

การออกแบบและพัฒนาเกราะป้องกันกระสุนสำหรับเสื้อเกราะกันกระสุนโดยใช้แผ่นโลหะ วัสดุผสม
เส้นใยคาร์บอน และฟิล์มเอ็กซเรย์ที่ใช้แล้ว



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีการป้องกันประเทศ ไม่สังกัดภาควิชา/เทียบเท่า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DESIGN AND DEVELOPMENT OF PROTECTIVE ARMOR FOR BULLETPROOF VEST USING
METAL PLATE, CARBON FIBER COMPOSITE AND REUSED X-RAY FILMS



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

Common Course

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

อัฐวุฒิ ผลาสินธุ์ : การออกแบบและพัฒนาเกราะป้องกันกระสุนสำหรับเสื้อเกราะกันกระสุนโดยใช้แผ่นโลหะ วัสดุผสมเส้นใยคาร์บอน และฟิล์มเอ็กซ์เรย์ที่ใช้แล้ว. (

DESIGN AND DEVELOPMENT OF PROTECTIVE ARMOR FOR BULLETPROOF VEST USING METAL PLATE, CARBON FIBER COMPOSITE AND REUSED X-RAY FILMS) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. ดร.นิพนธ์ วรรณโสภากย์, พ.อ. ผศ.ดร.ณัฐพร นุตยะสกุล

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและผลิตแผ่นเกราะกันกระสุนสำหรับเสื้อเกราะกันกระสุนที่ผลิตจากวัสดุผสมโดยทำมาจากแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) แผ่นเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber) และแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ที่ใช้แล้ว (X-ray Film) โดยวัสดุทั้ง 3 ชนิดยึดประสานกันด้วยกาวอีพอกซีเรซิน (Epoxy Resin) ทำการทดสอบยิงตามมาตรฐาน NIJ0101.04 ระดับ 2A ในงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาอิทธิพลการจัดเรียงของชั้นวัสดุ น้ำหนัก ศึกษาผลของความหนาของจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์และแผ่นเส้นใยคาร์บอนที่มีผลต่อการป้องกันการทะลุทะลวงของกระสุน วิเคราะห์ขนาดของความเสียหาย ความกว้างและความลึกของแผ่นเกราะอันเนื่องมาจากแรงปะทะของกระสุน การแตกหักบนเกราะกันกระสุนโดยเปรียบเทียบจากการทดสอบด้วยกระสุนจริงและวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ซึ่งจากผลการทดสอบแผ่นเกราะสามารถป้องกันกระสุนปืนขนาด 9 mm FMJ RN ที่ความเร็ว 341 m/s โดยมีน้ำหนักรวมของเกราะคือ 2 kg สามารถหยุดกระสุนที่ปะทะเข้ามาด้วยความเร็วสูงและทำลายหัวกระสุนให้แตกสลายได้ที่แผ่นแรกโดยไม่เกิดความเสียหายไปยังที่วัสดุแผ่นหลัง เมื่อพิจารณาค่า Back Face Signature (BFS) ซึ่งเป็นระยะยุบตัวของวัสดุแผ่นหลังเปรียบเทียบกับมาตรฐาน NIJ0101.04 ระดับ 2A สำหรับการทำเสื้อเกราะกันกระสุนพบว่ามีความหนาประมาณ 8.2 mm ซึ่งอยู่ในระดับมาตรฐาน (ระยะยุบตัวต้องไม่เกิน 44 mm) โดยชั้นงานของแผ่นเกราะที่ดีที่สุดคือชั้นงานที่ใช้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมจำนวน 1 แผ่น แผ่นเส้นใยคาร์บอนจำนวน 10 แผ่น และแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์จำนวน 20 แผ่น และเมื่อทำการวัดขนาดความเสียหายที่เกิดขึ้นโดยทำการวัดขนาดความกว้างหลุมปะทะ ในการทดสอบจริงและในการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งถือว่ามีความใกล้เคียงกันมากในเชิงปริมาณ เมื่อทำการวัดขนาดรอยยุบตัวของแผ่นเกราะด้านหน้า และเมื่อทำการวัดระยะยุบตัวของวัสดุแผ่นหลังของแผ่นเกราะ พบว่ามีความคลาดเคลื่อนเพียง 3%

สาขาวิชา	วิศวกรรมและเทคโนโลยีการป้องกัน	ลายมือชื่อนิสิต
	ประเทศ	
ปีการศึกษา	2561	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
		ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม
		ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5970469421 : MAJOR DEFENSE ENGINEERING AND TECHNOLOGY

KEYWORD: Bulletproof Vest, Armor Plate, Composite Material, Carbon-fibre Sheet, X-Ray Film

Attavut Plasin :

DESIGN AND DEVELOPMENT OF PROTECTIVE ARMOR FOR BULLETPROOF VEST USING METAL PLATE, CARBON FIBER COMPOSITE AND REUSED X-RAY FILMS. Advisor: Assoc.

Prof. Seksak Asavavisithchai, Ph.D. Co-advisor: Asst. Prof. Niphon Wansophark,

D.Eng.,Col. Asst. Prof. Nuthaporn Nuttayasakul, Ph.D.

The present research work aims to design and manufacture the ballistic armor plates for bulletproof vests, produced using composite materials as stainless steel plate, carbon fiber sheets and reused X-ray films. All three materials were bonded with epoxy resin. The armor plates were tested against NIJ-Type IIA threats, using NIJ 0101.04 ballistic test standard. The effects of the thicknesses of X-ray films and carbon fiber sheets, the weight of armor plates, and the arrangement of material layers on the penetration prevention of ammunition have been studied through the analysis of damage characteristics on the armor plates. The results of the width and depth on damaged armor surface, and the fracture of armor plates, due to the impact of ammunition, were comparatively examined with the real ammunition and finite element method. It was found that the armor, with the total weight of 2 kg, can resist against the 9 mm FMJ RN projectile at a speed of 341 m/s. It can stop the high-speed shells and fracture the bullets at the front SS plate, without damage to the rear plates. The back face signature (BFS), which is the collapsing depth of the rear plate materials, compared to the NIJ0101.04 standard, level 2A for making bulletproof vests, was approximately 8.2 mm, within the standard level. (the collapsed distance must not exceed 44 mm). In the present study, it was found that the best armor plate condition composed of a stainless steel plate, carbon fiber films of 10 sheets and X-ray film of 20 sheets. The measurement of damage width on the front plate showed very similar results in the actual test and in the simulation, using finite element method. The measurement of the collapse of the front and rear plate also yielded similar results with only 3% error.

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

Academic Year: 2018 Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จและเกิดขึ้นได้ต้องขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย อาจารย์ที่ปรึกษาหลักวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำในด้านการทำวิจัยและการเขียนวิทยานิพนธ์ ให้ความรู้ทางด้านโลหะวิทยา อีกทั้งสละเวลาในการตรวจทานวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ รวมถึง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิพนธ์ วรรณโสภาคย์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำในด้านการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาด้วยดีโดยตลอด รวมถึง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พันเอก ดร. ณัฐพร นุตยะสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมจากโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ที่ให้ความกรุณาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมและให้ความรู้เกี่ยวกับสื่อเกราะกันกระสุน

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการทุกท่านที่สละเวลาในการเดินทางมาเป็นกรรมการและให้ความอนุเคราะห์ในการตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ประจำหลักสูตร คุณธนภฤต สิ้นเปรม ที่ช่วยประสานงานและให้คำปรึกษาทางการเรียนตลอดมา

ขอขอบพระคุณกองสรรพาวุธตำรวจ สำนักงานตำรวจแห่งชาติ ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านสถานที่และอุปกรณ์ในการทดสอบยิง

ขอขอบคุณนางสาวปิยะนุช กุลเสน ที่ช่วยดำเนินการต่างๆ ให้งานวิจัยสำเร็จจุล่งไปได้ด้วยดี
หวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจศึกษางานวิจัยด้านสื่อเกราะกันกระสุนไม่มากนักน้อย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

อัฐวุฒิ ผลาสินธุ์

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการ และมูลเหตุจูงใจ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ความเป็นมาของสื่อเกราะกันกระสุนและมาตรฐานการทดสอบโดยสถาบัน NIJ.....	4
2.2 ทฤษฎีการชนและการเคลื่อนที่ของวัตถุ.....	13
2.3 วัสดุผสม (Composite Materials).....	25
2.4 ฟิล์มเอ็กซเรย์ (X- Ray Film).....	30
2.5 เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel).....	33
2.6 เส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber).....	37
2.7 อีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resins).....	39

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	42
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย	49
3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย	49
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	49
3.3 การสร้างเกราะกันกระสุนและเครื่องมือทดสอบชิ้นงาน.....	50
3.4 รูปแบบชิ้นงานทดสอบ.....	52
3.5 การตรวจสอบโครงสร้างชิ้นงานเกราะ.....	54
3.6 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน.....	54
3.7 การทดสอบยิงตามมาตรฐาน NIJ Standard 0101.04.....	55
3.8 ขั้นตอนการทดสอบการยิง	57
3.9 ศึกษาวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	58
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	63
4.1 ผลการทดสอบลักษณะทางกายภาพของวัสดุ.....	63
4.2 ผลการทดสอบการเจาะทะลุของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304	69
4.3 การตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพของชิ้นงานเกราะก่อนทำการทดสอบยิง	70
4.4 ผลการทดสอบยิงด้วยกระสุนจริงขนาด 9 mm จำนวน 5 นัด ตามมาตรฐาน NIJ0101.04..	71
4.5 ผลของการยิงทดสอบแผ่นเกราะรูปแบบ B6 (S1-C10-X20) ตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 2A	87
4.6 ผลการจำลองความเสียหายของแผ่นเกราะโดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	90
บทที่ 5 วิจัยผลการวิจัย	100
5.1 ผลของการใช้วัสดุผสมในแผ่นเกราะป้องกันกระสุน.....	100
5.2 ผลของการจัดเรียงวัสดุในแผ่นเกราะป้องกันกระสุน.....	102
5.3 ผลของความหนาของวัสดุในแผ่นเกราะป้องกันกระสุน	105
5.4 ผลของการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับทดสอบยิงจริง.....	106

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย.....	107
6.1 บทสรุปงานวิจัย.....	107
6.2 ปัญหาที่เกิดขึ้น.....	108
6.3 ข้อเสนอแนะ.....	108
บรรณานุกรม.....	109
ภาคผนวก.....	114
ประวัติผู้เขียน.....	138



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงการจำแนกระดับของการยิงทดสอบ ตามมาตรฐาน NIJ0101.04 [11].....	11
ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมแต่ละชนิด[28]	35
ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L และ 304[29]	36
ตารางที่ 2.4 ตารางแสดงคุณสมบัติทางกลที่อุณหภูมิห้องของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L และ 304 [29].....	36
ตารางที่ 2.5 ตารางแสดงการเปรียบเทียบสมบัติทางกลของเส้นใยคาร์บอน และเหล็กกล้าในน้ำหนักที่เท่ากัน [31].....	39
ตารางที่ 2.6 ตารางแสดงการการจัดเรียงชั้นของวัสดุตามลำดับความหนา[40].....	45
ตารางที่ 2.7 ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยแรงดึงของชิ้นงานทั้ง 4 รูปแบบ[40]	46
ตารางที่ 3.1 แสดงการจัดเรียงวัสดุของและน้ำหนักของรูปแบบชิ้นงาน แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม – แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ – แผ่นเส้นใยคาร์บอน	53
ตารางที่ 3.2 แสดงการจัดเรียงวัสดุของและน้ำหนักของรูปแบบชิ้นงาน แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม – แผ่นเส้นใยคาร์บอน– แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์.....	53
ตารางที่ 4.1 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304	64
ตารางที่ 4.2 แสดงสมบัติทางกลของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304.....	64
ตารางที่ 4.3 แสดงสมบัติทางกลของแผ่นเส้นใยคาร์บอน.....	65
ตารางที่ 4.4 แสดงสมบัติทางกลของแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์	67
ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงสมบัติจำเพาะของวัสดุต่อ 1 แผ่น (ขนาดชิ้นงาน 30.5 cm x 30.5 cm)...	70
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบยิงกระสุนกันกระสุนรูปแบบชิ้นงานแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม - แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ – แผ่นเส้นใยคาร์บอน	71

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบด้วยกระสุนจริง ขนาด 9 mm จำนวน 5 นัด ที่ความเร็วเฉลี่ย 350 m/s รูปแบบชิ้นงาน แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม-แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์-แผ่นเส้นใยคาร์บอน รหัสชิ้นงาน A1 (S1 - X10 - C0), A4 (S1 - X20 - C0), A7 (S1 - X30 - C0).....	72
ตารางที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบด้วยกระสุนจริงขนาด 9 mm จำนวน 5 นัด ที่ความเร็วเฉลี่ย 350 m/s รูปแบบชิ้นงาน แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม-แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์-แผ่นเส้นใยคาร์บอน รหัสชิ้นงาน A2 (S1 - X10 - C5), A5 (S1 - X20 - C5), A8 (S1 - X30 - C5).....	73
ตารางที่ 4.9 แสดงผลการทดสอบด้วยกระสุนจริงขนาด 9 mm จำนวน 5 นัด ที่ความเร็วเฉลี่ย 350 m/s รูปแบบชิ้นงาน แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม-แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์-แผ่นเส้นใยคาร์บอน รหัสชิ้นงาน A3 (S1 - X10 - C10), A6 (S1 - X20 - C10), A9 (S1 - X30 - C10).....	74
ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบยิงเกราะกันกระสุนรูปแบบชิ้นงานแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม-แผ่นเส้นใยคาร์บอน-แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์	78
ตารางที่ 4.11 แสดงผลการทดสอบด้วยกระสุนจริงขนาด 9 mm จำนวน 5 นัด ที่ความเร็วเฉลี่ย 350 m/s รูปแบบชิ้นงาน แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม- แผ่นเส้นใยคาร์บอน - แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ รหัสชิ้นงาน B1 (S1- C0- X10), B4 (S1- C0- X20), B7 (S1- C0- X30)	79
ตารางที่ 4.12 แสดงผลการทดสอบด้วยกระสุนจริงขนาด 9 mm จำนวน 5 นัด ที่ความเร็วเฉลี่ย 350 m/s รูปแบบชิ้นงาน แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม- แผ่นเส้นใยคาร์บอน-แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ รหัสชิ้นงาน B2 (S1- C5- X10) , B5 (S1- C5- X20) , B8 (S1- C5- X30).....	80
ตารางที่ 4.13 แสดงผลการทดสอบด้วยกระสุนจริงขนาด 9 mm จำนวน 5 นัด ที่ความเร็วเฉลี่ย 350 m/s รูปแบบชิ้นงาน แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม-แผ่นเส้นใยคาร์บอน-แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ รหัสชิ้นงาน B3 (S1- C10- X10), B6 (S1- C10- X20), B9 (S1- C10- X30).....	81
ตารางที่ 4.14 แสดงผลการทดสอบด้วยกระสุนจริง ขนาด 9 mm และกระสุน .357 ที่ความเร็วเฉลี่ย 380 m/s รูปแบบ B6/1 และ B6/2	85
ตารางที่ 4.15 ภาพแสดงผลการทดสอบด้วยกระสุนจริง ขนาด 9 mm และกระสุน .357 ที่ความเร็วเฉลี่ย 380 m/s รูปแบบ B6/1	86
ตารางที่ 4.16 แสดงผลการทดสอบด้วยกระสุนจริง ขนาด 9 mm และกระสุน .357 ที่ความเร็วเฉลี่ย 380 m/s รูปแบบ B6/2	86

ตารางที่ 4.17 แสดงผลการทดสอบด้วยกระสุน .357 Mag JSP และกระสุน 9 mm ชนิดละ 3 นัด
รูปแบบชิ้นงาน B6 (S1 – C10 – X20)..... 87

ตารางที่ 4.18 แสดงความเสียหายของแผ่นเกราะที่เกิดขึ้นที่เวลาต่างๆ ของแผ่นเกราะรูปแบบ B6
(S1-C10-X20)..... 91

ตารางที่ 4.19 แสดงขนาดความเสียหายของแผ่นเกราะจากการทดสอบจริงเปรียบเทียบกับ
จำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 93

ตารางที่ 4.20 แสดงภาพขนาดความเสียหายของแผ่นเกราะด้วยวิธีการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์
เปรียบเทียบกับความเสียหายที่เกิดจากการทดสอบจริง..... 94

ตารางที่ 4.21 แสดงภาพความเสียหายของแผ่นเกราะด้วยวิธีการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ของ
เกราะรูปแบบ S1 – C10 – X20 , S1 – C8 – X20 และ S1 – C6 – X20 97



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 หมวกโลหะของนักรบกรีกที่ไม่ได้ป้องกันส่วนของใบหน้า [1].....	4
รูปที่ 2.2 ชุดเกราะของอัศวินในสมัยโบราณ [2]	5
รูปที่ 2.3 เส้นใยอะรามิด [5].....	6
รูปที่ 2.4 วัสดุ Kevlar ที่นำมาทำเสื้อเกราะกันกระสุน [9].....	7
รูปที่ 2.5 ภาพจำลองการกระจายพลังงานในลูกกระสุนของเสื้อเกราะแบบอ่อน [10]	8
รูปที่ 2.6 ภาพแสดงการยุบตัวของเสื้อเกราะกันกระสุน[10]	9
รูปที่ 2.7 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบตามมาตรฐาน NIJ - 0101.04 [11].....	12
รูปที่ 2.8 ภาพแสดงการชนกันแบบยืดหยุ่นระหว่างวัตถุ 2 ชิ้นใน 1 มิติ (a) ก่อนชน (b) หลังชน [14].....	15
รูปที่ 2.9 ภาพแสดงการชนกันแบบไม่ยืดหยุ่นสมบูรณ์ระหว่างวัตถุ 2 ชิ้นใน 1 มิติ.....	16
รูปที่ 2.10 ภาพแสดงระยระอยลึกของวัสดุเป้าหมายที่ปะทะด้วยกระสุนความเร็วสูง [12]	17
รูปที่ 2.11 ภาพตัวอย่างการนำซอฟต์แวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์มาวิเคราะห์ความเสียหายของชิ้นงานเกราะใสสำหรับกันกระสุน[16].....	20
รูปที่ 2.12 ตัวอย่างเมชสำหรับโดเมนในหนึ่งมิติและสองมิติด้วยการใช้เอลิเมนต์ที่ต่างกัน[17]	21
รูปที่ 2.13 ภาพแสดงเอลิเมนต์ใน 1 มิติ ได้แก่ Rod Element , Beam Element , Bar Element[18].....	22
รูปที่ 2.14 ภาพแสดงเอลิเมนต์ใน 2 มิติ ได้แก่ Plane Stress Element , Plane Strain Element , Shell Element [18]	23
รูปที่ 2.15 ภาพแสดงเอลิเมนต์ใน 3 มิติ ได้แก่ Solid Element [18]	24
รูปที่ 2.16 ภาพแสดงลักษณะต่างๆของเฟสที่กระจายตัวอยู่ที่ส่งผลต่อสมบัติสุดท้ายของวัสดุผสม[19]	25

รูปที่ 2.17 ภาพแสดงการจำแนกของวัสดุเชิงประกอบตามชนิดของ Matrix และลักษณะของตัวเสริมแรง[20].....	26
รูปที่ 2.18 ภาพแสดงการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของเส้นใยคาร์บอนในเนื้อพีนีอีพอกซีเรซิน[21]	27
รูปที่ 2.19 ภาพแสดงรอยแตกหักวัสดุผสมที่มีโลหะทองแดงเป็นเฟสเนื้อพื้นและมีซิลิกอน คาร์ไบด์เป็นเฟสเสริมแรง[22]	28
รูปที่ 2.20 ภาพแสดงรอยแตกหักของวัสดุผสมที่มีเฟสเนื้อพื้นเป็นเซรามิกและมีซิลิกอนคาร์ไบด์เป็นเฟสเสริมแรง[23].....	29
รูปที่ 2.21 ภาพแสดงภาพตัดขวางของฟิล์มเอ็กซ์เรย์ชนิดอิมัลชันสองด้าน (Double Emulsion X – Ray Film) [25]	31
รูปที่ 2.22 ภาพแสดงภาพตัดขวางของฟิล์มเอ็กซ์เรย์ชนิดอิมัลชันด้านเดียว (Single Emulsion X – Ray Film) [25].....	32
รูปที่ 2.23 แผนภาพแสดงผลของการเติม Cr ลงในเหล็กต่อสมบัติเคมีไฟฟ้าของเหล็กผสมโครเมียม [26].....	33
รูปที่ 2.24 ภาพแสดงความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของเหล็กกล้าไร้สนิมแต่ละประเภท [27]	35
รูปที่ 2.25 ภาพแสดงการเปรียบเทียบขนาดของเส้นผมมนุษย์กับเส้นใยคาร์บอน[31]	37
รูปที่ 2.26 ภาพแสดงโครงสร้างทางเคมีของ Polyacrylonitrile[33].....	37
รูปที่ 2.27 ภาพแสดงผ้าเส้นใยคาร์บอนที่พร้อมสำหรับใช้งาน[34]	38
รูปที่ 2.28 ภาพแสดงโครงสร้างทางเคมีของ Epoxy[36].....	40
รูปที่ 2.29 ภาพแสดงแบบจำลองของกระสุนที่ทำลายแผ่นปะทะของเกราะคอมโพสิตแต่ไม่เกิดความเสียหายที่แผ่นหลัง[37]	42
รูปที่ 2.30 ภาพแสดงค่าพลังงานจลน์ที่ลดลงเป็นผลมาจากการดูดซับพลังงานของชุดเกราะคอมโพสิต[37].....	42
รูปที่ 2.31 ภาพเปรียบเทียบความเร็วของกระสุนทะลุทลวงชิ้นงานเมื่อเวลาผ่านไป[38]	43
รูปที่ 2.32 ภาพแสดงรอยแตกบนชิ้นงานหลังจากยิงทดสอบซึ่งมีลักษณะแผ่ขยายเป็นรูปทรงกรวย [38].....	44

รูปที่ 2.33 รูปแสดงระบบชุดเกราะคอมโพสิตที่ใช้ในการทดสอบยิง และภาพกระสุนที่ใช้ในการทดสอบยิงกระสุน 7.62 x 51 มม. M80 และ 7.62x63 มม. M2 AP[39].....	44
รูปที่ 2.34 ภาพแสดงพื้นที่ความเสียหายของชิ้นงานหลังจากทดสอบยิง ที่เกิดขึ้นบนชั้นเซรามิก ซึ่งเป็นชั้นที่หยุดการทะลุทะลวงของกระสุน และอนุภาคทรงกลมที่ได้รับแรงกดอัดในชั้นโพลีเอทิลีนคอมโพสิต (CMF)[39].....	45
รูปที่ 2.35 กราฟแสดง Tensile stress และ Tensile strain ของชิ้นงานทั้ง 4 รูปแบบ[40].....	46
รูปที่ 2.36 ภาพแสดงชิ้นงานเสื้อเกราะพระเจ้าตากที่ใช้วัสดุฟิล์มเอ็กซีเรย์ในทางการแพทย์ มาทดสอบ[42]	47
รูปที่ 2.37 ภาพแสดงชิ้นงานเสื้อเกราะบางระจันหลังจากการทดสอบยิง [44].....	48
รูปที่ 3.1 ภาพแสดงแม่พิมพ์สำหรับทำชิ้นงานขนาด 30.5 cm x 30.5 cm.....	49
รูปที่ 3.2 ภาพแสดงโครงสร้างชิ้นงานเกราะกันกระสุน ขนาด 30.5 cm x 30.5 cm	51
รูปที่ 3.3 ภาพแสดงอาวุธปืนทดสอบ.....	55
รูปที่ 3.4 ภาพแสดงกระสุนสำหรับทดสอบ.....	56
รูปที่ 3.5 ภาพแสดงเครื่องวัดความเร็วกระสุน	56
รูปที่ 3.6 ภาพแสดงอุปกรณ์ยึดจับชิ้นงานและกระเบดิน.....	57
รูปที่ 3.7 Hydrocodes จากสนามความเครียด ซึ่งแสดงในรูปแบบของเมทริกซ์	60
รูปที่ 3.8 ภาพการจำลองแผ่นเกราะกันกระสุนและกระสุนโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	61
รูปที่ 3.9 ภาพการสร้างเมชของชิ้นงานแผ่นเกราะกันกระสุนและกระสุนในโปรแกรม ANSYS.....	62
รูปที่ 4.1 แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 30.5 cm X 30.5 cm.....	63
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลการทดสอบแรงดึงของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304	64
รูปที่ 4.3 แผ่นวัสดุเส้นใยคาร์บอนขนาด 30.5 cm X 30.5 cm	65
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงผลการทดสอบแรงดึงของแผ่นเส้นใยคาร์บอน	66
รูปที่ 4.5 แผ่นฟิล์มเอ็กซีเรย์ 30.5 cm x 30.5 cm	67
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลการทดสอบแรงดึงของแผ่นฟิล์มเอ็กซีเรย์.....	67

รูปที่ 4.7 กราฟแสดงผลการทดสอบแรงดึงเปรียบเทียบระหว่างวัสดุ 3 ชนิด	68
รูปที่ 4.8 ภาพแสดงหัวกดที่จำลองหัวกระสุนขนาด 9 mm.....	69
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงผลการทดสอบการเจาะทะลุของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304.....	69
รูปที่ 4.10 แสดงภาพด้านข้างของชิ้นงานเกราะที่ผลิตจาก แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม จำนวน 1 แผ่น แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์จำนวน 30 แผ่น และแผ่นเส้นใยคาร์บอนจำนวน 10 แผ่น ตามลำดับ.....	70
รูปที่ 4.11 แสดงผลของจำนวนแผ่นเส้นใยคาร์บอนต่อขนาดความกว้างของหลุมบนแผ่นปะทะ	75
รูปที่ 4.12 แสดงผลของจำนวนแผ่นเส้นใยคาร์บอนต่อผลขนาดความลึกของชิ้นงานเกราะ.....	76
รูปที่ 4.13 แสดงผลของจำนวนแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ต่อขนาดความกว้างของหลุมบนแผ่นปะทะ.....	77
รูปที่ 4.14 แสดงผลของจำนวนแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ต่อขนาดความลึกของชิ้นงานเกราะ.....	77
รูปที่ 4.15 แสดงผลของจำนวนแผ่นเส้นใยคาร์บอนต่อขนาดความกว้างของหลุมบนแผ่นปะทะ	82
รูปที่ 4.16 แสดงผลของจำนวนแผ่นเส้นใยคาร์บอนที่มีผลขนาดความลึกของชิ้นงานเกราะ	83
รูปที่ 4.17 แสดงผลของจำนวนแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ที่มีผลต่อขนาดความกว้างของหลุมบนแผ่นปะทะ.....	84
รูปที่ 4.18 แสดงผลของจำนวนแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ที่มีผลขนาดความลึกของชิ้นงานเกราะ.....	84
รูปที่ 4.19 แสดงความเสียหายของกระสุนหลังจากการทดสอบยิง.....	87
รูปที่ 4.20 แสดงผลการยิงทดสอบที่ออกให้โดยกองสรรพาวุธตำรวจสำนักงานตำรวจแห่งชาติ	88
รูปที่ 4.21 แสดงผลการยิงทดสอบที่ออกให้โดยกองสรรพาวุธตำรวจ สำนักงานตำรวจแห่งชาติ	89
รูปที่ 4.22 แบบจำลอง 3 มิติของชิ้นงานเกราะรูปแบบ B6 ภายหลังจากการยิง	92
รูปที่ 4.23 การเปรียบเทียบผลของการลดจำนวนชั้นของแผ่นเส้นใยคาร์บอนที่มีผลต่อความเสียหาย ของแผ่นเกราะรูปแบบ S1 – C10 – X20, S1 – C8 – X20 และ S1 – C6 – X20	98
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความเร็วของกระสุนที่พุ่งเข้าไปยังชิ้นงานแผ่นเกราะกันกระสุน รูปแบบ S1 – C10 – X20, S1 – C8 – X20 และ S1 – C6 – X20 เมื่อเวลาผ่านไป.....	99

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการ และมูลเหตุจูงใจ

จากเหตุการณ์ในปัจจุบันไม่ว่าจะเป็นการก่อการจลาจลในประเทศโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ปัญหาความขัดแย้งในสามจังหวัดชายแดนภาคใต้ ทำให้ตำรวจ ทหารและผู้ที่เกี่ยวข้องมีความ จำเป็นอย่างยิ่งในการใช้เสื้อเกราะกันกระสุนในการปฏิบัติหน้าที่ เพื่อช่วยลดอันตรายจากกระสุน ปืนและอาวุธของมีคมที่จะมาทำร้ายบริเวณลำตัวของผู้สวมใส่ อย่างไรก็ตามเสื้อเกราะกันกระสุนที่ ใช้กันอยู่ในปัจจุบันในประเทศไทยยังต้องมีการสั่งนำเข้ามาจากต่างประเทศ ซึ่งมีราคาสูง อีกทั้ง เสื้อเกราะที่ใช้กันกระสุนโดยทั่วไปเกิดความไม่เพียงพอต่อความต้องการ จึงมีใช้เฉพาะนายทหาร หรือนายตำรวจชั้นสัญญาบัตร และอายุการใช้สั้น ด้วยเหตุผลนี้เองจึงเห็นความสำคัญในการผลิต และพัฒนาเกราะกันกระสุนแบบใหม่ที่สามารถป้องกันกระสุนได้ตรงตามมาตรฐาน น้ำหนักเบา สามารถผลิตใช้ขึ้นเองได้ในประเทศ และช่วยลดค่าใช้จ่ายในการนำเข้าเสื้อเกราะกันกระสุน

การเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมกับการออกแบบเกราะกันกระสุนที่นั้นมีความสำคัญยิ่งที่จะ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกันกระสุนให้มากขึ้น โดยทั่วไปเสื้อเกราะกันกระสุนที่ใช้กันในปัจจุบัน ประกอบไปด้วย 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 คือเปลือกด้านนอก (Outside shell carrier) เป็นส่วนที่ใช้ รับแรงปะทะจากกระสุนที่ยิงเข้ามา โดยทั่วไปนิยมใช้แผ่นเหล็กหรือเซรามิกเพื่อเพิ่มความสามารถ ในการรับแรงกระแทก ส่วนที่ 2 คือ ส่วนยึดรั้ง (Fastening system) ใช้สำหรับยึดเสื้อเกราะกับ ร่างกายเพื่อให้เกิดความกระชับ ส่วนที่ 3 แผ่นรับแรงกระแทก (Ballistic panel) ลักษณะเป็น สีเหลืองหรือโค้งตามรูปเสื้อ นิยมผลิตจากเส้นใยสังเคราะห์ เมื่อถูกแรงกระแทกจะเกิดการยืดตัว ช่วยดูดซับพลังงานเพื่อลดความเร็วของกระสุนที่ยิงเข้ามา^[1] งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อผลิต เกราะกันกระสุนจากวัสดุผสมที่มีแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ ซึ่งมีจุดเด่นในเรื่องความเหนียว ความยืดหยุ่น น้ำหนักเบา โดยทำการประสานยึดติดกับแผ่นโลหะ กับแผ่นเส้นใยคาร์บอนด้วยอีพอกซีเรซิน (Epoxy resin) รวมถึงศึกษาอิทธิพลของจำนวนแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ที่มีผลต่อการป้องกันการทะลุ

ทะลวงของกระสุน การศึกษาและวิเคราะห์เกราะกันกระสุนเพื่อใช้งานจริงจะต้องคำนึงถึงการเพิ่มจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ น้ำหนัก ต้นทุน รวมถึงกระบวนการผลิต และรายละเอียดในการยิงทดสอบ ด้วยเหตุนี้ การนำวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งเป็นการสร้างแบบจำลองของเกราะกันกระสุนมาทำการวิเคราะห์ร่วมไปกับการออกแบบจัดเรียงเพิ่มจำนวนชั้นของฟิล์มเอ็กซ์เรย์ในเสื้อเกราะกันกระสุน จะช่วยทำนายความสามารถในการกันกระสุนก่อนที่จะผลิตขึ้นงานจริง นับเป็นการลดต้นทุนในเรื่องของเวลาวัสดุที่เสียเปล่าจากการยิงทดสอบ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- เพื่อออกแบบและผลิตเกราะกันกระสุนที่ผลิตจากวัสดุผสม (Composite) ที่ทำมาจากแผ่นโลหะ แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ (X-ray Film) และแผ่นเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber)
- เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการสนับสนุนการป้องกันกระสุนของวัสดุผสม ศึกษาอิทธิพลของการจัดเรียงชั้นของวัสดุ ความหนา น้ำหนัก ที่มีผลต่อการดูดซับพลังงานของกระสุนปืน
- เพื่อศึกษาวิเคราะห์ค่าพลังงานจลน์และการแตกหักบนเกราะกันกระสุน โดยเปรียบเทียบจากการทดสอบด้วยกระสุนจริงและวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- พัฒนาและผลิตเกราะกันกระสุนที่มีความสามารถกันกระสุนระดับ 2A ที่มีความแข็งแรงและน้ำหนักเบาตามมาตรฐาน NIJ0101.04 ซึ่งใช้กระสุน 9 มม. FMJ RN ที่ความเร็ว 341 เมตร/วินาที (1,120 ฟุต/วินาที)
- ใช้วัสดุแผ่นเหล็กโลหะ แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ (X-ray Film) และวัสดุแผ่นเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber) มาประกอบเป็นวัสดุผสม (Composite) สำหรับป้องกันกระสุน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ด้านความมั่นคงของประเทศชาติ: ลดความเสี่ยงที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตแก่เจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติหน้าที่ในพื้นที่เสี่ยงอันตราย
- ด้านยุทธศาสตร์เชิงพาณิชย์: สามารถผลิตสื่อเกราะกันกระสุนที่ได้จากวัสดุเหลือใช้ ทำให้ปรับลดต้นทุนการผลิต เพื่อให้ได้สอดคล้องกับความต้องการอย่างเหมาะสม
- ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี: เสริมสร้างองค์ความรู้ในการผลิตและพัฒนาวัสดุผสมระหว่างแผ่นโลหะ แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์และแผ่นเส้นใยคาร์บอน เพื่อใช้ในการผลิตสื่อเกราะกันกระสุน

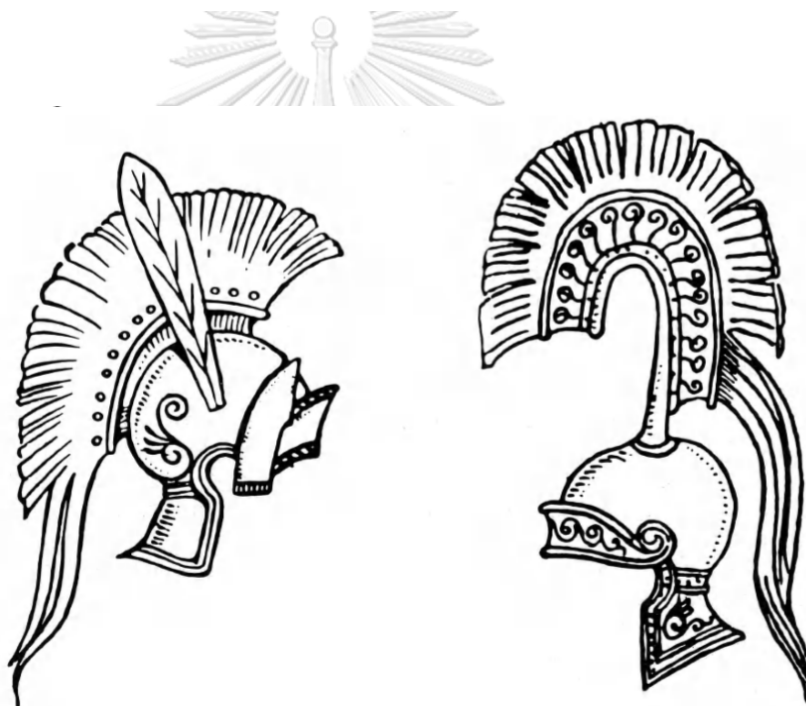


บทที่ 2

ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความเป็นมาของเสื้อเกราะกันกระสุนและมาตรฐานการทดสอบโดยสถาบัน NIJ

2.1.1 เสื้อเกราะกันกระสุน ในสมัยโบราณมนุษย์ได้รู้จักนำหนังสัตว์หรือขนสัตว์มาเป็นเครื่องนุ่งห่มร่างกายสำหรับปกป้องสภาพอากาศที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ แต่ต่อมาได้พัฒนารูปแบบเพื่อใช้สำหรับการต่อสู้ จึงมีการทำเป็นอาวุธ หมวก โล่และเสื้อเกราะที่ทำจากโลหะสัมฤทธิ์ (Bronze) ดังรูปที่ 2.1 เป็นเครื่องแบบในการออกรบของอัศวินในสมัยโบราณ ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งสามารถป้องกันอันตรายจากของมีคมให้กับผู้สวมใส่ในขณะที่ทำการออกรบ



รูปที่ 2.1 หมวกโลหะของนักรบกรีกที่ไม่ได้ป้องกันส่วนของใบหน้า [1]



รูปที่ 2.2 ชุดเกราะของอัศวินในสมัยโบราณ [2]

เมื่อโลกเปลี่ยนแปลงเข้าสู่ยุคปฏิวัติอุตสาหกรรม วิวัฒนาการด้านการผลิตอาวุธปืน และกระสุนปืนได้พัฒนามากขึ้น เสื้อเกราะจึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้ทันต่อภัยคุกคามทางการรบในสมัยนั้นและไม่ได้ป้องกันอันตรายจากอาวุธที่มาจกของมีคมเพียงอย่างเดียว แต่จะต้องป้องกันอันตรายจากกระสุนปืนและสะเก็ดระเบิดด้วย มีหลักฐานบันทึกไว้ว่าเสื้อเกราะอ่อนได้ถูกใช้เป็นครั้งแรกโดยชาวญี่ปุ่นในยุคกลาง เป็นเสื้อเกราะที่ทำจากผ้าไหมแต่ผลจากการศึกษาพบว่าเสื้อเกราะผ้าไหมนั้นสามารถกันได้แต่กระสุนที่มีความเร็วต่ำ (400 ฟุต/วินาทีหรือน้อยกว่า) โดยที่ไม่สามารถกันกระสุนปืนสมัยใหม่ที่มีความเร็วเกินกว่า 600 ฟุต/วินาทีได้ดังนั้นเมื่อเทียบกับค่าใช้จ่ายในการผลิตแล้วเสื้อเกราะผ้าไหมมีราคาสูงถึงตัวละ 800 ดอลลาร์สหรัฐ(เทียบกับค่าของเงินใน ค.ศ. 1998 เท่ากับ 1,400 ดอลลาร์สหรัฐ)ทำให้ไม่เป็นที่ยอมรับ[3]

ปัจจุบันได้นำวัสดุประเภทใยสังเคราะห์มาผลิตแผ่นรับแรงกระแทกเพิ่มมากขึ้นเพราะมีน้ำหนักเบาและมีความแข็งแรงมากกว่าโลหะ วัสดุที่ใช้คือ เส้นใยอะรามิด (Aramid fiber) ดังรูปที่ 2.3 เป็นเส้นใยประเภทอะลิเอไมด์หรือไนลอน มีความความแข็งแรงและแข็งแรงสูง สามารถคงรูปได้ดี ทนอุณหภูมิสูงถึง 370 องศาเซลเซียสหรืออาจจะเป็นเส้นใยโพลีเอทิลีนชนิดความแข็งแรงสูงยิ่งยวด (Ultra High Strength Polyethylene Fiber) เป็นเส้นใยโพลีเอทิลีนซึ่งกระบวนการผลิตจะใช้เทคนิคพิเศษ ทำให้มีความแข็งแรง แข็งแรงน้ำหนักเบาและราคาถูกกว่าเส้นใยอะรามิดแต่อุณหภูมิที่ใช้งานต่ำกว่าเสื้อเกราะกันกระสุน (Ballistic vest)[4]



รูปที่ 2.3 เส้นใยอะรามิด [5]

ดิวปองต์ (DuPont) ได้พัฒนาเส้นใยอะรามิดมาเป็นระยะเวลานานกว่า 25 ปีแล้ว โดยในปี 1965 ได้พัฒนาเส้นใย เคปลา (Kevlar) ซึ่งเรียกได้ว่าเป็นวัสดุชนิดแรก ที่ใช้สำหรับทำเส้นใยอะรามิดรุ่นใหม่ เส้นใยเคปลาเป็นเส้นใยสังเคราะห์ที่มีคุณสมบัติ แข็งแรง น้ำหนักเบา ทนทานต่อสารเคมี การฉีกขาด และเปลวไฟ ไม่หลอมละลาย หรืออ่อนตัว รวมทั้งไม่ดูดซับน้ำอีกด้วย [6] เส้นใยเคปลา รุ่นแรก เรียกว่า เคปลา 29 ผลิตขึ้นในช่วงต้นปี 70 ต่อมาได้มีการพัฒนาเส้นใยเคปลา รุ่นที่ 2 เรียกว่า เคปลา 129 ออกมาในปี 1988 ซึ่งใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน เนื่องจากมีความแข็งแรงกว่าเดิมถึง 15 % น้ำหนักเบาขึ้น 15 % บางและนุ่มขึ้น 20 % นอกจากนี้ เมื่อเร็ว ๆ นี้ ในปี 1996 ดิวปองต์ยังได้ พัฒนาเส้นใยเคปลา รุ่นล่าสุดออกมา ได้แก่ เคปลาโปรเตรา (Kevlar Protera) ซึ่งดิวปองต์กล่าวว่า เป็นเนื้อผ้าที่มีน้ำหนักเบา และยืดหยุ่นกว่าเดิม รวมทั้งยังกันกระสุนได้ดียิ่งขึ้น เนื่องมาจากการพัฒนากระบวนการปั่นของเส้นใย ทำให้โครงสร้างโมเลกุลของเส้นใย มีความแข็งแรงสามารถดูดซับพลังงานได้ดียิ่งขึ้น [6] ดังรูปที่ 2.4 [7, 8]



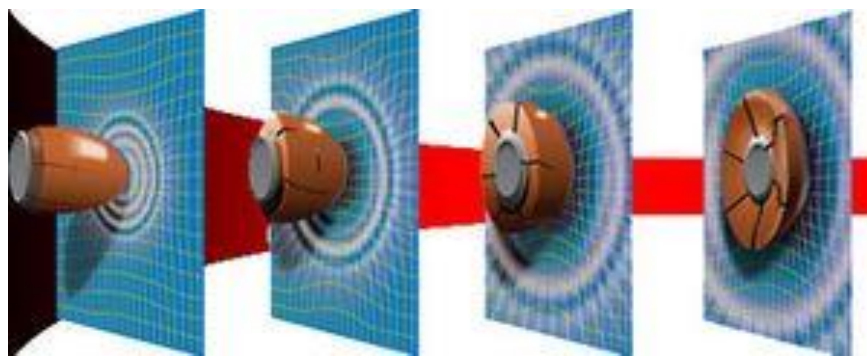
รูปที่ 2.4 วัสดุ Kevlar ที่นำมาทำเสื้อเกราะกันกระสุน [9]

อัลลิคติกแนล (Allied Signal) ได้ผลิตเส้นใยสเปคตรา (Spectra) ขึ้นซึ่งเป็นเส้นใยโพลีเอทิลีนที่มีความแข็งแรงสูง ได้จากการนำเส้นใยโพลีเอทิลีน ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ไปละลายในสารละลายชนิดหนึ่ง แล้วนำมาทำให้เย็นลง จะได้เส้นใยที่มีลักษณะคล้ายเจล นำมาทำเป็นส่วนประกอบของโล่ โดยนำเส้นใยสองชั้นมาสาน ทำมุมกัน 90 องศา แล้วตึงด้วยเรซินปิดทับทั้งสองด้าน ด้วยโพลีเอทิลีนบางๆ 2 แผ่น อัลลิคติกแนล กล่าวว่า เส้นใยแบบนี้มีความแข็งแรงและน้ำหนักเบาอย่างไม่น่าเชื่อ รวมทั้งยังสามารถกันกระสุนได้อย่างยอดเยี่ยมอีกด้วย[6]

อักโซ โนเบล (Akzo Nobel) ได้พัฒนาเส้นใย อะรามิดขึ้นได้เป็นเส้นใย “ทวารอน”(Twaron) ใช้ในการทำเสื้อเกราะ เส้นใยชนิดนี้เกิดจากเส้นใยละเอียดกว่า 1,000 เส้น ทำหน้าที่เหมือนกับฟองน้ำดูดซับแรงกระแทกของกระสุน และผลัดกระจายพลังงานไปตามเส้นใยอย่างรวดเร็ว มีน้ำหนักเบา สวมใส่สบาย และมีความยืดหยุ่นสูงอีกด้วย[6]

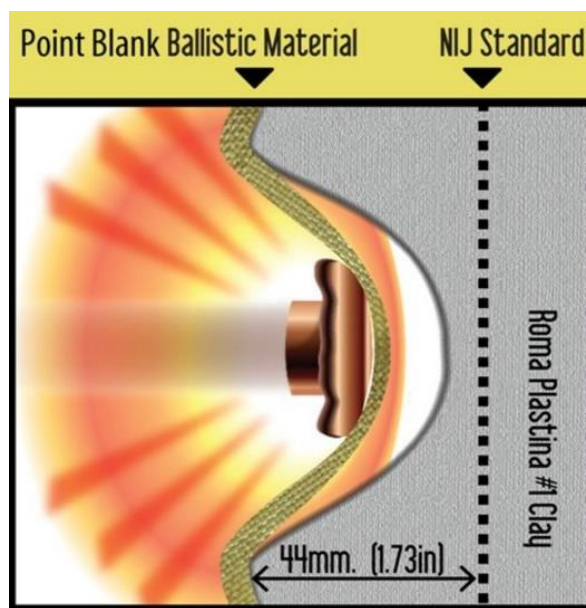
เสื้อเกราะกันกระสุนที่ผลิตจากวัสดุสังเคราะห์เหล่านี้จัดเป็นเสื้อเกราะกันกระสุนแบบอ่อน (soft ballistic vest) เพราะใช้วัสดุที่มีสมบัติทนแรงดึงสูงมากมาขึ้นรูปเป็นเส้นใยเพื่อทอเป็นผืนอย่างแน่นหนาและนำมาเรียงซ้อนกันหลายชั้น โดยแผ่นวัสดุสังเคราะห์แต่ละผืนจะวางสลับแนวกันให้เส้นใยทำมุม 90 องศาเพื่อให้เสื้อเกราะมีทั้งความแข็งแรง และความยืดหยุ่น (Flexible)

เมื่อกระสุนปืนพุ่งชนเสื้อเกราะ พลังงานหรือแรงกระแทกของกระสุนปืนจะถูกดูดซับและกระจายออกไปตามแนวเส้นใยรวมถึงแผ่นวัสดุสังเคราะห์ที่ชั้นต่างๆ เป็นผลให้หัวกระสุนสูญเสียรูปทรง และพลังงานไปจนกระสุนถูกหยุดในที่สุด[10] ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ภาพจำลองการกระจายพลังงานในลูกกระสุนของเสื้อเกราะแบบอ่อน [10]

แม้เสื้อเกราะกันกระสุนจะป้องกันอันตรายจากการทะลุทะลวงของกระสุนปืน (บางชนิด) ได้ แต่การเข้าชนอย่างรุนแรงของกระสุนปืนก็ยังสามารถทำให้ผู้สวมเสื้อเกราะได้ เพราะเสื้อเกราะมีความยืดหยุ่นจึงเกิดการยุบตัวชั่วคราว ทำให้ผู้สวมใส่เกิดอาการช้ำที่เรียกว่า บลันด์ทรอมา (Blunt trauma) ขึ้น ซึ่งหากตำแหน่งที่เกิดการกระแทกเป็นบริเวณที่โครงก็อาจทำให้กระดูกซี่โครงหักแท่งอวัยวะภายในจนเกิดอันตรายถึงชีวิตได้ จึงเป็นจุดด้อยอย่างหนึ่งของเสื้อเกราะกันกระสุนแบบอ่อน และทำให้การยุบตัวของเสื้อเกราะจากการกระแทกของกระสุน กลายเป็นมาตรฐานข้อหนึ่งที่ต้องมีการทดสอบ ซึ่งตามเกณฑ์มาตรฐานการทดสอบของ NIJ กำหนดว่า เสื้อเกราะกันกระสุนที่จะผ่านเกณฑ์การทดสอบเรื่องนี้ได้ต้องไม่ทำให้หุ่นทดสอบเกิดรอยยุบตัวด้านใน (Back Face Signature) ลึกเกิน 44 มิลลิเมตร หลังถูกยิงด้วยกระสุนทดสอบตามระดับการป้องกัน [10] ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ภาพแสดงการยุบตัวของเสื้อเกราะกันกระสุน[10]

2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการป้องกันกระสุนของเกราะกันกระสุน

ความสามารถในการป้องกันกระสุนจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. การเลือกใช้วัสดุ (Materials) ถือเป็นขั้นตอนพื้นฐานที่สำคัญของการผลิตเกราะกันกระสุน เพื่อสมรรถนะที่ดีต่อการต้านทานกระสุนที่ทะลุทะลวงเข้ามา โดยจะต้องเลือกวัสดุที่มีความแข็งแรงและความเหนียวสูง ที่สำคัญจะต้องคำนึงถึงเรื่องน้ำหนัก เพื่อให้สะดวกต่อการปฏิบัติหน้าที่ของผู้สวมใส่ อีกทั้งยังต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายในการผลิตรวมถึงอายุการใช้งาน
2. ความแข็งแรง (Strength) วัสดุที่มีความแข็งแรงสูงจะส่งผลดีต่อประสิทธิภาพต่อการต้านทานกระสุนที่ทะลุทะลวงเข้ามา ซึ่งจะช่วยให้กระสุนที่ปะทะเข้ามาเกิดการเปลี่ยนรูป และหยุดความเร็วของกระสุน
3. ความเหนียว (Toughness) มีความสัมพันธ์กับความแข็งแรง เกราะกันกระสุนที่ดีควรมีความสามารถในการดูดซับพลังงานของกระสุนที่ปะทะเข้ามาเพื่อไม่ให้เกิดการแตกหัก เพื่อลดอันตรายที่จะเกิดขึ้นต่อผู้สวมใส่

4. น้ำหนัก (Weight) ปัจจัยสำคัญที่นอกเหนือจากประสิทธิภาพการต้านทานกระสุน คือ เรื่องน้ำหนัก เสื้อเกราะกันสุนที่ดีจะต้องมีน้ำหนักเบา มีความคล่องตัวสูง ในขณะที่ยังคงสามารถป้องกันกระสุนได้ตามมาตรฐานที่ต้องการ

2.1.3 ส่วนประกอบทั่วไปของเสื้อเกราะกันกระสุน[6]

เสื้อเกราะโดยทั่วไปจะประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่

1. เสื้อนอก (Outside Shell Carrier) เป็นส่วนที่ใช้สำหรับรับแรงกระแทกอาจจะมีส่วนที่ใช้แผ่น เหล็ก หรือ เซรามิก เพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรงกระแทก
2. ส่วนยึดรั้ง (Fastening System) เป็นส่วนที่ใช้ยึดเสื้อเกราะกับร่างกายทำให้เกิดความกระชับ
3. แผ่นรับแรงกระแทก (Ballistic Panel) เป็นส่วนที่มีลักษณะเป็นใย ทอจากใยสังเคราะห์ เมื่อถูกแรงกระแทกจะเกิดการยืดตัว ช่วยดูดซับพลังงาน เพื่อลดความเร็วของกระสุนที่ผ่านเข้ามา มีการนำวัสดุประเภทใยสังเคราะห์มาผลิตเสื้อเกราะเพิ่มมากขึ้น เพราะมีน้ำหนักเบาและมีความแข็งแรงกว่าโลหะ

2.1.4 มาตรฐานการทดสอบโดยสถาบัน NIJ (Standard of National Institute of Justice)

2.1.4.1 มาตรฐานการทดสอบ NIJ Standard 0101.04

มาตรฐานในการทดสอบเสื้อเกราะมีอยู่หลายมาตรฐาน แต่มาตรฐานที่ได้รับการยอมรับเป็นอย่างกว้างขวางและนิยมใช้กันมากที่สุด คือ มาตรฐานสถาบันการยุติธรรมแห่งชาติสหรัฐอเมริกา หรือ มาตรฐาน NIJ (U.S National Institute of Justice) ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้กันอย่างกว้างที่สุด ทั้งในประเทศสหรัฐอเมริกา ออสเตรเลีย รวมถึงประเทศไทย ใช้มาตรฐาน NIJ ในการทดสอบเสื้อเกราะกันกระสุนด้วยเช่นกัน สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้มาตรฐานในการทดสอบการต้านทานกระสุน NIJ0101.04 เป็นมาตรฐานอ้างอิงในการป้องกันกระสุนของเสื้อเกราะบุคคล โดยแบ่งระดับตามความสามารถในการป้องกันกระสุนได้ดังนี้

ตารางที่ 2.1 แสดงการจำแนกระดับของการยิงทดสอบ ตามมาตรฐาน NIJ0101.04 [11]

Armor Type	Test Round	Test Bullet	Bullet weight	Reference Velocity (± 30 ft / s)
1	1	.22 caliber LR LRN	2.6 g 40 gr.	329 m/s (1080 ft/s)
	2	.380 ACP FMJ RN	6.2 g 95 gr.	322 m/s (1055 ft/s)
2A	1	9 mm FMJ RN	8.0 g 124 gr.	341 m/s (1120 ft/s)
	2	40 S&W FMJ	11.7 g 180 gr.	322 m/s (1055 ft/s)
2	1	9 mm FMJ RN	8.0 g 124 gr.	367 m/s (1205 ft/s)
	2	357 Mag JSP	10.2 g 158 gr	436 m/s (1430 ft/s)
3A	1	9 mm FMJ RN	8.2 g 124 gr.	436 m/s (1430 ft/s)
	2	44 Mag JHP	15.6 g 240 gr.	436 m/s (1430 ft/s)
3	1	7.62 mm NATO FMJ	9.6 g 148 gr.	838 m/s (2780 ft/s)
4	1	.30 caliber M2 AP	10.8 g 166 gr.	869 m/s (2880 ft/s)

ตัวย่อกำกับในตาราง

AP : Armor Piercing

FMJ : Full Metal Jacketed

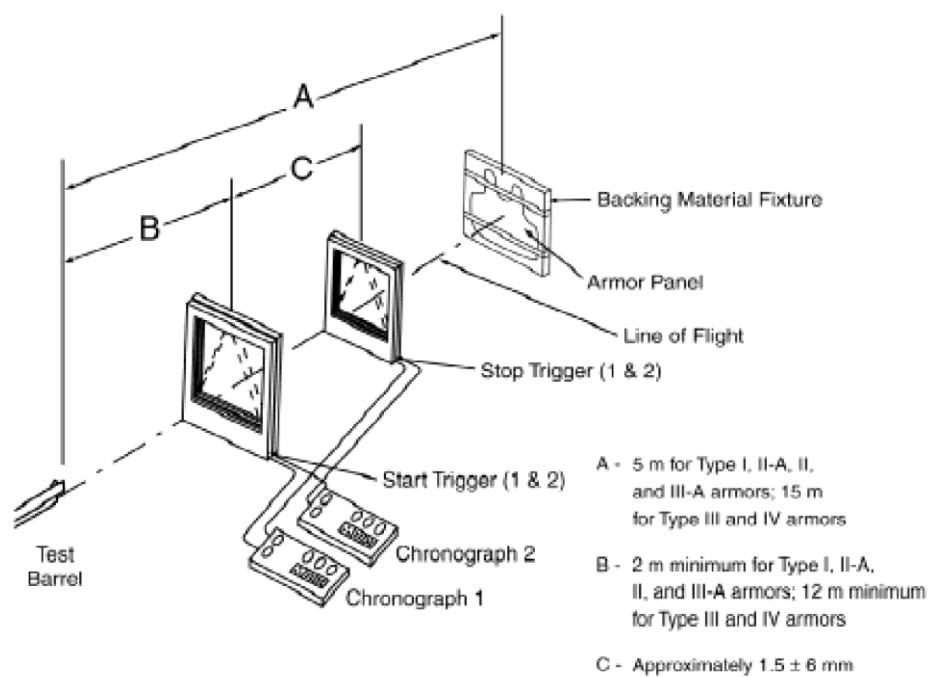
JSP : Jacket soft point

LRHV : Long Rifle High Velocity

2.1.4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับทดสอบ

ในการทดสอบยิงขึ้นงานเสื้อเกราะ ได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ตามมาตรฐาน NIJ 0101.04 ดังแสดงในรูปที่ 2.7

1. อาวุธปืนที่ใช้ทดสอบ (Test Barrel)
2. เครื่องวัดความเร็วกระสุน (Chronograph)
3. กระบะวัสดุหนุน (Backing Material Fixture)



รูปที่ 2.7 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบตามมาตรฐาน NIJ - 0101.04 [11]

2.2 ทฤษฎีการชนและการเคลื่อนที่ของวัตถุ

2.2.1 โมเมนตัม (Momentum) เป็นปริมาณเวกเตอร์ซึ่งแสดงการเคลื่อนที่ของวัตถุ เป็นความสัมพันธ์ของผลคูณระหว่างมวล กับความเร็ว เขียนได้เป็น

$$\vec{P} = m\vec{v} \quad (1)$$

\vec{P} แทน โมเมนตัม มีหน่วยเป็น กิโลกรัม · เมตร / วินาที (kg ·m/s)

m แทน มวล มีหน่วยเป็น กิโลกรัม (kg)

\vec{v} แทน ความเร็ว มีหน่วยเป็น เมตร / วินาที (m/s)

เนื่องจากว่า โมเมนตัมเป็นปริมาณเวกเตอร์ ในกรณีที่อนุภาคเคลื่อนที่ในทิศทางใดๆ จึงสามารถแตกโมเมนตัมออกเป็นในทิศ x , y , z ได้ดังนี้[12]

$$\begin{aligned} \vec{P}_x &= m\vec{v}_x \\ \vec{P}_y &= m\vec{v}_y \\ \vec{P}_z &= m\vec{v}_z \end{aligned} \quad (2)$$

จากกฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตัน สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนตัมเชิงเส้นของอนุภาคกับแรงลัพธ์ที่กระทำต่ออนุภาค จะพบว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเชิงเส้นของอนุภาคจะมีค่าเท่ากับแรงลัพธ์ที่กระทำต่ออนุภาค ได้ดังนี้

$$\vec{F} = \frac{d\vec{P}}{dt} \quad (3)$$

$$\vec{F} = \frac{dm\vec{v}}{dt} \quad (4)$$

เนื่องจากมวล m เป็นค่าคงที่ของแต่ละอนุภาค จะได้ว่า

$$\vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = m\vec{a} \quad (5)$$

ในบางเหตุการณ์เมื่ออนุภาคมีการเคลื่อนที่ชนกัน หรือเกิดแรงกระทำขึ้นบนวัตถุในช่วงเวลาสั้นๆ จะเรียกแรงที่กระทำในช่วงเวลาสั้นๆว่า แรงดล (Impulsive force) และเรียกปริมาณที่เป็นผลจากแรงดลนี้ว่า การดล (Impulse) จากสมการที่ 3 จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \vec{F} &= \frac{d\vec{P}}{dt} \\ d\vec{P} &= \vec{F} dt \end{aligned} \quad (6)$$

ทำการ Integrate เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของอนุภาคเมื่อมีแรงกระทำต่ออนุภาคในช่วงเวลาหนึ่ง กำหนดให้ค่าโมเมนตัมเริ่มต้นของ p_1 ที่เวลา t_1 และค่าโมเมนตัมสุดท้ายของ p_2 ที่เวลา t_2 จะได้ว่า

$$\Delta\vec{P} = \vec{P}_2 - \vec{P}_1 = \int_{t_1}^{t_2} \vec{F} dt \quad (7)$$

ปริมาณทางด้านขวาคือการดลตามที่ได้กล่าวข้างต้นของแรง F ในช่วงเวลา $\Delta t = t_2 - t_1$ จะได้นิยามการดลคือ

$$\vec{I} \equiv \int_{t_1}^{t_2} \vec{F} dt \quad (8)$$

ในที่นี้จะเขียนแทนสัญลักษณ์ \vec{I} ซึ่งนิยามว่าการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมต่อหน่วยเวลาของวัตถุ โดยปกติแล้วแรง (F) แล้วแรงจะไม่ใช่เป็นค่าคงที่ แต่จะแปรผันกับเวลา ดังนั้นเราจะพิจารณาเพื่อความสะดวกเราจะนิยามแรงเฉลี่ย (a time – average force) เป็น

$$\vec{F} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_1}^{t_2} \vec{F} dt \quad (9)$$

2.2.2. การชนกันของอนุภาค

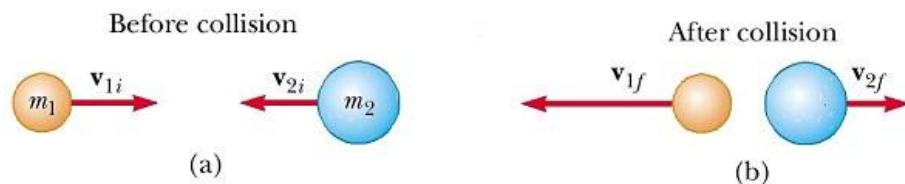
การชนกันของอนุภาคเป็นอันตรกิริยาที่วัตถุทั้งสองออกแรงกระทำซึ่งกันและกันในช่วงเวลาสั้นๆ ทำให้เกิดแรงดลระหว่างกันและกันโดยแรงดลที่เกิดขึ้นนี้จะมีขนาดใหญ่กว่าแรงภายนอกซึ่งทำให้อนุภาคทั้งสองชนกัน พิจารณาอนุภาคมวล m_1 , m_2 มีความเร็วต้นเป็น \vec{v}_{1i} , \vec{v}_{2i} ตามลำดับจะเกิดแรงกระทำต่อกัน จากกฎของนิวตันของที่ 3 จะได้ว่า[13]

แรงที่ 1 กระทำต่อ 2 = แรงที่ 2 กระทำต่อ 1

$$\begin{aligned} \vec{F}_{12} &= -\vec{F}_{21} \\ \frac{m_2 \vec{v}_{2f} - m_2 \vec{v}_{2i}}{\Delta t} &= \frac{-m_1 \vec{v}_{1f} + m_1 \vec{v}_{1i}}{\Delta t} \\ m_1 \vec{v}_{1i} + m_2 \vec{v}_{2i} &= m_1 \vec{v}_{1f} + m_2 \vec{v}_{2f} \end{aligned} \quad (10)$$

จากสมการ (10) เมื่อไม่มีแรงลัพธ์ใดๆ จากภายนอกเข้ามากระทำกับระบบ โมเมนตัมของระบบก่อนชน จะมีค่าเท่ากับโมเมนตัมของระบบหลังชน ซึ่งเรียกว่า การอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of momentum)

ในการชนกันของอนุภาคหรือวัตถุใดๆสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 แบบโดยเปรียบเทียบจากพลังงานจลน์ของวัตถุ ถ้าวัตถุชนแล้วไม่มีการสูญเสียพลังงานจลน์ กล่าวคือ พลังงานจลน์ก่อนชนและหลังชนเท่ากัน เรียกว่า การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic collision) ดังรูปที่ 2.8

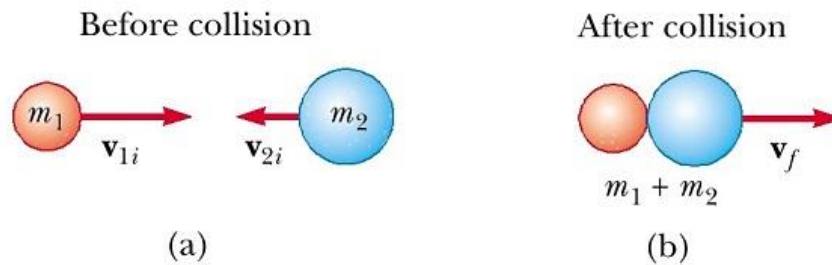


รูปที่ 2.8 ภาพแสดงการชนกันแบบยืดหยุ่นระหว่างวัตถุ 2 ชิ้นใน 1 มิติ (a) ก่อนชน (b) หลังชน [14]

ในกรณีชนแบบยืดหยุ่น โดยกำหนดให้วัตถุทั้งสองก่อนมีมวล m_1 , m_2 ความเร็วต้น v_{1i} , v_{2i} และความเร็วปลาย v_{1f} , v_{2f} จะเกิดการอนุรักษ์โมเมนตัม และพลังงานจลน์ ตามสมการที่ 11

$$\begin{aligned}
 m_1 \vec{v}_{1i} + m_2 \vec{v}_{2i} &= m_1 \vec{v}_{1f} + m_2 \vec{v}_{2f} \\
 \frac{1}{2} m_1 \vec{v}_{1i}^2 + \frac{1}{2} m_2 \vec{v}_{2i}^2 &= \frac{1}{2} m_1 \vec{v}_{1f}^2 + \frac{1}{2} m_2 \vec{v}_{2f}^2
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

แต่ถ้าพลังงานจลน์หลังชนน้อยกว่าก่อนชนจะเรียกว่าการชนแบบไม่ยืดหยุ่นสมบูรณ์ (Perfectly Inelastic collision) ดังรูปที่ 2.9 ดังสมการที่ 12



รูปที่ 2.9 ภาพแสดงการชนกันแบบไม่ยืดหยุ่นสมบูรณ์ระหว่างวัตถุ 2 ชิ้นใน 1 มิติ

(a) ก่อนชน (b) หลังชน [14]

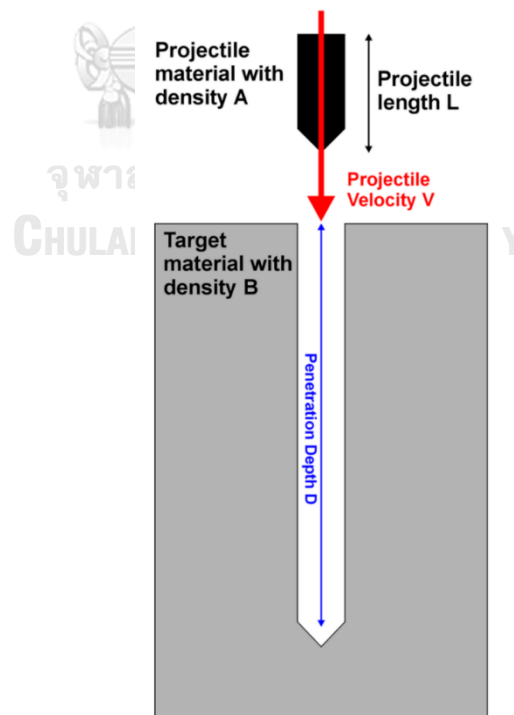
$$\begin{aligned}
 m_1 \vec{v}_{1i} + m_2 \vec{v}_{2i} &= m_1 \vec{v}_{1f} + m_2 \vec{v}_{2f} \\
 \frac{1}{2} m_1 \vec{v}_{1i}^2 + \frac{1}{2} m_2 \vec{v}_{2i}^2 &> \frac{1}{2} m_1 \vec{v}_{1f}^2 + \frac{1}{2} m_2 \vec{v}_{2f}^2
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

2.2.3 ความลึกของการกระทบ (Impact Depth)

ในการประมาณค่าความลึกของวัสดุกันกระสุนหลังจากการปะทะของกระสุนที่พุ่งเข้ามาด้วยความเร็วสูง สามารถใช้หลักการประมาณค่าของนิวตันสำหรับความลึกของการตกกระทบ (Newton's Approximation For The Impact Depth) โดยใช้แนวความคิดเรื่องการถ่ายโอนพลังงานจลน์ของกระสุน (Kinetic Energy) ที่วิ่งปะทะเข้ามาด้วยความเร็วสูง เมื่อกระแทกไปที่วัสดุเป้าหมายจะทำให้กระสุนเกิดการเสียรูป ส่งผลให้เกิดรอยแตกบนผิวชิ้นงานและเกิดเป็นระยรอยลึกขึ้น ดังภาพที่ 2.10 โดยมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของกระสุนและเกราะสุน[12] ดังสมการที่ 13

$$D \approx L \frac{A}{B} \quad (13)$$

- เมื่อ
- D คือ ระยะความลึกของการทะลุทะลวง (Penetration Depth)
 - L คือ ความยาวของกระสุน (Projectile Length)
 - A คือ ความหนาแน่นของกระสุน (Density Of Projectile Material)
 - B คือ ความหนาแน่นของวัสดุเป้าหมาย (Density Of Target Material)



รูปที่ 2.10 ภาพแสดงระยะรอยลึกของวัสดุเป้าหมายที่ปะทะด้วยกระสุนความเร็วสูง [12]

2.2.4 แรงเสียดทาน (Frictional Force)

เมื่อแผ่นเกราะถูกปะทะด้วยกระสุนด้วยความเร็วสูง หากพิจารณาที่ผิวสัมผัสตรงที่มีการปะทะจะพบว่าเกิดแรงต่างๆเกิดขึ้น แรงที่พื้นผิวสัมผัสกันจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ แรงกด (Pressure Force) และ แรงเสียดทาน (Frictional Force) โดยแรงที่เกิดขึ้นดังกล่าว จะมีการกระจายพลังงานในลักษณะที่แตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง พลังงานที่เกิดขึ้นจากแรงกดต้นจะถูกใช้ไปในการเปลี่ยนรูปร่างแผ่นวัสดุในบริเวณใกล้เคียงกับกระสุนปืน ซึ่งผลจากการเปลี่ยนรูปร่างนั้น มาจากความร้อนที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปจะอยู่ที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส[15]

2.2.4.1 ความร้อนระหว่างชั้นผิว (Temperature of Interface)

หลังจากการปะทะกันระหว่างกระสุนที่พุ่งตรงเข้าไปยังชิ้นงาน จะเกิดพลังงานความร้อนซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 14

$$\Delta T = \left(\frac{Vs}{\pi\sigma C}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot f \quad (14)$$

เมื่อ	ΔT	คือ	ความร้อนที่เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส
	V	คือ	ความเร็วของกระสุน
	s	คือ	ระยะทาง
	σ	คือ	ค่าการนำความร้อนของวัสดุ
	C	คือ	ค่าความจุความร้อนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของวัสดุ
	f	คือ	ค่าคงที่ของแรงเสียดทานต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

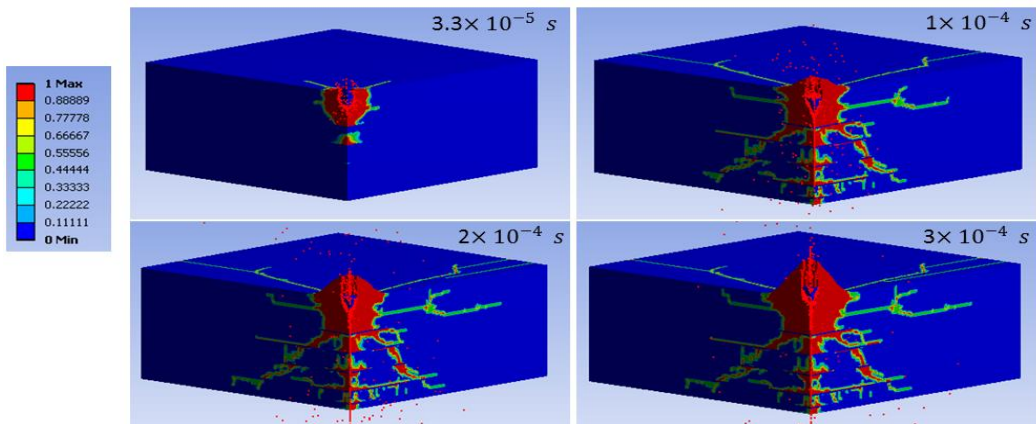
2.2.4.2 ความเค้นเสียดทาน (Frictional Stress)

เมื่ออุณหภูมิของพื้นผิวใกล้เคียงกับอุณหภูมิในการหลอมเหลว (Melting Temperature) จะส่งผลให้ค่าแรงเสียดทานต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ลดลง ทำให้ค่าแรงเสียดทานใหม่สามารถประมาณได้จากการสร้างสมดุลพลังงานระหว่างพื้นที่ผิวกับพลังงานที่เคลื่อนที่ไป [15] ดังสมการที่ 15

$$f = 2\left(\frac{\sigma C}{\pi V S}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \Delta T \quad (15)$$

2.2.5. ทฤษฎีและการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)

การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis : FEA) เป็นวิธีการจำลองการตอบสนองของวัสดุที่มีผลมาจากแรงกระทำต่างๆ โดยใช้วิธีการแก้ปัญหาเชิงตัวเลข เช่น ปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง การจำลองแรงกระทำที่มีต่อวัสดุ การกระจายตัวทางความร้อน การจำลองทิศทางการไหลของอากาศ เป็นต้น ซึ่งจะต้องใช้สมการทางคณิตศาสตร์เชิงกลมาช่วยในการแก้ปัญหาการตอบสนองทางด้านกายภาพของวัสดุ ในปัจจุบัน การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ถือเป็นเครื่องมือที่สำคัญในการวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ เนื่องจากสามารถทำนายและวิเคราะห์ความเสียหายและการตอบสนองเชิงกลของชิ้นงานภายใต้แรงกระทำตามที่กำหนดรวมถึงความเค้น ความเครียดของชิ้นงานซึ่งถ้าผู้วิจัยมีสมการตอบสนองเชิงกลของวัสดุที่ใกล้เคียงความเป็นจริงแล้ว จะสามารถใช้วิธีการจำลองนี้ทดแทนทดสอบจริง อีกทั้งยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในการทดลอง ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ภาพตัวอย่างการนำซอฟต์แวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์มาวิเคราะห์ความเสียหายของชิ้นงานเกราะใส่สำหรับกันกระสุน[16]

2.2.5.1 ศึกษาวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบ่งขั้นตอนหลักๆออกเป็น 3 ขั้นตอน[16]

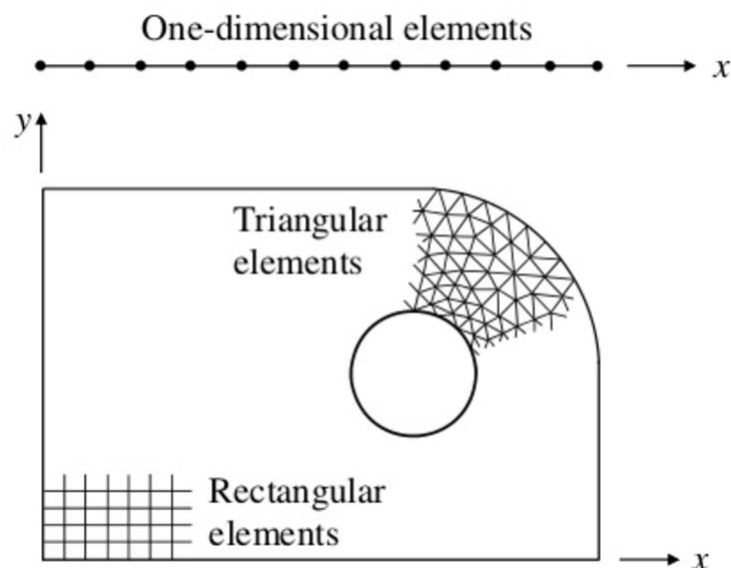
1. การกำหนดปัญหาเฉพาะเจาะจง ประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนย่อยคือ
 - การกำหนดรูปร่างทางเรขาคณิต (Geometry) เป็นการกำหนดขนาดรูปร่างของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ
 - การกำหนดคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties) เป็นการใส่คุณสมบัติของชิ้นงานวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ
 - การใส่แรงกระทำ (Loads) คือแรงที่กระทำต่อชิ้นงาน
2. การป้อนข้อมูลเข้าสู่โปรแกรม มีขั้นตอนดังนี้
 - การสร้างเมช (Mesh Generation) ถือเป็นวิธีที่มีความสำคัญที่สุด เป็นการแบ่งรูปร่างของชิ้นงานดังกล่าวให้เป็นชิ้นส่วนเล็กๆ โดยต้องคำนึงถึงรูปร่างและลักษณะของงานที่ใช้ในการทดสอบ
 - การกำหนดคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties) เป็นการใส่ข้อมูลคุณสมบัติของชิ้นงานวัสดุที่ใช้ในการทดสอบลงในโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณ
 - การกำหนดขอบเขต (Boundary Condition) เป็นการกำหนดสภาวะขอบเขตในการตอบสนองต่อแรงกระทำบนชิ้นงาน
3. การแสดงผล (Process Output) เป็นการรายงานผลการคำนวณจากการวิเคราะห์ทาง ไฟไนต์เอลิเมนต์

- การเลือกประเภทของข้อมูล เป็นการเลือกแสดงผลการจำลองที่เราสนใจ เช่น ความเค้น ความเครียดของวัสดุ ความรุนแรงของความเสียหายของชิ้นงานในวัสดุ
- การสร้างข้อมูลที่มีความสัมพันธ์กัน
- แสดงผลอย่างมีความหมายและน่าสนใจ

2.2.5.2. ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์ปัญหาต่างๆทางวิศวกรรมด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยทั่วไปประกอบไปด้วย 6 ขั้นตอน ดังนี้[17]

1. การแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ เป็นการแบ่งโดเมน (Domain) ในหนึ่งมิติออกเป็นเอลิเมนต์แบบหนึ่งมิตีย่อยๆ หรือแบ่งโดเมนรูปร่างซับซ้อนในสองมิติออกเป็นเอลิเมนต์รูปเรขาคณิต (Geometry) ให้มีความเหมาะสมต่อปัญหา ดังภาพที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างเมชสำหรับโดเมนในหนึ่งมิติและสองมิติด้วยการใช้เอลิเมนต์ที่ต่างกัน[17]

2. การเลือกใช้ชนิดเอลิเมนต์

ในการวิเคราะห์ปัญหาด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถแบ่งเอลิเมนต์ได้หลายแบบตามสภาพปัญหาและรูปร่างที่วิเคราะห์ การเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์ที่ไม่เหมาะสมกับปัญหาทั้งนี้เนื่องจากการเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์ จะมีผลกระทบต่อเวลาที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองรูปร่าง (CAD Model) แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element model) เวลาในการคำนวณ (Solving time) เวลาในการแสดงผล (Post processing time) ปริมาณการใช้เนื้อที่ของหน่วยความจำสำรอง (Disk usage for solving) และหน่วยความจำหลัก (Memory usage for solving) ของเครื่องคอมพิวเตอร์โดยทั่วไปชนิดของเอลิเมนต์สามารถแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบได้แก่ เอลิเมนต์ใน 1 มิติ, เอลิเมนต์ใน 2 มิติ และ เอลิเมนต์ใน 3 มิติ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้[18]

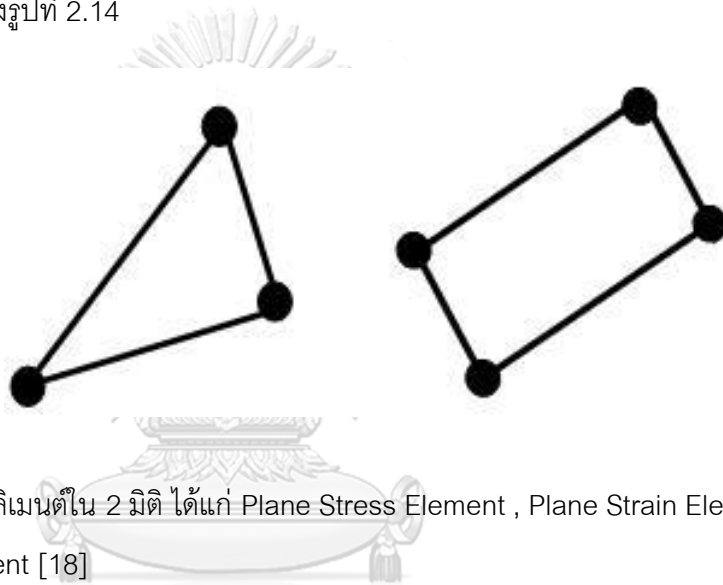
เอลิเมนต์ใน 1 มิติ เป็นเอลิเมนต์ที่มีรูปแบบง่ายที่สุด ใน 1 เอลิเมนต์ โดยมากมักประกอบด้วย 2 จุดต่อ (Node) เอลิเมนต์ชนิดนี้เหมาะสำหรับแก้ปัญหาทางด้านโครงสร้างหรืองานอื่นๆ ที่วางตัวตามแนวยาวและมีลักษณะเป็นท่อน คุณสมบัติเพิ่มเติมที่ต้องกำหนดให้กับเอลิเมนต์ได้แก่พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน สำหรับข้อดีของเอลิเมนต์ชนิดนี้คือ การใช้เนื้อที่ของหน่วยความจำเพียงเล็กน้อย ใช้เวลาในการเตรียมข้อมูลและการคำนวณไม่มากนัก ส่วนข้อจำกัดได้แก่ ความไม่สมจริงบริเวณจุดต่อของโครงสร้างและไม่สามารถแสดงการกระจายตัวของความเค้นบริเวณจุดต่อได้[18] ดังรูปที่ 2.13

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 2.13 ภาพแสดงเอลิเมนต์ใน 1 มิติ ได้แก่ Rod Element , Beam Element , Bar Element[18]

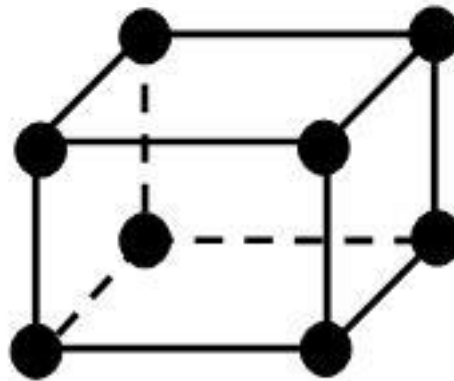
เอลิเมนต์ใน 2 มิติ โดยทั่วไปจะมีสองลักษณะคือ แบบสามเหลี่ยมที่ประกอบด้วย 3 จุดต่อและแบบสี่เหลี่ยมที่ประกอบด้วย 4 จุดต่อ เอลิเมนต์ชนิดนี้เหมาะสำหรับแก้ปัญหาทางที่สามารถจำลองรูปร่างเป็นพื้นผิว สำหรับคุณสมบัติที่ต้องกำหนดเพิ่มเติมคือความหนาของชิ้นงานในส่วนของข้อดีของเอลิเมนต์แบบนี้คือ สามารถแก้ไขปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อนได้มากกว่าเอลิเมนต์ใน 1 มิติ เวลาที่ใช้คำนวณแม้จะมากขึ้นเมื่อเทียบกับเอลิเมนต์ใน 1 มิติ แต่เมื่อเทียบเวลาคำนวณกับเอลิเมนต์ใน 3 มิติแล้วยังถือว่าน้อยมาก อีกทั้งผลลัพธ์จากการคำนวณที่ได้ยังมีความถูกต้องสูงอีกด้วย[18] ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ภาพแสดงเอลิเมนต์ใน 2 มิติ ได้แก่ Plane Stress Element , Plane Strain Element , Shell Element [18]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอลิเมนต์ใน 3 มิติ รูปร่างของเอลิเมนต์นี้โดยทั่วไปจะมีรูปทรงลูกบาศก์ที่ประกอบด้วย 8 จุดต่อ และรูปทรงปริมาตรที่ประกอบด้วย 4 จุดต่อ ขึ้นอยู่กับรูปร่างของชิ้นงาน สำหรับเอลิเมนต์ชนิดนี้สามารถใช้แก้ปัญหาทางกลศาสตร์ของแข็งได้หลากหลายรูปแบบ แต่ปัญหาหลักของการใช้เอลิเมนต์ชนิดนี้คือการใช้หน่วยความจำมาก รวมทั้งใช้เวลาในการคำนวณนาน ซึ่งมักจะเป็นปัญหาสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาที่ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล[18] ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ภาพแสดงเอลิเมนต์ใน 3 มิติ ได้แก่ Solid Element [18]

3. การประดิษฐ์สมการไฟไนต์เอลิเมนต์

เนื่องจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์อธิบายด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ แนวคิดสำคัญในขั้นตอนนี้คือ การเปลี่ยนแปลงสมการเชิงอนุพันธ์ไปเป็นสมการทางพีชคณิต ประกอบด้วยการทำเพียง บวก ลบ คูณ และหาร เท่านั้น สมการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการทางพีชคณิตนี้มักเขียนในรูปแบบของเมทริกซ์ (matrix) เพื่อความสะดวกในการประดิษฐ์ขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ต่อไป

4. การรวมสมการไฟไนต์เอลิเมนต์เข้าด้วยกันแล้วแก้สมการระบบใหญ่

หลังจากประดิษฐ์สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ในขั้นตอนที่ 3 จะต้องนำมารวมเข้าเป็นสมการระบบใหญ่ เป็นการนำแต่ละเอลิเมนต์ย่อยๆ มาประกอบกันเข้าขึ้นเป็นโดเมนรูปร่างที่สมบูรณ์ของปัญหานั้น ระบบสมการใหญ่นี้ จึงประกอบด้วยสมการทางพีชคณิตย่อยเป็นจำนวนมากโดยขึ้นอยู่กับจำนวนจุดต่อในโดเมนนั้น

5. การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตนำเงื่อนไขขอบเขตประยุกต์ลงบนสมการใหญ่ที่เกิดขึ้น แล้วจึงแก้สมการระบบใหญ่

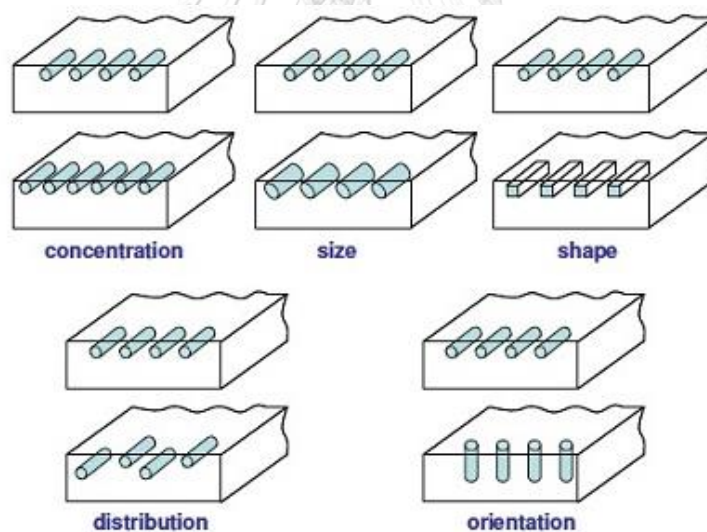
6. การคำนวณหาค่าอื่นๆที่ต้องการ

เมื่อทำการวิเคราะห์อย่างถูกต้องแล้ว จึงสามารถนำมาหาอื่นๆได้ เช่น เมื่อรู้ว่า

u จะสามารถหาค่า $\frac{\partial u}{\partial x}$ ได้

2.3 วัสดุผสม (Composite Materials)

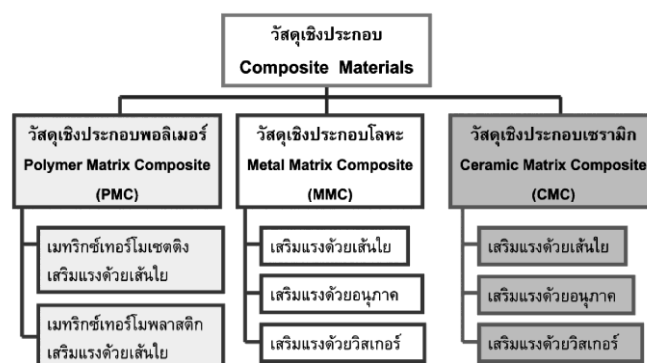
วัสดุผสม (Composite Materials) เป็นวัสดุผสมตั้งแต่ 2 กลุ่มวัสดุหลักเป็นต้นไปที่เกิดจากการประดิษฐ์สร้างขึ้น (Artificially Made) โดยที่วัสดุผสมจะต้องไม่ละลายซึ่งกันและกันและองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยความสำคัญทางวิศวกรรมของวัสดุผสมที่มีคุณสมบัติที่ดี หรือลักษณะที่สำคัญแตกต่างกันออกไปจากวัสดุตั้งต้นเดิมในด้าน ความแข็งแรง น้ำหนัก ความต้านทานการกัดกร่อน การนำไฟฟ้า เป็นต้น ดังรูปที่ โดยที่มีวัสดุผสมเกิดขึ้นจากเฟส 2 ชนิด ชนิดแรกเป็นเฟสหลักเรียกว่า เนื้อพื้น (Matrix) เป็นเฟสที่มีปริมาณมากกว่า มีความต่อเนื่องกันอยู่ และอยู่ล้อมรอบเฟสอื่น จะทำหน้าที่เป็นตัวรองรับ ยึดเกาะเฟสต่างๆเข้าด้วยกัน ช่วยกระจายแรงให้สม่ำเสมอไปทั่วทุกเฟสในระหว่างที่มีการเปลี่ยนรูปเกิดขึ้น และเฟสอีกชนิดหนึ่งที่กระจายแทรกตัวอยู่ในเฟสหลัก ซึ่งเรียกว่า ตัวเสริมแรง (Reinforcement) ทำหน้าที่เสริมสมบัติให้กับเฟสหลัก ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุผสมที่ได้จะเป็นฟังก์ชันหรือขึ้นกับคุณสมบัติของสารตั้งต้น ปริมาณของสารตั้งต้น และรูปทรงทางเรขาคณิตของเฟสที่กระจายตัว[19] ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ภาพแสดงลักษณะต่างๆของเฟสที่กระจายตัวอยู่ที่ส่งผลต่อสมบัติสุดท้ายของวัสดุผสม[19]

วัสดุเชิงประกอบประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน ได้แก่ เฟสเนื้อพื้นและตัวเสริมแรง ซึ่งโดยทั่วไปจะแบ่งวัสดุผสมตามเฟสเนื้อพื้นได้ออกเป็น 3 ประเภทวัสดุผสมเนื้อพื้นพอลิเมอร์ (Polymer – Matrix Composites : PMCs) , วัสดุผสมเนื้อพื้นโลหะ (Metal – Matrix Composites : MMCs) และวัสดุผสมเนื้อพื้นเซรามิก (Ceramic – Matrix Composites : CMCs) ดังรูปที่ 2.17 และสามารถจำแนกย่อยต่อไปได้อีกตามลักษณะของสารเสริมแรง ได้แก่ อนุภาค (Particle) เส้นใย (Fiber) และ whisker (Whisker) อนุภาคเสริมแรงจะมีลักษณะเป็นเม็ดหรือผล เช่น ผงถ่านดำ ซิลิกอนคาร์ไบด์ เป็นต้น และถ้าพิจารณาอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio) ถ้าอัตราส่วนดังกล่าวมากกว่า 100 ขึ้นไป จะเรียกสารเสริมแรงนั้นเป็นเส้นใย ซึ่งอาจจำแนกตามความยาวเป็นเส้นใยต่อเนื่อง (Continuous Fiber) และเส้นใยไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Fiber) และยังสามารถจำแนกเส้นใยไม่ต่อเนื่องตามอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางได้เป็นเส้นใยยาว (Long Fiber) ซึ่งมีอัตราส่วนมากกว่า 1,000 ขึ้นไป และเส้นใยสั้น (Short Fiber) ซึ่งมีอัตราส่วนน้อยกว่า 1,000 เส้นใยมีทั้งที่เป็นเส้นใยอินทรีย์และเส้นใยอนินทรีย์ ตัวอย่างเส้นใยอินทรีย์เช่น เส้นใยอะรามิด เส้นใยเซลลูโลส เป็นต้น ส่วนเส้นใยอนินทรีย์ อาจเป็นเส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน หรือเส้นใยโลหะ เช่นเส้นใยโบรอน เส้นใยทองแดง เป็นต้น ส่วน whisker เป็นลักษณะของเส้นใยขนาดเล็กมากที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางในหน่วยไมโครเมตรและมีความยาวไม่กี่มิลลิเมตร ซึ่งเกิดจากการก่อตัวทางยาวของผลึกเดี่ยว (Elongated Single Crystal) จึงมีแนวโน้มที่จะเป็นผลึกสมบูรณ์ที่ปราศจากการเคลื่อน (Dislocation) ทำให้ whisker มีความแข็งแรงสูงมาก[20]

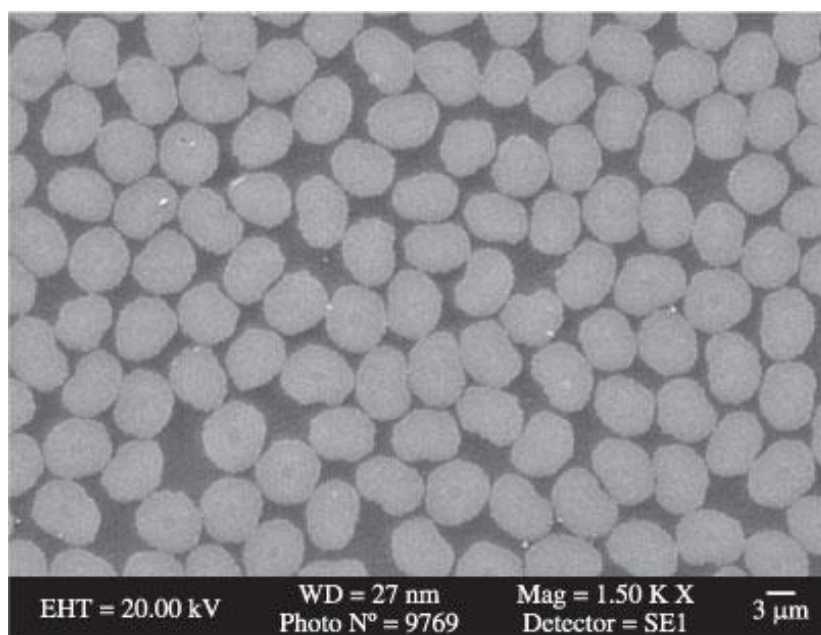
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 2.17 ภาพแสดงการจำแนกของวัสดุเชิงประกอบตามชนิดของ Matrix และลักษณะของตัวเสริมแรง[20]

2.3.1. วัสดุผสมเนื้อพื้นพอลิเมอร์ (Polymer – Matrix Composites : PMCs)

ประกอบด้วยเรซินพอลิเมอร์เป็นเนื้อพื้น และมีวัสดุผสมเสริมแรงเป็นเส้นใยแก้ว (Glass Fiber – Reinforced Polymer) วัสดุผสมเสริมแรงเป็นเส้นใยคาร์บอน (carbon fiber – reinforced polymer) วัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิด (Aramid Fiber – Reinforced Polymer) เป็นต้น ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ภาพแสดงการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของเส้นใยคาร์บอนในเนื้อพื้นอีพอกซีเรซิน[21]

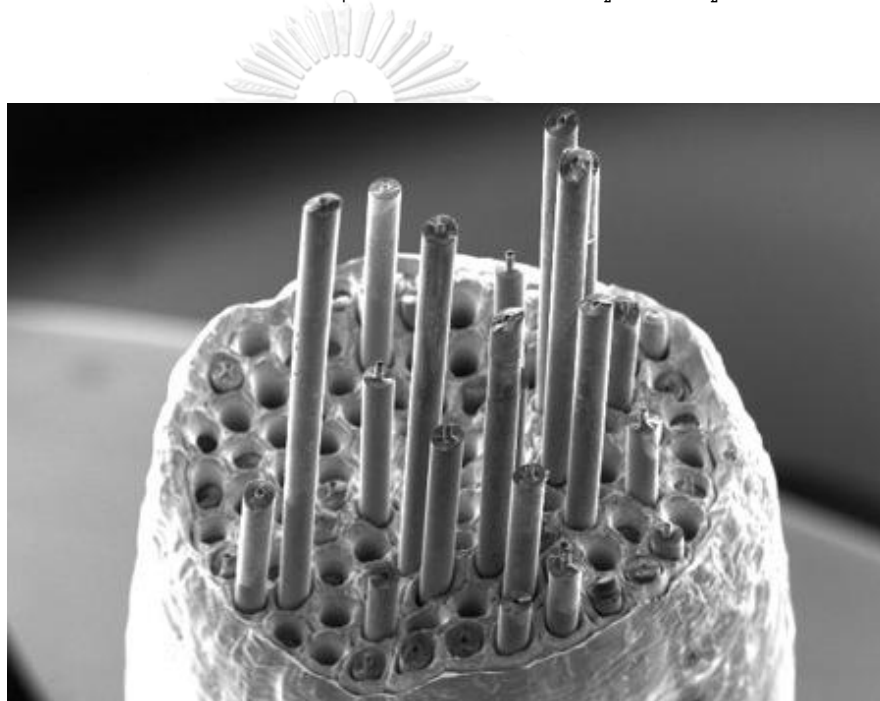
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อนำสมบัติของเฟสเนื้อพื้นพอลิเมอร์และสมบัติของเส้นใยเสริมแรงประกอบกันทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นมากกว่าวัสดุพอลิเมอร์ เนื่องจากเส้นใยเสริมแรงทำหน้าที่รับแรงกระทำ แต่สำหรับระยะยืดสูงสุดนั้น วัสดุเชิงประกอบจะมีความสามารถในการยืดสูงสุดได้ไม่เกินระยะยืดสูงสุดของเส้นใยเสริมแรง สำหรับเฟสเนื้อพื้นต้องมีความเหนียวทนทานมากพอที่จะห่อหุ้มเส้นใยเสริมแรงไว้ สารเสริมแรงในรูปอนุภาคมีส่วนเสริมความแข็งแรงในรูปอนุภาค (Particle) มีส่วนเสริมความแข็งแรงได้ไม่ดีเท่ากับรูปแบบเส้นใย (Fiber) เนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของสารเสริมเสริมแรงส่งผลต่อการกระจายแรง จึงนิยมเรียกสารเสริมแรงในรูปอนุภาคว่า สารเติม (Filler) วัสดุเชิงประกอบจะมีความแข็งแรงมากขึ้นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยทำให้ความแข็งแรงจำเพาะ (Specific Strength) ซึ่งเป็น

อัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงต่อความหนาแน่นของวัสดุเพิ่มสูงขึ้น จึงทำให้สามารถนำวัสดุเชิงประกอบมาใช้สำหรับงานโครงสร้างบางชนิดที่ต้องรับแรงกระทำที่สูงมากนั้ได้ เช่น เฟอร์นิเจอร์ต่างๆ[20]

2.3.2 วัสดุผสมเนื้อพื้นโลหะ (Metal – Matrix Composites: MMCs)

ประกอบด้วยเนื้อพื้นเป็นโลหะเหนียวได้แก่ อะลูมิเนียม วัสดุเสริมแรงเป็นเส้นใยต่อเนื่องได้แก่ คาร์บอน ซิลิกอนคาร์ไบด์ โบรอน อะลูมินา เป็นต้น ช่วยปรับปรุงวัสดุให้สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูง ต้านทานการเสียดสี และปรับปรุงด้านความแข็งแรงให้สูงขึ้น ดังรูปที่ 2.19



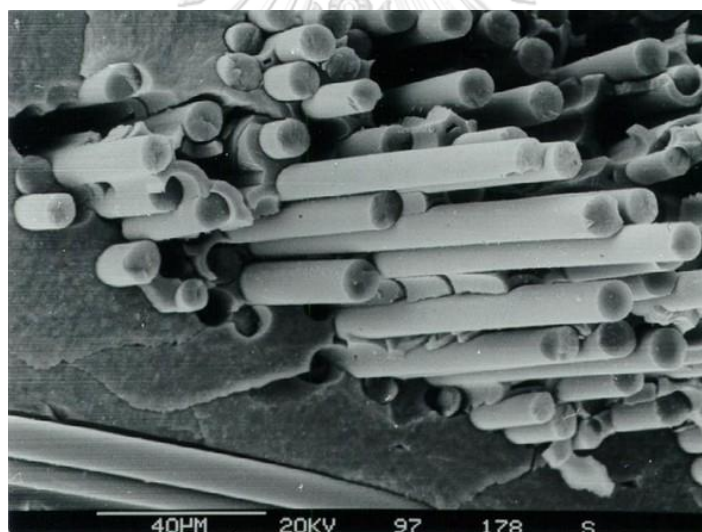
รูปที่ 2.19 ภาพแสดงรอยแตกหักวัสดุผสมที่มีโลหะทองแดงเป็นเฟสเนื้อพื้นและมีซิลิกอน คาร์ไบด์ เป็นเฟสเสริมแรง[22]

สำหรับวัสดุเสริมแรงที่ใช้จะต้องเป็นวัสดุเสริมแรงที่เป็นเซรามิกหรือสารเสริมแรงโลหะ ทำให้วัสดุเนื้อพื้นที่เป็นโลหะมีความทนทานต่อความล้าสูงขึ้นมาก และมีอายุการใช้งานนานขึ้น อีกทั้งความหนาแน่นของสารเสริมแรงที่น้อยกว่าโลหะ ทำให้ความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบลดลงรวมถึงสัมประสิทธิ์การขยายเนื่องจกความร้อน (Coefficient Temperature Expansion : CTE) ลดลง เพราะสารเสริมแรงเป็นเซรามิกจึงมีการขยายตัวเนื่องจกความร้อนต่ำกว่าโลหะ ส่วนกรณีที่สารเสริมแรงมีลักษณะเป็นเส้นใยยาว วัสดุเชิงประกอบที่ได้จะมีความ

แข็งแรงที่สูงขึ้น โดยทั่วไปวัสดุเชิงประกอบโลหะจะนำไปใช้งานในลักษณะเดียวกับโลหะ สารเติมแรงที่เติมเข้าไปจะเป็นการปรับปรุงสมบัติของเนื้อพื้นโลหะให้ดียิ่งขึ้น และมีอายุการใช้งานที่นานขึ้น[20]

2.3.3. วัสดุผสมเนื้อพื้นเซรามิก (Ceramic – Matrix Composites : CMCs)

ประกอบด้วยวัสดุเซรามิกเป็นเนื้อพื้น และนำเอาผงอนุภาค เส้นใย วิสเกอร์ของเซรามิกชนิดหนึ่งไปใส่ฝังไว้เป็นวัสดุเสริมแรง เช่น ซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ดังรูปที่ 2.20 ทำให้วัสดุมีความแข็งแรง มีความเหนียวที่ดีขึ้น สามารถต้านทานการแตกหักได้สูงขึ้น ใช้งานที่อุณหภูมิสูง ทนทานต่อการกัดกร่อน และอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อได้รับความร้อนต่ำมาก แต่ข้อเสียคือเปราะและแตกหักง่ายเมื่อเกิดรอยแตกแล้วไม่สามารถซ่อมแซมได้โดยง่าย



รูปที่ 2.20 ภาพแสดงรอยแตกหักของวัสดุผสมที่มีเฟสเนื้อพื้นเป็นเซรามิกและมีซิลิกอนคาร์ไบด์เป็นเฟสเสริมแรง[23]

การเสริมแรงให้กับเซรามิกเป็นการปรับปรุงสมบัติให้วัสดุเชิงประกอบที่ได้มีความเหนียวและทนทานมากขึ้น สารเสริมแรงจะเข้าไปขบวนการแพร่ของรอยแตกที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการใช้งาน เมื่อวัสดุเชิงประกอบได้รับแรงจะไม่เกิดการเปราะแตกในทันที เนื่องจากรอยแยกจะถูกหน่วงด้วยสารเสริมแรงเนื่องจากสมบัติที่เรียกว่า ความเหนียวแบบเทียม (Pseudo Ductile) สำหรับเนื้อพื้นเซรามิกที่ไม่เสริมแรงจะแสดงสมบัติที่เปราะ และแตกทันทีเมื่อได้รับแรงกระทำ

จนถึงจุดจุดหนึ่ง ดังนั้นสารเสริมแรงที่ใส่เข้าไปจะทำให้วัสดุเชิงประกอบเซรามิกมีความเหนียวและทนทานมากขึ้น[20]

2.4 फिल्मเอกซเรย์ (X- Ray Film)

2.4.1 फिल्मเอกซเรย์ คือ วัสดุที่มีความสำคัญในทางการแพทย์เพื่อช่วยในการวินิจฉัยอาการ ภายในร่างกายของผู้ป่วย หลักการทำงานจะเป็นการบันทึกเงาภาพจากการฉายรังสี ไม่ว่าจะ เป็นรังสีแสง หรือรังสีเอกซเรย์ เพื่อให้ภาพออกมาปรากฏถาวร โดยชนิดของฟิล์มเอกซเรย์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันแบ่งออกเป็น 6 ประเภทหลักๆ ได้แก่[24]

2.4.1.1 फिल्मที่ใช้ในวงการแพทย์ (Medical X-ray Film) แบ่งออกเป็น 2 ชนิด

- फिल्मชนิดธรรมดา (Regular Type Film) ซึ่งมีทั้งสองชนิดที่ต้องใช้และไม่ต้องใช้ร่วมกับฉากเพิ่มความเข้มแสง เมื่อใช้ร่วมกับฉากเพิ่มความเข้มแสงจะเรียกว่า Screen Film

- फिल्मชนิดที่ใช้รังสีโดยตรง (Direct Exposure) फिल्मเอกซเรย์ชนิดนี้มีการฉาบสารผสมที่เรียกว่า Emulsion บนด้านทั้งสองของแผ่นฟิล์ม ทำให้มีความหนากว่าฟิล์มเอกซเรย์ชนิดธรรมดา ในปัจจุบันจึงไม่เป็นที่นิยมเท่าที่ควร เพราะไม่สามารถล้างฟิล์มด้วยวิธีอัตโนมัติ (Automatic Processing) ได้

2.4.1.2 फिल्मเอกซเรย์ชนิดที่ใช้ในวงการทันตแพทย์ (Dental X-ray Film) จะมีขนาดเล็กเป็นพิเศษเพื่อใช้งานเฉพาะส่วนในช่องปาก ตลอดจนถึงความไวของฟิล์มให้สอดคล้องกับบริเวณที่ต้องการศึกษา เช่น รากฟัน ฟัน เป็นต้น

2.4.1.3 Photo Radiographic Film फिल्मชนิดนี้ฉาบผสม Emulsion ทางด้านเดียวของฟิล์ม (Single Coated)

2.4.1.4 Dosimeter film फिल्मชนิดที่ใช้สำหรับวัดปริมาณรังสีของผู้ที่ปฏิบัติงานเกี่ยวกับรังสี เพื่อให้ทราบถึงปริมาณรังสีที่ได้รับในระยะเวลาตามที่กำหนดไว้

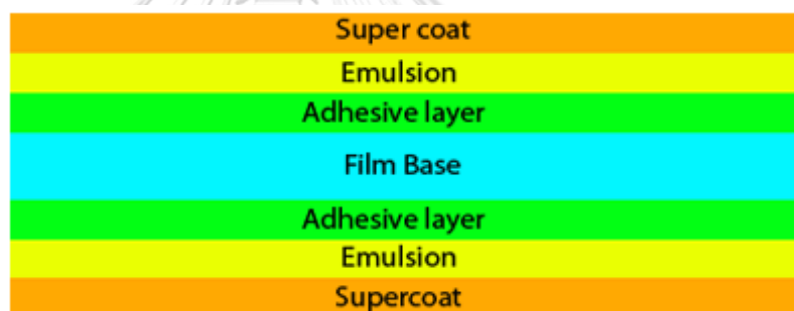
2.4.1.5 फिल्मเอกซเรย์ที่ใช้ในวงการอุตสาหกรรม (Industrial Film) เป็นฟิล์มที่ผลิต

ขึ้นมาเป็นพิเศษในการถ่ายภาพรังสีของวัตถุที่มีความหนา และวัตถุที่มีการเชื่อมเพื่อตรวจดูรอยร้าวของวัตถุ

2.4.1.6 Duplication Film เป็นฟิล์มที่สามารถนำไปใช้ในการ Copy ภาพรังสีให้ออกมาในลักษณะของภาพรังสีโดยตรง (Direct Positive Copies)

2.4.2 ส่วนประกอบของฟิล์ม X – Ray โดยทั่วไปฟิล์ม X – Ray แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่[25]

2.4.2.1 ฟิล์มชนิดอิมัลชันสองด้าน (Double Emulsion X – Ray Film) ฟิล์มที่ใช้ในการถ่ายภาพ x- ray ทางกายภาพจะเป็นชนิดที่มีอิมัลชันสองด้าน ทั้งนี้เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเป็น 2 เท่า โดยประกอบไปด้วยส่วนต่างๆดังรูปที่ 2.21

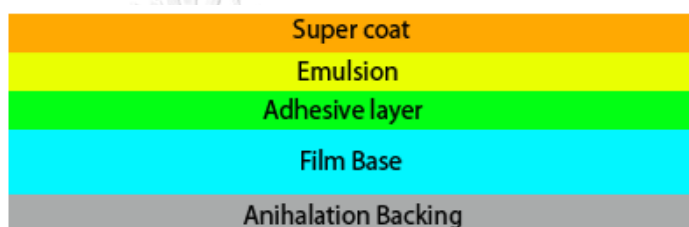


รูปที่ 2.21 ภาพแสดงภาพตัดขวางของฟิล์มเอ็กซ์เรย์ชนิดอิมัลชันสองด้าน (Double Emulsion X – Ray Film) [25]

- ชั้นเคลือบ (Super Coat) ทำมาจากเจลาติน (Gelatin) เป็นส่วนที่ช่วยป้องกันความเสียหายภายนอกให้แก่ชั้นอิมัลชัน
- ชั้นอิมัลชัน (Emulsion) ประกอบขึ้นด้วยผลึกเงินแฮไลด์ (Silver Halide) ผังตัวอยู่ในอิมัลชัน ช่วยลดการเกิดภาพครอสโอเวอร์ (Image Crossover)
- ชั้นยึดติด (Adhesive Layer) ทำหน้าที่ประสานระหว่างชั้นอิมัลชันและชั้นฐานของฟิล์มเข้าด้วยกัน ทำมาจากเจลาติน

- ชั้นฐานของฟิล์ม (Film Base) ทำมาจากโพลีเอสเตอร์ (Polyester) เป็นส่วนสำคัญในเรื่องความแข็งแรง ช่วยลดความเสียหายที่เกิดจากการโค้งงอแผ่นฟิล์มเอ็กซเรย์

2.4.2.2 ฟิล์มชนิดอิมัลชันชั้นด้านเดียว (Single Emulsion X – Ray Film) โดยทั่วไปฟิล์มเอ็กซเรย์ชนิดนี้นิยมใช้ในการถ่ายภาพเอ็กซเรย์เต้านม (Mammography) กระจุกกรยางค์ (Extremities) เพื่อต้องการให้บันทึกภาพให้มีรายละเอียดสูงสุด โดยประกอบไปด้วยส่วนต่างๆดังรูปที่ 2.22

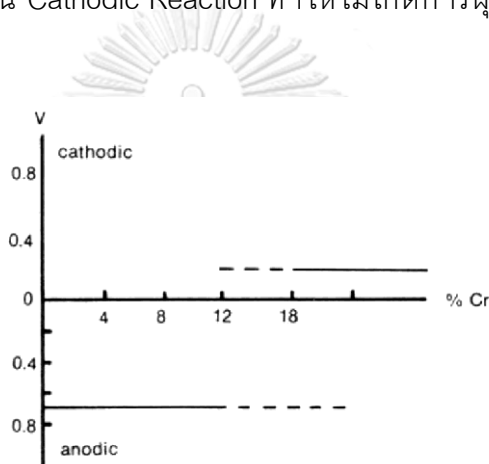


รูปที่ 2.22 ภาพแสดงภาพตัดขวางของฟิล์มเอ็กซเรย์ชนิดอิมัลชันชั้นด้านเดียว (Single Emulsion X – Ray Film) [25]

- ชั้นเคลือบ (Super Coat) ทำมาจากเจลาติน (Gelatin) เป็นส่วนที่ช่วยป้องกันความเสียหายภายนอกให้แก่ชั้นอิมัลชัน
- ชั้นอิมัลชัน (Emulsion) ประกอบขึ้นด้วยผลึกเงินแฮไลด์ (Silver Halide) ผังตัวอยู่ในอิมัลชัน ช่วยลดการเกิดภาพครอสโอเวอร์ (Image Crossover)
- ชั้นยึดติด (Adhesive layer) ทำหน้าที่ประสานระหว่างชั้นอิมัลชันและชั้นฐานของฟิล์มเข้าด้วยกัน ทำมาจากเจลาติน
- ชั้นฐานของฟิล์ม (Film Base) ทำมาจากโพลีเอสเตอร์ (Polyester) เป็นส่วนสำคัญในเรื่องความแข็งแรง ช่วยลดความเสียหายที่เกิดจากการโค้งงอแผ่นฟิล์มเอ็กซเรย์

2.5 เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel)

มีคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้สูงกว่าเหล็กทั่วไป โดยเฉพาะเมื่ออยู่ในบรรยากาศที่มีความชื้นจะเกิดปฏิกิริยา Oxidation ทำให้เกิดสนิม เพราะตามธรรมชาติของสสารจำเป็นต้องลดพลังงานอิสระให้มากที่สุด โดยเปลี่ยนรูปไปเป็นออกไซด์ของเหล็ก (FeO_2 , Fe_2O_3) ดังนั้นเมื่อผสมธาตุโครเมียมเข้าไปในเหล็กในปริมาณที่มาก จะทำให้เหล็กดังกล่าวมีสมบัติการต้านทานการเกิดสนิมมากขึ้น เนื่องจากโครเมียมในช่วงแรกจะเกิด Anodic Reaction ทำให้เกิดฟิล์มของโครเมียมออกไซด์ Cr_2O_3 ขึ้น ซึ่งเป็นฟิล์มที่มีความหนาแน่นและทึบแล้วจึงเปลี่ยนเป็น Cathodic Reaction ทำให้ไม่เกิดการผุกร่อน [26] ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 แผนภาพแสดงผลของการเติม Cr ลงในเหล็กต่อสมบัติเคมีไฟฟ้าของเหล็กผสมโครเมียม [26]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การจำแนกเหล็กกล้าไร้สนิมแบ่งออกเป็น 5 ประเภท[27]

- เฟอริติก (Ferritic Stainless Steel) เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีโครเมียม 10.5 – 27% มีความต้านทานการกัดกร่อนได้น้อยกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทออสเทนนิค แต่สูงกว่าประเภทมาร์เทนซิติก นิยมใช้ทำเครื่องประดับ อุปกรณ์สำหรับรถยนต์ โดยเฉพาะส่วนของท่อไอเสียรถยนต์ ตัวอย่างเช่น เหล็กกล้าไร้สนิม เบอร์ 403,405,409,434,436,442,446

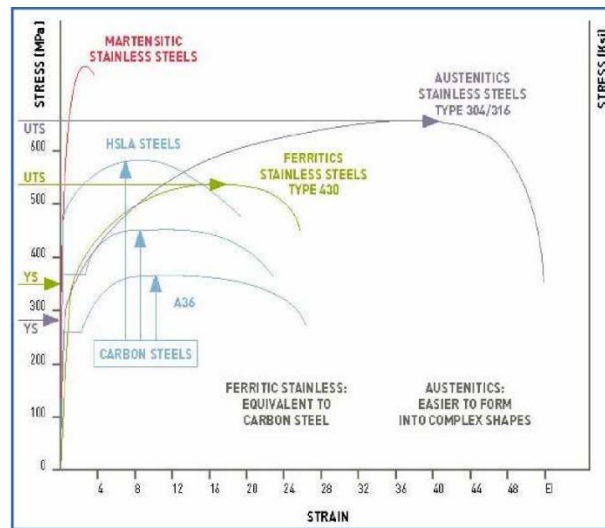
- มาร์เทนซิติก (Martensitic Stainless Steel) เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีปริมาณคาร์บอน 0.1-1%โครเมียม 12 – 14%และโมลิบดีนัม 0.2-1 % จะทนทานการกัดกร่อนได้น้อย

กว่าประเภทออสเทนนิค แต่มีความแข็งมากกว่าเนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนมากกว่า มีสมบัติเฉพาะตัวคือแม่เหล็กดูดติด จึงเหมาะกับการทำอุปกรณ์สำหรับการตัด มีดผ่าตัดในวงการแพทย์ ตัวอย่างเช่นเหล็กกล้าไร้สนิมเบอร์ 414 , 416 , 420 , 431 , 440

- ออสเทนนิติก (Austenitic Stainless Steel) เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีปริมาณคาร์บอนไม่เกิน 0.15% โครเมียมไม่น้อยกว่า 16% และมีการเติมโมลิบดีนัมและนิกเกิลเป็นองค์ประกอบ มีสมบัติทางกลที่เด่นชัดคือมี Tensile strength ต่ำกว่ามาร์เทนซิติก แต่มี %Elongation สูงกว่าดังข้อมูลในตารางที่ 2.2 และภาพที่ 2.24 ทำให้สามารถขึ้นรูปทางกลได้ง่าย และมีลักษณะเฉพาะคือแม่เหล็กดูดไม่ติด ตัวอย่างเช่นเหล็กกล้าไร้สนิมเบอร์ 304, 316 , 317 , 321 , 347 ในบางครั้งจะมีตัวอักษร H อยู่ด้านหลัง แทนปริมาณชนิดที่มีปริมาณคาร์บอนสูง หรือจะมีตัวอักษร L อยู่ด้านหลังแทนปริมาณชนิดที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ ถ้ามีตัวอักษร M แทนชนิดที่มีโมลิบดีนัมเป็นองค์ประกอบ นิยมใช้ทำบานพับประตู อ่างล้างมือ

- ดูเพล็กซ์ (Duplex Stainless Steel) เป็นประเภทที่มีโครงสร้างผลึกผสมระหว่างเฟอริติกและออสเทนนิติกในอัตราส่วนที่เท่ากัน 50:50 ทำให้ได้เหล็กกล้าไร้สนิมที่มีคุณสมบัติพิเศษคือมีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile Strength) ที่สูงกว่า และต้านทานการกัดกร่อนได้ดีกว่าประเภทออสเทนนิติก นิยมไปใช้ทำอุปกรณ์ที่ทนต่อความดัน ชิ้นส่วนของเรือดำน้ำ ใบพัดเรือ เช่นเหล็กกล้าไร้สนิมเบอร์ 2205

- ฟรีซิปิเทชัน ฮาร์ดเดนนิ่ง (Precipitation Stainless Steel) เป็นการนำเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทออสเทนนิติก หรือมาร์เทนซิติกไปผ่านกระบวนการให้ความร้อน และทำให้เย็นลงทิ้งให้ตกตะกอน ส่งผลให้เนื้อพื้นมีความแข็งที่สูงขึ้น และทนต่อการออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงๆได้ จึงนำไปใช้งานในชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เครื่องยนต์เจ็ท เช่น 17-7PH ซึ่งประกอบด้วยโครเมียม 17% และนิกเกิล 7%



รูปที่ 2.24 ภาพแสดงความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของเหล็กกล้าไร้สนิมแต่ละประเภท [27]

ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมแต่ละชนิด[28]

Grade	Yield strength (MPa)	Tensile Strength (Mpa)	Elongation (%)	Hardness (HV)
202	299	684	57	170
304	298	695	60	168
316L	300	636	55	157
409L	266	421	34	136
430	326	502	29	157
439	292	441	31	151
441	298	464	33	150
444	380	540	27	-

2.5.1. Stainless 304 เป็นเหล็กกล้าในตระกูลออสเทนนิติกที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า 18/8 โดยมีปริมาณของธาตุโครเมียมอยู่ 18% และธาตุนิกเกิล 8% เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมในบรรยากาศในวงกว้าง ขึ้นอยู่กับการกัดกร่อนบริเวณรอยต่อและการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมที่มีความร้อนในคลอไรด์ สำหรับเหล็กกล้าชนิด 304L เป็นรูปแบบคาร์บอนต่ำชนิดพิเศษของชนิด 304 ที่มีปริมาณคาร์บอนสูงสุด 0.03% ดังตารางที่ 2.3 ซึ่งช่วยขจัดการตกตะกอนของคาร์ไบด์เนื่องจากการเชื่อม เป็นผลให้อัลลอยด์นี้สามารถนำมาใช้ในสภาพที่เชื่อมได้แม้อยู่ในสภาวะที่มีฤทธิ์กัดกร่อนอย่างรุนแรง [29]

ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L และ 304[29]

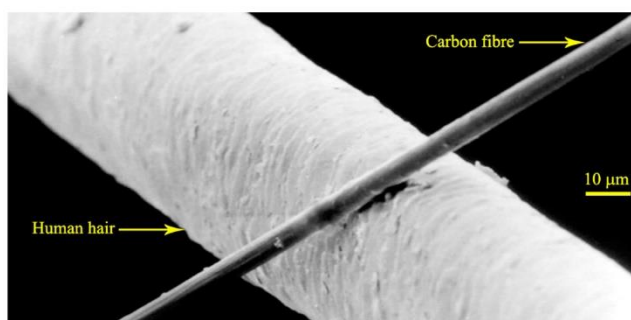
	Type 304 (%)	Type 304L (%)
Carbon	0.08 max	0.03 max
Manganese	2.00 max	2.00 max
Phosphorus	0.045 max	0.045 max
Sulfur	0.030 max	0.030 max
Silicon	0.75 max	0.75 max
Chromium	18.00 – 20.00	18.00-20.00
Nickel	8.00-12.00	8.00-12.00
Nitrogen	0.10 max	0.10 max
Iron	Balance	Balance

ตารางที่ 2.4 ตารางแสดงคุณสมบัติทางกลที่อุณหภูมิห้องของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L และ 304 [29]

	UTS ksi (MPa)	0.2%YS ksi (Mpa)	Elongation % in 2" (50.8 mm)	Hardness Rockwell
Type 304L	85(586)	35 (241)	55	B80
Type 304	90(621)	42 (290)	55	B82

2.6 เส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber)

เส้นใยคาร์บอนเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมมากในวงการแข่งรถยนต์ การแข่งขันกีฬา และ อุตสาหกรรมการบิน อวกาศ เพราะเนื่องจากมีคุณสมบัติเฉพาะตัวที่แตกต่างจากวัสดุอื่นทั่วไปในเรื่องของความแข็งแรง ความทนทานมาก มีน้ำหนักเบา เส้นใยคาร์บอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.005 - 0.10 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2.25 ซึ่งโดยทั่วไปการผลิตเส้นใยคาร์บอนที่ได้จะถูกทำให้เป็นเส้นด้าย และนำเส้นใยขนาดเล็กรวมกันจึงได้เป็นเส้นใยคาร์บอน[30]



รูปที่ 2.25 ภาพแสดงการเปรียบเทียบขนาดของเส้นผมมนุษย์กับเส้นใยคาร์บอน[31]

เส้นใยคาร์บอนมีต้นกำเนิดมาจากโพลีเมอร์ที่เรียกว่า โพลีอะคริโลไนไทรล์ (Polyacrylonitrile : PAN) มีสูตรโครงสร้างทางเคมี ดังรูปที่ 2.26 ส่วนในการผลิตเส้นใย Carbon Fiber จากตัว PAN เองนั้น จะมีขั้นตอนหลักๆอยู่ 4 ขั้นตอนดังนี้ [32]



รูปที่ 2.26 ภาพแสดงโครงสร้างทางเคมีของ Polyacrylonitrile[33]

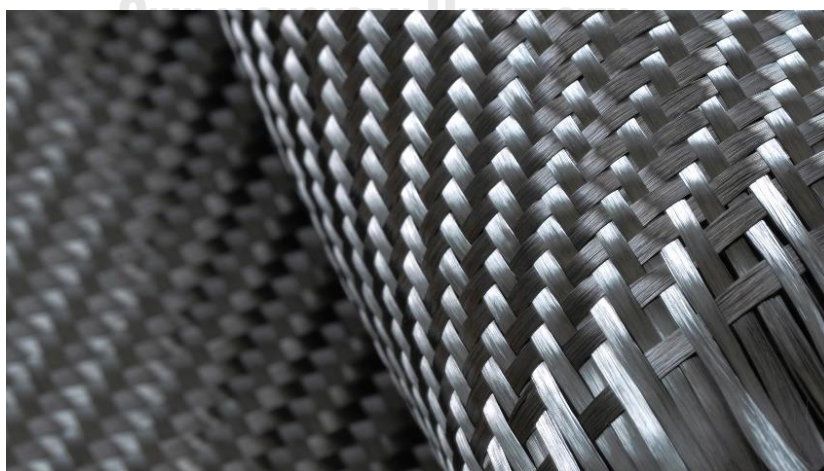
ขั้นตอนที่ 1 : Oxidation เป็นการนำเส้นใยโพลีอะคลิโลไนไทรล์ ไปเผาไฟโดยให้อุณหภูมิอยู่ที่ 3,000 องศาเซลเซียส จนทำให้เส้นใยเปลี่ยนจากสีขาวกลายเป็นสีดำ เมื่อได้ทำการเผาตัวเส้นใยเสร็จสิ้น ก็จะได้ส่วนที่เรียกว่าผ้า Nomex และเราสามารถนำผ้า Nomex นี้ไปทำเสื้อผ้ากันไฟได้

ขั้นตอนที่ 2 : Carbonisation เป็นนำผ้า Nomex ที่ได้จากการเผาในขั้นตอน Oxidation ไปเผาต่อที่ความร้อนสูงถึง 10,000-30,000 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศไนโตรเจนด้วยความดันสูงมาก เพื่อทำการนำส่วนประกอบธาตุอื่นๆที่ไม่ใช่ธาตุ Carbon ออกไปให้หมด ทำให้เส้นใยคาร์บอนมีความแข็งแรงมากขึ้น

ขั้นตอนที่ 3 : Surface Treatment เป็นขั้นตอนการเคลือบสารโพลีเมอร์ที่ผิวหน้าของเส้นใย ซึ่งสามารถยึดเกาะโครงสร้างเล็กๆ เพื่อให้ตัวผ้า Carbon Fiber สามารถคงรูปอยู่ได้ และทำให้เส้นใยมีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น สำหรับขั้นตอนนี้จะต้องระมัดระวังในการเคลือบสารโพลีเมอร์ไม่ให้เกิดฟองอากาศ เพราะถ้าเกิดฟองอากาศขึ้นแล้วเส้นใยคาร์บอนที่ได้จะไม่มี ความแข็งแรงและสามารถเกิดการแตกหรือหักได้

ขั้นตอนที่ 4 : Surface Coating เป็นการนำเอาสาร อีพ็อกซี่ (Epoxy) มาเคลือบผิวเพื่อให้พื้นผิวลื่นและเกิดความเงางาม ทำให้เส้นใยคาร์บอนไม่เกิดการหลุดออกมาเป็นขุยๆเมื่อนำมาตัดหรือขึ้นรูปตามการนำไปใช้งาน ดังรูปที่ 2.27

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.27 ภาพแสดงผ้าเส้นใยคาร์บอนที่พร้อมสำหรับใช้งาน[34]

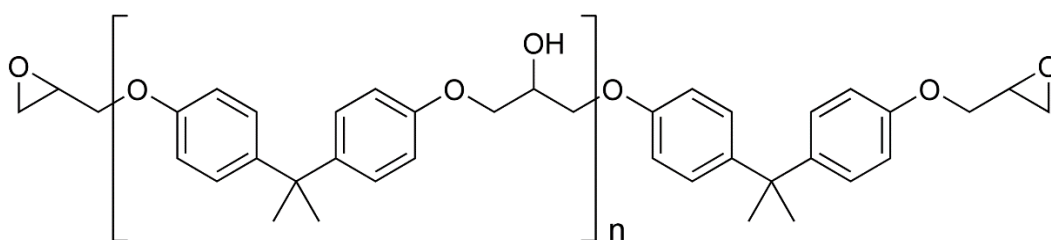
คุณสมบัติเด่นที่สำคัญของเส้นใยคาร์บอนนอกเหนือจากเรื่องของน้ำหนักที่เบาแล้ว เมื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติทางกลกับเหล็กกล้าในน้ำหนักที่มีความเท่ากัน จะพบว่าเส้นใยคาร์บอนมีความแข็งแรงมากกว่าเหล็กกล้า อีกทั้งยังมีความแข็งแรงต่อน้ำกรดในทิศทาง การขดสี่ และการกระแทก ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ตารางแสดงการเปรียบเทียบสมบัติทางกลของเส้นใยคาร์บอน และเหล็กกล้าในน้ำหนักที่เท่ากัน [31]

วัสดุ	Density (g / cm ³)	Tensile Strength (GPa)	Tensile Modulus (GPa)	Specific Strength (GPa)
คาร์บอนไฟเบอร์	1.75	3.5	230.0	2.00
เหล็กกล้า	7.87	1.3	210.0	0.17

2.7 อีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resins)

อีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resins) คือพอลิเมอร์ที่มีวงสามเหลี่ยม ประกอบด้วยคาร์บอน 2 อะตอมและออกซิเจน 1 อะตอม ติดที่ปลายสายโซ่ หมู่อีพ็อกซี (Epoxy Group) ดังรูปที่ 2.28 นี้ เป็นตำแหน่งตำแหน่งที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาการเชื่อมโยง อีพ็อกซีมีสมบัติหลากหลายในช่วงกว้าง ขึ้นอยู่กับโครงสร้างโมเลกุล มีการยึดเกาะกับเส้นใยต่างๆ ได้ดี เช่นเส้นใยแก้ว เส้นใยอะรามิด เส้นใยคาร์บอน ฯลฯ มีการหดตัวต่ำเมื่อเทียบกับเทอร์โมเซตชนิดอื่นๆ เช่นพอลิเอสเตอ์ชนิดไม่อิ่มตัว และไวนิลเอสเตอ์ นอกจากนี้ยังมีความแข็งแรงสูง ทนทานต่อสารเคมี มีเสถียรภาพรูปร่างสูง (Dimension Stability) ง่ายต่อการขึ้นรูป ถึงแม้ว่าต้นทุนการผลิตอีพ็อกซีคอมโพสิตจะสูงกว่าพอลิเอสเตอ์ชนิดไม่อิ่มตัวและไวนิลเอสเตอ์ และการใช้งานที่อุณหภูมิได้ไม่ดีเท่าพอลิเอไมด์ (Polyamide) แต่สมบัติโดยรวมของอีพ็อกซีถือว่าดีมาก[35]



รูปที่ 2.28 ภาพแสดงโครงสร้างทางเคมีของ Epoxy[36]

2.7.1. ปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของอีพ็อกซีเรซิน (Curing Reaction of Epoxy Resins)

อีพ็อกซีเรซินจะถูกเปลี่ยนเป็นเทอร์โมเซตโดยการเกิดปฏิกิริยาของหมู่อีพ็อกซี ซึ่งอาจจะเกิดปฏิกิริยากับตัวมันเองกลายเป็นโฮโมโพลิเมอร์ (Homopolymer) หรืออาจเกิดปฏิกิริยากับสารเชื่อมโยงโมเลกุล (สารทำให้แข็ง) ซึ่งในการเกิดปฏิกิริยาอาจจะเกิดอย่างใดอย่างหนึ่งหรือเกิดทั้งสองอย่าง

2.7.2. สารเชื่อมโยงอีพ็อกซีเรซิน

สารเชื่อมโยงอีพ็อกซีโดยทั่วไปจะแบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือกลุ่มเอมีน (Amine) กลุ่มกรดลิวอิส (Lewis Acid) และกลุ่มแอนไฮไดรด์ (Acid Anhydride)

1. สารเชื่อมโยงกลุ่มเอมีน

1.1 เอมีนตติยภูมิ (Tertiary Amine) โดยทั่วไปจะเหมาะสำหรับงานยึดเกาะและงานเคลือบ ตัวอย่างของสารเชื่อมโยงกลุ่มนี้ เช่นเบนซิลไดเมทิลเอมีน (Benzyl dimethylamine, BDMA), ไดเมทิลอะมิโนเมทิลฟีนอล (Dimethylaminomethyl Phenol, DMP-30), ไตรเอทานอลเอมีน (Triethanol Amine)

1.2 พอลิฟังก์ชันนอลเอมีน (Polyfunctional Amine) สารเชื่อมโยงกลุ่มนี้เป็นทั้งอะลิฟาติกเอมีนและอะโรมาติกเอมีน โดยมีไฮโดรเจนที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาอย่างน้อย 3 อะตอม ซึ่งจะอยู่ในรูปของเอมีนปฐมภูมิ (Primary Amine) หรือเอมีนทุติยภูมิ (Secondary

Amine) โดยทั่วไปอะลิฟาติกเอมีนจะเกิดปฏิกิริยาจะเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงได้เร็ว และเกิดได้ที่อุณหภูมิห้อง ในขณะที่อะโรมาติกเอมีนมีความว่องไวค่อนข้างต่ำ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีอุณหภูมิของการเปลี่ยนรูปร่างสูง พอลิฟังก์ชันนอลเอมีนนิยมนำมาใช้ในการทำกาว ผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยการหล่อแบบ และแผ่นลามิเนต (Laminating) ตัวอย่างของสารเชื่อมโยงประเภทนี้คือ ไดเอทิลลีนไตรเอมีน (Diethylene Triamine , DTA) , ไตรเอทิลลีนเตตระเอมีน (Triethylenetetramine , TETA)

2. สารเชื่อมโยงกลุ่มกรดลิวอิส (Lewis Acid)

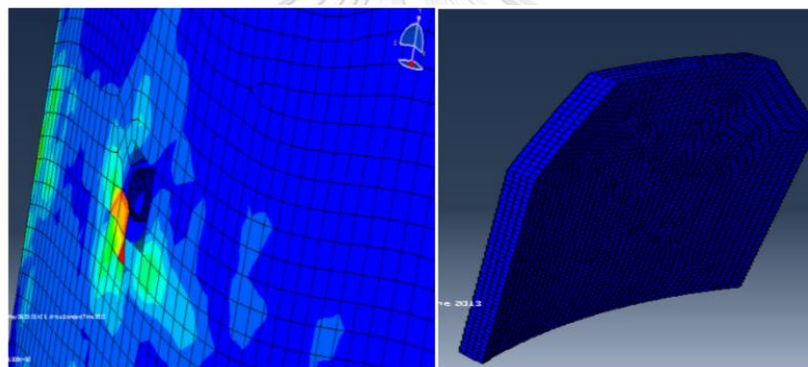
กรดลิวอิสที่ใช้เป็นสารเชื่อมโยง เช่นโบรอนไตรฟลูออไรด์โมโนเอทิลลีนเอมีน (Boron Trifluoride Monoethyleneamine , BF_3MEA) เป็นสารเชิงซ้อนที่เสถียรที่อุณหภูมิห้อง และไม่ทำปฏิกิริยากับสารอื่น เป็นสารเชื่อมโยงที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์ที่เป็นงานแผ่นมากกว่างานหล่อ

3. สารเชื่อมโยงกลุ่มแอซิดแอนไฮไดรด์ (Acid Anhydride)

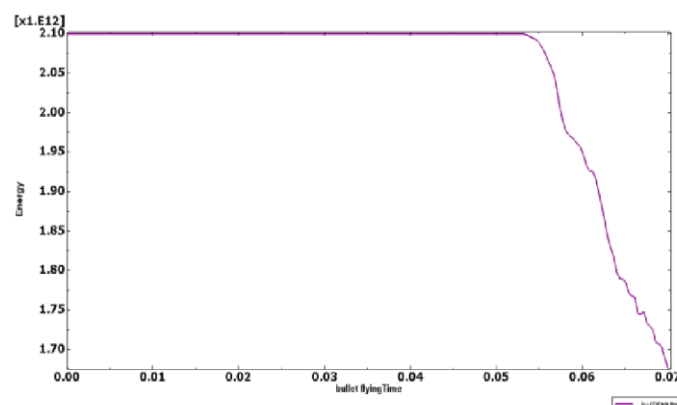
แอซิดแอนไฮไดรด์ที่นิยมนำมาใช้เป็นสารเชื่อมโยงของอีพ็อกซีเรซิน อาจจะมีอยู่ในรูปโมโนแอนไฮไดรด์ (Monoanhydride) หรือ ไดแอนไฮไดรด์ (Dianhydride) [35]

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Yohannes Regassa และคณะ[37] ได้ทำการวิจัยเสื่อเกราะกันกระสุนแบบคอมโพสิต ซึ่งดีกว่าการใช้วัสดุที่เป็นเหล็กในรูปแบบเดิม เพื่อลดน้ำหนักให้เบาลง ทำให้เพิ่มสมรรถภาพในการปฏิบัติงานได้ดีขึ้นและยังสามารถต้านทานการปะทะของกระสุนได้ดี วิธีการวิจัยจะมีการสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม Solid Work 2012 และ Abaqus 6.10 เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้จำลองชุดเกราะกันกระสุนเป็นแบบคอมโพสิตซึ่งงานวิจัยดังกล่าวได้จำลองเส้นใย Kevlar-29 จำนวน 20 ชั้น ความหนา 10 มิลลิเมตร และใช้โพลีเอสเตอร์ เรซินเป็นวัสดุเนื้อพื้น จากผลการทดลองพบว่าสามารถป้องกันการทะลุทวงของกระสุนขนาด 7.62 x 39 มิลลิเมตรที่ระยะ 10 เมตร โดยไม่เกิดความเสียหายที่ชั้นสุดท้าย ดังรูปที่ 2.29 ส่งผลให้ค่าพลังงานจลน์ลดลง ดังรูปที่ 2.30 ที่ความเร็ว 720 เมตรต่อวินาที ซึ่งชุดเกราะคอมโพสิตที่จำลองตั้งเกราะใช้น้ำหนักเพียง 1.5 กิโลกรัม

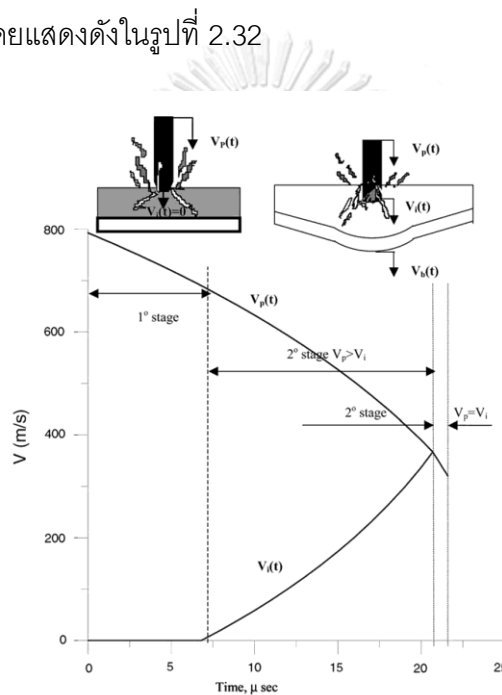


รูปที่ 2.29 ภาพแสดงแบบจำลองของกระสุนที่ทำลายแผ่นปะทะของเกราะคอมโพสิตแต่ไม่เกิดความเสียหายที่แผ่นหลัง[37]



รูปที่ 2.30 ภาพแสดงค่าพลังงานจลน์ที่ลดลงเป็นผลมาจากการดูดซับพลังงานของชุดเกราะคอมโพสิต[37]

งานวิจัยของ D.P. Goncalves[38] ได้ทำการวิเคราะห์ผลกระทบการปะทะของกระสุนกับชิ้นงานเกราะเซรามิก และโลหะ ในรูปแบบ 1 มิติ โดยแบบจำลองนี้จะช่วยให้การคำนวณการสูญเสียมวลและความเร็วของกระสุนปืนรวมถึงความเสียหายที่มีต่อแผ่นวัสดุรองรับ ดังรูปที่ 2.31 และได้ทำการศึกษาผลกระทบของขนาดเม็ดอนุภาควัสดุเซรามิกที่มีผลต่อความสามารถในการป้องกันกระสุนโดยผลิตชิ้นงานเซรามิก 2 ชั้นที่เป็นตระกูลเดียวกัน สมบัติทางกลเหมือนกัน แต่มีองค์ประกอบทางเคมีต่างกัน จากผลการทดลองสรุปว่าหากขนาดอนุภาคเซรามิกใหญ่ขึ้นจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการป้องกันการทะลุทลวงของกระสุนได้ดีขึ้น โดยไม่ต้องเพิ่มความหนาของแผ่นเซรามิกแต่อย่างใด โดยแสดงดังในรูปที่ 2.32

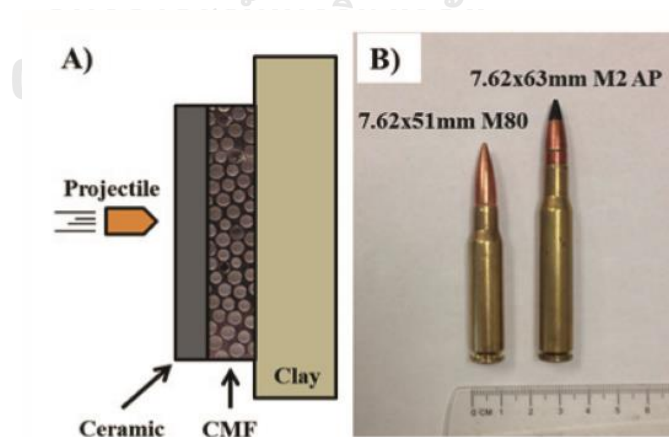


รูปที่ 2.31 ภาพเปรียบเทียบความเร็วของกระสุนทะลุทลวงชิ้นงานเมื่อเวลาผ่านไป[38]



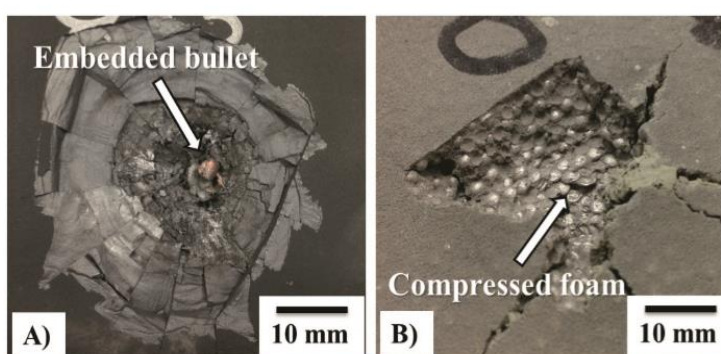
รูปที่ 2.32 ภาพแสดงรอยแตกบนชิ้นงานหลังจากยิงทดสอบซึ่งมีลักษณะแผ่ขยายเป็นรูปทรงกรวย [38]

Matias Garcia-Avila[39] ได้ทำการศึกษาโลหะโฟมคอมโพสิต (Composite Metal Foam : CMF) ซึ่งเป็นวัสดุที่เป็นรูพรุน มีน้ำหนักเบา มีความสามารถในการดูดซับพลังงานที่ดี โดยใช้เทคนิคการทำผงโลหะที่มีลักษณะเป็นทรงกลมกลางขนาด 2 มม. ดังรูปที่ 2.33 ในเมทริกซ์และใช้ร่วมกับแผ่นเซรามิกเพื่อสร้างชุดเกราะที่มีน้ำหนักเบา โดยทำการทดสอบการยิงด้วยกระสุน 7.62 x 51 มม. M80 และ 7.62x63 มม. M2 AP ที่ระดับ 3 และ 4 ตามมาตรฐาน NIJ0101.06 ที่ความเร็วในการปะทะที่แตกต่างกันสำหรับการยิง 1 นัดและการยิงหลายนัด



รูปที่ 2.33 รูปแสดงระบบชุดเกราะคอมโพสิตที่ใช้ในการทดสอบยิง และภาพกระสุนที่ใช้ในการทดสอบยิงกระสุน 7.62 x 51 มม. M80 และ 7.62x63 มม. M2 AP[39]

จากการยิงทดสอบจะพบว่าระบบชุดเกราะคอมโพสิตโดยให้แผ่นปะทะเป็นวัสดุเซรามิก เมื่อกระสุนได้กระทบแผ่นเซรามิกจะเกิดการแตกตัวและเปลี่ยนรูปร่างทำให้เกิดความเสียหายในชั้นแรกแผ่กระจายเป็นรูปกรวย ดังรูป 2.34A การกระจายพื้นที่ความเสียหายส่งผลให้พลังงานจลน์ลดลง เกิดการดูดซับพลังงานในชั้นถัดมา จากรูป 2.34B จะเห็นการบีบอัดของอนุภาคทรงกลมของโพลีเอทิลีนบริเวณศูนย์กลาง พื้นที่ที่โดนกระแทกจากกระสุนมีลักษณะทรงกลมที่แบนลง และเกิดการแตกร้าวบางส่วนที่ผิวชั้นงาน ซึ่งจากงานวิจัยนี้สามารถป้องกันกระสุนได้ทั้งระดับ 3 ทั้งการยิงทดสอบ 1 จุดและหลายจุดในเวลาเดียวกัน



รูปที่ 2.34 ภาพแสดงพื้นที่ความเสียหายของชิ้นงานหลังจากทดสอบยิง ที่เกิดขึ้นบนชั้นเซรามิก ซึ่งเป็นชั้นที่หยุดการทะลุทะลวงของกระสุน และอนุภาคทรงกลมที่ได้รับแรงกดอัดในชั้นโพลีเอทิลีนคอมโพสิต (CMF)[39]

A.M.R. Azmi และคณะ[40] ได้ทำการศึกษาการทดสอบแรงดึงและแรงกระแทกของวัสดุใหม่ที่ทำจากเส้นในธรรมชาติ kenaf และแผ่นฟิล์ม x-ray โดยกำหนดรูปแบบการวางแบบสลับกันเพื่อศึกษารูปแบบที่ดีที่สุด ดังตารางที่ 2.6

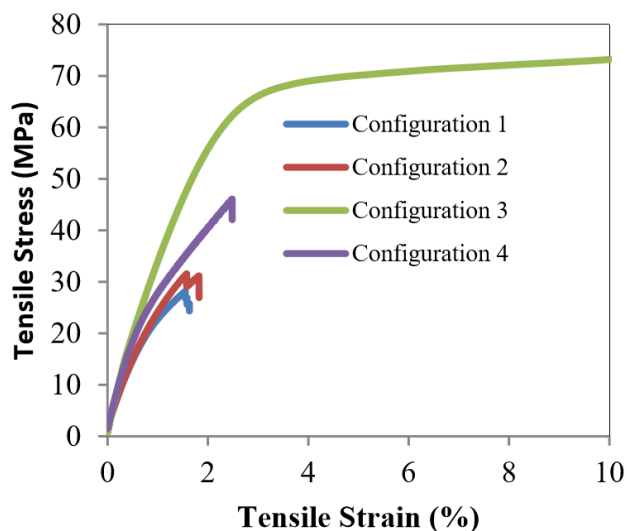
ตารางที่ 2.6 ตารางแสดงการการจัดเรียงชั้นของวัสดุตามลำดับความหนา[40]

Configuration	Layers	Thickness
1	K-X-K-X-K-X-K	6.35mm
2	K-K-X-X-X-K-K	6.40mm
3	X-X-X-X-X-X-X	1.60mm
4	K-K-K-K-K-K-K	8.15mm

K - Kenaf

X - X-ray Film

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบ Tensile stress และ Tensile strain ของชิ้นงานทั้ง 4 รูปแบบ พบว่าชิ้นงานรูปแบบที่ 3 มีความยืดหยุ่นมากกว่าเมื่อเทียบกับรูปแบบอื่นๆ ดังภาพที่ 2.35



รูปที่ 2.35 กราฟแสดง Tensile stress และ Tensile strain ของชิ้นงานทั้ง 4 รูปแบบ[40]

ผลการทดสอบยังพบอีกว่ารูปแบบที่ 4 ที่มีการจัดเรียงโดยใช้ kenaf ทั้งหมดมีคุณสมบัติที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบที่ 1 และรูปแบบที่ 2 ซึ่งเป็นการผสมกันระหว่างวัสดุต่างชนิด ทำให้การยึดติดกันระหว่างชั้นผิวของ kenaf และแผ่นฟิล์ม x-ray ไม่มีประสิทธิภาพ ดังตารางที่

2.7

ตารางที่ 2.7 ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยแรงดึงของชิ้นงานทั้ง 4 รูปแบบ[40]

Conf.	UTS (MPa)	Tensile Modulus (GPa)	Tensile Strain (%)
1	30.59	2.98	1.88%
2	34.15	3.05	1.84%
3	75.52	2.40	15.29%
4	49.61	3.43	2.79%

การทดสอบเสื้อเกราะกันกระสุนพระเจ้าตากของ พ.ต.ท. กฤษฏากร เซวงค์ดีโสภาคย์ [41] โดยใช้วัสดุจากฟิล์มเอ็กซ์เรย์ที่เหลือใช้แล้วจากโรงพยาบาลเนื่องจากมีคุณสมบัติในการรับแรงและกระจายแรงได้ดี พร้อมกับแผ่นโลหะด้านหลังเพื่อลดแรงปะทะจากกระสุนที่เข้ามาและช่วยดูดซับพลังงานมาเป็นส่วนประกอบหลักในการผลิตดังรูปที่ 2.36 ซึ่งผลการทดสอบที่ได้นั้น เสื้อเกราะพระเจ้าตากสามารถกันกระสุนได้ที่ระดับ 2A ตามมาตรฐาน NIJ0101.04 โดยสามารถป้องกันกระสุนปืนพกได้ทุกชนิด สำหรับปืนเล็กยาวนั้น ต้องเสริมแผ่นโลหะเข้า ซึ่งผลการทดสอบพบว่าสามารถหยุดลูกกระสุนปืน M16 A1 ได้ โดยการเสริมแผ่นอะลูมิเนียมด้านหน้าเกราะเพื่อลดแรงปะทะและดูดซับพลังงาน อีกทั้งยังเสริมแผ่นสแตนเลสด้านหลังเกราะเพื่อช่วยในการรับแรงและเศษสะเก็ดโลหะที่หลอมละลายกับหัวลูกกระสุนปืน



รูปที่ 2.36 ภาพแสดงชิ้นงานเสื้อเกราะพระเจ้าตากที่ใช้วัสดุฟิล์มเอ็กซ์เรย์ในทางการแพทย์ มาทดสอบ[42]

การทดสอบเสื้อเกราะบางระจัน โดย พ.ต.ทงพล เอี่ยมบุญ[43] ได้ทำการวิจัยเสื้อเกราะกันกระสุนซึ่งโครงสร้างของเกราะประกอบพัฒนาโลหะพิเศษกันกระสุน ให้มีน้ำหนักเบากว่าแผ่นและใช้วัสดุแผ่นใยสังเคราะห์พิเศษ (Polyethylene) มาประกอบร่วมกับแผ่นเซรามิคปัจจุบันมีน้ำหนักเบาเท่าเทียมกับของเสื้อเกราะที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ ผลการทดสอบเสื้อเกราะบางระจันสามารถป้องกันกระสุนได้ที่ระดับ 2A ถึง 2 ตามมาตรฐาน NIJ0101.04 ดังรูปที่ 2.37



รูปที่ 2.37 ภาพแสดงชิ้นงานเสื้อเกราะบางระจันหลังจากการทดสอบยิง [44]

ธรรม์ณชาติ วันแดง [45] ได้ศึกษาวิจัยปัจจัยที่เหมาะสมในการพัฒนาแผ่นเกราะกันกระสุนจากวัสดุงานประดับยนต์สำหรับทำเสื้อเกราะกันกระสุนที่ระดับการป้องกันระดับ 2 ตามมาตรฐาน NIJ Standard – 0101.06 ที่มีค่าแบล็คเฟซซิกเนเจอร์ต่ำ โดยทำการศึกษาอิทธิพลของการเสริมแผ่นอีพอกซีผสมคาร์บอนไฟเบอร์ 3 ระดับ 0,10,20 ชั้น ที่มีผลต่อการป้องกันการเกิดค่าแบล็คเฟซซิกเนเจอร์ต่อผู้สวมใส่ ในการทดสอบ ในการทดสอบจะนำวัสดุทดสอบแต่ละปัจจัยใส่เสื้อเกราะแบบเปิด – ปิด จำนวน 3 ตัว ทำการทดสอบด้วยกระสุนจริง ขนาด .357 Magnum ทดลองซ้ำ 6 ครั้งต่อการทดลอง จากผลการทดลองพบว่าสามารถหยุดการทะลุของกระสุนได้ที่ระดับการป้องกันระดับ 2 ตามมาตรฐาน NIJ Standard – 0101.06 และปัจจัยด้านการเสริมแผ่นอีพอกซีผสมเส้นใยคาร์บอนมีผลต่อการเกิดค่าแบล็คเฟซซิกเนเจอร์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

- แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 304 ขนาด 30.5 cm x 30.5 cm ความหนา 2 mm
- แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ที่ใช้แล้วจากโรงพยาบาล ทั้งแบบมีตะกั่ว และแบบไม่มีตะกั่ว
- แผ่นเส้นใยคาร์บอน – ไฟเบอร์ ขนาด 160 g/m² จาก Toray Carbon Fibers America, Inc (CFA)

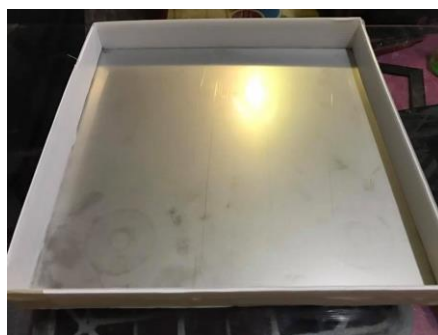
สมบัติของแผ่นเส้นใยคาร์บอน-ไฟเบอร์

Tensile Strength	3,530	MPa
Tensile Modulus	230	GPa
Strain	1.5	%
Density	1.76	g/cm ³

- อีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resin)
- อะซิโตน (Acetone)

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- แม่พิมพ์สำหรับทำชิ้นงานขนาด 30.5 cm x 30.5 cm ทำมาจากแผ่นฟิวเจอร์บอร์ด ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.38 ภาพแสดงแม่พิมพ์สำหรับทำชิ้นงานขนาด 30.5 cm x 30.5 cm

- b) เครื่องชั่งน้ำหนัก ยี่ห้อ DIGI Model รุ่น DS-673 สามารถอ่านค่าได้ทศนิยม 3 ตำแหน่ง
- c) กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope)
- d) กล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ JOEL รุ่น JSM-6400
- e) เครื่องทดสอบแรงดึง – แรงอัด (Universal Testing Machine) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น EZ-S
- f) เครื่องมือทดสอบการป้องกันกระสุนวัสดุ ณ กรมสรรพาวุธตำรวจ สำนักงานตำรวจแห่งชาติ กทม.

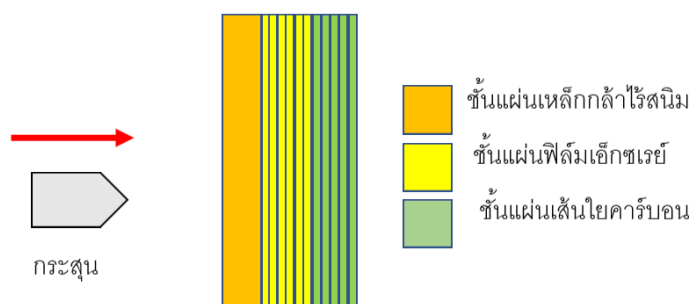
3.3 การสร้างเกราะกันกระสุนและเครื่องมือทดสอบชิ้นงาน

3.3.1 การสร้างชั้นฟิล์มเอ็กซ์เรย์

- a) สร้างแม่พิมพ์สำหรับทำชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 30.5 cm x 30.5 cm
- b) ผสม Epoxy Resin และ Hardener ชนิดใสแข็งด้วยอัตราส่วน 2 : 1 โดยน้ำหนัก
- c) ทำการคนให้เข้ากันอย่างช้าๆ ระวังระวังอย่าให้เกิดฟองอากาศในสารละลาย
- d) เทเรซินลงบนแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ที่วางไว้ในแม่พิมพ์ เกลี่ยให้เรซินท่วมผิวชิ้นงาน
- e) เมื่อเรซินเริ่มแข็งตัวระดับหนึ่ง นำแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์แผ่นถัดไปวางลงบนแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ชั้นแรกอย่างเบา มือ พยายามไม่ให้เกิดฟองอากาศในระหว่างวางแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์
- f) ทำซ้ำตามขั้นตอน d และ e ตามลำดับ จนกว่าจะได้จำนวนแผ่นฟิล์มที่ต้องการ

3.3.2 การประกอบชั้นฟิล์มเอ็กซ์เรย์กับแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมกับแผ่นเส้นใยคาร์บอน

- นำแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมวางไว้ในแม่พิมพ์สำหรับทำชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 30.5 cm x 30.5 cm
- ผสม Epoxy Resin และ Hardener ชนิดใสแข็งด้วยอัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนัก
- ทำการคนให้เข้ากันอย่างช้าๆ ระวังอย่าให้เกิดฟองอากาศในสารละลาย
- เทเรซินลงบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่วางไว้ในแม่พิมพ์ เกลี่ยให้เรซินท่วมผิวแผ่น
- เมื่อเรซินเริ่มแข็งตัวระดับหนึ่ง นำชิ้นงานฟิล์มเอ็กซ์เรย์ที่ได้จากการประกอบในขั้นตอน 3.3.1 ถัดไปวางลงบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมอย่างเบามือ พยายามไม่ให้เกิดฟองอากาศในระหว่างชั้นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ และแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม
- วางชิ้นงานไว้ในอากาศถ่ายเทจนแห้งสนิท
- เทเรซินลงบนแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ ชั้นสุดท้าย เกลี่ยให้เรซินท่วมผิวชิ้นงานอย่างบาง จากนั้นรอเรซินเริ่มแข็งตัวได้ระดับหนึ่ง แล้วจึงนำแผ่นเส้นใยคาร์บอนวางลงไปอย่างเบามือ จะได้โครงสร้างชิ้นงานตามภาพที่ 3.2



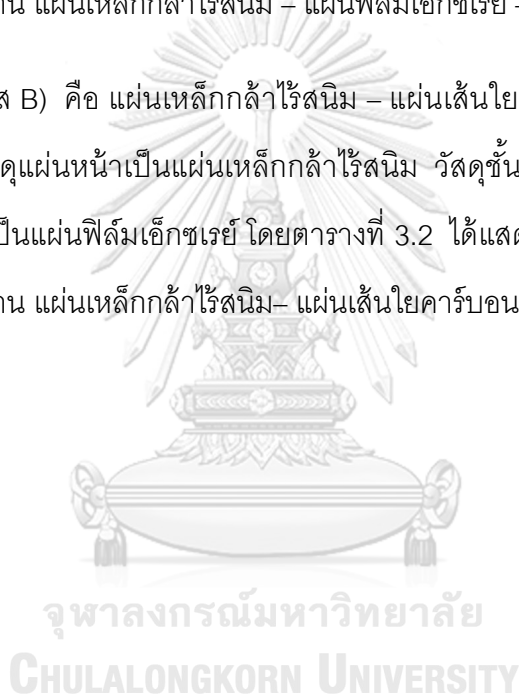
รูปที่ 3.39 ภาพแสดงโครงสร้างชิ้นงานเกราะกันกระสุน ขนาด 30.5 cm x 30.5 cm

- h) ผ่านไป 12 ชั่วโมง เมื่อเรซินแข็งตัวดีแล้ว ให้นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ ตกแต่งขอบของชิ้นงาน

3.4 รูปแบบชิ้นงานทดสอบ

รูปแบบที่ 1 (รหัส A) คือ แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม – แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ – แผ่นเส้นใยคาร์บอน เป็นรูปแบบที่วัสดุแผ่นหน้าเป็นแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม วัสดุชั้นกลางเป็นแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ และชั้นสุดท้ายเป็นแผ่นเส้นใยคาร์บอน โดยตารางที่ 3.1 ได้แสดงการจัดเรียงวัสดุและน้ำหนักของรูปแบบชิ้นงาน แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม – แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ – แผ่นเส้นใยคาร์บอน

รูปแบบที่ 2 (รหัส B) คือ แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม – แผ่นเส้นใยคาร์บอน – แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ เป็นรูปแบบที่วัสดุแผ่นหน้าเป็นแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม วัสดุชั้นกลางเป็นแผ่นเส้นใยคาร์บอน และชั้นสุดท้ายเป็นแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ โดยตารางที่ 3.2 ได้แสดงการจัดเรียงวัสดุและน้ำหนักของรูปแบบชิ้นงาน แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม – แผ่นเส้นใยคาร์บอน – แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์



ตารางที่ 3.8 แสดงการจัดเรียงวัสดุของและน้ำหนักของรูปแบบชิ้นงาน แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม –
แผ่นฟิล์มเอ็กซีเรย์ – แผ่นเส้นใยคาร์บอน

รูปแบบชิ้นงาน แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม - แผ่นฟิล์มเอ็กซีเรย์ - แผ่นเส้นใยคาร์บอน				
รหัส	ชิ้นงาน	น้ำหนักก่อนทำ (kg)	น้ำหนักหลังทำ (kg)	น้ำหนัก Resin(kg)
A1	S1 - X10 - C0	1.558	1.686	0.128
A2	S1 - X10 - C5	1.628	1.864	0.236
A3	S1 - X10 - C10	1.698	1.964	0.266
A4	S1 - X20 - C0	1.798	2.012	0.214
A5	S1 - X20 - C5	1.868	2.180	0.312
A6	S1 - X20 - C10	1.938	2.254	0.316
A7	S1 - X30 - C0	2.038	2.150	0.112
A8	S1 - X30 - C5	2.108	2.350	0.242
A9	S1 - X30 - C10	2.178	2.456	0.278

ตารางที่ 3.9 แสดงการจัดเรียงวัสดุของและน้ำหนักของรูปแบบชิ้นงาน แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม –
แผ่นเส้นใยคาร์บอน- แผ่นฟิล์มเอ็กซีเรย์

รูปแบบชิ้นงาน แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม - แผ่นเส้นใยคาร์บอน- แผ่นฟิล์มเอ็กซีเรย์				
รหัส	ชิ้นงาน	น้ำหนักก่อนทำ (kg)	น้ำหนักหลังทำ (kg)	น้ำหนัก Resin(kg)
B1	S1 - C0- X10	1.558	1.686	0.128
B2	S1 - C5- X10	1.628	1.734	0.106
B3	S1 - C10- X10	1.698	1.872	0.174
B4	S1- C0- X20	1.798	2.012	0.214
B5	S1- C5- X20	1.868	2.062	0.194
B6	S1- C10- X20	1.938	2.120	0.182
B7	S1- C0- X30	2.038	2.150	0.112
B8	S1- C5- X30	2.108	2.296	0.188
B9	S1- C10- X30	2.178	2.364	0.186

ตัวอย่างชิ้นงาน A2 (S1 - X10 - C5) แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมจำนวน 1 แผ่น / แผ่นฟิล์มเอ็กซีเรย์
10 แผ่น / แผ่นเส้นใยคาร์บอน 5 แผ่น

3.5 การตรวจสอบโครงสร้างชิ้นงานเกราะ

3.5.1 การตรวจสอบแบบมหภาค

- a) ตรวจสอบโครงสร้างชิ้นงานให้มีขนาดตามมาตรฐาน NIJ0101.04 คือ 30.5 cm x 30.5 cm
- b) ตรวจสอบความแนบสนิทกันระหว่างชั้นวัสดุ รวมถึงฟองอากาศที่จะอยู่ระหว่างแผ่น
- c) หลังจากทำการยิงแล้ว ตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้นของชิ้นงาน รวมถึงลักษณะการเปลี่ยนรูปของหัวกระสุน ทำการวัดขนาดของความเสียหาย ความลึกของการทะลุทะลวง บันทึกผลของความเสียหาย

3.5.2 การตรวจสอบแบบจุลภาค

- a) ตรวจสอบโครงสร้างของชิ้นงานโลหะโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง
- b) บางกรณีตัวอย่างทดสอบมีขนาดเล็กมากจนไม่สามารถตรวจสอบได้ในกำลังขยายต่ำ จึงต้องใช้อุปกรณ์ที่มีศักยภาพสูงคือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.6 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน

- a) ตัดชิ้นงานทดสอบให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนดไว้คู่มือทดสอบ ASTM
- b) นำชิ้นงานไปทดสอบแรงดึง (Tensile Test)
 - ทำการติดตั้งเครื่องทดสอบที่ใช้สำหรับทดสอบชิ้นงาน
 - บันทึกค่าต่างๆที่จำเป็นลงในโปรแกรมของเครื่องทดสอบ จากนั้นใส่ค่าความเร็วในการทดสอบ รูปทรง และค่าความปลอดภัย
 - ดึงชิ้นงานจนชิ้นงานแยกขาดออกจากกัน
 - บันทึกค่าความเสียหาย จากนั้นนำผลที่ได้มาวาดกราฟ Load – Displacement Curve เพื่อหาค่าพื้นที่ใต้กราฟ ซึ่งจะหาค่าพลังงานที่ใช้ในการเจาะทะลุชิ้นงาน
 - ทำการทดสอบชิ้นงานจนครบ

- วิเคราะห์ผลการทดสอบ

c) บันทึกผลข้อมูล นำไปวิเคราะห์ผล

3.7 การทดสอบยิงตามมาตรฐาน NIJ Standard 0101.04

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ไปทดสอบการยิงที่กองสรรพาวุธตำรวจ สำนักงานตำรวจแห่งชาติ กทม.

3.7.1 ชิ้นงานทดสอบ

ชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในการทดสอบยิงจะต้องมีขนาด 30.5 cm x 30.5 cm

ตามมาตรฐาน NIJ Standard 0101.04 ได้กำหนดไว้

3.7.2 เครื่องมือในการทดสอบยิง

a) อาวุธปืนทดสอบ (Test Barrel) ดังภาพที่ 3.3



รูปที่ 40 ภาพแสดงอาวุธปืนทดสอบ

b) กระสุนทดสอบยิงระดับ 2A ขนาด 9 mm. ดังภาพที่ 3.4



รูปที่ 3.41 ภาพแสดงกระสุนสำหรับทดสอบ

c) เครื่องวัดความเร็วกระสุน (Chronograph) 2 ชุด

รุ่น Oehler 35P Proof Channel Chronograph ดังภาพที่ 3.5



รูปที่ 3.42 ภาพแสดงเครื่องวัดความเร็วกระสุน

d) อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน ดังภาพที่ 3.6

e) กระดาษดิน ดังภาพที่ 3.6



รูปที่ 3.43 ภาพแสดงอุปกรณ์ยึดจับชิ้นงานและกระบะดิน

3.8 ขั้นตอนการทดสอบการยิง

- a) ทำการติดตั้งชิ้นงานเพื่อทำการทดสอบยิง
- b) ทำการติดตั้งอุปกรณ์ตามมาตรฐาน NIJ Standard 0101.04 โดยให้ระยะห่างจากปลายกระบะบอกลงถึงชิ้นงาน 5 เมตร และวางตำแหน่งของเครื่องวัดความเร็วกระสุนด้านหน้าชิ้นงานห่างจากปลายกระบะบอกลง 2 เมตร
- c) ยิงกระสุนปืนขนาด 9 มม. โดยที่ยังไม่ติดตั้งชิ้นงานทดสอบ เพื่อตรวจสอบความเร็วของกระสุนปืนอยู่ในช่วงความเร็ว 341 เมตร / วินาที หรือ 1,120 ฟุต / วินาที (± 30 ฟุต / วินาที) ตามมาตรฐาน NIJ0101.04
- d) ติดตั้งชิ้นงานทดสอบเพื่อทำการทดสอบยิงด้วยกระสุนจริง
- e) ทำการยิงทดสอบ และตรวจสอบความเร็วก่อนยิงและความเร็วหลังยิงจากเครื่องวัดความเร็วที่บันทึกได้ ตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานทดสอบ
- f) บันทึกผลทุกชิ้นงานทดสอบและนำไปวิเคราะห์ผล

3.9 ศึกษาวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

3.9.1 โมเดลการจำลองวัสดุชนิดต่างๆ

งานวิจัยในส่วนนี้จะเป็นการวิเคราะห์แบบจำลองของเกราะใสแบบสองมิติ โดยจำลองชิ้นงานเกราะกันกระสุนและกระสุนที่เข้ามาปะทะชิ้นงาน ด้วยวิธีการสร้างสมมาตรรอบแกนของชิ้นงานแบบจำลอง โดยใช้โปรแกรม AnsysTM ร่วมกับโปรแกรมการออกแบบ ได้แก่ โปรแกรม Solidworks เพื่อประเมินความสามารถในการกันกระสุนเบื้องต้นของเกราะกันกระสุน อีกทั้งยังวิเคราะห์ความเสียหายที่จะเกิดกับเกราะกันกระสุน โดยพิจารณาจากค่าพลังงานจลน์และค่าความเร็วสุดท้ายที่เกิดขึ้น เมื่อกระสุนปะทะกับชิ้นงาน และเพื่อยืนยันผลจากการทดสอบยิงจริง

สมการพื้นฐานที่ใช้แก้ปัญหาการวิเคราะห์แบบ Explicit Dynamic เนื่องจากเป็นการจำลองกิจกรรมทางกายภาพที่มีการรับโหลดรุนแรงในช่วงเวลาสั้นๆ แสดงโดยกฎอนุรักษ์มวล โมเมนตัมและพลังงานของ Lagrange ซึ่งได้รวมโมเดลของวัสดุและตั้งค่าของสภาวะเริ่มต้นและขอบเขต เพื่อหาวิธีการแก้ปัญหาได้อย่างสมบูรณ์

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลองโมเดล Johnson-Cook ซึ่งเป็นโมเดลสำหรับวัสดุประเภทโลหะ เนื่องจากวัสดุมีความเครียดสูงมาก อัตราความเครียดและอุณหภูมิสูง สามารถหาความเค้นที่จุดคราก เมื่อมีฟังก์ชันของความเครียด อัตราความเครียด และอุณหภูมิ[46] ดังสมการที่ 3.1

$$Y = [A + B\varepsilon_p^n] [1 + C \log \dot{\varepsilon}_p^*] [1 - T_H^m] \quad 3.1$$

ε_p คือ ผลกระทบของความเครียดแบบคงรูป (Plastic Strain)

ε_p^* คือ ผลกระทบของอัตราความเครียดคงรูปแบบปกติ

(Normalized Effective Plastic Strain)

T_H คือ อุณหภูมิที่สัมพันธ์กัน

โดยใช้ค่าคงที่ต่างๆของวัสดุแต่ละชนิดที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองความเสียหายของเกราะกันกระสุนดัดและกระสุนดังตารางภาคผนวกที่ ง.1 และ ง.4

สำหรับวัสดุเส้นใยคาร์บอนงานได้ใช้แบบจำลองโมเดล Puff Equation ใช้อธิบายพฤติกรรมของวัสดุจากบริเวณที่มีการบีบอัดไปยังบริเวณที่มีการขยายตัวสูง จึงจำเป็นต้องใช้สมการของ Mie-Gruneisen [47] ตามสมการที่ 3.2 ในการอธิบายความสัมพันธ์ของความดันและปริมาตรของของแข็ง ณ อุณหภูมิหนึ่งในสภาวะที่ถูกบีบอัด

$$P = P_H + \Gamma\rho[e - e_H] \quad 3.2$$

โดยค่าคงที่ต่างหาได้จากสมการ

$$P_H = \frac{\rho_0 c_0^2 \mu (1 + \mu)}{[1 + (S - 1)\mu]^2}$$

$$e_H = \frac{P_H}{2\rho_0} \left(\frac{\mu}{1 + \mu} \right)$$

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$$

P_0 คือ ความดัน ณ สถานะอ้างอิง (Pressure at a reference state)

e_0 คือ พลังงานภายใน ณ สถานะอ้างอิง (Internal Energy at a reference state)

Γ คือ Gruneisen coefficient

ρ คือ ความหนาแน่น (Density)

โดยใช้ค่าคงที่ต่างๆของแผ่นเส้นใยคาร์บอนที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองความเสียหายของเกราะกันกระสุนดังตารางภาคผนวกที่ ง.2

สำหรับวัสดุแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์งานได้ใช้ Hydrocodes ซึ่งความเค้นทั้งหมดจะคำนวณจาก สนามความเครียด ซึ่งแสดงในรูปแบบของเมทริกซ์สำหรับวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็น Orthotropic ตาม ภาพที่ 3.7 โดยใช้ค่าคงที่ต่างๆของแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองความเสียหาย ของเกราะกันกระสุนดังตารางภาคผนวกที่ ง.3

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{yz} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{1-\nu_{yz}\nu_{zy}}{E_y E_z \Delta} & \frac{\nu_{yz}+\nu_{zx}\nu_{yz}}{E_y E_z \Delta} & \frac{\nu_{zx}+\nu_{yx}\nu_{zy}}{E_y E_z \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{yx}+\nu_{zx}\nu_{yz}}{E_y E_z \Delta} & \frac{1-\nu_{yz}\nu_{zx}}{E_x E_z \Delta} & \frac{\nu_{zy}+\nu_{xy}\nu_{zx}}{E_x E_z \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{zx}+\nu_{yx}\nu_{zy}}{E_y E_z \Delta} & \frac{\nu_{zy}+\nu_{xy}\nu_{zx}}{E_x E_z \Delta} & \frac{1-\nu_{xy}\nu_{yx}}{E_x E_y \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{xz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{yz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ 2\varepsilon_{xy} \\ 2\varepsilon_{xz} \\ 2\varepsilon_{yz} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ 2\varepsilon_{xy} \\ 2\varepsilon_{xz} \\ 2\varepsilon_{yz} \end{bmatrix} \\
 \Delta &= \frac{1 - \nu_{xy}\nu_{yx} - \nu_{yz}\nu_{zy} - \nu_{zx}\nu_{xz} - 2\nu_{yx}\nu_{zy}\nu_{xz}}{E_x E_y E_z}
 \end{aligned}$$

รูปที่ 3.44 Hydrocodes จากสนามความเครียด ซึ่งแสดงในรูปแบบของเมทริกซ์

3.9.2 การออกแบบและสร้างเมซของแผ่นเกราะกันกระสุนและกระสุน

ในการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ในขั้นตอนแรกต้องทำการออกแบบรูปร่างของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบนี้ โดยจะเริ่มจากการเตรียมโครงสร้างกระสุนและแผ่นเกราะที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมด 3 ชั้น ได้แก่แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งเป็นแผ่นปะทะ แผ่นเส้นใยคาร์บอน และแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ตามลำดับโดยโครงสร้างระหว่างแผ่นจะถูกเชื่อมต่อกันด้วย Epoxy resin จึงเข้าปะทะกระสุนด้วยความเร็ว 350 m/s โดยในขั้นตอนนี้ จะเลือกใช้โมเดลของวัสดุที่มีอยู่แล้วในฐานข้อมูลของซอฟต์แวร์ ANSYS โดยโครงสร้างวัสดุของกระสุนจะใช้ทองเหลือง (Brass) เป็นเปลือกกระสุน และตะกั่ว (Lead) เป็นเนื้อแกนกระสุน ซึ่งจะใช้โมเดลของวัสดุในฐานข้อมูลโดยไม่มี การแก้ไขโดยชนิดของโมเดล ดังภาพที่ 3.8 โดยมีการจำลองโมเดลเกราะกันกระสุน 3 รูปแบบ ได้แก่

รูปแบบที่ 1 : แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 1 แผ่น แผ่นเส้นใยคาร์บอน 10 แผ่น และแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์

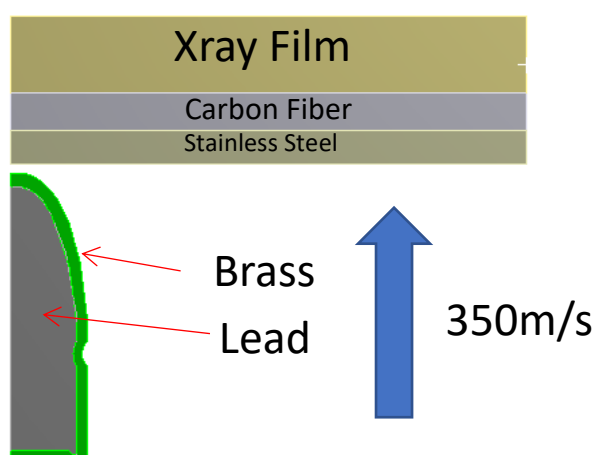
20 แผ่น (S1 - C10 - X20) ความหนาชิ้นงานเกราะรวมเท่ากับ 8.64 mm

รูปแบบที่ 2 : แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 1 แผ่น แผ่นเส้นใยคาร์บอน 8 แผ่น และแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์

20 แผ่น (S1 - C8 - X20) ความหนาชิ้นงานเกราะรวมเท่ากับ 8.18 mm

รูปแบบที่ 3 : แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 1 แผ่น แผ่นเส้นใยคาร์บอน 6 แผ่น และแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์

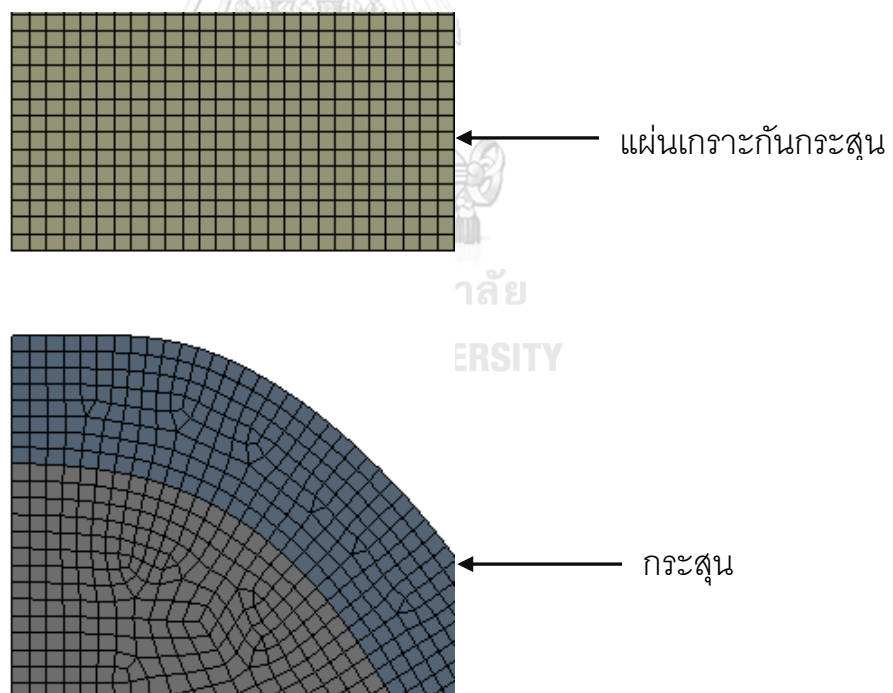
20 แผ่น (S1 - C6 - X20) ความหนาชิ้นงานเกราะรวมเท่ากับ 7.82 mm



รูปที่ 3.45 ภาพการจำลองแผ่นเกราะกันกระสุนและกระสุนโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การสร้างเมช เป็นขั้นตอนที่สำคัญมากขั้นตอนหนึ่ง โดยผู้วิจัยต้องทำการแบ่งโครงสร้างของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบแบ่งออกเป็นชิ้นส่วนเล็กๆ เรียกว่าเอลิเมนต์ (Element) เรียงต่อเนื่องกันโดยทั่วไปแล้วจะต้องใช้ชนิดของเอลิเมนต์ให้เหมาะสมกับรูปร่างของชิ้นงาน ลักษณะของแรงกระทำที่กระทำต่อชิ้นงาน จากนั้นโปรแกรมก็จะคำนวณผลและเชื่อมโยงผลในแต่ละตำแหน่งที่เป็นขอบมุมของเอลิเมนต์ที่เรียกว่า Node

โดยทั่วไปแล้วชนิดของเอลิเมนต์จะแบ่งออกเป็น 3 ประเภทได้แก่ เอลิเมนต์มิติเดียว เอลิเมนต์สองมิติ และเอลิเมนต์สามมิติ สำหรับการศึกษาในงานนี้จะเป็นการวิเคราะห์ปัญหาในรูปแบบสามมิติ ดังภาพที่ 3.9 จะแสดงส่วนของแผ่นเกราะกันกระสุนใช้การสร้างเอลิเมนต์แบบ Quadrominant และ เอลิเมนต์ของกระสุนเป็นชนิดแบบ Tri Element with quadrominant ซึ่งมีคุณภาพอยู่ที่ 99.5%



รูปที่ 3.46 ภาพการสร้างเมชของชิ้นงานแผ่นเกราะกันกระสุนและกระสุนในโปรแกรม ANSYS

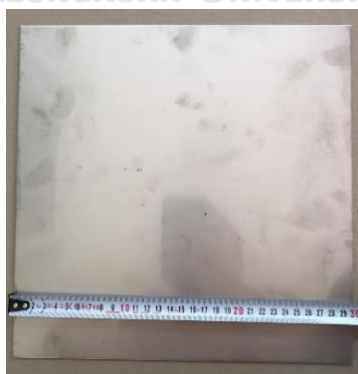
บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 ผลการทดสอบลักษณะทางกายภาพของวัสดุ

4.1.1) แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม

เมื่อตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 304 ดังแสดงในรูป 4.1 พบว่าพื้นผิวทั่วชิ้นงานมีลักษณะมันวาว ผิวเรียบเสมอกันทั้งสองด้าน ไม่มีขอบคมตามขอบและมุม มีความหนาของแผ่น 2 mm และมีขนาด 30.5 cm x 30.5 cm ตามมาตรฐานทดสอบ NIJ0101.04[11] และตารางที่ 4.1 ได้แสดงส่วนประกอบทางเคมีของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ด้วยวิธีวิเคราะห์ Spark source optical emission spectrometry ซึ่งพบว่ามีปริมาณของธาตุผสมของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน[29] และตารางที่ 4.2 ได้แสดงสมบัติทางกลด้วยการวิเคราะห์จากเครื่อง HOUNSFIELD รุ่น UTM (H10KM) และรูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) ของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 จากกราฟการทดสอบพบว่า เมื่อเริ่มดึงชิ้นงานทดสอบความเค้นและความเครียดเป็นสัดส่วนคงที่โดยมีความสัมพันธ์เป็นกราฟเส้นตรง พบว่าค่ามอดุลัสความยืดหยุ่น เท่ากับ 4.487 GPa (ดูตารางที่ 4.2) โดยบริเวณจุดครากมีความเค้นประมาณ 360 MPa หลังจากนั้นเมื่อความเครียดเพิ่มขึ้น ค่าความเค้นจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ โดยมีค่าความเค้นสูงสุด เท่ากับ 691 MPa (ดูตาราง ที่ 4.2) จากนั้นค่าความเค้นจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดจนกระทั่งวัสดุขาดออกจากกัน



รูปที่ 4.47 แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 30.5 cm X 30.5 cm

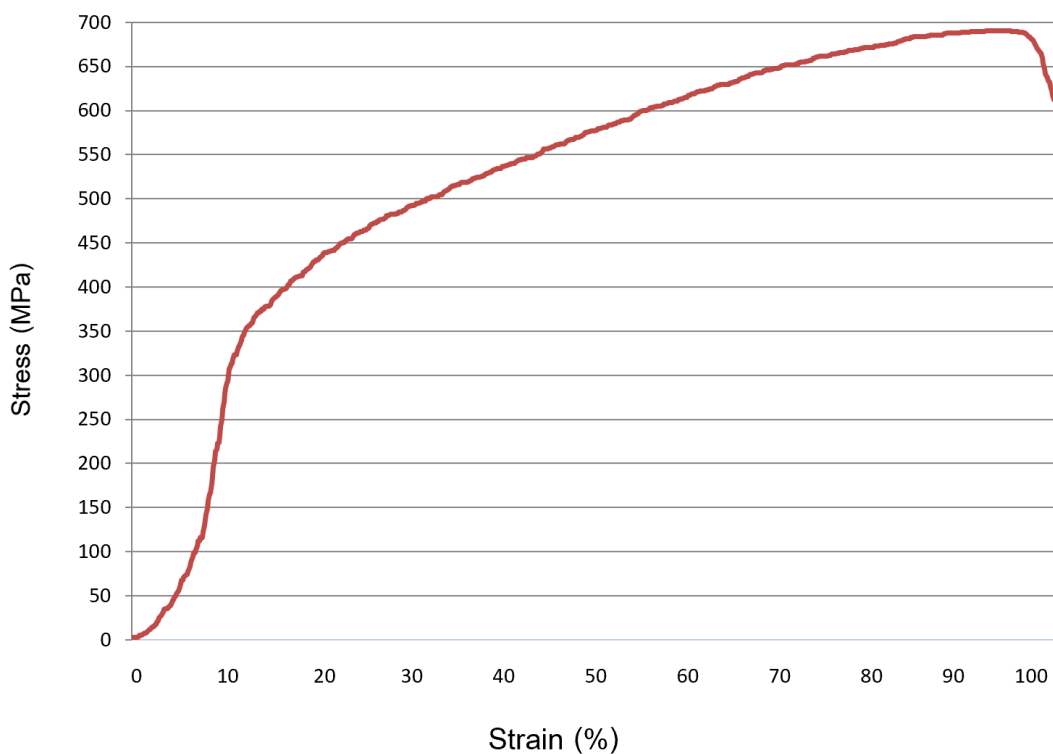
ตารางที่ 4.10 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304

ปริมาณธาตุผสม (wt.%) ของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 304										
Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	V
71.74	0.022	0.506	1.208	0.025	0.0084	18.00	0.103	8.273	0.107	0.0086

ตารางที่ 4.11 แสดงสมบัติทางกลของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304

E Modulus (GPa)	Max Stress (MPa)	Break Stress (MPa)	Elongation at break (%)
4.467	691	-	89.6

ผลการทดสอบแรงดึงของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304



รูปที่ 4.48 กราฟแสดงผลการทดสอบแรงดึงของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304

4.1.2) แผ่นเส้นใยคาร์บอน

เมื่อตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของแผ่นเส้นใยคาร์บอนพบว่าการถักใยทอประสานกันเป็นแผ่นยึดติดกันแน่น ไม่มีบริเวณใดบริเวณหนึ่งหลุดออกมาเป็นขุย และมีผิวลื่น ดังรูปที่ 4.3 แสดงชิ้นงานวัสดุเส้นใยคาร์บอนขนาด 30.5 cm X 30.5 cm และตารางที่ 4.3 ได้แสดงสมบัติทางกลด้วยการวิเคราะห์จากเครื่อง HOUNSFIELD รุ่น UTM (H10KM) รูปที่ 4.4 กราฟแสดงผลการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) ของแผ่นเส้นใยคาร์บอน จากกราฟการทดสอบพบว่า เมื่อทำการดึงชิ้นงานทดสอบ ความเค้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเครียดเพิ่มขึ้น มีความสัมพันธ์เป็นกราฟเส้นตรง โดยมีค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น เท่ากับ 25.85 GPa และจุดคราก (Yield Stress) เท่ากับ 444 MPa (ดูตารางที่ 4.3) จนวัสดุยืดออกจนถึงค่าความเค้นสูงสุด ที่ 444.1 MPa จนกระทั่งวัสดุขาดออกจากกันที่ความเค้นเท่ากับ 4323 MPa

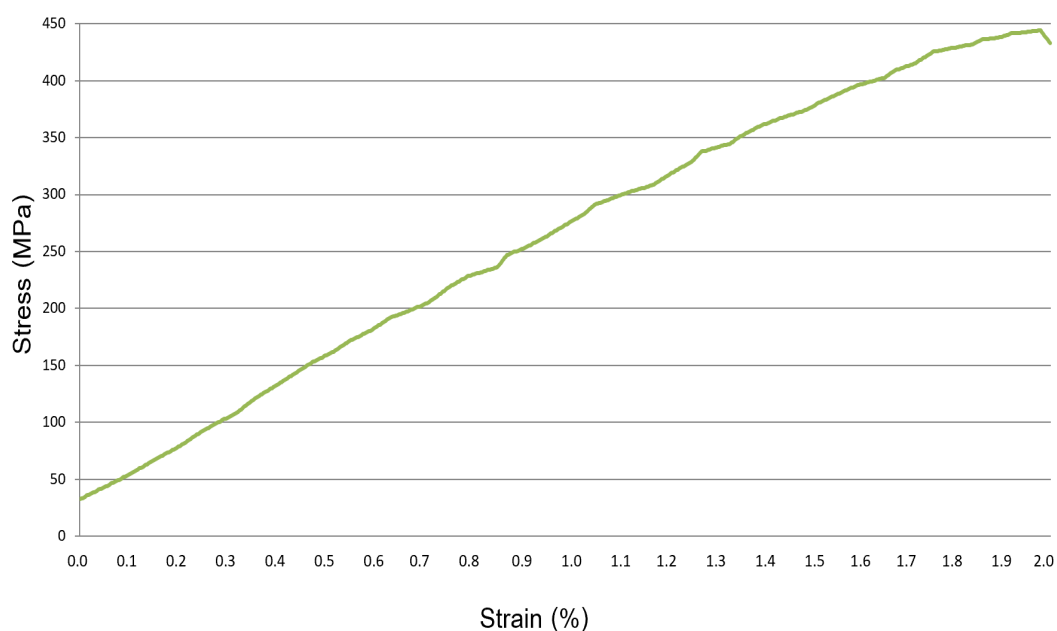


รูปที่ 4.49 แผ่นวัสดุเส้นใยคาร์บอนขนาด 30.5 cm X 30.5 cm

ตารางที่ 4.12 แสดงสมบัติทางกลของแผ่นเส้นใยคาร์บอน

E Modulus (GPa)	Yield Stress (MPa)	Max Stress (MPa)	Break Stress (MPa)	Break Extension (%)
25.85	444	444	433	2.0

ผลการทดสอบแรงดึงของแผ่นเส้นใยคาร์บอน



รูปที่ 4.50 กราฟแสดงผลการทดสอบแรงดึงของแผ่นเส้นใยคาร์บอน

4.1.3) แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์

แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ที่นำมาใช้ทำเกราะมีความเรียบ มีสีดำทึบและมีสีฟ้าในบางบริเวณ ได้ทำการปรับสภาพผิวด้วยการใช้ผ้าสะอาดเช็ดฝุ่นทุกแผ่น เพื่อป้องกันช่องว่างขนาดเล็กระหว่างแผ่นในขณะทำการเชื่อมประสานด้วย Epoxy resin โดยรูปที่ 4.5 แสดงชิ้นงานแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ขนาด 30.5 cm x 30.5 cm และในตารางที่ 4.4 แสดงสมบัติทางกลของแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ ด้วยการวิเคราะห์จากเครื่อง HOUNSFIELD รุ่น UTM (H10KM) รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) ของแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ จากกราฟการทดสอบพบว่า เมื่อเริ่มดึงชิ้นงานทดสอบ ค่าความเค้นและความเครียดเป็นสัดส่วนคงที่โดยมีความสัมพันธ์เป็นกราฟเส้นตรง พบว่าค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น เท่ากับ 2.48 GPa (ดูตาราง ที่ 4.4) โดยบริเวณจุดครากมีความเค้นประมาณ 84 MPa หลังจากนั้นเมื่อความเครียดเพิ่มขึ้น ค่าความเค้นจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ โดยมีค่าความเค้นสูงสุดเท่ากับ 146 MPa (ดูตาราง ที่ 4.4) จนกระทั่งวัสดุขาดออกจากรันที่ค่าความเค้นเท่ากับ 146 MPa

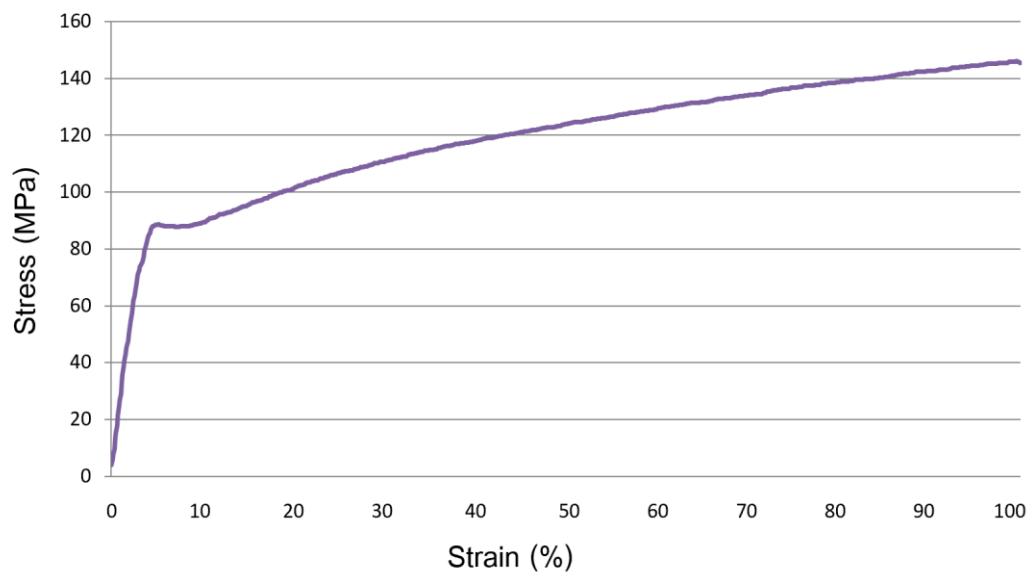


รูปที่ 4.51 แผ่นฟิล์มอินเดียม 30.5 cm x 30.5 cm

ตารางที่ 4.13 แสดงสมบัติทางกลของแผ่นฟิล์มอินเดียม

E Modulus (GPa)	Yield Stress (MPa)	Max Stress (MPa)	Break Stress (MPa)	Break Extension (%)
2.48	146.2	146.2	145.5	99.2

ผลการทดสอบแรงดึงของแผ่นฟิล์มอินเดียม

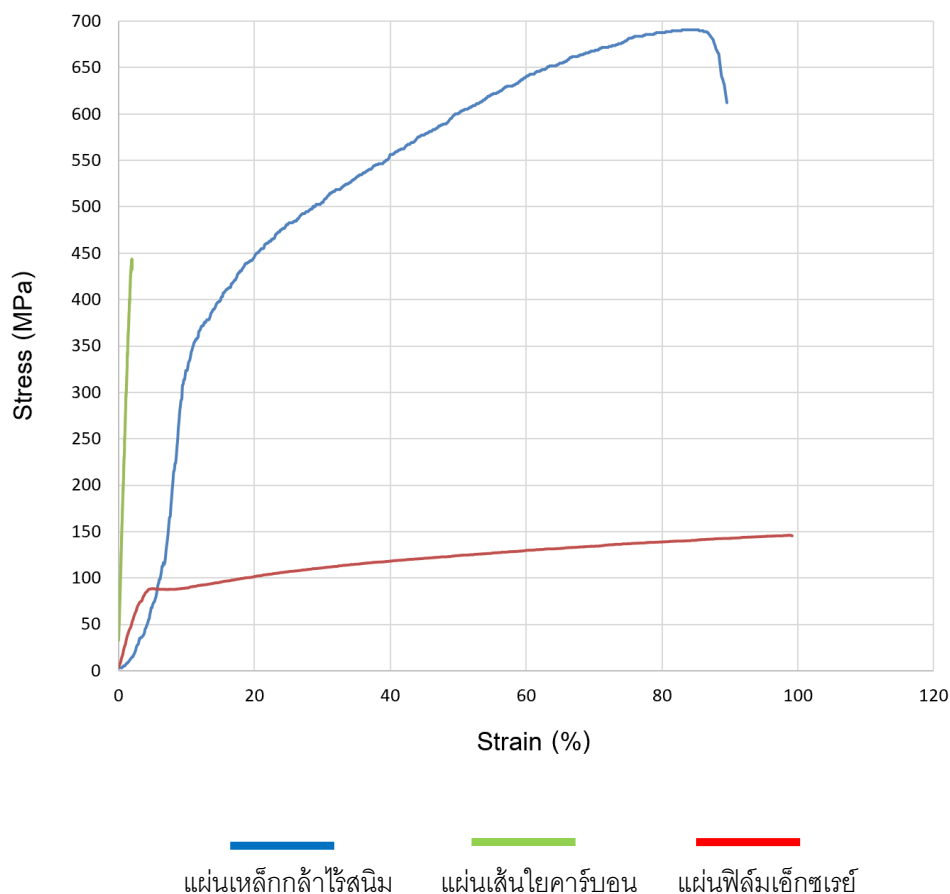


รูปที่ 4.52 กราฟแสดงผลการทดสอบแรงดึงของแผ่นฟิล์มอินเดียม

4.1.4) ผลการทดสอบแรงดึงเปรียบเทียบกันระหว่างวัสดุทั้ง 3 ชนิด

เมื่อทำการเปรียบเทียบกราฟแสดงผลการทดสอบแรงดึงของวัสดุทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม แผ่นเส้นใยคาร์บอน และแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ จากรูปที่ 4.7 พบว่า เมื่อพิจารณาพื้นที่ใต้กราฟของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นวัสดุที่มีความเหนียวและแข็งแรงที่สุดโดยค่าความเค้นของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมสูงสุดเท่ากับ 691 MPa จากนั้นกราฟจะลดลงมาโดยมีค่าความเครียดประมาณ 90% เมื่อพิจารณาเส้นกราฟของแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์มีค่าความเค้นสูงสุดเท่ากับ 146 MPa โดยมีค่าเครียดประมาณ 100% และเมื่อพิจารณาพื้นที่ใต้กราฟจะพบว่าเป็นวัสดุที่มีความอ่อนตัวและมีความเหนียว และเมื่อพิจารณาเส้นกราฟของแผ่นเส้นใยคาร์บอนจะพบว่าวัสดุมีค่าความเค้นสูงสุด ที่ประมาณ 444.1 MPa จนกระทั่งวัสดุขาดออกจากกันที่ความเครียดประมาณ 2% โดยเมื่อพิจารณาจากกราฟพบว่าวัสดุชนิดที่แข็งแรงแต่เปราะ

ผลการทดสอบของแรงดึงของวัสดุทั้ง 3 ชนิด



รูปที่ 4.53 กราฟแสดงผลการทดสอบแรงดึงเปรียบเทียบระหว่างวัสดุ 3 ชนิด

4.2 ผลการทดสอบการเจาะทะลุของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304

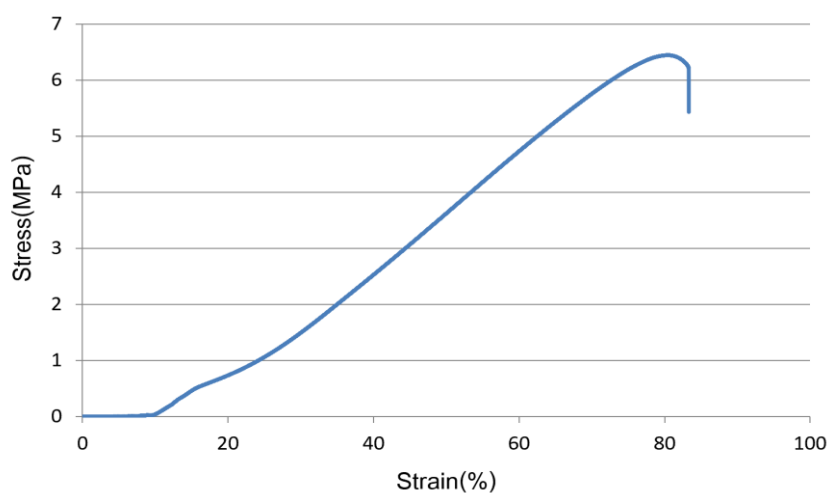
เมื่อนำชิ้นงานแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 มาทดสอบการเจาะทะลุ เพื่อหาค่าพลังงานการแตกหักซึ่งจำลองหวักดให้มีขนาดใกล้เคียงกับกระสุนขนาด 9 mm ตามรูปที่ 4.8 ด้วยเครื่องทดสอบแรง Universal Testing Machine (UTM) โดยใช้ความเร็ว 1 mm/min รูปที่ 4.9 กราฟแสดงผลการทดสอบการเจาะทะลุของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 จากกราฟของการทดสอบพบว่า เมื่อชิ้นงานทดสอบถูกกดลงด้วยความเร็วดังกล่าวความเค้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเครียดเพิ่มขึ้น โดยมีความสัมพันธ์เป็นกราฟเส้นตรง จนเมื่อค่าความเค้นสูงสุดประมาณ 6.4 MPa ความเค้นมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด จนวัสดุแตกหักหรือทะลุที่ความเค้นประมาณ 5.2 MPa



รูปที่ 4.54 ภาพแสดงหวักดที่จำลองหวักระสุนขนาด 9 mm

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการทดสอบการเจาะทะลุของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304



รูปที่ 4.55 กราฟแสดงผลการทดสอบการเจาะทะลุของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304

4.3 การตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพของชิ้นงานเกราะก่อนทำการทดสอบยิง

จากการตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพของชิ้นงานเกราะที่ใช้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม, แผ่นฟิล์มเอ็กซีเรย์และแผ่นเส้นใยคาร์บอน ตามจำนวนชิ้นงานที่ได้กำหนดไว้ โดยยึดประสานด้วยกาว Epoxy resin จากรูปที่ 4.10 จะเห็นว่าการประกบกันด้วยวัสดุชนิดเดียวกัน และวัสดุต่างชนิดกัน สามารถยึดติดประสานกันได้ดี บริเวณรอยต่อของวัสดุแนบสนิทชิดกัน ไม่เกิดการแยกกันของรอยต่อ ไม่เกิดฟองอากาศขึ้นในชิ้นงาน โดยรูปที่ 4.9 แสดงชิ้นงานรูปแบบ S1 – X30 – C10 (แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมจำนวน 1 แผ่น, แผ่นฟิล์มเอ็กซีเรย์จำนวน 30 แผ่น , แผ่นเส้นใยคาร์บอนจำนวน 10 แผ่น) ความหนาเฉลี่ยของแต่ละชิ้นงานเกราะประมาณ 1 cm (ข้อมูลสมบัติจำเพาะของวัสดุแสดงดังในตารางที่ 4.5)



รูปที่ 4.56 แสดงภาพด้านข้างของชิ้นงานเกราะที่ผลิตจาก แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม จำนวน 1 แผ่น แผ่นฟิล์มเอ็กซีเรย์จำนวน 30 แผ่น และแผ่นเส้นใยคาร์บอนจำนวน 10 แผ่น ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.14 ตารางแสดงสมบัติจำเพาะของวัสดุต่อ 1 แผ่น (ขนาดชิ้นงาน 30.5 cm x 30.5 cm)

ชนิดของวัสดุ	น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (cm ³)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม	1.318	186.05	0.0070
แผ่นเส้นใยคาร์บอน	0.014	0.0080	1.76
แผ่นฟิล์มเอ็กซีเรย์	0.024	9.3025	0.0026

4.4 ผลการทดสอบยิงด้วยกระสุนจริงขนาด 9 mm จำนวน 5 นัด ตามมาตรฐาน NIJ0101.04

4.4.1 ชิ้นงานเกราะรูปแบบ แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม – แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ – แผ่นเส้นใยคาร์บอน


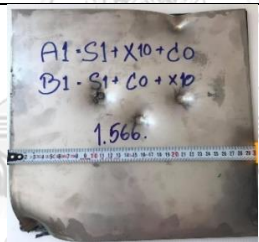



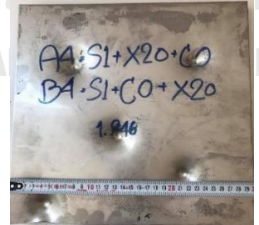


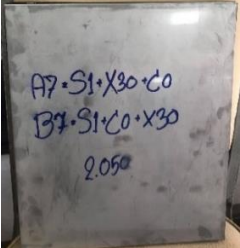



จากการทดสอบยิงด้วยกระสุนจริงขนาด 9 mm จำนวน 5 นัด ตามมาตรฐาน NIJ0101.04 โดยมีแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นแผ่นปะทะด้านหน้า พบว่าทุกชิ้นงานสามารถต้านทานกระสุนได้ ซึ่งแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (แผ่นปะทะ) สามารถหยุดกระสุนและทำลายหัวกระสุนให้แตกได้ แต่เนื่องจากผลของพลังงานจลน์จากกระสุนที่ปะทะเข้ามาทำให้เกิดรอยยุบตัวบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ความรุนแรงดังกล่าวส่งผลให้เกิดการแยกระหว่างชั้นวัสดุที่ต่างชนิดกัน พบรอยแตกกว่าที่แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ และเกิดการปริแตกที่แผ่นหลัง แต่ไม่ทำให้วัสดุแผ่นหลังทะลุ โดยความเสียหายดังกล่าวจะมีความรุนแรงลดลงเมื่อมีการเพิ่มจำนวนชั้นวัสดุ โดยในตารางที่ 4.6 ได้แสดงผลการทดสอบยิงเกราะด้วยกระสุนขนาด 9 mm จำนวน 5 นัด ณ บริเวณที่ต่างกันบนชิ้นงาน และตารางที่ 4.6, 4.7, 4.8 แสดงผลการทดสอบด้วยกระสุนจริง โดยเปรียบเทียบชิ้นงานออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 คือรูปแบบไม่ใช้แผ่นเส้นใยคาร์บอน กลุ่มที่ 2 คือรูปแบบที่ใช้แผ่นเส้นใยคาร์บอนจำนวน 5 แผ่น และกลุ่มที่ 3 คือรูปแบบที่ใช้แผ่นเส้นใยคาร์บอนจำนวน 10 แผ่น แล้วแต่ละกลุ่มใช้จำนวนแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์เป็น 10, 20 และ 30 แผ่น ตามลำดับ

ตารางที่ 4.15 ผลการทดสอบยิงเกราะกันกระสุนรูปแบบชิ้นงานแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม - แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ – แผ่นเส้นใยคาร์บอน

รูปแบบชิ้นงาน แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม - แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ – แผ่นเส้นใยคาร์บอน						
รหัสชิ้นงาน		ความเร็วกระสุนเฉลี่ย (m/s)	ผลการยิงทดสอบ		ขนาดความเสียหายของหลุม	
			ทะลุ	ไม่ทะลุ	ความกว้างเฉลี่ย (cm)	รอยยุบเฉลี่ย (cm)
A1	S1 - X10 - C0	350		√	5.70	0.69
A2	S1 - X10 - C5	350		√	5.10	0.54
A3	S1 - X10 - C10	350		√	4.40	0.52
A4	S1 - X20 - C0	350		√	5.50	0.64
A5	S1 - X20 - C5	350		√	4.60	0.56
A6	S1 - X20 - C10	350		√	4.20	0.46
A7	S1 - X30 - C0	350		√	4.60	0.59
A8	S1 - X30 - C5	350		√	4.30	0.55
A9	S1 - X30 - C10	350		√	4.10	0.45

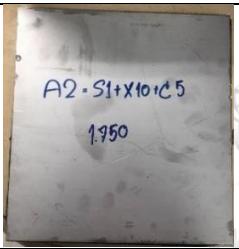



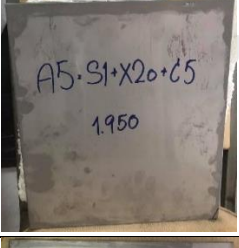
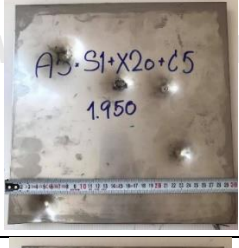


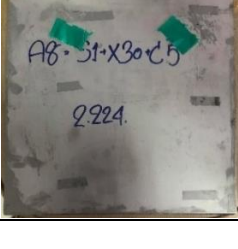
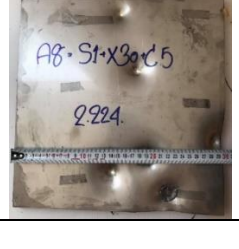


เมื่อทำการเปรียบเทียบความเสียหายหลังจากการทดสอบยิงจริงของรูปแบบเกราะกลุ่มที่ผลิตจากแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมจำนวน 1 แผ่น ใช้แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์จำนวน 10, 20 และ 30 แผ่น ตามลำดับ เมื่อไม่ใช้แผ่นเส้นใยคาร์บอน พบว่าทุกรูปแบบสามารถต้านทานการทะลุทะลวงของกระสุนได้ไว้ที่ชั้นแรก แต่ผลจากแรงปะทะของกระสุนที่พุ่งเข้ามาทำให้เกิดความเสียหายที่แผ่นหลัง เมื่อพิจารณาจากความเสียหายแผ่นหลังของเกราะจะพบว่า เมื่อใช้แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์จำนวน 10 แผ่น จะเห็นผลของการทะลุทะลวงมากขึ้นที่วัสดุแผ่นหลัง แต่เมื่อเพิ่มจำนวนแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์มากขึ้น จะช่วยลดอำนาจการทะลุทะลวงของกระสุน ทำให้ระยะยุบที่วัสดุแผ่นหลังมีขนาดเล็กลงแต่ทั้งนี้ยังทำให้ชิ้นงานที่แผ่นหลังเกิดความเสียหายเป็นวงกว้าง ดังดูได้จากตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.16 แสดงผลการทดสอบด้วยกระสุนจริง ขนาด 9 mm จำนวน 5 นัดที่ความเร็วเฉลี่ย 350 m/s รูปแบบชิ้นงาน แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม-แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์-แผ่นเส้นใยคาร์บอน รหัสชิ้นงาน A1 (S1 - X10 - C0), A4 (S1 - X20 - C0), A7 (S1 - X30 - C0)

รหัส	ชิ้นงานก่อนยิง (ด้านหน้า)	ชิ้นงานหลังยิง		
		ด้านหน้า (แผ่นปะทะ)	ด้านหลัง	ด้านข้าง
A1				
A4				
A7				

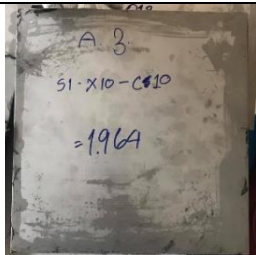
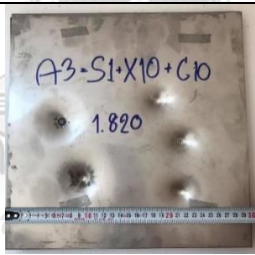


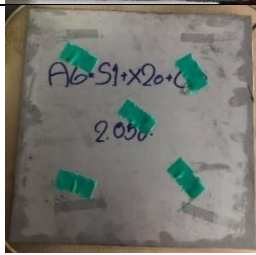
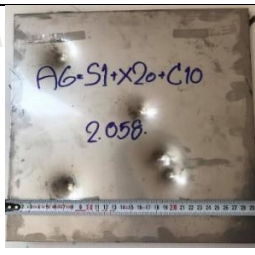


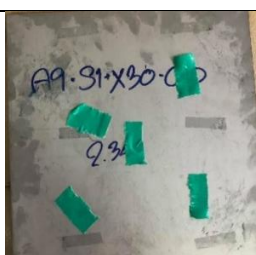



เมื่อทำการเปรียบเทียบความเสียหายหลังจากการทดสอบยิงจริงของรูปแบบเกราะกลุ่มที่ผลิตจากแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมจำนวน 1 แผ่น ใช้แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์จำนวน 10, 20 และ 30 แผ่น ตามลำดับ โดยใช้แผ่นเส้นใยคาร์บอนจำนวน 5 แผ่น พบว่าทุกรูปแบบสามารถต้านทานการทะลุทะลวงของกระสุนได้ไว้ที่ชั้นแรก ซึ่งผลจากแรงปะทะของกระสุนที่พุ่งเข้ามาทำให้เกิดความเสียหายที่แผ่นหลัง เมื่อพิจารณาจากความเสียหายแผ่นหลังของเกราะจะพบว่า เมื่อเสริมแผ่นเส้นใยคาร์บอนเป็นวัสดุที่แผ่นหลัง ส่งผลให้ความเสียหายที่เกิดขึ้นลดน้อยลง ไม่เกิดความเสียหายเป็นบริเวณกว้าง ระยะรอยยุบมีขนาดเล็กลงเมื่อเพิ่มจำนวนแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์เป็น 10, 20 และ 30 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการเสริมแผ่นเส้นใยคาร์บอน ดังดูได้จากตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.17 แสดงผลการทดสอบด้วยกระสุนจริงขนาด 9 mm จำนวน 5 นัด ที่ความเร็วเฉลี่ย 350 m/s รูปแบบชิ้นงาน แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม-แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์-แผ่นเส้นใยคาร์บอน รหัสชิ้นงาน A2 (S1 - X10 - C5), A5 (S1 - X20 - C5), A8 (S1 - X30 - C5)

รหัส	ชิ้นงานก่อนยิง (ด้านหน้า)	ชิ้นงานหลังยิง		
		ด้านหน้า (แผ่นปะทะ)	ด้านหลัง	ด้านข้าง
A2				
A5				
A8				

เมื่อทำการเปรียบเทียบความเสียหายหลังจากการทดสอบยิงจริงของรูปแบบเกราะที่ผลิตจากแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมจำนวน 1 แผ่น ใช้แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์จำนวน 10, 20 และ 30 แผ่น ตามลำดับ โดยใช้แผ่นเส้นใยคาร์บอนจำนวน 10 แผ่น พบว่าทุกรูปแบบสามารถต้านทานการทะลุทะลวงของกระสุนได้ไว้ที่ชั้นแรก ความแตกต่างที่เห็นได้ชัดกว่ารูปแบบที่ใช้แผ่นเส้นใยคาร์บอน 5 แผ่น คือ ความเสียหายที่เกิดขึ้นของวัสดุแผ่นหลังมีแนวโน้มที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด รอยปริแตกที่เกิดขึ้นมีขนาดลดลง รวมถึงความกว้างของหลุมปะทะและระยะยุบของแผ่นเกราะเกิดขึ้นน้อยลง โดยในรูปแบบ A9 ที่ใช้จำนวนแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์มากที่สุดและแผ่นเส้นใยคาร์บอนมากที่สุด ความเสียหายที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กสุดเมื่อเทียบกับรูปแบบอื่นๆ ดังดูได้จากตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.18 แสดงผลการทดสอบด้วยกระสุนจริงขนาด 9 mm จำนวน 5 นัด ที่ความเร็วเฉลี่ย 350 m/s รูปแบบชิ้นงาน แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม-แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์-แผ่นเส้นใยคาร์บอน รหัสชิ้นงาน A3 (S1 - X10 - C10), A6 (S1 - X20 - C10), A9 (S1 - X30 - C10)

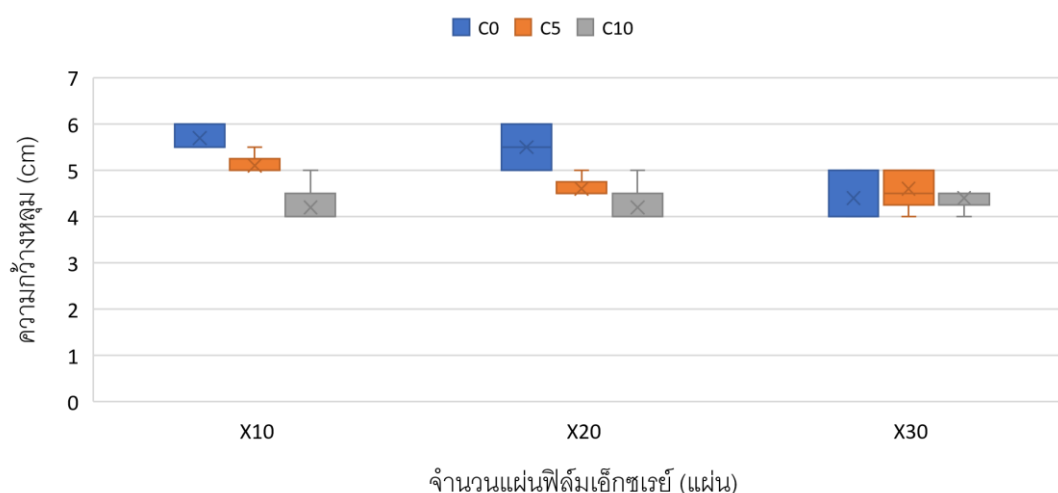
รหัส	ชิ้นงานก่อนยิง (ด้านหน้า)	ชิ้นงานหลังยิง		
		ด้านหน้า (แผ่นปะทะ)	ด้านหลัง	ด้านข้าง
A3				
A6				
A9				

4.4.1.1 ผลของจำนวนแผ่นเส้นใยคาร์บอนที่มีต่อขนาดความกว้างของหลุมและระยะลึกของหลุม

ชิ้นงานเกาะรูปแบบ แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม- แผ่นฟิล์มเอ็กซีเรย์- แผ่นเส้นใยคาร์บอน การทดสอบชิ้นงานเกาะรูปแบบแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (แผ่นปะทะ) แผ่นฟิล์มเอ็กซีเรย์ (ชั้นกลาง) และแผ่นเส้นใยคาร์บอน (แผ่นหลัง) เมื่อพิจารณาชิ้นงานที่ A1, A2, A3 ซึ่งเป็นกลุ่มของชิ้นงานที่มีจำนวนแผ่นฟิล์มเอ็กซีเรย์ 10 แผ่นเท่ากัน และเพิ่มจำนวนแผ่นเส้นใยคาร์บอนชิ้นงานละ 5 แผ่น ตามลำดับ เมื่อวัดขนาดความกว้างของหลุมปะทะหลังจากการทดสอบยิ่งพบว่า ขนาดความกว้างจะเล็กลง เมื่อเพิ่มจำนวนแผ่นเส้นใยคาร์บอน ในขณะเดียวกัน เมื่อวัดระยะรอยยุบของชิ้นงานพบว่า มีขนาดลดลง เมื่อเพิ่มจำนวนแผ่นเส้นใยคาร์บอนเช่นกัน เมื่อตรวจสอบกลุ่มของชิ้นงาน A4, A5, A6 ซึ่งเป็นกลุ่มของชิ้นงานที่มีจำนวนแผ่นฟิล์มเอ็กซีเรย์ 20 แผ่นเท่ากัน โดยเพิ่มจำนวนแผ่นเส้นใยคาร์บอนชิ้นงานละ 5 แผ่น ตามลำดับ และชิ้นงาน A7, A8, A9 ซึ่งเป็นกลุ่มของชิ้นงานที่มีจำนวนแผ่นฟิล์มเอ็กซีเรย์ 30 แผ่นเท่ากัน โดยเพิ่มจำนวนแผ่นเส้นใยคาร์บอนชิ้นงานละ 5 แผ่น ตามลำดับ พบว่ามีความกว้างของหลุมปะทะแนวโน้มเล็กลง และระยะรอยยุบลดลง ดังรูปที่ 4.11 แสดงผลของจำนวนแผ่นเส้นใยคาร์บอนที่มีผลต่อขนาดความกว้างของหลุมบนแผ่นปะทะ และรูปที่ 4.12 แสดงผลของจำนวนแผ่นเส้นใยคาร์บอนที่มีผลขนาดความลึกของชิ้นงานเกาะ

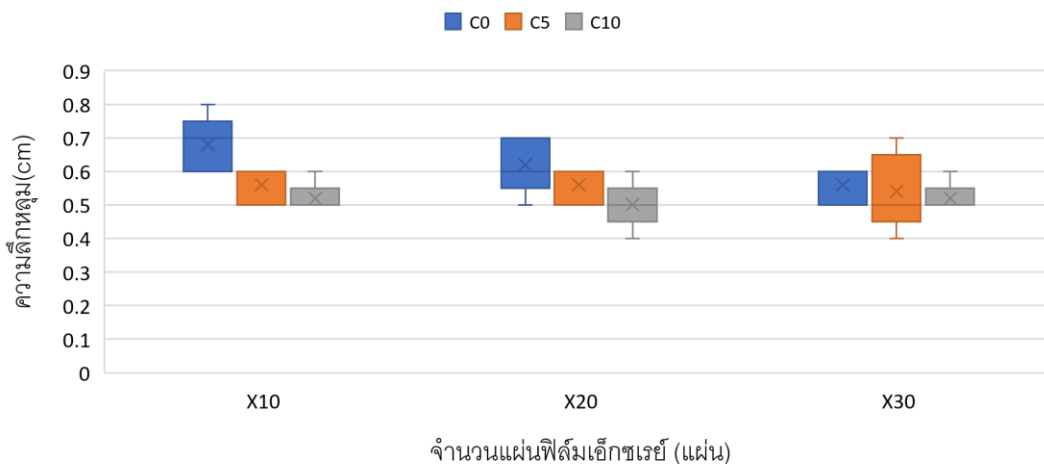
ผลของจำนวนแผ่นเส้นใยคาร์บอนต่อขนาดความกว้างหลุมด้านปะทะ รูปแบบการจัดเรียง

แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม - แผ่นฟิล์มเอ็กซีเรย์ - แผ่นเส้นใยคาร์บอน



รูปที่ 4.57 แสดงผลของจำนวนแผ่นเส้นใยคาร์บอนต่อขนาดความกว้างของหลุมบนแผ่นปะทะ

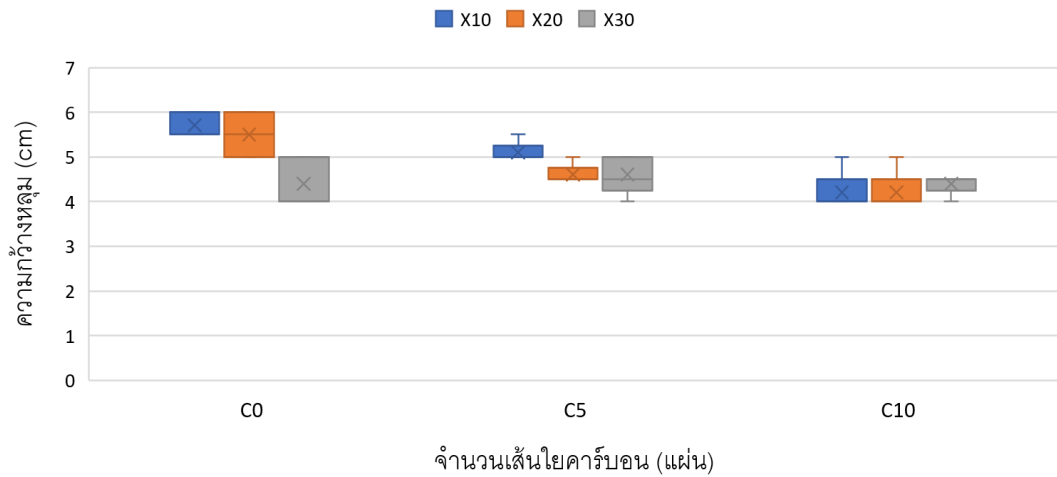
ผลของจำนวนแผ่นเส้นใยคาร์บอนต่อขนาดความลึก รูปแบบการจัดเรียง
แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม - แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ - แผ่นเส้นใยคาร์บอน



รูปที่ 4.58 แสดงผลของจำนวนแผ่นเส้นใยคาร์บอนต่อผลขนาดความลึกของชิ้นงานเกราะ

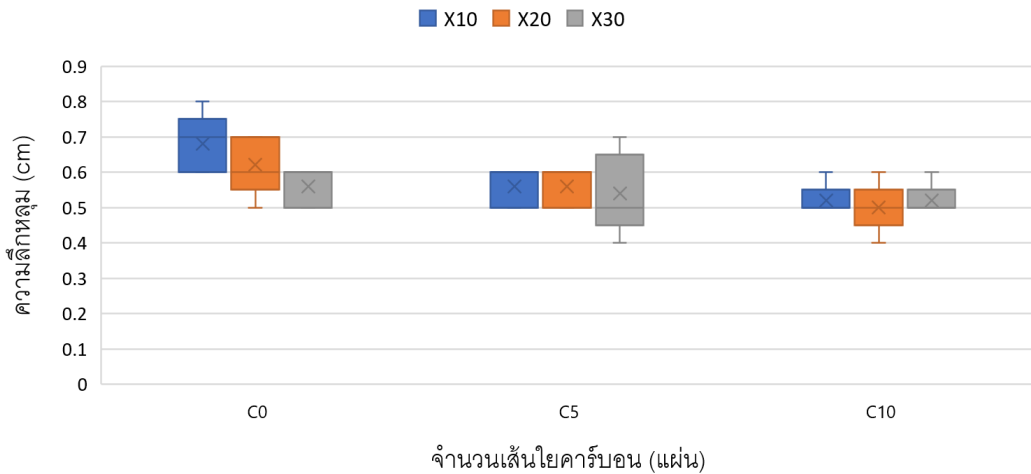
4.4.1.2 ผลของจำนวนแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ที่มีต่อขนาดความกว้างของหลุมและขนาดความลึกของหลุมชิ้นงานเกราะรูปแบบแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม-แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์-แผ่นเส้นใยคาร์บอน การทดสอบชิ้นงานเกราะรูปแบบแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (แผ่นปะทะ) แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ (ชั้นกลาง) และแผ่นเส้นใยคาร์บอน (แผ่นหลัง) เมื่อพิจารณาชิ้นงานที่ A1, A4, A7 ซึ่งเป็นกลุ่มของชิ้นงานที่ไม่ใช้แผ่นเส้นใยคาร์บอนและมีจำนวนแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์เป็น 10, 20 และ 30 แผ่นตามลำดับ พบว่าขนาดของความกว้างของหลุมปะทะและระยะยุบตัวของหลุมปะทะมีขนาดเล็กลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อทำการเพิ่มจำนวนแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ แต่เมื่อทำการเพิ่มจำนวนแผ่นเส้นใยคาร์บอนเป็นจำนวน 5 แผ่นเท่ากันโดยใช้แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์เป็น 10, 20 และ 30 แผ่นตามลำดับดังชิ้นงาน A2, A5, A8 พบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ขนาดของหลุมปะทะทั้งระยะความกว้างและระยะยุบตัวมีขนาดความเสียหายลดลงเล็กน้อย และเมื่อทำการเพิ่มจำนวนแผ่นเส้นใยคาร์บอนเป็น 10 แผ่น โดยใช้แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์เป็น 10, 20 และ 30 แผ่นตามลำดับดังชิ้นงาน A3, A6, A9 พบว่า ขนาดความกว้างของความเสียหายใกล้เคียงกันจนไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงและระยะยุบตัวของหลุมปะทะมีแนวโน้มความเสียหายที่ลดลง ดังรูปที่ 4.13 แสดงผลของจำนวนแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ต่อขนาดความกว้างของหลุมบนแผ่นปะทะ และรูปที่ 4.14 แสดงผลของจำนวนแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ขนาดความลึกของชิ้นงานเกราะ

ผลของจำนวนแผ่นฟิล์มเอกซเรย์ต่อขนาดความกว้างหลุมด้านปะทะ รูปแบบการจัดเรียง
แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม - แผ่นฟิล์มเอกซเรย์ - แผ่นเส้นใยคาร์บอน



รูปที่ 4.59 แสดงผลของจำนวนแผ่นฟิล์มเอกซเรย์ต่อขนาดความกว้างของหลุมบนแผ่นปะทะ

ผลของจำนวนแผ่นฟิล์มเอกซเรย์ต่อความลึก รูปแบบการจัดเรียง
แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม - แผ่นฟิล์มเอกซเรย์ - แผ่นเส้นใยคาร์บอน



รูปที่ 4.60 แสดงผลของจำนวนแผ่นฟิล์มเอกซเรย์ต่อขนาดความลึกของชิ้นงานเกราะ

4.4.2 ชิ้นงานเกาะรูปแบบ แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม- แผ่นเส้นใยคาร์บอน- แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์


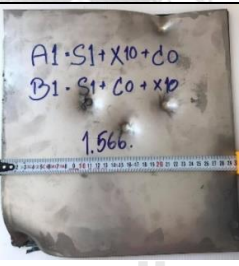


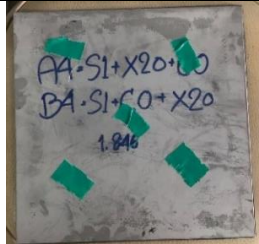
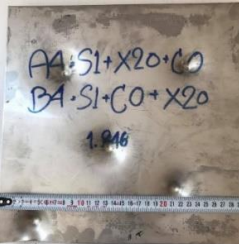


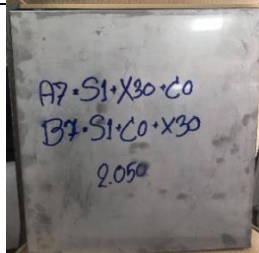



จากการทดสอบยิงด้วยกระสุนจริงขนาด 9 mm จำนวน 5 นัด ตามมาตรฐาน NIJ0101.04 โดยมีแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นแผ่นปะทะด้านหน้า เรียงสลับวัสดุโดยให้แผ่นเส้นใยคาร์บอนเป็นชั้นตรงกลาง พบว่าทุกชิ้นงานสามารถต้านทานกระสุนได้ โดยแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (แผ่นปะทะ) สามารถหยุดกระสุนได้และทำลายหัวกระสุนให้แตกได้เหมือนชิ้นงานชนิดที่มีแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์อยู่ชั้นกลาง แต่อิทธิพลของแรงปะทะของกระสุนที่พุ่งเข้ามา ทำให้ชิ้นงานเกาะเกิดการแยกกันระหว่างชั้นวัสดุที่ต่างชนิดกัน และทำให้ชิ้นงานแผ่นหลังเกิดความเสียหาย (แต่ไม่ทะลุ) แต่ชิ้นงาน B6, B8, B9 ไม่เกิดความเสียหายที่แผ่นหลัง ตารางที่ 4.10 ได้แสดงผลการทดสอบยิงเกาะด้วยกระสุนขนาด 9 mm จำนวน 5 นัด ณ บริเวณที่ต่างกันบนชิ้นงานและตารางที่ 4.11, 4.12, 4.13 ภาพแสดงผลการทดสอบด้วยกระสุนจริง โดยเปรียบเทียบชิ้นงานออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 คือรูปแบบไม่ใช้แผ่นเส้นใยคาร์บอน กลุ่มที่ 2 คือรูปแบบที่ใช้แผ่นเส้นใยคาร์บอนจำนวน 5 แผ่น และกลุ่มที่ 3 คือรูปแบบที่ใช้แผ่นเส้นใยคาร์บอนจำนวน 10 แผ่น แล้วแต่ละกลุ่มใช้จำนวนแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์เป็น 10, 20, 30 แผ่น ตามลำดับ

ตารางที่ 4.19 ผลการทดสอบยิงเกาะกันกระสุนรูปแบบชิ้นงานแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม-แผ่นเส้นใยคาร์บอน-แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์

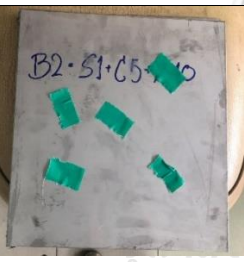
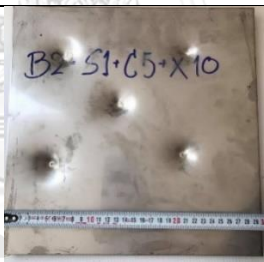


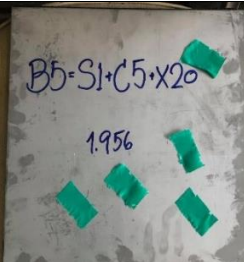
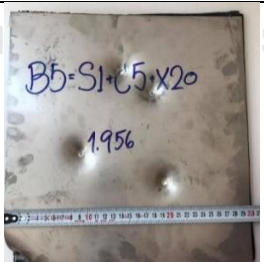


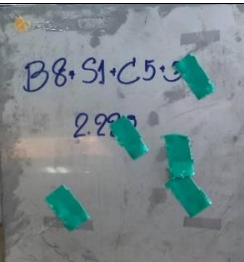
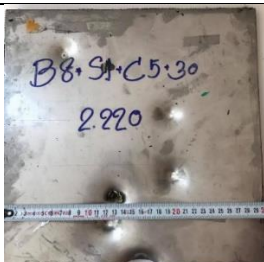


รูปแบบชิ้นงาน แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม - แผ่นเส้นใยคาร์บอน - แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์						
รหัสชิ้นงาน		ความเร็วกระสุน เฉลี่ย(m/s)	ผลการยิงทดสอบ		ขนาดความเสียหายของหลุม	
			ทะลุ	ไม่ทะลุ	ความกว้างเฉลี่ย (cm)	รอยยุบเฉลี่ย (cm)
B1	S1 - C0- X10	350		√	5.70	0.69
B2	S1 - C5- X10	350		√	4.60	0.50
B3	S1 - C10- X10	350		√	4.30	0.46
B4	S1- C0- X20	350		√	5.50	0.64
B5	S1- C5- X20	350		√	4.50	0.53
B6	S1- C10- X20	350		√	4.30	0.44
B7	S1- C0- X30	350		√	4.60	0.59
B8	S1- C5- X30	350		√	4.50	0.48
B9	S1- C10- X30	350		√	4.16	0.44

เมื่อทำการเปรียบเทียบความเสียหายหลังจากการทดสอบยิงจริงของรูปแบบเกราะกลุ่มที่ผลิตจากแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมจำนวน 1 แผ่น ใช้แผ่นฟิล์มเอ็กซเรย์จำนวน 10, 20 และ 30 แผ่น ตามลำดับ เมื่อไม่ใช้แผ่นเส้นใยคาร์บอน พบว่าทุกรูปแบบสามารถต้านทานการทะลุทะลวงของกระสุนได้ไว้ที่ชั้นแรก แต่ผลจากแรงปะทะของกระสุนที่พุ่งเข้ามาทำให้เกิดความเสียหายที่แผ่นหลัง เมื่อพิจารณาจากความเสียหายแผ่นหลังของเกราะจะพบว่า เมื่อใช้แผ่นฟิล์มเอ็กซเรย์จำนวน 10 แผ่น จะเห็นผลของการทะลุทะลวงมากขึ้นที่วัสดุแผ่นหลัง แต่เมื่อเพิ่มจำนวนแผ่นฟิล์มเอ็กซเรย์มากขึ้น จะช่วยลดอำนาจการทะลุทะลวงของกระสุน ทำให้ระยะยุบที่วัสดุแผ่นหลังมีขนาดเล็กลง แต่ทั้งนี้ยังทำให้ชิ้นงานที่แผ่นหลังเกิดความเสียหายเป็นวงกว้าง ดังดูได้จากตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.20 แสดงผลการทดสอบด้วยกระสุนจริงขนาด 9 mm จำนวน 5 นัดที่ความเร็วเฉลี่ย 350 m/s รูปแบบชิ้นงาน แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม- แผ่นเส้นใยคาร์บอน - แผ่นฟิล์มเอ็กซเรย์ รหัสชิ้นงาน B1 (S1- C0- X10), B4 (S1- C0- X20), B7 (S1- C0- X30)

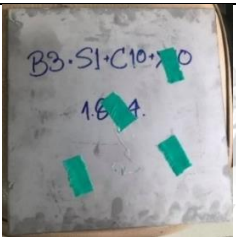
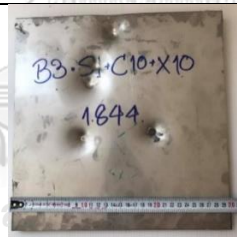
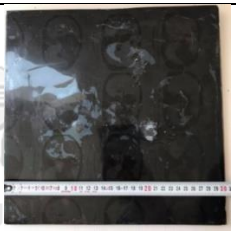

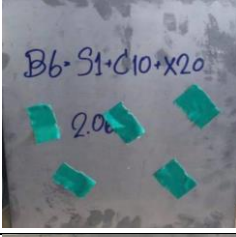



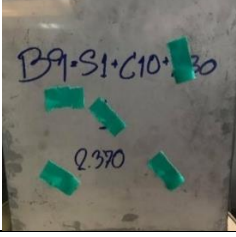
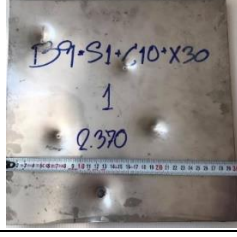


รหัส	ชิ้นงานก่อนยิง (ด้านหน้า)	ชิ้นงานหลังยิง		
		ด้านหน้า (แผ่นปะทะ)	ด้านหลัง	ด้านข้าง
B1				
B4				
B7				

เมื่อทำการเปรียบเทียบความเสียหายหลังจากการทดสอบยิงจริงของรูปแบบเกราะกลุ่มที่ผลิตจากแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมจำนวน 1 แผ่น ใช้แผ่นฟิล์มเอ็กซเรย์จำนวน 10, 20 และ 30 แผ่น ตามลำดับ โดยใช้แผ่นเส้นใยคาร์บอนจำนวน 5 แผ่น พบว่าทุกรูปแบบสามารถต้านทานการทะลุทะลวงของกระสุนได้ไว้ที่ชั้นแรก เมื่อพิจารณาจากความเสียหายแผ่นหลังของเกราะจะพบว่า เมื่อทำการเสริมแผ่นเส้นใยคาร์บอนเป็นวัสดุชั้นกลาง ส่งผลให้ความเสียหายที่เกิดขึ้นลดน้อยลง ระยะเวลายุบมีขนาดเล็กลงเมื่อเพิ่มจำนวนแผ่นฟิล์มเอ็กซเรย์เป็น 10, 20 และ 30 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการเสริมแผ่นเส้นใยคาร์บอน และ กลุ่มชิ้นงานที่นำแผ่นเส้นใยคาร์บอนไว้ที่แผ่นหลัง โดยชิ้นงาน B8 ไม่เกิดความเสียหายที่แผ่นหลัง ดังดูได้จากตารางที่ 4.12 ตารางที่ 4.21 แสดงผลการทดสอบด้วยกระสุนจริงขนาด 9 mm จำนวน 5 นัดที่ความเร็วเฉลี่ย 350 m/s รูปแบบชิ้นงาน แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม- แผ่นเส้นใยคาร์บอน-แผ่นฟิล์มเอ็กซเรย์ รหัสชิ้นงาน B2 (S1- C5- X10) , B5 (S1- C5- X20) , B8 (S1- C5- X30)

รหัส	ชิ้นงานก่อนยิง (ด้านหน้า)	ชิ้นงานหลังยิง		
		ด้านหน้า (แผ่นปะทะ)	ด้านหลัง	ด้านข้าง
B2				
B5				
B8				

เมื่อทำการเปรียบเทียบความเสียหายหลังจากการทดสอบยิงจริงของรูปแบบเกราะกลุ่มที่ผลิตจากแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมจำนวน 1 แผ่น ใช้แผ่นฟิล์มเอ็กซเรย์จำนวน 10, 20 และ 30 แผ่น ตามลำดับ โดยใช้แผ่นเส้นใยคาร์บอนจำนวน 10 แผ่น พบว่าทุกรูปแบบสามารถต้านทานการทะลุทะลวงของกระสุนได้ไว้ที่ชั้นแรก เมื่อพิจารณาจากความเสียหายแผ่นหลังของเกราะจะพบว่า เมื่อเสริมแผ่นเส้นใยคาร์บอนเป็นวัสดุที่แผ่นหลัง ส่งผลให้ความเสียหายที่เกิดขึ้นลดน้อยลง ระยะเวลาอยู่ยงมีขนาดเล็กลง เมื่อเพิ่มจำนวนแผ่นฟิล์มเอ็กซเรย์เป็น 10, 20 และ 30 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มชิ้นงานที่ทำการเสริมแผ่นเส้นใยคาร์บอนจำนวน 5 แผ่นกลุ่มชิ้นงานที่นำแผ่นเส้นใยคาร์บอนไว้ที่แผ่นหลัง โดยชิ้นงาน B6 และ B8 ไม่เกิดความเสียหายที่วัสดุแผ่นหลัง ดังดูได้จากตารางที่ 4.13

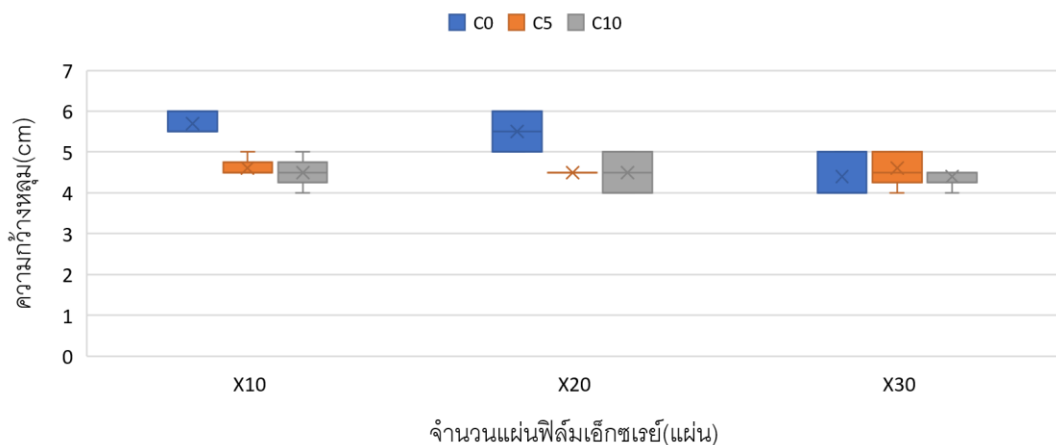
ตารางที่ 4.22 แสดงผลการทดสอบด้วยกระสุนจริงขนาด 9 mm จำนวน 5 นัดที่ความเร็วเฉลี่ย 350 m/s รูปแบบชิ้นงาน แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม-แผ่นเส้นใยคาร์บอน-แผ่นฟิล์มเอ็กซเรย์ รหัสชิ้นงาน B3 (S1- C10- X10), B6 (S1- C10- X20), B9 (S1- C10- X30)

รหัส	ชิ้นงานก่อนยิง (ด้านหน้า)	ชิ้นงานหลังยิง		
		ด้านหน้า (แผ่นปะทะ)	ด้านหลัง	ด้านข้าง
B3				
B6				
B9				

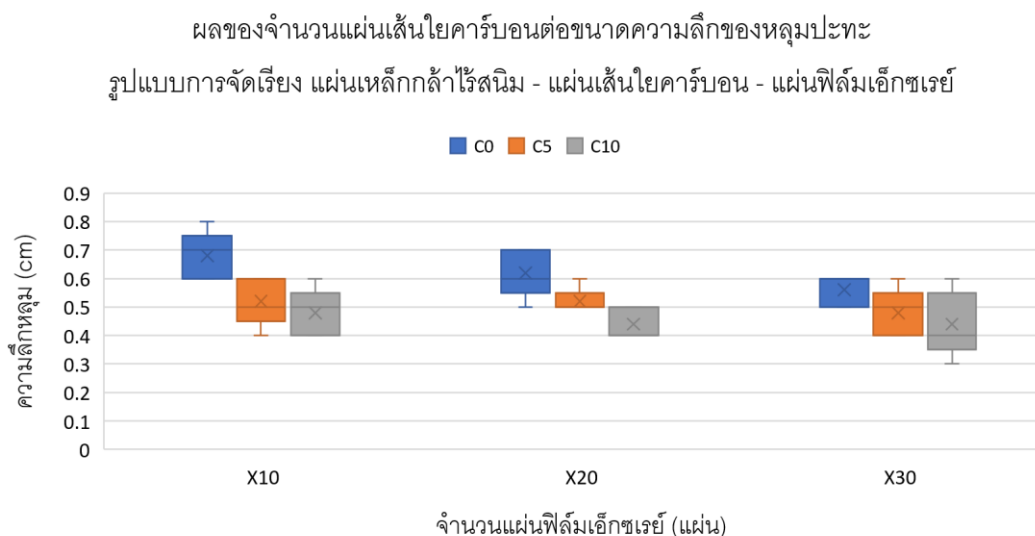
4.4.2.1 ผลของจำนวนแผ่นเส้นใยคาร์บอนต่อขนาดความกว้างของหลุมและขนาดความลึกของหลุมชิ้นงานแกะรูแบบ แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม- แผ่นเส้นใยคาร์บอน- แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์

การทดสอบชิ้นงานแกะรูแบบแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (แผ่นปะทะ) แผ่นเส้นใยคาร์บอน (ชั้นกลาง) และ แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ (แผ่นหลัง) เมื่อพิจารณาชิ้นงานที่ใช้จำนวนแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ 10, 20, 30 แผ่นเท่ากัน ในขณะที่มีการเสริมจำนวนแผ่นเส้นใยคาร์บอนเป็น 0, 5, 10 แผ่นตามลำดับ พบว่าขนาดความกว้างของหลุมปะทะและระยะยุบตัวมีแนวโน้มลดลงชัดเจนทันทีที่มีการเพิ่มแผ่นเส้นใยคาร์บอน และมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนระหว่างชิ้นงานที่ไม่มีการเสริมแผ่นเส้นใยคาร์บอนกับชิ้นงานที่มีเส้นใยคาร์บอนเพิ่มมา 5 แผ่น แต่เมื่อพิจารณาความเสียหายของชิ้นงานที่มีการเสริมเส้นใยคาร์บอน 5 แผ่นเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ใช้เส้นใยคาร์บอน 10 แผ่น พบว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างกันเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.15 แสดงผลของจำนวนแผ่นเส้นใยคาร์บอนที่มีผลต่อขนาดความกว้างของหลุมบนแผ่นปะทะ และรูปที่ 4.16 แสดงผลของจำนวนแผ่นเส้นใยคาร์บอนที่มีผลขนาดความลึกของชิ้นงานแกะ

ผลของจำนวนแผ่นเส้นใยคาร์บอนต่อขนาดความกว้างหลุมด้านปะทะ
รูปแบบการจัดเรียง แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม - แผ่นเส้นใยคาร์บอน - แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์



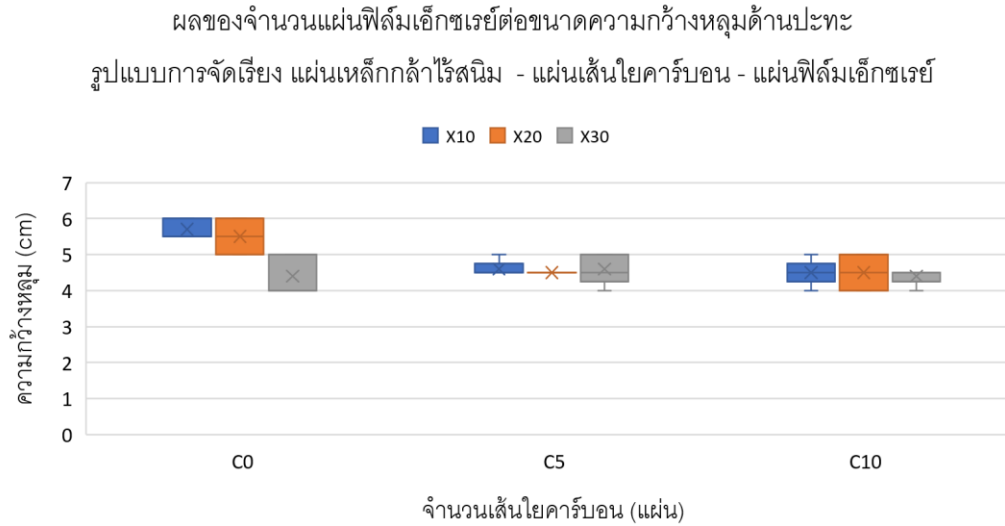
รูปที่ 4.61 แสดงผลของจำนวนแผ่นเส้นใยคาร์บอนต่อขนาดความกว้างของหลุมบนแผ่นปะทะ



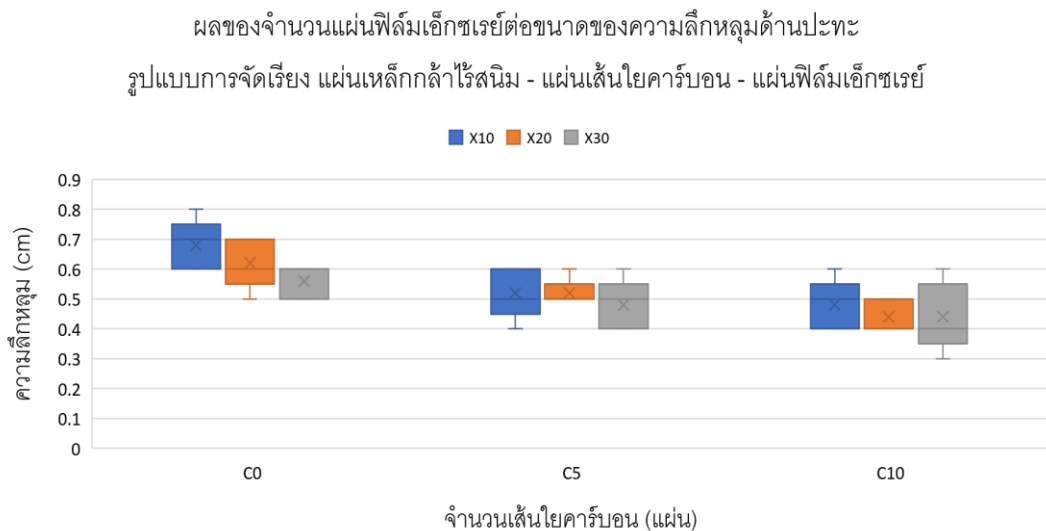
รูปที่ 4.62 แสดงผลของจำนวนแผ่นเส้นใยคาร์บอนที่มีผลขนาดความลึกของชิ้นงานเกราะ

4.4.2.2 ผลของจำนวนแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ต่อขนาดความกว้างของหลุมและระยะลึกของหลุม ชิ้นงานเกราะรูปแบบ แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม- แผ่นเส้นใยคาร์บอน- แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ การทดสอบชิ้นงานเกราะรูปแบบแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (แผ่นปะทะ) แผ่นเส้นใยคาร์บอน (ชิ้นกลาง) และ แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ (แผ่นหลัง) เมื่อพิจารณาชิ้นงานที่ B1, B4, B7 ซึ่งเป็นกลุ่มชิ้นงานที่ไม่ใช้แผ่นเส้นใยคาร์บอน แต่ใช้จำนวนแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ 10, 20 และ 30 แผ่น ตามลำดับ เมื่อวัดขนาดความกว้างของหลุมปะทะหลังจากการทดสอบยิ่งพบว่า ขนาดความกว้างจะเล็กลง เมื่อเพิ่มจำนวนแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ในขณะเดียวกัน เมื่อวัดระยะรอยยุบของชิ้นงานพบว่า มีขนาดลดลง เมื่อตรวจสอบชิ้นงาน B2, B5, B8 ซึ่งเป็นกลุ่มชิ้นงานที่มีจำนวนแผ่นเส้นใยคาร์บอน 5 แผ่น เท่ากัน เพิ่มจำนวนแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์เป็น 10, 20 และ 30 แผ่นตามลำดับ และชิ้นงาน B3, B6, B9 ซึ่งเป็นกลุ่มชิ้นงานที่มีจำนวนแผ่นเส้นใยคาร์บอน 10 แผ่นเท่ากัน ใช้จำนวนแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์เป็น 10, 20 และ 30 แผ่นตามลำดับ พบว่าความกว้างของหลุมปะทะมีแนวโน้มเล็กลง และระยะรอยยุบลดลง แต่ชิ้นงานที่ B6, B8, B9 ไม่เกิดความเสียหายที่แผ่นหลังของชิ้นงาน ดังนั้นผลของความเสียหายทุกรูปแบบจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มจำนวนแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ ขณะที่จำนวนแผ่นใยคาร์บอนมีจำนวนเท่าเดิม รูปที่ 4.17 แสดงผลของจำนวนแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ต่อขนาดความกว้าง

ของหลุมบนแผ่นปะทะ และรูปที่ 4.18 แสดงผลของจำนวนแผ่นฟิล์มเอกซเรย์ต่อขนาดความลึกของชิ้นงานเกราะ



รูปที่ 4.63 แสดงผลของจำนวนแผ่นฟิล์มเอกซเรย์ที่มีผลต่อขนาดความกว้างของหลุมบนแผ่นปะทะ



รูปที่ 4.64 แสดงผลของจำนวนแผ่นฟิล์มเอกซเรย์ที่มีผลขนาดความลึกของชิ้นงานเกราะ

4.4.3 ผลการทดสอบยิงขึ้นงานกระาะรูปแบบแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม-แผ่นเส้นใยคาร์บอน-แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ เมื่อทำการสลัชั้นของวัสดุในรูปแบบ B6 (S1-C10-X20) ตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 2A

จากผลการทดสอบยิงแผ่นกระาะในหัวข้อ 4.4.2 พบว่าขึ้นงาน B6 ซึ่งเป็นรูปแบบการจัดเรียงคือแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 1 แผ่น แผ่นเส้นใยคาร์บอน 10 แผ่น แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ 20 แผ่น ตามลำดับ สามารถต้านทานกระสุนได้โดยไม่เกิดความเสียหายที่วัสดุแผ่นหลัง ทางผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการจัดเรียงชั้นของวัสดุในขึ้นงาน B6 ออกเป็น 2 รูปแบบ โดยการสลัชั้นแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์จำนวน 2 แผ่นกับแผ่นเส้นใยคาร์บอนจำนวน 1 แผ่น ดังนี้

รูปแบบ B6/1 : S1-X2-C1-X2-C1-X2-C1-X2-C1-X2-C1-X2-C1-X2-C1-X2-C1-X2-C1

รูปแบบ B6/2 : S1-C1-X2-C1-X2-C1-X2-C1-X2-C1-X2-C1-X2-C1-X2-C1-X2-C1-X2

หมายเหตุ : S1 คือ แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม จำนวน 1 แผ่น

X2 คือ แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ จำนวน 2 แผ่น

C1 คือ แผ่นเส้นใยคาร์บอน จำนวน 1 แผ่น

จากการทดสอบยิงขึ้นงานกระาะโดยใช้กระสุน 2 ชนิด คือ กระสุน .357 Mag JSP 158 gr. ที่ความเร็ว 380 m/s และกระสุน 9 mm. FMJ RN 124 gr. ที่ความเร็ว 370 m/s พบว่า ขึ้นงานกระาะทั้ง 2 รูปแบบสามารถต้านทานกระสุนได้โดยไม่เกิดการทะลุไปยังชั้นวัสดุแผ่นหลังดังตารางที่ 4.14 จากความรุนแรงของกระสุนส่งผลให้วัสดุแผ่นหลังเกิดความเสียหาย มีลักษณะเป็นรอยปริแตกเกิดขึ้นทั้งสองรูปแบบดังตารางที่ 4.15 และ 4.16

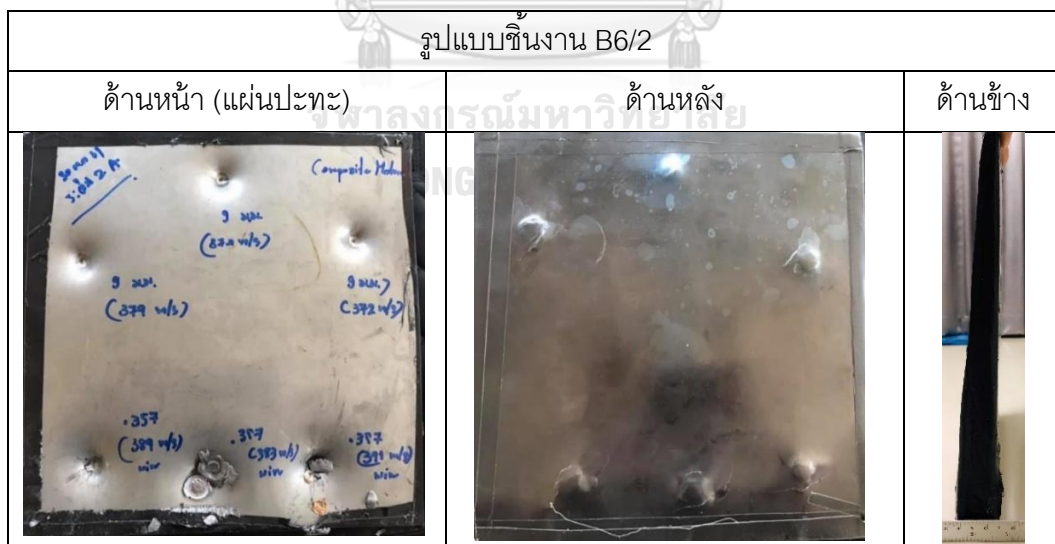
ตารางที่ 4.23 แสดงผลการทดสอบด้วยกระสุนจริง ขนาด 9 mm และกระสุน .357 ที่ความเร็วเฉลี่ย 380 m/s รูปแบบ B6/1 และ B6/2

รูปแบบขึ้นงาน	ความเร็วกระสุนเฉลี่ย (m/s)	ผลการยิงทดสอบ			ขนาดความเสียหายของหลุม	
		ทะลุ	ไม่ทะลุ	รอยปริแตกที่แผ่นหลัง	ความกว้างเฉลี่ย (cm)	รอยยุบเฉลี่ย (cm)
B6/1	380		√	√	5.25	0.65
B6/2	380		√	√	5.15	0.60

ตารางที่ 4.24 ภาพแสดงผลการทดสอบด้วยกระสุนจริง ขนาด 9 mm และกระสุน .357 ที่ความเร็วเฉลี่ย 380 m/s รูปแบบ B6/1



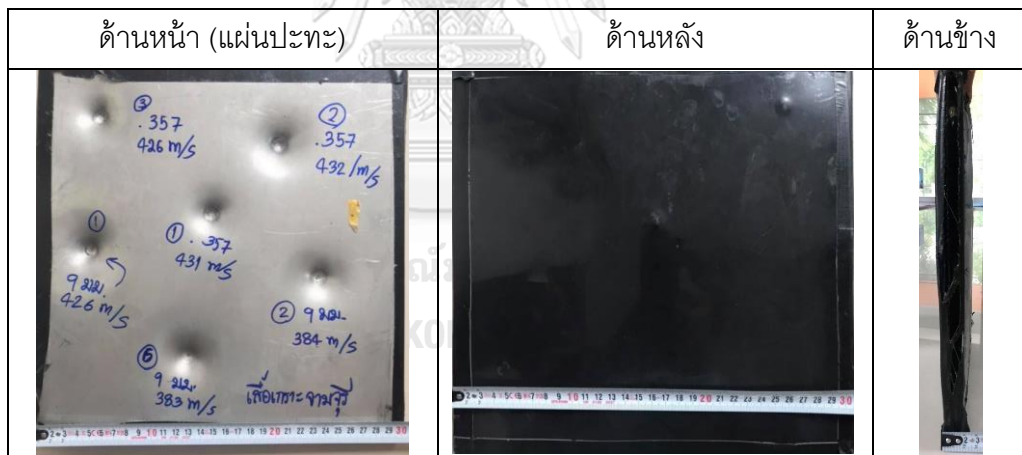
ตารางที่ 4.25 แสดงผลการทดสอบด้วยกระสุนจริง ขนาด 9 mm และกระสุน .357 ที่ความเร็วเฉลี่ย 380 m/s รูปแบบ B6/2



4.5 ผลของการยิงทดสอบแผ่นเกราะรูปแบบ B6 (S1-C10-X20) ตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 2A

จากผลการทดสอบยิงแผ่นเกราะในหัวข้อ 4.4 ชิ้นงานแผ่นเกราะที่ใช้จำนวนแผ่นวัสดุ น้อยที่สุดแต่ยังคงต้านทานการทะลุทะลวงของกระสุนได้ โดยไม่เกิดความเสียหายที่แผ่นหลัง คือ ชิ้นงาน B6 ซึ่งเป็นรูปแบบการจัดเรียงคือแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 1 แผ่น แผ่นเส้นใยคาร์บอน 10 แผ่น แผ่นฟิล์มเอ็กซีเรย์ 20 แผ่น ตามลำดับ ทางผู้วิจัยได้ทำการทดสอบความสามารถในการ ป้องกันกระสุนของแผ่นเกราะรูปแบบดังกล่าว ขนาด 30 cm x 30 cm โดยใช้กระสุน 2 ชนิด คือ กระสุน .357 Mag JSP 158 gr. ที่ความเร็ว 381 m/s และกระสุน 9 mm. FMJ RN 124 gr. ที่ ความเร็ว 341 m/s พบว่า จากตารางที่ 4.17 แผ่นเกราะสามารถป้องกันกระสุนได้ จากแรงปะทะ ของกระสุนส่งผลให้เกิดการยุบตัวของแผ่นเกราะ แต่ไม่ทำให้วัสดุแผ่นหลังเกิดการปริแตกหรือเสียหาย และจากรูปที่ 4.19 แสดงรูปกระสุนถูกทำให้เสียรูปในวัสดุชิ้นแรก (แผ่นปะทะ)

ตารางที่ 4.26 แสดงผลการทดสอบด้วยกระสุน .357 Mag JSP และกระสุน 9 mm ชนิดละ 3 นัด
รูปแบบชิ้นงาน B6 (S1 – C10 – X20)



รูปที่ 4.65 แสดงความเสียหายของกระสุนหลังจากการทดสอบยิง

-2-

ผลการยิงทดสอบแผ่นเกราะแข็ง (มุมยิง 0°)

นัดที่	ชนิดกระสุน	ความเร็ว	การทะลุ
1	.357 Mag JSP	431 m/s	ไม่ทะลุ
2	.357 Mag JSP	432 m/s	ไม่ทะลุ
3	.45 ACP FMJ	426 m/s	ไม่ทะลุ
4	.45 ACP FMJ	426 m/s	ไม่ทะลุ
5	9 mm. FMJ	384 m/s	ไม่ทะลุ
6	9 mm. FMJ	383 m/s	ไม่ทะลุ

ความเห็นของผู้ทดสอบ

แผ่นเกราะแข็งป้องกันกระสุน สามารถทนกระสุน ขนาด.357 Mag JSP และ 9 mm. FMJ ได้ ซึ่งตรงตามข้อกำหนดตามมาตรฐาน NIJ STANDARD 0101.04

(ลงชื่อ) พ.ต.ท.


 (สมเกียรติ สมครรัฐกิจ)

ผู้ควบคุมทำการทดสอบ

(ลงชื่อ) ร.ต.อ.


 (ชิตพล สะอาดดี)

ผู้ทำการทดสอบ

๓ ส.ค.2561

รูปที่ 4.67 แสดงผลการยิงทดสอบที่ออกให้โดยกองสรรพาวุธตำรวจ สำนักงานตำรวจแห่งชาติ

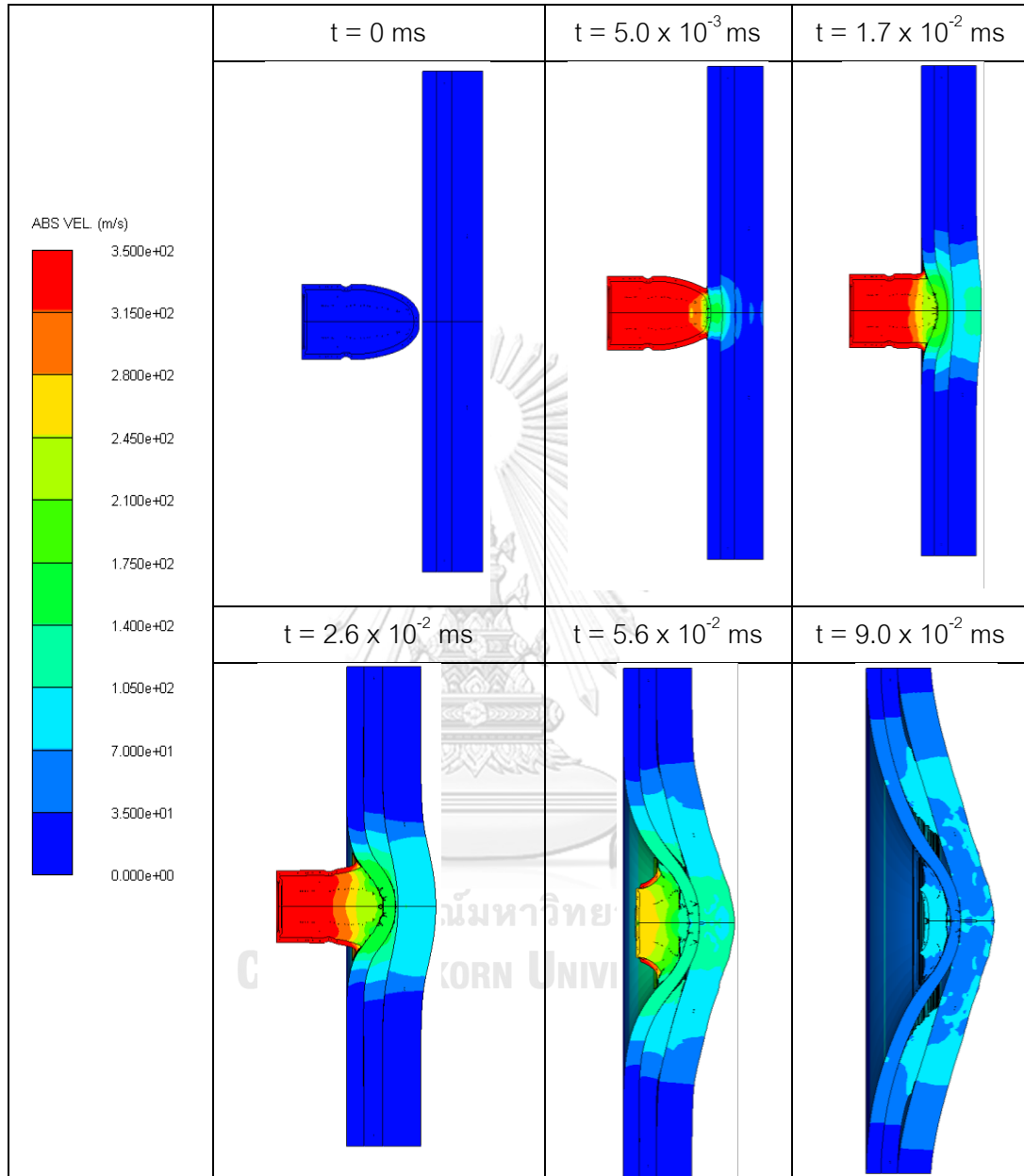
4.6 ผลการจำลองความเสียหายของแผ่นเกราะโดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

4.6.1 ผลการจำลองความเสียหายของแผ่นเกราะรูปแบบ B6

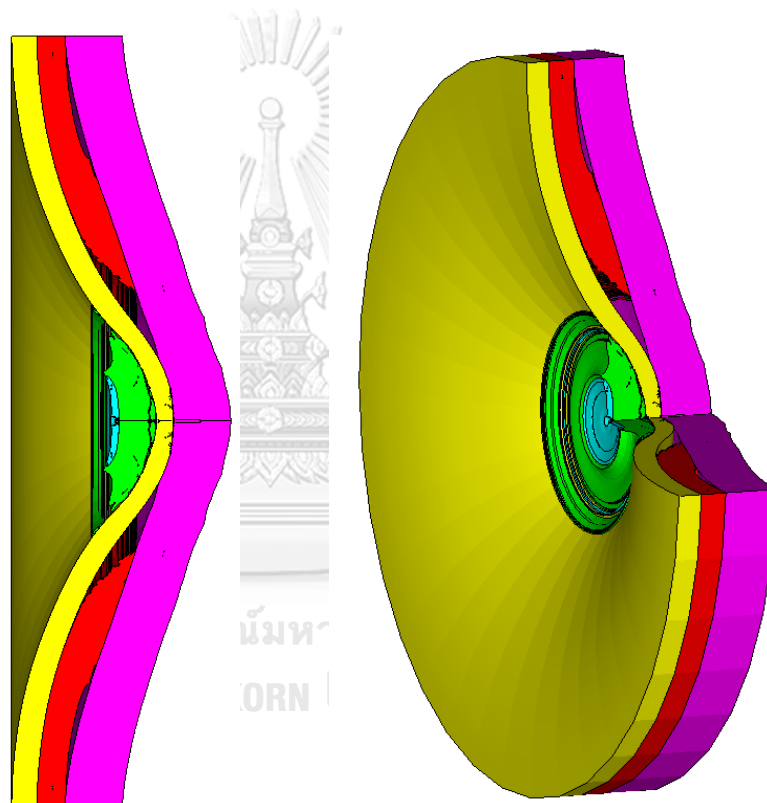
จากขั้นตอนการวิเคราะห์รูปแบบความเสียหายโดยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จำเป็นอย่างยิ่งที่ผลการทดสอบจริงและผลที่ได้จากการจำลองมีความใกล้เคียงกัน ในงานวิจัยนี้จึงได้ใช้สมบัติของโครงสร้างวัสดุที่ใช้ในการทดสอบจริงเพื่อให้ผลการจำลองที่ได้มีความใกล้เคียงและแม่นยำที่สุด เพื่อที่จะได้ศึกษาแนวโน้มของความเสียหายของชิ้นงานแผ่นเกราะ รวมถึงการคาดการณ์จำนวนแผ่นวัสดุในรูปแบบต่อไปให้มีประสิทธิภาพและแม่นยำมากขึ้น ในขั้นต้นของการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น ทางผู้วิจัยได้ทำการศึกษาความเสียหายของแผ่นเกราะรูปแบบ B6 (S1 – C10 – X20) ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ใช้จำนวนแผ่นวัสดุในแผ่นเกราะที่เหมาะสมที่สุดในการต้านทานกระสุน โดยไม่ทำให้วัสดุแผ่นหลังเกิดความเสียหาย และอีกปัจจัยที่สำคัญคือเป็นรูปแบบที่มีน้ำหนักเบา นอกเหนือจากการศึกษาการจัดเรียงแผ่นวัสดุและประสิทธิภาพในการป้องกันกระสุนของแผ่นเกราะแล้ว ยังต้องทำการพิจารณาน้ำหนัก การปรับลดจำนวนแผ่นวัสดุให้น้อยลงแต่ยังสามารถต้านทานแรงปะทะจากกระสุนได้ตามมาตรฐาน

จากผลการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของแผ่นเกราะรูปแบบ B6 (S1-C10-X20) ซึ่งเป็นการจำลองสภาวะเดียวกันกับการทดสอบจริง ตารางที่ 4.18 เมื่อกระสุนวิ่งปะทะเข้ามายังแผ่นเกราะด้วยความเร็ว 350 m/s ทำมุม 90° กับแผ่นเกราะ จะพบว่าวัสดุแผ่นปะทะ (แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม) ได้เกิดการยุบตัวอันเนื่องมาจากแรงปะทะของกระสุนและยังทำให้กระสุนเกิดการเสียรูป โดยที่วัสดุแผ่นปะทะสามารถหยุดกระสุนไม่ให้ทะลุทะลวงไปยังชั้นถัดไปได้ และจากแรงปะทะดังกล่าวได้ส่งผ่านพลังงานจลน์ไปยังวัสดุชั้นถัดมาทำให้เกิดความเสียหายเป็นวงกว้าง โดยสามารถดูได้จากแถบสีที่แผ่กระจายออกไป และทำให้บริเวณที่ได้รับแรงปะทะเกิดการยุบตัว วัสดุชั้นกลางและวัสดุแผ่นหลังช่วยดูดซับพลังงานจลน์ไม่ให้เกิดความเสียหายมายังที่แผ่นหลัง ซึ่งพบว่ารูปแบบความเสียหายของแผ่นเกราะจากการทดสอบจริงและผลการจำลองด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์มีความใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.27 แสดงความเสียหายของแผ่นเกราะที่เกิดขึ้นที่เวลาต่างๆ ของแผ่นเกราะรูปแบบ B6 (S1-C10-X20)



เมื่อพิจารณาแบบจำลอง 3 มิติของชิ้นงานเกราะรูปแบบ B6 ภายหลังจากการยิง จากรูปที่ 4.21 พบว่า หลังจากกระสุนวิ่งเข้าปะทะแผ่นเกราะจนเกิดความเสียหายแล้ว กระสุนได้เสียรูปและหยุดที่วัสดุแผ่นปะทะ (แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม) จากแรงปะทะทำให้แผ่นเกราะเกิดการยุบตัวลงไป เมื่อพิจารณาที่วัสดุชั้นกลาง (แผ่นเส้นใยคาร์บอน) เกิดการฉีกขาดอันเนื่องมาจากแรงปะทะของกระสุน และเมื่อพิจารณาที่วัสดุแผ่นหลัง (แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์) เป็นชั้นที่ไม่เกิดความเสียหาย ผลจากการจำลองโครงสร้างทางกายภาพด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความใกล้เคียงกันกับผลการทดสอบจริง



- แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (แผ่นปะทะ)
- แผ่นเส้นใยคาร์บอน
- แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์

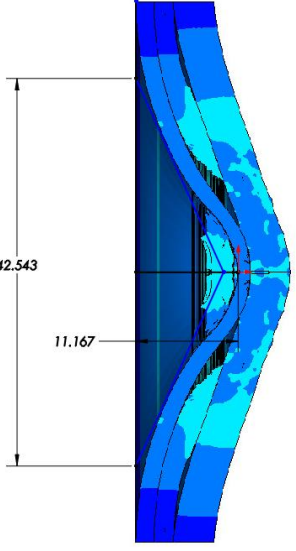
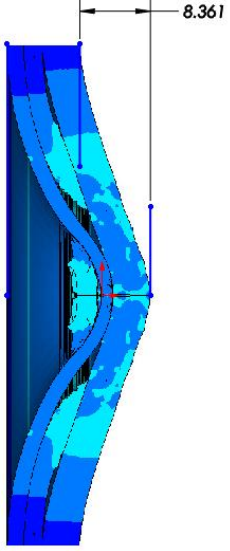


รูปที่ 4.68 แบบจำลอง 3 มิติของชิ้นงานเกราะรูปแบบ B6 ภายหลังจากการยิง

จากผลการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และผลการทดสอบจริง ที่มีผลการทดสอบใกล้เคียงกันในเชิงคุณภาพ ทางผู้วิจัยจึงได้ทำการวัดขนาดความเสียหายที่เกิดขึ้นโดยทำการวัดขนาดความกว้างหลุมปะทะ ในการทดสอบจริงและการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังปรากฏในตารางที่ 4.19 พบว่า มีค่าความคลาดเคลื่อนเพียง 2.82% ซึ่งถือว่ามีค่าใกล้เคียงกันมากในเชิงปริมาณ เมื่อทำการวัดขนาด รอยยุบตัวของแผ่นเกราะด้านหน้า พบว่ามีความคลาดเคลื่อนเพียง 3.57% และเมื่อทำการวัดระยะยุบตัวของวัสดุแผ่นหลังของแผ่นเกราะ พบว่ามีความคลาดเคลื่อนเพียง 1.43 % ซึ่งถือว่ามีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อพิจารณาค่า Back Face Signature (BFS) ซึ่งเป็นระยะยุบตัวของวัสดุแผ่นหลังเปรียบเทียบกับมาตรฐาน NIJ0101.04 ระดับ 2A สำหรับการทำเสื้อเกราะกันกระสุนพบว่ามีค่าประมาณ 8.2 mm ซึ่งอยู่ในระดับมาตรฐาน (ระยะยุบตัวต้องไม่เกิน 44 mm)[10] โดยตารางที่ 4.20 แสดงภาพขนาดความเสียหายของแผ่นเกราะด้วยวิธีการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับความเสียหายที่เกิดจากการทดสอบจริง

ตารางที่ 4.28 แสดงขนาดความเสียหายของแผ่นเกราะจากการทดสอบจริงเปรียบเทียบกับ การจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

	Finite Element Method (mm)	การยิงทดสอบจริง (mm)	ความคลาดเคลื่อน (%)
ความกว้างหลุม ปะทะ	42.50	43.7	2.82 %
รอยยุบตัวแผ่น เกราะด้านหน้า	11.20	11.6	3.57%
รอยยุบตัวของ วัสดุแผ่นหลัง	8.316	8.2	1.43%

ตารางที่ 4.29 แสดงภาพขนาดความเสียหายของแผ่นเกราะด้วยวิธีการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์
เปรียบเทียบกับความเสียหายที่เกิดจากการทดสอบจริง

รูปแสดงขนาดของความเสียหายของแผ่นเกราะด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ รูปแบบ B6 : S1 – C10 – X20	
	
ความกว้างหลุมปะทะ = 42.543 mm รอยยุบตัวแผ่นเกราะด้านหน้า = 11.167 mm	รอยยุบตัวของวัสดุแผ่นหลัง = 8.361 mm
รูปแสดงขนาดของความเสียหายของแผ่นเกราะจากการทดสอบจริง รูปแบบ B6 : S1 – C10 – X20	
	
ความกว้างหลุมปะทะ = 43.7 mm รอยยุบตัวแผ่นเกราะด้านหน้า = 12.3 mm	รอยยุบตัวของวัสดุแผ่นหลัง = 8.2 mm

4.6.2 ผลของการจำลองความเสียหายของแผ่นเกราะรูปแบบ S1 – C8 – X20 และ S1 – C6 – X20

จากขั้นตอนการวิเคราะห์รูปแบบความเสียหายโดยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของรูปแบบ B6 รูปแบบการจัดเรียง S1 – C10 – X20 เมื่อเทียบกับการทดสอบยิงจริงพบว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นมีความใกล้เคียงกัน และเมื่อเปรียบเทียบความเสียหายในเชิงปริมาณ โดยการเปรียบเทียบขนาดรอยยุบตัวของวัสดุแผ่นหน้า ความกว้างของหลุมปะทะ และรอยยุบตัวของวัสดุแผ่นหลัง พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน และที่สำคัญระยะยุบตัวของวัสดุแผ่นหลังซึ่งแสดงถึงค่า Back Face Signature (BFS) อยู่ในระดับมาตรฐาน ทางผู้วิจัยจึงมีความต้องการลดจำนวนชั้นวัสดุเพื่อให้ได้แผ่นเกราะที่มีน้ำหนักเบาลง แต่ยังมีประสิทธิภาพในการป้องกันกระสุน และยังเป็นการผลิตต้นทุนการผลิต จึงทำการปรับรูปแบบแผ่นเกราะกันกระสุนโดยลดจำนวนของแผ่นเส้นใยคาร์บอนเป็นรูปแบบ S1 – C8 – X20 กล่าวคือ ใช้จำนวนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 1 แผ่นเป็นวัสดุแผ่นปะทะ แผ่นเส้นใยคาร์บอนจำนวน 8 แผ่น เป็นวัสดุชั้นกลาง และแผ่นฟิล์มเอ็กซเรย์จำนวน 20 แผ่น เป็นวัสดุแผ่นหลัง และรูปแบบ S1 – C6 – X20 ซึ่งใช้จำนวนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 1 แผ่นเป็นวัสดุแผ่นปะทะ แผ่นเส้นใยคาร์บอนจำนวน 6 แผ่น เป็นวัสดุชั้นกลาง และแผ่นฟิล์มเอ็กซเรย์จำนวน 20 แผ่น เป็นวัสดุแผ่นหลัง จำลองรูปแบบความเสียหายด้วยการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อศึกษารูปแบบความเสียหาย ประสิทธิภาพการป้องกันกระสุน ก่อนการผลิตและทดสอบยิงจริง


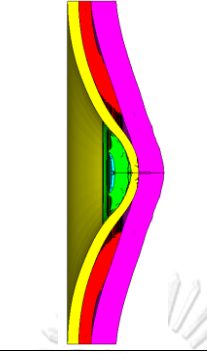
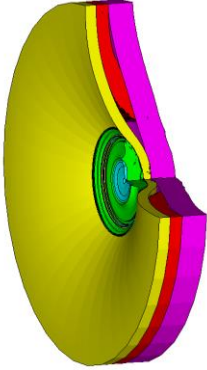
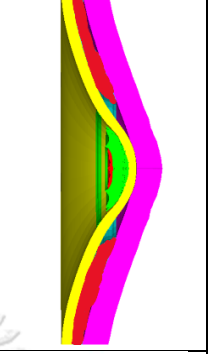
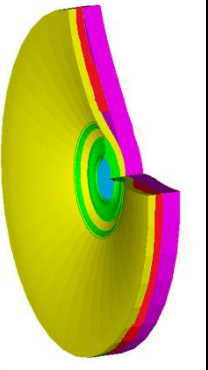
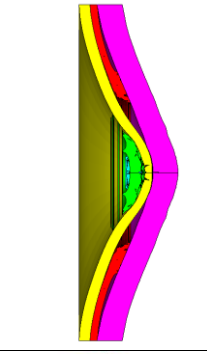
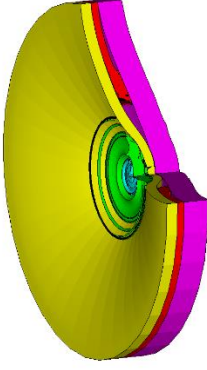
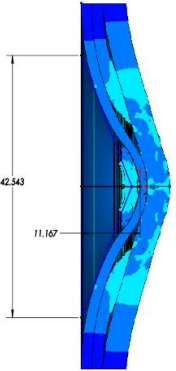
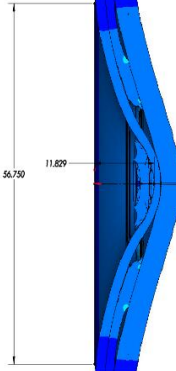
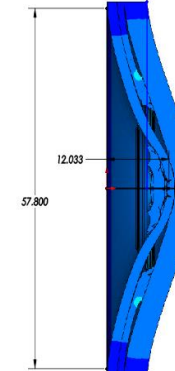
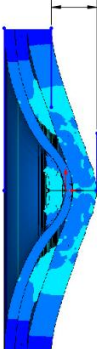
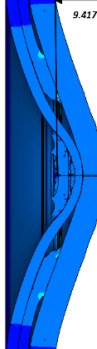
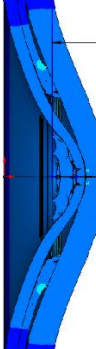
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากผลการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของแผ่นเกราะรูปแบบ S1-C8-X20 และ S1-C6-X20 ซึ่งเป็นการจำลองสภาวะเดียวกันกับการจำลองของรูปแบบ B6 ตารางที่ 4.21 เมื่อกระสุนวิ่งปะทะเข้ามายังแผ่นเกราะด้วยความเร็ว 350 m/s ทำมุม 90° กับแผ่นเกราะ วัสดุแผ่นปะทะ (แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม) ได้เกิดการยุบตัวอันเนื่องมาจากแรงปะทะของกระสุน โดยที่วัสดุแผ่นปะทะสามารถหยุดกระสุนไม่ให้ทะลุทะลวงไปยังชั้นถัดไป ซึ่งมีรูปแบบความเสียหายใกล้เคียงกับรูปแบบ B6 และจากแรงปะทะดังกล่าวทำให้บริเวณที่ได้รับแรงปะทะเกิดการยุบตัว และได้ส่งผ่านพลังงานจลน์ไปยังวัสดุชั้นถัดมาทำให้เกิดความเสียหาย โดยวัสดุชั้นกลางและวัสดุแผ่นหลังช่วยดูดซับพลังงานจลน์ไม่ให้เกิดความเสียหายมายังที่แผ่นหลัง แต่เมื่อพิจารณาระยะยุบตัว

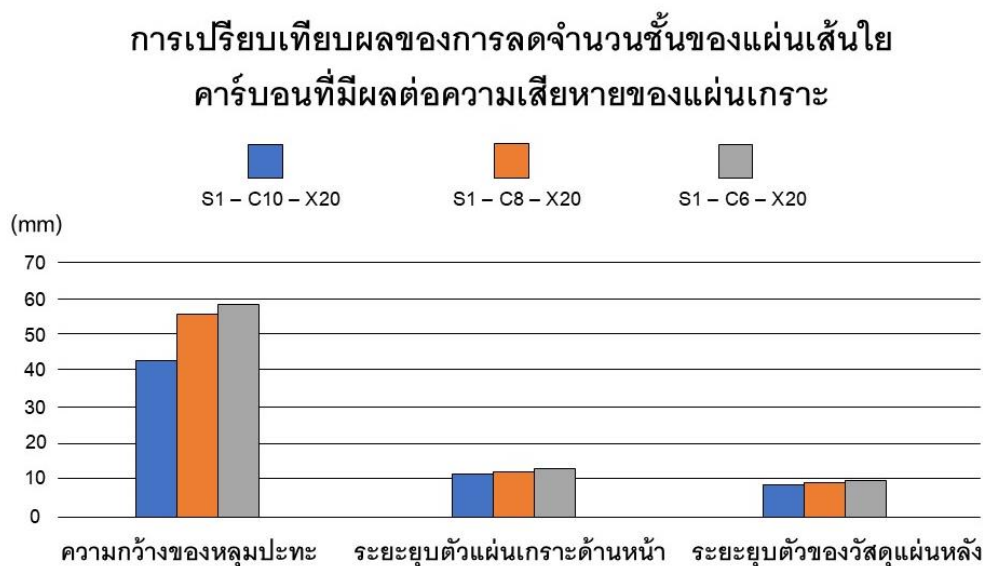
ของวัสดุแผ่นหน้า ความกว้างของหลุมปะทะและระยะยุบตัวของวัสดุแผ่นหลังขณะทำการลดจำนวนชั้นของแผ่นเส้นใยคาร์บอนพบว่ามึระยะดังกล่าวมีค่ามากขึ้นเมื่อเทียบกับแผ่นเกราะรูปแบบ S1 – C10 – X20 โดยแผ่นเกราะที่ใช้เส้นใยคาร์บอนจำนวน 6 แผ่นมีระยะยุบตัวของวัสดุแผ่นหน้า ความกว้างของหลุมปะทะและระยะยุบตัวของวัสดุแผ่นหลังที่มีปริมาณที่มากกว่าแผ่นเกราะที่ใช้เส้นใยคาร์บอนจำนวน 8 แผ่น เมื่อพิจารณาแบบจำลอง 3 มิติแผ่นเกราะรูปแบบ S1 – C6 - X20 พบว่าเริ่มมีการฉีกขาดเกิดขึ้นเล็กน้อยที่วัสดุแผ่นปะทะ (แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม) แต่ไม่ขาดทะลุขาดออกจากกัน



ตารางที่ 4.30 แสดงภาพความเสียหายของแผ่นเกราะด้วยวิธีการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ของ
เกราะรูปแบบ S1 – C10 – X20 , S1 – C8 – X20 และ S1 – C6 – X20

การเปรียบเทียบ	S1 – C10 – X20	S1 – C8 – X20	S1 – C6 – X20
<p>แบบจำลอง 3 มิติ หลังการทดสอบยิง</p> <p>  แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม แผ่นเส้นใยคาร์บอน แผ่นฟิล์มเอ็กซเรย์ </p>	 	 	 
<p>ความกว้างหลุมปะทะ และระยะยุบตัวแผ่น เกราะด้านหน้า (mm)</p>			
<p>ระยะยุบตัวของวัสดุ แผ่นหลัง (mm)</p>			

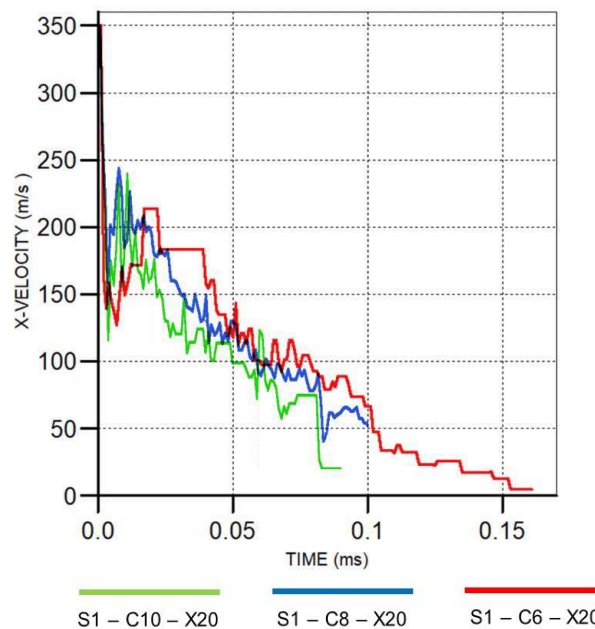
จากการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของชิ้นงานรูปแบบ S1 – C8 – X20 เมื่อพิจารณาขนาดของความเสียหาย ความกว้างของหลุมปะทะ มีขนาด 56.750 mm พบว่ามีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเทียบกับรูปแบบ S1 – C10 – X20 ซึ่งมีความกว้างของหลุมปะทะเพียง 42.543 mm และเมื่อวิเคราะห์ระยะยุบตัวของวัสดุแผ่นหน้า มีขนาด 11.829 mm ซึ่งมีระยะที่เล็กกว่าชิ้นงาน S1 – C10 – X20 ซึ่งมีระยะยุบ 11.167 mm และระยะยุบตัวของวัสดุแผ่นหลัง พบว่ามีระยะยุบตัวที่เล็กกว่าเมื่อเทียบกับรูป S1 – C10 – X20 ซึ่งมีระยะยุบตัวเพียง 8.361 mm และในขณะเดียวกันการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของชิ้นงานรูปแบบ S1 – C6 – X20 เมื่อพิจารณาขนาดของความเสียหาย ความกว้างของหลุมปะทะ มีขนาด 57.800 mm พบว่ามีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเทียบกับรูปแบบ S1 – C8 – X20 และเมื่อวิเคราะห์ระยะยุบตัวของวัสดุแผ่นหน้า มีขนาด 12.033 mm ซึ่งมีระยะที่เล็กกว่าชิ้นงาน S1 – C8 – X20 และระยะยุบตัวของวัสดุแผ่นหลัง พบว่ามีระยะยุบตัวที่ 9.863 mm ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานทดสอบโดยค่า Back Face Signature (BFS) ต้องมีค่าน้อยกว่า 44 mm เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.22 เมื่อทำการลดจำนวนแผ่นเส้นใยคาร์บอนจากเดิม 10 แผ่น เป็นจำนวน 8 แผ่นและ 6 แผ่นตามลำดับ พบว่าขนาดของความกว้างของหลุมปะทะ ระยะยุบตัวของวัสดุแผ่นหน้าและหลังมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ



รูปที่ 4.69 การเปรียบเทียบผลของการลดจำนวนชั้นของแผ่นเส้นใยคาร์บอนที่มีผลต่อความเสียหายของแผ่นเกราะรูปแบบ S1 – C10 – X20, S1 – C8 – X20 และ S1 – C6 – X20

เมื่อพิจารณากราฟความเร็วของกระสุนที่ปะทะเข้าไปยังแผ่นเกราะในทิศทาง 90 องศา กับ ชี้นงานเกราะ ที่ความเร็ว 350 m/s จากการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากรูปที่ 4.23 พบว่า พบว่ากราฟทั้ง 3 รูปแบบมีแนวโน้มที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน แต่ยังเห็นความไม่ต่อเนื่องของ กราฟเป็นผลมาจากการทะลุทะลวงของกระสุนที่ผ่านชั้นของวัสดุที่ต่างชนิดกัน โดยเมื่อพิจารณา ในช่วงแรกตั้งแต่เวลา $t = 0 - 0.02$ ms ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ความเร็วของกระสุนพุ่งเข้ามาปะทะกับ แผ่นเกราะ ความเร็วกระสุนลดลงเหลือเพียง 160 m/s ซึ่งความเร็วกระสุนลดลงอย่างชัดเจน อัน เนื่องมาจากวัสดุแผ่นปะทะสามารถหยุดกระสุนที่พุ่งปะทะเข้ามาได้ จากนั้นที่เวลา $t = 0.02 - 0.06$ ms ความเร็วกระสุนเพิ่มมาจากเดิม และมีแนวโน้มลดลง ซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนผ่านวัสดุ ที่ต่างชนิดกันจากวัสดุแผ่นปะทะไปยังวัสดุชั้นกลาง และ วัสดุชั้นกลางที่มีส่วนช่วยดูดซับพลังงาน จลน์จากกระสุน โดยความเร็วของกระสุนลดลงจนหยุดนิ่งที่วัสดุแผ่นหลังเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 0.08 ms เมื่อเปรียบเทียบกับช่วงเวลาของกระสุนที่พุ่งปะทะแผ่นเกราะเทียบกับรูปแบบ S1 - C6 - X20 พบว่าใช้ช่วงระยะเวลาในการหยุดกระสุนที่ยาวกว่า

Gauge History (Ident 0 - admodel)



รูปที่ 4.70 กราฟแสดงความเร็วของกระสุนที่พุ่งเข้าไปยังชี้นงานแผ่นเกราะกันกระสุน รูปแบบ

S1 - C10 - X20, S1 - C8 - X20 และ S1 - C6 - X20 เมื่อเวลาผ่านไป

บทที่ 5

วิจารณ์ผลการวิจัย

5.1 ผลของการใช้วัสดุผสมในแผ่นเกราะป้องกันกระสุน

5.1.1 แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม

จากการใช้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ที่มีความหนา 2 mm เป็นวัสดุแผ่นหน้าในการรับแรงปะทะจากกระสุน จากหัวข้อที่ 4.4 จะพบว่ากระสุนไม่สามารถทะลุทะลวงผ่านแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมไปยังวัสดุชั้นถัดไปได้ อีกทั้งยังทำให้กระสุนที่ปะทะเข้ามาเกิดการเสียรูป และเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยลดความเร็วของกระสุนที่ปะทะเข้ามา เมื่อพิจารณารูปที่ 4.23 ซึ่งเป็นกราฟความเร็วของกระสุนจากการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าเมื่อกระสุนพุ่งปะทะเข้ามาด้วยความเร็ว 350 m/s ในช่วงความเร็วที่เวลา 0 - 0.02 ms ความเร็วของกระสุนลดลงเหลือเพียง 150 m/s ถือเป็นวัสดุที่มีความสำคัญต่อการต้านทานกระสุนโดยตรง เมื่อทำการทดสอบการเจาะทะลุในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องทดสอบแรง Universal Testing Machine (UTM) โดยใช้ความเร็ว 1 mm/min ซึ่งเป็นการจำลองความเสียหายของกระสุนโดยใช้ความเร็วต่ำ แสดงให้เห็นถึงรูปแบบความเสียหายที่ใกล้เคียงกันกับการทดสอบยิงจริง เกิดการสูญเสียเนื้อของวัสดุทั้งกระสุนและแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม แม้ว่าการทดสอบยิงด้วยกระสุนขนาด 9 mm ด้วยแผ่นเปล่า 1 แผ่น จำนวน 1 นัด พบว่าแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมมีการทะลุเกิดขึ้น แต่เมื่อมีการเสริมแรงจากแผ่นเส้นใยคาร์บอนและแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์แล้ว มีการกระจายแรงไปยังวัสดุแผ่นถัดไป ทำให้แผ่นเกราะมีประสิทธิภาพในการต้านทานกระสุนได้ดียิ่งขึ้น เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) ในห้องปฏิบัติการ (หัวข้อที่ 4.1.4) เมื่อพิจารณาพื้นที่ใต้กราฟความเค้น ความเครียดของวัสดุแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมจะพบว่าค่ามอดุลัสความยืดหยุ่น เท่ากับ 4.487 GPa ค่าความเค้นสูงสุด เท่ากับ 691 MPa และเมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ใต้กราฟความเค้น ความเครียดของวัสดุทั้ง 3 ชนิด พบว่าแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมมีคุณสมบัติด้านความเหนียวที่สูงกว่าวัสดุทั้ง 2 ชนิด มีความสามารถในการรับแรงปะทะจากกระสุนได้ โดยที่กระสุนไม่สามารถทะลุผ่านไปยังวัสดุชั้นถัดไป

5.1.2 แผ่นเส้นใยคาร์บอน

จากการใช้แผ่นเส้นใยคาร์บอนมาเป็นวัสดุผสมในการทำแผ่นเกราะกันกระสุน เมื่อพิจารณาผลการทดสอบแรงดึงในห้องปฏิบัติการ (หัวข้อที่ 4.1.4) พบว่าค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น เท่ากับ 25.85 GPa และจุดคราก (Yield Stress) เท่ากับ 444 MPa (ดูตาราง ที่ 4.3) พบว่ากราฟมีความชันสูงมากมีลักษณะเป็นเส้นตรง กราฟมีความเค้นค่อนข้างสูง มีความเครียดต่ำมาก จนวัสดุยืดออกจนถึงค่าความเค้นสูงสุด ที่ 444.1 MPa และเมื่อพิจารณาพื้นที่ใต้กราฟความเค้น ความเครียด จะเห็นว่ากราฟมีความสมบัติทางกลของแผ่นเส้นใยคาร์บอนที่มีความแข็งแรงสูง ด้านทานแรงดึงสูง สามารถต้านทานแรงปะทะจากกระสุนที่พุ่งทะลุเข้ามาได้ และเมื่อมีเพื่อจำนวนแผ่นเส้นใยคาร์บอนเสริมเข้าไปในแผ่นวัสดุผสมสำหรับป้องกันกระสุน ทำให้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการรับแรงปะทะจากกระสุนและเมื่อพิจารณาตามตารางที่ 2.5 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบสมบัติทางกลของแผ่นเส้นใยคาร์บอนและเหล็กกล้าไร้สนิมในน้ำหนักที่เท่ากันพบว่าเส้นใยคาร์บอนมีความแข็งแรงมากกว่าเหล็กกล้าไร้สนิม อีกทั้งยังมีความแข็งแรงต่อแรงดึงในทิศทางตั้งฉาก ดังนั้น การนำแผ่นเส้นใยคาร์บอนเสริมแรงในวัสดุผสม ช่วยในการลดแรงปะทะจากกระสุนที่พุ่งเข้ามา ไม่ให้วัสดุแผ่นหลังเกิดความเสียหาย เป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งที่ช่วยลดซับพลังงานจลน์และคลื่นกระแทก (Shock wave) ที่ถูกส่งผ่านมาจากวัสดุแผ่นหน้า ทำให้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกิดเพียงรอยยุบตัวแต่ไม่เกิดการเสียรูปจนชิ้นงานฉีกขาดจากอิทธิพลแรงปะทะจากกระสุน

5.1.3 แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์

จากการใช้แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์มาเป็นวัสดุผสมในการทำแผ่นเกราะกันกระสุน พบว่าสามารถดูดซับพลังงานจลน์ที่ตกค้างเหลืออยู่จากวัสดุชั้นก่อนหน้า ทำให้แรงปะทะจากกระสุนส่งผ่านมายังวัสดุแผ่นหลังมีปริมาณน้อย เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) ในห้องปฏิบัติการ (หัวข้อที่ 4.1.4) พบว่าค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น เท่ากับ 2.48 GPa (ดูตาราง ที่ 4.4) โดยบริเวณจุดครากมีความเค้นประมาณ 84 MPa หลังจากนั้นเมื่อความเครียดเพิ่มขึ้น ค่าความเค้นจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ โดยมีค่าความเค้นสูงสุดเท่ากับ 146 MPa (ดูตาราง ที่ 4.4) จนกระทั่งวัสดุขาดออกจากกันที่ค่าความเค้นเท่ากับ 146 MPa พิจารณาพื้นที่ใต้กราฟความเค้น ความเครียดของวัสดุแผ่นฟิล์ม

เอ็กซ์เรย์พบว่า เป็นวัสดุที่มีความอ่อนตัวและเหนียว สามารถดูดซับพลังงานไว้ได้โดยไม่เกิดการฉีกขาดสามารถนำมาเป็นวัสดุผสมซึ่งมีหน้าที่ในการกระจายแรงได้ดี สามารถใช้เสริมแรงร่วมกับแผ่นเส้นใยคาร์บอนได้ดี นอกจากนี้เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติทางกลที่ดีแล้ว อีกทั้งยังมีต้นทุนที่ไม่สูงมาก สามารถนำมาเป็นส่วนประกอบในการผลิตแผ่นเกราะกันกระสุนได้ และยังเป็นทางเลือกต้นทุนการผลิตเสื้อเกราะกันกระสุนแต่ยังมีคุณภาพเทียบเท่ากันกับเสื้อเกราะที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

5.2 ผลของการจัดเรียงวัสดุในแผ่นเกราะป้องกันกระสุน

5.2.1 แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นวัสดุแผ่นปะทะ แผ่นเส้นใยคาร์บอนเป็นวัสดุชั้นกลาง แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์เป็นวัสดุแผ่นหลัง

ชิ้นงานที่มีการจัดเรียงวัสดุรูปแบบแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นวัสดุแผ่นปะทะ แผ่นเส้นใยคาร์บอนเป็นวัสดุชั้นกลางและแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์เป็นวัสดุแผ่นหลัง สามารถต้านทานกระสุนได้โดยไม่ทำให้วัสดุแผ่นหลังเกิดความเสียหาย แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งเป็นวัสดุชั้นหน้าสุด จะทำหน้าที่ลดแรงปะทะจากกระสุน พบได้เช่นเดียวกับการทดสอบของจำนงค์ อมตารียกุลและวันทนา อมตารียกุล[48] โดยการยิงแผ่นเกราะกันกระสุนด้วยปืน M16 A1 ด้วยกระสุนขนาด 9 mm ตามมาตรฐาน NIJ Level 2 โดยแผ่นเกราะประกอบไปด้วยแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 จำนวน 3 ชุด พบว่าบนแผ่นเกราะมีรอยยุบตัวเล็กน้อย กระสุนปืนไม่สามารถทะลุผ่านแผ่นเกราะไปได้

โดยทั่วไปพลังงานของแผ่นเกราะที่ดูดซับพลังงานจลน์จากกระสุนปืนไปตามกฎอนุรักษ์พลังงาน[49] ได้แก่

$$E_k \cong E_{\text{Stainless Steel}} + E_{\text{Carbon fiber}} + E_{\text{X-ray film}} \quad (5.1)$$

เมื่อ E_k คือพลังงานจลน์ที่สูญเสีย (Joule)

$E_{\text{Stainless Steel}}$ คือพลังงานจลน์ที่แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมดูดซับ (Joule)

$E_{\text{Carbon fiber}}$ คือพลังงานจลน์ที่แผ่นเส้นใยคาร์บอนดูดซับ (Joule)

$E_{\text{X-ray film}}$ คือพลังงานจลน์ที่แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ดูดซับ (Joule)

การวางตำแหน่งของแผ่นเส้นใยคาร์บอนที่ตำแหน่งชั้นตรงกลางของแผ่นเกราะดังกล่าวแบบชิ้นงาน B6 จะช่วยในการดูดซับพลังงานการกระแทกจากกระสุนปืนและทำหน้าที่กระจาย

แรงจากแรงปะทะของกระสุนที่เข้ามา อันเนื่องมาจากเส้นใยของแผ่นเส้นใยคาร์บอนมีการเสริมแรงแบบประสานกันของเส้นใยและเมื่อมีการซ้อนทับกันหลายๆชั้น ทำให้ซึ่งสามารถต้านทานแรงปะทะจากกระสุนได้ดียิ่งขึ้น พบได้เช่นเดียวกันกับการทดสอบของ Ying W.[50] ได้นำแผ่นผ้าที่มีการจัดเรียงเส้นใยในทิศทางที่ต่างกัน ซ้อนทับให้เกิดความหนาที่ต้องการ และใช้วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม ABAQUS ในการจำลองการยิงกระสุนไปยังชิ้นงาน เพื่อทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบความเสียหายของวัสดุที่มีการจัดเรียงตัวของเส้นใยที่แตกต่างกันนำมาซ้อนกันเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ดูดซับ (The energy absorption) จากการทดสอบพบว่าจำนวนชั้นที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการรับแรงเพิ่มขึ้น และการเรียงตัวของมุมเส้นใยให้มีทิศทางที่ต่างหากันจะช่วยลดแรงกระแทกได้ ซึ่งส่งผลให้ดูดซับพลังงานไว้มากกว่า 20% เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเรียงตัวในทิศทางเดียว ดังนั้นเมื่อเกิดรอยปริแตกเกิดขึ้นในแผ่นเส้นใยคาร์บอนอันเนื่องมาจากแรงที่ส่งผ่านจากวัสดุแผ่นหน้า ทำให้ความเครียดเกิดขึ้นที่บริเวณดังกล่าวส่งผลให้เกิดความเสียหายที่กระจายเป็นวงกว้าง ทำให้เหลือพลังงานตกค้างจากกระสุนส่งผ่านไปชั้นวัสดุแผ่นหลังในปริมาณที่น้อย และสมบัติทางกลของแผ่นฟิล์มเอ็กซเรย์ (จากหัวข้อ 4.1.3) ที่มีความเหนียวจะช่วยดูดซับพลังงานที่ตกค้างเหลืออยู่ ซึ่งเห็นได้ชัดในชิ้นงานรูปแบบ B6 (S1-C10-X20) โดยวัสดุแผ่นหลังไม่เกิดการฉีกขาดหรือความเสียหายเกิดขึ้น อีกทั้งยังทำหน้าที่ป้องกันการยุบตัวจากแรงปะทะจากกระสุนปืน และเมื่อพิจารณากราฟแสดงความเร็วของกระสุนที่พุ่งเข้ามายังชิ้นงานจากการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เวลา 5.0×10^{-3} ms ถึง 5.6×10^{-2} ms ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่กระสุนวิ่งเข้าปะทะชิ้นงานแผ่นเกราะ เกิดการยุบตัวเข้าไปในวัสดุชั้นถัดมาที่แผ่นเส้นใยคาร์บอนและแผ่นฟิล์มเอ็กซเรย์ ช่วงความเร็วของระยะเวลาดังกล่าวความเร็วปลายของกระสุนจะลดลงตามลำดับเมื่อเวลาผ่านไป จากสมการพลังงานจลน์ได้แก่ $\Delta E_k = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mu^2$ เมื่อพิจารณามวลของกระสุนเป็นค่าคงที่ อาศัยหลักการพลังงานจลน์ที่เปลี่ยนแปลงไปคืองานที่เกิดขึ้น ทำให้งานจากแรงปะทะจากกระสุนแปรผันโดยตรงกับ $v^2 - u^2$ และเมื่อความเร็วลดลง งานที่เกิดขึ้นก็จะมีค่าลดลง

5.2.2 แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นวัสดุแผ่นปะทะ แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์เป็นวัสดุชั้นกลาง แผ่นเส้นใยคาร์บอนเป็นวัสดุแผ่นหลัง

เมื่อใช้จำนวนชิ้นงานวัสดุเท่ากัน รูปแบบชิ้นงานที่มีการจัดเรียงวัสดุรูปแบบแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นวัสดุแผ่นปะทะ แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์เป็นวัสดุชั้นกลางและแผ่นเส้นใยคาร์บอนเป็นวัสดุแผ่นหลัง สามารถต้านทานการกระสุนได้โดยกระสุนไม่ทะลุแผ่นเกราะ แต่เกิดรอยปริแตกเสียหายที่วัสดุแผ่นหลังทุกรูปแบบเสียหาย การนำแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมวางไว้ที่ตำแหน่งเป็นวัสดุแผ่นหน้า ยังคงสามารถลดแรงปะทะจากกระสุนที่พุ่งทะลุเข้ามาได้ แต่การวางตำแหน่งแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ไว้ที่ตำแหน่งชั้นกลางและแผ่นเส้นใยคาร์บอนเป็นวัสดุแผ่นหลัง ประสิทธิภาพการป้องกันกระสุนไม่ดีเท่ากับการวางตำแหน่งแผ่นเส้นใยคาร์บอนไว้ที่ตำแหน่งชั้นกลางและแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์เป็นวัสดุแผ่นหลัง เนื่องจากการวางชั้นแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์เป็นการนำแผ่นวัสดุแผ่นเรียบมาซ้อนทับกันเป็นชั้นๆ (Stacking layers) ไม่มีการเสริมแรงของเส้นใย มีแต่เพียงอิทธิพลของจำนวนแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ที่เพิ่มทำให้การกระจายแรงทำได้ไม่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นเส้นใยคาร์บอนที่มีการเสริมแรงประสานกันของเส้นใย อีกทั้งการวางชั้นแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ไว้ตรงกลางซึ่งเป็นชั้นถัดจากแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่รับแรงปะทะจากกระสุน นอกจากพลังงานจลน์ที่ถูกส่งผ่านจากกระสุนไปยังแผ่นปะทะแล้ว ยังมีพลังงานความร้อนที่ถูกส่งผ่านเข้ามาทำให้แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์เมื่อได้รับความร้อนเกิดการหลอมละลาย พบได้เช่นเดียวกับการทดสอบเสื้อเกราะกันกระสุนพระเจ้าตากของ พ.ต.ท. กฤษฏากร เซวงค์ดีโสภาคย์[41] ที่ต้องมีการเคลือบสารลงบนแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์เพื่อให้เหนียวและทนความร้อน จึงต้องมีการเสริมแผ่นเหล็กเข้าไปที่ด้านหน้าและด้านหลังของเสื้อเกราะ และเมื่อพิจารณาสมบัติทางกลจากหัวข้อที่ 4.1.4 พบว่า แผ่นเส้นใยคาร์บอนสามารถทนต่อแรงดึงได้สูง แต่มีความเปราะ การวางตำแหน่งไว้ที่ชั้นสุดท้ายทำให้ต้องรับความเสียหายที่รุนแรงจากแรงกระทำที่ส่งผ่านมายังวัสดุชั้นก่อนหน้า เนื่องจากแผ่นเส้นใยคาร์บอนไม่มีความยืดหยุ่นและดูดซับแรงกระแทก ส่งผลให้เกิดรอยปริแตกที่บริเวณแผ่นหลังของชิ้นงานและเกิดรอยยุบตัวที่วัสดุแผ่นหลังที่มาก

5.3 ผลของความหนาของวัสดุในแผ่นเกราะป้องกันกระสุน

5.3.1 ความหนาของชั้นแผ่นเส้นใยคาร์บอน

เมื่อทำการศึกษาการเพิ่มจำนวนชั้นของแผ่นเส้นใยคาร์บอนพบว่า เมื่อเพิ่มจำนวนแผ่นเส้นใยคาร์บอนเป็น 0, 5 และ 10 ตามลำดับ พบว่าประสิทธิภาพในการป้องกันกระสุนดีขึ้น เมื่อพิจารณารอยยุบตัวของวัสดุแผ่นหน้า ความกว้างของหลุมปะทะและระยะยุบตัวของวัสดุแผ่นหลัง มีแนวโน้มที่ลดลงตามลำดับ การเพิ่มจำนวนแผ่นเส้นใยคาร์บอนสามารถกระจายแรงที่ส่งผ่านมาจากวัสดุแผ่นหน้า ทำให้กระสุนไม่สามารถทะลุทะลวงผ่านชั้นเหล็กกล้าไร้สนิมได้ พบได้เช่นเดียวกับการทดสอบของ ธรรม์ณชาติ วันแต่ง [45] ที่ทำการศึกษาอิทธิพลของการเสริมแผ่นอีพ็อกซีผสมคาร์บอนไฟเบอร์ 3 ระดับ ตั้งแต่ 0, 10 และ 20 ชั้น ทำการทดสอบยิงด้วยกระสุนจริง ขนาด .357 Magnum พบว่าสามารถหยุดการทะลุของกระสุนได้ดีขึ้นเนื่องจากความแข็งและเหนียวดังกล่าวจะทำให้รับแรงปะทะและดูดซับพลังงานจากกระสุนได้ดี และเมื่อเพิ่มจำนวนชั้นของคาร์บอนไฟเบอร์จะทำให้ประสิทธิภาพในการหยุดกระสุนดีขึ้น แต่จะทำให้น้ำหนักเพิ่มขึ้น และต้นทุนในการผลิตสูง

5.3.2 ความหนาของชั้นแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์

เมื่อทำการศึกษาการเพิ่มจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์พบว่า เมื่อทำการเพิ่มจำนวนแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์เป็น 10, 20 และ 30 ตามลำดับ ทำให้ขนาดความเสียหายที่เกิดขึ้นลดลงตามลำดับ รอยปริแตกบริเวณวัสดุแผ่นหลังเกิดขึ้นน้อยลง แผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์มีส่วนสำคัญในการกระจายแรงปะทะที่ถูกส่งผ่านมาจากวัสดุชั้นก่อนหน้า พบได้เช่นเดียวกับการทดสอบเสื้อเกราะกันกระสุนพระเจ้าตากของ พ.ต.ท. กฤษฏากร เขวงศักดิ์โสภาคย์ [41] โดยใช้วัสดุจากฟิล์มเอ็กซ์เรย์ที่เหลือใช้พบว่ามีการรับแรงและกระจายแรงได้ดี ซึ่งผลการทดสอบที่ได้นั้น เสื้อเกราะพระเจ้าตากสามารถกันกระสุนได้ที่ระดับ 2A ตามมาตรฐาน NIJ0101.04 โดยสามารถป้องกันกระสุนปืนพกได้ทุกชนิด อีกทั้งยังเสริมแผ่นสแตนเลสด้านหลังเกราะเพื่อช่วยในการรับแรงและเศษสะเก็ดโลหะที่หลอมละลายกับหัวลูกกระสุนปืน

5.4 ผลของการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับ การทดสอบจริง

จากการจำลองความเสียหายของแผ่นเกราะโดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า เมื่อกระสุนปะทะด้วยความเร็วสูงเข้ามายังแผ่นเกราะ มีการกระจายแรงที่ส่งผ่านจากวัสดุแผ่นหน้าไปยังวัสดุชั้นถัดมา จากผลการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และผลการทดสอบในรูปแบบ B6 (S1-C10-X20) ที่ความหนาของชิ้นงานคือ 8.64 mm ระหว่างแผ่นของแต่ละส่วนประกอบนั้นจะถูกเชื่อมต่อกันด้วย Epoxy Resin ปัญหาของ impact นั้นจะเกิดอิลิเมนต์ที่บิดเบี้ยวค่อนข้างสูง จึงได้ใช้โมเดลชิ้นงานเป็นแบบ Continuum Model และทำการวัดขนาดความเสียหายที่เกิดขึ้นโดยทำการวัดขนาดความกว้างหลุมปะทะ ในการทดสอบจริงและในการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งถือว่ามีความใกล้เคียงกันมากในเชิงปริมาณ เมื่อทำการวัดขนาด รอยยุบตัวของแผ่นเกราะด้านหน้า และเมื่อทำการวัดระยะยุบตัวของวัสดุแผ่นหลังของแผ่นเกราะ พบว่ามีความคลาดเคลื่อนเพียง 3% ทำให้การคำนวณมีความแม่นยำและมีความน่าเชื่อถือ ซึ่งเป็นเพราะปัจจัยของการใส่ค่าเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) การวาดรูปทรงสามมิติที่เหมาะสม (Computational Domain) และการสร้างกริด (Grid Mesh) การเลือกแบบจำลองโมเดลที่เหมาะสมกับคุณสมบัติของวัสดุแต่ละชนิด และเมื่อพิจารณาค่า Back Face Signature (BFS) ซึ่งเป็นระยะยุบตัวของวัสดุแผ่นหลังเปรียบเทียบกับตามมาตรฐาน NIJ0101.04 ระดับ 2A สำหรับการทำเสื้อเกราะกันกระสุนพบว่ามีความประมาณ 8.2 mm ซึ่งอยู่ในระดับมาตรฐานที่ต้องไม่เกิน 44 mm

เมื่อทำการลดชิ้นจำนวนชั้นแผ่นเส้นใยคาร์บอนเป็น 8 แผ่น ที่ความหนาของแผ่นเป็น 8.18 mm และใช้จำนวนชั้นแผ่นเส้นใยคาร์บอนเป็น 6 แผ่น ที่มีความหนาของแผ่นเป็น 7.72 mm โดยใช้รูปแบบการจำลองเดียวกันกับรูปแบบ B6 จากการจำลองความเสียหายของแผ่นเกราะโดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า ประสิทธิภาพการต้านทานกระสุนของแผ่นเกราะลดลงตามลำดับ รูปแบบความเสียหายของความกว้างของหลุมปะทะ ระยะรอยยุบตัวของวัสดุแผ่นหน้าและแผ่นหลังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตามรูปที่ 4.22 อันเนื่องมาจากการลดจำนวนชั้นของแผ่นเส้นใยคาร์บอน แต่ทั้งนี้รูปแบบที่ใช้จำนวนแผ่นเส้นใยคาร์บอนจำนวน 6 แผ่นยังคงสามารถป้องกันกระสุนได้โดยไม่ทำให้วัสดุแผ่นหลังเกิดความเสียหาย และระยะยุบตัวคือ 9.683 mm ยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน จากการทดสอบทำให้ทราบว่าสามารถลดจำนวนแผ่นเส้นใยคาร์บอนในรูปแบบ B6 ได้ถึง 6 แผ่น เพื่อให้ได้น้ำหนักของแผ่นเกราะที่เบาลง ความหนาที่บางอีกทั้งยังเป็นการลดต้นทุนของแผ่นเส้นใยคาร์บอนในการผลิตแผ่นเกราะกันกระสุน

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย

6.1 บทสรุปงานวิจัย

- แผ่นเกราะกันกระสุนรูปแบบ B6 (S1-C10-X20) ใช้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมจำนวน 1 แผ่น แผ่นเส้นใยคาร์บอนจำนวน 10 แผ่น และแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์จำนวน 20 แผ่น ประสานด้วยการอ็อกซีเรชั่น สามารถกันกระสุนได้ในระดับ 2A ตามมาตรฐาน NIJ0101.04 ซึ่งใช้กระสุนขนาด 9 mm FMJ RN ที่ความเร็ว 341 m/s โดยไม่เกิดความเสียหายเกิดขึ้นที่วัสดุแผ่นหลัง โดยแผ่นเกราะ 1 แผ่นมีน้ำหนักเพียง 2 kg และมีความหนาประมาณ 8 mm โดยมีระยะยุบตัวของวัสดุแผ่นหลังอยู่ที่ 8.2 mm ซึ่งเป็นรูปแบบที่ดีที่สุดที่สามารถใช้ในการผลิตเสื้อเกราะกันกระสุน
- ชิ้นงานที่มีการจัดเรียงวัสดุรูปแบบแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นวัสดุแผ่นหน้า แผ่นเส้นใยคาร์บอนเป็นวัสดุชั้นกลางและแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์เป็นวัสดุแผ่นหลัง สามารถต้านทานกระสุนได้โดยไม่ทำให้วัสดุแผ่นหลังเกิดความเสียหาย ซึ่งมีประสิทธิภาพการป้องกันกระสุนได้ดีกว่าการจัดเรียงรูปแบบแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นวัสดุแผ่นหน้า แผ่นแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์เป็นวัสดุชั้นกลางและแผ่นเส้นใยคาร์บอนเป็นวัสดุแผ่นหลัง โดยพิจารณาจากแผ่นเกราะที่ใช้จำนวนวัสดุเท่ากันแต่มีการจัดเรียงของแผ่นเส้นใยคาร์บอนและแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ที่แตกต่างกัน
- เมื่อทำการเพิ่มจำนวนแผ่นเส้นใยคาร์บอนและทำการวัดขนาดความกว้างของหลุมปะทะ หลังจากการทดสอบยิ่งพบว่า ขนาดความกว้างจะเล็กลง และเมื่อวัด ระยะรอยยุบของชิ้นงานพบว่า มีขนาดลดลง ในขณะที่เดียวกันการเพิ่มจำนวนแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์ ขนาดของความกว้างของหลุมปะทะและระยะรอยยุบตัวของชิ้นงานมีแนวโน้มลดลงเช่นกัน
- เมื่อใช้ค่าสภาวะในการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เช่นเดียวกันกับรูปแบบ B6 (S1-C10-X20) โดยการลดจำนวนชั้นของแผ่นเส้นใยคาร์บอนโดยใช้เพียง 8 แผ่น และ 6 แผ่นตามลำดับ พบว่าความกว้างของหลุมปะทะ ระยะยุบตัวของวัสดุแผ่นหน้า และระยะยุบตัวของวัสดุแผ่นหลังมีแนวโน้มที่ลดลงตามลำดับ อีกทั้งยังไม่เกิดความเสียหายที่แผ่นหลัง จากผลการ

ทดสอบด้วยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถใช้จำนวนแผ่นเส้นใยคาร์บอน 6 แผ่นในการประกอบเป็นวัสดุผสมสำหรับผลิตเป็นแผ่นเกราะกันกระสุนได้

6.2 ปัญหาที่เกิดขึ้น

- ในขั้นตอนการผลิตแผ่นเกราะกันกระสุน ต้องระมัดระวังเรื่องของการเซตตัวของกาว Epoxy resin ขณะทำการประกบวัสดุแต่ละชนิดเท่าด้วยกัน เพราะหากทำการประกบชั้นระหว่างแผ่นกันเกิดขึ้นในเวลาที่ไม่เหมาะสมของการเซตตัวของกาว จะทำให้วัสดุเชื่อมติดประสานกันอย่างไม่มีประสิทธิภาพ และต้องระมัดระวังขั้นตอนการประกบกันระหว่างชั้นวัสดุ ต้องไม่เกิดฟองอากาศระหว่างติดประสานวัสดุเข้าด้วยกัน

6.3 ข้อเสนอแนะ

- ในการทดสอบยิงจริงต้องทำการวัดความเร็วของกระสุนก่อนทำการยิงทดสอบจริงทุกครั้ง ให้มั่นใจว่าความเร็วของกระสุนอยู่ในมาตรฐานตามที่กำหนดไว้ เพื่อให้ผลการทดสอบมีความถูกต้อง แม่นยำ
- ทำการทดสอบยิงแผ่นเกราะกันกระสุนชิ้นงานโดยใช้จำนวนชั้นวัสดุที่มากที่สุดด้วยกระสุนปืนที่มีความรุนแรงที่สูงกว่าระดับ 2A ขึ้นไป เพื่อให้ทราบขีดความสามารถในการป้องกันกระสุน และประโยชน์ในการต่อยอดสำหรับผลิตแผ่นเกราะรูปแบบต่างๆต่อไป

บรรณานุกรม

1. Roy C, L., *Ballistic materials and penetration mechanics* Elsevier scientific publishing company. 1980, Amsterdam , Oxford , New York.
2. NitipanP. พิพิธภัณฑฑ์ทหารประเทศฝรั่งเศส 2556 10 ตุลาคม 2556 [cited 2017 15]; Available from: <https://pantip.com/topic/31088088>.
3. เรื่องน่ารู้เกี่ยวกับเสื้อเกราะกันกระสุน [cited 2017 15 June]; Available from: <http://www.gunsandgames.com/smf/index.php?topic=99696.0:wap2>.
4. เสื้อเกราะกันกระสุน (*Ballistic vest*). [cited 2017 18 May]; Available from: www.safetylifethailand.com/download/เสื้อเกราะกันกระสุน.pdf.
5. *Aramid fiber fabric*. [cited 2017 15 June]; Available from: <https://th.aliexpress.com/popular/aramid-fiber-fabric.html>.
6. นาวาโทหญิง สุวรรณ ลิ่มสัมพันธ์, เสื้อเกราะกันกระสุน กองศึกษาและวิจัย กรมสรรพาวุธทหารเรือ.
7. Azmi, A.M.R., et al., *9 - A newly developed bulletproof vest using kenaf-X-ray film hybrid composites, in Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, M. Jawaid, M. Thariq, and N. Saba, Editors. 2019, Woodhead Publishing. p. 157-169.
8. Azmi, A.M.R., et al., *Flexural and Impact Properties of A New Bulletproof Vest Insert Plate Design Using Kenaf Fibre Embedded With X-Ray Films*. *Materials Today: Proceedings*, 2018. **5**(5, Part 2): p. 11193-11197.
9. armor, D.K.X.n.g.l.a.b.f.f.b. [cited 2017 15 June]; Available from: <http://www.defensereview.com/dupont-kevlar-xp-next-gen-lightweight-aramid-ballistic-fiber-for-body-armor/>.
10. บุญรักษ์ กาญจนวราวิชย์. การพัฒนาเสื้อเกราะกันกระสุนแบบเกราะแข็ง [cited 2017 18 July]; Available from: http://www.neutron.rmutphysics.com//news/index.php?option=com_content&task=view&id=2230
11. *National Institute of Justice, Ballistic Resistance of Personal Body Armor NIJ Standard – 0101.04*. U.S. Department of Justice.
12. *Impact Depth*. [cited 2017 13 August 2017]; Available from:

<https://en.wikipedia.org/wiki/Impactdepth>

13. เอกสารประกอบการสอนบทที่ 5 การชนและโมเมนตัม. [cited 2017 15 June 2017]; Available from: www.atom.rmutphysics.com/charud/scibook/nuch/introphysics/5.pdf.
14. เอกสารประกอบการสอน บทที่ 5 *Linear momentum and Collision*. [cited 2017 15 June]; Available from: www.physics.rmutk.ac.th/.
15. Olarence Zener , R.E.P., *Mechanism of Armor Penetrat*. 1943.
16. Wantaprom , W., Plasin , A . , , *Production and Finite Element Analysis of Transparent Armor Specimens Assembled with Tempered Glasses*, in *Department of Materials Science, Faculty of Science*. 2014, Chulalongkorn University.
17. ปราโมทย์ เดชะอำไพ. ไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับงานวิศวกรรม. [cited 2017 15 June 2017]; Available from: <https://www.slideshare.net/tony2010/9789740336105>
18. ยศกร ประทุมวัลย์. การเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์(*Element type*) ให้เหมาะสมกับปัญหาทางศาสตร์ของแข็ง. [cited 2017 15 June 2017]; Available from: <http://www.vcharkarn.com/varticle/41926>.
19. William D. Callister, J., *Materials Science and Enjineering*. 2548, บริษัท สำนักพิมพ์ที่อุปจำกัด กรุงเทพฯ.
20. หลุทกัศ กิรติเสวี, ฉัตรชัย วีระนิตติสกุล, and อภิรัตน์ เล่าห์บุตรี, ภาพรวมของวัสดุเชิงประกอบ (*An Overview of Composite Materials*) 2553. **22**(70).
21. Vinay Shivakumarl, et al. *Fracture morphology of carbon fiber reinforced plastic composite laminates*. 2010 [cited 2017 15 June]; Available from: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392010000300022.
22. Arnab Gupta. *So, what are Composites, again?* 2013 [cited 2017 15 June]; Available from: <http://arnabocan.com/frontposts/2013-03-10-whatarecomposites/>.
23. *Ceramic Matrix Composite* 9 October 2018 [cited 2017 15 June 2017]; Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Ceramic_matrix_composite.
24. สุพจน์ เอื้ออภิสัทธีวงศ์ *Image Receptor : X-ray Film & Intensifying screen* , เอกสารประกอบการสอน. 2556, เชียงใหม่ คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
25. ชนิดและโครงสร้างฟิล์มเอ็กซ์เรย์ [cited 2017 15 June]; Available from:

- http://www.mt.mahidol.ac.th/e-learning/MTRD310/web/film/4_4type.htm.
26. อุษณีย์ กิตกำจร เอกสารประกอบการสอน เหล็กกล้าไร้สนิม *Stainless Steels*. นครราชสีมา: สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
 27. *Application of Stainless Steel* การใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิม
 28. แนวทางการใช้เฟอร์ริติกทดแทนออสเทนนิค [cited 2017 15 June 2017]; Available from: <http://www.siamstainless.com/?paged=34>.
 29. *304/304L STAINLES STEEL DATA SHEET*. [cited 2017 18 July 2017]; Available from: www.aksteel.com.
 30. คาร์บอนไฟเบอร์ วัสดุป้องกันอาคารจากแผ่นดินไหว. [cited 2017 15 June 2017]; Available from: <http://dpm.nida.ac.th/main/index.php/articles/tsunami-and-earthquake/item/>
 31. Yue Liu , Bernd Zwingmann , and Mike Schlaich *Carbon Fiber Reinforced Polymer for Cable Structures*. 2015 [cited 2017 15 June 2017]; Available from: <http://www.mdpi.com/2073-4360/7/10/1501/htm>.
 32. Narun Lee *Black or yellow* [cited 2017 15 June 2017]; Available from: http://www.pandarider.com/tip_carbon.html.
 33. Wikipedia. *Polyacrylonitrile*. [cited 2017 15 June 2017]; Available from: <https://en.wikipedia.org/wiki/Polyacrylonitrile>.
 34. *Where All Other Materials Fail* [cited 2017 15 June 2017]; Available from: <http://www.johndtable.com/carbon-fiber/processing.html>.
 35. แก้ว แซ่เดียว, การศึกษาการอบฮีพอกซีด้วยคลื่นไมโครเวฟ 2547, สงขลา: คณะวิศวกรรมศาสตร์ , มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
 36. Wikipedia. *Epoxy*. [cited 2017 15 June 2017]; Available from: <https://th.wikipedia.org/wiki/ฮีพอกซี>
 37. Yohannes Regassa¹, Gessesew Likeleh², and Prof. Ratnam Uppala³, *Modeling and Simulation of Bullet Resistant Composite Body Armor* International Journal of Research Studies in Science, 2014. **1**(3, June 2014): p. 39-44.
 38. D.P. Gonc,alvesa, A.N.K. F.C.L. de Meloa, and H.A. Al-Qureshib, *Analysis and investigation of ballistic impact on ceramic/metal composite armour*.
 39. Marc Portanovab and Afsaneh Rabieia, *Ballistic performance of a composite metal foam-ceramic armor system* Matias Garcia- Avilaa. Procedia Materials

- Science 2014. 4: p. 151 – 156.
40. A.M.R. Azmi, M.T.H. Sultan, and A. Hamdan *Design and development of bulletproof vest using kenaf fibre embedded with X-ray films* Proceedings of Mechanical Engineering Research 2017: p. 370-371.
 41. กฤษฎากร เชนงศักดิ์โสภาคย์, เสื้อเกราะกันกระสุนจากแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์. ตาก: กลุ่มนักวิจัยหุ่นยนต์ และ เทคโนโลยี, วิทยาการตาก.
 42. เสื้อเกราะพระเจ้าตาก (จากฟิล์มเอ็กซ์เรย์) [cited 2017 15 June 2017]; Available from: https://www.google.co.th/search?q=%E0%B9%80%E0%B8%AA%E0%B8%B7%E0%B9%89%E0%B8%AD%E0%B9%80%E0%B8%81%E0%B8%A3%E0%B8%B2%E0%B8%B0%E0%B8%9E%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B9%80%E0%B8%88%E0%B9%89%E0%B8%B2%E0%B8%95%E0%B8%B2%E0%B8%81&source=lnms&tbn=isch&sa=X&sqi=2&ved=0ahUKewjRqpyot8DUAhUKLI8KHbaAD5YO_AUIBigB&biw=682&bih=788#imgsrc=0CAH3vkNkLS9pM: .
 43. เสื้อเกราะบางระจัน [cited 2017 15 June]; Available from: http://www.bangrajunn.com/index.php?option=com_content&task=view&id=40&Itemid=43.
 44. เสื้อ”บางระจัน” เกราะคุ้มชีวิตภูมิปัญญาไทย [cited 2017 15 June]; Available from: <http://www.manager.co.th/Daily/ViewNews.aspx?NewsID=9470000058279>.
 45. ธรรมนูญชาติ วันแต่ง, การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการพัฒนาวัสดุจากงานระดับบัณฑิตสำหรับ ทำเสื้อเกราะกันกระสุนระดับ 2 ที่มีค่าแบล็คเฟซซิกเนเจอร์ต่ำ in การประชุมวิชาการระดับชาติ และนานาชาติ “ราชภัฏวิจัย ครั้งที่ 3. 2558.
 46. Chiranyawaran R *Fracture Surface Simulation of Composite using ANSYS Program in Department of Materials Science and Engineering 2012*, Silpakorn University Bangkok.
 47. *Mie-Gruneisen equation of state* [cited 2019 19 jan]; Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Mie%E2%80%93Gruneisen_equation_of_state?fbclid=IwAR1bEXGgPuvzL2jqNcY9T8Bir5hrHnX2vlpYe0dvONWDDBwVY8j3qn48R20.
 48. จ่านงค์ อมตาริยกุล. and และวันทนา อมตาริยกุล., การวิเคราะห์หาวัสดุสำหรับทำเสื้อเกราะกันกระสุนให้มีประสิทธิภาพสูงกว่าระดับ // มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 2559 9(2): p. 161-176.
 49. อรพรรณ เจริญวงษ์. and และ ชัยณรงค์ ศรีกุลวงศ์ . การจำลองเชิงตัวเลขเพื่อการออกแบบแผ่นเกราะเซรามิค/โลหะ, in การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย 2556.

50. Ying W. and Xiaogang C., *A numerical study of ply orientation on ballistic impact resistance of multi-ply fabric panels*. *Composites Part B: Engineering*, 2015. **68**: p. 259-265.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก.
มาตรฐานทดสอบเสื้อเกราะกันกระสุน

NIJ Standard-0101.04

**NIJ STANDARD
FOR
BALLISTIC RESISTANCE OF PERSONAL BODY ARMOR**

1. PURPOSE AND SCOPE

The purpose of this standard is to establish minimum performance requirements and test methods for the ballistic resistance of personal body armor intended to protect the torso against gunfire. This standard is a general revision of NIJ Standard-0101.03, dated April 1987, updating the labeling requirements, acceptance criteria, test ammunition, procedures, and other items throughout the standard.

The scope of the standard is limited to ballistic resistance only; this standard does not address threats from knives and sharply pointed instruments, which are different types of threat.

2. NIJ BODY ARMOR CLASSIFICATION

Personal body armors covered by this standard are classified into seven classes, or types, by level of ballistic performance. The ballistic threat posed by a bullet depends, among other things, on its composition, shape, caliber, mass, angle of incidence, and impact velocity. Because of the wide variety of bullets and cartridges available in a given caliber and because of the existence of handloaded ammunition, armors that will defeat a standard test round may not defeat other loadings in the same caliber. For example, an armor that prevents complete penetration by a 40 S&W test round may or may not defeat a 40 S&W round with higher velocity. In general, an armor that defeats a given lead bullet may not resist complete penetration by other bullets of the same caliber of different construction or configuration. The test ammunition specified in this standard represent general, common threats to law enforcement officers.

As of the year 2000, ballistic resistant body armor suitable for full time wear throughout an entire shift of duty is available in classification Types I, IIA, II, and IIIA, which provide increasing levels of protection from handgun threats. Type I body armor, which was first issued during the NIJ demonstration project in 1975, is the minimum level of protection that any officer should have. Officers seeking protection from lower velocity 9 mm and 40 S&W ammunition typically wear Type IIA body armor. For protection against high velocity 357 Magnum and higher velocity 9 mm ammunition, officers traditionally select Type II body armor. Type IIIA body armor provides the highest level of protection available in concealable body armor and provides protection from high velocity 9 mm and 44 Magnum ammunition.

Type IIIA armor is suitable for routine wear in many situations; however, departments located in hot, humid climates may need to carefully evaluate their use of Type IIIA body armor for their officers. Types III and IV armor, which protect against high powered rifle rounds, are

clearly intended for use only in tactical situations when the threat warrants such protection (see app. C).

The classification of an armor panel that provides two or more levels of NIJ ballistic protection at different locations on the ballistic panel shall be that of the minimum ballistic protection provided at any location on the panel.

2.1 Type I (22 LR; 380 ACP)

This armor protects against .22 caliber Long Rifle Lead Round Nose (LR LRN) bullets, with nominal masses of 2.6 g (40 gr) impacting at a minimum velocity of 320 m/s (1050 ft/s) or less, and 380 ACP Full Metal Jacketed Round Nose (FMJ RN) bullets, with nominal masses of 6.2 g (95 gr) impacting at a minimum velocity of 312 m/s (1025 ft/s) or less.

2.2 Type IIA (9 mm; 40 S&W)

This armor protects against 9 mm Full Metal Jacketed Round Nose (FMJ RN) bullets, with nominal masses of 8.0 g (124 gr) impacting at a minimum velocity of 332 m/s (1090 ft/s) or less, and 40 S&W caliber Full Metal Jacketed (FMJ) bullets, with nominal masses of 11.7 g (180 gr) impacting at a minimum velocity of 312 m/s (1025 ft/s) or less. It also provides protection against the threats mentioned in section 2.1.

2.3 Type II (9 mm; 357 Magnum)

This armor protects against 9 mm Full Metal Jacketed Round Nose (FMJ RN) bullets, with nominal masses of 8.0 g (124 gr) impacting at a minimum velocity of 358 m/s (1175 ft/s) or less, and 357 Magnum Jacketed Soft Point (JSP) bullets, with nominal masses of 10.2 g (158 gr) impacting at a minimum velocity of 427 m/s (1400 ft/s) or less. It also provides protection against the threats mentioned in sections 2.1 and 2.2.

2.4 Type IIIA (High Velocity 9 mm; 44 Magnum)

This armor protects against 9 mm Full Metal Jacketed Round Nose (FMJ RN) bullets, with nominal masses of 8.0 g (124 gr) impacting at a minimum velocity of 427 m/s (1400 ft/s) or less, and 44 Magnum Jacketed Hollow Point (JHP) bullets, with nominal masses of 15.6 g (240 gr) impacting at a minimum velocity of 427 m/s (1400 ft/s) or less. It also provides protection against most handgun threats, as well as the threats mentioned in sections 2.1, 2.2, and 2.3.

2.5 Type III (Rifles)

This armor protects against 7.62 mm Full Metal Jacketed (FMJ) bullets (U.S. Military designation M80), with nominal masses of 9.6 g (148 gr) impacting at a minimum velocity of 838 m/s (2750 ft/s) or less. It also provides protection against the threats mentioned in sections 2.1, 2.2, 2.3, and 2.4.

2.6 Type IV (Armor Piercing Rifle)

This armor protects against .30 caliber armor piercing (AP) bullets (U.S. Military designation M2 AP), with nominal masses of 10.8 g (166 gr) impacting at a minimum velocity of 869 m/s (2850 ft/s) or less. It also provides at least single hit protection against the threats mentioned in sections 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, and 2.5.

2.7 Special Type

A purchaser having a special requirement for a level of protection other than one of the above standard types and threat levels should specify the exact test round(s) and minimum reference impact velocities to be used, and indicate that this standard shall govern in all other aspects.

3. DEFINITIONS

3.1 Angle of Incidence

The angle between the line of flight of the bullet and the perpendicular to the front surface of the backing material fixture as shown in figure 1.

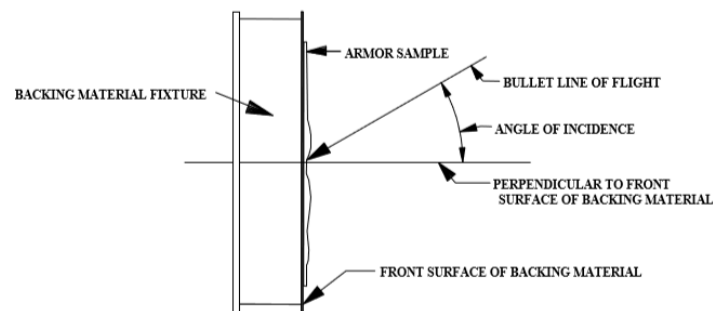


Figure 1. Angle of incidence

3.2 Armor Carrier

A component of the armor sample or armor panel whose primary purpose is to retain the ballistic panel and provide a means of supporting and securing the armor garment to the user. These carriers are not generally ballistic resistant.

3.3 Armor Panel

The portion of an armor sample that generally consists of an external carrier and its internal ballistic protective component(s) (e.g., the front and back panels).

3.4 Armor Sample

One complete armor garment comprised of a single wraparound style jacket, or a set (two) of front and back armor panels.

3.5 Backface Signature (BFS)

The depth of the depression made in the backing material, created by a nonpenetrating projectile impact, measured from the plane defined by the front edge of the backing material fixture. For armor tested on built up or curved backing material, the BFS is measured from the plane defined by the top edges of the depression or crater formed by the impact.

3.6 Backing Material

A homogenous block of nonhardening, oil base modeling clay, placed in contact with the back of the armor panel during ballistic testing.

3.7 Backing Material Fixture

A box fixture containing the backing material, typically comprised of a rigid frame constructed of wood or metal with a removable wooden back. The wooden back is not used during Ballistic Limit testing.

3.8 Baseline Ballistic Limit

The experimentally derived, statistically calculated impact velocity at which a projectile is expected to completely penetrate an armor component (sample, panel or ballistic panel) 50 % of the time (V_{50}). This velocity is also the velocity at which a projectile is expected to be stopped by the armor 50 % of the time (V_{50}).

3.9 Ballistic Panel

The protective component of an armor sample or panel, primarily consisting of ballistic resistant materials, usually enclosed in a nonremovable cover. The ballistic panel is normally retained within the armor sample or panel by a separate fabric carrier, and may be removable from the carrier.

3.10 Certification of Compliance

Manufacturer's affidavit (certification) that a production unit of body armor meets (complies with) all of the requirements of this standard (sec. 4.0) for the labeled protection classification (sec. 2.0).

3.11 Compliance

NIJ approval, after successful ballistic performance testing to this standard, of a body armor model submitted to the NIJ Compliance Testing Program (CTP).

3.12 Compliance Test Group

A group of armor samples, either six, four, or nine complete garments, submitted to the NIJ CTP for testing according to this standard (sec. 4.7).

3.13 Deformation

The maximum momentary displacement of the rear surface of an armor panel, caused by a fair hit that does not penetrate the armor, when the armor is in initial contact with the backing material.

3.14 Fair Hit

A bullet that impacts the armor sample or panel at an angle of incidence no greater than $\pm 5^\circ$ from the intended angle of incidence, no closer to the edge of the ballistic panel than 76 mm (3.0 in) and no closer to a prior hit than 51 mm (2.0 in), at an impact velocity within ± 9.1 m/s (30 ft/s) of the required reference test velocity.

A bullet that impacts the armor sample or panel at an angle of incidence no greater than $\pm 5^\circ$ from the intended angle of incidence, no closer to the edge of the ballistic panel than 76 mm (3.0 in) and no closer to a prior hit than 51 mm (2.0 in), at an impact velocity less than 7.6 m/s (30 ft/s) below the required reference test velocity which produces a penetration or an excessive backface signature.

A bullet that impacts the armor sample or panel at an angle of incidence no greater than $\pm 5^\circ$ from the intended angle of incidence, no closer to the edge of the ballistic panel than 76 mm (3.0 in) and no closer to a prior hit than 51 mm (2.0 in), at an impact velocity more than 7.6 m/s (30 ft/s) above the required reference test velocity which does not produce a penetration or an excessive backface signature.

3.15 Full Metal Jacketed Bullet (FMJ)

A bullet consisting of a lead core completely covered, except for the base, with copper alloy (approximately 90 % copper and 10 % zinc). “Total Metal Jacket (TMJ),” “Totally Enclosed Metal Case (TEMC),” and other commercial terminology for bullets with electro deposited copper and copper alloy coatings have been tested and are considered comparable to Full Metal Jacketed (FMJ) bullets for this standard.

3.16 Insert

A removable or nonremovable unit of ballistic material which can be part of either the armor or ballistic panel, which is utilized to enhance the ballistic performance of an armor in a specific area (also known as “trauma packs” or “trauma plates”).

3.17 Jacketed Hollow Point Bullet (JHP)

A bullet consisting of a lead core which has a hollow cavity or hole located in the nose of the bullet and is completely covered except for the hollow point with a copper alloy (approximately 90 % copper and 10 % zinc) jacket.

3.18 Jacketed Soft Point Bullet (JSP)

A lead bullet, also known as a Semi Jacketed Soft Point (SJSP), completely covered, except for the point, with copper alloy (approximately 90 % copper and 10 % zinc) jacket.

3.19 Lead Bullet

A bullet made entirely of lead, which may be alloyed with hardening agents.

3.20 Minimum Velocity

The designated NIJ Standard-0101.04 reference impact velocity (sec.5.4, table 1) less 9.1 m/s (30 ft/s).

3.21 Model

A manufacturer's designation (name, number, or other description) that serves to uniquely identify a specific configuration of body armor based upon the details of the ballistic panel construction (i.e., the number of layers of one or more types of ballistic resistant material assembled in a specific manner or the manner in which the armor is held in place upon the torso).

NIJ verifies the ballistic resistance of a **model** based on ballistic testing of **model** samples in accordance with this standard. As an example, differences in stitching (e.g., box stitch versus quilt stitch) would make the ballistic panels different **models**. If a **model** of armor fails compliance testing, the manufacturer may never resubmit any armor under that model designation.

3.22 Obliquity

The same determination of striking condition as "angle of incidence" (sec. 3.1).

3.23 Penetration

Complete Penetration (CP): The complete perforation of an armor sample or panel by a test bullet or by a fragment of the bullet or armor sample itself, as evidenced by the presence of that bullet or fragment (armor or bullet) in the backing material, or by a hole which passes through the armor and/or backing material.

Partial Penetration (PP): Any impact that is not a complete penetration is considered a partial penetration.

3.24 Reference Bullet Velocity

The designated impact velocity of NIJ Standard–0101.04 test threat ammunition (sec. 5.4, table 1), obtained using specified ANSI/SAAMI unvented velocity test barrels.

3.25 Retest

The NIJ CTP procedure for resolving ballistic performance issues with NIJ Standard–0101.04 compliant body armor models (sec. 5.22).

3.26 Round Nose Bullet (RN)

A bullet with a blunt or rounded nose. A bullet with a generally blunt or rounded nose or tip, which possesses a small flat surface at the tip of the bullet shall also be considered a round nose bullet for this standard.

3.27 Semi Jacketed Hollow Point Bullet (SJHP)

A bullet consisting of a lead core with a copper alloy (approximately 90 % copper and 10 % zinc) jacket covering the base and bore riding surface (major diameter), which leaves some portion of the lead core exposed, thus forming a lead nose or tip, which has a hollow cavity or hole located in the nose or tip of the bullet.

3.28 Semi Jacketed Soft Point Bullet (SJSP)

A bullet, also known as a Jacketed Soft Point (JSP), consisting of a lead core with a copper alloy (approximately 90 % copper and 10 % zinc) jacket covering the base and bore riding surface (major diameter), which leaves some portion of the lead core exposed, thus forming a lead nose or tip.

3.29 Strike Face

The surface of an armor sample or panel, designated by the manufacturer, as the surface that should face the incoming ballistic threat.

3.30 Wear Face

The surface of an armor sample or panel, designated by the manufacturer, as the surface that should be worn against the body.

3.31 Yaw

The angular deviation of the longitudinal axis of the projectile from its line of flight, measured as close to the target as practical.

4. REQUIREMENTS

4.1 Acceptance Criteria

An armor model satisfies the requirements of this standard if all six armor samples (sec. 4.7) meet workmanship (sec. 4.3) and labeling (sec. 4.5) requirements and, when tested in accordance with section 5.0, each component part of the armor sample (front, back, side, groin and coccyx) meets the penetration and backface signature requirements of sections 4.6, 5.4, and table 1.

Each submitted armor sample will also be tested to determine a baseline Ballistic Limit velocity (sec. 5.17), to be used for any future NIJ retest examination of that armor model (sec. 5.22).

4.2 Test Sequence

Tests shall be conducted in the order presented in section 5.0 of this standard. The Compliance Test Report (CTR), found in appendix A, shall be used to record and document the results of the tests.

4.3 Workmanship

Each armor sample shall be free from wrinkles, blisters, cracks or fabric tears, crazing, chipped or sharp corners and edges, or other evidence of inferior workmanship. Additionally, all samples shall be identical in appearance, size, and manner of construction.

4.4 Traceability

Manufacturers will submit along with their samples, or have on file with NIJ's CTP Office, documentation of the method(s) they use to assure configuration control, uniformity of production methods, and materials traceability.

4.5 Labeling

Each set or sample of ballistic resistant armor shall be durably and clearly marked (labeled), in a readable type and font size, in accordance with the requirements set forth below.

4.5.1 Ballistic Panels

Every ballistic panel shall have a label. The label shall be permanently attached to either exterior surface of the panel. The label shall contain the following information, written in the English language (fig. 2.):

- (a) Name, logo or other identification of the manufacturer.
- (b) The rated level of protection, according to section 2.0 of this standard, and referenced to this edition of the standard (i.e., Type II in accordance with NIJ Standard-0101.04).
- (c) Size (if custom fitted, provision for the name of the individual for whom it is made).
- (d) Lot number.

- (e) Date of manufacture.
- (f) Date of issue line (to be filled in by user).
- (g) A model designation that uniquely identifies the panel for purchasing purposes (panels designed to fit the male and female torsos shall have separate model designations).
- (h) Strike face or wear face - the surface of the garment that is to face the threat or to be worn next to the body must be identified.
- (i) Serial number.
- (j) Care instructions for the ballistic material in accordance with 16 CFR 423 (Part 423, Care Labeling of Textile Wearing Apparel and Certain Piece Goods, as amended effective January 2, 1984; Federal Trade Commission Regulation Rule).
- (k) For Type I through Type IIIA armor, a warning in type at least twice the size of the rest of the type on the label, exclusive of the information required in “a” above, stating that the armor is not intended to protect the wearer from rifle fire and, if applicable, that the armor is not intended to protect the wearer from sharp edged or pointed instruments. (Note: printing color changes are acceptable but cannot be substituted for the type size requirement herein).
- (l) For armor that has been successfully tested for compliance to this standard through NIJ’s voluntary CTP at an NIJ-approved testing facility, the following statement shall be included on the label: *“The Manufacturer certifies that this model of armor has been tested through NLECTC and has been found to comply with Type (insert appropriate type designation) Performance for NIJ Standard-0101.04.”*
- (m) **THE COMPLIANCE STATEMENT ABOVE SHALL NOT APPEAR ON ARMOR THAT HAS FAILED NIJ COMPLIANCE TESTING, OR ON ARMOR THAT HAS NOT BEEN TESTED FOR COMPLIANCE AS SPECIFIED BY THIS STANDARD. ONCE AUTHORIZED TO PLACE THIS STATEMENT ON A MODEL OF ARMOR, THE MANUFACTURER SHALL NOT ALTER OR MODIFY THIS STATEMENT IN ANY WAY.**



MANUFACTURER'S NAME	
MANUFACTURER'S ADDRESS (Logo may be used)	
PERSONAL BODY ARMOR	
<hr style="border: 2px solid black;"/>	
SIZE: _____	MODEL: _____
DATE OF MFG: _____	SERIAL NO.: _____
DATE OF ISSUE: _____	LOT NO.: _____
<i><u>The Manufacturer certifies that this model of armor has been tested through NLECTC and has been found to comply with Type II Performance in accordance with NIJ Standard—0101.04.</u></i>	
<u>WARNING!</u>	
<u>This Garment is Rated ONLY for the Ballistic Threat Level Stated Above. It is NOT Intended to Protect Against Rifle Fire, or Sharp Edged or Pointed Instruments.</u>	
<u>THIS SIDE TO BE WORN AWAY FROM BODY</u>	
Care Instructions for Ballistic Panel: (Sample Instructions Shown)	
1) Do Not Wash or Dry Clean	
2) Wipe With a Damp Cloth	

Figure 2. Sample ballistic panel label

4.5.2 Armor Carriers with Nonremovable Ballistic Panels

Armor with ballistic panels that are nonremovable shall, in addition to the label required for the ballistic panel, have a label on the carrier (fig.3) that is in conformance with the requirements for the ballistic panels (sec. 4.5.1) unless the armor is so constructed that the ballistic panel label is not covered by the carrier.

4.5.3 Armor Carriers with Removable Ballistic Panels

Armor carriers with removable ballistic panels shall have label(s) on either exterior surface of the carrier. If the carrier is one piece (i.e., all parts are sewn together into one garment) one label in conformance with the requirements of this section is sufficient. If the front and back of the carrier are separable, the front and back parts shall each be labeled. The label shall contain the following information (fig. 3):

- (a) Name, logo or other identification of the manufacturer.
- (b) A statement telling the user to look at the ballistic panels to determine the level of ballistic protection.

- (c) Size (if custom fitted, provision for the name of the individual for whom it is made to be filled in by user).
- (d) Date of issue line (to be filled in by user).
- (e) A model designation that uniquely identifies the garment for purchasing purposes (armor designed to fit the male and female torso shall have separate model designations).
- (f) For armors where the carrier extends beyond the ballistic panel more than 40 mm (1.5 in), the edge of the panel shall be clearly identified on the carrier by a label stating: “NO BALLISTIC PROTECTION BEYOND THIS POINT” (fig.4), and a stitch line through both sides of the carrier at this location to keep the ballistic panel from shifting within the carrier.
- (g) Care instructions for the armor carrier in accordance with 16 CFR 423.

MANUFACTURERS NAME	
MANUFACTURER’S ADDRESS	
(Logo may be used)	
PERSONAL BODY ARMOR	
<hr style="border: 2px solid black;"/>	
NAME: _____	MODEL: _____
SIZE: _____	SERIAL NO.: _____
DATE OF MFG: _____	LOT NO.: _____
DATE OF ISSUE: _____	
 <i><u>This carrier offers no ballistic protection without ballistic panels being inserted.</u></i> <i><u>See ballistic panel labels for protection level provided in accordance with</u></i> <i><u>NIJ Standard-0101.04.</u></i>	
 <u>CARE INSTRUCTIONS FOR CARRIER:</u> <i>(sample instructions shown – to be provided by Manufacturer)</i>	
1) Remove Ballistic Panels from Front and Back of Outer Shell Vest (Carrier).	
2) Ensure Hook and Pile Fasteners are in Closed Position during Washing Cycle.	
3) Automatic Machine Wash the Outer Shell Vest (Carrier) Only, Using the Permanent Press Cycle and Warm Water Settings (Approximately 120 F).	
4) Use Low Sudsing Detergent According to Detergent Manufacturer’s Directions.	
5) <u>DO NOT USE BLEACH.</u>	
6) Carrier Only may be Tumble Dried at Medium Temperature Setting or may be Line Dried.	
7) Carrier Only may be Dry Cleaned.	
8) Carrier Must be Completely Dry Before Inserting Ballistic Panels.	

Figure 3. Sample carrier label

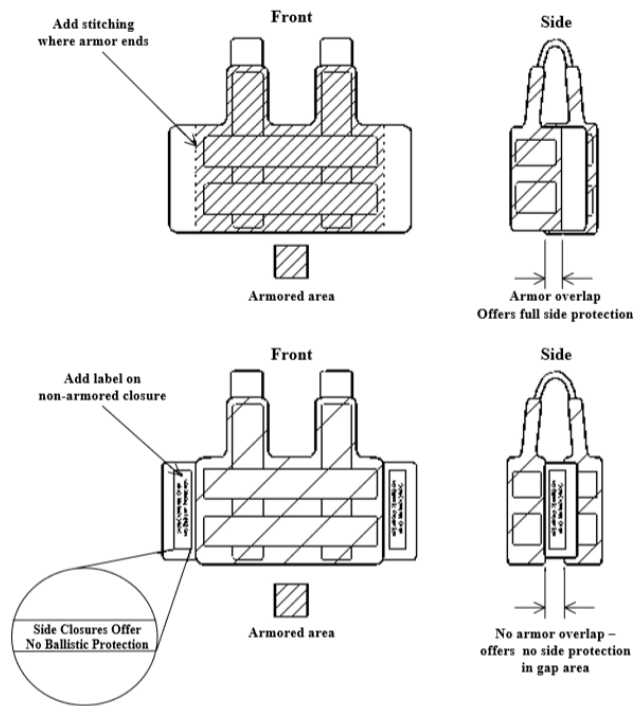


Figure 4. Sample label locations

4.5.4 Armors with Built In Trauma Packs

For armor models that contain built in inserts or trauma packs, manufacturers must submit a detailed diagram of the location of each trauma pack. If a manufacturer fails to notify the NIJ CTP Office of the existence of a built in insert or trauma pack and it is discovered during testing, the test results for that model will be invalidated. The manufacturer may resubmit the model for testing under the same model designation after resolving the lack of documentation concerning the location of the insert or trauma pack.

4.6 Ballistic Penetration and Backface Signature Criteria

Each part of one complete body armor sample shall be tested for resistance to ballistic penetration and backface signature (depth of depression in backing material) after wet conditioning in accordance with the procedures in section 5.0. Complete penetration or any designated depth measurement of BFS in the backing material greater than 44 mm (1.73 in) by any fair hit (as defined in sec. 3.14) shall constitute a failure.

If any armor sample part fails at any time during compliance testing, data for that shot shall be recorded and the testing continued until all required testing is completed. The detailed test requirements are summarized in section 5.4, table 1. Type I, IIA, II, or IIIA armor designed to include a removable insert for additional penetration or BFS protection over a localized area of the armor sample or panel shall be tested without the insert.

4.7 Sampling

4.7.1 Types I, IIA, II, and IIIA

Six complete armors, sized to fit a 117 cm (46 in) to 122 cm (48 in) chest circumference for males and a 107 cm (42 in) to 112 cm (44 in) chest circumference for females, shall constitute the compliance test group. Five of these armor samples shall be selected at random from the group and used for ballistic testing. Four armor samples will be used for Penetration and Backface Signature testing (sec. 5.4), and one armor sample will be used for baseline Ballistic Limit determination (sec. 5.17). The remaining armor sample will be returned to the manufacturer if not used in the ballistic testing.

4.7.2 Type III

Four complete armor samples, or panels, no smaller than 254 mm x 305 mm (10.0 in x 12.0 in) shall constitute a compliance test group. Two of these armor samples shall be selected at random from the group and used for the testing. Two armors will be used for Penetration and Backface Signature testing, and at least one armor sample will be used for baseline Ballistic Limit determination (sec. 5.17). Any remaining armor samples will be returned to the manufacturer if not used in the ballistic testing.

4.7.3 Type IV

Nine complete armor samples/panels/inserts, no smaller than 203 mm x 254 mm (8.0 in x 10.0 in) shall constitute a compliance test group. Eight of these armor samples shall be selected at random and used for the testing. Two armor samples will be used for Penetration and Backface Signature testing, and at least six complete armor samples will be used for baseline Ballistic Limit determination (sec. 5.17). Any remaining armor samples will be returned to the manufacturer if not used in the testing.

4.8 Armor Backing Material

4.8.1 Backing Material Fixture (BMF)

A minimum of three Backing Material Fixtures filled with appropriate backing material are required. The inside dimensions of the BMF shall be 610 mm x 610 mm x 140 mm \pm 2 mm (24.0 in x 24.0 in x 5.5 in \pm 0.06 in) deep. The tolerance on all dimensions will be \pm 2 mm (0.06 in).

The back of the fixture shall be removable and constructed of 19.1 mm (0.75 in) thick wood or plywood.

4.8.2 Fixture Construction

The sides of the box fixture shall be constructed of rigid wood or metal, preferably with a metal front edge to reliably guide the preparation of the flat front surface of the backing material. The backing material shall be worked into the fixture (box) with as few voids as possible. The backing material surface shall be cut, "struck," or otherwise manipulated to result in a smooth, flat front surface even with the front edges of the box fixture.

4.8.3 Backing Material

It has been determined that Roma Plastilina No.1¹ oil-based modeling clay is acceptable for the backing material application. In the interest of conformity only, it is being specified as the designated backing material for all NIJ Standard-0101.04 Body Armor Compliance Testing. This material is available from art supply stores.

4.8.4 Backing Material Replacement and Identification

Clay used as backing material in NIJ Compliance Testing shall be replaced on an annual basis as a minimum, and the replacement date shall be recorded on the backing material fixture.



4.9 Test Surveillance

NIJ representatives may witness compliance testing at any time. NIJ or its designated representatives shall be afforded the opportunity to examine the range and test setup before beginning any new series of compliance testing. The manufacturer shall inform NIJ CTP personnel of the intent to test at least two weeks before the start of testing.

¹The use of brand names in this standard does not constitute endorsement by the U.S. Department of Justice; National Institute of Justice; U.S. Department of Commerce; National Institute of Standards and Technology; Office of Law Enforcement Standards; or any other agency of the United States Federal Government, nor does it imply that the product is best suited for its intended applications.

ภาคผนวก ข.

แสดงองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกลของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304

		INSPECTION CERTIFICATE 3.1 ISSUE DATE: 2017-06-17									
		ACCORDING TO EN 10204		CERTIFICATE NO 143534		Rev 1					
MANUFACTURER'S MARK BHS	INSPECTOR'S STAMP 		MELTING PROCESS		E/AOD						
CUSTOMER: P.K. STEEL CENTER LTD., PART 84/086 PETCHBUNSEM ROAD, NONGKANGPLU, NONGKHAEM, BANGKOK 10160, THAILAND. Thailand			ORDER No. BE05354	ITEM No. 3	DELIVERY NOTE No. DEL041329						
			CUSTOMER ORDER No. B17-05/03								
			REQUIREMENTS								
SPECIFICATIONS ASTM A240 / A240M-15a ASME BPVC-III SA240 / SA240M-2013		MATERIAL CODE 304L 304L		CASE BPC2030596 [1962 kg] BPC2030597 [1962 kg] BPC2030598 [1963 kg] BPC2030599 [1963 kg]							
*ทางบริษัทฯ ออกใบ certificate ฉบับนี้ ตามที่ลูกค้าได้สั่งซื้อ จำนวน 1 แผ่น ตามใบสั่งซื้อ เลขที่ JV 6102005 ลอ. 1/2/61 เท่านั้น *											
TOLERANCE: BHSTOL PRODUCT: 2B Finish, Cold Rolled, Annealed & Pickled, Skin passed				KURZNAME HEAT No.: 368P							
DIMENSIONS: 2 mm X 1220 mm X 2440 mm		QUANTITY: 180	MASS: 7852 Kg	MATERIAL No.: N0039561							
CHEMICAL COMPOSITION (%)											
	C	S	P	Mn	Si	Cr	Ni	N			
Min						17.5	8.0				
Max	0.030	0.030	0.045	2.00	0.75	19.5	12.0	0.10			
Actual	0.021	0.001	0.028	1.74	0.25	18.1	8.0	0.08			
MECHANICAL PROPERTIES											
TEMPERATURE	DIRECTION	POSITION	Rm MPa	Rp0.2 MPa	A50 %	HRBW					
Ambient	Transverse	Requirement Min	485	170	40						
		Max				92					
Ambient	Transverse	Head	662	321	48	84					
		Tail				84					
INTERGRANULAR CORROSION			This material is free from mercury contamination. The radiation level exhibited by this material is not greater than the normal background level. This document is issued without alteration or erasure and may only be reproduced in full. Tests to verify batch and quality have been made. Verwechslungsprüfung wurde durchgeführt. Visual and dimensional control: no exceptions. Beschichtungsprüfung und Abmessung: ohne Beanstandung. The delivery is in accordance with the order. Die Lieferung entspricht den Bestellbedingungen. This material meets the Hardness requirement of Norm MR-6175 & Norm MR-0103. Material has been PMG Tested. Rm = Tensile strength (UTS); Rp0.2 = Yieldproof strength at 0.2% strain (Rp1.0 = Yieldproof strength at 1.0% strain); A5 = Elongation with gauge length 5.65*5g (cross-sectional area); A5 = Elongation with gauge length 50 mm; HRBW = Rockwell hardness B scale. Bahru Stainless Sdn Bhd is certified with ISO 9001 & ISO 14001. BAHRU STAINLESS SDN BHD IS MEMBER OF ACERINOX GROUP.								
HEAT TREATMENT (SOLUTION ANNEALED)											
Anneal °C		Quench									
1050 - 1100		AIR/SPRAY									
						BAHRU STAINLESS PTD 4069 (PLO 108), Jalan Rumbia 4 Tanjung Langsat Industrial Complex 81700 Pasir Gudang, Johor, Malaysia Swin Le Teoh					

ภาคผนวก ค.

แสดงสมบัติทางกลของ แผ่นเส้นใยคาร์บอน – ไฟเบอร์ ขนาด 160 g/m²

จาก Toray Carbon Fibers America, Inc (CFA)

**TECHNICAL
DATA SHEET**
No. CFA-001

TORAYCA® T300 DATA SHEET

Baseline carbon fiber used in aerospace applications. Has 30 year production history and is known for its balanced composite properties, high quality, consistency, reliability and supplyability.

FIBER PROPERTIES

	English	Metric	Test Method
Tensile Strength	512 ksi	3,530 MPa	TY-0308-01
Tensile Modulus	33.4 Msi	230 GPa	TY-0308-01
Strain	1.5 %	1.5 %	TY-0308-01
Density	0.064 lbs/in ³	1.76 g/cm ³	TY-0308-02
Filament Diameter	2.8E-04 in.	7 µm	
Yield			
1K	22,568 ft/lbs	66 g/1000m	TY-0308-03
3K	7,523 ft/lbs	198 g/1000m	TY-0308-03
6K	3,761 ft/lbs	396 g/1000m	TY-0308-03
12K	1,862 ft/lbs	800 g/1000m	TY-0308-03
Sizing Type	40A, 40B	1.0 %	TY-0308-05
& Amount	40D	0.7 %	TY-0308-05
	50A, 50B	1.0 %	TY-0308-05
Twist	Twisted, Untwisted, or Never twisted		

FUNCTIONAL PROPERTIES

CTE	-0.41 $\alpha 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Specific Heat	0.19 Cal/g $\cdot^{\circ}\text{C}$
Thermal Conductivity	0.025 Cal/cm $\cdot\text{s}^{\circ}\text{C}$
Electric Resistivity	$1.7 \times 10^{-2} \Omega\text{-cm}$
Chemical Composition: Carbon	93 %
Na + K	<50 ppm

COMPOSITE PROPERTIES *

Tensile Strength	270 ksi	1,860 MPa	ASTM D-3039
Tensile Modulus	20.0 Msi	135 GPa	ASTM D-3039
Tensile Strain	1.3 %	1.3 %	ASTM D-3039
Compressive Strength	215 ksi	1,470 MPa	ASTM D-695
Flexural Strength	260 ksi	1,810 MPa	ASTM D-790
Flexural Modulus	18.0 Msi	125 GPa	ASTM D-790
ILSS	14 ksi	10 kgf/mm ²	ASTM D-2344
90° Tensile Strength	11.0 ksi	76 MPa	ASTM D-3039

* Toray 250°F Epoxy Resin. Normalized to 60% fiber volume.

TORAY CARBON FIBERS AMERICA, INC.

T300

COMPOSITE PROPERTIES **

Tensile Strength	255 ksi	1,760 MPa	ASTM D-3039
Tensile Modulus	19.5 Msi	130 GPa	ASTM D-3039
Tensile Strain	1.3 %	1.3 %	ASTM D-3039
Compressive Strength	230 ksi	1,570 MPa	ASTM D-695
Compressive Modulus	18.5 Msi	125 GPa	ASTM D-695
In-Plane Shear Strength	14 ksi	98 MPa	ASTM D-3518
ILSS	15.5 ksi	11 kgf/mm ²	ASTM D-2344
90° Tensile Strength	11.5 ksi	80 MPa	ASTM D-3039

** Toray Semi-Toughened 350°F Epoxy Resin. Normalized to 60% fiber volume.

See Section 4 for Safety & Handling information. The above properties do not constitute any warranty or guarantee of values.

These values are for material selection purposes only. For applications requiring guaranteed values, contact our sales and technical team to establish a material specification document.

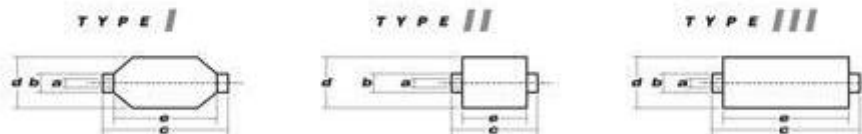
PACKAGING

The table below summarizes the tow sizes, twists, sizing types, and packaging available for standard material. Other bobbin sizes may be available on a limited basis.

Tow Sizes	Twist ¹	Sizing	Bobbin Net Weight (kg)	Bobbin Type ²	Bobbin Size (mm)					Spools per Case	Case Net Weight (kg)
					a	b	c	d	e		
1K	A	40A, 50A	1.0	I	94	99	320	135	260	15	15
	A	40A, 50A	1.0	II	76	82	192	132	156	16	16
	B	50B	1.0	II	76	82	192	132	156	16	16
3K	A	40A, 50A	2.0	II	76	82	192	157	156	12	24
	B	40B, 50B	2.0	II	76	82	192	157	156	12	24
6K	A	40D, 50A	2.0	II	76	82	192	157	156	12	24
	B	40D, 50B	2.0	II	76	82	192	157	156	12	24
12K	A	50A	4.0	II	76	82	192	204	156	6	24
	B	50B	4.0	II	76	82	192	204	156	6	24

¹ Twist - A: Twisted yarn B: Untwisted yarn made from a twisted yarn through an untwisting process.

² Bobbin Type - See Diagram below



TORAY CARBON FIBERS AMERICA, INC.

6 Hutton Centre Drive, Suite #1270, Santa Ana, CA 92707 TEL: (714) 431-2320 FAX: (714) 424-0750
Sales@Toraycfa.com Technical@Toraycfa.com www.torayusa.com

ภาคผนวก ง.

ค่าคงที่ของวัสดุชนิดต่างๆสำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Element Method
 ง.1 ตารางแสดงค่าคงที่วัสดุของ Steel สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Element Method

Properties	Value	Units
EOS	Shock	-
Density	7.89	g/cm ³
Gruneisen Coefficient	2.17	-
Parameter C1	4569	m / a
Parameter S1	1.49	-
Strength	Johnson Cook	-
Shear Modulus	8.18e7	kpa
Yield Strength	3.6e5	kpa
Hardening Constant	1.244e6	kpa
Hardening Exponent	0.72	-
Thermal Softening	3.2525	-
Strain Rate Constant	0.023	-

ง. 2 ตารางแสดงค่าคงที่วัสดุของแผ่นเส้นใยคาร์บอน สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธี
Finite Element Method

Properties	Value	Units
EOS	Puff	-
Density	1.29	g/cm ³
Gruneisen Coefficient	0.35	-
Parameter A1	8.21e6	m / a
Parameter A2	7.036e7	-
Parameter A3	0	-
Strength	Vonmisses	-
Shear Modulus	3000000	kpa
Yield Strength	300000	kpa
Expansion Coefficient	0.25	kpa
Sublimation Energy	8.23e6	kpa
Hardening Exponent	0.72	-
Thermal Softening	3.2525	-
Strain Rate Constant	0.023	-
Reference Temperature	0	-
Specific Heat	0	-

ง.3 ตารางแสดงค่าคงที่วัสดุของแผ่นฟิล์มเอ็กซเรย์ สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธี
Finite Element Method

Equation of State	Ortho
Reference density	9.15000E-01 (g/cm ³)
Stiffness	Engineering constants
Youngs Modulus 11	3.62000E+06 (kPa)
Youngs Modulus 22	5.11000E+07 (kPa)
Youngs Modulus 33	5.11000E+07 (kPa)
Poissons Ratio 12	1.30000E-02 (none)
Poissons Ratio 23	0.00000E+00 (none)
Poissons Ratio 31	5.00000E-01 (none)
Shear Modulus 12	2.00000E+06 (kPa)
Shear Modulus 23	1.92000E+05 (kPa)
Shear Modulus 31	2.00000E+06 (kPa)
Material axes	I-J-K Space
Rotation angle about 11 (degrees)	0.00000E+00 (none)
Volumetric response	Shock
Gruneisen coefficient	1.64000E+00 (none)
Parameter C1	3.69890E+03 (m/s)
Parameter S1	1.30000E+00 (none)
Parameter Quadratic S2	0.00000E+00 (s/m)
Relative volume, VE/V0	0.00000E+00 (none)
Relative volume, VB/V0	0.00000E+00 (none)
Parameter C2	0.00000E+00 (m/s)
Parameter S2	0.00000E+00 (none)
Reference Temperature	2.93000E+02 (K)
Specific Heat	1.85000E+03 (J/kgK)
Thermal Conductivity	0.00000E+00 (J/mKs)
Strength	Orthotropic Yield
A11	1.60000E-02 (none)

A22	6.00000E-04 (none)
A33	6.00000E-04 (none)
A12	0.00000E+00 (none)
A13	0.00000E+00 (none)
A23	0.00000E+00 (none)
A44	1.00000E+00 (none)
A55	1.70000E+00 (none)
A66	1.70000E+00 (none)
Eff. Stress #1	1.48000E+03 (kPa)
Eff. Stress #2	7.00000E+03 (kPa)
Eff. Stress #3	2.70000E+04 (kPa)
Eff. Stress #4	4.00000E+04 (kPa)
Eff. Stress #5	5.00000E+04 (kPa)
Eff. Stress #6	6.00000E+04 (kPa)
Eff. Stress #7	8.00000E+04 (kPa)
Eff. Stress #8	9.80000E+04 (kPa)
Eff. Stress #9	2.00000E+05 (kPa)
Eff. Stress #10	1.00000E+06 (kPa)
Eff. Plastic Strain #1	0.00000E+00 (none)
Eff. Plastic Strain #2	1.00000E-02 (none)
Eff. Plastic Strain #3	1.00000E-01 (none)
Eff. Plastic Strain #4	1.50000E-01 (none)
Eff. Plastic Strain #5	1.75000E-01 (none)
Eff. Plastic Strain #6	1.90000E-01 (none)
Eff. Plastic Strain #7	2.00000E-01 (none)
Eff. Plastic Strain #8	2.05000E-01 (none)
Eff. Plastic Strain #9	2.10000E-01 (none)
Failure	Orthotropic Softening
Tensile Failure Stress 11	1.01000E+20 (kPa)
Tensile Failure Stress 22	1.15000E+06 (kPa)
Tensile Failure Stress 33	1.15000E+06 (kPa)

Maximum Shear Stress 12	5.75000E+05 (kPa)
Maximum Shear Stress 23	1.20000E+05 (kPa)
Maximum Shear Stress 31	5.75000E+05 (kPa)
Fracture Energy 11	7.90000E+02 (J/m ²)
Fracture Energy 22	3.00000E+01 (J/m ²)
Fracture Energy 33	3.00000E+01 (J/m ²)
Fracture Energy 12	1.46000E+03 (J/m ²)
Fracture Energy 23	1.46000E+03 (J/m ²)
Fracture Energy 31	1.46300E+00 (J/m ²)
Damage Coupling Coefficient	0.00000E+00 (none)
Erosion	None
Material Cutoffs	-
Maximum Expansion	1.00000E-01 (none)
Minimum Density Factor	1.00000E-04 (none)
Minimum Density Factor (SPH)	2.00000E-01 (none)
Maximum Density Factor (SPH)	3.00000E+00 (none)
Minimum Soundspeed	1.00000E-06 (m/s)
Maximum Soundspeed (SPH)	1.01000E+20 (m/s)
Maximum Temperature	1.01000E+20 (K)

ง.4 ตารางแสดงค่าคงที่วัสดุของกระสุนปืน (ตะกั่ว , ทองเหลือง) สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Element Method

Properties	Lead Value	Brass Value	Units
EOS	Shock	Shock	-
Density	11.34	8.93	g/cm ³
Gruneisen Coefficient	2.7	1.99	-
Parameter C1	2051	3940	m / a
Parameter S2	1.46	1.489	-
Strength	Vonmises	Vonmises	-
Shear Modulus	5600000	45000000	kpa
Yield Strength	5000	70000	kpa

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายอัฐวุฒิ ผลาสินธุ์
วัน เดือน ปี เกิด	8 มกราคม 2535
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	89/474 หมู่บ้านพฤษ์เกล้าปิ่นเกล้าสาย 5 ตำบลบางเตย อำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม 73210
ผลงานตีพิมพ์	การประชุมวิชาการทางโลหวิทยาแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 11



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY