

การพัฒนาแผ่นปะทะของเสื้อเกราะกันกระสุนจากพอลิเบนซอกซาซีนคอมพอลิทีที่เสริมแรงด้วย  
เส้นใยคาร์บอนและเส้นใยแก้ว



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2560  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF STRIKE PANEL OF BODY ARMOR FROM POLYBENZOXAZINE COMPO  
SITES REINFORCED WITH CARBON AND GLASS FIBERS

Miss Thanchanok Noochsuparb



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาแผ่นปะทะของเสื้อเกราะกันกระสุนจากพอลิ  
เบนซอกลาซีนคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน  
และเส้นใยแก้ว

โดย

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ศาสตราจารย์ ดร. ศราวุธ ริมดุสิต

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร. ศิริพร ดำรงค์ศักดิ์กุล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ศาสตราจารย์ ดร. ศราวุธ ริมดุสิต)

.....กรรมการ  
(ดร. พิมพ์พร พลเพชร)

.....กรรมการ  
(ดร. สุจารีณี สิ้นไชย)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จันจิรา จับศิลป์)

ัญชนก นุชสุภาพ : การพัฒนาแผ่นปะทะของเสื้อเกราะกันกระสุนจากพอลิเบนซอกซาซีนคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยแก้ว (DEVELOPMENT OF STRIKE PANEL OF BODY ARMOR FROM POLYBENZOXAZINE COMPOSITES REINFORCED WITH CARBON AND GLASS FIBERS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ. ดร. ศรารุช ริมคูสิต, 88 หน้า.

งานวิจัยนี้ทำการพัฒนาเกราะแข็งกันกระสุนจากวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยแก้วชนิดชนิดความแข็งแรงสูง (S glass) ในส่วนของแผ่นหน้าหรือแผ่นปะทะให้มีน้ำหนักเบาและมีประสิทธิภาพทางกลสูงขึ้น โดยนำเส้นใยคาร์บอนที่มีสมบัติความหนาแน่นต่ำและมีความแข็งแรงสูงมาใช้ร่วมกับเส้นใยแก้วชนิดความแข็งแรงสูง ที่มีสมบัติรับแรงกระแทกได้สูง ความแข็งแรงสูง และราคาต่ำ โดยศึกษาอิทธิพลของจำนวนชั้นและการจัดลำดับชั้นของเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้วชนิดความแข็งแรงสูง ในส่วนของแผ่นปะทะต่อประสิทธิภาพการทำลายหัวกระสุน สมบัติทางกายภาพ และทางกลเพื่อนำมาประยุกต์ใช้เป็นเกราะกันกระสุน จากผลการทดลองในส่วนของสมบัติทางกลของการจัดลำดับชั้นเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้วพบว่า การจัดลำดับชั้นแบบโครงสร้างแซนวิชจะให้ค่าสูงสุด โดยค่าความแข็งแรงภายใต้แรงดึงและภายใต้แรงกระแทกสูงสุดในชิ้นงานที่มีรูปแบบเส้นใยคาร์บอนเป็นแกนกลาง (GCG) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 401 เมกะปาสคาล และ 250 กิโลจูลต่อตารางเมตร ในส่วนของค่าความแข็งที่ผิวมีค่าสูงเมื่อวัดค่าด้านที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว สำหรับสมบัติทางกายภาพพบว่า พอลิเบนซอกซาซีนเมตริกยึดติดได้ดีกับเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยแก้วตรวจสอบโดยพิจารณาโครงสร้างสัณฐานของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยแก้ว การทดสอบความแข็งแรงของวัสดุจากการทดสอบยิงพบว่า เสื้อเกราะแข็งกันกระสุนที่ประกอบด้วยพอลิเบนซอกซาซีนเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยแก้วชนิดความแข็งแรงสูง โดยมีการจัดลำดับชั้นแบบโครงสร้างแซนวิชโดยเส้นใยคาร์บอนเป็นแกนกลางของวัสดุ จำนวน 2 แผ่นประกบกับพอลิเบนซอกซาซีนอัลลอยด์เสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิดจำนวน 1 แผ่น ซึ่งมีค่าหนาแน่นเชิงพื้นที่ 4.18 กรัม/ตารางเซนติเมตร สามารถต้านการเจาะทะลุของกระสุน 7.62 x 51 มม. ที่ความเร็ว 847 ± 9 เมตรต่อวินาที ตามมาตรฐาน NIJ-0101.06 ที่ระดับภัยคุกคามระดับ 3 ได้

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2560

# # 5870164921 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS:

THANCHANOK NOOCHSUPARB: DEVELOPMENT OF STRIKE PANEL OF BODY ARMOR FROM POLYBENZOXAZINE COMPOSITES REINFORCED WITH CARBON AND GLASS FIBERS. ADVISOR: PROF. DR. SARAWUT RIMDUSIT, Ph.D., 88 pp.

This study aims to develop a light weight and high-performance strike panel of a hard ballistic armor from carbon/glass fabric-reinforced polybenzoxazine composites. The effects of various designs of lamination stacking of carbon/glass fiber reinforced polybenzoxazine composites on mechanical and physical properties as well as ballistic impact resistance to 7.62x51 mm ammunition based on National Institute of Justice (NIJ standard-0101.06) level III of strike panel for hard ballistic armor applications were investigated. The experimental results revealed that the tensile strength and the impact strength of sandwich structure of the composite having glass/carbon/glass (GCG) design exhibited the greatest values among other designs in which those values were 401 MPa and 250 kJ/m<sup>2</sup>, respectively. From scanning electron micrograph, the substantial interfacial adhesion between reinforcing fibers and benzoxazine matrix was observed. The result of ballistic impact test presented that the hard ballistic armor consisted of 2 panels having stacking design of glass/carbon/glass fiber-reinforced polybenzoxazine composite backed by panel of aramid fiber-reinforced polybenzoxazine/polyurethane alloy having areal weight density of 4.18 g/cm<sup>2</sup> could resist the penetration of 7.62 x 51 mm projectile at a velocity of 847 ± 9 m/s according to NIJ standard-0101.06 at test level III.

Department: Chemical Engineering      Student's Signature .....

Field of Study: Chemical Engineering      Advisor's Signature .....

Academic Year: 2017

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับการช่วยเหลือจากหลายๆท่าน ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ศราวุธ ริมดุสิต อาจารย์ที่ปรึกษา เป็นอย่างสูงสำหรับการให้คำปรึกษาเกี่ยวกับงานวิจัย วางแผนการวิจัย การตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ และแนวทางในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณคณะกรรมการ ซึ่งได้แก่ ศาสตราจารย์ ดร.ศิริพร ดำรงค์ศักดิ์กุล ประธานกรรมการ, ดร. พิมพ์พร พลเพชร, ดร.สุจาริณี สิ้นไชย และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จันจิรา จัปศิลป์ กรรมการ ที่ท่านได้สละเวลาอันมีค่ามาสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา สำหรับเงินทุนในการทำวิจัย

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการพอลิเมอร์ สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับสถานที่และอุปกรณ์ในการทำการทดลอง รวมทั้งเอื้อเฟื้อเครื่องมือในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ นางสาวภัทริน โมรา, นางสาวมนัญญา โอฆวิไล และ พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ห้องปฏิบัติการพอลิเมอร์ สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้กำลังใจ คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และทุกคนในครอบครัวที่เป็นกำลังใจที่ให้การสนับสนุนตลอดมาจนกระทั่งงานวิจัยลุล่วงไปได้ด้วยดี

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
หน้า.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ท
หน้า.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 มูลเหตุจูงใจ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	6
2.1 มาตรฐานในการทดสอบเกราะกันกระสุน.....	6
2.2 วัสดุคอมพอสิต (Composite Materials).....	9
2.2.1 วัสดุเนื้อหลักหรือเมตริก (Matrix).....	10
2.2.2 วัสดุเสริมแรงในวัสดุคอมพอสิต (Reinforcement materials).....	15
2.3 ความเสียหายจากการดูดซับพลังงานของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใย [23].....	21
2.3.1 การเกิดความเสียหายลักษณะเป็นรูปโคน.....	21
2.3.2 การเกิดความเสียหายในทิศทางการดึงของบริเวณเส้นใยหลัก (Primary yarns) และบริเวณเส้นใยรอง (Secondary yarns).....	22

2.3.3 การแยกระหว่างชั้นของลามิเนต (Delamination) และการแตกหักของเมทริก (Matrix cracking) .....	23
2.3.4 การเกิดความเสียหายแบบ Shear plugging .....	23
2.3.5 พลังงานเสียดทาน.....	24
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24
2.4.1 เกราะกันกระสุนจากวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิต .....	24
2.4.2 สมบัติทางกลของการจัดลำดับชั้นของวัสดุคอมพอสิต.....	27
2.4.3 ผลของการจัดลำดับชั้นของวัสดุคอมพอสิตต่อการรับแรงปะทะจากวัสดุความเร็วสูง .....	30
บทที่ 3 วัสดุและวิธีดำเนินงานวิจัย .....	32
3.1 วัสดุและสารเคมี.....	32
3.2 อุปกรณ์.....	32
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	33
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	43
4.1 ความหนาแน่นของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซินที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้วที่การจัดลำดับชั้นแบบต่างๆ.....	43
4.2 ความต้านทานแรงดึง (Tensile test) ของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซินที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้วที่การจัดลำดับชั้นแบบต่างๆ .....	45
4.3 ความต้านทานแรงกระแทก (Impact test) ของการจัดลำดับชั้นของวัสดุคอมพอสิต พอลิเบนซอกซาซินที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้ว.....	50
4.4 ความแข็ง (Hardness Test) ของการจัดลำดับชั้นของวัสดุพอลิเบนซอกซาซินที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้ว.....	52
4.5 ลักษณะสัญญาณของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซินที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยแก้ว .....	53



4.6 การประเมินการต้านทานการเจาะทะลุและรอยยุบตัวจากการรับแรงปะทะแบบชีพนะของวัสดุคอมพอสิตโดยใช้เบนซอกซาซินเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยต่ออาวูธปีนตามมาตรฐาน NIJ-0101.06 .....	54
4.6.1 ผลของจำนวนชั้นของเส้นใยแก้วชนิด S และเส้นใยคาร์บอนที่ใช้ร่วมกันในแผ่นปะทะของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดต่างๆสำหรับประยุกต์ใช้เป็นเกราะกันกระสุน.....	54
4.6.2 ผลของด้านวัสดุที่เหมาะสมในการรับแรงปะทะของวัสดุคอมพอสิตสำหรับประยุกต์ใช้ผลิตเป็นเกราะกันกระสุน.....	59
4.6.3 ผลของจำนวนแผ่นของแผ่นปะทะจากวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซินที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิด S ร่วมกับเส้นใยคาร์บอน .....	62
4.6.4 ผลของการจัดลำดับชั้นของเส้นใยแก้วชนิด S และเส้นใยคาร์บอนที่ใช้ร่วมกันในแผ่นปะทะของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดต่างๆสำหรับประยุกต์ใช้เป็นเกราะกันกระสุน .....	67
4.6.5 ผลการทดสอบยิงสื่อเกราะกันกระสุนรูปแบบ GCG ในการจัดลำดับชั้นแผ่นปะทะของชิ้นงานคอมพอสิต.....	74
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	79
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	79
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	80
รายการอ้างอิง .....	81
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	88

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 รายละเอียดของอุปกรณ์และระยะในการทดสอบเกราะกันกระสุนตามมาตรฐาน NIJ-0101.06 [1].....	8
รูปที่ 2.2 ตำแหน่งการยิงทดสอบเกราะกันกระสุนตามมาตรฐาน NIJ-0101.06 [1].....	8
รูปที่ 2.3 ลักษณะความเสียหายของวัสดุเซรามิกประยุกต์ใช้เป็นเกราะกันกระสุน [2].....	9
รูปที่ 2.4 การสังเคราะห์เบนซอกซาซีนเรซินจากมอนอเมอร์ [14].....	12
รูปที่ 2.5 กระบวนการพอลิเมอไรเซชันของพอลิเบนซอกซาซีน [14].....	12
รูปที่ 2.6 การสังเคราะห์พอลิยูรีเทนจากโทลูอีนไดไอโซไซยาเนตและพอลิโพรพิลีนพอลิออล [34] ..	13
รูปที่ 2.7 กระบวนการพอลิเมอไรเซชันพอลิเบนซอกซาซีนกับพอลิยูรีเทน [35].....	15
รูปที่ 2.8 โครงสร้างแกรไฟต์องค์ประกอบของเส้นใยคาร์บอน [41] .....	19
รูปที่ 2.9 ความเสียหายลักษณะเป็นรูโคนจากการรับแรงปะทะจากกระสุนปืนของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใย [46] .....	22
รูปที่ 2.10 บริเวณความเสียหายในทิศทางการดึงของบริเวณเส้นใยหลักและบริเวณเส้นใยรองจากการรับแรงปะทะจากกระสุนปืนของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใย [47] .....	22
รูปที่ 2.11 ลักษณะความเสียหายการแยกระหว่างชั้นของลามิเนตและการแตกหักของเมตริกจากการรับแรงปะทะจากกระสุนปืนของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใย [14].....	23
รูปที่ 2.12 ลักษณะความเสียหายแบบ Shear plugging จากการรับแรงปะทะจากกระสุนปืนของวัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใย [48].....	24
รูปที่ 2.13 ลักษณะความเสียหายของกระสุนปืน 0.44 Mag JHP ของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิด E และเส้นใยคาร์บอน ทดสอบโดยกระสุนปืน 0.44 Mag JHP ที่ความเร็ว 412-442 เมตร/วินาที [26] .....	26
รูปที่ 2.14 ลักษณะความเสียหายของวัสดุคอมพอสิตที่ประยุกต์ใช้ผลิตเป็นเกราะกันกระสุน ทดสอบโดยกระสุนปืน ขนาด 7.62 มม. ที่ความเร็ว 832-842 เมตร/วินาที [26].....	26
รูปที่ 2.15 การจัดลำดับชั้นของวัสดุคอมพอสิตอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วและเส้นใยคาร์บอน [25].....	29

รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	33
รูปที่ 3.2 การจัดลำดับชั้นของเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้วชนิด S ในส่วนของแผ่นปะทะที่มีต่อสมบัติทางกลของชิ้นงานคอมพอสิต.....	35
รูปที่ 3.3 การทดสอบความต้านทานแรงดึงด้วยเครื่อง Universal testing machine ของบริษัท Instron รุ่น 8872 .....	37
รูปที่ 3.4 การทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้งด้วยเครื่อง Universal testing machine ของบริษัท Instron รุ่น 5567 .....	38
รูปที่ 3.5 การทดสอบความต้านแรงกระแทกด้วยเครื่อง Pendulum impact tester ของบริษัท Ceast รุ่น 2260.....	39
รูปที่ 3.6 การทดสอบความแข็งด้วยเครื่อง Durometer hardness ชนิด Shore D ของบริษัท Instron.....	39
รูปที่ 3.7 ทิศทางการปะทะของกระสุนปืนของวัสดุคอมพอสิตโดยใช้เบนชอกซาซีนเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใย.....	40
รูปที่ 3.8 อุปกรณ์ในการทดสอบยิงชิ้นงานเกราะกันกระสุนตามมาตรฐาน NIJ-0101.06 ที่ระดับภัยคุกคามระดับ 3.....	41
รูปที่ 3.9 กระสุนขนาด 7.62 x 51 มม. ใช้ทดสอบยิงชิ้นงานเกราะกันกระสุนที่ความเร็ว 847 ± 9.1 เมตร/วินาที ตามมาตรฐาน NIJ-0101.06 ที่ระดับภัยคุกคามระดับ 3 .....	41
รูปที่ 3.10 ขนาดชิ้นงานและตำแหน่งในการทดสอบยิงชิ้นงานเกราะกันกระสุนที่ ตามมาตรฐาน NIJ-0101.06 ที่ระดับภัยคุกคามระดับ 3.....	42
รูปที่ 4.1 ความเสียหายจากการทดสอบความต้านทานแรงดึงของการจัดลำดับชั้นของวัสดุพอลิเบนชอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้ว.....	49
รูปที่ 4.2 ความแข็งแรงภายใต้แรงกระแทกของการจัดลำดับชั้นของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนชอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้ว .....	50
รูปที่ 4.3 ความแข็งที่ผิวของการจัดลำดับชั้นของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนชอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้ว.....	52
รูปที่ 4.4 ลักษณะสัญญาณของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนชอกซาซีนที่เสริมแรงด้วย (ก) เส้นใยคาร์บอน (ข) เส้นใยแก้ว ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน.....	53

รูปที่ 4.5 ความเสียหายของวัสดุคอมพอลิท์สำหรับประยุกต์ใช้เป็นเกราะกันกระสุน ทดสอบโดยกระสุนปืนขนาด 7.62 มม. ที่ความเร็ว 844 เมตร/วินาที .....	58
รูปที่ 4.6 ความเสียหายของวัสดุคอมพอลิท์สำหรับประยุกต์ใช้เป็นเกราะกันกระสุน ทดสอบโดยกระสุนปืนขนาด 7.62 มม. ที่ความเร็ว 844 เมตร/วินาที .....	58
รูปที่ 4.7 ความเสียหายของวัสดุคอมพอลิท์สำหรับประยุกต์ใช้เป็นเกราะกันกระสุน โดย (ก)ด้านปะทะกระสุนคือ วัสดุคอมพอลิท์เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว และ (ข)ด้านปะทะกระสุนคือ วัสดุคอมพอลิท์เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน .....	61
รูปที่ 4.8 ความเสียหายของวัสดุคอมพอลิท์สำหรับประยุกต์ใช้เป็นเกราะกันกระสุน โดย (ก) แผ่นปะทะจำนวน 2 แผ่นและ (ข) แผ่นปะทะจำนวน 1 แผ่น ของชิ้นงานในกลุ่มที่ 1 .....	65
รูปที่ 4.9 ความเสียหายของวัสดุคอมพอลิท์สำหรับประยุกต์ใช้เป็นเกราะกันกระสุน โดย (ก) แผ่นปะทะจำนวน 2 แผ่นและ (ข)แผ่นปะทะจำนวน 1 แผ่น ของชิ้นงานในกลุ่มที่ 3 .....	66
รูปที่ 4.10 ลักษณะการจัดลำดับชั้นของชิ้นงานคอมพอลิท์พอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิด S ร่วมกับเส้นใยคาร์บอน .....	67
รูปที่ 4.11 ความเสียหายของกระสุนปืนและวัสดุคอมพอลิท์สำหรับประยุกต์ใช้เป็นเกราะกันกระสุนของรูปแบบ GC1 ในการจัดลำดับชั้นแผ่นปะทะ .....	71
รูปที่ 4.12 ความเสียหายของกระสุนปืนและวัสดุคอมพอลิท์สำหรับประยุกต์ใช้เป็นเกราะกันกระสุนของรูปแบบ GC2 (2G/2C) ในการจัดลำดับชั้นแผ่นปะทะ .....	71
รูปที่ 4.13 ความเสียหายของกระสุนปืนและวัสดุคอมพอลิท์สำหรับประยุกต์ใช้เป็นเกราะกันกระสุนของรูปแบบ GC2 (3G/3C) ในการจัดลำดับชั้นแผ่นปะทะ .....	72
รูปที่ 4.14 ความเสียหายของกระสุนปืนและวัสดุคอมพอลิท์สำหรับประยุกต์ใช้เป็นเกราะกันกระสุนของรูปแบบ GC2 (5G/5C) ในการจัดลำดับชั้นแผ่นปะทะ .....	72
รูปที่ 4.15 ความเสียหายของกระสุนปืนและวัสดุคอมพอลิท์สำหรับประยุกต์ใช้เป็นเกราะกันกระสุนของรูปแบบ GC3 ในการจัดลำดับชั้นแผ่นปะทะ .....	73
รูปที่ 4.16 ความเสียหายของกระสุนปืนและวัสดุคอมพอลิท์สำหรับประยุกต์ใช้เป็นเกราะกันกระสุนของรูปแบบGCG ในการจัดลำดับชั้นแผ่นปะทะ .....	73
รูปที่ 4.17 ความเสียหายของกระสุนปืนและวัสดุคอมพอลิท์สำหรับประยุกต์ใช้เป็นเกราะกันกระสุนของรูปแบบ CGC ในการจัดลำดับชั้นแผ่นปะทะ .....	74

รูปที่ 4.18 ความเสียหายของวัสดุคอมพอสิตเมื่อทดสอบโดยกระสุนปืน ขนาด 7.62 มม. ที่  
ความเร็ว  $847 \pm 9.1$  เมตร/วินาที รูปแบบ GCG ในการจัดลำดับชั้นแผ่นปะทะของชิ้นงานเสื้อ  
เกราะ ..... 77



## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 แสดงมาตรฐานการทดสอบเกราะกันกระสุนสำหรับสวมใส่ตัวบุคคลตามระดับภัยคุกคาม (NIJ-0101.06) [1] .....	7
ตารางที่ 2.2 สมบัติของเรซินที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้ผลิตเป็นเกราะกันกระสุน [28, 29].....	10
ตารางที่ 2.3 สมบัติของเส้นใยชนิดต่างๆ [37, 38].....	16
ตารางที่ 2.4 สมบัติของเส้นใยแก้วจำแนกตามสมบัติของการใช้งาน [39].....	17
ตารางที่ 2.5 สมบัติของเส้นใยแก้วชนิด S [38].....	18
ตารางที่ 2.6 สมบัติของเส้นใยคาร์บอนจำแนกตามสารตั้งต้นที่ใช้ในการผลิต [42].....	19
ตารางที่ 2.7 สมบัติเส้นใยเคพลาร์จำแนกตามการใช้งาน (ASTM D-885) [43] .....	20
ตารางที่ 2.8 ผลการทดลองชนิดของวัสดุคอมพอสิตต่อการต้านทานกระสุนตามระดับภัยคุกคาม [5].....	25
ตารางที่ 2.9 สมบัติทางกลของวัสดุคอมพอสิตอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วและเส้นใยคาร์บอน [49, 50].....	27
ตารางที่ 2.10 สมบัติทางกลและกายภาพของวัสดุคอมพอสิตอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วและเส้นใยคาร์บอน [51].....	28
ตารางที่ 2.11 การทดสอบแรงดึงโดยจัดลำดับชั้นของชิ้นงานคอมพอสิตในรูปแบบต่างๆ [25] .....	29
ตารางที่ 2.12 ความแข็งแรงต่อแรงดัดของการจัดลำดับชั้นของชิ้นงานคอมพอสิตในรูปแบบต่างๆ [52].....	29
ตารางที่ 2.13 การดูดซับพลังงานและความเร็วสูงสุดที่ชิ้นงานสามารถต้านทานการเจาะทะลุได้ ( $V_{50}$ ) ของการจัดลำดับชั้นของวัสดุคอมพอสิตอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิด E ร่วมกับเส้นใยคาร์บอน [8] .....	30
ตารางที่ 2.14 ผลของสัดส่วนน้ำหนักที่สูญหายและความเร็วคงเหลือการกำจัดลำดับชั้นวัสดุ คอมพอสิตต่อการรับแรงปะทะจากลูกเหล็กที่ความเร็ว 182 เมตร/วินาที [53].....	31
ตารางที่ 3.1 ปริมาณของเส้นใยแก้วและเส้นใยคาร์บอนของการจัดลำดับชั้นของวัสดุพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้ว .....	36

ตารางที่ 4.1 ความหนาแน่นจากการทดลอง, จากทฤษฎี และช่องว่างภายในชิ้นงานของการจัดลำดับ ชั้นของวัสดุคอมพอลิโทลิตเบนชอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้ว	43
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงของการจัดลำดับชั้นของวัสดุพอลิเบนชอก ซาซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้ว .....	48
ตารางที่ 4.4 จำนวนชั้นของเส้นใยแก้วและเส้นใยคาร์บอนที่ใช้ร่วมกันในแผ่นปะทะของวัสดุคอม พอลิโทลิตเบนชอกซาซีนเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดต่างๆสำหรับประยุกต์ใช้เป็นเกราะกันกระสุน.....	57
ตารางที่ 4.5 จำนวนแผ่นของแผ่นปะทะจากวัสดุคอมพอลิโทลิตเบนชอกซาซีนที่เสริมแรงด้วย เส้นใยแก้วชนิด S ร่วมกับเส้นใยคาร์บอน .....	62
ตารางที่ 4.6 การจัดลำดับชั้นของเส้นใยแก้วชนิด S และเส้นใยคาร์บอนที่ใช้ร่วมกันในแผ่นปะทะ ของวัสดุคอมพอลิโทลิตเบนชอกซาซีนเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดต่างๆสำหรับประยุกต์ใช้เป็น เกราะกันกระสุน.....	70
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบยิงเสื้อเกราะจำนวน 6 นัดของรูปแบบ GCG ในการจัดลำดับชั้นแผ่น ปะทะของชิ้นงาน และรอยยุบตัวบนแผ่นหลังของชิ้นงาน .....	76
ตารางที่ 4.8 เกราะแข็งกันกระสุนด้านการเจาะทะลุของกระสุนปืนขนาด 7.62 มม จากวัสดุต่างๆ.	78

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 มุลเหตุจูงใจ

เกราะกันกระสุน เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันหรือลดอันตรายจากกระสุนปืนในการปฏิบัติงานของเจ้าหน้าที่ทหาร ตำรวจ รวมไปถึงบุคคลทั่วไป เกราะกันกระสุนได้ถูกพัฒนาจากอดีตถึงปัจจุบันอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากภัยคุกคามของอาวุธปืนและกระสุนปืนที่เพิ่มระดับความรุนแรงมากขึ้น โดยวัสดุที่ผู้ประกอบการนิยมใช้ ได้แก่ เหล็กและเซรามิก แต่วัสดุดังกล่าวมีน้ำหนักมาก ราคาแพง และเมื่อรับแรงปะทะจากกระสุนปืนอาจทำให้เกิดการแตกเป็นชิ้นเล็กๆซึ่งเป็นอันตรายต่อบุคคลอื่นและผู้สวมใส่ [2-4] โดยวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิต [5-13] เริ่มได้รับความสนใจมากขึ้นสำหรับนำมาประยุกต์ใช้เป็นเกราะกันกระสุน เนื่องจากมีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรง ขึ้นรูปได้ง่าย และสามารถนำมาปรับปรุงสมบัติได้หลากหลาย ในงานวิจัยนี้จึงได้สนใจที่จะศึกษาและพัฒนาวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตสำหรับการใช้งานเป็นเกราะกันกระสุนนั่นเอง

วัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นเนื้อหลักหรือพอลิเมอร์เมตริก (Polymer matrix) ทำหน้าที่เป็นกาวประสานยึดวัสดุเสริมแรงทำให้เกิดความคงรูปของชิ้นงานคอมพอสิต โดยพอลิเมอร์เมตริกที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้ผลิตเป็นเกราะกันกระสุนที่มีประสิทธิภาพสูง คือ เทอร์โมเซตเรซิน เช่น อีพ็อกซี (Epoxy) ฟีนอลิก (Phenolics) ไวนิลเอสเตอ์ (Vinyl ester) และพอลิเบนซอกซาซีน (BA-a) [5-15] เป็นต้น และอีกส่วนเป็นวัสดุเสริมแรง (Reinforcement materials) [16] นิยมใช้เส้นใยเป็นวัสดุเสริมแรง เนื่องจากสามารถช่วยเพิ่มสมบัติทางกลให้สูงขึ้นเหมาะสำหรับนำมาประยุกต์ใช้ผลิตเป็นเกราะกันกระสุน เนื่องจากความแข็งแรงต่อน้ำหนักมีความสำคัญยิ่ง ส่งผลให้เกราะกันกระสุนที่ผลิตจากวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตมีน้ำหนักเบา จากความก้าวหน้าของเทคโนโลยีและทางวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ที่นิยมนำมาผลิตเกราะกันกระสุน [5-13, 16] ได้แก่ เส้นใยพอลิเอธิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (UHMWPE) หรือที่รู้จักในชื่อทางการค้าคือ สเปกตรา (Spectra) และไดเนมา (Dyneema) เส้นใยอะรามิด (Aramid fiber) หรือที่รู้จักในชื่อทางการค้าคือ เคพลาร์ (Kevlar) และทวารอน (Twaron) เส้นใยแก้ว (Glass Fiber) และเส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) เป็นต้น



พอลิเบนซอกซาซีน (BA-a) [14, 15, 17] เป็นเทอร์โมเซตเรซินที่พัฒนาจากฟีนอลิกเรซิน มีสมบัติที่โดดเด่น คือ สักเคราะห์ได้ง่าย ไม่เกิดผลิตภัณฑ์พลอยได้อื่นจากการบ่มอนอเมอร์ให้เป็นพอลิเมอร์ มีเสถียรภาพทางความร้อนและทางกลสูง ค่าการหดตัวจากการขึ้นรูปใกล้เคียงศูนย์ ค่าการดูดซึมน้ำต่ำ ค่าความหนืดก่อนการขึ้นรูปต่ำ และสามารถทำอัลลอยด์ร่วมกับเรซินอื่นได้หลายชนิด เช่น ระบบของพอลิเบนซอกซาซีนกับอีพอกซี [18] พอลิเบนซอกซาซีนกับสารไดแอนไฮโดรด์ [19] และพอลิเบนซอกซาซีนกับยูรีเทน [20-22] เป็นต้น ทำให้ได้เรซินมีสมบัติกว้างขวางและหลากหลายมากขึ้น เราจึงสนใจที่จะใช้พอลิเบนซอกซาซีนเป็นพอลิเมอร์เมตริกหลักทำงานร่วมกับเส้นใยเสริมแรงชนิดต่าง ๆ นั้นเอง

โดยทั่วไปเกราะแข็งกันกระสุนที่เตรียมจากวัสดุคอมพอสิตประกอบด้วย 2 ส่วนที่สำคัญ คือ แผ่นหน้าหรือแผ่นปะทะ (Strike panel) ทำหน้าที่ทำลายหัวกระสุนให้แตกออกเป็นชิ้นเล็กๆ และช่วยลดความเร็วของลูกกระสุนก่อนถึงแผ่นหลังหรือแผ่นดูดซับพลังงาน ต้องมีสมบัติที่แข็งแรง รับแรงปะทะจากกระสุนปืนได้ในหลายตำแหน่ง และสามารถทำลายหัวกระสุนปืน [23, 24] และแผ่นหลังหรือแผ่นดูดซับพลังงาน (Support panel) ทำหน้าที่ดูดซับพลังงาน กระจายแรงปะทะตามแนวเส้นใย และทำให้กระสุนสูญเสียพลังงานจนหยุดในที่สุด ต้องมีสมบัติที่เหนียว ยืดหยุ่น และดูดซับพลังงานได้สูง [23, 24] จากงานวิจัยของ Pilpel และคณะ [5] ได้ศึกษาเปรียบเทียบวัสดุคอมพอสิตพอลิโพรพิลีนเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิด E และ S ในช่วงความหนาแน่นเชิงพื้นที่ 0.73-1.09 กรัม/ตารางเซนติเมตร ผลที่ได้เส้นใยแก้วชนิด E สามารถต้านทานภัยคุกคามระดับ 2 และเส้นใยแก้วชนิด S สามารถต้านทานภัยคุกคามระดับที่สูงกว่าคือ ระดับ 3A นอกจากนี้เกราะกันกระสุนจากวัสดุคอมพอสิตพอลิโพรพิลีนเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิด E และเส้นใยแก้วชนิด S ในส่วนของแผ่นปะทะและแผ่นดูดซับพลังงานตามลำดับ สามารถต้านกระสุนปืนขนาด 7.62 มม. ที่ความเร็ว 843 เมตร/วินาที ตามมาตรฐาน NIJ-0101.06 ได้ และจากงานวิจัยของ Jun Hee Song [25] ได้ศึกษาการจัดลำดับชั้นของวัสดุคอมพอสิตอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วและเส้นใยคาร์บอน จำนวน 6 ชั้นงาน ซึ่งจากงานวิจัยพบว่าการจัดลำดับชั้นของเส้นใยมีผลทำให้สมบัติทางกลของวัสดุคอมพอสิตมีค่าที่แตกต่างกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะนำพอลิเบนซอกซาซีนเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิด S และเส้นใยคาร์บอนมาใช้เป็นแผ่นหน้าหรือแผ่นปะทะ โดยจะศึกษาผลของการจัดลำดับชั้นของเส้นใยทั้ง 2 ชนิด ต่อสมบัติทางกลด้วย และนอกจากนี้จากงานวิจัยของ Kasemsiri [26] ได้ศึกษาแผ่นหลังหรือแผ่นดูดซับพลังงาน โดยใช้พอลิเบนซอก

ซาซินอัลลอยด์เป็นเมตริกเรซินในอัตราส่วน 80:20 โดยน้ำหนักของพอลิเบนซอกซาซินและยูรีเทนตามลำดับ เสริมแรงด้วยเส้นใยเคฟลาร์โดยมีความหนา 25 ชั้น และใช้พอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิด E เป็นแผ่นหน้าหรือแผ่นปะทะ ผลที่ได้เกราะกันกระสุนสามารถต้านกระสุนปืนขนาด 7.62 มม. ที่ความเร็ว 832-842 เมตร/วินาที ตามมาตรฐาน NIJ-0101.06 ได้ ดังนั้นในงานวิจัยจึงสนใจที่จะนำพอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิด S และเส้นใยคาร์บอนมาใช้เป็นแผ่นหน้าร่วมกับแผ่นหลังที่เป็นพอลิเบนซอกซาซิน-ยูรีเทนอัลลอยด์ในอัตราส่วน 80:20 โดยน้ำหนักตามลำดับนั่นเอง

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายพัฒนาเกราะกันกระสุนจากวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตส่วนของแผ่นหน้าหรือแผ่นปะทะให้มีน้ำหนักเบาและมีประสิทธิภาพทางกลสูงขึ้น โดยกำหนดจำนวนชั้นและจัดลำดับชั้นของเส้นใยแก้วชนิด S เสริมกับเส้นใยคาร์บอนโดยมีพอลิเบนซอกซาซินเป็นเมตริกเรซินในส่วนของแผ่นหลังหรือแผ่นดูดซับพลังงานใช้เส้นใยเคฟลาร์โดยมีความหนา 25 ชั้นและมีพอลิเบนซอกซาซินอัลลอยด์เป็นเมตริกเรซินในอัตราส่วน 80:20 โดยน้ำหนักของพอลิเบนซอกซาซินและยูรีเทนตามลำดับ เพื่อให้เกราะกันกระสุนนี้สามารถป้องกันกระสุนขนาด 7.62 x 51 มม. ที่ความเร็ว  $847 \pm 9$  เมตร/วินาที ตามมาตรฐาน NIJ-0101.06 ที่ระดับภัยคุกคามระดับ 3 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อพัฒนาแผ่นปะทะของเกราะกันกระสุนน้ำหนักเบาจากวัสดุคอมพอสิตโดยใช้เบนซอกซาซินเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิดความแข็งแรงสูง (S glass) และเส้นใยคาร์บอน

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของจำนวนชั้นและการจัดลำดับชั้นของเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้วชนิด S ในส่วนของแผ่นปะทะต่อประสิทธิภาพการทำลายหัวกระสุน สมบัติทางกายภาพและทางกลของเกราะกันกระสุน

### 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 สังเคราะห์เบนซอกซาซินเรซินโดยเทคนิคไม่ใช่ตัวทำละลาย

1.3.2 สังเคราะห์ยูรีเทนจากสารพอลิโพรพิลีนพอลิโออล (Polypropylene polyol) และโทลูอีนไดไอโซไซยาเนต (Toluene diisocyanate : TDI)

1.3.3 เตรียมพอลิเบนซอกซาซินอัลลอยด์ที่เป็นเมตริกเรซินระหว่างเบนซอกซาซินกับยูรีเทนในอัตราส่วน 80:20 โดยน้ำหนักตามลำดับ

1.3.4 เตรียมวัสดุคอมพอสิตโดยใช้เบนซอกซาซินเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยและขึ้นรูปเกราะกันกระสุน

- แผ่นหน้าหรือแผ่นปะทะ วัสดุคอมพอสิต คือ เบนซอกซาซินเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิด S กับเส้นใยคาร์บอน

- แผ่นหลังหรือแผ่นดูดซับพลังงาน วัสดุคอมพอสิต คือ พอลิเบนซอกซาซินอัลลอยด์เมตริกเรซินระหว่างเบนซอกซาซินกับยูรีเทนในอัตราส่วน 80:20 โดยน้ำหนักตามลำดับเสริมแรงด้วยเส้นใยเคพลาร์

1.3.5 วิเคราะห์สมบัติทางกลและสมบัติการยึดติดของเส้นใยที่เสริมแรงด้วยเบนซอกซาซินเรซินของวัสดุคอมพอสิตในแผ่นหน้าหรือแผ่นปะทะ โดยศึกษา ดังนี้

1.3.5.1 สมบัติการรับแรงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงแรงอัด (Universal Testing Machine)

- ความแข็งแรงต่อแรงดึง

- ความแข็งแรงต่อแรงดัดโค้ง

1.3.5.2 สมบัติการต้านแรงกระแทกด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทก (Impact tester)

1.3.5.3 ความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness Tester)

1.3.6 วิเคราะห์สมบัติการยึดเกาะกันระหว่างเมตริกและเส้นใยของวัสดุคอมพอสิตโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)

1.3.7 ประเมินผลการต้านทานและรอยยุบตัวของเกราะกันกระสุน และความเสียหายของกระสุนจากการรับแรงปะทะของวัสดุคอมพอสิตโดยใช้เบนซอกซาซินเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยต่ออาวุธปืน ตามมาตรฐาน NIJ-0101.06

- ทดสอบระดับภัยคุกคามระดับ 3 ทดสอบโดยกระสุนปืนขนาด 7.62 × 51 มม. ที่ความเร็ว 847 ± 9 เมตร/วินาที

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถผลิตเสื้อเกราะแข็งกันกระสุนจากวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตในส่วนของแผ่นหน้าหรือแผ่นปะทะให้มีน้ำหนักเบาและมีประสิทธิภาพทางกลสูงขึ้น โดยเสื้อเกราะกันกระสุนนี้สามารถป้องกันกระสุนขนาด 7.62 × 51 มม. ที่ความเร็ว 847 ± 9 เมตร/วินาที ตามมาตรฐาน NIJ-0101.06 ที่ระดับภัยคุกคามระดับ 3 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



## บทที่ 2

### ทฤษฎี

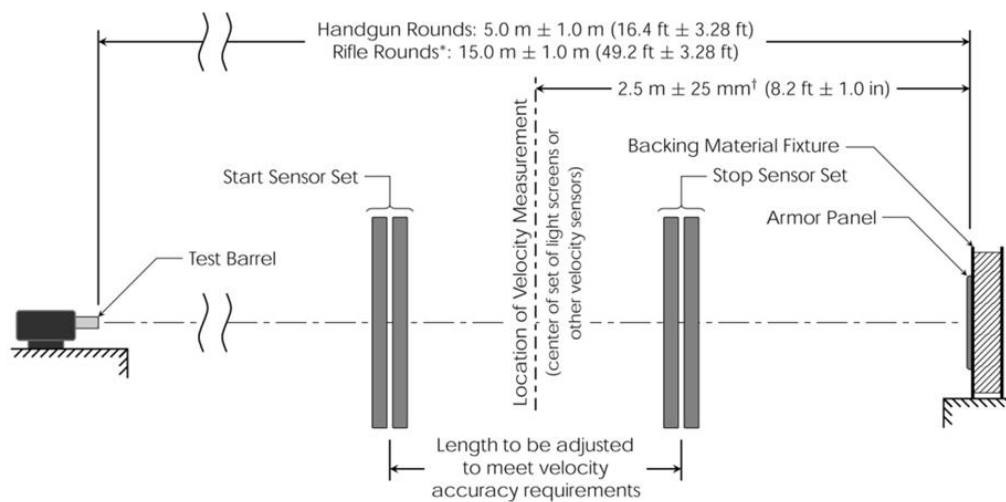
#### 2.1 มาตรฐานในการทดสอบเกราะกันกระสุน

มาตรฐานเกราะกันกระสุนในประเทศไทย จัดทำโดยคณะกรรมการกำหนดมาตรฐาน ยุทธโศภกรณ์ กระทรวงกลาโหม โดยอ้างอิงมาตรฐานของ NIJ (The National Institute of Justice) ประเทศสหรัฐอเมริกาซึ่งมาตรฐาน NIJ ฉบับล่าสุด คือ NIJ-0101.06 [1] แบ่งระดับมาตรฐานเป็น 5 ระดับ ดังตารางที่ 2.1 โดยแสดงข้อมูลระดับภัยคุกคามตามชนิดและขนาดของกระสุนปืน ความเร็วของกระสุนปืนในการทดสอบ รอยยุบตัวที่ไม่เกินมาตรฐาน และจำนวนนัดที่ยิงผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ในส่วนของ 3 ระดับแรก คือ ระดับ 2-A, 2 และ 3-A ป้องกันระดับภัยคุกคามของปืนพกสั้นเหมาะสำหรับทดสอบเสื้อเกราะอ่อน และในส่วนของระดับ 3 และ 4 เป็นระดับในการป้องกันประเภทอาวุธสงครามที่มีความเร็วทะลุทะลวงสูงเหมาะสำหรับทดสอบเสื้อเกราะแข็ง

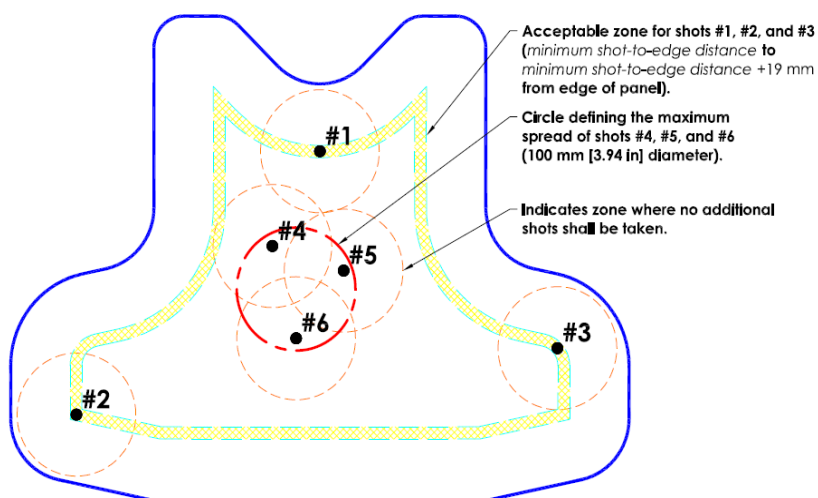
อุปกรณ์และระยะในการทดสอบยิงเกราะกันกระสุนตามมาตรฐาน NIJ-0101.06 แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 2.1 โดยอุปกรณ์ตั้งค่าในการทดสอบประกอบด้วย 2 ส่วนสำคัญ คือ ลำกล้องทดสอบมีหน้าที่เสมือนเป็นอาวุธปืนปล่อยกระสุนปืนไปสู่เป้าหมาย และชุดวัดความเร็วมีหน้าที่วัดความเร็วที่ออกจากลำกล้องทดสอบก่อนที่กระสุนกระทบแผ่นเกราะเพื่อให้ได้ความเร็วของกระสุนดังกล่าวตามระดับภัยคุกคาม ซึ่งในระดับภัยคุกคาม 2-A, 2 และ 3-A ลำกล้องทดสอบกับเกราะกันกระสุนมีระยะห่างเป็นระยะทาง 5 เมตร และในระดับภัยคุกคาม 3 และ 4 ลำกล้องทดสอบกับเกราะกันกระสุนมีระยะห่างเป็นระยะทาง 15 เมตร โดยตำแหน่งการยิงทดสอบเกราะกันกระสุนตามมาตรฐาน NIJ-0101.06 แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 แสดงมาตรฐานการทดสอบกระสุนสำหรับสมิได้ตัวบุคคลตามระดับภัยคุกคาม (NIJ-0101.06) [1]

ระดับภัยคุกคาม	ขนาดและชนิดของกระสุนทดสอบ	น้ำหนักของลูกกระสุน (กรัม)	ความเร็วของกระสุน (เมตร/วินาที)	ความเร็วของกระสุน (ลำสุดท้าย) (เมตร/วินาที)	รอยบุบตัวที่ไม่เกินมาตรฐาน (มิลลิเมตร)	จำนวนนัดที่ยิงต่อแผ่นเกราะ		จำนวนนัดที่ยิงผ่านเกณฑ์มาตรฐาน
						มุม 0 องศา	มุม 30 องศา	
2-A	9 mm FMJ RN	8.0	355	373	44	4	2	6
	40 S&W FMJ	11.7	325	352	44	4	2	6
2	9 mm FMJ RN	8.0	379	398	44	4	2	6
	.357 Mag JSP	10.2	408	436	44	4	2	6
3-A	9 mm FMJ RN	8.1	430	448	44	4	2	6
	.44 Mag JHP	15.6	408	436	44	4	2	6
3	7.62 mm NATO FMJ	9.6	847	-	44	6	0	6
4	.30 caliber M2 AP	10.8	878	-	44	1 - 6	0	1 - 6



รูปที่ 2.1 รายละเอียดของอุปกรณ์และระยะในการทดสอบเกราะกันกระสุนตามมาตรฐาน NIJ-0101.06 [1]



รูปที่ 2.2 ตำแหน่งการยิงทดสอบเกราะกันกระสุนตามมาตรฐาน NIJ-0101.06 [1]

## 2.2 วัสดุคอมพอสิต (Composite Materials)

วัสดุเซรามิกและเหล็กนิยมนำมาผลิตเป็นเกราะกันกระสุนตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน แต่เนื่องด้วยวัสดุดังกล่าวมีน้ำหนักสูงทำให้ไม่คล่องตัวในการปฏิบัติงานของเจ้าหน้าที่ และปัจจุบันนิยมนำวัสดุเซรามิกใช้เป็นแผ่นหน้าหรือแผ่นปะทะของเกราะกันกระสุน [2-4] ซึ่งเมื่อโดนแรงปะทะจากกระสุนปืนเกิดการแตกเป็นชิ้นเล็กๆซึ่งเป็นอันตรายต่อบุคคลอื่นและผู้ที่สวมใส่ อีกทั้งไม่สามารถรับแรงปะทะได้ในหลายตำแหน่ง ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ลักษณะความเสียหายของวัสดุเซรามิกประยุกต์ใช้เป็นเกราะกันกระสุน [2]

### จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วัสดุคอมพอสิต [27] คือ วัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีหรือโครงสร้างแตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปมาผสมกันโดยที่ไม่ละลายเข้าด้วยกันแบ่งเป็น 2 เฟส คือ เฟสที่เป็นเนื้อหลักหรือเมตริก (Matrix phase) และเฟสเสริมแรง (Reinforcement phase) ในงานวิจัยเลือกใช้วัสดุคอมพอสิตประเภทพอลิเมอร์เมตริกเสริมแรงด้วยเส้นใย ข้อดีคือสามารถปรับปรุงสมบัติของวัสดุคอมพอสิตได้หลากหลายจากการเลือกสารตั้งต้นนั้นคือเมตริกและเส้นใยเสริมแรงให้ได้สมบัติที่ต้องการและเหมาะสมสำหรับประยุกต์ใช้งาน



## 2.2.1 วัสดุเนื้อหลักหรือเมตริก (Matrix)

เมตริก (Matrix) เป็นได้ทั้งโลหะ เซรามิก และพอลิเมอร์ มีหน้าที่เป็นกาวประสานยึดเส้นใย เสริมแรงทำให้เกิดความคงรูปของชิ้นงานคอมพอสิต และเป็นตัวกลางส่งผ่านแรงที่มากระทำไปสู่เส้นใยเสริมแรง โดยเมตริกที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้ผลิตเป็นเกราะกันกระสุนที่มีประสิทธิภาพสูง คือ เทอร์โมเซตเรซิน [5-15, 28, 29] ได้แก่ อีพ็อกซี (Epoxy) ฟีนอลิก (Phenolics) ไวนิลเอสเตอ์ (Vinyl ester) และพอลิเบนซอกซาซีน (Polybenzoxazine) เป็นต้น แสดงสมบัติของเมตริกต่างๆ ดังตารางที่ 2.2

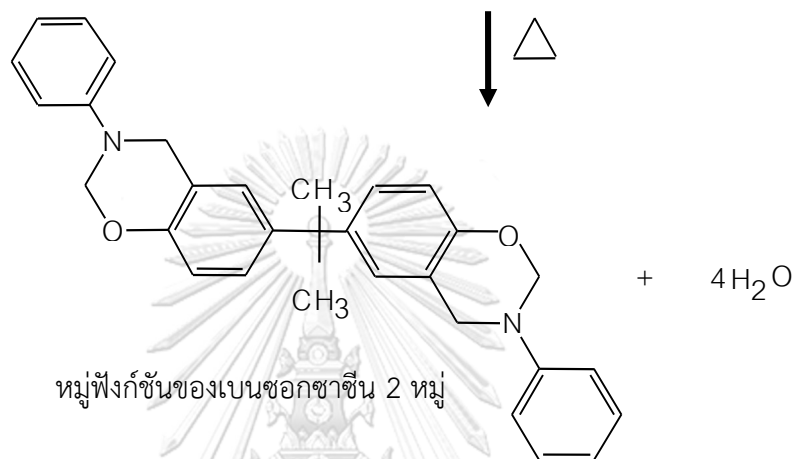
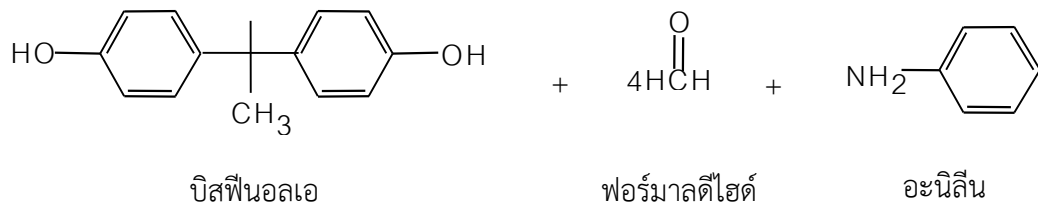
ตารางที่ 2.2 สมบัติของเรซินที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้ผลิตเป็นเกราะกันกระสุน [28, 29]

สมบัติ	อีพ็อกซี (Epoxy)	ฟีนอลิก (Phenolics)	ไซยาเนตเอสเตอ์ (Cyanate ester)	พอลิเบนซอกซาซีน (Polybenzoxazine)
ความหนาแน่น Density (g/cc)	1.2-1.25	1.24-1.32	1.1-1.35	1.19
อุณหภูมิใช้งานสูงสุด Max use temperature (°C)	180	~200	150-200	130-280
ความแข็งแรงต่อแรงดึง Tensile strength (MPa)	90-120	24-25	70-130	100-125
การยืดตัว Elongation (%)	3-4.3	0.3	0.2-0.4	2.3-2.9
ค่าคงตัวของไดอิเล็กทริก Dielectric constant (1MHz)	3.8-4.5	0.4-10	2.7-3.0	3-3.5
อุณหภูมิการบ่ม Cure temperature (°C)	RT-180	150-190	180-250	160-220
การหดตัวจากการบ่ม Cure shrinkage (%)	>3	0.002	~3	~0
อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว T <sub>g</sub> (°C)	150-220	170	250-270	170-340

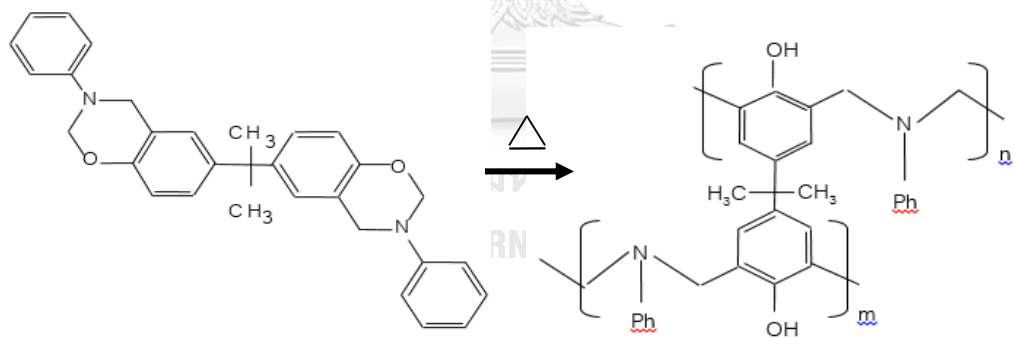
### 2.2.1.1 พอลิเบนซอกซาซีนเรซิน (Polybenzoxazine resin)

พอลิเบนซอกซาซีน (BA-a) เป็นพอลิเมอร์ในตระกูลฟีนอลิกค้นพบโดย Cope และ Holy ในปี ค.ศ. 1940 [30] และในปี ค.ศ. 1996 Ishida [14, 31] ได้สังเคราะห์เบนซอกซาซีนเรซินโดยเทคนิคไม่ใช้ตัวทำละลาย โดยสังเคราะห์จากบิสฟีนอลเอ (Bisphenol A) ฟอรัมาลดีไฮด์ (Formaldehyde) และอะนิลีน (Aniline) ในอัตราส่วน 1:4:2 โดยโมล ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ดังรูป 2.4 กระบวนการพอลิเมอไรเซชันหรือกระบวนการบ่มความร้อนของพอลิเบนซอกซาซีนโดยการให้ความร้อนเพื่อเปิดวงแหวนพบว่าปฏิกิริยาสิ้นสุดโดยไม่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงดังรูป 2.5 รีมดูลิต และคณะ [14] ศึกษาสมบัติของเบนซอกซาซีนเรซินเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นเมตริกเรซินในงานด้านเกราะกันกระสุน โดยมีสมบัติที่โดดเด่น [28, 31-33] คือ

- การสังเคราะห์สารไม่ต้องใช้ตัวทำละลาย ดังนั้นจึงได้ผลิตภัณฑ์ที่บริสุทธิ์ประหยัดค่าใช้จ่ายการผลิตและลดมลพิษจากการใช้ตัวทำละลาย
- ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยา
- ความหนืดก่อนการขึ้นรูปต่ำ
- การหดตัวจากการขึ้นรูปใกล้ศูนย์
- การดูดซึมน้ำต่ำ
- เสถียรภาพทางความร้อนและทางกลสูง
- ทำอัลลอยด์ร่วมกับเรซินอื่นได้หลายชนิด ทำให้ได้เรซินที่มีสมบัติกว้างขวางและหลากหลาย



รูปที่ 2.4 การสังเคราะห์เบนซอกซาซีนเรซินจากมอนอเมอร์ [14]

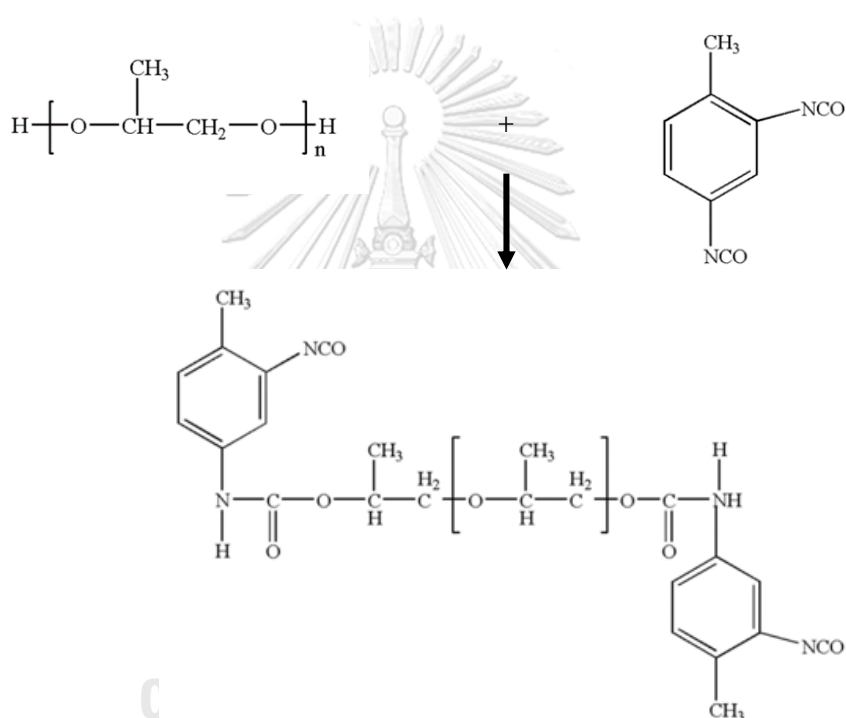


รูปที่ 2.5 กระบวนการพอลิเมอไรเซชันของพอลิเบนซอกซาซีน [14]

### 2.2.1.2 ยูรีเทน (Urethane elastomer)

พอลิยูรีเทน (PU) [20-22] มีสมบัติหลากหลาย เป็นได้ทั้งเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซต และสามารถใช้งานได้หลายรูปแบบ เช่น โฟม ยาง เป็นต้น จากสมบัติที่หลากหลายเกิดจากสารตั้งต้น คือ สารที่มีหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่ไอโซไซยาเนต (Isocyanate) เป็นองค์ประกอบ ซึ่งสารที่มีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นองค์ประกอบมีน้ำหนักมวลโมเลกุลและชนิดที่หลากหลายเช่น พอลิเอสเทอร์

(Polyester) พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate) และพอลิโพรพิลีนพอลิออล (Polypropylene polyol) เป็นต้น จึงสามารถเลือกใช้สารตั้งต้นให้ตรงกับวัตถุประสงค์การใช้งาน ในงานวิจัยนี้เลือกใช้สารตั้งต้น คือ โทลูอินไดไอโซไซยาเนต (Toluene diisocyanate : TDI) และพอลิโพรพิลีนพอลิออล (Polypropylene polyol) ในอัตราส่วน 2:1 โดยโมลตามลำดับ ทำปฏิกิริยาดังรูปที่ 2.6 โดยการเกิดปฏิกิริยาส่วนใหญ่หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของพอลิโพรพิลีนพอลิออลทำปฏิกิริยากับหมู่ไอโซไซยาเนต (-NCO) ของโทลูอินไดไอโซไซยาเนตตรงตำแหน่งพารา (para) ดังคำอธิบายของ Pegoraro และคณะ [34]



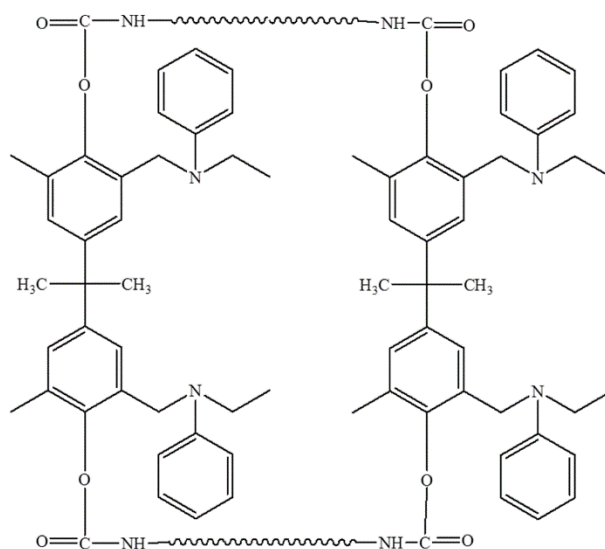
รูปที่ 2.6 การสังเคราะห์พอลิยูรีเทนจากโทลูอินไดไอโซไซยาเนตและพอลิโพรพิลีนพอลิออล [34]

### 2.2.1.3 พอลิเบนซอกซาซินอัลลอยด์

เนื่องจากพอลิเบนซอกซาซินมีสมบัติทำอัลลอยด์ร่วมกับเรซินอื่นได้หลายชนิด [18-22] ในงานวิจัยเลือกใช้พอลิยูรีเทนเพื่อปรับสมบัติเรซินเพื่อประยุกต์ใช้เป็นแผ่นหลังหรือแผ่นดูดซับพลังงานของเกราะกันกระสุน เนื่องจากสมบัติที่โดดเด่นของพอลิยูรีเทน คือ มอดูลัสความยืดหยุ่นสูง ต้านทานต่อแรงกระแทกและรังสียูวี และเกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็วในกระบวนการสังเคราะห์ กระบวนการ

พอลิเมอไรเซชันระหว่างพอลิเบนซอกซาซีนและพอลิยูรีเทน [35] เกิดขึ้นจากการบ่มความร้อน วิเคราะห์หาชนิดและปริมาณสารโดยเทคนิคการวัดการดูดกลืนแสงของสารในช่วงอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy : FTIR) ระหว่างการบ่มความร้อนวงเบนซินของพอลิเบนซอกซาซีนถูกเปิดออกทำปฏิกิริยากับหมู่ไอโซไซยาเนต (-NCO) ของพอลิยูรีเทน และกลุ่มฟีนอลของพอลิเบนซอกซาซีนทำปฏิกิริยากับหมู่ไอโซไซยาเนต (-NCO) ของพอลิยูรีเทน ซึ่งโครงสร้างของพอลิเบนซอกซาซีนอัลลอยด์เมตริกเรซินระหว่างพอลิเบนซอกซาซีนกับพอลิยูรีเทนแสดงดังรูปที่ 2.7

พอลิเบนซอกซาซีนอัลลอยด์เมตริกเรซินระหว่างพอลิเบนซอกซาซีนกับพอลิยูรีเทน มีสมบัติยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิเบนซอกซาซีน และสมบัติสูงกว่ากฎการผสมจากอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) มีค่ามากกว่า 200 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าพอลิเบนซอกซาซีนและพอลิยูรีเทน มีค่าเท่ากับ 165 และ -70 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่าอัตราส่วนของเบนซอกซาซีนและยูรีเทนในพอลิเบนซอกซาซีนอัลลอยด์เมตริกเรซินมีผลต่อสมบัติทางกลของวัสดุคอมพอสิต [20, 36] จึงสามารถปรับสมบัติของเรซินให้เหมาะสมกับวัสดุคอมพอสิตสำหรับประยุกต์ใช้เป็นแผ่นหลังหรือแผ่นดูดซับพลังงานของเกราะกันกระสุน Kasemsiri [26] ทดลองปรับปริมาณยูรีเทน 0-40% โดยน้ำหนัก พบว่าวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนอัลลอยด์เมตริกเรซินระหว่างเบนซอกซาซีนกับยูรีเทนในอัตราส่วน 80 : 20 โดยน้ำหนักตามลำดับเสริมแรงด้วยเส้นใยเคฟลาร์ เหมาะสมสำหรับประยุกต์ใช้เป็นแผ่นหลังหรือแผ่นดูดซับพลังงานของแผ่นเกราะกันกระสุน โดยวัสดุคอมพอสิตที่มีจำนวนชั้นของเส้นใยเคฟลาร์จำนวน 30 และ 50 ชั้น สามารถต้านภัยคุกคามระดับ 2-A และ 3-A ตามมาตรฐาน NIJ ได้ตามลำดับ



รูปที่ 2.7 กระบวนการพอลิเมอไรเซชันพอลิเบนซอกซาซีนกับพอลิยูรีเทน [35]

## 2.2.2 วัสดุเสริมแรงในวัสดุคอมพอสิต (Reinforcement materials)

วัสดุเสริมแรงกระจายตัวในวัสดุที่เป็นเนื้อหลัก (Matrix) ทำหน้าที่ปรับปรุงและเพิ่มสมบัติทางกลในวัสดุเนื้อหลัก ซึ่งวัสดุเสริมแรงมีหลายรูปร่างลักษณะ เช่น เป็นแผ่นชิ้นเล็กๆต่าง (Flake) ผง (Powdered) และเส้นใย (fiber) เป็นต้น ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เส้นใยสังเคราะห์เพื่อประยุกต์ใช้ผลิตเป็นเกราะกันกระสุน โดยเส้นใยสังเคราะห์ที่นิยมนำมาผลิตเกราะกันกระสุนมีชนิดและสมบัติที่หลากหลายแสดงดังตารางที่ 2.3 [37, 38]

ตารางที่ 2.3 สมบัติของเส้นใยชนิดต่างๆ [37, 38]

คุณสมบัติ	หน่วย	เส้นใยแก้ว ชนิด E	เส้นใยแก้ว ชนิด S	เส้นใย เคพลาร์	เส้นใย สเปก ตรา	เส้นใย คาร์บอน
ความหนาแน่น (Density)	g/cm <sup>3</sup>	2.54	2.49	1.45	0.97	1.85-1.96
ความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength)	GPa	2.4	4.5	3.6	3.0	2.4
การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break)	%	3-4	5.4	2.8	3.5	0.38-0.5
Young's modulus	GPa	72.4	85	135	117	345-520
ความแข็งแรงตึงจำเพาะ (Specific tensile strength)	GPa	9.6	18.5	25.3	31.5	12.2-13.3
Specific young's modulus	GPa	291	348	950	1231	1950- 2868
ค่าพลังงานสะสมจำเพาะ (Specific energy absorption)	J/g	27-33	36-55	20-60	45-65	5-40

### 2.2.2.1 เส้นใยแก้ว (Glass fiber)

เส้นใยแก้วค้นพบโดย Edward Drummond Libbey ในปลายศตวรรษที่ 19 เส้นใยแก้วมีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูง มีความคงรูปสูง ไม่ดูดความชื้น และทนทานต่อสารเคมีและความร้อน โดยผลิตจากซิลิกาและหินปูนเป็นวัตถุดิบหลัก นำไปหลอมขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียสได้เส้นใยแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5-15 ไมครอน เส้นใยแก้วมีหลากหลายชนิดขึ้นกับชนิดของซิลิกาและองค์ประกอบอื่นๆ ซึ่งแต่ละชนิดมีสมบัติทางกลที่แตกต่างดังตารางที่ 2.4 โดยแบ่งประเภทเส้นใยแก้วเป็นชนิดต่างๆตามสมบัติ [39] ดังนี้

- เส้นใยแก้วชนิด C (Glass fiber type C) ทนต่อสภาพแวดล้อมที่เป็นกรด

- เส้นใยแก้วชนิด D (Glass fiber type D) ประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์
- เส้นใยแก้วชนิด E (Glass fiber type E) นิยมใช้เป็นเส้นใยเสริมแรงในวัสดุคอมพอสิต
- เส้นใยแก้วชนิด S และ R (Glass fiber types S and R) มีความแข็งแรงสูงนิยมใช้สำหรับงานที่ต้องการรับแรงสูงและนิยมใช้เป็นเส้นใยเสริมแรงในวัสดุคอมพอสิตซึ่งมีราคาที่สูงกว่าเส้นใยแก้วชนิด E
- เส้นใยแก้วชนิด Z (Glass fiber type Z) ทนต่อสภาพแวดล้อมที่เป็นด่าง

เส้นใยแก้วชนิด S เป็นเส้นใยที่ใช้ในงานเสริมแรง เนื่องจากมีความแข็งแรงสูงและมีค่ามอดูลัสสูงกว่าเส้นใยแก้วชนิด E มีรายงานการใช้งานสำหรับการทหารในด้านอากาศยานและอุปกรณ์ป้องกันภัยต่างๆ โดยสมบัติที่สำคัญของเส้นใยแก้วชนิด S แสดงดังตารางที่ 2.5 [38]

ตารางที่ 2.4 สมบัติของเส้นใยแก้วจำแนกตามสมบัติของการใช้งาน [39]

สมบัติ	เส้นใยแก้วชนิด E (Glass fiber type E)	เส้นใยแก้วชนิด S (Glass fiber type S)	เส้นใยแก้วชนิด C (Glass fiber type C)
Modulus of elasticity (GPa)	7.24	8.62	-
ความแข็งแรงต่อแรงดึง Tensile Strength (GPa)	3.4	4.8	2.4



ตารางที่ 2.5 สมบัติของเส้นใยแก้วชนิด S [38]

สมบัติ	เส้นใยแก้วชนิด S (Glass fiber type S)
ความถ่วงจำเพาะ Specific gravity	2.50
Young's modulus (GPa)	87
ความแข็งแรงต่อแรงดึง Tensile strength (MPa)	4310
การยืดตัว Elongation, %	5.0
สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน Coefficient of thermal expansion ( $\mu\text{m}/\text{m}/^{\circ}\text{C}$ )	5.6

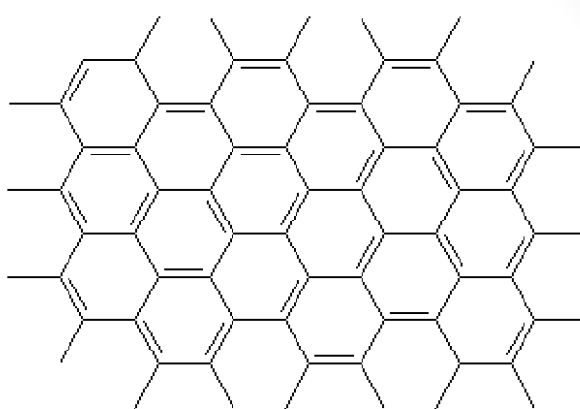
#### 2.2.2.2 เส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber)

เส้นใยคาร์บอนจดสิทธิบัตรครั้งแรกในปีค.ศ. 1879 โดย Edison ใช้ผลิตไส้หลอดไฟ ต่อมาในปีค.ศ. 1950-1960 การใช้งานเส้นใยคาร์บอนได้พัฒนาสูงขึ้นโดยเฉพาะนำมาประยุกต์ใช้ด้านอากาศยานผลิตชิ้นส่วนเครื่องยนต์ไอพ่น เส้นใยคาร์บอนประกอบด้วยแกรไฟต์ (Graphite) ซึ่งเป็นรูปแบบของคาร์บอนบริสุทธิ์ ประกอบด้วยวงแหวน 6 เหลี่ยมต่อดัดกันเป็นรังผึ้งดังรูปที่ 2.8 โดยมีสมบัติที่โดดเด่น [40] คือ

- น้ำหนักเบา
- มีความแข็งแรงต่อแรงดึงในทิศทางสูง
- ทนทานต่อการกระแทก
- ทนทานต่อสารเคมีและความร้อนสูง
- ทนต่อการขีดถู

สมบัติดังกล่าวข้างต้นทำให้เส้นใยคาร์บอนได้รับความนิยมในอุตสาหกรรมการบิน วิศวกรรมอวกาศ การทหาร อุตสาหกรรมยานยนต์ และการกีฬา เป็นต้น แต่เนื่องจากเส้นใยคาร์บอนมี

ราคาแพงเมื่อเทียบกับเส้นใยชนิดอื่น และสมบัติบางประการที่ต้องการพัฒนาให้สูงขึ้นจึงนิยมนำเส้นใยคาร์บอนใช้ร่วมกับวัสดุอื่นๆในรูปแบบคอมพอสิตซึ่งมีอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง



รูปที่ 2.8 โครงสร้างแกรไฟต์องค์ประกอบของเส้นใยคาร์บอน [41]

สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเส้นใยคาร์บอนมีความหลากหลายขึ้นอยู่กับสารตั้งต้นในการผลิตเส้นใยคาร์บอน สารตั้งต้นที่นิยมนำมาผลิตเส้นใยคาร์บอน คือ พอลิอะคริไนด์ไนไตรล์ (Polyacrylonitrile : PAN) พิตช์ (Pitch) และเรยอน (Rayon) โดยมีสมบัติทางกลดังตารางที่ 2.6 [42] เส้นใยคาร์บอนที่ผลิตจากพอลิอะคริไนด์ไนไตรล์ (Polyacrylonitrile : PAN) มีความแข็งแรงสูง และมีค่าความแข็งแรงสูงถึง 6895 เมกะปาสคาล จึงนิยมนำมาผลิตเส้นใยคาร์บอนเพื่อประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมขั้นสูง

ตารางที่ 2.6 สมบัติของเส้นใยคาร์บอนจำแนกตามสารตั้งต้นที่ใช้ในการผลิต [42]

สารตั้งต้นในการผลิตเส้นใยคาร์บอน	ความแข็งแรงต่อแรงดึง Tensile strength (GPa)	Tensile modulus (GPa)	การยืดตัว ณ จุดขาด Elongation at break (%)
พอลิอะคริไนด์ไนไตรล์ (Polyacrylonitrile : PAN)	2.5-7.0	250-400	0.6-2.5
พิตช์ (Pitch)	1.5-3.5	200-800	0.3-0.9
เรยอน (Rayon)	~1.0	~50	~2.5

### 2.2.2.3 เส้นใยเคฟลาร์ (Kevlar fiber)

เคฟลาร์ ชื่อเรียกทางการค้าของเส้นใยสังเคราะห์พอลิพาราฟีนีลีนเทเรพทาเลอไมด์ (Poly-p-phenylene terephthalamide : PPTA) ถูกค้นพบโดย Stephanie Kwolek และ Herbert Blades นักวิทยาศาสตร์บริษัทดูปองท์ ในปีค.ศ.1965 เส้นใยเคฟลาร์มีน้ำหนักเบา ค่ามอดูลัสสูง ความแข็งแรงต่อแรงดึงในทิศทางสูง ทนทานต่อการกระแทก และคงทนต่อความร้อนและสารเคมี [45] สมบัติดังกล่าวข้างต้นทำให้เส้นใยเคฟลาร์ได้รับความนิยมจากหลากหลายอุตสาหกรรมที่ต้องการความแข็งแรง ทนทานต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อวกาศยาน อุปกรณ์ป้องกันไฟ อุปกรณ์ป้องกันทางการทหาร เป็นต้น โดยเส้นใยเคฟลาร์มีหลายชนิดขึ้นอยู่กับการใช้งานแสดงสมบัติทางกลดังตารางที่ 2.7 ซึ่งเคฟลาร์ 49 และ 129 นิยมนำมาผลิตเกราะกันกระสุน

ตารางที่ 2.7 สมบัติเส้นใยเคฟลาร์จำแนกตามการใช้งาน (ASTM D-885) [43]

สมบัติ	เคฟลาร์ 29	เคฟลาร์ 49	เคฟลาร์ 68	เคฟลาร์ 119	เคฟลาร์ 129	เคฟลาร์ 149
ความแข็งแรงต่อแรงดึง Tensile strength (GPa)	2.90	2.90	2.90	3.03	3.34	2.34
Initial modulus (GPa)	71.02	119.97	99.28	55.16	96.53	144.79
การยืดตัว Elongation (%)	3.6	2.8	3.0	4.4	3.3	1.5
ความหนาแน่น Density (g/cm <sup>3</sup> )	1.44	1.45	1.44	1.44	1.45	1.47
การดูดซึมความชื้น Moisture absorption (%)	6	4.3	4.3	-	-	1.5

## 2.3 ความเสียหายจากการดูดซับพลังงานของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใย[23]

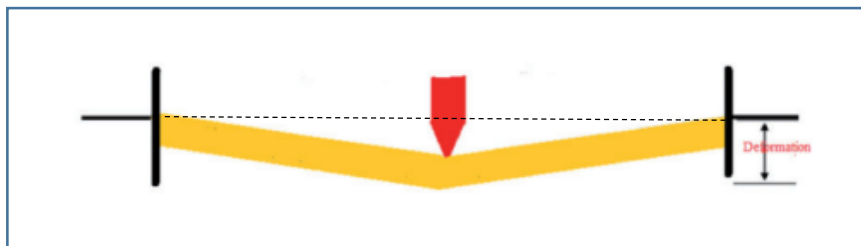
จากการทดสอบยิงด้วยกระสุนของวัสดุคอมพอสิต ลักษณะการปะทะของกระสุนปืนเมื่อปะทะกับวัสดุคอมพอสิตขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุคอมพอสิตและกระสุนที่ใช้ทดสอบ ซึ่งลักษณะการปะทะมีดังนี้ [44]

1. กระสุนไม่สามารถเจาะหรือเจาะได้เพียงบางส่วนของวัสดุคอมพอสิตแสดงว่าพลังงานจลน์ของกระสุนมีค่าน้อยกว่าความสามารถในการดูดซับพลังงานของวัสดุคอมพอสิต
2. กระสุนสามารถเจาะวัสดุคอมพอสิตได้แต่ไม่สามารถทะลุผ่านวัสดุได้แสดงว่าพลังงานจลน์ของกระสุนปืนทั้งหมดถูกดูดซับพลังงานได้อย่างสมบูรณ์ในวัสดุคอมพอสิต
3. กระสุนสามารถทะลุผ่านวัสดุและมีความเร็วหลงเหลือค่าหนึ่งแสดงว่าการดูดซับพลังงานของวัสดุคอมพอสิตน้อยกว่าพลังงานจลน์ของกระสุนปืน

จากการปะทะของกระสุนปืนในวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิต ทำให้วัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตเกิดความเสียหายในการดูดซับพลังงานจากการรับแรงปะทะจากกระสุนปืน จากงานวิจัยของ Mohan และคณะ [45] รายงานกลไกการเกิดความเสียหายของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยเมื่อได้รับแรงปะทะจากกระสุนปืนดังนี้

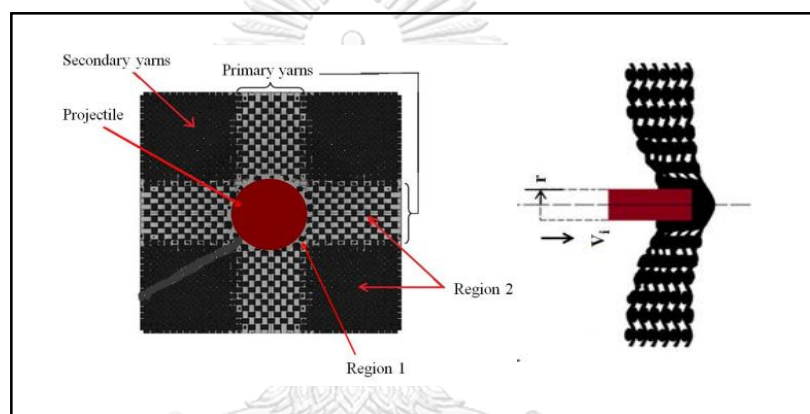
### 2.3.1 การเกิดความเสียหายลักษณะเป็นรูปโคน

จากการเจาะของกระสุนปืนเข้าสู่ชิ้นงานพอลิเมอร์คอมพอสิต ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุโดยมีลักษณะเป็นรูปโคนกตลิกจากผิวด้านหน้าที่ถูกกระแทกจากลูกกระสุนไปยังผิวด้านหลังของวัสดุแสดงดังรูป 2.10 ลักษณะดังกล่าวเกิดขึ้นเมื่อกระสุนปะทะวัสดุ โดยระยะทางของกระสุนและระยะความเสียหายของโคนที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากัน นอกจากนี้ความเร็วของกระสุนและการเคลื่อนที่ของวัสดุที่มีลักษณะเป็นรูปโคนมีค่าเท่ากัน ซึ่งทำเส้นใยในแต่ละชั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็นลักษณะดังกล่าวเพื่อดูดซับพลังงานที่ได้รับแรงปะทะจากกระสุนปืน



รูปที่ 2.9 ความเสียหายลักษณะเป็นรูปโค่นจากการรับแรงปะทะจากกระสุนปืนของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใย [46]

### 2.3.2 การเกิดความเสียหายในทิศทางการตั้งของบริเวณเส้นใยหลัก (Primary yarns) และบริเวณเส้นใยรอง (Secondary yarns)

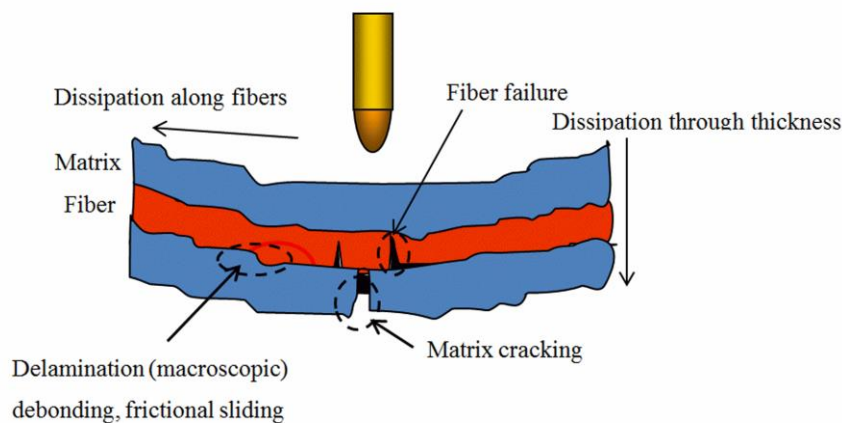


รูปที่ 2.10 บริเวณความเสียหายในทิศทางการตั้งของบริเวณเส้นใยหลักและบริเวณเส้นใยรองจากการรับแรงปะทะจากกระสุนปืนของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใย [47]

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บริเวณเส้นใยหลัก (Primary yarns) ของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตได้รับผลกระทบโดยตรงจากการต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนปืน โดยระยะเยียดของบริเวณเส้นใยหลักมีค่ามากกว่าบริเวณเส้นใยรอง (Secondary yarns) ความเสียหายของเส้นใยจากความเครียดที่เกิดขึ้นส่งผลให้มีการดูดซับพลังงาน ในส่วนความเสียหายของบริเวณเส้นใยรองคือความเสียหายที่อยู่นอกเหนือตำแหน่งบริเวณเส้นใยหลักของชิ้นงานเพื่อดูดซับพลังงานที่ส่งผ่านมาจากความเสียหายของบริเวณเส้นใยหลัก เมื่อกระสุนเจาะเข้าไปในชั้นของวัสดุคอมพอสิตความเสียหายของวัสดุเริ่มต้นที่เส้นใยชั้นบนส่งผ่านมาถึงชั้นล่าง จนเกิดความเสียหายอย่างฉับพลันของชิ้นงานเส้นใยบริเวณทั้งสองจะเกิดความเสียหายเพื่อดูดซับพลังงานกระสุนทั้งหมดเกิดเป็นความเสียหายลักษณะเป็นรูปโค่นดังรูป 2.10

### 2.3.3 การแยกระหว่างชั้นของลามิเนต (Delamination) และการแตกหักของเมตริก (Matrix cracking)

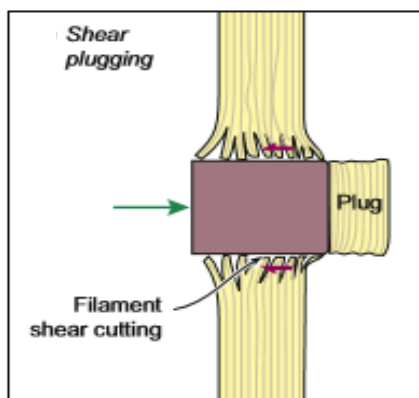


รูปที่ 2.11 ลักษณะความเสียหายการแยกระหว่างชั้นของลามิเนตและการแตกหักของเมตริกจากการรับแรงปะทะจากกระสุนปืนของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใย [14]

ลักษณะความเสียหายจากการแยกระหว่างชั้นของลามิเนตและการแตกหักของเมตริกของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตแสดงดังรูปที่ 2.11 เกิดขึ้นเพื่อลดและดูดซับพลังงานจากลูกกระสุนเมื่อมาปะทะกับวัสดุ ส่วนใหญ่ความเสียหายลักษณะเป็นรูปโค่นที่เกิดขึ้นจะเกิดการแยกระหว่างชั้นของลามิเนตและการแตกหักของเมตริกควบคู่ไปด้วย แต่การแตกหักของเมตริกแบบสมบูรณ์ไม่เกิดขึ้นในวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยเนื่องจากเมตริกมีการยึดติดอยู่กับเส้นใยเสริมแรงหลังจากได้รับแรงปะทะจากกระสุนปืน ซึ่งการแตกหักของเมตริกทำให้ความแข็งแรงของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตลดลงซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการแยกชั้นของลามิเนต

### 2.3.4 การเกิดความเสียหายแบบ Shear plugging

เมื่อกระสุนปะทะกับชิ้นงาน แรงเฉือนบริเวณชิ้นงานที่ปะทะกับกระสุนเพิ่มขึ้น โดยเมื่อแรงปะทะของกระสุนมากกว่าแรงเฉือนบริเวณชิ้นงาน ส่งผลให้ชิ้นงานบริเวณดังกล่าวเสียหายโดยเคลื่อนที่ไปพร้อมกับกระสุนที่ทะลุผ่านชิ้นงาน ซึ่งความเสียหายนี้ไม่เกิดกับกระสุนที่มีลักษณะเป็นรูปทรงกรวยที่มีความทะลุทะลวงสูง ลักษณะความเสียหายแบบ Shear plugging แสดงดังรูป



รูปที่ 2.12 ลักษณะความเสียหายแบบ Shear plugging จากการรับแรงปะทะจากกระสุนปืนของวัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใย [48]

### 2.3.5 พลังงานเสียดทาน

แรงเสียดทานระหว่างกระสุนปืนและวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตมีความสำคัญในการดูดซับพลังงาน เนื่องจากขนาดรอยต่อการทอของเส้นใยในวัสดุคอมพอสิตมีขนาดเล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของกระสุนปืน ทำให้เกิดแรงเสียดทานส่งผลให้กระสุนเกิดความเสียหายและความเร็วลดลงเมื่อปะทะกับวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิต

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### CHULALONGKORN UNIVERSITY

#### 2.4.1 เกราะกันกระสุนจากวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิต

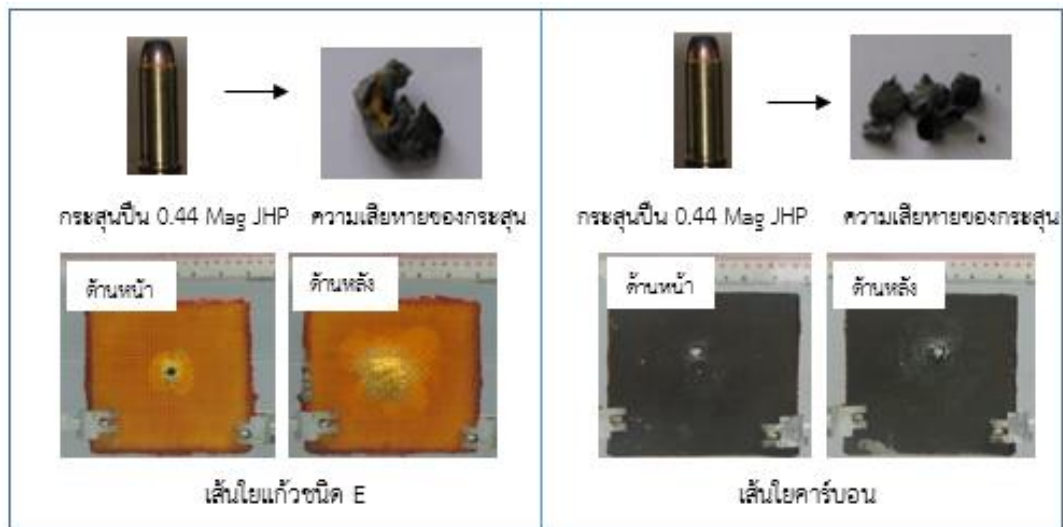
Pilpel และคณะ (2009) [5] ประเมินผลการต้านทานต่ออาวุธปืนของวัสดุคอมพอสิต จากวัสดุคอมพอสิตพอลิโพรพีลีนเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิด E และเส้นใยแก้วชนิด S ในส่วนของแผ่นปะทะและแผ่นดูดซับพลังงานตามลำดับ สามารถต้านภัยคุกคามระดับ 3 ซึ่งทดสอบโดยกระสุนปืนขนาด 7.62 มม. ที่ความเร็ว 843 เมตร/วินาที และผลการทดลองจากวัสดุคอมพอสิตชนิดอื่น แสดงดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ผลการทดลองชนิดของวัสดุคอมพอลิท์ต่อการต้านทานกระสุนตามระดับภัยคุกคาม [5]

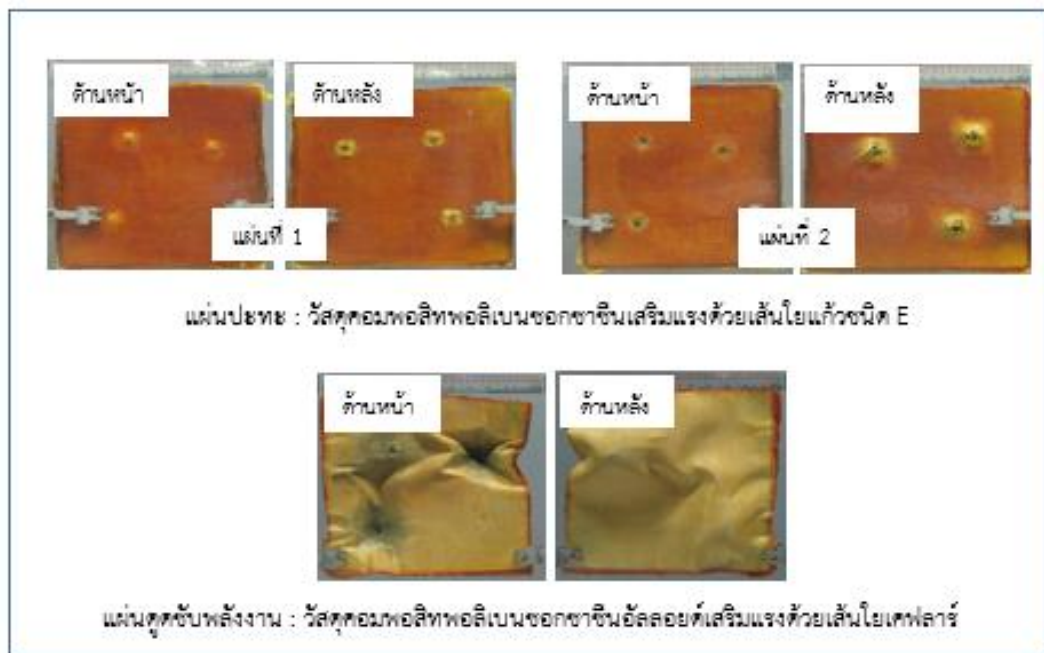
วัสดุ (เส้นใย/เมตริก)	Areal Density (g/cm <sup>2</sup> )	มาตรฐาน NIJ	ความเร็ว (m/s)
S-Glass fiber/PP	1.10-1.46	3-A	443-480
S-Glass + E-glass fibers เส้นใยมีน้ำหนักเท่ากัน	0.98-1.708	3-A	442 -543
S-Glass + E-glass fibers เส้นใยมีน้ำหนักเท่ากัน	4.90	3	843

Kasemsiri (2011) [26] พัฒนาเกราะกันกระสุนน้ำหนักเบาจากเส้นใยเสริมแรงโดยมีพอลิเบนซอกซาซินอัลลอยด์เป็นเมตริกเรซิน ทดสอบในส่วนของแผ่นหน้าหรือแผ่นปะทะขนาด 15×15 ตารางเซนติเมตร ผลที่ได้วัสดุคอมพอลิท์พอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิด E และวัสดุคอมพอลิท์พอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนสามารถทำลายหัวกระสุนปืนขนาด 0.44 Mag JHP ที่ความเร็ว 412-442 เมตร/วินาที ลักษณะความเสียหายของกระสุนปืนและแผ่นวัสดุคอมพอลิท์แสดงดังรูป 2.13 จากนั้นทดสอบความสามารถของวัสดุคอมพอลิท์ในการประยุกต์ใช้ผลิตเป็นเกราะกันกระสุน โดยแผ่นหน้าวัสดุคอมพอลิท์ คือ พอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิด E จำนวน 2 แผ่น แผ่นหลังหรือแผ่นดูดซับพลังงานวัสดุคอมพอลิท์ คือ พอลิเบนซอกซาซินอัลลอยด์เสริมแรงด้วยเส้นใยเคฟลาร์จำนวน 1 แผ่น ขนาด 30 × 30 ตารางเซนติเมตร มีน้ำหนัก 4.6 กิโลกรัม และความหนา 31.5 มิลลิเมตร สามารถต้านภัยคุกคามระดับ 3 ซึ่งทดสอบโดยกระสุนปืนขนาด 7.62 มม. ที่ความเร็ว 832-842 เมตร/วินาที ความเสียหายของวัสดุคอมพอลิท์ที่ประยุกต์ใช้ผลิตเป็นเกราะกันกระสุนแสดงดังรูป 2.14





รูปที่ 2.13 ลักษณะความเสียหายของกระสุนปืน 0.44 Mag JHP ของวัสดุคอมโพสิตพอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิด E และเส้นใยคาร์บอน ทดสอบโดยกระสุนปืน 0.44 Mag JHP ที่ความเร็ว 412-442 เมตร/วินาที [26]



รูปที่ 2.14 ลักษณะความเสียหายของวัสดุคอมโพสิตที่ประยุกต์ใช้ผลิตเป็นเกราะกันกระสุน ทดสอบโดยกระสุนปืน ขนาด 7.62 มม. ที่ความเร็ว 832-842 เมตร/วินาที [26]

#### 2.4.2 สมบัติทางกลของการจัดลำดับชั้นของวัสดุคอมพอสิต

Murugan และคณะ (2014) [49, 50] ศึกษาผลของสมบัติทางกลจากการจัดลำดับชั้นของวัสดุคอมพอสิตของอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วและเส้นใยคาร์บอน โดยกำหนดจำนวนชั้นและการจัดลำดับชั้นจำนวน 4 ชั้นงานดังตารางที่ 2.9 โดยทดสอบความต้านทานภายใต้แรงดึง, แรงดัดโค้ง และแรงกระแทก ตามมาตรฐาน ASTM D3039, ASTM D790 และ ASTM D256 ตามลำดับ ผลที่ได้วัสดุที่มีการจัดลำดับชั้นในรูปแบบโครงสร้างแซนวิชที่มีเส้นใยคาร์บอนเป็นแกนกลาง (GCCG) ให้ค่าความแข็งแรงภายใต้แรงดึงและค่าความแข็งแรงภายใต้แรงกระแทกสูงกว่าการจัดลำดับชั้นในรูปแบบโครงสร้างแซนวิชที่มีเส้นใยแก้วเป็นแกนกลาง (CGGC) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 194.8 เมกะปาสคาล และ 143.58 กิโลจูล/ตารางเมตร ตามลำดับ ในส่วนการจัดลำดับชั้นในรูปแบบ CGGC ให้ค่าความแข็งแรงภายใต้แรงดัดโค้งสูงกว่าการจัดลำดับชั้นในรูปแบบ GCCG ซึ่งมีค่าเท่ากับ 198.7 เมกะปาสคาล

ตารางที่ 2.9 สมบัติทางกลของวัสดุคอมพอสิตอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วและเส้นใยคาร์บอน [49, 50]

การจัดลำดับ ชั้นของ ชั้นงาน	ความแข็งแรงต่อแรงดึง (MPa) ASTM D3039 [49]	ความแข็งแรงต่อแรง ดัดโค้ง (MPa) ASTM D790 [49]	ความแข็งแรงต่อแรง กระแทก (kJ/m <sup>2</sup> ) ASTM D256 [50]
GGGG	125.3	129.7	147.14
GCCG	194.8	166.5	143.58
CGGC	187.4	198.7	103.75
CCCC	210.7	279.4	100.20

หมายเหตุ : C คือ Carbon fiber และ G คือ Glass fiber

Agarwal และคณะ (2015) [51] ศึกษาผลของสมบัติทางกายภาพและทางกลจากการจัดลำดับชั้นของวัสดุคอมพอสิตอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วและเส้นใยคาร์บอน โดยกำหนดจำนวนชั้นและการจัดลำดับชั้นจำนวน 5 ชั้นงานดังตารางที่ 2.10 โดยทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง, แรงดัดโค้ง และแรงกระแทก ตามมาตรฐาน ASTM D3039, ASTM D2344 และ ASTM D256 ตามลำดับ และทดสอบความแข็งที่ผิวแบบ Vickers hardness ผลที่ได้ชั้นงาน 4 มีการจัดลำดับชั้นในรูปแบบ C-C-G-G-C-C มีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง, แรงดัดโค้ง และแรงกระแทกสูงที่สุดในทุก

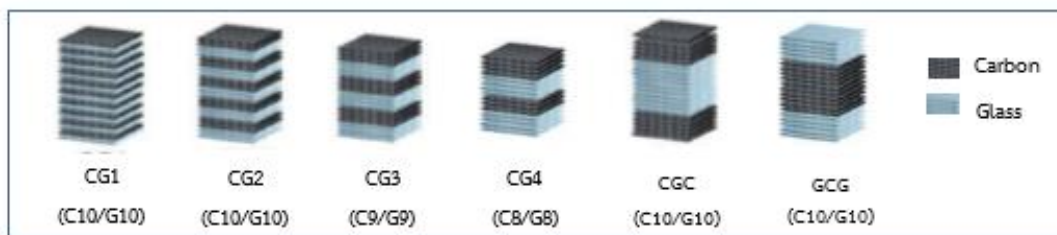
รูปแบบการจัดลำดับชั้นของชิ้นงานซึ่งมีค่าเท่ากับ 290 เมกะปาสคาล, 365 เมกะปาสคาลและ 2.60 จูล ตามลำดับ

ตารางที่ 2.10 สมบัติทางกลและกายภาพของวัสดุคอมพอสิตที่อีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วและเส้นใยคาร์บอน [51]

ชิ้นงาน	การจัดลำดับชั้น ของชิ้นงาน	ความแข็งแรงต่อ แรงดึง (MPa) ASTM D3039	ความแข็งแรงต่อ แรงดัดโค้ง (MPa) ASTM D2344	ความแข็งแรงต่อ แรงกระแทก (J) ASTM D256
1	G-G-G-G-G-G-G	238	316	2.65
2	G-G-C-C-C-G-G	270	340	2.20
3	G-C-G-C-G-C-G	310	355	2.45
4	C-C-G-G-G-C-C	290	365	2.60
5	C-C-C-C-C-C-C	250	360	2.55

หมายเหตุ : C คือ Carbon fiber และ G คือ Glass fiber

Jun Hee Song (2015) [25, 52] ศึกษาผลของสมบัติทางกลของวัสดุคอมพอสิตของอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วและเส้นใยคาร์บอน (ผืนผ้าทอแบบ 3 มิติ คือระนาบผืนผ้าทอเส้นใยทำมุม 0 และ 90 องศา) โดยกำหนดจำนวนชั้นและการจัดลำดับชั้นจำนวน 6 ชิ้นงาน ดังรูปที่ 2.15 ทดสอบสมบัติทางกลด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงแรงอัด (Universal Testing Machine) ผลการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 ที่อัตราการดึง 2 มิลลิเมตร/นาที แสดงดังตารางที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดโดยชิ้นงาน CG4 และ CGC มีสมบัติทางกลจากการทดสอบแรงดึงสูงกว่าชิ้นงานคอมพอสิตในรูปแบบอื่น และผลการทดสอบแรงดัดโค้งตามมาตรฐาน ASTM D790 แสดงดังตารางที่ 2.12 ซึ่งชิ้นงาน CG4 มีค่าความแข็งแรงต่อแรงดัดสูงสุดเท่ากับ 696 เมกะปาสคาล จากการทดสอบข้างต้นสรุปได้ว่าการกำหนดจำนวนชั้นและการจัดลำดับของชิ้นงานคอมพอสิตที่มีผลต่อสมบัติทางกลของชิ้นงาน



หมายเหตุ : C คือ Carbon fiber และ G คือ Glass fiber

รูปที่ 2.15 การจัดลำดับชั้นของวัสดุคอมพอสิตที่พอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วและเส้นใยคาร์บอน [25]

ตารางที่ 2.11 การทดสอบแรงดึงโดยจัดลำดับชั้นของชิ้นงานคอมพอสิตในรูปแบบต่างๆ [25]

ชิ้นงาน	ความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงสุด Ultimate tensile Stress (MPa)	Elastic modulus (GPa)	พลังงานต่อ หน่วยปริมาตร (MPa)	การยืดตัว Elongation (%)
CG1	435-440	370-380	225	1.1-1.2
CG2	435-440	375-385	240-250	1.1-1.3
CG3	390-400	355-365	215-220	1.0-1.2
CG4	435-450	390-395	250-260	1.1-1.25
CGC	390-400	350	230-240	1.1-1.25
GCG	435-445	390-400	225	1.05-1.2

ตารางที่ 2.12 ความแข็งแรงต่อแรงดัดของการจัดลำดับชั้นของชิ้นงานคอมพอสิตในรูปแบบต่างๆ

[52]

ชิ้นงาน	ความแข็งแรงภายใต้แรงดัดโค้ง Bending strength (MPa)
CG1	587
CG2	568
CG3	578
CG4	696
CGC	657
GCG	498

### 2.4.3 ผลของการจัดลำดับชั้นของวัสดุคอมพอสิตต่อการรับแรงปะทะจากวัสดุความเร็วสูง

Pandya และคณะ (2013) [8] ศึกษาการดูดซับพลังงานและความเร็วสูงสุดที่ชิ้นงานสามารถต้านทานการเจาะทะลุได้ ( $V_{50}$ ) ของการจัดลำดับชั้นของวัสดุคอมพอสิตที่พอกซีที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิด E ร่วมกับเส้นใยคาร์บอน ต่อการรับแรงปะทะจากลูกเหล็ก (AISI 4340) โดยทุกชิ้นงานมีความหนา 3 มิลลิเมตร ผลการทดลองดังตารางที่ 2.13 โดยชิ้นงานคอมพอสิตที่พอกซีที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิด E มีความสามารถในการดูดซับพลังงานและสามารถป้องกันการเจาะทะลุที่ความเร็วสูงกว่าชิ้นงานคอมพอสิตที่พอกซีที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแต่มีความหนาแน่นเชิงพื้นที่ที่สูงกว่า และในการจัดลำดับชั้นของชิ้นงานพบว่า ชิ้นงานที่มีการจัดลำดับชั้นแบบ G-G-C-C ซึ่งเป็นด้านเส้นใยแก้วรับแรงปะทะสามารถดูดซับพลังงานและสามารถป้องกันการเจาะทะลุที่ความเร็วสูงกว่าชิ้นงานที่ด้านเส้นใยคาร์บอนเป็นด้านรับแรงปะทะ จากผลการทดลองดังกล่าวสรุปได้ว่าประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงานและการต้านทานการเจาะทะลุของวัสดุความเร็วสูงควรนำด้านเส้นใยแก้วเป็นด้านรับแรงปะทะ

ตารางที่ 2.13 การดูดซับพลังงานและความเร็วสูงสุดที่ชิ้นงานสามารถต้านทานการเจาะทะลุได้ ( $V_{50}$ ) ของการจัดลำดับชั้นของวัสดุคอมพอสิตที่พอกซีที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิด E ร่วมกับเส้นใยคาร์บอน [8]

การจัดลำดับชั้น	ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ (kg/m <sup>2</sup> )	$V_{50}$ (m/s)	การดูดซับพลังงาน (J)
G-G-G-G-G-G	3.74	98	30.83
G-G-C-C	3.33	87	24.30
C-C-G-G	3.33	84	22.65
C-C-C-C-C-C-C-C	3.00	81	21.06

หมายเหตุ : C คือ Carbon fiber และ G คือ Glass fiber

Randjbaran และคณะ (2014) [53] ศึกษาความเสียหายและความเร็วคงเหลือของการจัดลำดับชั้นในวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน และเส้นใยเคพลาร์ต่อการรับแรงปะทะจากลูกเหล็ก (AISI 4340) ที่ความเร็วเริ่มต้น 182 เมตร/วินาที โดยชั้นงานห่างจากลำกล้องยิง 5 เมตร ผลการทดลองดังตารางที่ 2.14 โดยชั้นงานที่ 1 สามารถดูดซับพลังงานได้ดีที่สุดเนื่องจากมีความเสียหายของชั้นงานและความเร็วคงเหลือน้อยสุดจากความเร็วเริ่มต้น 182 เมตร/วินาที และชั้นงานที่มีประสิทธิภาพรองลงมาคือชั้นที่ 4 จากผลการทดลองดังกล่าวสรุปได้ว่าการจัดลำดับชั้นในวัสดุคอมโพสิตที่มีผลต่อการดูดซับพลังงานจากการรับแรงปะทะของวัสดุความเร็วสูงโดยในการทดลองนี้ประสิทธิภาพในการการดูดซับพลังงานคือ ผืนผ้าเส้นใยแก้วควรวางไว้ด้านหน้าและผืนผ้าเส้นใยคาร์บอนควรวางไว้ตรงกลางของชั้นงาน

ตารางที่ 2.14 ผลของสัดส่วนน้ำหนักที่สูญหายและความเร็วคงเหลือการจัดลำดับชั้นวัสดุคอมโพสิตต่อการรับแรงปะทะจากลูกเหล็กที่ความเร็ว 182 เมตร/วินาที [53]

ชั้นงาน	การจัดลำดับชั้น	สัดส่วนน้ำหนักที่สูญหาย (Weight loss,%)	ความเร็วคงเหลือ (เมตร/วินาที)
1	K-C-G-K-G-C	20	14
2	G-C-K-C-K-G	3.5	5
3	K-G-C-G-C-K	8	8
4	G-K-C-C-G-K	6.5	5
5	K-C-G-G-C-K	16	8
6	C-C-C-C-C-C	6	27

หมายเหตุ : K คือ Kevlar fiber, C คือ Carbon fiber และ G คือ Glass fiber

### บทที่ 3

#### วัสดุและวิธีดำเนินงานวิจัย

##### 3.1 วัสดุและสารเคมี

3.1.1 บิสฟีนอลเอ (Bisphenol A) บริษัท PTT Phenol ประเทศไทย

3.1.2 ฟอรัมาลดีไฮด์ (Formaldehyde) บริษัท Merck-chemical Co. Ltd. ประเทศเยอรมนี

3.1.3 อะนิลีน (Aniline) บริษัท LOBA Chemie Pvt. Ltd. ประเทศอินเดีย

3.1.4 พอลิโพรพิลีนพอลิออล (Polypropylene polyol) มวลโมเลกุล 2000 บริษัท TPI Polyol Co. Ltd. ประเทศไทย

3.1.5 โทลูอินไดไอโซไซยานต (Toluene diisocyanate : TDI) บริษัท South City Group ประเทศไทย

3.1.6 เส้นใยแก้วชนิด S (Glass fiber type S), เส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) และเส้นใยอะรามิด (Aramid fiber) โดยมีค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่ 800,340 และ 340 กรัม/ตารางเมตร ตามลำดับ จากบริษัท Thai Polyadd Limited Partnership ประเทศไทย

##### 3.2 อุปกรณ์

3.2.1 เครื่องให้ความร้อน (Hot Plate) ยี่ห้อ IKA บริษัท S.N.P. Scientific Co, Ltd. ประเทศไทย

3.2.2 เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molder) บริษัท Labtech Engineering Co, Ltd. ประเทศไทย

3.2.3 ตู้อบลมร้อน (Oven) บริษัท Worldco Co, Ltd. ประเทศไทย

3.2.4 เครื่องทดสอบแรงดึงแรงอัด (Universal Testing Machine) บริษัท Instron Co, Ltd. ประเทศไทย

3.2.5 เครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness Tester) บริษัท Instron Co, Ltd. ประเทศไทย

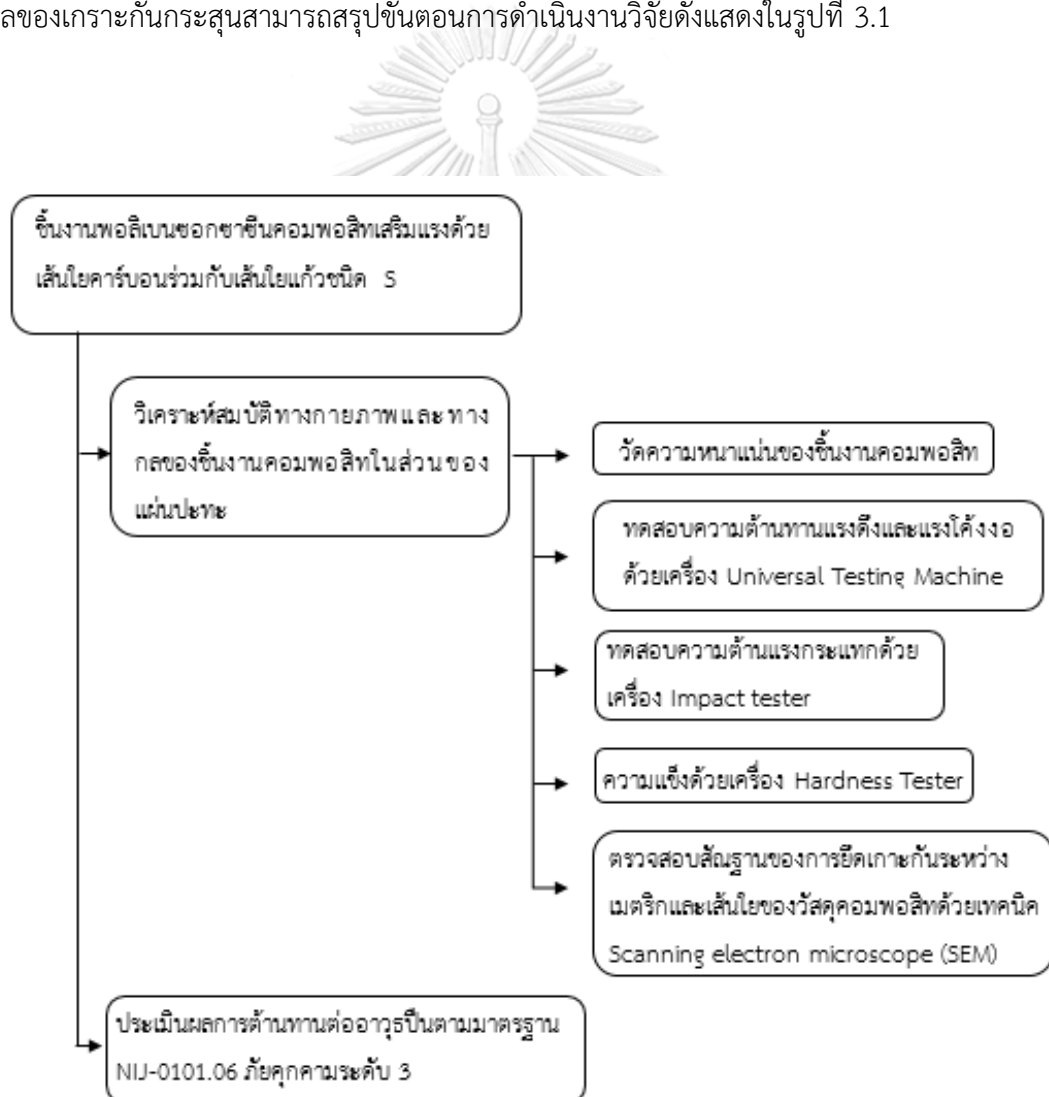
3.2.6 เครื่อง Pendulum impact tester ยี่ห้อ Ceast บริษัท Instron Co, Ltd. ประเทศไทย

3.2.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)

3.2.8 อุปกรณ์ทดสอบยิงตามมาตรฐานการทดสอบเกราะกันกระสุนสำหรับสวมใส่ส่วนบุคคลตามระดับภัยคุกคาม (NIJ-0101.06)

### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในการศึกษาอิทธิพลของจำนวนชั้นและการจัดลำดับชั้นของเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้วชนิด S ในส่วนของแผ่นปะทะที่มีต่อ ประสิทธิภาพการทำลายหัวกระสุน สมบัติทางกายภาพและทางกลของเกราะกันกระสุนสามารถสรุปขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย



### 3.3.1 การเตรียมเมตริกเรซิน

เบนซอกซาซีนมอนอเมอร์ (BA-a) สังกะราห์จากบิสฟีนอลเอ (Bisphenol A) พอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde) และอะนิลีน (Aniline) ในอัตราส่วน 1:4:2 โดยโมลตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที โดยเทคนิคไม่ใช้ตัวทำละลาย และนำมาบดให้ละเอียดจะได้ของแข็งลักษณะเป็นผงสีเหลืองที่อุณหภูมิห้อง

พอลิยูรีเทน (PU) สังกะราห์จากโทลูอินไดไอโซไซยาเนต (Toluene diisocyanate : TDI) และพอลิโพรพิลีนพอลิออล (Polypropylene polyol) ในอัตราส่วน 2:1 โดยโมล ตามลำดับ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้สภาวะไนโตรเจน

### 3.3.2 การเตรียมวัสดุพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดต่างๆ

3.3.2.1 แผ่นหน้าหรือแผ่นปะทะ วัสดุคอมพอสิตคือพอลิเบนซอกซาซีนเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้วชนิด S เตรียมโดยนำพอลิเบนซอกซาซีนให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส ทาลงบนแผ่นเส้นใยแก้วและแผ่นเส้นใยคาร์บอนบนเตาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส และขึ้นรูปขึ้นงานคอมพอสิตโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molder) ที่ความดัน 15 เมกะปาสคาล และที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.3.2.2 แผ่นหลังหรือแผ่นดูดซับพลังงาน วัสดุคอมพอสิตคือพอลิเบนซอกซาซีนอัลลอยด์เมตริกเรซินระหว่างเบนซอกซาซีนกับยูรีเทนในอัตราส่วน 80:20 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เสริมแรงด้วยเส้นใยเคฟลาร์ เตรียมโดยนำพอลิเบนซอกซาซีนผสมกับยูรีเทนที่เตาให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน ทาลงบนแผ่นเส้นใยเคฟลาร์บนเตาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส และขึ้นรูปขึ้นงานคอมพอสิตโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molder) ที่ความดัน 10 เมกะปาสคาล และที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

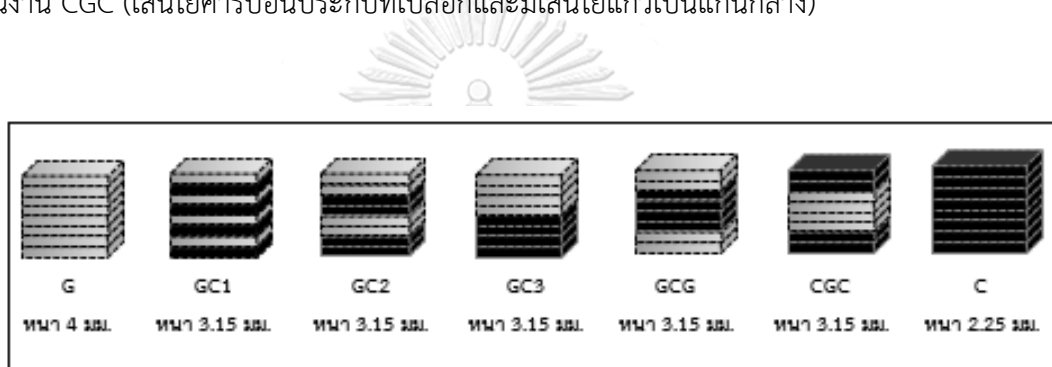
### 3.3.3 การเรียงสลับชั้นขึ้นงานคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้ว

ในการทดสอบสมบัติทางกลทำการทดสอบ 7 ชั้นงาน โดยทุกๆชั้นงานมีจำนวน 8 ชั้นเท่ากัน ทุกชั้นงาน ดังรูปที่ 3.2 และในแต่ละชั้นงานมีสัดส่วนของปริมาณเส้นใยแก้วและเส้นใยคาร์บอนดัง

ตารางที่ 3.1 ซึ่งในการจัดลำดับชั้นของชิ้นงานคอมพอลิโทปอลิเบนซอกซาซินที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้วแบ่งเป็น 2 กลุ่มคือ

-กลุ่มที่ 1 เป็นการจัดสลับชั้นไปมา โดยมีชิ้นงาน 3 แบบดังนี้ ชิ้นงาน GC1 (เส้นใยแก้วสลับกับเส้นใยคาร์บอนอย่างละ 1 ชั้น), ชิ้นงาน GC2 (เส้นใยแก้วสลับกับเส้นใยคาร์บอนอย่างละ 2 ชั้น) และชิ้นงาน GC3 (เส้นใยแก้วอยู่ที่ผิวด้านบนสลับกับเส้นใยคาร์บอนอยู่ที่ผิวด้านล่าง)

-กลุ่มที่ 2 เป็นการจัดลำดับชั้นแบบโครงสร้างแซนวิช (Sandwich structure) โดยมีชิ้นงาน 2 แบบดังนี้ ชิ้นงาน GCG (เส้นใยแก้วประกบที่เปลือกและมีเส้นใยคาร์บอนเป็นแกนกลาง) และชิ้นงาน CGC (เส้นใยคาร์บอนประกบที่เปลือกและมีเส้นใยแก้วเป็นแกนกลาง)



รูปที่ 3.2 การจัดลำดับชั้นของเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้วชนิด S ในส่วนของแผ่นปะทะที่มีต่อสมบัติทางกลของชิ้นงานคอมพอลิโท

ตารางที่ 3.1 ปริมาณของเส้นใยแก้วและเส้นใยคาร์บอนของการจัดลำดับชั้นของวัสดุพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้ว

ชั้นงาน	การจัดเรียงลำดับชั้น	ปริมาณเส้นใยแก้ว (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปริมาณเส้นใยคาร์บอน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
G	G-G-G-G-G-G-G	70	0
GC1	G-C-G-C-G-C-G-C	35	35
GC2	G-G-C-C-G-G-C-C	35	35
GC3	G-G-G-G-C-C-C-C	35	35
GCG	G-G-C-C-C-C-G-G	35	35
CGC	C-C-G-G-G-G-C-C	35	35
C	C-C-C-C-C-C-C-C	0	70

### 3.3.4 การวัดความหนาแน่น

ความหนาแน่นของวัสดุพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้ว ทำการทดสอบโดยวิธีการแทนที่ด้วยน้ำตามมาตรฐาน ASTM D792-08 (Method A) ซึ่งแต่ละชั้นงานคอมพอสิตมีจำนวนชั้น 8 ชั้นและมีการจัดเรียงลำดับชั้นดังรูปที่ 3.2 โดยมีขนาด 50 มิลลิเมตร × 25 มิลลิเมตร และทำการชั่งน้ำหนักทั้งในอากาศและในน้ำ และทำการเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นตามทฤษฎีโดยใช้ข้อมูลปริมาณเส้นใยดังตารางที่ 3.1 เพื่อประเมินคุณภาพของชั้นงานคอมพอสิต

ความหนาแน่นคำนวณโดยใช้สมการต่อไปนี้

$$\rho = \frac{A}{A-B} \rho_0 \quad (3.1)$$

โดย  $\rho$  และ  $\rho_0$  คือ ความหนาแน่นของชั้นงานและของน้ำที่อุณหภูมิที่กำหนด (กรัม/ลบ.ซม.) ตามลำดับ

A และ B คือ น้ำหนักของชั้นงานในอากาศและในน้ำ (กรัม) ตามลำดับ

### 3.3.5 การทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile test)

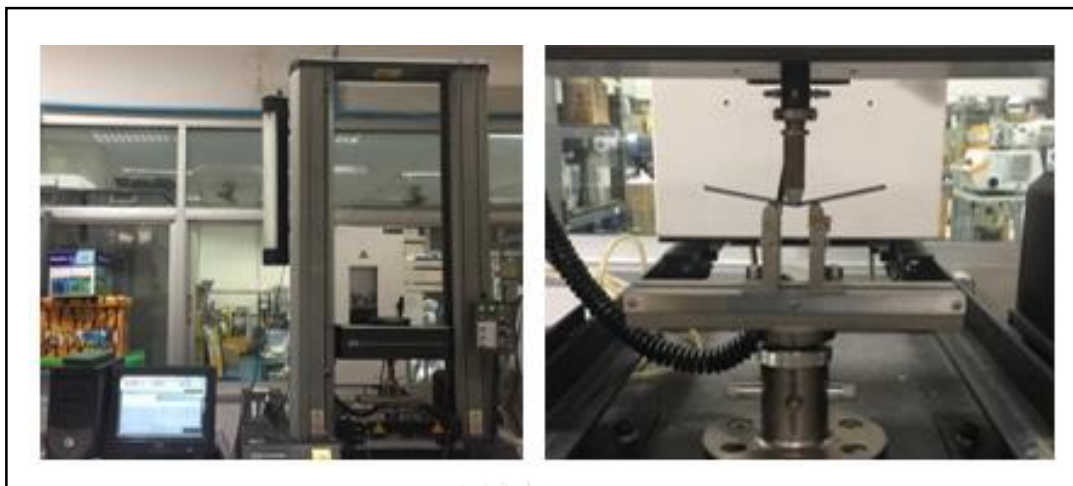
การทดสอบความต้านทานแรงดึง โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3039 ทดสอบด้วยเครื่อง Universal testing machine (Instron รุ่น 8872) ดังรูปที่ 3.3 โดยใช้ความเร็วในการดึง (Test speed) 2 มิลลิเมตร/นาที ด้วยน้ำหนักกด 25 กิโลนิวตัน และความยาวของเกจ (Gage length) 70 มิลลิเมตร ซึ่งแต่ละชิ้นงานคอมพอลิโสมีจำนวนชั้น 8 ชั้นและมีการจัดเรียงลำดับชั้นดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.3 การทดสอบความต้านทานแรงดึงด้วยเครื่อง Universal testing machine ของบริษัท Instron รุ่น 8872

### 3.3.6 การทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้ง (Flexural test)

การทดสอบความต้านทานแรงกระแทก โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D790 ทดสอบแบบ 3 จุด (3-points bending) ทดสอบด้วยเครื่อง Universal testing machine (Instron รุ่น 5567) ดังรูปที่ 3.4 ใช้ความเร็วในการดึง (Test speed) 2 มิลลิเมตร/นาที ด้วยน้ำหนักกด 1 กิโลนิวตัน และอัตราระยะห่างของขารองรับชิ้นงาน (Ratio of span to depth) เท่ากับ 16:1 ซึ่งแต่ละชิ้นงานคอมพอลิโสมีจำนวนชั้น 8 ชั้นและมีการจัดเรียงลำดับชั้นดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.4 การทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้งด้วยเครื่อง Universal testing machine ของบริษัท Instron รุ่น 5567

### 3.3.7 การทดสอบความต้านแรงกระแทก (Impact test)

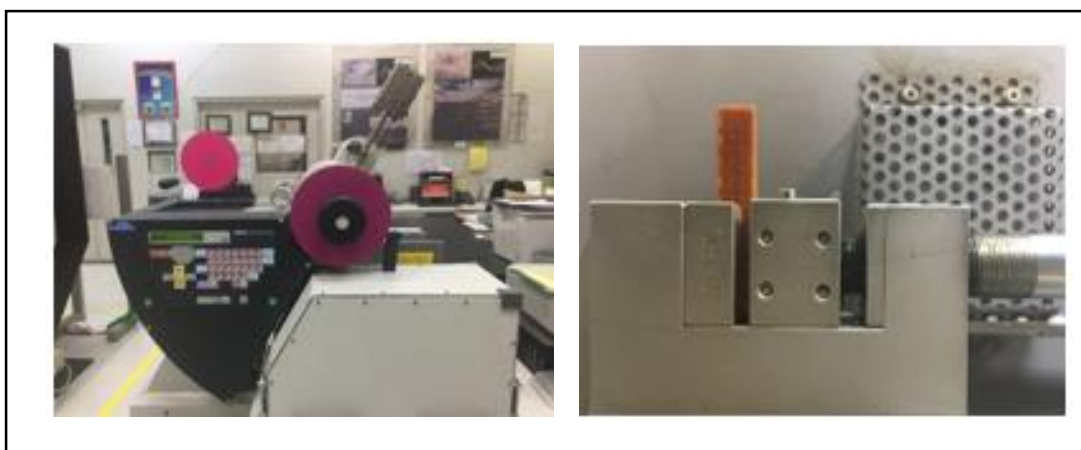
การทดสอบความต้านแรงกระแทก โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256 แบบไอซอด (Izod type) ทดสอบด้วยเครื่อง Pendulum impact tester (Ceast รุ่น 2260) ดังรูปที่ 3.5 ใช้ลูกตุ้มขนาด 25 จูล ซึ่งแต่ละชิ้นงานคอมพอสิตมีจำนวนชั้น 8 ชั้นและมีการจัดเรียงลำดับชั้นดังรูปที่ 3.2

ค่าความแข็งแรงต่อการกระแทก (Impact strength) คำนวณโดยใช้สมการต่อไปนี้

$$\text{Impact strength} = \frac{W}{A} \quad (3.2)$$

โดย W คือ ค่าพลังงานกระแทก (kJ)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง ( $\text{m}^2$ )



รูปที่ 3.5 การทดสอบความต้านแรงกระแทกด้วยเครื่อง Pendulum impact tester ของบริษัท Ceast รุ่น 2260

### 3.3.8 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

การทดสอบความแข็ง โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2240 ทดสอบด้วยเครื่อง Durometer hardness ชนิด Shore D (Instron) ดังรูปที่ 3.6 ใช้น้ำหนักกด 5 กิโลกรัม ซึ่งแต่ละชิ้นงานคอมพอลิทีมีการจัดเรียงลำดับชั้นดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.6 การทดสอบความแข็งด้วยเครื่อง Durometer hardness ชนิด Shore D ของบริษัท Instron

### 3.3.9 การวิเคราะห์โครงสร้างพื้นฐาน (Morphology)

การยัดเกราะระหว่างเมตริกพอลิเบนซอกซาซีนกับเส้นใยเสริมแรงวิเคราะห์ได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) โดยนำชิ้นงานมาเคลือบพื้นผิวที่เสียหายด้วยทองคำก่อนนำไปวิเคราะห์โครงสร้างพื้นฐาน ซึ่งใช้ความต่างศักย์ 15 กิโลโวลต์

### 3.3.10 การทดสอบความต้านทานและรอยยุบตัวของเกราะกันกระสุน และความเสียหายของกระสุน จากการรับแรงปะทะของวัสดุคอมโพสิตโดยใช้เบนซอกซาซีนเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยต่ออาวุธปืนตามมาตรฐาน NIJ-0101.06

ทดสอบการรับแรงปะทะจากอาวุธปืนของเกราะกันกระสุนจากวัสดุคอมโพสิตพอลิเบนซอกซาซีนเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วร่วมกับเส้นใยคาร์บอนในส่วนของแผ่นปะทะ และในส่วนของแผ่นดูดซับพลังงานวัสดุคอมโพสิตคือพอลิเบนซอกซาซีนอัลลอยด์เมตริกเรซินระหว่างเบนซอกซาซีนกับยูรีเทนเสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิต ทำการทดสอบด้วยกระสุนปืนขนาด 7.62 x 51 มม. ที่ความเร็ว  $847 \pm 9.1$  เมตร/วินาที ตามมาตรฐาน NIJ-0101.06 ที่ระดับภัยคุกคามระดับ 3 โดยทิศทางการปะทะของกระสุนตั้งรูปที่ 3.7 และในการทดสอบกำหนดระยะห่างระหว่างลำกล้องทดสอบกับเกราะกันกระสุนเท่ากับ 15 เมตร อุปกรณ์และกระสุนที่ใช้ในการทดสอบตั้งรูปที่ 3.8 และ 3.9 ตามลำดับ



รูปที่ 3.7 ทิศทางการปะทะของกระสุนปืนของวัสดุคอมโพสิตโดยใช้เบนซอกซาซีนเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใย



รูปที่ 3.8 อุปกรณ์ในการทดสอบยิงชิ้นงานเกราะกันกระสุนตามมาตรฐาน NIJ-0101.06 ที่ระดับภัยคุกคามระดับ 3



รูปที่ 3.9 กระสุนขนาด 7.62 x 51 มม. ใช้ทดสอบยิงชิ้นงานเกราะกันกระสุนที่ความเร็ว  $847 \pm 9.1$  เมตร/วินาที ตามมาตรฐาน NIJ-0101.06 ที่ระดับภัยคุกคามระดับ 3

ในงานวิจัยทำการทดสอบเกราะกันกระสุนจากวัสดุคอมพอสิต 2 ขนาดดังนี้

1. ขนาด 150×150 ตารางมิลลิเมตร ใช้ในการทำการศึกษาเบื้องต้นในการหาจำนวนชั้นและการจัดลำดับชั้นที่เหมาะสมของวัสดุคอมพอสิตสำหรับประยุกต์ใช้เป็นเสื้อเกราะกันกระสุน โดยทดสอบยิงจำนวน 1 นัดตรงบริเวณตรงกลางชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.10
2. ขนาดเสื้อเกราะกันกระสุน 290×280 ตารางมิลลิเมตร โดยทดสอบยิงจำนวน 6 นัด ตามมาตรฐาน NIJ-0101.06 ที่ระดับภัยคุกคามระดับ 3 ตำแหน่งการทดสอบยิงแสดงดังรูปที่ 3.10





รูปที่ 3.10 ขนาดชิ้นงานและตำแหน่งในการทดสอบยิงชิ้นงานเกราะกันกระสุนที่ ตามมาตรฐาน NIJ-0101.06 ที่ระดับภัยคุกคามระดับ 3

## บทที่ 4

## ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

## 4.1 ความหนาแน่นของวัสดุคอมพอลิโทลิตเบนชอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้วที่การจัดลำดับชั้นแบบต่างๆ

การวัดค่าความหนาแน่นเป็นสิ่งสำคัญสำหรับประเมินคุณภาพของวัสดุ โดยให้ข้อมูลลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคในเมตริกของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอลิโทลิต รวมไปถึงการเกิดช่องว่างหรือช่องว่างของอากาศภายในวัสดุ

ตารางที่ 4.1 ความหนาแน่นจากการทดลอง, จากทฤษฎี และช่องว่างภายในชิ้นงานของการจัดลำดับชั้นของวัสดุคอมพอลิโทลิตเบนชอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้ว

ชิ้นงาน	การจัดเรียงลำดับชั้น	ความหนาแน่นจากการทดลอง ( $\rho_{ex}$ ) (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	ความหนาแน่นตามทฤษฎี ( $\rho_{ct}$ ) (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	อัตราส่วนช่องว่างภายในชิ้นงาน ( $\Delta v$ ) (%)
G	G-G-G-G-G-G-G	1.872	1.875	0.180
GC1	G-C-G-C-G-C-G-C	1.720	1.722	0.113
GC2	G-G-C-C-G-G-C-C	1.712	1.722	0.577
GC3	G-G-G-G-C-C-C-C	1.713	1.722	0.519
GCG	G-G-C-C-C-C-G-G	1.719	1.722	0.171
CGC	C-C-G-G-G-G-C-C	1.709	1.722	0.752
C	C-C-C-C-C-C-C-C	1.575	1.586	0.699

หมายเหตุ : สัญลักษณ์ G และ C คือ ชั้นของเส้นใยแก้ว และเส้นใยคาร์บอน ตามลำดับ

โดยค่าความหนาแน่นที่ได้จากการทดลอง, ความหนาแน่นตามทฤษฎี และช่องว่างภายในชิ้นงานของวัสดุคอมพอลิโทลิตเบนชอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้วที่การ

จัดลำดับชั้นแบบต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.1 โดยความหนาแน่นตามทฤษฎี และช่องว่างภายในชิ้นงาน คำนวณดังสมการที่ 4.1 และ 4.2 [51] ตามลำดับ โดยความหนาแน่นของเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยแก้วมีค่าเท่ากับ 1.85 และ 2.49 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ และความหนาแน่นพอลิเบนซอกลูซีนมีค่า 1.19 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

$$\rho_{ct} = \frac{1}{\frac{w_f}{\rho_f} + \frac{(1-w_f)}{\rho_m}} \quad (4.1)$$

โดย  $\rho_{ct}$  คือ ความหนาแน่นตามทฤษฎีของวัสดุคอมพอสิต (The density of composite material) หน่วยคือ กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร,  $\rho_f$  คือ ความหนาแน่นของเส้นใยเสริมแรง (The density of fiber) หน่วยคือ กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร,  $\rho_m$  คือ ความหนาแน่นของเมตริก (The density of matrix resin) หน่วยคือ กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร และ  $w_f$  คือ สัดส่วนน้ำหนักของเส้นใยเสริมแรง (The weight fraction of fiber)

$$\Delta v = \frac{\rho_{ct} - \rho_{ex}}{\rho_{ct}} \quad (4.2)$$

โดย  $\Delta v$  คือ ช่องว่างภายในชิ้นงาน (Void faction) ,  $\rho_{ct}$  คือ ความหนาแน่นตามทฤษฎีของวัสดุคอมพอสิต (The density of composite material) หน่วยคือ กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร และ  $\rho_{ex}$  คือ ความหนาแน่นจากการทดลองของวัสดุคอมพอสิต (The density of experimental) หน่วยคือ กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

จากตารางที่ 4.1 ความหนาแน่นจากการทดลองของชิ้นงานคอมพอสิตพอลิเบนซอกลูซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้วที่การจัดลำดับชั้นต่างๆมี ค่าเท่ากับ 1.872, 1.720, 1.712, 1.713, 1.719, 1.709 และ 1.575 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ในชิ้นงาน G, GC1, GC2, GC3, GCG, CGC และ C ตามลำดับ ซึ่งความหนาแน่นของคอมพอสิตที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับความหนาแน่นทางทฤษฎี ส่งผลให้สัดส่วนช่องว่างภายในชิ้นงานของวัสดุคอมพอสิตมีค่าต่ำ ดังตารางที่ 4.1

โดยในชิ้นงาน G, GC1, GC2, GC3, GCG, CGC และ C มีอัตราส่วนช่องว่างภายในชิ้นงานเท่ากับ 0.180, 0.113, 0.577, 0.519, 0.171, 0.752 และ 0.699 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยสัดส่วนช่องว่างภายในชิ้นงานที่ต่ำนั้น บ่งบอกถึงช่องว่างอากาศในชิ้นงานที่น้อยและความสม่ำเสมอในชิ้นงานแต่ละชิ้นนั่นเอง นอกจากนี้แล้วเมื่อเทียบกับการทดลองของ Agarwal และคณะ [51] ศึกษาการจัดลำดับชั้นของชิ้นงานคอมพอสิตที่พอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้วโดยมีอัตราส่วนช่องว่างในชิ้นงานอยู่ระหว่าง 5.156-0.705 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการมีช่องว่างภายในชิ้นงานที่ใช้ทดสอบสามารถส่งผลให้สมบัติทางกลของชิ้นงานมีค่าลดลงด้วย แสดงให้เห็นว่าพอลิเบนซอกซาซินเรซินมีความสามารถในการوابเส้นใยทั่วถึงและยึดติดกับเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยแก้วได้เป็นอย่างดี เนื่องจากสมบัติความหนืดขณะหลอมเหลวต่ำ

#### 4.2 ความต้านทานแรงดึง (Tensile test) ของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซินที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้วที่การจัดลำดับชั้นแบบต่างๆ

สมบัติความต้านทานแรงดึงเป็นสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุที่บ่งบอกถึงความแข็งแรงหรือความต้านทานในการเปลี่ยนรูปร่างเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ โดยการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงจะทำให้เพิ่มความเครียดอย่างเป็นสัดส่วนอธิบายหลักการนี้โดยกฎของฮุค (Hooke's law) ดังสมการ

$$\sigma = E\varepsilon \quad (4.3)$$

โดย  $\sigma$  คือ ความเค้น (Stress) หน่วยคือ เมกะปาสคาล,  $E$  คือ โมดูลัสของยัง (Young's modulus) หน่วยคือ เมกะปาสคาล และ  $\varepsilon$  คือ ความเครียด (Strain) ซึ่งจากสมการดังกล่าวสามารถนำมาเขียนกราฟแสดงพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุได้เรียกว่า กราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain curve)

จากตารางที่ 4.2 แสดงค่าความแข็งแรงภายใต้แรงดึง (Tensile strength), โมดูลัสของยัง (Young's modulus), เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (% Elongation) และพลังงาน ณ จุดขาด (Energy at break) ของการจัดลำดับชั้นของวัสดุพอลิเบนซอกซาซินที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้ว

ค่าโมดูลัสของยังของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วของชิ้นงาน G และเส้นใยคาร์บอนของชิ้นงาน C มีค่าเท่ากับ  $21.00 \pm 0.18$  และ  $40.19 \pm 1.47$  จิกะปาสคาล จะเห็นว่าวัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนมีค่าโมดูลัสสูงกว่าวัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว เนื่องจากเส้นใยคาร์บอนมีค่าโมดูลัสสูงกว่าเส้นใยแก้ว จึงทำให้มีความสามารถในการรับรูป

ที่สูงกว่า [37, 38] และเมื่อพิจารณาการจัดลำดับชั้นของวัสดุคอมพอลิเมอร์เบนซอกลูซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้วในชิ้นงาน GC1, GC2, GC3, GCG และ CGC มีค่ามอดูลัสของยังเท่ากับ  $25.24 \pm 0.96$ ,  $27.09 \pm 0.34$ ,  $27.29 \pm 0.99$ ,  $26.31 \pm 1.02$  และ  $26.56 \pm 1.19$  จิกะปาสคาล ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน โดยวัสดุคอมพอลิเมอร์เบนซอกลูซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้วมีค่ามอดูลัสสูงกว่าวัสดุคอมพอลิเมอร์ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว เนื่องจากการเติมเส้นใยคาร์บอนที่มีค่ามอดูลัสสูงกว่า จึงช่วยเพิ่มความทรงรูปให้แก่ชิ้นงานวัสดุคอมพอลิเมอร์เบนซอกลูซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้วที่การจัดลำดับชั้นแบบต่างๆด้วย

ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%) ของวัสดุคอมพอลิเมอร์เบนซอกลูซีนเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วของชิ้นงาน G และเส้นใยคาร์บอนของชิ้นงาน C มีค่าเท่ากับ  $4.44 \pm 0.11$  และ  $2.27 \pm 0.34$  เปอร์เซ็นต์ พบว่าวัสดุคอมพอลิเมอร์ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่สูงกว่าวัสดุคอมพอลิเมอร์ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน เนื่องจากเส้นใยแก้วมีความยืดหยุ่นสูงกว่าเส้นใยคาร์บอน จึงทำให้มีความสามารถในการยืดตัวที่สูงกว่า [37, 38] และเมื่อพิจารณาการจัดลำดับชั้นของวัสดุคอมพอลิเมอร์เบนซอกลูซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้วในชิ้นงาน GC1, GC2, GC3, GCG และ CGC มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเท่ากับ  $2.39 \pm 0.17$ ,  $2.37 \pm 0.12$ ,  $2.43 \pm 0.13$ ,  $2.60 \pm 0.13$  และ  $2.57 \pm 0.32$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยวัสดุคอมพอลิเมอร์เบนซอกลูซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้วมีการยืดตัวสูงกว่าวัสดุคอมพอลิเมอร์ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน เนื่องจากการเติมเส้นใยแก้วที่มีการยืดตัวที่สูงกว่า จึงช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นให้แก่ชิ้นงานวัสดุคอมพอลิเมอร์เบนซอกลูซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้วที่การจัดลำดับชั้นแบบต่างๆ ด้วย แต่อย่างไรก็ตาม การจัดลำดับชั้นแบบ GCG ที่นำเส้นใยแก้วที่มีการยืดตัวสูงเป็นเปลือกหุ้มประกบกับเส้นใยคาร์บอนที่มีความแข็งแรงสูงเป็นแกนกลาง จะมีการยืดตัวสูงสุดเมื่อเทียบกับการจัดลำดับชั้นแบบอื่นๆ

ค่าพลังงาน ฌ จุดขาดของวัสดุคอมพอลิเมอร์เบนซอกลูซีนเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วของชิ้นงาน G และเส้นใยคาร์บอนของชิ้นงาน C มีค่าเท่ากับ  $39.12 \pm 1.86$  และ  $11.95 \pm 0.66$  จูล จะเห็นว่าวัสดุคอมพอลิเมอร์ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วมีค่าพลังงาน ฌ จุดขาดสูงกว่าวัสดุคอมพอลิเมอร์ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน เนื่องจากเส้นใยแก้วสามารถดูดซับพลังงานจากการรับแรงได้สูงกว่าเส้นใยคาร์บอน [37, 38] และเมื่อพิจารณาการจัดลำดับชั้นของวัสดุคอมพอลิเมอร์เบนซอกลูซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้วในชิ้นงาน GC1, GC2, GC3, GCG และ CGC มีค่า

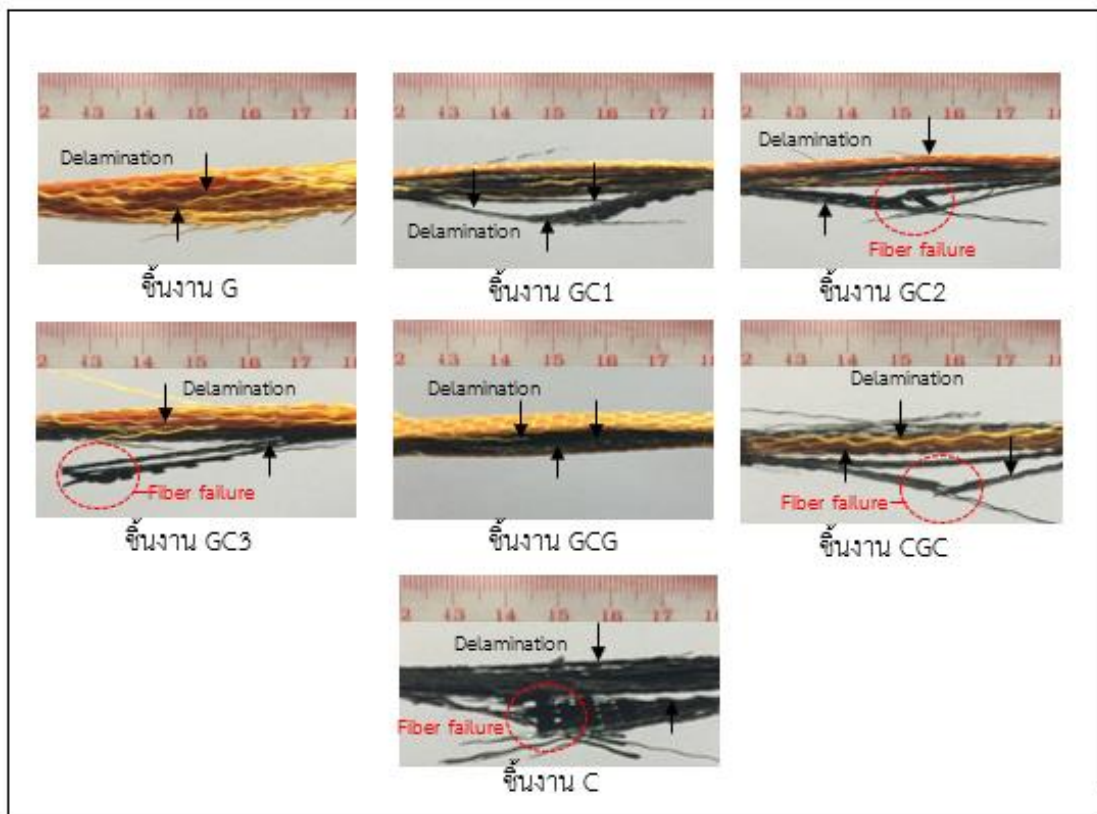
พลังงาน ณ จุดขาดเท่ากับ  $12.41 \pm 1.37$ ,  $11.79 \pm 1.11$ ,  $13.18 \pm 1.15$ ,  $15.86 \pm 0.62$  และ  $14.92 \pm 3.02$  จูล ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน โดยวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้วมีค่าพลังงาน ณ จุดขาดสูงกว่าวัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน เนื่องจากการเติมเส้นใยแก้วที่มีความสามารถในการดูดซับพลังงานที่สูงกว่า จึงช่วยเพิ่มความสามารถในดูดซับพลังงานให้แก่ชิ้นงานวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้วที่การจัดลำดับชั้นแบบต่างๆด้วย

นอกจากนี้ค่าความแข็งแรงภายใต้แรงดึงของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วของชิ้นงาน G และเส้นใยคาร์บอนของชิ้นงาน C มีค่าเท่ากับ  $328 \pm 5$  และ  $501 \pm 17$  เมกะปาสคาล ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาการจัดลำดับชั้นของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้วในชิ้นงาน GC1, GC2, GC3, GCG และ CGC โดยค่าความแข็งแรงภายใต้แรงดึงของวัสดุคอมพอสิตที่การจัดลำดับชั้นแบบต่างๆมีค่าเท่ากับ  $340 \pm 3$ ,  $345 \pm 8$ ,  $372 \pm 10$ ,  $401 \pm 3$  และ  $385 \pm 14$  เมกะปาสคาล ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ได้การจัดลำดับชั้นในกลุ่มของโครงสร้างแซนวิช (Sandwich structure) มีค่าสูงกว่าการจัดลำดับชั้นแบบสลับไปสลับมา โดยมีค่าสูงสุดในชิ้นงาน GCG เนื่องจากในการทดสอบความต้านแรงดึงเส้นใยแก้วที่ประกบเส้นใยคาร์บอนอยู่นั้นมีความสามารถในการยึดตัวที่สูงกว่าเส้นใยคาร์บอนที่อยู่ตรงแกนกลาง และเนื่องจากพอลิเบนซอกซาซีนมีความสามารถในการยึดเกาะประสานเส้นใยต่างๆเข้าด้วยกันได้ดี ทำให้ชิ้นงานสามารถทนแรงดึงได้มากก่อนที่จะเสียหายด้วยความเค้นสูงสุด [54] สอดคล้องกับผลการทดลองของ Murugan และคณะ [49] พบว่าวัสดุคอมพอสิตโครงสร้างแซนวิช (Sandwich structure) โดยมีการจัดลำดับชั้นของเส้นใยคาร์บอนเป็นแกนกลาง (Core) และเส้นใยแก้วเป็นเปลือกหุ้ม (Shell) ให้ค่าความแข็งแรงภายใต้แรงดึงสูงกว่าการจัดลำดับชั้นที่เส้นใยแก้วเป็นแกนกลางและเส้นใยคาร์บอนเป็นเปลือกหุ้ม และจากรูปที่ 4.1 แสดงความเสียหายจากการทดสอบความต้านทานแรงดึงของการจัดลำดับชั้นของวัสดุพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้ว ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองโดยความเสียหายของชิ้นงาน GCG จะเกิดความเสียหายจากการแยกระหว่างชั้นของลามิเนตในชั้นเส้นใยคาร์บอนที่เป็นแกนกลางเป็นหลัก ซึ่งในแต่ละความเสียหายของการจัดลำดับชั้นของชิ้นงานคอมพอสิตตรงตำแหน่งเส้นใยคาร์บอนเกิดการแตกหักก่อนเนื่องจากสมบัติที่เปราะกว่าเส้นใยแก้วเมื่อได้รับแรงดึงที่เท่ากัน

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงของการจัดลำดับชั้นของวัสดุพอลิเบนซอกลาซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้ว

ชั้นงาน	การจัดเรียงลำดับชั้น	ความแข็งแรงภายใต้แรงดึง (MPa)	มอดูลัสของยัง (Gpa)	เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%)	พลังงาน ณ จุดขาด (J)
G	G-G-G-G-G-G-G	328 ± 5	21.00 ± 0.18	4.44 ± 0.11	39.12 ± 1.86
GC1	G-C-G-C-G-C-G-C	340 ± 3	25.24 ± 0.96	2.39 ± 0.17	12.41 ± 1.37
GC2	G-G-C-C-G-G-C-C	345 ± 8	27.09 ± 0.34	2.37 ± 0.12	11.79 ± 1.11
GC3	G-G-G-G-C-C-C-C	372 ± 10	27.29 ± 0.99	2.43 ± 0.13	13.18 ± 1.15
GCG	G-G-C-C-C-C-G-G	401 ± 3	26.31 ± 1.02	2.60 ± 0.13	15.86 ± 0.62
CGC	C-C-G-G-G-G-C-C	385 ± 14	26.56 ± 1.19	2.57 ± 0.32	14.92 ± 3.02
C	C-C-C-C-C-C-C	501 ± 17	40.19 ± 1.47	2.27 ± 0.34	11.95 ± 0.66

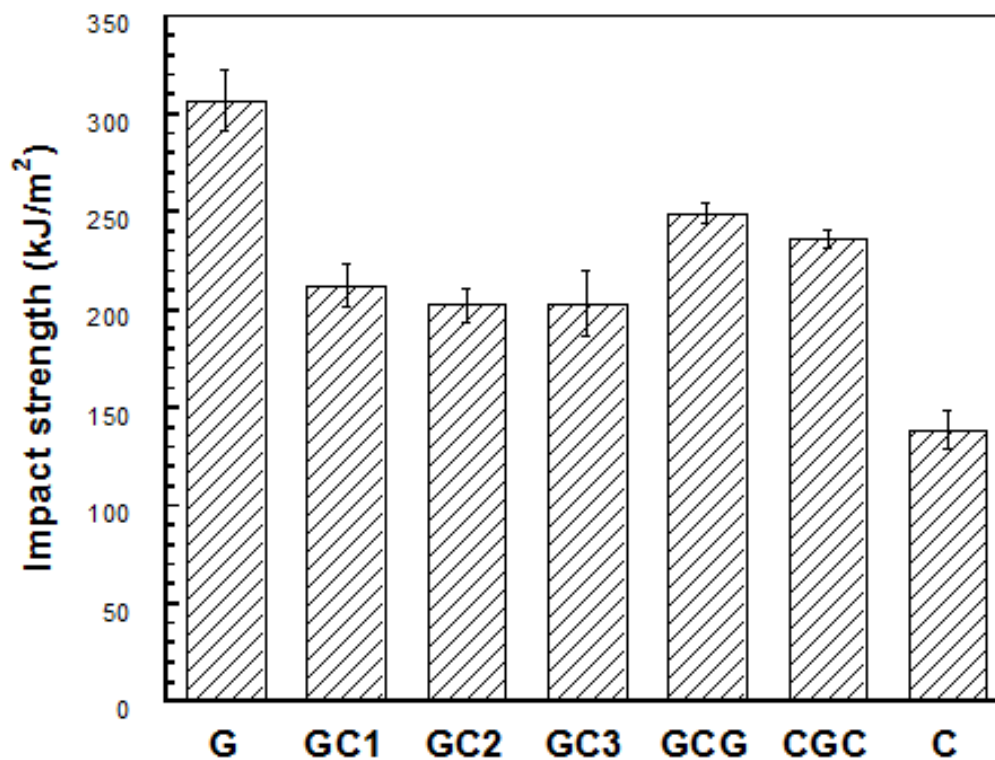
หมายเหตุ : สัญลักษณ์ G และ C คือ ชั้นของเส้นใยแก้ว และเส้นใยคาร์บอน ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 ความเสียหายจากการทดสอบความต้านทานแรงดึงของการจัดลำดับชั้นของวัสดุพอลิเบนซอกซาซินที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้ว



#### 4.3 ความต้านทานแรงกระแทก (Impact test) ของการจัดลำดับชั้นของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้ว



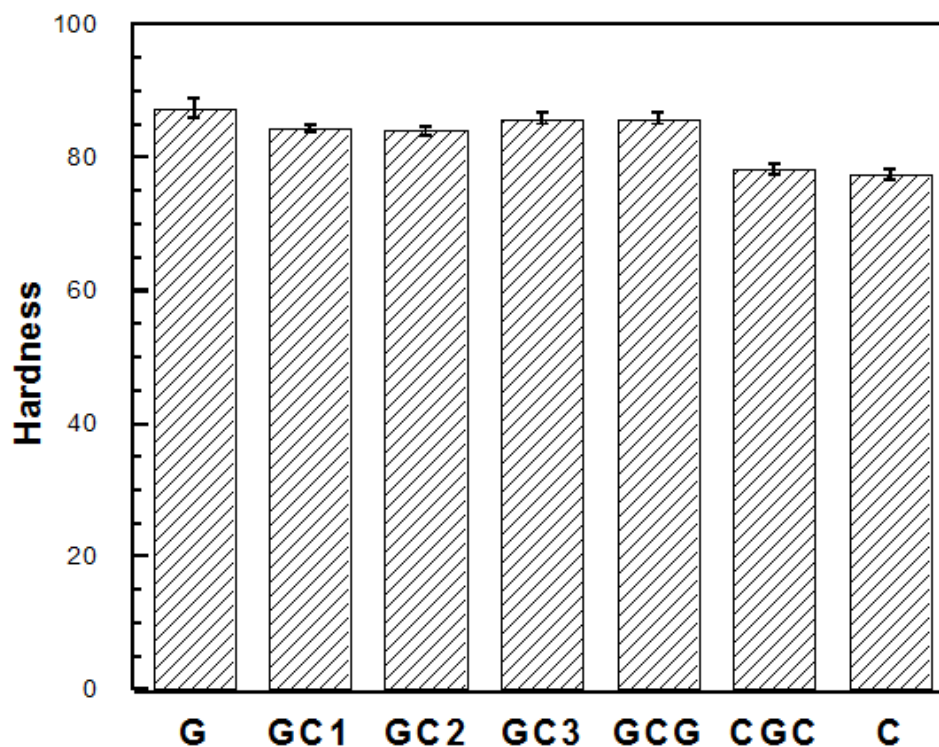
รูปที่ 4.2 ความแข็งแรงภายใต้แรงกระแทกของการจัดลำดับชั้นของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้ว

สมบัติความต้านทานภายใต้แรงกระแทกบ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานไว้ได้โดยไม่เกิดการแตกหักของวัสดุซึ่งบ่งบอกถึงความเหนียว (Toughness) ของวัสดุนั้นเอง จากรูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ค่าความแข็งแรงภายใต้แรงกระแทกของการจัดลำดับชั้นของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้วที่การจัดลำดับชั้นแบบต่างๆ พบว่าค่าความแข็งแรงภายใต้แรงกระแทก ของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วของชิ้นงาน G และเส้นใยคาร์บอนของชิ้นงาน C มีค่าเท่ากับ  $307 \pm 16$  และ  $139 \pm 10$  กิโลจูล/ตารางเมตร ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าวัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วมีสมบัติในการดูดซับพลังงานที่ดีกว่าวัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน และเมื่อพิจารณาการจัดลำดับชั้นของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้ว

ในชิ้นงาน GC1 GC2 GC3 GCG และ CGC มีค่าความแข็งแรงภายใต้แรงกระทำเท่ากับ  $212 \pm 11$ ,  $203 \pm 10$ ,  $203 \pm 17$ ,  $250 \pm 5$  และ  $236 \pm 5$  กิโลจูล/ตารางเมตร ตามลำดับ โดยค่าความแข็งแรงภายใต้แรงกระทำของการจัดลำดับของชิ้นงานมีแนวโน้มค่าเข้าใกล้วัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว โดยในการจัดลำดับชั้นของวัสดุคอมพอสิตชิ้นงาน GCG ให้ค่าความแข็งแรงภายใต้แรงกระทำสูงที่สุด เนื่องจากความเสียหายจากการได้รับแรงกระทำจะเริ่มต้นที่ชั้นผิวของชิ้นงานทั้งสองข้างจึงเป็นบริเวณที่เสียหายมากที่สุด [55] จึงทำให้ชิ้นงานที่มีการจัดเรียงแบบ GCG ที่มีเส้นใยแก้วมีสมบัติรับแรงกระทำได้สูงอยู่ตรงเปลือกประกบเส้นใยคาร์บอนตรงแกนกลางจึงทำให้มีค่าความแข็งแรงภายใต้แรงกระทำสูงที่สุด และชิ้นงาน CGC แม้ว่าเส้นใยคาร์บอนอยู่ตรงเปลือกแต่ตรงแกนกลางของชิ้นงานคือเส้นใยแก้วทั้งหมดจึงทำให้ค่าความแข็งแรงภายใต้แรงกระทำ ไม่ต่างจากชิ้นงาน GCG มากนัก ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Murugan และคณะ [49] พบว่าวัสดุคอมพอสิตโครงสร้างแซนวิช (Sandwich structure) โดยมีการจัดลำดับชั้นของเส้นใยคาร์บอนเป็นแกนกลาง (Core) และเส้นใยแก้วเป็นเปลือกหุ้ม (Shell) ให้ค่าความแข็งแรงภายใต้แรงกระทำ สูงกว่าการจัดลำดับชั้นที่เส้นใยแก้วเป็นแกนกลางและเส้นใยคาร์บอนเป็นเปลือกหุ้ม

นอกจากนี้สามารถประเมินค่าความเหนียวได้จากพื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียดที่ได้จากการทดสอบความต้านทานแรงดึงนั่นก็คือ ค่าพลังงาน ณ จุดขาด (Energy at break) ของการทดสอบความต้านทานแรงดึงในการทดลองที่ 4.2 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองพบว่าชิ้นงาน GCG มีค่าพลังงาน ณ จุดขาด สูงสุดในการจัดลำดับของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซินที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้ว

#### 4.4 ความแข็ง (Hardness Test) ของการจัดลำดับชั้นของวัสดุพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้ว



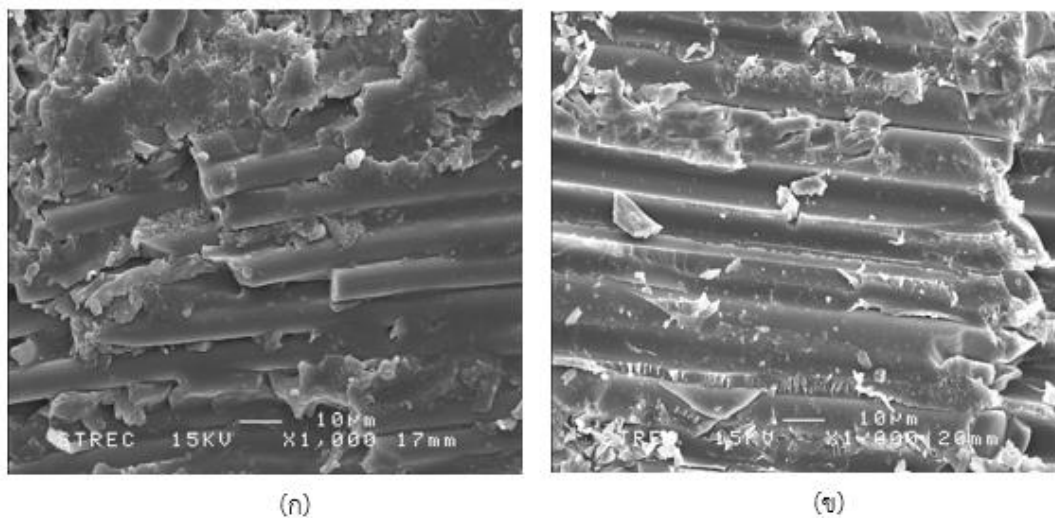
รูปที่ 4.3 ความแข็งที่ผิวของการจัดลำดับชั้นของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้ว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ความแข็งที่พื้นผิว (Hardness) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงการต้านทานต่อการขีดถูและการสึกหรอของวัสดุคอมพอสิต จากรูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ค่าความแข็งของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้วที่การจัดลำดับชั้นแบบต่างๆ พบว่าค่าความแข็งที่พื้นผิวของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วของชิ้นงาน G และเส้นใยคาร์บอนของชิ้นงาน C มีค่าเท่ากับ  $87 \pm 2$  และ  $77 \pm 1$  ตามลำดับ พบว่าวัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วมีความแข็งผิวสูงกว่าวัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน และเมื่อพิจารณาการจัดลำดับชั้นของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้วในชิ้นงาน GC1 GC2 GC3 GCG และ CGC (ทำการทดสอบด้านเส้นใยแก้วเป็นหลัก) มีค่าความแข็งที่ผิวเท่ากับ  $84 \pm 1$ ,  $84 \pm 1$ ,  $86 \pm 1$ ,  $86 \pm 1$  และ  $78 \pm 1$  ตามลำดับ จากผลการทดสอบ

ความแข็งแรงของวัสดุคอมพอลิโทลิตเบนชอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้ว นั้น หากทดสอบทางด้านเส้นใยแก้วจะได้ค่าความแข็งแรงที่สูงกว่า เนื่องจากเส้นใยแก้วมีความแข็งแรง สูงกว่านั่นเอง

#### 4.5 ลักษณะพื้นฐานของวัสดุคอมพอลิโทลิตเบนชอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนและ เส้นใยแก้ว



รูปที่ 4.4 ลักษณะพื้นฐานของวัสดุคอมพอลิโทลิตเบนชอกซาซีนที่เสริมแรงด้วย (ก) เส้นใยคาร์บอน (ข) เส้นใยแก้ว ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

การศึกษาพื้นฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านเพื่อตรวจสอบการยึดติดกันระหว่างเมตริกและเส้นใยเสริมแรงในวัสดุคอมพอลิโทลิต โดยให้ข้อมูลเกี่ยวกับเฟสและลักษณะ ความเสียหายของวัสดุบ่งบอกถึงในการตัดสินใจเลือกใช้เมตริกและวัสดุเสริมแรงในวัสดุคอมพอลิโทลิต [56]

จากรูปที่ 4.4ก และ 4.4ข แสดงลักษณะพื้นผิวรอยแตกจากการรับแรงกระทำของวัสดุคอมพอลิโทลิตเบนชอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยแก้วตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าพอลิเบนชอกซาซีนเรซินมีความสามารถในการอาบเส้นใยทั่วถึงและยึดติดได้ดีกับเส้นใยแก้วและเส้นใยคาร์บอน ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดความหนาแน่นของวัสดุในหัวข้อการทดลอง 4.1 จากการคำนวณอัตราส่วนช่องว่างภายในชิ้นงานจากความหนาแน่นในการทดลองและความหนาแน่นตามทฤษฎี

#### 4.6 การประเมินการต้านทานการเจาะทะลุและรอยยุบตัวจากการรับแรงปะทะแบบซีปนะของวัสดุคอมพอลิท์โดยใช้เบนซอกซาซีนเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยต่ออาวุธปืนตามมาตรฐาน NIJ-0101.06

ในการทดสอบรับแรงปะทะจากอาวุธปืนในภัยคุกคามระดับ 3 ซึ่งเป็นระดับในการป้องกันประเภทอาวุธสงครามที่มีความเร็วทะลุทะลวงสูงเหมาะสำหรับทดสอบเสื้อเกราะแข็ง ศึกษาผลของจำนวนชั้นและการจัดลำดับชั้นในแผ่นปะทะวัสดุคือพอลิเบนซอกซาซีนเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้วชนิด S ในส่วนของแผ่นดูดซับพลังงานวัสดุคือพอลิเบนซอกซาซีนอัลลอยด์เมตริกเรซินระหว่างเบนซอกซาซีนกับยูรีเทนในอัตราส่วน 80:20 โดยน้ำหนัก ตามลำดับเสริมแรงด้วยเส้นใยเคพลาร์จำนวน 25 ชั้นทุกๆการทดสอบ เพื่อให้เกราะกันกระสุนนี้สามารถป้องกันกระสุนขนาด  $7.62 \times 51$  มม. ที่ความเร็ว  $847 \pm 9$  เมตร/วินาที และมีรอยยุบตัวไม่เกิน 44 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน NIJ-0101.06

##### 4.6.1 ผลของจำนวนชั้นของเส้นใยแก้วชนิด S และเส้นใยคาร์บอนที่ใช้ร่วมกันในแผ่นปะทะของวัสดุคอมพอลิท์พอลิเบนซอกซาซีนเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดต่างๆสำหรับประยุกต์ใช้เป็นเกราะกันกระสุน

จากตารางที่ 4.4 ชั้นงานที่ 1-3 เป็นการศึกษาผลของการลดจำนวนชั้นเส้นใยแก้วในชั้นงานคอมพอลิท์ในส่วนของแผ่นปะทะ พบว่าเมื่อลดจำนวนชั้นของเส้นใยแก้วจาก 45, 40 และ 35 ชั้น โดยมีความหนาแน่นเชิงพื้นที่ลดลงเป็น 4.85, 4.49 และ 4.01 กรัม/ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ และทำการทดสอบรับแรงปะทะจากกระสุนปืนขนาด  $7.62 \times 51$  มม. ที่ความเร็ว  $847 \pm 9$  เมตร/วินาที ผลปรากฏว่าชั้นงานคอมพอลิท์พอลิเบนซอกซาซีนเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วจำนวน 45 ชั้นในส่วนของแผ่นปะทะ สามารถต้านการเจาะทะลุของกระสุนปืนขนาด  $7.62 \times 51$  มม. ที่ความเร็ว 846 เมตร/วินาที และมีคาร์อยยุบตัว 28 มิลลิเมตร ซึ่งอยู่ในช่วงค่ามาตรฐาน แต่อย่างไรก็ตาม ค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่มีค่าสูงกว่าค่าที่กองทัพไทยกำหนดไว้คือ เกราะแข็งกันกระสุนต้องมีค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่ไม่เกิน 4.2 กรัม/ตารางเซนติเมตร

จากตารางที่ 4.4 ชั้นงานที่ 9-10 เป็นการศึกษาผลของการลดจำนวนชั้นเส้นใยคาร์บอนในชั้นงานคอมพอลิท์ในส่วนของแผ่นปะทะ พบว่าเมื่อลดจำนวนชั้นของเส้นใยแก้วจาก 60 และ 90 ชั้น โดยมีความหนาแน่นเชิงพื้นที่ลดลงเป็น 3.29 และ 4.18 กรัม/ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ และทำ

การทดสอบรับแรงปะทะจากกระสุนปืนขนาด 7.62 x 51 มม. ที่ความเร็ว 847 ± 9 เมตร/วินาที ผลปรากฏว่าชิ้นงานคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนจำนวน 90 ชั้นในส่วนของแผ่นปะทะ สามารถต้านการเจาะทะลุของกระสุนปืนขนาด 7.62 x 51 มม. ที่ความเร็ว 847 เมตร/วินาที และมีค่ารอยยุบตัว 10 มิลลิเมตร ซึ่งอยู่ในช่วงค่ามาตรฐาน อย่างไรก็ตาม การใช้วัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนในส่วนของแผ่นปะทะต้องใช้ถึง 90 ชั้นถึงสามารถป้องกันภัยคุกคามดังกล่าวได้ ทำให้สิ้นเปลืองค่าวัสดุเนื่องจากเส้นใยคาร์บอนมีราคาแพง

จากผลการทดสอบรับแรงปะทะจากกระสุนปืนข้างต้นแสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานคอมพอสิตสำหรับประยุกต์ใช้เป็นเกราะแข็งกันกระสุนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วในส่วนของแผ่นปะทะมีประสิทธิภาพป้องกันกระสุนที่จำนวนชั้นน้อยกว่า แต่ประสิทธิภาพในการทำลายหัวกระสุนต่ำกว่า ชิ้นงานคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนสังเกตได้จากรอยยุบตัวของชิ้นงาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงพัฒนาเกราะแข็งกันกระสุนโดยการใช้เส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้วในส่วนของแผ่นปะทะเพื่อช่วยลดน้ำหนักและเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันมากขึ้น

ในการทดลองหาจำนวนชั้นที่เหมาะสมของเส้นใยแก้วและเส้นใยคาร์บอนในส่วนของแผ่นปะทะของวัสดุคอมพอสิตสำหรับประยุกต์ใช้เป็นเกราะกันกระสุน จากตารางที่ 4.4 พบว่าชิ้นงานที่ 4 วัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วจำนวน 30 ชั้น ร่วมกับเส้นใยคาร์บอนจำนวน 30 ชั้น ในส่วนของแผ่นปะทะ สามารถต้านการเจาะทะลุของกระสุนปืนขนาด 7.62 x 51 มม. ที่ความเร็ว 844 เมตร/วินาที และรอยยุบตัวมีขนาด 30 มิลลิเมตร และเมื่อทำการลดจำนวนชั้นของเส้นใยคาร์บอนจาก 30 ชั้น เป็น 25 ชั้น ในชิ้นงานที่ 5 วัสดุดังกล่าวสามารถต้านการเจาะทะลุของกระสุนปืนขนาด 7.62 x 51 มม. ที่ความเร็ว 844 เมตร/วินาที และรอยยุบตัวมีขนาด 35 มิลลิเมตร และเมื่อทำการลดจำนวนชั้นเส้นใยแก้วลงจาก 30 ชั้น เป็น 25 ชั้น ร่วมกับเส้นใยคาร์บอนจำนวน 30 ชั้นในส่วนของแผ่นปะทะดังชิ้นงานที่ 6 ผลที่ได้วัสดุคอมพอสิตดังกล่าวไม่สามารถต้านทานกระสุนปืนขนาด 7.62 x 51 มม. ที่ความเร็ว 846 เมตร/วินาที และจากชิ้นงานที่ 7 และ 8 โดยใช้เส้นใยแก้วจำนวน 25 ชั้น และเพิ่มจำนวนชั้นเส้นใยคาร์บอนเป็น 45 และ 55 ชั้น ตามลำดับ ในส่วนของแผ่นปะทะโดยมีความหนาแน่นเชิงพื้นที่ 4.40 และ 4.68 กรัม/ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ผลที่ได้วัสดุทั้งสองสามารถต้านการเจาะทะลุของกระสุนปืนขนาด 7.62 x 51 มม. ที่ความเร็ว 847 เมตร/วินาที และรอยยุบตัวมีขนาด 28 และ 25 มิลลิเมตร ตามลำดับ

จากผลการทดสอบดังกล่าว จำนวนชั้นที่เหมาะสมสำหรับด้านทานการรับแรงปะทะจากอาวุธปืน ที่ระดับภัยคุกคามระดับ 3 คือวัสดุคอมพอลิโทลิกเบนชอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว จำนวน 30 ชั้น ร่วมกับเส้นใยคาร์บอนจำนวน 30 ชั้น และ 25 ชั้น เนื่องจากสามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนปืนขนาด 7.62 x 51 มม. ที่ความเร็ว 847 ± 9 เมตร/วินาที ได้และมีความหนาแน่นเชิงพื้นที่ไม่เกินตามที่กองทัพไทยกำหนดคือ 4.2 กรัม/ตารางเซนติเมตร แต่วัสดุคอมพอลิโทลิกเบนชอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วจำนวน 30 ชั้น ร่วมกับเส้นใยคาร์บอนจำนวน 25 ชั้น มีลักษณะความเสียหายและรอยยุบตัวมีค่ามากกว่าวัสดุคอมพอลิโทลิกเบนชอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วจำนวน 30 ชั้น ร่วมกับเส้นใยคาร์บอนจำนวน 30 ชั้น ซึ่งค่ารอยยุบตัวที่ได้มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคือ ค่ารอยยุบตัวไม่เกิน 44 มิลลิเมตร โดยลักษณะความเสียหายของชิ้นงานที่ 4 และ 5 แสดงดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ

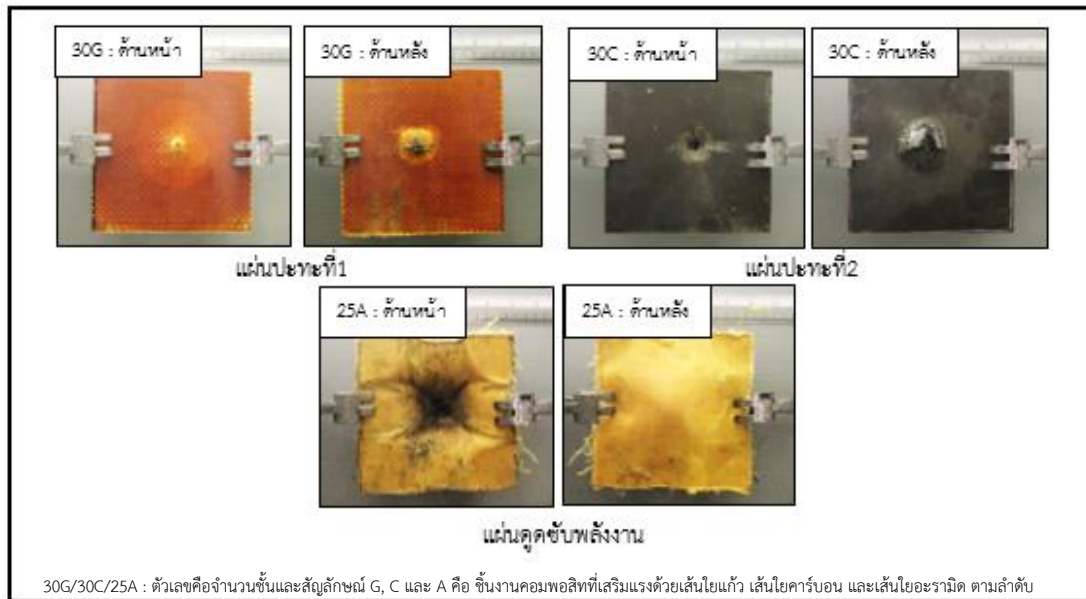
จากผลดังกล่าวสรุปได้ว่าจำนวนชั้นที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้จัดลำดับชั้นของแผ่นปะทะสำหรับประยุกต์ใช้ผลิตเป็นเกราะกันกระสุนถัดไปคือ วัสดุคอมพอลิโทลิกเบนชอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วจำนวน 30 ชั้น ร่วมกับเส้นใยคาร์บอนจำนวน 30 ชั้น และในส่วนแผ่นดูดซับพลังงานวัสดุคือ วัสดุคอมพอลิโทลิกเบนชอกซาซีนอัลลอยด์ (PBA/PU:80/20) เสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิดจำนวน 25 ชั้น โดยวัสดุมีความหนา 30.58 มิลลิเมตร และความหนาแน่นเชิงพื้นที่ 4.18 กรัม/ตารางเซนติเมตร

ตารางที่ 4.3 จำนวนชั้นของเส้นใยแก้วและเส้นใยคาร์บอนที่ใช้ร่วมกันในแผ่นปะทะของวัสดุคอมพอลิโทลิตเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดต่างๆสำหรับประยุกต์ใช้เป็นเกราะกันกระสุน

ชั้นงาน	แผ่นปะทะ		ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ (กรัม/ตารางเซนติเมตร)	ความหนา (มิลลิเมตร)	ความเร็วกระสุน (เมตร/วินาที) 838-856 m/s	ผลการทดสอบ	รอยยุบตัว (มิลลิเมตร)
	แผ่นที่ 1	แผ่นที่ 2					
1	45 G	-	4.85	29.76	846	ไม่ทะลุ	28
2	40 G	-	4.49	26.38	848	ทะลุ	-
3	35 G	-	4.01	25.61	844	ทะลุ	-
4	30 G	30 C	4.18	30.58	844	ไม่ทะลุ	30
5	30 G	25 C	4.09	30.16	844	ไม่ทะลุ	35
6	25 G	30 C	3.91	28.08	846	ทะลุ	-
7	25 G	45 C	4.40	27.75	847	ไม่ทะลุ	28
8	25 G	55 C	4.68	30.20	847	ไม่ทะลุ	25
9	60C	-	3.29	25.43	840	ทะลุ	-
10	90C	-	4.18	30.94	847	ไม่ทะลุ	10

หมายเหตุ : ตัวเลขในแผ่นปะทะและแผ่นดูดซับพลังงานคือ จำนวนชั้นที่ศึกษา และสัญลักษณ์ G, C และ A คือ ชั้นงานคอมพอลิโทลิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน และเส้นใยอะรามิดตามลำดับ





รูปที่ 4.5 ความเสียหายของวัสดุคอมพอลิท์สำหรับประยุกต์ใช้เป็นเกราะกันกระสุน ทดสอบโดยกระสุนปืนขนาด 7.62 มม. ที่ความเร็ว 844 เมตร/วินาที



รูปที่ 4.6 ความเสียหายของวัสดุคอมพอลิท์สำหรับประยุกต์ใช้เป็นเกราะกันกระสุน ทดสอบโดยกระสุนปืนขนาด 7.62 มม. ที่ความเร็ว 844 เมตร/วินาที

#### 4.6.2 ผลของด้านวัสดุที่เหมาะสมในการรับแรงปะทะของวัสดุคอมพอสิตสำหรับประยุกต์ใช้ผลิตเป็นเกราะกันกระสุน

จากรูปที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบผลของด้านที่เหมาะสมของวัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วกับด้านวัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนในการรับแรงปะทะของกระสุนปืนชนิด 7.62x51 มม. ที่จำนวนชั้นเส้นใยเท่ากันโดยแผ่นปะทะวัสดุคอมพอสิตประกอบด้วยเส้นใยแก้วจำนวน 30 ชั้น ร่วมกับเส้นใยคาร์บอนจำนวน 30 ชั้น และในส่วนแผ่นดูดซับพลังงานวัสดุคือพอลิเบนซอกซาซินอัลลอยด์ (PBA/PU:80/20) เสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิดจำนวน 25 ชั้น โดยมีความหนาแน่นเชิงพื้นที่ 4.18 กรัม/ตารางเซนติเมตร จากผลการทดสอบด้านรับแรงปะทะของวัสดุคอมพอสิตที่ใช้พอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วเป็นแผ่นรับแรงปะทะแผ่นแรก สามารถต้านการเจาะทะลุของกระสุนปืนขนาด 7.62 x 51 มม. ที่ความเร็ว 844 เมตร/วินาที และรอยยุบตัวมีขนาด 30 มิลลิเมตร ลักษณะความเสียหายของชิ้นงานคอมพอสิตแสดงดังรูปที่ 4.10ก ในขณะที่ด้านรับแรงปะทะของวัสดุคอมพอสิตที่ใช้พอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนเป็นแผ่นรับแรงปะทะแผ่นแรก ไม่สามารถต้านทานกระสุนปืนขนาด 7.62 x 51 มม. ที่ความเร็ว 383 เมตร/วินาที ลักษณะความเสียหายของชิ้นงานคอมพอสิตแสดงดังรูปที่ 4.10ข

จากผลการทดลองแสดงว่าวัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงเส้นใยแก้วมีความสามารถในการรับแรงปะทะจากกระสุนได้ดีกว่าวัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงเส้นใยคาร์บอนเนื่องจากวัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงเส้นใยคาร์บอนทนแรงกระแทกได้ต่ำกว่าวัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงเส้นใยแก้ว [57] ทำให้ประสิทธิภาพของแผ่นปะทะลดลงเมื่อเทียบกับนำด้านวัสดุที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วรับแรงปะทะ สอดคล้องกับผลการทดลองเชิงกลการทดสอบแรงกระแทกในหัวข้อ 4.4 และสมบัติความแข็งที่ผิวในหัวข้อ 4.5 แสดงให้เห็นสมบัติเด่นในการรับแรงกระแทกและด้านการสึกหรอของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซินที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว

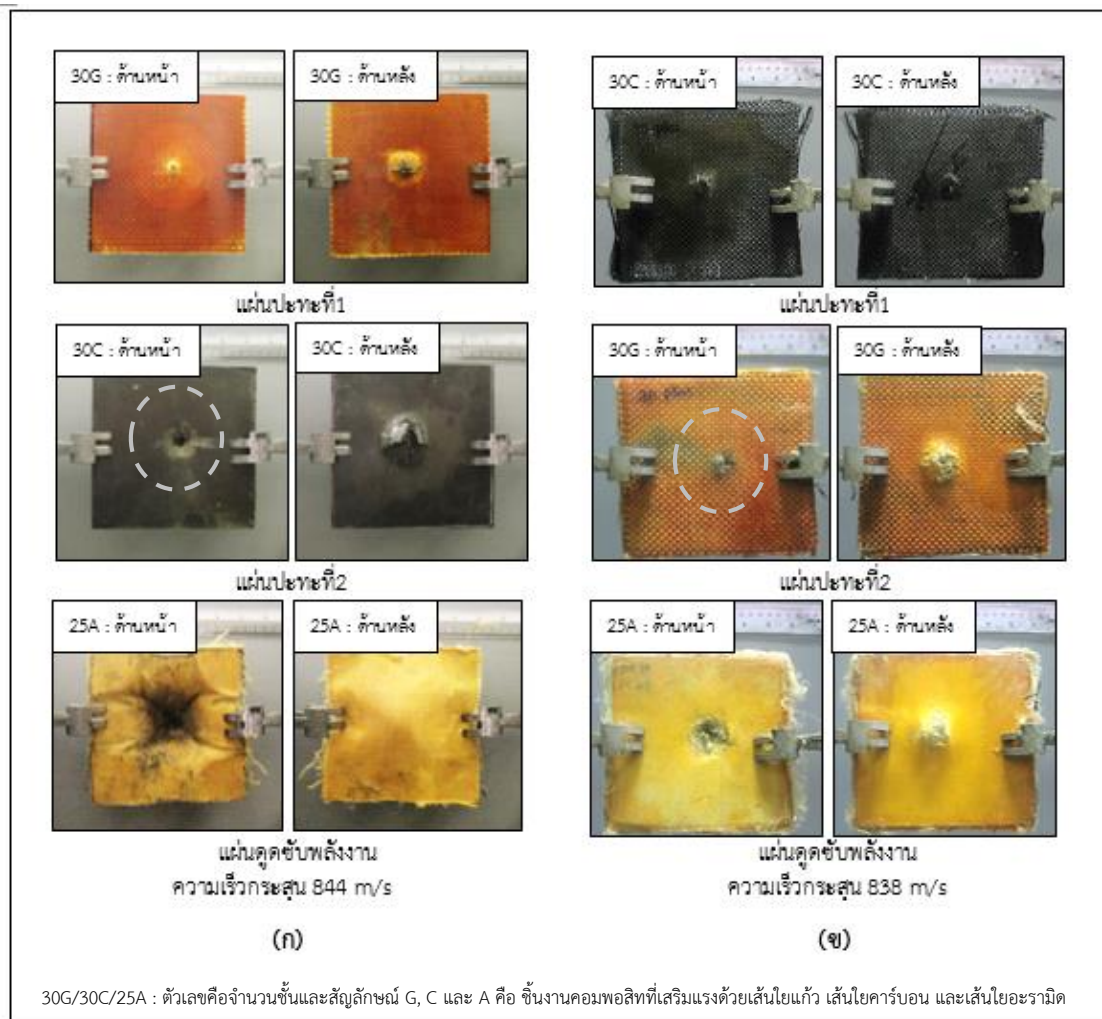
และเมื่อเปรียบเทียบลักษณะความเสียหายด้านหน้าของชิ้นงานคอมพอสิตในตำแหน่งแผ่นปะทะที่ 2 พบว่าในรูปที่ 4.7ก ลักษณะความเสียหายของชิ้นงานเป็นวงกว้างแตกต่างไปจากด้านหน้าของแผ่นปะทะที่ 1 แสดงให้เห็นถึงลักษณะหัวกระสุนเปลี่ยนรูปร่างถูกทำลายเมื่อผ่านแผ่นปะทะจากวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซินที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว และเมื่อเปรียบเทียบในรูปที่ 4.7ข ลักษณะความเสียหายของด้านหน้าในแผ่นปะทะที่ 2 มีลักษณะความเสียหายเหมือนกับด้านหน้าใน

แผ่นปะทะที่ 1 แสดงให้เห็นว่ากระสุนไม่ได้เปลี่ยนแปลงรูปร่างและไม่ได้ถูกทำลายเมื่อผ่านแผ่นปะทะ จากวัสดุคอมพอลิโทลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน

ผลที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลอง Pandya และคณะ (2013) [8] ศึกษาการดูดซับพลังงานและความเร็วสูงสุดที่ชิ้นงานสามารถต้านทานการเจาะทะลุได้ ( $V_{50}$ ) ของการจัดลำดับชั้นของวัสดุคอมพอลิโทอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิด E ร่วมกับเส้นใยคาร์บอน ต่อการรับแรงปะทะจากลูกเหล็ก (AISI 4340) พบว่าในการจัดลำดับชั้นของชิ้นงานพบว่าชิ้นงานที่มีด้านเส้นใยแก้วรับแรงปะทะสามารถดูดซับพลังงานและสามารถป้องกันการเจาะทะลุที่ความเร็วสูงกว่าชิ้นงานที่ด้านเส้นใยคาร์บอนเป็นด้านรับแรงปะทะ

จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าด้านวัสดุในการรับแรงปะทะกระสุนปืนมีความสำคัญในลดความเร็วของลูกกระสุนปืนและการทำลายหัวกระสุน ดังนั้นด้านวัสดุที่เหมาะสมต่อการรับแรงปะทะแรกจากกระสุนปืนสำหรับนำไปทดสอบการจัดลำดับชั้นของแผ่นปะทะถัดไปคือ ด้านวัสดุคอมพอลิโทลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว





รูปที่ 4.7 ความเสียหายของวัสดุคอมพอสิตสำหรับประยุกต์ใช้เป็นเกราะกันกระสุน โดย (ก)ด้านปะทะกระสุนคือ วัสดุคอมพอสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว และ (ข)ด้านปะทะกระสุนคือ วัสดุคอมพอสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน

#### 4.6.3 ผลของจำนวนแผ่นของแผ่นปะทะจากวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิด S ร่วมกับเส้นใยคาร์บอน

ตารางที่ 4.4 จำนวนแผ่นของแผ่นปะทะจากวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิด S ร่วมกับเส้นใยคาร์บอน

กลุ่มชิ้นงาน	แผ่นปะทะ (30G , 30C)		แผ่นดัด พับ พลังงาน	ความเร็วกระสุน (เมตร/วินาที) 838-856 m/s	ผลการ ทดสอบ	รอยยุบตัว (มิลลิเมตร)
	แผ่นที่1	แผ่นที่2				
1	30G	30C	25 A	844	ไม่ทะลุ	30
	30G/30C	-	25 A	838	ทะลุ	-
2	1G/1C (15G,15C)	1G/1C (15G,15C)	25 A	840	ไม่ทะลุ	20
	1G/1C (30G,30C)	-	25 A	838	ทะลุ	-
3	8G/15C/7G (15G,15C)	8G/15C/7G (15G,15C)	25 A	847	ไม่ทะลุ	19
	15G/30C/15G (30G,30C)	-	25 A	838	ไม่ทะลุ	27
4	8C/15G/7C (15G,15C)	8C/15G/7C (15G,15C)	25 A	840	ไม่ทะลุ	20
	15C/30G/15C (30G,30C)	-	25 A	840	ทะลุ	-

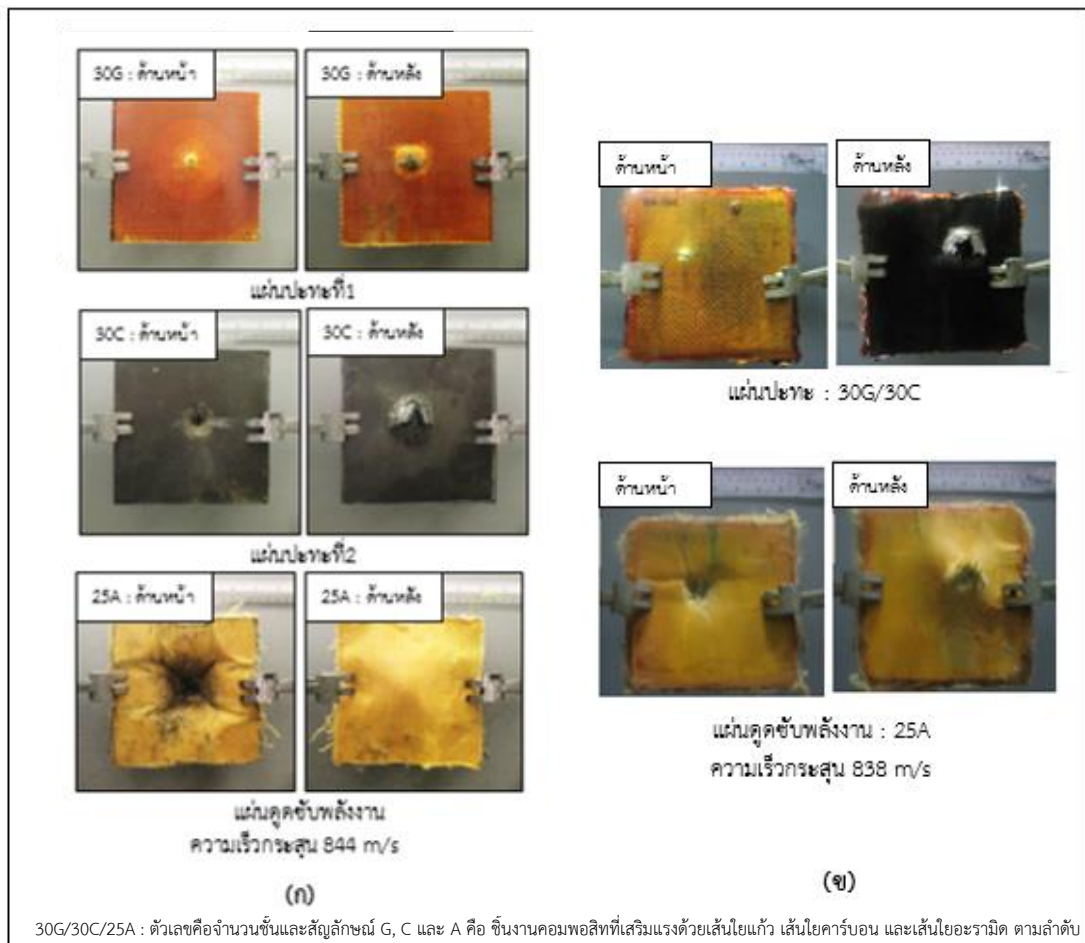
จากตารางที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการต้านทานกระสุน โดยทำการศึกษาจำนวนของแผ่นปะทะจำนวน 1 แผ่น และ 2 แผ่นของวัสดุคอมพอสิตสำหรับประยุกต์ใช้เป็นเกราะกันกระสุน โดยแผ่นปะทะวัสดุคือ พอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิด S จำนวน 30 ชั้น ร่วมกับเส้นใยคาร์บอน จำนวน 30 ชั้น และแผ่นดูดซับพลังงานวัสดุคือ พอลิเบนซอกซาซินอัลลอยด์ (PBA/PU:80/20) เสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิตจำนวน 25 ชั้น จากผลการทดลองพบว่าในทุกกลุ่มชิ้นงาน ชิ้นงานที่ประกอบด้วยแผ่นปะทะจำนวน 2 แผ่น มีประสิทธิภาพมากกว่าในการต้านการเจาะทะลุของกระสุนปืนขนาด 7.62 x 51 มม. ที่ความเร็ว 847 ± 9 เมตร/วินาที ตามมาตรฐาน NIJ-0101.06 ที่ระดับภัยคุกคามระดับ 3 และมีรอยยุบตัวไม่เกิน 44 มิลลิเมตร ตามค่ามาตรฐาน

ตัวอย่างเช่น ในกลุ่มชิ้นงานที่ 1 ชิ้นงานที่ประกอบด้วยแผ่นปะทะจำนวน 2 แผ่น โดยแผ่นปะทะที่ 1 วัสดุคือ พอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิด S จำนวน 30 ชั้น และแผ่นปะทะที่ 2 วัสดุคือ พอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนจำนวน 30 ชั้น สามารถต้านการเจาะทะลุของกระสุนปืนขนาด 7.62 x 51 มม. ที่ความเร็ว 844 เมตร/วินาที และรอยยุบตัวมีขนาด 30 มิลลิเมตร แต่ชิ้นงานในกลุ่มเดียวกันที่ประกอบด้วยแผ่นปะทะจำนวน 1 แผ่น วัสดุคือ พอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิด S (ด้านรับแรงปะทะ)จำนวน 30 ชั้น ร่วมกับเส้นใยคาร์บอนจำนวน 30 ชั้น ไม่สามารถต้านการเจาะทะลุของกระสุนปืนขนาด 7.62 x 51 มม. ที่ความเร็ว 838 เมตร/วินาที โดยลักษณะความเสียหายของชิ้นงานในกลุ่มที่ 1 แสดงดังรูปที่ 4.8 และกลุ่มชิ้นงานที่ 3 ชิ้นงานที่ประกอบด้วยแผ่นปะทะจำนวน 2 แผ่น โดยแผ่นปะทะที่ 1 วัสดุคือ พอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิด S จำนวน 15 ชั้น ร่วมกับเส้นใยคาร์บอนจำนวน 15 ชั้น มีการจัดลำดับชั้นแบบ 8G/15C/7G (เส้นใยแก้ว 8 ชั้น/เส้นใยคาร์บอน 15 ชั้น/เส้นใยแก้ว 7 ชั้น) และแผ่นปะทะที่ 2 วัสดุมีจำนวนชั้นและลักษณะการจัดลำดับชั้นเช่นเดียวกับแผ่นปะทะที่ 1 สามารถต้านการเจาะทะลุของกระสุนปืนขนาด 7.62 x 51 มม. ที่ความเร็ว 847 เมตร/วินาที และรอยยุบตัวมีขนาด 19 มิลลิเมตร ส่วนชิ้นงานในกลุ่มเดียวกันที่มีจำนวนแผ่นปะทะ 1 แผ่น วัสดุคือ พอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิด S จำนวน 30 ชั้นร่วมกับเส้นใยคาร์บอนจำนวน 30 ชั้น มีการจัดลำดับชั้นแบบ 15G/30C/15G (เส้นใยแก้ว 15 ชั้น/เส้นใยคาร์บอน 30 ชั้น/เส้นใยแก้ว 15 ชั้น) สามารถต้านการเจาะทะลุของกระสุนปืนขนาด 7.62 x 51 มม. ที่ความเร็ว 837 เมตร/วินาที และรอยยุบตัวมีขนาด 27 มิลลิเมตร แต่ชิ้นงานมีรอยยุบตัวมากกว่าทั้งที่ได้รับแรงปะทะจากกระสุนปืนน้อยกว่าเมื่อ

เทียบกับชิ้นงานที่มีแผ่นปะทะจำนวน 2 แผ่น โดยลักษณะความเสียหายของชิ้นงานในกลุ่มที่ 3 แสดงดังรูปที่ 4.9

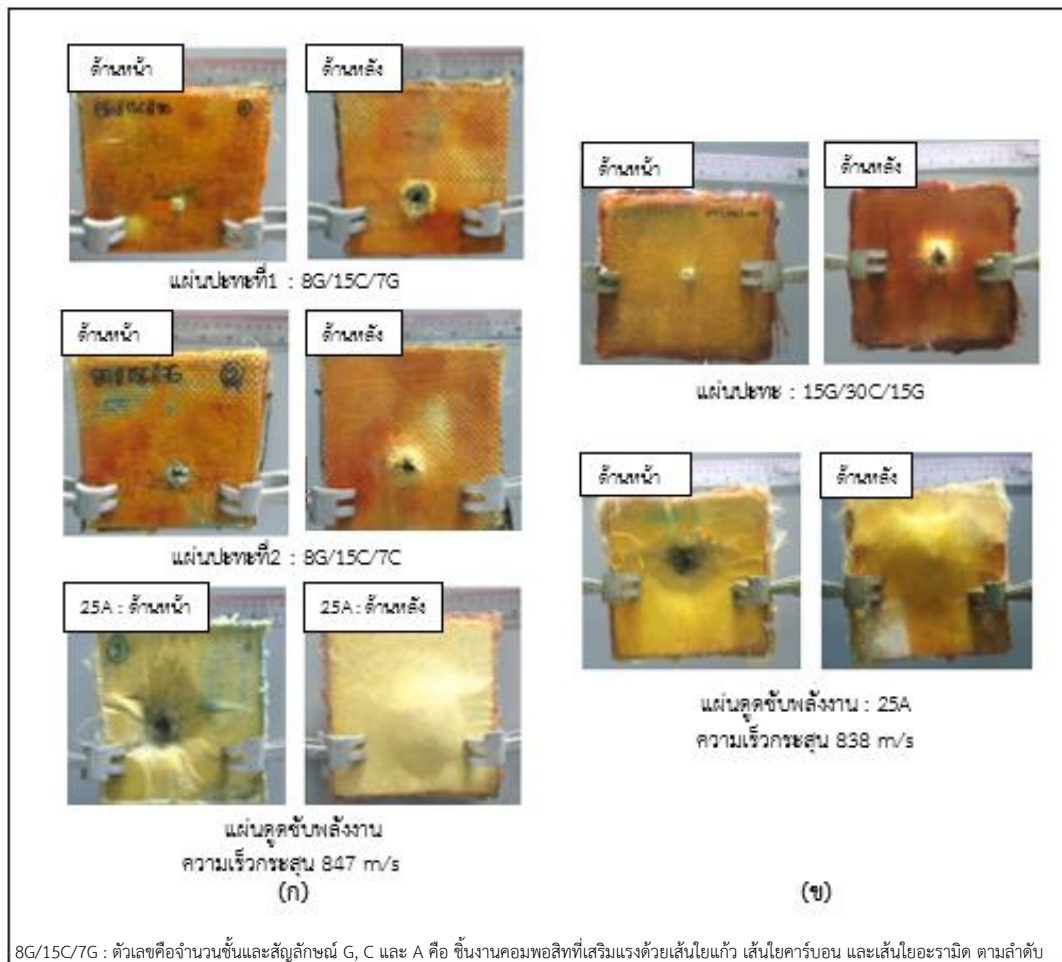
จากผลดังกล่าวสรุปได้ว่าแผ่นปะทะจำนวน 2 แผ่น มีประสิทธิภาพมากกว่าในการทำลายหัวกระสุนปืนและลดความเร็วของกระสุนเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นปะทะจำนวน 1 แผ่น เนื่องจากการแบ่งวัสดุออกเป็น 2 แผ่นจะเกิดช่องว่างของอากาศ (Air gap) เมื่อนำมาประกอบเป็นเกราะกันกระสุน ซึ่งการมีช่องว่างของอากาศดังกล่าวช่วยลดแรงปะทะของกระสุนปืนก่อนเจาะทะลุในแผ่นถัดไป [58] สอดคล้องกับผลการทดลองของ Dey และคณะ [59] ทำการทดลองศึกษาความแข็งแรงของโครงสร้างวัสดุเหล็ก (Weldox 700 E steel) ต่อวัสดุความเร็วสูง ที่ความหนาเท่ากันคือ 12 มิลลิเมตร โดยเปรียบเทียบโครงสร้าง 3 แบบ คือ แผ่นเหล็ก 1 แผ่นที่มีความหนา 12 มิลลิเมตร, แผ่นเหล็กที่มีความหนา 6 มิลลิเมตรจำนวน 2 แผ่นประกบกัน และแผ่นเหล็กที่มีความหนา 6 มิลลิเมตรจำนวน 2 แผ่นโดยวางห่างกันมีช่องอากาศ (Air gap) 24 มิลลิเมตร พบว่าวัสดุทั้ง 3 แบบสามารถต้านทานการเจาะทะลุได้ด้วยความเร็วสูงสุดคือ 174, 243 และ 252 เมตร/วินาที ตามลำดับ และสอดคล้องกับผลการทดลองของ Kasemsiri (2011) [26] ทำการศึกษาความเสียหายของเกราะกันสุนจากวัสดุคอมโพสิตพอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยแก้วชนิด E ที่มีจำนวนแผ่นปะทะจำนวน 1 แผ่น และ 2 แผ่น พบว่าแผ่นปะทะที่มีจำนวน 2 แผ่นมีความสามารถในการทำลายหัวกระสุนและแสดงความเสียหายของการดูดซับพลังงานมากกว่าแผ่นปะทะที่มีจำนวน 1 แผ่น

ดังนั้นในเกราะกันกระสุนจึงเลือกใช้แผ่นปะทะจำนวน 2 แผ่นร่วมกับแผ่นดูดซับพลังงานจำนวน 1 แผ่นสำหรับนำไปทดสอบการจัดลำดับชั้นของแผ่นปะทะถัดไป



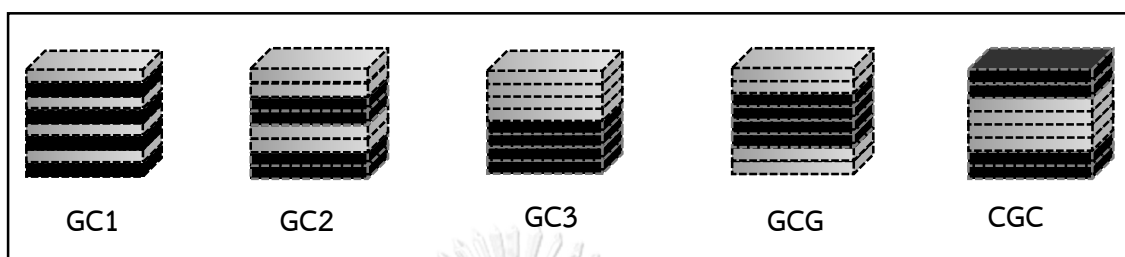
รูปที่ 4.8 ความเสียหายของวัสดุคอมพอสิตสำหรับประยุกต์ใช้เป็นเกราะกันกระสุน โดย (ก) แผ่นปะทะจำนวน 2 แผ่นและ (ข) แผ่นปะทะจำนวน 1 แผ่น ของชิ้นงานในกลุ่มที่ 1





รูปที่ 4.9 ความเสียหายของวัสดุคอมพอสิตสำหรับประยุกต์ใช้เป็นเกราะกันกระสุน โดย (ก) แผ่นปะทะจำนวน 2 แผ่นและ (ข)แผ่นปะทะจำนวน 1 แผ่น ของชิ้นงานในกลุ่มที่ 3

#### 4.6.4 ผลของการจัดลำดับชั้นของเส้นใยแก้วชนิด S และเส้นใยคาร์บอนที่ใช้ร่วมกันในแผ่นปะทะของวัสดุคอมพอลิธพอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดต่างๆ สำหรับประยุกต์ใช้เป็นเกราะกันกระสุน



รูปที่ 4.10 ลักษณะการจัดลำดับชั้นของชิ้นงานคอมพอลิธพอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิด S ร่วมกับเส้นใยคาร์บอน

จากผลการทดลอง 4.7.1-4.7.3 ในการจัดลำดับชั้นของชิ้นงานคอมพอลิธสำหรับประยุกต์ใช้เป็นเกราะกันกระสุน ประกอบด้วยแผ่นปะทะจำนวน 2 แผ่น ซึ่งวัสดุคือ พอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิด S จำนวน 30 ชั้น ร่วมกับเส้นใยคาร์บอนจำนวน 30 ชั้น และแผ่นดูดซับพลังงานวัสดุคือ พอลิเบนซอกซาซินอัลลอยด์ (PBA/PU:80/20) เสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิดจำนวน 25 ชั้น โดยในการทดสอบยิงด้านวัสดุที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วรับแรงปะทะจากกระสุนปืนเป็นหลัก

จากตารางที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบผลการจัดลำดับชั้นของเส้นใยแก้วชนิด S และเส้นใยคาร์บอนที่ใช้ร่วมกันในแผ่นปะทะของวัสดุคอมพอลิธพอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดต่างๆ สำหรับประยุกต์ใช้เป็นเกราะกันกระสุน ในการทดสอบแรงปะทะจากอาวุธปืนวัสดุคอมพอลิธประกอบด้วย 3 แผ่น โดยแผ่นปะทะเป็นวัสดุคอมพอลิธพอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วและเส้นใยคาร์บอนที่จัดเรียงชั้นอย่างละ 15 ชั้น จำนวน 2 แผ่น และแผ่นที่ 3 เป็นวัสดุคอมพอลิธพอลิเบนซอกซาซินอัลลอยด์ (PBA/PU : 80/20) เสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิดจำนวน 25 ชั้น ทุกชิ้นงานมีความหนาแน่นเชิงพื้นที่อยู่ในช่วง 4.10-4.15 กรัม/ตารางเซนติเมตร โดยแบ่งกลุ่มการจัดลำดับชั้นอ้างอิงจากการทดสอบทางกลเป็น 2 กลุ่มชิ้นงาน ลักษณะการจัดเรียงลำดับชั้นดังรูปที่ 4.10 ในกลุ่มที่ 1 เป็นการจัดสลับชั้นไปมาทำการจัดเรียงลำดับชั้น 5 แบบดังนี้ เส้นใยแก้วสลับกับเส้นใยคาร์บอนอย่างละ 1 ชั้น (1G/1C), เส้นใยแก้วสลับกับเส้นใยคาร์บอนอย่างละ 2 ชั้น (2G/2C), เส้นใยแก้วสลับกับเส้นใยคาร์บอนอย่างละ 3 ชั้น (3G/3C), เส้นใยแก้วสลับกับเส้นใยคาร์บอนอย่างละ 5

ชั้น (5G/5C) และเส้นใยแก้วสลับกับเส้นใยคาร์บอนอย่างละ 15 ชั้น (15G/15C) ในกลุ่มที่ 2 เป็นการ จัดลำดับชั้นแบบโครงสร้างแซนวิช (Sandwich structure) ทำการจัดเรียงลำดับชั้น 2 แบบดังนี้ เส้น ใยคาร์บอนเป็นแกนกลางของวัสดุ (8G/15C/7G) และแบบเส้นใยแก้วเป็นแกนกลางของวัสดุ (8C/15G/7C)

จากรูปที่ 4.11-4.17 แสดงผลการทดสอบยิงด้วยกระสุนปืนขนาด 7.62 x 51 มม. ที่ความเร็ว 847 ± 9 เมตร/วินาที ตามมาตรฐาน NIJ-0101.06 ที่ระดับภัยคุกคามระดับ 3 ทุกชิ้นงานคอมพอสิต ของการจัดลำดับชั้นในส่วนของแผ่นปะทะสำหรับประยุกต์ใช้เป็นเกราะกันกระสุนสามารถต้านทาน การเจาะทะลุของกระสุนปืนขนาด 7.62 x 51 มม. ที่ความเร็ว 840-849 เมตร/วินาที และรอยยุบตัว มีขนาด 19-30 มิลลิเมตร โดยความเสียหายที่เกิดขึ้นในส่วนของแผ่นปะทะมีลักษณะจำกัดเป็นวงกลม ทั้งด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นปะทะ ในขณะที่ความเสียหายของแผ่นดูดซับพลังงานด้านหน้ามี ลักษณะเป็นรอยแตกรูปดาวและในส่วนด้านหลังมีลักษณะเป็นรูปโค่น ซึ่งการเจาะทะลุของชิ้นงานมี ลักษณะเป็นรูปกรวยและวงแหวนซึ่งเป็นลักษณะของกระสุนปืนขนาด 7.62 มม. ในชิ้นงานคอมพอสิตที่มี การจัดเรียงชั้นวัสดุเป็นโครงสร้างลามิเนตเมื่อได้รับแรงปะทะจะมีความเสียหายเฉพาะส่วน พื้นที่ที่ ได้รับผลกระทบหลักจากกระสุนปืนความเร็วสูงทำให้เกิดความเสียหายในทิศทางการตั้งของบริเวณ เส้นใยหลัก (Primary yarns) ขยายไปบริเวณเส้นใยรอง (Secondary yarn) เกิดการแยกระหว่างชั้น ของลามิเนต (Delamination) และการแตกหักของเมตริกและเส้นใย ส่งผลให้เกิดลักษณะโคงเป็นรูป พีระมิดหรือรูปโค่นที่ด้านหลังของชิ้นงานคอมพอสิตทั้งในส่วนของแผ่นปะทะและแผ่นดูดซับพลังงาน โดยลักษณะความเสียหายรูปโค่นและการแยกชั้นของลามิเนตจะปรากฏชัดเจนในส่วนของแผ่นดูดซับ พลังงานเพื่อทำหน้าที่ดูดซับพลังงานและหยุดการเจาะทะลุของกระสุนปืน ซึ่งความเสียหายดังกล่าว ขึ้นอยู่กับความเร็วและมวลกระสุนที่เคลื่อนอยู่จากการทะลุผ่านแผ่นปะทะ ดังนั้นแผ่นปะทะจึงเป็น ส่วนประกอบที่สำคัญในการทำลายหัวกระสุนเพื่อลดปริมาณความเร็วและมวลที่เหลืออยู่ของกระสุน ปืนให้น้อยที่สุดก่อนปะทะกับแผ่นดูดซับพลังงาน [23, 60, 61]

จากตารางที่ 4.6 ผลทดสอบยิงการจัดลำดับชั้นของแผ่นปะทะของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบน ซอกซาซินเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิด S ร่วมกับเส้นใยคาร์บอนต่อความเสียหายของชิ้นงานและ กระสุนปืน โดยชิ้นงานรูปแบบ GCG มีความเสียหายของรอยยุบตัวน้อยที่สุด แสดงให้เห็นว่าการจัด เรียงลำดับชั้นแบบ GCG สามารถดูดซับพลังงานจากการปะทะกับกระสุนปืนได้มากที่สุด และจาก หน้าที่การทำลายหัวกระสุนของแผ่นปะทะ ความเสียหายของกระสุนของทุกการจัดลำดับชั้นแสดงดัง

รูปที่ 4.14-4.20 ซึ่งลักษณะความเสียหายของกระสุนส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นก้อนกลมทำให้เกิดรอยยุบตัวสูงที่แผ่นดัดซับพลังงาน เมื่อเทียบกับชิ้นงานรูปแบบ GCG ที่ความเสียหายของกระสุนมีลักษณะแตกเป็นชิ้นๆแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการทำลายหัวกระสุนของแผ่นปะทะ

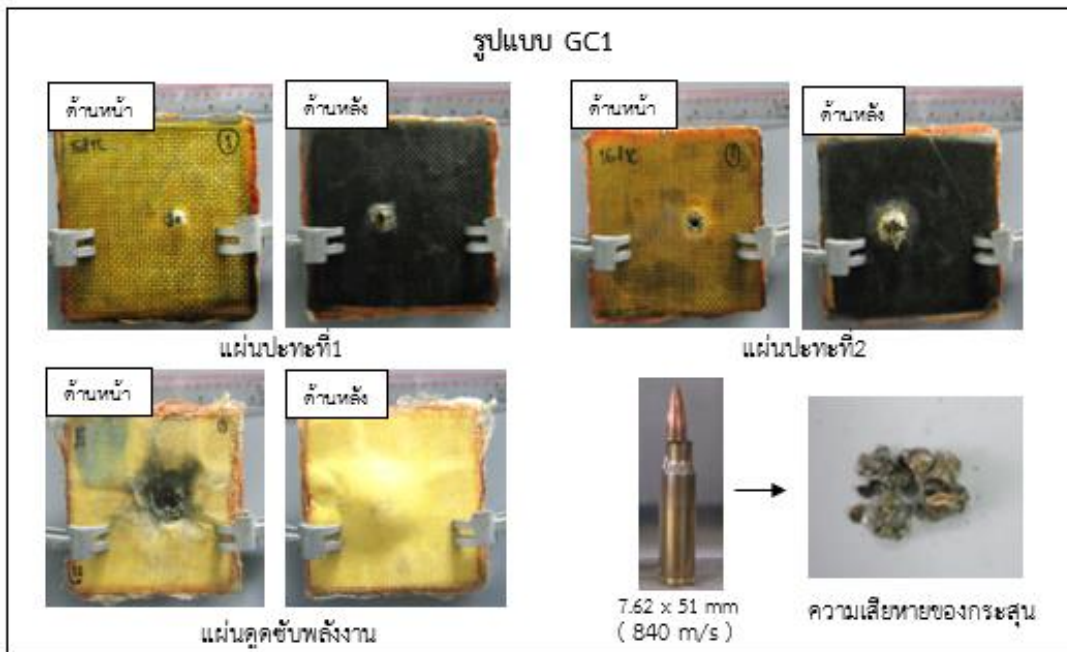
จากผลดังกล่าวสรุปได้ว่ารูปแบบของการจัดลำดับชั้นของแผ่นปะทะจากวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิด S ร่วมกับเส้นใยคาร์บอนที่เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้เป็นเสื้อเกราะติดบุคคลคือ ชิ้นงานรูปแบบแซนวิชโดยเส้นใยคาร์บอนเป็นแกนกลางของวัสดุ (GCG) เนื่องจากโครงสร้างของชิ้นงานดังกล่าวมีชั้นเส้นใยแก้วซึ่งเป็นวัสดุเซรามิกชนิดหนึ่งที่มีความแข็งแรงและสามารถต้านทานแรงปะทะได้สูงทำหน้าที่ห่อหุ้มเส้นใยคาร์บอนที่รับแรงปะทะได้ต่ำอยู่ตำแหน่งแกนกลางของชิ้นงาน การจัดเรียงในรูปแบบ GCG จึงทำลายและลดความเร็วของกระสุนทำให้เกิดรอยยุบตัวน้อยสุด และสอดคล้องกับความแข็งแรงทางกลของการจัดลำดับชั้นของชิ้นงานคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซินที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยแก้วในค่าความแข็งแรงภายใต้แรงดึงและค่าความแข็งแรงภายใต้แรงกระแทก

และจากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยในพัฒนาแผ่นปะทะของเกราะกันกระสุนน้ำหนักเบาจากวัสดุคอมพอสิตโดยใช้เบนซอกซาซินเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิด S ร่วมกับเส้นใยคาร์บอน ซึ่งเกราะกันกระสุนรูปแบบ GCG ในส่วนของแผ่นปะทะดังกล่าวสามารถลดน้ำหนักได้ 15 เปอร์เซ็นต์ และลดความเสียหายจากรอยยุบตัวได้ 32 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับชิ้นงานคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิด S เพียงชนิดเดียวในส่วนของแผ่นปะทะจากการทดลองที่ 4.7.1

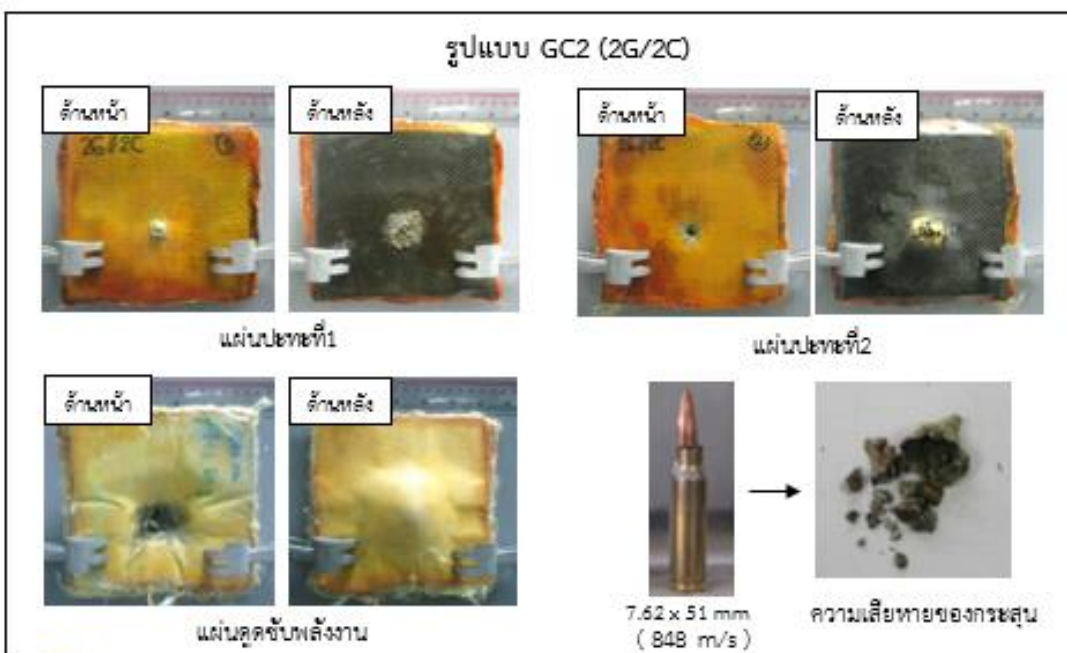
ตารางที่ 4.5 การจัดลำดับชั้นของเส้นใยแก้วชนิด S และเส้นใยคาร์บอนที่ใช้ร่วมกันในแผ่นปะทะของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกลาซินเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดต่างๆสำหรับประยุกต์ใช้เป็นเกราะกันกระสุน

กลุ่ม ชั้นงาน	การ จัดลำดับ ชั้น	แผ่นปะทะ (30G , 30C)		ความเร็ว กระสุน (เมตร/วินาที) 838-856 m/s	ผลการ ทดสอบ	รอยยุบตัว (มิลลิเมตร)
		แผ่นที่1 (15G,15C)	แผ่นที่2 (15G,15C)			
1	GC1	1G/1C	1G/1C	840	ไม่ทะลุ	24
	GC2	2G/2C	2G/2C	848	ไม่ทะลุ	29
		3G/3C	3G/3C	849	ไม่ทะลุ	28
		5G/5C	5G/5C	842	ไม่ทะลุ	26
	GC3	15G/15C	15G/15C	849	ไม่ทะลุ	30
2	GCG	8G/15C/7G	8G/15C/7G	847	ไม่ทะลุ	19
	CGC	8C/15G/7C	8C/15G/7C	840	ไม่ทะลุ	22

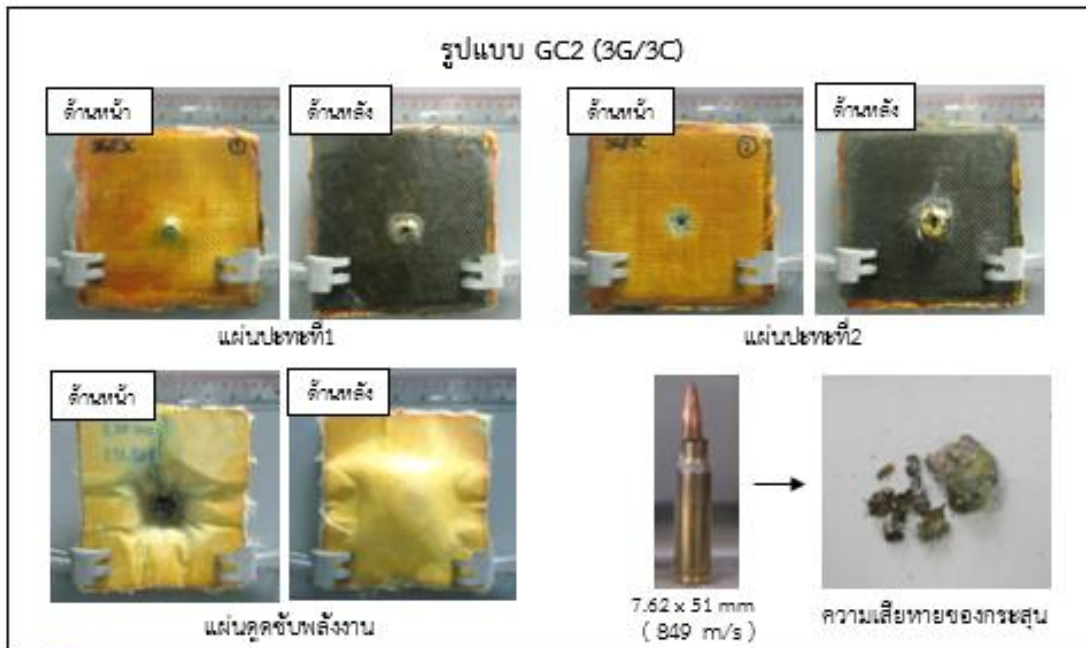
หมายเหตุ : ตัวเลขในแผ่นปะทะและแผ่นดูดซับพลังงานคือ จำนวนชั้นและลักษณะการจัดเรียงที่ศึกษา และสัญลักษณ์ G, C และ A คือ ชั้นงานคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน และเส้นใยอะรามิต ตามลำดับ



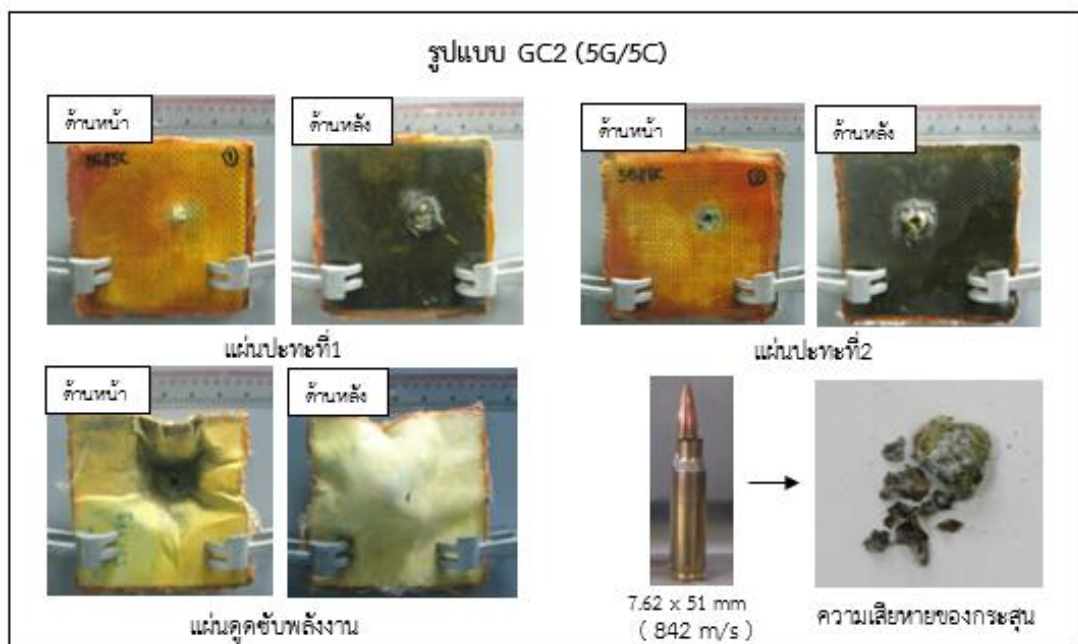
รูปที่ 4.11 ความเสียหายของกระสุนปืนและวัสดุคอมพอสิตสำหรับประยุกต์ใช้เป็นเกราะกันกระสุนของรูปแบบ GC1 ในการจัดลำดับชั้นแผ่นปะทะ



รูปที่ 4.12 ความเสียหายของกระสุนปืนและวัสดุคอมพอสิตสำหรับประยุกต์ใช้เป็นเกราะกันกระสุนของรูปแบบ GC2 (2G/2C) ในการจัดลำดับชั้นแผ่นปะทะ



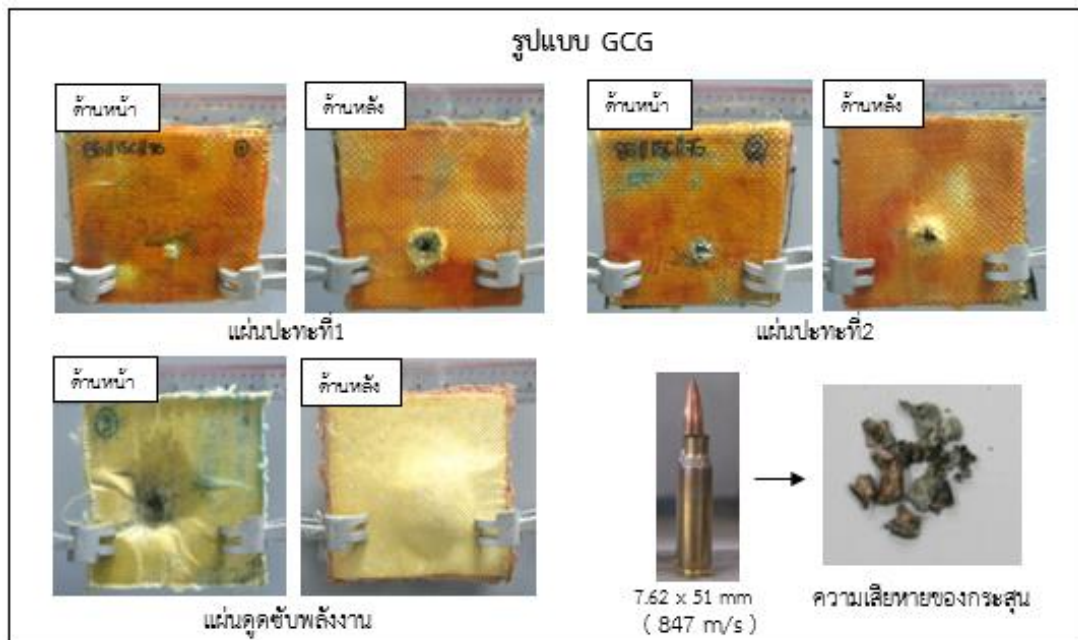
รูปที่ 4.13 ความเสียหายของกระสุนปืนและวัสดุคอมพอลิทีสำหรับประยุกต์ใช้เป็นเกราะกันกระสุนของรูปแบบ GC2 (3G/3C) ในการจัดลำดับชั้นแผ่นปะทะ



รูปที่ 4.14 ความเสียหายของกระสุนปืนและวัสดุคอมพอลิทีสำหรับประยุกต์ใช้เป็นเกราะกันกระสุนของรูปแบบ GC2 (5G/5C) ในการจัดลำดับชั้นแผ่นปะทะ

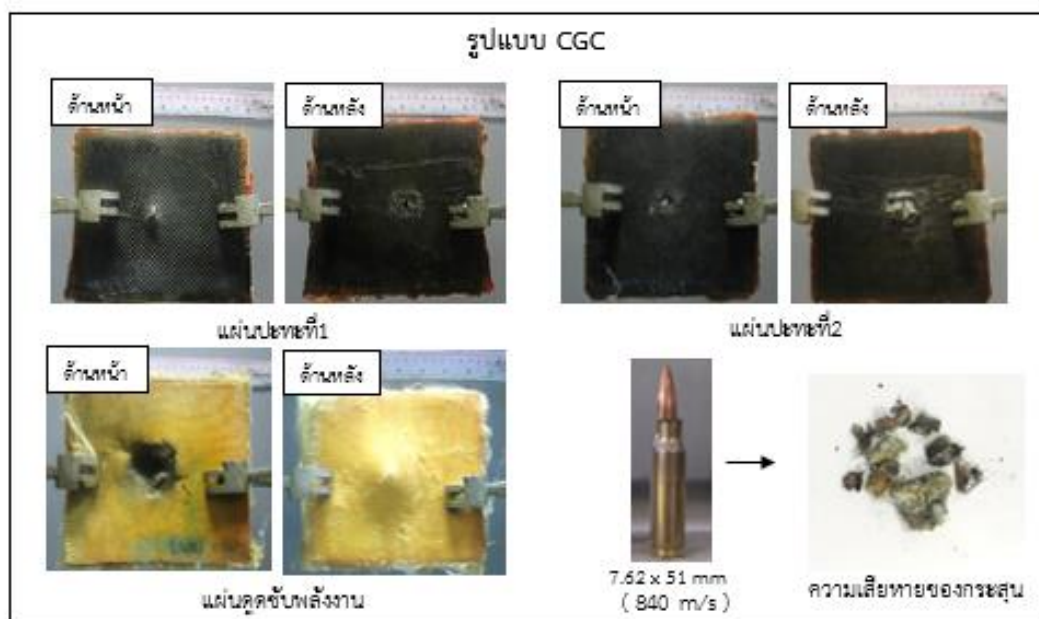


รูปที่ 4.15 ความเสียหายของกระสุนปืนและวัสดุคอมพอลิท์สำหรับประยุกต์ใช้เป็นเกราะกันกระสุนของรูปแบบ GC3 ในการจัดลำดับชั้นแผ่นปะทะ



รูปที่ 4.16 ความเสียหายของกระสุนปืนและวัสดุคอมพอลิท์สำหรับประยุกต์ใช้เป็นเกราะกันกระสุนของรูปแบบGCG ในการจัดลำดับชั้นแผ่นปะทะ





รูปที่ 4.17 ความเสียหายของกระสุนปืนและวัสดุคอมพอสิตสำหรับประยุกต์ใช้เป็นเกราะกันกระสุนของรูปแบบ CGC ในการจัดลำดับชั้นแผ่นปะทะ

#### 4.6.5 ผลการทดสอบยิงเสื่อเกราะกันกระสุนรูปแบบ GCG ในการจัดลำดับชั้นแผ่นปะทะของชิ้นงานคอมพอสิต

จากผลการจัดลำดับชั้นแผ่นปะทะของชิ้นงานคอมพอสิต โดยชิ้นงานคอมพอสิตที่มีการจัดลำดับชั้นแบบแซนวิชโดยเส้นใยคาร์บอนเป็นแกนกลางของวัสดุ (GCG) มีประสิทธิภาพสูงทั้งสมบัติทางกลและการรับแรงปะทะจากอาวุธปืน จึงนำผลของจำนวนชั้นและการจัดลำดับชั้นดังกล่าวมาพัฒนาเป็นเสื่อเกราะติดบุคคลที่มีประสิทธิภาพสามารถต้านระดับภัยคุกคามระดับ 3 ตามมาตรฐาน NIJ-0101.06 โดยแผ่นปะทะเป็นวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วและเส้นใยคาร์บอนที่จัดเรียงชั้นอย่างละ 15 ชั้น จำนวน 2 แผ่น ซึ่งมีการจัดลำดับชั้นแบบแซนวิชโดยเส้นใยคาร์บอนเป็นแกนกลางของวัสดุ (G/C/G) และแผ่นดูดซับพลังงานเป็นวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนอัลลอยด์ (PBA/PU : 80/20) เสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิตจำนวน 25 ชั้น โดยเสื่อเกราะติดบุคคลมีความหนา 30 มิลลิเมตร และความหนาแน่นเชิงพื้นที่ 4.18 กรัม/ตารางเซนติเมตร

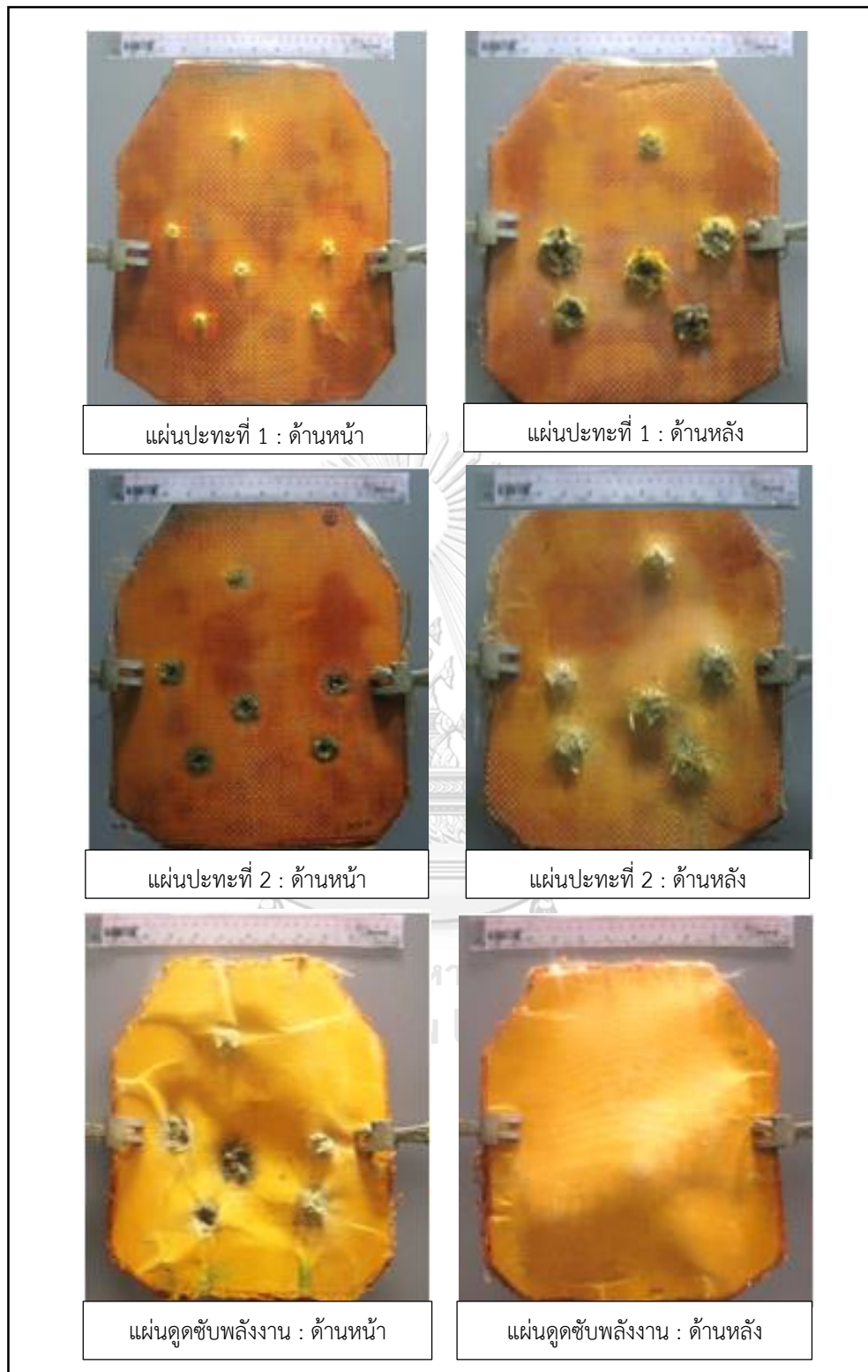
ทดสอบยิงเสื่อเกราะติดบุคคลโดยกระสุนปืนขนาด 7.62 x 51 มม. ที่ความเร็ว  $847 \pm 9$  เมตร/วินาทีจำนวน 6 นัด ตามมาตรฐาน NIJ-0101.06 ที่ระดับภัยคุกคามระดับ 3 จากผลการทดสอบวัสดุดังกล่าวสามารถต้านการทะลุของกระสุนปืนขนาด 7.62 x 51 มม. ได้ และรอยยุบตัวไม่เกิน

44 มิลลิเมตรตามค่ามาตรฐานกำหนด โดยผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.7 และลักษณะความเสียหายของชิ้นงานสื่อเกราะแสดงดังรูปที่ 4.18

โดยทั่วไปการเลือกใช้วัสดุเกราะกันกระสุนสำหรับประยุกต์ใช้ในการปฏิบัติหน้าที่ของทหารและพลเรือนมีความสำคัญต่อการเคลื่อนย้ายและสวมใส่สะดวกสบายในการปฏิบัติงาน ดังนั้นการเลือกวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำและสามารถป้องกันภัยคุกคามในระดับสูงจึงจำเป็นสำหรับนำมาผลิตเป็นเกราะกันกระสุน การป้องกันภัยคุกคามระดับ 3 ตามมาตรฐาน NIJ-0101.06 วัสดุที่ใช้ต้องสามารถต้านทานกระสุนปืนขนาด 7.62 x 51 มม. ซึ่งเป็นลูกกระสุนปืนที่ใช้ในอาวุธปืนสงครามที่มีความยาวลำกล้อง 560 มิลลิเมตร จากรายงานวัสดุต่างๆที่สามารถต้านทานกระสุนปืนขนาด 7.62 แสดงดังตารางที่ 4.8 โดยวัสดุคอมพอลิโทลิกโพลีเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วร่วมกับเส้นใยคาร์บอนในส่วนของแผ่นปะทะและพอลิเบนซอกซาซีนอัลลอยด์ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิดในส่วนของแผ่นดูดซับพลังงานที่เราเลือกใช้มีความหนาแน่นเชิงพื้นที่ 4.18 กรัม/ตารางเซนติเมตร ซึ่งต่ำกว่าเกราะแข็งกันกระสุนที่ต้านการเจาะทะลุของกระสุนปืนขนาด 7.62 มม จากวัสดุต่างๆดังตารางที่ 4.8 จากวัสดุพอลิเมอร์พบว่าวัสดุคอมพอลิโทลิกโพลีเบนซอกซาซีนเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิด E ร่วมกับพอลิเบนซอกซาซีนอัลลอยด์เสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิด มีความหนาแน่นเชิงพื้นที่ 5.11 กรัม/ตารางเซนติเมตร และวัสดุคอมพอลิโทลิกโพลีไพรีนเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิด E และ S มีความหนาแน่นเชิงพื้นที่ 4.90 กรัม/ตารางเซนติเมตร และในส่วนวัสดุเซรามิกและเหล็กพบว่าวัสดุเซรามิกซิลิคอนคาร์ไบด์ร่วมกับเส้นใยโพลีเอทิลีนนำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดมีความหนาแน่นเชิงพื้นที่ 4.44 กรัม/ตารางเซนติเมตร, วัสดุเซรามิกร่วมกับพอลิคาร์บอนเนตเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วมีความหนาแน่นเชิงพื้นที่ 8.57 กรัม/ตารางเซนติเมตร, วัสดุเหล็กกล้า (AISI 4340) มีความหนาแน่นเชิงพื้นที่ 10-11.5 กรัม/ตารางเซนติเมตร และวัสดุอะลูมิเนียมอัลลอยด์ (7075) มีความหนาแน่นเชิงพื้นที่ 10-11.5 กรัม/ตารางเซนติเมตร ดังนั้นวัสดุที่เลือกใช้ทำวิจัยเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับประยุกต์ใช้เป็นเกราะกันกระสุนน้ำหนักเบาสมรรถนะสูง จากวัสดุที่หาได้ง่ายภายในประเทศราคาไม่แพงเพื่อลดปริมาณการนำเข้าเกราะกันกระสุนจากต่างประเทศ

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบยิงเลเซอร์จำนวน 6 นัดของรูปแบบ GCG ในการจัดลำดับชั้นแผ่นปะทะของชิ้นงาน และรอยยุบตัวบนแผ่นหลังของชิ้นงาน

นัดที่	มุมยิง	ความเร็วกระสุน (เมตร/วินาที) 838-856 m/s	ผลการทดสอบ	รอยยุบตัว (มิลลิเมตร)
1	0°	843	ไม่ทะลุ	13.45
2	0°	847	ไม่ทะลุ	14.23
3	0°	852	ไม่ทะลุ	17.56
4	30°	850	ไม่ทะลุ	22.63
5	30°	838	ไม่ทะลุ	23.94
6	0°	850	ไม่ทะลุ	26.98



รูปที่ 4.18 ความเสียหายของวัสดุคอมพอสิตเมื่อทดสอบโดยกระสุนปืน ขนาด 7.62 มม. ที่ความเร็ว  $847 \pm 9.1$  เมตร/วินาที รูปแบบ GCG ในการจัดลำดับชั้นแผ่นปะทะของชั้นงานเสื้อเกราะ

ตารางที่ 4.7 เกราะแข็งกันกระสุนต้านการเจาะทะลุของกระสุนปืนขนาด 7.62 มม จากวัสดุต่างๆ

วัสดุ	ความหนา (mm)	ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ (กรัม/ตารางเซนติเมตร)	ความเร็วกระสุน (เมตร/วินาที)
พอลิโพรพิลีนเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิด E และ S [5]	-	4.90	843
พอลิเบนซอกซาซีนเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิด E+พอลิเบนซอกซาซีนอัลลอยด์เสริมแรงเส้นใยอะรามิด [26]	31.55	5.11	829-843
ซิลิคอนคาร์ไบด์ + เส้นใยโพลีเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด [62]	-	4.44	776
อะลูมินา+สแตนเลส+พอลิเบนซอกซาซีนอัลลอยด์เสริมแรงเคพลาร์ [63]	22	7.1	838
เซรามิก+เส้นใยแก้วเสริมแรงด้วยพอลิคาร์บอเนต [64]	35.5	8.57	850
เหล็กกล้า ( AISI 4340 ) [65]	12.7-14.4	10-11.5	775-784
อะลูมิเนียมอัลลอยด์ (7075) [66]	70	10-11.5	777-780

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยได้ทำการพัฒนาเกราะแข็งกันกระสุนจากวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตในส่วนองแผ่นหน้าหรือแผ่นปะทะให้มีน้ำหนักเบาและมีประสิทธิภาพทางกลสูงชัน โดยทำการศึกษาสมบัติเชิงกลและกายภาพของการจัดลำดับชั้นของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้วชนิด S และทำการศึกษัจำนวนชั้นและจัดลำดับชั้นของเส้นใยแก้วชนิด S ร่วมกับเส้นใยคาร์บอนโดยมีพอลิเบนซอกซาซีนเป็นเมตริกเรซินในส่วนของแผ่นปะทะ ร่วมกับแผ่นหลังหรือแผ่นดูดซับพลังงานโดยใช้วัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนอัลลอยด์เสริมแรงด้วยเส้นใยเคฟลาร์ 25 ชั้น เพื่อประยุกต์ใช้เป็นเกราะกันกระสุน และเกราะกันกระสุนนี้สามารถป้องกันกระสุนขนาด  $7.62 \times 51$  มม. ที่ความเร็ว  $847 \pm 9$  เมตร/วินาที ตามมาตรฐาน NIJ-0101.06 ที่ระดับภัยคุกคามระดับ 3 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

จากการศึกษาการจัดลำดับชั้นของชิ้นงานคอมพอสิตโดยนำเส้นใยคาร์บอนมาใช้ร่วมเส้นใยแก้ว พบว่าสมบัติทางกลของทุกการจัดลำดับชั้นอยู่ระหว่างค่าที่ได้จากวัสดุหลัก ซึ่งค่าที่ได้จากการจัดลำดับชั้นแบบโครงสร้างแบบแซนวิช (Sandwich structure) จะได้ค่าสูงสุด โดยค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงและต่อแรงกระแทกสูงสุดในชิ้นงานรูปแบบเส้นใยคาร์บอนเป็นแกนกลาง (GCG) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 401 เมกะปาสคาล และ 250 กิโลจูล/ตารางเมตร ในส่วนของค่าความแข็งไม่มีผลต่อการจัดลำดับชั้นแต่มีค่าสูงเมื่อวัดค่าด้านที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว และจากสมบัติทางกายภาพพบว่าพอลิเบนซอกซาซีนเมตริกยึดติดได้ดีกับเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยแก้วตรวจสอบโดยค่าช่องว่างภายในชิ้นงานจากการวัดค่าความหนาแน่นที่ได้จากการทดลองเทียบกับค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีและสัญญาณของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยแก้วจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

จากการศึกษาแผ่นเกราะกันกระสุนสำหรับประยุกต์ใช้เป็นเสื้อเกราะกันกระสุน พบว่าจำนวนชั้นของเส้นใยแก้วและเส้นใยคาร์บอนชนิดละ 30 ชั้น ด้านวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วในการรับแรงปะทะเริ่มต้นจากกระสุนปืน และจำนวนแผ่นปะทะจำนวน 2 แผ่นเหมาะสมสำหรับนำมาประยุกต์ใช้เป็นแผ่นปะทะของเกราะกันกระสุน และเมื่อนำมาศึกษาการจัดลำดับชั้นของเส้นใยในแผ่นปะทะพบว่าโครงสร้างแบบแซนวิช (Sandwich structure) รูปแบบ

GCG โดยมีเส้นใยคาร์บอนเป็นแกนกลางสามารถดูดซับพลังงานและทำลายหัวกระสุนได้มากกว่ารูปแบบอื่น โดยสามารถต้านการเจาะทะลุที่ความเร็ว 847 เมตร/วินาที และเกิดรอยยุบตัวเพียง 19 มิลลิเมตรซึ่งต่ำกว่าค่าที่มาตรฐานกำหนดไว้คือ 44 มิลลิเมตร

จากผลการทดลองทั้งหมดในงานวิจัยสามารถผลิตเสื้อเกราะติดบุคคลขนาด 290×280 ตารางมิลลิเมตร ซึ่งประกอบด้วยแผ่นปะทะจำนวน 2 แผ่น และแผ่นดูดซับพลังงานจำนวน 1 แผ่น ในส่วนของแผ่นปะทะวัสดุคอมพอสิตคือ พอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยแก้ว ซึ่งมีการจัดลำดับชั้นแบบแซนวิชโดยเส้นใยคาร์บอนเป็นแกนกลางของวัสดุ (รูปแบบ GCG) โดยใน 1 แผ่นของการจัดลำดับชั้นใช้เส้นใยแก้วและเส้นใยคาร์บอนอย่างละ 15 ชั้น และในส่วนของแผ่นดูดซับพลังงานวัสดุคอมพอสิตคือ พอลิเบนซอกซาซินอัลลอยด์ (PBA/PU : 80/20) เสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิดจำนวน 25 ชั้น สามารถป้องกันกระสุนขนาด 7.62 x 51 มม. ที่ความเร็ว 847 ± 9 เมตร/วินาที ตามมาตรฐาน NIJ-0101.06 ที่ระดับภัยคุกคามระดับ 3 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเสื้อเกราะติดบุคคลมีความหนา 30 มิลลิเมตร และความหนาแน่นเชิงพื้นที่ 4.2 กรัม/ตารางเซนติเมตร

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการทดสอบยิงเราไม่สามารถกำหนดความเร็วเริ่มต้นในการทดสอบได้ ทำให้ไม่สามารถเทียบความเสียหายจากการรับแรงปะทะของทุกชิ้นงานได้อย่างชัดเจน

## รายการอ้างอิง

1. M.B. Mukasey, J.L.S., D.W. Hagy, Ballistic resistance of body armor. 2008.
2. Medvedovski, E., Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. Part 1. *Ceramics International*, 2010. 36(7): p. 2103-2115.
3. Wang, S.F., et al., Transparent ceramics: Processing, materials and applications. *Progress in Solid State Chemistry*, 2013. 41(1): p. 20-54.
4. Madhu, V., et al., An experimental study of penetration resistance of ceramic armour subjected to projectile impact. *International Journal of Impact Engineering*, 2005. 32(1): p. 337-350.
5. E. D. Pilpel, R.H.H., S. Johnson, Composite ballistic panels and method of use.
6. Larsson, F. and L. Svensson, Carbon, polyethylene and PBO hybrid fibre composites for structural lightweight armour. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2002. 33(2): p. 221-231.
7. Monteiro, S.N., et al., Novel ballistic ramie fabric composite competing with Kevlar™ fabric in multilayered armor. *Materials & Design*, 2016. 96(Supplement C): p. 263-269.
8. Pandya, K.S., et al., Ballistic impact behavior of hybrid composites. *Materials & Design*, 2013. 44(Supplement C): p. 128-135.
9. Nguyen, L.H., et al., A methodology for hydrocode analysis of ultra-high molecular weight polyethylene composite under ballistic impact. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016. 84(Supplement C): p. 224-235.
10. Grujicic, M., et al., Material Modeling and Ballistic-Resistance Analysis of Armor-Grade Composites Reinforced with High-Performance Fibers. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2009. 18(9): p. 1169.
11. Grujicic, M., et al., Ballistic-performance optimization of a hybrid carbon-nanotube/E-glass reinforced poly-vinyl-ester-epoxy-matrix composite armor. *Journal of Materials Science*, 2007. 42(14): p. 5347-5359.



12. Bandaru, A.K., L. Vetiyatil, and S. Ahmad, The effect of hybridization on the ballistic impact behavior of hybrid composite armors. *Composites Part B: Engineering*, 2015. 76(Supplement C): p. 300-319.
13. Naik, N.K. and A.V. Doshi, Ballistic impact behaviour of thick composites: Parametric studies. *Composite Structures*, 2008. 82(3): p. 447-464.
14. S. Rimdusit, C.J., S. Tiptipakorn, *Alloys and Composites of Polybenzoxazines. Properties and Applications*, 2013, New York: Springer
15. Ghosh, N.N., B. Kiskan, and Y. Yagci, Polybenzoxazines—New high performance thermosetting resins: Synthesis and properties. *Progress in Polymer Science*, 2007. 32(11): p. 1344-1391.
16. Mallick, P.K., *Fiber-Reinforce Composite*. 1993.
17. H. Ishida, T.A., *Handbook of Benzoxazine Resin*. Elsevier Press, 2012.
18. Jubsilp, C., et al., High performance wood composites based on benzoxazine-epoxy alloys. *Bioresource Technology*, 2008. 99(18): p. 8880-8886.
19. Jubsilp, C., T. Takeichi, and S. Rimdusit, Property enhancement of polybenzoxazine modified with dianhydride. *Polymer Degradation and Stability*, 2011. 96(6): p. 1047-1053.
20. Rimdusit, S., W. Bangsen, and P. Kasemsiri, Chemorheology and thermomechanical characteristics of benzoxazine-urethane copolymers. *Journal of Applied Polymer Science*, 2011. 121(6): p. 3669-3678.
21. Rimdusit, S., et al., Toughening of polybenzoxazine by alloying with urethane prepolymer and flexible epoxy: A comparative study. *Polymer Engineering & Science*, 2005. 45(3): p. 288-296.
22. Rimdusit, S., et al., Effects of polyol molecular weight on properties of benzoxazine-urethane polymer alloys. *Polymer Engineering & Science*, 2008. 48(11): p. 2238-2246.
23. M. Okhawilai, S.R., *Hard armor composites from ballistic fiber-reinforced polybenzoxazine alloys*.
24. <https://www.mtec.or.th>. 20/12/2016.

25. Song, J.H., Pairing effect and tensile properties of laminated high-performance hybrid composites prepared using carbon/glass and carbon/aramid fibers. *Composites Part B: Engineering*, 2015. 79(Supplement C): p. 61-66.
26. Kasemsiri, P., Light Weight Ballistic Armor from Fiber-Reinforced with Benzoxazine Alloys, in *Chemical Engineering*. 2011, Chulalongkorn University
27. Mobasher, B., *Mechanics of Fiber and Textile Reinforced Cement Composites*. Taylor & Francis Group, 2012.
28. H. Ishida, D.P.S., Improved Thermal and Mechanical Properties of Polybenzoxazines Based on Alkyl-Substituted Aromatic Amines. Vol. 38 2000, *Polym. Phys.* 3289-3301.
29. Nair, C.P.R., Advances in addition-cure phenolic resins. Vol. 29 2004, *Prog. Polym. Sci.* 401-498.
30. F.W. Holly, A.C.C., Condensation products of aldehydes and ketones with o-aminobenzyl alcohol and o-hydroxybenzylamine. *J. Am. Chem. Soc.* , 1944. 66 p. 1875-1879.
31. Ishida, H., Process for preparation of other publications benzoxazine compound in solventless system, in U.S. Patent 5,543,516. 1996.
32. H. Ishida, D.J.A., Mechanical characterization of copolymers based on benzoxazine and epoxy. *Polymer* 1996. 37: p. 4487-4495.
33. Xin Ning, H.I., Phenolic materials via ring-opening polymerization of benzoxazines: Effect of molecular structure on mechanical and dynamic mechanical properties, ed. P. B. Vol. 32. 1994, *J. Polym. Sci.* 921-927
34. M. Pegoraro, A.G., G. Ricca, <sup>1</sup>H nuclear magnetic resonance study of polyurethane prepolymers from toluene diisocyanate polypropylene glycol. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2003. 87 p. 347-357.
35. T. Takeichi, Y.G., T. Agag, Synthesis and characterization of poly(urethane-benzoxazine) films as novel type of polyurethane/phenolic resin composites. *J. Polym. Sci. Pol. Chem*, 2000. 38 p. 4165-4176.
36. S. Rimdusit, S.P., W. Tanthapanichakoon, S. Damrongsakkul, Toughening of polybenzoxazine by alloying with urethane prepolymer and flexible epoxy: A comparative study. *J. Polym. Eng. Sci.* , 2005. (45): p. 288-296.

37. M.R. O'Masta, V.S.D., and H.N.G. Wadley, Mechanisms of projectile penetration in Dyneema® encapsulated aluminum structures. *Int. J. Imp. Eng.* , 2014. 74 p. 16-35.
38. D.K.Y. Tam, S.R., P. Gao, T. Yi., High-performance ballistic protection using polymer nanocomposites. 2012: p. 213-237.
39. Bansal, P.N., *Handbook of Ceramic Composites*. 2005, Kluwer Academic Publishers.
40. Chand, S., Review carbon fiber for composites. *J. Mater. Sci*, 2000. 35 p. 1303-1313.
41. in <http://www.carbonfiber.gr.jp/english/material/what.html>. 2016.
42. W.F. Smith, J.H., *Foundations of Materials Science and Engineering*. The McGraw-Hill Companies Inc., 2006.
43. D.R. Hartran, R.B.J., T.W. Rameg, Ballistic material, U.S. Patent 5, 813 Editor. 1993.
44. Naik, N.K., P. Shirao, and B.C.K. Reddy, Ballistic impact behaviour of woven fabric composites: Formulation. *International Journal of Impact Engineering*, 2006. 32(9): p. 1521-1552.
45. Mohan, S. and S. Velu, Ballistic impact behaviour of unidirectional fibre reinforced composites. *International Journal of Impact Engineering*, 2014. 63(Supplement C): p. 164-176.
46. Elmessiry, M. and E. El-Tahan, Stab resistance of triaxial woven fabrics for soft body armor. *Vol. 45*. 2014.
47. Shaktivesh, N. Nair, and N. Naik, Ballistic impact behavior of 2D plain weave fabric targets with multiple layers: Analytical formulation. *Vol. 24*. 2015. 116-150.
48. Attwood, J.P., et al., Mechanisms of the penetration of ultra-high molecular weight polyethylene composite beams. *International Journal of Impact Engineering*, 2016. 93(Supplement C): p. 153-165.
49. Ramasamy, M., et al., Experimental Investigation on Static Mechanical Properties of Glass/Carbon Hybrid Woven Fabric Composite Laminates. *Vol. 903*. 2014. 96-101.

50. Murugan, R., R. Ramesh, and K. Padmanabhan, Investigation on Static and Dynamic Mechanical Properties of Epoxy Based Woven Fabric Glass/Carbon Hybrid Composite Laminates. *Procedia Engineering*, 2014. 97(Supplement C): p. 459-468.
51. Agarwal, G., et al., Effect of stacking sequence on physical, mechanical and tribological properties of glass-carbon hybrid composites. *Friction*, 2014. 2(4): p. 354-364.
52. Song, J.H., Bending properties of carbon/glass and carbon/aramid fabric composites with various stacking structures by the VARTM method. *Fibers and Polymers*, 2016. 17(4): p. 600-607.
53. Randjbaran, E., et al., Hybrid Composite Laminates Reinforced with Kevlar/Carbon/Glass Woven Fabrics for Ballistic Impact Testing. Vol. 2014. 2014. 1-8.
54. Pandya, K.S., C. Veerraju, and N.K. Naik, Hybrid composites made of carbon and glass woven fabrics under quasi-static loading. *Materials & Design*, 2011. 32(7): p. 4094-4099.
55. Portella, E.H., et al., Influence of Stacking Sequence on the Mechanical and Dynamic Mechanical Properties of Cotton/Glass Fiber Reinforced Polyester Composites. *Materials Research*, 2016. 19: p. 542-547.
56. Hameed, N., et al., Mechanical properties of poly(styrene-co-acrylonitrile)-modified epoxy resin/glass fiber composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 2008. 110(6): p. 3431-3438.
57. Enfedaque, A., et al., Effect of Glass Fiber Hybridization on the Behavior Under Impact of Woven Carbon Fiber/Epoxy Laminates. *Journal of Composite Materials*, 2010. 44(25): p. 3051-3068.
58. Alexander F. St. Claire, T.J.I., Michael Noland,, LAYERING OF AIR GAPS TO IMPROVE ARMOR PROTECTION, in United States. 2012
59. Dey, S., et al., On the ballistic resistance of double-layered steel plates: An experimental and numerical investigation. *International Journal of Solids and Structures*, 2007. 44(20): p. 6701-6723.

60. Tan, V.B.C.L., C. T.; and Cheong, C. H. , Perforation of high-strength fabric by projectiles of different geometry. *Int. J. Impact Eng*, 2003. 28: p. 207-222.
61. Tan V. B. C.; Shim, V.P.W.a.Z., X., Modelling crimp in woven fabrics subjected to ballistic impact. *Int. J. Impact Eng. ,* 2005. 32 p. 561-574.
62. Hu, D., et al., Investigation on the ballistic behavior of mosaic SiC/UHMWPE composite armor systems. *Ceramics International*, 2017. 43(13): p. 10368-10376.
63. P., K., Effects of Diol Molecular Weight on Properties of Benzoxazine-Urethane Polymer Alloys for Ballistic Armor Applications in Chemical Engineering. 2006, Chulalongkorn University.
64. PBO Fiber-Zylon. Technical Information Revised 2005, 6.
65. Demir, T., M. Übeyli, and R.O. Yıldırım, Effect of Hardness on the Ballistic Impact Behavior of High-Strength Steels Against 7.62-mm Armor Piercing Projectiles. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2009. 18(2): p. 145-153.
66. Demir, T., M. Übeyli, and R.O. Yıldırım, Investigation on the ballistic impact behavior of various alloys against 7.62mm armor piercing projectile. *Materials & Design*, 2008. 29(10): p. 2009-2016.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวธัญชนก นุชสุภาพ เกิดเมื่อวันที่ 26 ตุลาคม พ.ศ. 2535 ที่จังหวัดจันทบุรี เข้าศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนศรียานุสรณ์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ในปี 2557 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2558

การเผยแพร่ผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

T. Noochsuparb, M. Okhawilai and S. Rimdusit, Effects of Lamination Stacking Design of Carbon/Glass Fabric Reinforced Polybenzoxazine Composites for Hard Ballistic Armor Applications, Oral Presentation, The 7th International TICHE Conference (ITICHE 2017), Shangri-La Hotel, Bangkok, Thailand, October 18-20, 2017



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY