

การพัฒนาวัสดุกันกระสุนจากวัสดุผสมอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยชานอ้อย



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีการป้องกันประเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

Development of Ballistic Protective Materials Made by Bagasse Fibers  
Reinforced Epoxy Composite.



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

Faculty of Engineering  
Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาวัสดุกันกระสุนจากวัสดุผสมอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยชานอ้อย
โดย	นางสาวนนทลี อึ้งแก้ว
สาขาวิชา	วิศวกรรมและเทคโนโลยีการป้องกันประเทศ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พักเอก ดร.ณัฐพร นุตยะสกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปัญญาวัชร ว่างยาว)

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

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

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุวีรัตน์ ผลศิลป์)

นนทลี อึ้งแก้ว : การพัฒนาวัสดุกันกระสุนจากวัสดุผสมอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยชานอ้อย (Development of Ballistic Protective Materials Made by Bagasse Fibers Reinforced Epoxy Composite.) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. พันเอก ดร.ณัฐพร นุตยะสกุล, หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวัสดุกันกระสุนจากวัสดุผสมที่ผลิตจากอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยชานอ้อย ตามมาตรฐานที่กำหนดคือ NIJ-Type IIIA โดยทำสอบตามมาตรฐาน NIJ 0108.01 ballistic test วัสดุผสมใช้เส้นใยชานอ้อยในปริมาณ 0, 30, 50, 70 และ 90 Vol.% แผ่นวัสดุผสมถูกนำไปยึดติดกับแผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยเกรด AA5083-H116 ที่ความหนาแตกต่างกัน และมีการวิเคราะห์ชิ้นงานทดสอบที่จัดลำดับชั้นวัสดุแตกต่างกันในการประกอบเป็นวัสดุกันกระสุน จากการทดสอบพบว่ามอดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุผสมเพิ่มขึ้นถึง 54.32% จากการทดสอบยิงกระสุนจริงพบว่า เมื่อนำแผ่นวัสดุผสมมาไว้เป็นแผ่นหน้าของวัสดุกันกระสุนจะสามารถต้านทานการเจาะทะลุตามมาตรฐาน NIJ-Type IIIA ได้ดีกว่าเมื่อนำแผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยเกรด AA5083-H116 มาไว้ที่ด้านหน้า



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมและเทคโนโลยีการป้องกัน ลายมือชื่อนิสิต .....

ประเทศ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2560 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 5770553221 : MAJOR DEFENSE ENGINEERING AND TECHNOLOGY

KEYWORDS: BAGASSE FIBERS / EPOXY REINFORCED BAGASSE FIBERS / BALLISTIC PROTECTIVE MATERIAL

NONTALEE AONGKEAW: Developement of Ballistic Protective Materials Made by Bagasse Fibers Reinforced Epoxy Composite.. ADVISOR: ASSOC. PROF. SEKSAK ASAVAVISITHCHAI, Ph.D., CO-ADVISOR: ASST. PROF. COLONELNUTHAPORN NUTTAYASAKUL, Ph.D., pp.

The present research aims to develop a ballistic protective material made by bagasse fiber-reinforced epoxy composites, following the requirement of NIJ-Type IIIA threats using NIJ 0108.01 ballistic test standard. The content of bagasse fibers, used in the composite specimens, are 0, 30, 50, 70 and 90 Vol.%. The panels of composites were attached to AA5083-H116 aluminium alloy specimens with various thicknesses. Analysis of different arrangement of material layers was also conducted. It was found that flexural modulus of composites increased up to 54.32%. Following the ballistic impact testing, the arrangement of ballistic protective specimens with composite panels as face sheet, it can successfully resist the NIJ-Type IIIA treat better than the panels with AA5083-H116 aluminium alloy at the front.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

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

Advisor's Signature .....

Academic Year: 2017

Co-Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบิดา-มารดาที่ได้อภิบาลเลี้ยงดูข้าพเจ้ามาจนถึงทุกวันนี้ ขอขอบคุณที่ให้โอกาสและสนับสนุนข้าพเจ้าในทุกด้านโดยเฉพาะด้านการศึกษาที่ดีอย่างเต็มกำลัง

ขอขอบคุณผู้มีพระคุณทุกท่านที่ให้การสนับสนุนไม่ว่าจะด้านใดทั้งโดยตรงและโดยอ้อม

ขอขอบคุณครู-อาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาไม่ว่าในระดับชั้นใด หากไม่ได้ความเมตตาจากพวกท่านข้าพเจ้าคงไม่มีวันนี้

ขอขอบคุณ รศ.ดร. เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย และ ผศ.พันเอก ดร. อนุรักษ์ นุทยสกุล ที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษาด้วยดีในทุกเรื่องตลอดการทำวิจัย

ขอขอบคุณโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า จังหวัดนครนายก และ โรงงานวัตถุระเบิดทหาร จังหวัดนครสวรรค์ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำการทดสอบ และอำนวยความสะดวกอย่างดีตลอดการทดสอบ

ข้าพเจ้าขอขอบคุณบุคคลทั้งหลายที่กล่าวมาด้วยใจจริงอีกครั้ง ความสำเร็จทั้งหมดในวันนี้จะไม่มีขึ้นได้เลยหากไม่ได้ความเมตตาจากท่านทั้งหลายที่มีให้แก่ข้าพเจ้า ข้าพเจ้าขอยกความชอบทั้งหมดให้แก่ท่านทั้งหลายที่ทำให้ข้าพเจ้าประสบความสำเร็จ และมีกำลังจะไปช่วยเหลือผู้อื่นต่อไป



## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	1
สารบัญรูปภาพ.....	1
บทที่ 1 .....	1
บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 .....	4
วรรณกรรมปริทัศน์.....	4
2.1 วัสดุกันกระสุน.....	4
2.1.1 การปะทะกันของวัตถุ.....	7
2.2 วัสดุในการผลิต .....	19
2.2.1 อะลูมิเนียมผสม.....	19
2.2.2 พอลิเมอร์เทอร์โมเซตติง .....	28
2.2.3 วัสดุผสมเนื้อพีนพอลิเมอร์เสริมเส้นใย.....	30
บทที่ 3 .....	49
ระเบียบวิธีวิจัย .....	49

3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย .....	49
3.2 อุปกรณ์/เครื่องมือ.....	51
3.2.1 อุปกรณ์เตรียมเส้นเส้นใย .....	51
3.2.2 อุปกรณ์งานเรซินและงานสุญญากาศ.....	52
3.2.3 อุปกรณ์ตัดแต่งชิ้นงาน .....	54
3.2.4 อุปกรณ์/เครื่องมือทดสอบ .....	54
3.3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	56
3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมเส้นใย .....	56
3.3.3 การผลิตวัสดุเกราะกันกระสุน.....	61
3.4 การทดสอบการป้องกันกระสุน ตามคู่มือทดสอบ NIJ Standard 0108.01.....	61
3.4.1 ชิ้นงานทดสอบทดสอบ (Sampling).....	61
3.4.2 เครื่องมือ/อุปกรณ์การทดสอบ.....	62
3.5 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน.....	64
3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล .....	70
3.5.1 การกระจายตัวของเส้นใย.....	70
3.5.2 การทดสอบการต้านทานแรงตัดโค้ง.....	71
3.5.3 การทดสอบการป้องกันกระสุน .....	71
บทที่ 4 .....	73
ผลการวิจัย .....	73
4.1 เส้นใยชานอ้อย.....	73
4.2 ผลการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างของชิ้นงานทดสอบ.....	74
4.2.1 แผ่นอะลูมิเนียมผสมเกรด AA5083 .....	74
4.2.2 แผ่นวัสดุผสม.....	75

4.2.4	ชิ้นงานทดสอบการป้องกันกระสุน .....	77
4.3	ผลการทดสอบสมบัติทางกลในห้องปฏิบัติการ .....	80
4.3.1	ผลการทดสอบแรงดึง (Tensile test).....	80
4.3.2	ผลการทดสอบแรงอัด .....	85
4.3.3	ผลการทดสอบแรงดัด .....	87
4.3.4	ผลการทดสอบการต้านทานแรงกระแทก (Impact test).....	89
4.4	ผลการทดสอบการต้านทานกระสุน.....	91
4.4.1	วัสดุกันกระสุนที่มีแผ่นอะลูมิเนียมเป็นส่วนหน้า.....	91
4.4.2	วัสดุกันกระสุนที่มีแผ่นวัสดุผสมเป็นส่วนหน้า.....	94
บทที่ 5	.....	99
วิเคราะห์ผลการวิจัย	.....	99
5.1	เส้นใยชานอ้อย.....	99
5.2	ผลของปริมาณเส้นใยในชิ้นงานวัสดุผสม .....	100
5.3	ผลของความหนาของแผ่นอะลูมิเนียมผสมเกรด AA 5083 .....	100
5.4	ผลของการจัดเรียงวัสดุ .....	104
บทที่ 6	.....	108
สรุปผลวิจัย.....	.....	108
.....	.....	109
รายการอ้างอิง .....	.....	109
ภาคผนวก ก.....	.....	113
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	.....	122

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2. 1	ระดับการป้องกันและข้อกำหนดอาวุธทดสอบ [7]	17
ตารางที่ 2. 2	ธาตุผสมในอะลูมิเนียม AA 5083-H116 [13]	20
ตารางที่ 2. 3	คุณสมบัติทางกายภาพของอะลูมิเนียม AA 5083-H116 [13]	20
ตารางที่ 2. 4	คุณสมบัติทางกลอย่างน้อยที่สุดของเกราะอะลูมิเนียมผสมที่ใช้ในทางทหาร [14]	22
ตารางที่ 2. 5	ปริมาณธาตุผสมของเกราะอะลูมิเนียมผสมที่กำหนดใช้ในทางทหาร (%) [14]	22
ตารางที่ 2. 6	ความหนาชิ้นงานตามกระสุนและมุมที่กำหนด [14]	25
ตารางที่ 2. 7	ความเร็วคงค้างหลังการปะทะของชิ้นงานทดสอบแต่ละเงื่อนไข [15]	26
ตารางที่ 2. 8	ระยะความลึกการเจาะทะลุของชิ้นงานทดสอบแต่ละเงื่อนไข [15]	27
ตารางที่ 2. 9	คุณสมบัติสำคัญของอีพอกซีบางชนิด [16]	30
ตารางที่ 2. 10	แสดงข้อดีข้อเสียของวัสดุธรรมชาติ [22]	34
ตารางที่ 2. 11	การใช้พลังงานในการผลิตเส้นใย [23]	35
ตารางที่ 2. 12	ความแตกต่างของระยะลึกที่ Clay witness ด้านหลังชิ้นงานทดสอบ [25]	37
ตารางที่ 2. 13	คุณสมบัติด้านความแข็งแรงของชานอ้อย [22]	39
ตารางที่ 2. 14	คุณสมบัติทางกลของวัสดุหลังทดสอบคุณสมบัติทางกล [27]	40
ตารางที่ 4. 1	ข้อมูลทางกายภาพของเส้นใยชานอ้อย	74
ตารางที่ 4. 2	สมบัติจำเพาะของวัสดุกันกระสุน	79
ตารางที่ 4. 3	ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงของอะลูมิเนียมผสม AA5083	81
ตารางที่ 4. 4	ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานวัสดุผสม	82
ตารางที่ 4. 5	ผลการทดสอบแรงอัดของชิ้นงานวัสดุผสม	86

ตารางที่ 4. 6 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นงานอีพอกซีเรซิน .....	87
ตารางที่ 4. 7 ผลการทดสอบแรงกระแทกของวัสดุผสม .....	90
ตารางที่ 4. 8 ผลการตรวจสอบชิ้นงานวัสดุกันกระสุนที่มีแผ่นอะลูมิเนียมหนา 8 mm เป็นส่วนหน้าของแผ่นวัสดุผสม .....	92
ตารางที่ 4. 9 ผลการตรวจสอบชิ้นงานวัสดุกันกระสุนที่มีแผ่นอะลูมิเนียมหนา 10 mm เป็นส่วนหน้าของแผ่นวัสดุผสม .....	93
ตารางที่ 4. 10 ผลการตรวจสอบชิ้นงานวัสดุกันกระสุนที่มีส่วนหลังเป็นแผ่นอะลูมิเนียมหนา 6 mm .....	95



## สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2. 1 ลักษณะเด่นของเกราะสำหรับบุคคลและเกราะสำหรับยานพาหนะ [1].....	5
รูปที่ 2. 2 ภายนอกรถ MTV ที่เป็น LTAS ซึ่งยึดด้วยสกรู [2].....	6
รูปที่ 2. 3 รถ U-kit ที่ติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ [2].....	6
รูปที่ 2. 4 ความก้าวหน้าของการออกแบบโครงสร้างตัวถังใน ซ้ายบน คือภายในห้องเครื่อง ขวาบน คือ ภายในห้องเครื่องที่วาดจากโปรแกรม ล่างสุด คือ ชิ้นส่วนเกราะหุ้มที่ออกแบบจากโปรแกรม [2].....	7
รูปที่ 2. 5 การปะทะแนวตรง [4].....	8
รูปที่ 2. 6 การปะทะแนวเฉียง [4].....	8
รูปที่ 2. 7 อนุภาคที่แยกจากกันหลังการปะทะในแนวตรง [4].....	9
รูปที่ 2. 8 การปะทะแนวเฉียงของอนุภาค [4].....	11
รูปที่ 2. 9 แนวการปะทะของการปะทะแนวเฉียง [4].....	11
รูปที่ 2. 10 เส้นโค้งภาระงานและพลังงานต่อเวลาในแต่ละช่วงที่ตัวแปร ที่วิเคราะห์ขึ้นหลังจาก การทดสอบการปะทะ [5].....	13
รูปที่ 2. 11 กระสุนปืน .44mm S&W Special (Lead semi-wadcutter) [9].....	16
รูปที่ 2. 12 กระสุนปืน 9mm Lugar (9mm Parabellum) [9].....	16
รูปที่ 2. 13 ตำแหน่งอุปกรณ์การทดสอบตามคู่มือ NIJ Standard 0108.01.....	18
รูปที่ 2. 14 กราฟแสดงผลการยิงทดสอบด้วยกระสุน 0.50 cal FSP [14].....	23
รูปที่ 2. 15 ชิ้นงานทดสอบ AA 7039, AA 5083 และ AA 5059 หลังการยิงทดสอบตามลำดับ [14].....	24
รูปที่ 2. 16 กราฟแสดงผลการยิงขึ้นทดสอบด้วยกระสุน 0.30 cal AP [14].....	24
รูปที่ 2. 17 กราฟแสดงผลการทดสอบการยิงขึ้นทดสอบด้วยกระสุน 20 mm FSP [14].....	25
รูปที่ 2. 18 โครงสร้างพื้นฐานของกลุ่มอีพอกไซด์ (Epoxide group) [16].....	30
รูปที่ 2. 19 ตัวอย่าง Curaua fiber [25].....	36

รูปที่ 2. 20 การเรียงตัวของชิ้นงานทดสอบ [25] .....	36
รูปที่ 2. 21 การตรวจสอบระยะลึกของการเจาะทะลุที่ Clay witness [25].....	37
รูปที่ 2. 22 ลำดับการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากอ้อย [22].....	38
รูปที่ 2. 23 ภาพขยายจากกล้อง SEM (a) เส้นใยที่ไม่ได้ปรับปรุง (b) เส้นใยที่ผ่านการปรับปรุง ด้วยสารละลาย 5% NaOH [27].....	41
รูปที่ 2. 24 ผลของเวลา Holding time ที่มีต่อ Flexural properties ของเส้นใยชานอ้อย [29]....	42
รูปที่ 2. 25 ปริมาณเส้นใยที่มีผลต่อ Flexural properties ของเส้นใยชานอ้อย [29].....	42
รูปที่ 3. 1 เนื้ออีพอกซีเรซิน E700 (ฝาสีน้ำเงิน) และฮาร์ดเดนเนอร์ H777 (ฝาสีแดง).....	50
รูปที่ 3. 2 ชานอ้อยที่หีบเอาน้ำอ้อยออกแล้ว (ซ้าย) และน้ำดื่มสะอาดตรา จทบ.พช. (ขวา).....	50
รูปที่ 3. 3 กรดอะซิติกเข้มข้น 12 mol (ซ้าย) โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 50% (ขวา).....	51
รูปที่ 3. 4 ปีกเกอร์ขนาด 50 ml (ซ้าย) และปีกเกอร์ขนาด 1000 ml (ขวา).....	52
รูปที่ 3. 5 อุปกรณ์งานเรซิน .....	53
รูปที่ 3. 6 อุปกรณ์งานสุญญากาศ .....	53
รูปที่ 3. 7 อุปกรณ์การตัดแต่งชิ้นงาน .....	54
รูปที่ 3. 8 เครื่อง Universal testing machine (ซ้าย) และเครื่องทดสอบการกระแทกแบบชาร์ป ปี (Charpy impact test) (ขวา).....	55
รูปที่ 3. 9 เครื่องมือทดสอบการป้องกันกระสุนวัสดุโรงงานวัตถุระเบิดทหาร .....	56
รูปที่ 3. 10 ขั้นตอนการเตรียมเส้นใย.....	57
รูปที่ 3. 11 ลำดับการเตรียมเส้นใยชานอ้อยก่อนล้าง.....	57
รูปที่ 3. 12 การเตรียมผิวและจัดเก็บเส้นใย.....	58
รูปที่ 3. 13 ขั้นตอนการผลิตชิ้นงานทดสอบ .....	59
รูปที่ 3. 14 ภาพวาดกระบวนการดูดอากาศ .....	60
รูปที่ 3. 15 การผลิตชิ้นงานอีพอกซีเสริมเส้นใยชานอ้อย .....	60

รูปที่ 3. 16 การเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบหมายเลข 1 วัดขนาด หมายเลข 2 เลื่อยตัดตามที่วัดขนาด และหมายเลข 3 ตะไบให้ผิวชิ้นงานเรียบสม่ำเสมอ .....	61
รูปที่ 3. 17 ขนาดชิ้นงานด้านข้าง และหน้าตัด (a) (b) และ (c) ชิ้นงานด้านข้างอีพอกซีเรซินเสริมชานอ้อยยึดติดกับอะลูมิเนียม 10mm 8mm และ 6mm ตามลำดับ (d) หน้าตัดชิ้นงานด้านอะลูมิเนียม.....	62
รูปที่ 3. 18 หมายเลข 1 ตำแหน่งจับยึดชิ้นงาน และเครื่องวัดความเร็ว หมายเลข 2 เครื่องยิงทดสอบ หมายเลข 3 ตำแหน่งโดยรวมของอุปกรณ์ยิงทดสอบ .....	63
รูปที่ 3. 19 การติดตั้งชิ้นงาน และตรวจสอบชิ้นงานหลังยิงทดสอบ.....	64
รูปที่ 3. 20 ชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึงตาม ASTM D5083-02 [32] .....	65
รูปที่ 3. 21 ชิ้นงานทดสอบการตัดโค้งตามมาตรฐาน ASTM D5023-07 [Vernice A, #36].....	65
รูปที่ 3. 22 ชิ้นงานสำหรับทดสอบการกดอัดตามมาตรฐาน ASTM D6108-03 [Vernice A, #37].....	66
รูปที่ 3. 23 ชิ้นงานสำหรับทดสอบการกระแทกตามมาตรฐาน ASTM D6110-06 [Vernice A, #37].....	66
รูปที่ 3. 24 ชิ้นงานสำหรับทดสอบการต้านทานแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM B577M-07 [Vernice A, #35].....	66
รูปที่ 3. 25 ชิ้นงานสำหรับทดสอบการกระแทกตามมาตรฐาน ASTM E23-07a [Vernice A, #34].....	67
รูปที่ 3. 26 ชิ้นงานอีพอกซีเรซินเส้นใยสำหรับทดสอบการดึง การตัดโค้ง การกระแทก และการกดอัด .....	68
รูปที่ 3. 27 ชิ้นงานอะลูมิเนียมสำหรับทดสอบการดึง .....	68
รูปที่ 3. 28 ชิ้นงานอะลูมิเนียมสำหรับทดสอบการกระแทก.....	69
รูปที่ 3. 29 การทดสอบการระแทก หมายเลข 1 ติดตั้งชิ้นงานในตำแหน่งที่จะกระแทก หมายเลข 2 ติดตั้งค้อนในตำแหน่งที่จะปล่อย หมายเลข 3 ปล่อยค้อนกระแทกชิ้นงาน.....	69
รูปที่ 3. 30 การจัดวางชิ้นงานอะลูมิเนียมเพื่อทดสอบการกระแทก .....	70
รูปที่ 3. 31 การจัดเรียงชิ้นงาน (a) อะลูมิเนียมเป็นส่วนหน้า (b) วัสดุผสมเป็นส่วนหน้า .....	72



รูปที่ 4. 1 เส้นใยชานอ้อยที่ผ่านการปรับปรุงผิว (a) ภาพจากกล้องถ่ายภาพ และ (b) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แสงที่กำลังขยาย x100 .....	73
รูปที่ 4. 2 ภาพ SEM แสดงเส้นใยชานอ้อยภายหลังการปรับปรุงผิว .....	74
รูปที่ 4. 3 แผ่นอะลูมิเนียมเกรด AA5083 .....	75
รูปที่ 4. 4 ลักษณะกายภาพด้านหน้าของแผ่นวัสดุผสม .....	76
รูปที่ 4. 5 การกระจายตัวของเส้นใยในแผ่นวัสดุผสม .....	76
รูปที่ 4. 6 ลักษณะของเส้นใยชานอ้อยที่เสริมในชิ้นงานวัสดุผสมในปริมาณต่าง ๆ .....	77
รูปที่ 4. 7 โครงสร้างอะลูมิเนียม AA5083-H116 กำลังขยาย 100 เท่า .....	78
รูปที่ 4. 8 โครงสร้างอะลูมิเนียม AA 5083-H116 จากกล้อง TEM .....	78
รูปที่ 4. 9 การยึดติดกันระหว่างแผ่นวัสดุผสมและแผ่นอะลูมิเนียม .....	79
รูปที่ 4. 10 กราฟความเค้น-ความเครียดจากแรงดึงของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม .....	80
รูปที่ 4. 11 การดึงทดสอบชิ้นงานอะลูมิเนียม .....	81
รูปที่ 4. 12 กราฟความเค้น-ความเครียดจากแรงดึงของชิ้นงานวัสดุผสม .....	82
รูปที่ 4. 13 การทดสอบแรงดึง .....	83
รูปที่ 4. 14 ผีวรอยขาดจากการดึงทดสอบของวัสดุผสมที่เสริมเส้นใยปริมาณต่างกัน (กำลังขยาย x100) .....	84
รูปที่ 4. 15 ผีวรอยขาดจากการดึงทดสอบของวัสดุผสมที่เสริมเส้นใยปริมาณต่างกัน (กำลังขยาย x500) .....	84
รูปที่ 4. 16 กราฟความเค้น-ความเครียดจากแรงอัดของชิ้นงานวัสดุผสม .....	85
รูปที่ 4. 17 การทดสอบการกดอัดชิ้นงานแต่ละสัดส่วนเส้นใย .....	86
รูปที่ 4. 18 กราฟความเค้น-ความเครียดจากการทดสอบการดัดของชิ้นงานวัสดุผสม .....	88
รูปที่ 4. 19 การทดสอบการดัดโค้ง .....	88
รูปที่ 4. 20 ผีวรอยขาดจากการกระแทกของชิ้นงานอะลูมิเนียมเกรด AA5083 .....	89

รูปที่ 4. 21 กราฟแท่งเปรียบเทียบพลังงานการกระแทกของชิ้นงานวัสดุผสม .....	90
รูปที่ 4. 22 ผิวชิ้นงานวัสดุผสมที่แตกหักจากการกระแทก .....	91
รูปที่ 4. 23 กราฟแท่งเปรียบเทียบความหนาของแผ่นอะลูมิเนียมและความสูงรอยนูนของชิ้นงาน วัสดุกันกระสุนที่ใช้แผ่นอะลูมิเนียมเป็นส่วนหน้า .....	92
รูปที่ 4. 24 ภาพความเสียหายของชิ้นงานวัสดุกันกระสุนที่มีส่วนหน้าเป็นแผ่นอะลูมิเนียมหนา 8 mm .....	93
รูปที่ 4. 25 ภาพความเสียหายของชิ้นงานวัสดุกันกระสุนที่มีส่วนหน้าเป็นแผ่นอะลูมิเนียมหนา 10 mm.....	94
รูปที่ 4. 26 ภาพความเสียหายของชิ้นงานวัสดุกันกระสุนที่มีส่วนหลังเป็นแผ่นอะลูมิเนียมหนา 6 mm .....	96
รูปที่ 4. 27 ภาพความเสียหายของชิ้นงานวัสดุกันกระสุนที่มีส่วนหลังเป็นแผ่นอะลูมิเนียมหนา 8 mm .....	97
รูปที่ 4. 28 ภาพความเสียหายของชิ้นงานวัสดุกันกระสุนที่มีส่วนหลังเป็นแผ่นอะลูมิเนียมหนา 10 mm .....	97
รูปที่ 4. 29 กราฟแท่งเปรียบเทียบความหนาของแผ่นอะลูมิเนียมและความสูงรอยนูนของชิ้นงาน วัสดุกันกระสุนที่ใช้ส่วนหน้าเป็นแผ่นวัสดุกันกระสุน .....	98
รูปที่ 5. 1 มวลที่เคลื่อนที่จากระยะ $s_1$ ถึง $s_2$ .....	102
รูปที่ 5. 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะทาง .....	103
รูปที่ 5. 3 ภาพวาดจำลองแรงกระสุนที่ปะทะแผ่นอะลูมิเนียมที่ความหนาไม่เท่ากัน.....	103
รูปที่ 5. 4 กราฟความแตกต่างของพลังงานความเครียดในวัสดุแต่ละชั้นต่อช่วงเวลาที่ยื่นไป ..	104

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

เกราะกันกระสุนได้ถูกผลิตขึ้นเพื่อใช้ป้องกันอันตรายแก่ผู้สวมใส่หรือยานพาหนะ สิ่งของ ตลอดจนสิ่งก่อสร้าง เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายจากกระสุนปืนและสะเก็ดระเบิดต่าง ๆ เกราะกันกระสุนจะทำหน้าที่หยุดหัวกระสุนหรือสะเก็ดระเบิดที่ปะทะกับส่วนหน้าของเกราะกันกระสุน และลดคลื่นกระแทกที่เกิดจากการถ่ายเทพลังงานจลน์จากการปะทะเหล่านี้ให้น้อยที่สุด โดยทั่วไป เกราะกันกระสุนที่ใช้กับบุคคลหรือยานพาหนะจะมีความต้องการใช้วัสดุที่มีน้ำหนักเบา ในการผลิตวัสดุกันกระสุน เนื่องจากต้องการให้เกิดความสะดวกมากที่สุดในการใช้งาน ทำให้ผู้สวมใส่หรือยานพาหนะยังสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างรวดเร็วเหมือนเดิม เช่น เกราะกันกระสุนสำหรับทหาร/ตำรวจ หรือเกราะกันกระสุนที่ติดในรถยนต์ เป็นต้น ในขณะที่เกราะกันกระสุนที่ติดกับสิ่งก่อสร้างที่ไม่มีการเคลื่อนที่จะไม่คำนึงถึงเรื่องของน้ำหนักมากนัก เช่น เกราะกันกระสุนสำหรับป้อมสนาม เกราะกันกระสุนสำหรับคลังเก็บอาวุธ เป็นต้น

ในการผลิตเกราะกันกระสุน สามารถใช้วัสดุได้หลายประเภท เช่น เซรามิก โลหะ พอลิเมอร์ หรือวัสดุผสม ในปัจจุบันการใช้วัสดุผสมเพื่อเป็นเกราะกันกระสุนเป็นที่นิยมมาก เนื่องจากวัสดุผสมเกิดจากการนำเอาวัสดุต่างชนิดกันมารวมกัน ทำให้มีสมบัติเด่นเฉพาะของวัสดุต่าง ๆ รวมไว้ด้วยกันในวัสดุผสม ซึ่งไม่สามารถหาได้จากวัสดุทั่วไป โดยทั่วไป เกราะกันกระสุนที่สร้างจากวัสดุผสมจะประกอบด้วยวัสดุส่วนหน้าที่ต้องปะทะกับลูกกระสุนหรือสะเก็ดระเบิด และวัสดุส่วนหลังที่ไม่ต้องปะทะกับลูกกระสุนหรือสะเก็ดระเบิด แต่จะเป็นส่วนที่สัมผัสกับร่างกายของผู้สวมใส่หรือยานพาหนะ วัสดุส่วนหน้าของเกราะกันกระสุนจะต้องมีความแข็งแรงและความแข็งสูง มีมอดูลัสของความยืดหยุ่นสูง เพื่อที่จะหยุดหัวกระสุนหรือสะเก็ดระเบิดที่เดินทางด้วยความเร็วสูง ดังนั้น จึงนิยมใช้ โลหะที่มีความแข็งแรงสูง หรือเซรามิก เพื่อทำเป็นเกราะส่วนหน้า สำหรับวัสดุส่วนหลังของเกราะกันกระสุนนั้น ต้องมีความยืดหยุ่นสูง มีความแกร่งมาก สามารถดูดซับพลังงานจลน์จำนวนมากไว้ได้ จึงนิยมใช้วัสดุประเภทพอลิเมอร์ที่มีความเหนียวสูงหรือยาง

ชานอ้อยเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เป็นเศษที่เหลือจากการหีบเอาน้ำอ้อยออกจากลำอ้อยที่ตัดจากกอ มีการนำชานอ้อยไปใช้ประโยชน์หลายอย่าง เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงในหม้อไอน้ำ ใช้ผลิตเป็นเยื่อกระดาษร่วมกับเส้นใยธรรมชาติอื่น ใช้ผลิตเฟอฟูรอลซึ่งเป็นสารเคมีในอุตสาหกรรมไม้พลาสติก และยา เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการนำชานอ้อยมาพัฒนาเป็นเส้นใยเพื่อใช้ในวัสดุผสม เนื่องจากชานอ้อยมีโครงสร้างเป็นเส้นใยเกาะกัน มีความเหนียวและความยืดหยุ่นสูง

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาวัสดุผสมที่จะนำไปใช้เป็นเกราะกันกระสุนในยานพาหนะ เพื่อให้สามารถทำการป้องกันกระสุนได้ตามมาตรฐาน NIJ 0108.01 ระดับ 3A โดยวัสดุผสมที่ใช้ ผลิตจากเส้นใยของชานอ้อยร่วมกับอีพอกซีเรซิน และยึดติดกับแผ่นอะลูมิเนียมผสม เกรด AA5083 โดยจะทำการศึกษาโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคของวัสดุที่ใช้ทำเกราะกันกระสุน และเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้นระหว่างปริมาณสัดส่วนของเส้นใยเสริมแรง ความหนาของชั้นประกบของเกราะกันกระสุน และสมบัติทางกลของเกราะกันกระสุนนี้

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษากระบวนการผลิตวัสดุกันกระสุนที่ผลิตจากวัสดุผสมโดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมผสม ยึดติดกับอีพอกซีเรซินที่เสริมด้วยเส้นใยชานอ้อย
- 1.2.2 เพื่อตรวจสอบวิเคราะห์ความสามารถในการป้องกันกระสุนของวัสดุผสมที่มีปริมาณของเส้นใยเสริมแรงต่างกัน มีความหนาของชั้นประกบของวัสดุกันกระสุนต่างกัน
- 1.2.3 เพื่อตรวจสอบวิเคราะห์คุณสมบัติทางกลของวัสดุผสมที่ผลิตขึ้น
- 1.2.4 เพื่อผลิตพัฒนาการผลิตวัสดุกันกระสุนจากวัสดุที่หาได้ง่ายในประเทศไทย

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ใช้ชานอ้อยที่เหลือจากการคั้นน้ำ
- 1.3.2 ใช้เทอร์โมเซตติงพลาสติกชนิดอีพอกซีเรซิน (Epoxy resin) E700 เป็นวัสดุเนื้อพื้นเสริมแรงด้วยเส้นใยจากชานอ้อย และยึดติดกับแผ่นอะลูมิเนียมผสม
- 1.3.3 ใช้อะลูมิเนียมผสมเกรด AA5083 – H116 ในการวัสดุกันกระสุน
- 1.3.4 มาตรฐานที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการทดสอบประสิทธิภาพวัสดุกันกระสุนคือ NIJ Standard 0108.01 ระดับ 3A

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 มีความเข้าใจเกี่ยวกับขั้นตอนการผลิตวัสดุอีพอกซีเรซินเสริมด้วยเส้นใยจากชานอ้อย
- 1.4.2 สามารถลดน้ำหนักวัสดุกันกระสุนลง
- 1.4.3 วัสดุกันกระสุนที่ผลิตได้สามารถกันกระสุนได้ตามเป้าหมาย
- 1.4.4 มีความเข้าใจถึงขีดความสามารถในการป้องกันกระสุนของวัสดุที่ผลิตขึ้น
- 1.4.5 สามารถนำผลการทำสอบที่ได้ ใช้เป็นข้อมูลในการพิจารณาปรับปรุงการผลิตวัสดุ หรือ ต่อยอดงานวิจัยได้



## บทที่ 2

### วรรณกรรมปริทัศน์

#### 2.1 วัสดุกันกระสุน

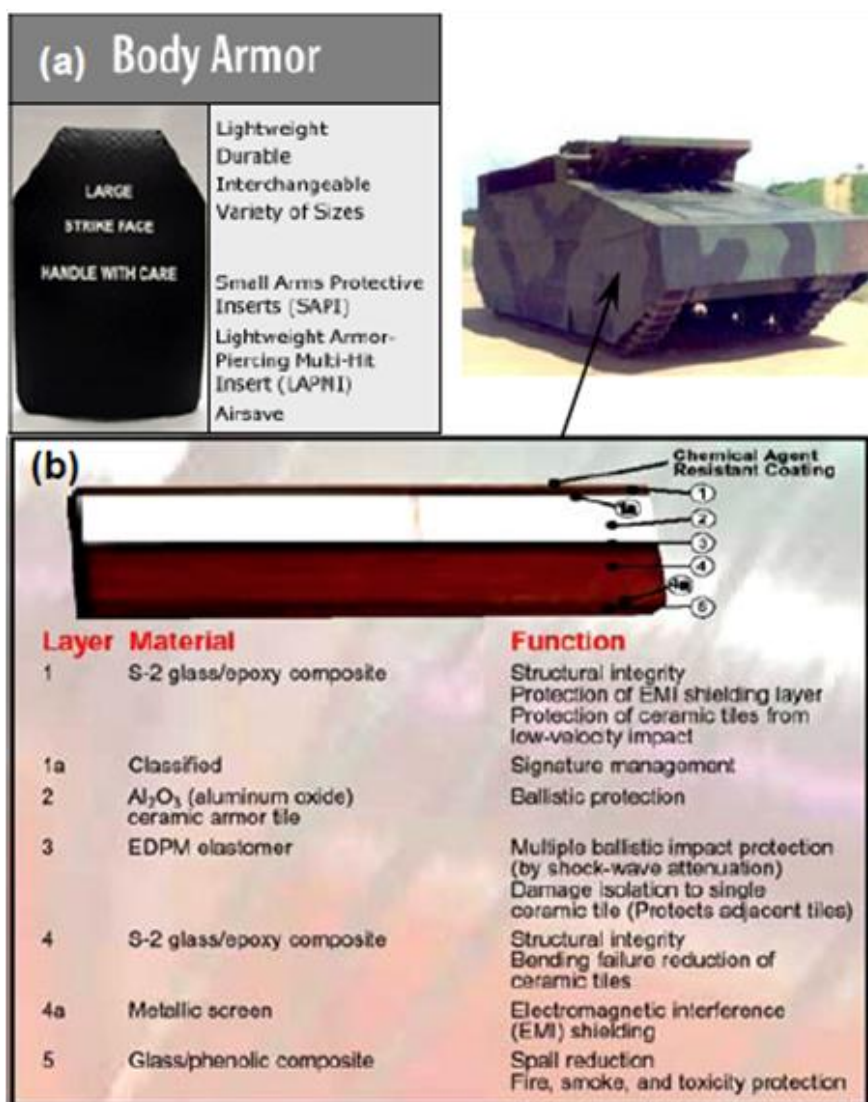
วัสดุกันกระสุนมีวัตถุประสงค์เพื่อต้านทาน/ลดแรงปะทะของกระสุนและ/หรือสะเก็ดอาวุธ ที่จะส่งผลกระทบต่อวัตถุ หรือ สิ่งมีชีวิตที่อยู่ด้านหลัง เช่น มนุษย์ เต่าปฎิกรณ์ อาวุธในคลังเก็บอาวุธ เป็นต้น

วัสดุกันกระสุนสามารถแบ่งได้หลายประเภทตามวัตถุประสงค์การใช้งาน อาจแบ่งตามมาตรฐานการป้องกัน เช่น วัสดุกันป้องกันการปะทะจากอาวุธและสะเก็ดอาวุธ (NIJ Standard-0108.01) เช่น โล่กันกระสุน ผืนกันกระสุน แผ่นกันกระสุน เกราะสำหรับยานพาหนะ เป็นต้น หมวกนิรภัย หรือหมวกสนาม (NIJ Standard-0106.01) และเกราะบุคคล (NIJ Standard-0101.06) เป็นต้น ซึ่งเกราะกันกระสุนสามารถผลิตได้จากวัสดุหลักทั้ง 3 ชนิดได้แก่ โลหะ เซรามิก และพอลิเมอร์ โดยจะเน้นผลิตจากโลหะและเซรามิก เนื่องจากมีความแข็งแรงต่อน้ำหนักมากกว่าพอลิเมอร์

เกราะสำหรับยานพาหนะ ในที่นี้จะหมายถึง วัสดุที่เป็นส่วนภายนอกที่ปกคลุมตัวรถ ที่ไม่ใช่กระจก เช่น หลังคา ประตู ฝากระโปรง เป็นต้น ซึ่งส่วนใหญ่หากพูดถึงการพัฒนาวัสดุเกราะกันกระสุนสำหรับยานพาหนะจะหมายถึงการพัฒนาเพื่อใช้กับรถยนต์เกราะ (รถถัง) หรือรถขนาดใหญ่ที่ใช้ในการลงพื้นที่ภาคสนามทางการทหาร เนื่องด้วยวัสดุดั้งเดิมนั้นมีน้ำหนักมาก และอาจมีส่วนให้ต้องเพิ่มภาระหรือลดความคล่องตัวในการขับเคลื่อน อีกทั้งยังมีราคาสูง เนื่องจากวัสดุที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นโลหะเกรดพิเศษที่ผลิตขึ้นโดยเฉพาะ ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการวิจัยพัฒนาวัสดุเพื่อใช้ทำเกราะกันกระสุนสำหรับยานพาหนะที่หลากหลาย เพื่อลดข้อจำกัดต่าง ๆ และเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่วัสดุมากขึ้น

เกราะในยุคโบราณนั้นใช้เกราะเพื่อป้องกันทหาร และม้า ซึ่งเป็นพาหนะที่ใช้ในสนามรบ โดยทำจากวัสดุที่หาได้ในพื้นที่ มาดัดแปลงเป็นเกราะ เช่น ไม้ไผ่ หนังสัตว์ เขือก โลหะ เป็นต้น และได้มีการพัฒนาเรื่อยมา จนกระทั่งเป็นเกราะสำหรับบุคคล และเกราะสำหรับยานพาหนะที่ใช้กันทุกวันนี้ [1] ได้แสดงให้เห็นถึงความเหมือน และแตกต่างระหว่างเกราะสำหรับบุคคลไว้ในรูปที่ 2.1 มีการพัฒนาต้นแบบเกราะกันกระสุนด้านในตัวถังของรถ MTV (Medium Tactical Vehicle) ซึ่งเป็น

พาหนะที่ใช้ลงพื้นที่สนามรบประเภทหนึ่ง [2] แสดงในรูปที่ 2.2 โดยผลิตเป็นต้นแบบเพื่อทดสอบใช้งานจริง มีชื่อเรียกว่า U-kit ดังรูปที่ 2.3 แสดงรถ U-kit ที่ติดตั้งชิ้นส่วนเกราะ และอุปกรณ์จำลองการปะทะเพื่อทำการทดสอบ และรูปที่ 2.4 จะแสดงส่วนที่ใกล้กับห้องเครื่องที่ต้องติดโพลัมกันกระแทก



รูปที่ 2. 1 ลักษณะเด่นของเกราะสำหรับบุคคลและเกราะสำหรับยานพาหนะ [1]

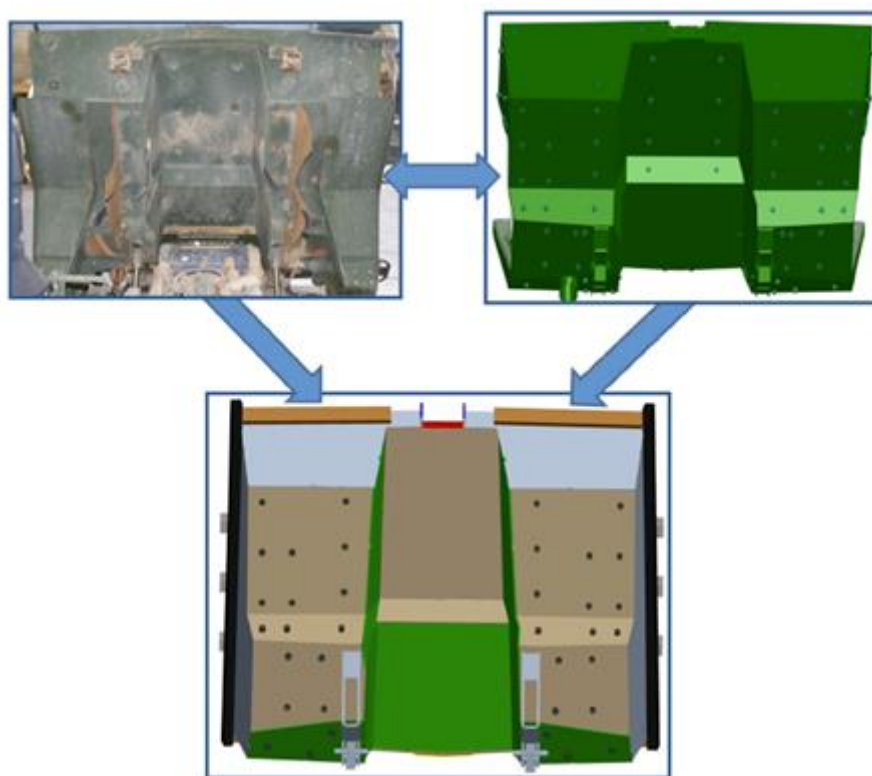


รูปที่ 2. 2 ภายนอกรถ MTV ที่เป็น LTAS ซึ่งยึดด้วยสกรู [2]



รูปที่ 2. 3 รถ U-kit ที่ติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ [2]





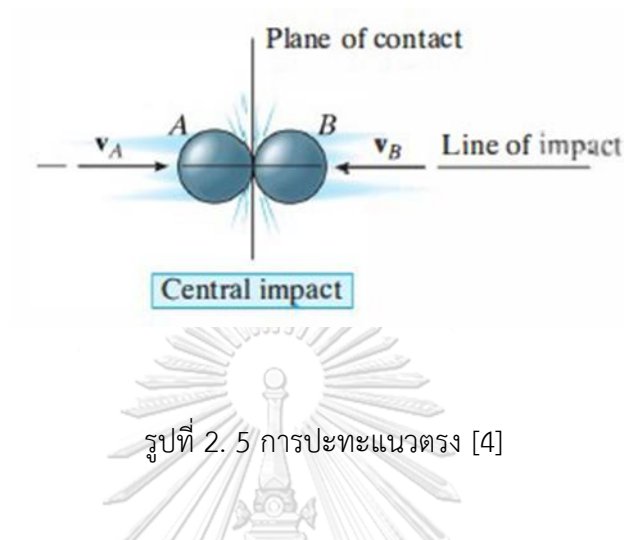
รูปที่ 2. 4 ความก้าวหน้าของการออกแบบโครงสร้างตัวถังใน ซ้ายบน คือภายในห้องเครื่อง ขวาบน คือ ภายในห้องเครื่องที่วาดจากโปรแกรม ล่างสุด คือ ชิ้นส่วนเกราะหุ้มที่ออกแบบจากโปรแกรม [2]

รถสายพานลำเลียงพลที่ใช้ในประเทศไทย (M113 A2, M113 A3) เกราะทั้งรถทำจากอะลูมิเนียม AA5083 ความหนาเฉลี่ยประมาณ 38 mm สามารถป้องกันกระสุนและสะเก็ดอาวุธในระดับ 4 ตาม NIJ Standard 0108.01 ได้ จะมีน้ำหนักพร้อมรบประมาณ 13 ตัน

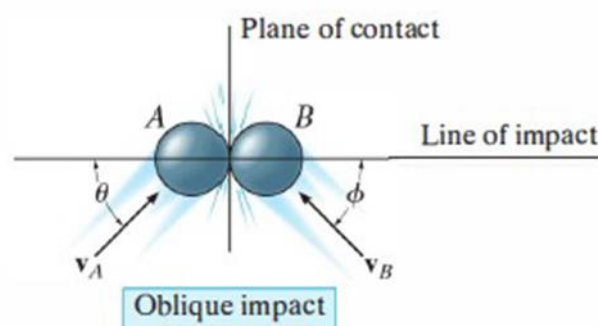
#### 2.1.1 การปะทะกันของวัตถุ

การปะทะ (Impact) เป็นปรากฏการณ์ที่วัตถุสองชิ้นหรือมากกว่าเคลื่อนมาปะทะกันด้วยแรงดลหรือแรงปฏิกิริยาที่กระทำระหว่างกันในช่วงเวลาสั้น ๆ การปะทะกันหรือการชนกันของอนุภาคแบ่งออกได้ 2 ลักษณะ คือ การปะทะแนวตรง (Direct central impact) ทิศทางการเคลื่อนที่ของจุดศูนย์กลางมวลของอนุภาคทั้งสองจะอยู่บนเส้นที่ลากผ่านศูนย์กลางทั้งสอง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยเส้นปะทะ (Line of impact) คือ เส้นที่ลากตั้งฉากกับเส้นสัมผัสของวัตถุระหว่างการปะทะ กรณีที่

การเคลื่อนที่ของอนุภาคใดอนุภาคหนึ่งหรือทั้งสองอนุภาคทำมุมกับเส้นการปะทะเรียกการปะทะ  
ลักษณะนี้ว่า การปะทะแนวเฉียง (Oblique impact) [3] แสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 การปะทะแนวตรง [4]



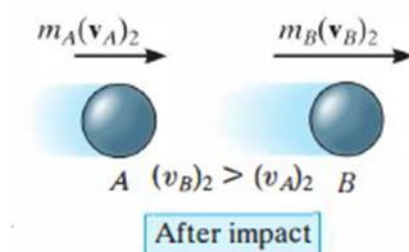
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 2.6 การปะทะแนวเฉียง [4]

การปะทะแนวตรง (Direct central impact) ขณะเริ่มปะทะกันอนุภาคทั้งสองจะเกิดการเปลี่ยนรูปหรือไม่คงตัว (Deformable or nonrigid) เช่น การยุบตัว อนุภาคในช่วงเวลาเกิดการยุบตัว จะเกิดการดลช่วงยุบตัว (Deformation impulse) มีขนาดเท่ากันกระทำซึ่งกันและกันในทิศทางตรงข้าม ในขณะที่ยุบตัวสูงสุด อนุภาคทั้งสองจะเคลื่อนไปพร้อมกันด้วยความเร็ว  $v$  เนื่องจากการเคลื่อนที่สัมผัสของทั้งสองเป็นศูนย์ ต่อมาจะเกิดการคืนตัว (Restitution) สู่สภาพเดิมหรือเปลี่ยนแปลงอย่างถาวร ในช่วงการคืนตัวจะเกิดการดลช่วงคืนตัวผลักดันอนุภาคให้แยกจากกัน ขนาดของการดลช่วงยุบตัว จะมีความมากกว่าขนาดของการดลช่วงคืนตัว เมื่ออนุภาคเริ่มแยกจากกัน โมเมนตัมของอนุภาคทั้งสอง

แสดงในรูปที่ 2.7 เมื่อ  $(v_B)_2 > (v_A)_2$  โดยปกติปัญหาในการปะทะเราจะทราบความเร็วก่อนปะทะของอนุภาคทั้งสอง และต้องการหาความเร็วหลังปะทะ  $(v_A)_2$  และ  $(v_B)_2$  เนื่องจากในระหว่างการปะทะ การดลช่วงยุบตัวและช่วงคืนตัวเป็นการดลภายใน จึงสามารถตัดทิ้ง [3] จะได้

$$(\rightarrow +) \quad m_A(v_A)_1 + m_B(v_B)_1 = m_A(v_A)_2 + m_B(v_B)_2 \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.7 อนุภาคที่แยกจากกันหลังการปะทะในแนวตรง [4]

จึงจำเป็นต้องหาสมการเพื่อหาตัวแปรไม่ทราบค่าทั้งสอง  $(v_A)_2$  และ  $(v_B)_2$  อัตราส่วนระหว่างการดลช่วงคืนตัวกับการดลช่วงยุบตัว เรียกว่า สัมประสิทธิ์การคืนสภาพ  $e$  เราสามารถเขียนสมการของค่าสัมประสิทธิ์การคืนสภาพ  $e$  ในเทอมของความเร็วสัมพัทธ์ ก่อนการปะทะและหลังปะทะของอนุภาคทั้งสอง ได้ดังนี้ [3]

$$(\rightarrow +) \quad e = \frac{(v_B)_2 - (v_A)_2}{(v_A)_1 - (v_B)_1} \quad (2.2)$$

สัมประสิทธิ์การคืนสภาพ  $e$  มีค่าเท่ากับความเร็วสัมพัทธ์ของอนุภาคทั้งสองขณะแยกจากกันหลังการปะทะ  $(v_B)_2 - (v_A)_2$  กับ ความเร็วสัมพัทธ์ของอนุภาคทั้งสองขณะเคลื่อนที่เข้าหากันก่อนการปะทะ  $(v_A)_1 - (v_B)_1$  จากการทดลองพบว่าค่าของ  $e$  จะขึ้นอยู่กับความเร็วในการปะทะ รวมทั้งขนาดและรูปร่างของอนุภาคที่ปะทะกันด้วย โดยทั่วไปสัมประสิทธิ์การคืนสภาพมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพของอนุภาคทั้งสอง [3]

การปะทะแบบยืดหยุ่น (Elastic impact,  $e = 1$ ) ถ้าการปะทะกันของวัตถุหรืออนุภาคทั้งสองเป็นแบบยืดหยุ่นสมบูรณ์ แสดงว่าการดลช่วงยุบตัว  $\int P dt$  จะมีค่าเท่ากับการดลช่วงคืนตัว  $\int R dt$  นั่นคืออนุภาคจะมีความสามารถในการยุบตัวและคืนตัวเท่ากัน ซึ่งในความเป็นจริงนั้นการปะทะกันแบบยืดหยุ่น  $e = 1$  นั้นไม่สามารถเกิดขึ้นได้

การปะทะกันแบบไม่ยืดหยุ่น (Plastic impact,  $e = 0$ ) ในกรณีนี้จะไม่เกิดการดลช่วงคืนตัว กระทำต่ออนุภาค  $\int R dt = 0$  ดังนั้นหลังการปะทะ วัตถุหรืออนุภาคทั้งสองจะติดกัน และเคลื่อนที่ไปพร้อมกันด้วยความเร็วเดียวกัน เราไม่สามารถวิเคราะห์ปัญหาการปะทะของวัตถุทั้งสอง โดยอาศัยหลักการของงานและพลังงานได้ เนื่องจากไม่ทราบค่าแรงภายในที่เกิดขึ้นระหว่างการยุบตัวและคืนตัวจะเกิดขึ้นและแปรเปลี่ยนอย่างไร อย่างไรก็ตามจากการทดลอง สามารถวัดค่าความเร็วก่อนและหลังการปะทะได้ ซึ่งทำให้การพลังงานที่สูญเสียระหว่างการปะทะได้ โดยหาผลต่างของพลังงานจลน์ [3] จากสมการ (3)

$$\sum U_{1-2} = \sum T_2 - \sum T_1 \quad (2.3)$$

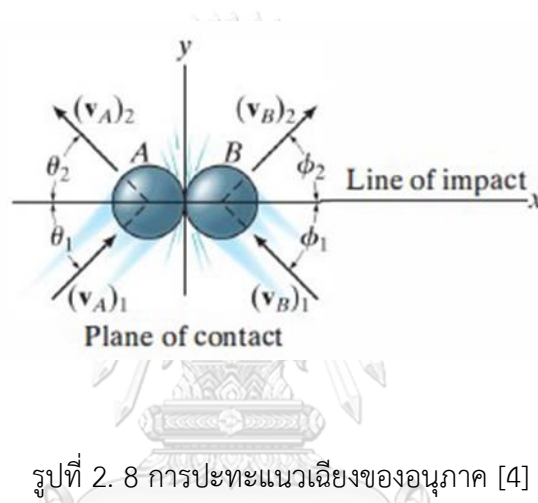
โดย  $U =$  พลังงานที่เกิดในการปะทะ

$T =$  พลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นในการปะทะ

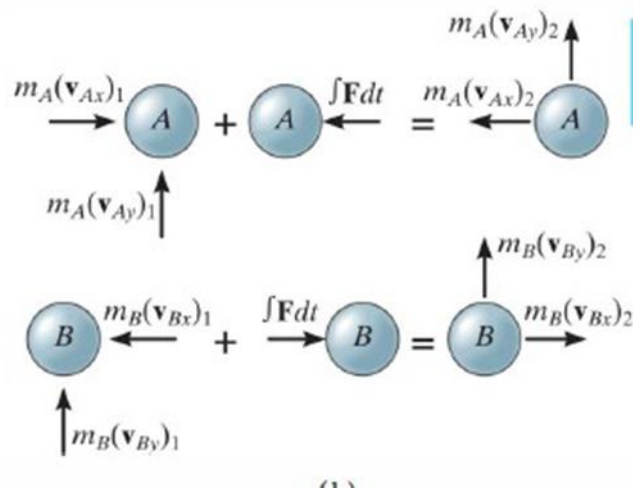
พลังงานที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน เสียง และทำให้วัตถุเปลี่ยนรูปไปอย่างถาวร ในกรณีที่เป็นการปะทะแบบยืดหยุ่นสมบูรณ์ แสดงว่าการปะทะของวัตถุทั้งสองไม่มีการสูญเสียพลังงาน แต่ถ้าเป็นการปะทะแบบไม่ยืดหยุ่น จะเกิดพลังงานที่สูญเสียมากที่สุด [3]

การปะทะแนวเฉียง (Oblique impact) พิจารณาอนุภาคมวล  $m_A$  และ  $m_B$  เคลื่อนที่อยู่ในระนาบด้วยความเร็ว  $v_{A1}$  และ  $v_{B1}$  ทำมุมแกน  $x$  เท่ากับ  $\theta_1$  และ  $\Phi_1$  แสดงว่าอนุภาคปะทะกันแนวเฉียง ดังรูปที่ 2.8 ขณะที่อนุภาคปะทะกัน เกิดแรงดลกระทำที่อนุภาคตามเส้นการปะทะเท่ากับ  $\int F dt$  และ  $-\int F dt$  กำหนดให้แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคตามแนวแกน  $y$  มีค่าน้อยมาก สำหรับการปะทะกันของอนุภาคที่มีผิวลื่นทั้งสอง ขนาดและทิศทางของความเร็วของอนุภาคขณะที่เคลื่อนแยกออกจากกันจะเป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่า จากปัญหาการปะทะ เราจะทราบความเร็วเริ่มต้นของอนุภาคทั้งสอง ดังนั้นการปะทะแนวเฉียง ดังรูปที่ 2.9 จะประกอบด้วยตัวแปรที่ไม่ทราบค่า 4 ตัวคือ  $(v_A)_2$ ,  $(v_B)_2$ ,  $\theta_2$  และ  $\Phi_2$  กำหนดให้แกน  $y$  เป็นแนวแกนสัมผัสของอนุภาคทั้งสอง และแกน  $x$  เป็นแนวแกนตามเส้นการปะทะ แรงดลช่วงยุบตัวและคืนตัวจะกระทำในแนวแกน  $x$  เท่านั้น แทนค่าความเร็วหรือโมเมนตัมแนวแกน  $x$  และ  $y$  จะได้สมการสเกลาร์ 4 สมการเพื่อหาค่าที่ไม่ทราบทั้ง 4

1. พิจารณาการอนุรักษ์โมเมนตัมที่ระบบของอนุภาคตามแกน  $x$  ดังนั้น  $\Sigma m(v_x)_1 = \Sigma m(v_x)_2$
2. สมการสัมประสิทธิ์การคืนสภาพ เป็นสมการความสัมพันธ์ของความเร็วสัมผัสของอนุภาคหลังปะทะและก่อนปะทะ ตามแนวแกน  $x$  และทิศตามเส้นแนวของการปะทะ
3. พิจารณาการอนุรักษ์โมเมนตัมที่อนุภาค  $A$  ตามแกนเส้นสัมผัสหรือแกน  $y$  ซึ่งตั้งฉากกับเส้นการปะทะ เนื่องจากไม่มีการดลตามแกน  $y$  กระทำต่ออนุภาค  $A$
4. พิจารณาการอนุรักษ์โมเมนตัมที่อนุภาค  $B$  ตามแกนเส้นสัมผัสหรือแกน  $y$  ซึ่งตั้งฉากกับเส้นการปะทะ เนื่องจากไม่มีการดลตามแกน  $y$  ของอนุภาค  $B$  [3]



รูปที่ 2. 8 การปะทะแนวเฉียงของอนุภาค [4]



รูปที่ 2. 9 แนวการปะทะของการปะทะแนวเฉียง [4]

พลังงานในการปะทะ (Impact energy) พลังงานสูงสุด ( $E_0$ ) ในช่วงที่หัวค้อนหรือหัวเครื่องมือ (Tup) ปะทะกับชิ้นงานทดสอบ [5] จะเขียนได้ดังสมการที่ (2.4)

$$E_0 = \frac{1}{2}mV_0^2 \quad (2.4)$$

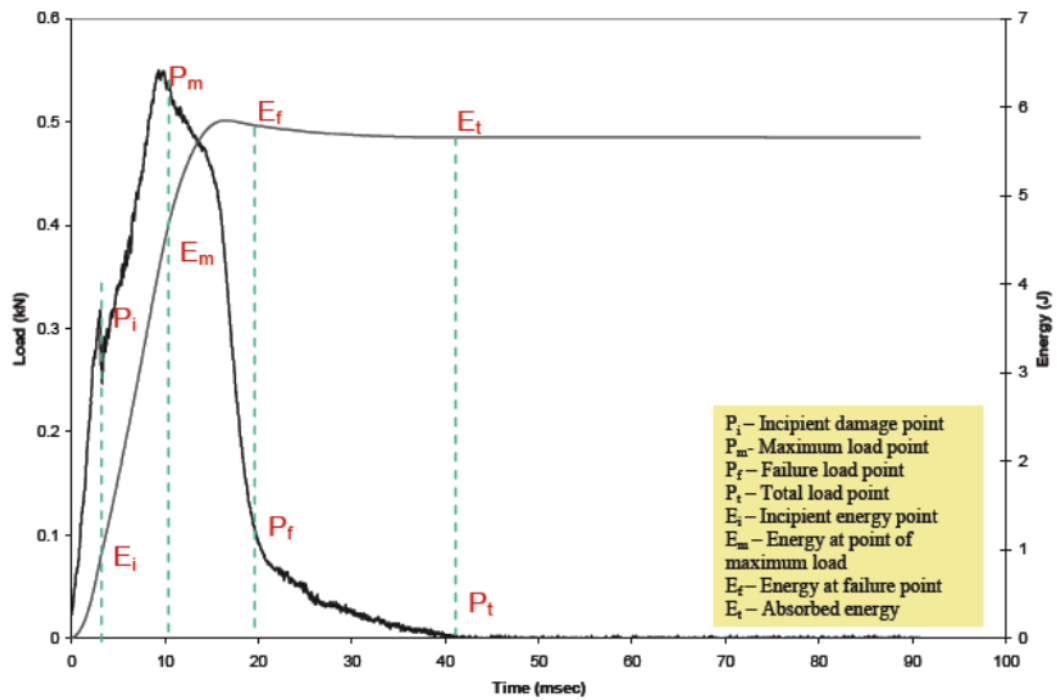
โดย  $V_0$  คือ ความเร็วของเครื่องมือที่มาปะทะ  
 $m$  คือ มวลของเครื่องมือที่มาปะทะ

สามารถสมมติให้หัวเครื่องมือตกอย่างอิสระ จะได้  $V_0 = \sqrt{2gh_0}$  โดย  $h_0$  คือ ความสูงที่ปล่อย

เมื่อเครื่องมือปะทะกับชิ้นงานทดสอบ พลังงานในตอนเริ่มจะลดลง [5] สามารถหาได้จากสมการ (2.5) แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรแต่ละตัวที่วิเคราะห์ขึ้นหลังจากเกิดการปะทะในรูปที่ 2.12

$$\Delta E_0 = E_0 - E_f = \frac{1}{2}m(V_0^2 - V_f^2) \quad (2.5)$$

โดย  $E_f$  คือ พลังงานจลน์ที่เวลา  $t$  ในช่วงหลังจากหัวเครื่องมือเริ่มปะทะกับชิ้นงานทดสอบ  
 $V_f$  คือ ความเร็วล่าสุด หรือความเร็วสุดท้ายของหัวเครื่องมือ



รูปที่ 2. 10 เส้นโค้งภาระงานและพลังงานต่อเวลาในแต่ละช่วงที่ตัวแปร ที่วิเคราะห์ขึ้นหลังจากการทดสอบการปะทะ [5]

พิจารณาตามรูปที่ 2.10 จากความสัมพันธ์ระหว่างการดลและโมเมนตัม เขียนได้เป็น

$$\int_0^{\tau} P dt = m(V_0 - V_f) \quad (2.6)$$

โดยที่ P คือภาระงาน ณ เวลา  $\tau$  , รวมสมการ (2.5) และ (2.6) ด้วยกันจะได้

$$\Delta E_0 = E_a \left[ 1 - \frac{E_a}{4E_0} \right] \quad (2.7)$$

โดย  $E_0 = V_0 \int_0^{\tau} P dt$  เขียนสมการ (2.7) ใหม่ได้เป็น

$$\Delta E_0 = \bar{V} \int_0^r P dt \quad (2.8)$$

โดยที่  $\bar{V} = \frac{1}{2}(V_0 + V_f)$

### 2.1.2 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะการกันกระสุน

มาตรฐาน NIJ (Standard of National Institute of Justice) จัดทำขึ้นเพื่อช่วยรับรองสมรรถนะของเครื่องมือ/อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการปฏิบัติงานของผู้มีหน้าที่บังคับใช้กฎหมาย และป้องกันการก่ออาชญากรรม

มาตรฐาน NIJ มีการกำหนดใช้เครื่องมือทดสอบให้น้อยที่สุด หรือเท่าที่จำเป็น เพื่อสะดวกในทดสอบ และเผยแพร่ให้ใช้เป็นมาตรฐานได้ทั้งในระดับชาติและนานาชาติ ซึ่งผู้ผลิตสามารถจัดหาและทำการทดสอบตามแนวทางที่มาตรฐานกำหนด และนำไปรับรองผลิตภัณฑ์เพื่อช่วยในการตัดสินใจของฝ่ายจัดซื้อของหน่วยงาน หรือผู้ซื้อ

มาตรฐานการทดสอบที่รับรองโดย NIJ นั้นมีหลายประเภทขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของผลิตภัณฑ์ที่นำไปใช้งาน [6, 7]

ในงานวิจัยนี้จะใช้มาตรฐาน NIJ 0108.01 เป็นมาตรฐานในการทดสอบสมรรถนะของเกราะกันกระสุนที่ผลิตขึ้น เนื่องจากเป็นมาตรฐานที่ใช้ทดสอบวัสดุกันกระสุนในหลายวัตถุประสงค์ รวมทั้งการเป็นเกราะกันกระสุนสำหรับยานพาหนะซึ่งเป็นจุดประสงค์ในการนำไปใช้ของงานวิจัยนี้ด้วย

มาตรฐาน NIJ 0108.01

มาตรฐานนี้สามารถใช้สำหรับทดสอบวัสดุทุกชนิดที่ใช้ป้องกันกระสุนและสะเก็ดจากอาวุธ (ในเสื้อเกราะกันกระสุน) รวมถึงวัสดุที่ใช้ป้องกันนอกเหนือจากมาตรฐานเกราะบุคคล (Body armor) และหมวกนิรภัย/หมวกสนาม (Ballistic helmet) เกราะกันกระสุนออกแบบให้สามารถป้องกันอันตรายตั้งแต่ปืนพกไปจนถึงปืนไรเฟิลความเร็วสูง เกราะกันกระสุนผลิตได้จากวัสดุหลายชนิดใช้เป็นโล่ป้องกันที่เคลื่อนที่ได้ ผนังห้องควบคุมหลักของป้อมตำรวจ/ป้อมสนามและวัสดุป้องกันห้องโดยสารในยานพาหนะ เป็นต้น วัสดุที่ใช้ผลิต เช่น โลหะ เซรามิก กระฉกโปร่งใส เส้นใยและพลาสติก เสริมแรงด้วยเส้นใย ชนิดใดชนิดหนึ่งหรือหลายชนิดรวมกัน [7]

ผลการปะทะของกระสุนขึ้นอยู่กับ ส่วนประกอบของกระสุน รูปร่างกระสุน ลักษณะลำกล้อง มวลกระสุน และความเร็วกระสุน เพราะปืนกระบอกเดียวกันอาจทำให้วัสดุเกิดความเสียหายต่างกัน วัสดุที่ป้องกันกระสุนปืน 357 ได้อาจจะ หรืออาจจะไม่สามารถป้องกันกระสุนจากปืนแบบเดียวกันที่มี



ความเร็วสูงกว่าได้ จึงมีการกำหนดระดับการป้องกันเพื่อใช้เป็นมาตรฐานในการยืนยันสมรรถนะของวัสดุ การทดสอบการป้องกันอ้างอิงจากมาตรฐาน NIJ 0101.02 (เกราะบุคคลสำหรับตำรวจ) และ NIJ 0106.01 (หมวกนิรภัย/หมวกสนาม) [6]

#### การจัดระดับการป้องกัน

ระดับการป้องกันตามมาตรฐานนี้แบ่งออกเป็น 7 ระดับ

ระดับ 1 (Type I : 22 LR ; 38 Special)

ระดับ 2A (Type II : Lower velocity 357 Magnum ; 9 mm)

ระดับ 2 (Type II: High velocity 357 Magnum ; 9 mm)

ระดับ 3A (Type III-A : 44 Magnum ; Submachine gun 9 mm)

ระดับ 3 (Type III : High-Powered Rifle)

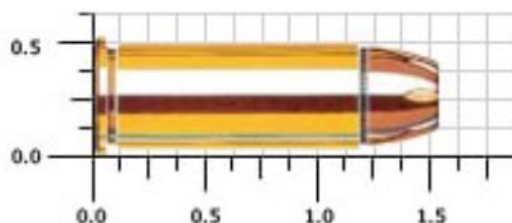
ระดับ 4 (Type IV : Armor-Piercing Rifle)

ระดับพิเศษ (Special Type) [7]

สำหรับระดับ 3A (Type III-A : 44 Magnum ; Submachine gun 9 mm) ตัวอย่างกระสุนทดสอบมีดังนี้

44 Magnum SWC Gas Checked

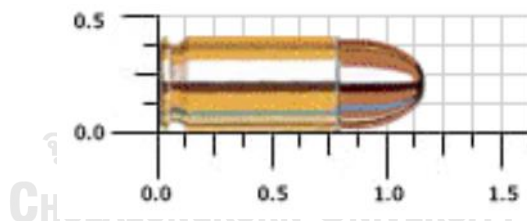
อาวุธทดสอบ 44 Magnum handgun หรือกระบอกยิงทดสอบ ขนาดกระบอกปืนพก 14-16 cm (5.5-6.25 in) มวล 15.55 g (240 gr) ความเร็ว  $426 \pm 15$  m ( $1400 \pm 50$  ft) ต่อวินาที [7] ตัวอย่างกระสุนทดสอบ 44 Magnum (lead semi-wadcutter) แรงในการปะทะประมาณ 423J [8] ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2. 11 กระสุนปืน .44mm S&W Special (Lead semi-wadcutter) [9]

### Submachine gun 9 mm

อาวุธทดสอบ 9 mm SMG หรือกระบอกยิงทดสอบ ขนาดกระบอกทดสอบ 24-26 cm (9.5-10.25 in) มวล 8.0 g (124 gr) ความเร็ว  $426 \pm 15$  m ( $1400 \pm 50$  ft) ต่อวินาที ป้องกันกระสุนปืนทุกชนิดรวมไปถึงกระสุนทุกชนิดในระดับ 1, 2 และ 2A ได้ [7] ตัวอย่างกระสุนทดสอบ 9 mm Full metal jacketed แรงในการปะทะประมาณ 494J [8] ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2. 12 กระสุนปืน 9mm Luger (9mm Parabellum) [9]

### การต้านทานกระสุนและสะเก็ดอาวุธ

การต้านทานกระสุนและสะเก็ดอาวุธ (Ballistic resistant) การต้านทานของวัสดุป้องกันแต่ละชนิดต้องผ่านการทดสอบการยิงโดยอาวุธที่ใช้ยิงระบุไว้ในตารางที่ 2.1 ตามแต่ระดับการป้องกันที่ผู้ผลิตเลือก หากเกิดการเจาะทะลุที่ แผ่นพยาน (Witness plate) จะถือว่าวัสดุไม่ผ่านการทดสอบ ความแตกต่าง และการกำหนดระดับการต้านทานระบุไว้ในตาราง

ที่ 2.1 เช่นกันในรูปแบบที่ 2.13 แสดงตัวอย่างตำแหน่งอุปกรณ์ทดสอบยิงตามคู่มือ NIJ Standard 0108.01

ตารางที่ 2. 1 ระดับการป้องกันและข้อกำหนดอาวุธทดสอบ [7]

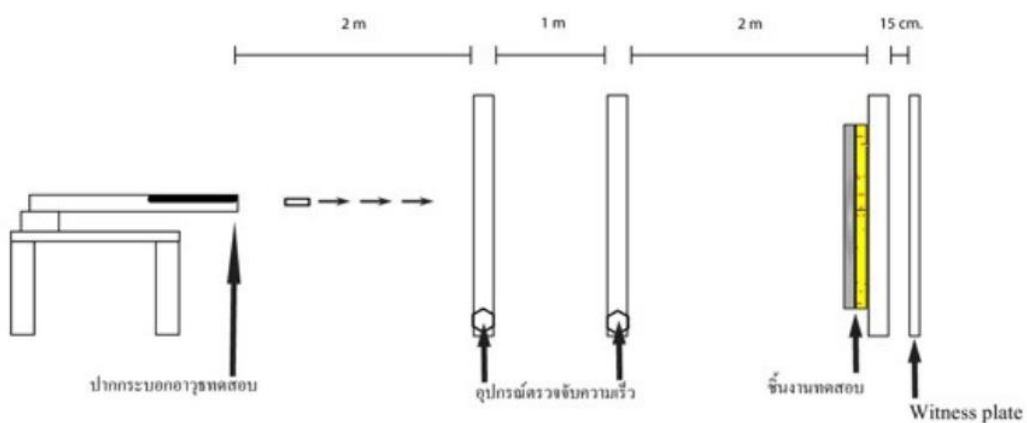
Armor Type	Test Ammunition	Nominal Bullet Mass	Suggested Barrel Length	Required Bullet Velocity	Required Hits Per Armor Specimen	Permitted Penetrations
I	22 LRHV	2.6 g	15 to 16.5 cm	320 – 12 m/s	5	0
	Lead	40 gr	6 to 6.5 in	1050 – 40 ft/s		
	38 Special	10.2 g	15 to 16.5 cm	259 – 15 m/s	5	0
	RN Lead	158 gr	6 to 6.5 in	850 – 50 ft/s		
II-A	357	10.2 g	10 to 12 cm	381 – 15 m/s	5	0
	Magnum	158 gr	4 to 4.75 in	1250 – 50 ft/s		
	JSP	8.0 g	10 to 12 cm	332 – 12 m/s	5	0
	9 mm FMJ	124 gr	4 to 4.75 in	1090 – 40 ft/s		
II	357	10.2 g	15 to 16.5 cm	425 – 15 m/s	5	0
	Magnum	158 gr	6 to 6.5 in	1395 – 50 ft/s		
	JSP	8.0 g	10 to 12 cm	358 – 12 m/s	5	0
	9 mm FMJ	124 gr	4 to 4.75 in	1175 – 40 ft/s		
III-A	44 Magnum	15.55 g	14 to 16 cm	426 – 15 m/s	5	0
	Lead SWC	240 gr	5.5 to 6.25 in	1400 – 50 ft/		
	Gas	8.0 g	24 to 26 cm	426 – 15 m/s	5	0
	Checked 9 mm FMJ	124 gr	9.5 to 10.25 in	1400 – 50 ft/		
III	7.62 mm	9.7 g	56 cm	838 – 15 m/s	5	0
	308	150 gr	22 in	2750 – 50 ft/s		
	Winchester FMJ					

ตารางที่ 2.1 ระดับการป้องกันและข้อกำหนดอาวุธทดสอบ [5] (ต่อ)

Armor Type	Test Ammunition	Nominal Bullet Mass	Suggested Barrel Length	Required Bullet Velocity	Required Hits Per Armor Specimen	Permitted Penetrations
IV	30-06 AP	10.8 g 166 gr	56 cm 22 in	868 – 15 m/s 2850 – 50 ft/s	1	0
Special Requirement *	*	*	*	*	*	*

\* These items must be specified by the user. All the items must be specified.

Abbreviations: AP - Armor Piercing, FMJ - Full Metal Jacket, JSP - Jacketed Soft Point, LRHV - Long Rifle High Velocity, RN - Round Nose, SWC - Semi-Wadcutter



รูปที่ 2. 13 ตำแหน่งอุปกรณ์การทดสอบตามคู่มือ NIJ Standard 0108.01

## 2.2 วัสดุในการผลิต

การแบ่งประเภทของวัสดุสามารถแบ่งได้หลายแบบตามแต่ละตำรา บางตำราแบ่งวัสดุเป็น 3 ประเภทได้แก่ โลหะ เซรามิก และพอลิเมอร์ ส่วนวัสดุที่มีคุณสมบัติอยู่ระหว่างวัสดุทั้ง 3 เรียกว่า วัสดุผสม บางตำราจะแบ่งเป็น 5 ประเภท ได้แก่ โลหะ เซรามิก พอลิเมอร์ สารกึ่งตัวนำ และวัสดุผสม [10] ตามแต่จะเห็นสมควร ในที่นี้จะไม่ขอจัดแบ่งประเภทของวัสดุในภาพรวมแต่จะกล่าวถึงวัสดุที่เกี่ยวข้องในการใช้ทำการวิจัยนี้เท่านั้นได้แก่ อะลูมิเนียมผสม (Aluminium alloy) พอลิเมอร์เทอร์โมเซตติง (Thermosetting polymer) และวัสดุผสมเนื้อพอลิเมอร์ (Polymer matrix composites, PMCs)

### 2.2.1 อะลูมิเนียมผสม

อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ มีโครงสร้างผลึกแบบ FCC มีความหนาแน่นประมาณ 2.699g/cm<sup>3</sup> ที่อุณหภูมิ 20°C มีความแข็งแรงจำเพาะที่ดี อะลูมิเนียมบางชนิดจึงมีการนำไปใช้เป็นชิ้นส่วนที่น้ำหนักเบา มีความแข็งแรงสูง อะลูมิเนียมเป็นวัสดุที่ขึ้นรูปง่าย ไม่เปลี่ยนแปลงสมบัติจากความเหนียวเป็นเปราะที่อุณหภูมิต่ำ ไม่เป็นพิษ สามารถรีไซเคิลได้ ด้านทานการเกิดออกซิเดชันและด้านทานการกัดกร่อนมีจุดหลอมเหลวต่ำ (660°C) อะลูมิเนียมผสมแบ่งตามการใช้งานได้สองชนิด คือ อะลูมิเนียมที่ใช้แรงขึ้นรูป (Wrought alloy) และอะลูมิเนียมหล่อ (Casting alloy) [11]

การขึ้นรูปเย็น และการเติมธาตุผสม(ธาตุผสมหลักเช่น แมกนีเซียม (Mg) ซิลิคอน (Si) แมงกานีส (Mn) เป็นต้น) เป็นการลดความต้านทานการกัดกร่อนของอะลูมิเนียมลง [12] เนื่องจากอะลูมิเนียมไวต่อออกซิเจนมาก มักเกิดชั้นฟิล์มบางที่ผิวเมื่อสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ จึงเป็นปัญหาในเรื่องการปรับปรุงผิวเพื่อใช้งาน ในการใช้แรงขึ้นรูปอะลูมิเนียมนั้นจะทำได้ง่ายเนื่องจากอะลูมิเนียมผสมค่อนข้างมีความเหนียวกว่าโลหะผสมอื่น ในที่นี้จะเลือกใช้อะลูมิเนียมผสมที่ใช้แรงขึ้นรูป AA 5083-H116 เป็นอะลูมิเนียมผสมที่มีแมกนีเซียมเป็นธาตุผสมหลักเพิ่มความแข็งแรงโดยการขึ้นรูปเย็น แสดงธาตุผสมและคุณสมบัติทางกลในตารางที่ 2.2 และ 2.3 เป็นเกรดที่หาซื้อได้ภายในประเทศและมีความน่าเชื่อถือว่ามี การนำไปใช้เป็นวัสดุกันกระสุน

ตารางที่ 2. 2 ธาตุผสมในอะลูมิเนียม AA 5083-H116 [13]

Element	Wt %	Element	Wt %	Element	Wt %
Al	92.4-95.6	Si	Max. 0.4	Ti	Max. 0.15
Mg	4-4.9	Cr	0.05-0.25	Zn	Max. 0.25
Mn	0.4-1	Fe	Max. 0.4	Cu	Max. 0.1
Other, each; Max. 0.05					
Other, total; Max. 0.15					

ตารางที่ 2. 3 คุณสมบัติทางกายภาพของอะลูมิเนียม AA 5083-H116 [13]

Physical Properties	Metric	English	Note
Density	2.66 g/cm <sup>3</sup>	0.0916 lb/in <sup>3</sup>	
Hardness, Brinell	85	85	500kg load with 10mm ball, calculated value.
Ultimate tensile strength	317 MPa	46.000 ksi	
Tensile Yield Strength	228 MPa	33.00 ksi	
Elongation at Break	16 %	16 %	
Modulus of Elastic	7.03 MPa	1.02 ksi	In tension
Compression Modulus	71.1 MPa	10.40 ksi	
Modulus of Elastic*	71 MPa	10.30 ksi	* Average of tension and compression modulus about 2% greater than two modulus.
Physical Properties	Metric	English	Note
Poisson's ratio	0.33	0.33	Estimated from trend in similar alloys.

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางกายภาพของอะลูมิเนียม AA 5083-H116 [13] (ต่อ)

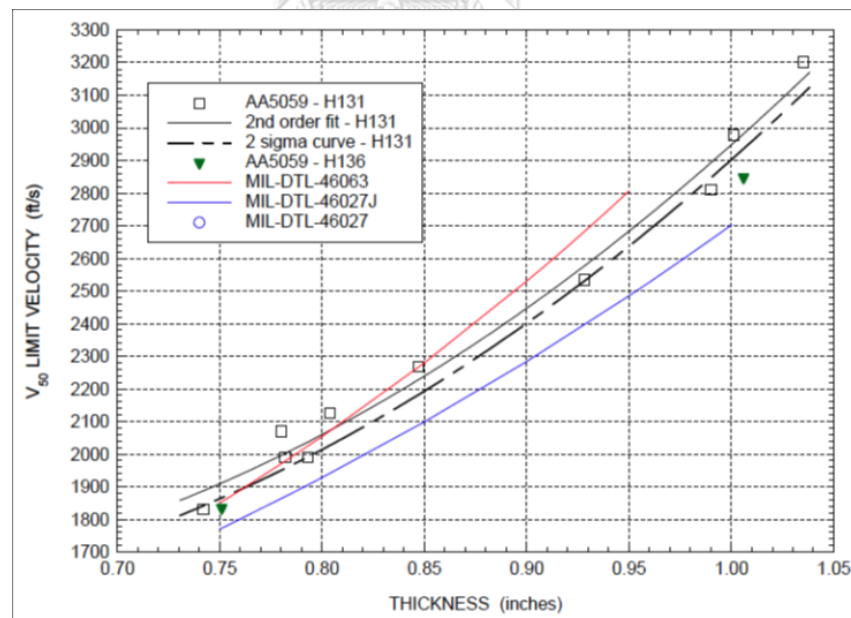
Physical Properties	Metric	English	Note
Fatigue Toughness	159MPa	23000psi	500,000,000 cycles completely reversed, stress: RR Moore Machine/Specimen.
Fracture Toughness	43MPa/m <sup>2</sup>	39.1ksi/in <sup>2</sup>	K <sub>IC</sub> ; TL orientation
Machinability	30%	30%	0-100 Scale of Aluminium Alloys
Shear Modulus	26.4GPa	3830ksi	
Shear Strength	190MPa	27600psi	Calculated Value

วัสดุกันกระสุนที่ใช้สำหรับยานพาหนะเช่น เรือ รถยนต์ เครื่องบิน ฯลฯ ต้องการวัสดุที่มีน้ำหนักเบา และแข็งแรง วัสดุที่ได้รับการยอมรับว่ามีคุณสมบัติตามต้องการและมีการใช้งานกันในปัจจุบันคือ โลหะผสมของอะลูมิเนียม (ชนิดแข็งแรงพิเศษ) เกรดที่ใช้ได้แก่ AA 5083, AA 5456, AA 5059, AA 7039, AA 2219, AA 2519 เป็นต้น โดยแสดงคุณสมบัติทางกลและธาตุผสมของทั้ง 6 เกรดในตารางที่ 2.4 และ 2.5 ตามลำดับ โดยทั่วไปเกรดที่นิยมใช้เป็นเกราะสำหรับยานพาหนะมากที่สุดคือ AA 5083 สามารถป้องกันกระสุนและสะเก็ดได้ดี ด้านทานการกัดกร่อนได้ดี มีความแข็งแรงไม่เท่า AA 7039, AA 2019 และ AA 2519 แต่ทั้ง 3 เกรดนั้นด้านทานการกัดกร่อนไม่ดีเช่น เกิดรอยร้าวเนื่องจากความเค้นนำไปสู่การเกิดการกัดกร่อนใน AA 7039 และ การเกิดรูเข็มและหลุมกร่อนใน AA 2519 เป็นต้น ทางเลือกหนึ่งที่ได้คือการปรับปรุง AA 5083 ให้มีความแข็งแรงและมีสมรรถนะในการใช้งานเพิ่มขึ้น





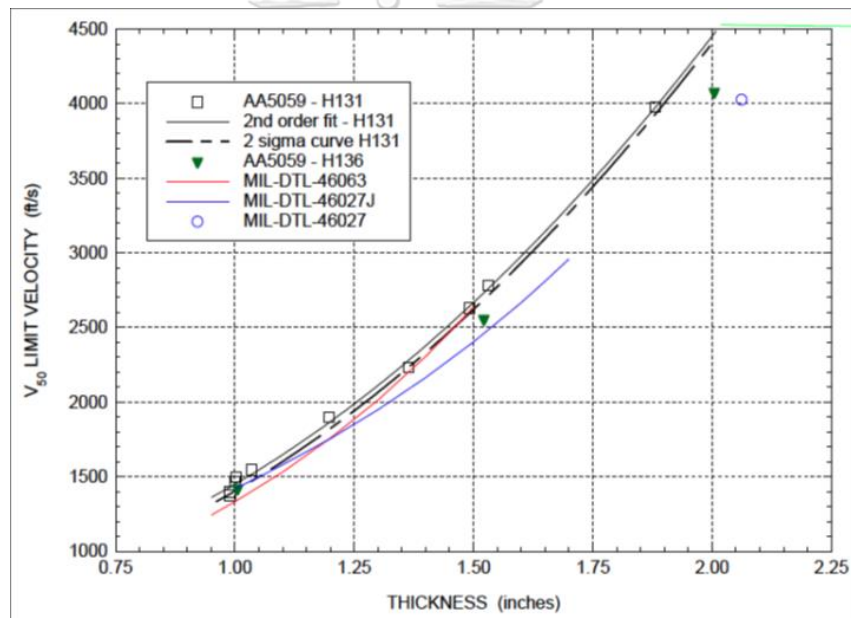
มีการศึกษาการใช้ AA 5059 แทน AA 5083 โดยทดสอบสมรรถนะในการป้องกัน เปรียบเทียบจากค่า V50 ของชิ้นงาน ในการทดสอบใช้กระสุนเจาะเกราะ 5 ชนิด ได้แก่ 0.30 cal AP, 0.50 cal FSP, 20 mm FSP, 0.30 cal AP M2, 0.50 cal AP M2 ที่ความเร็วต่างๆ [14] แสดงข้อมูลกระสุน และความหนาขึ้นทดสอบในตารางที่ 2.6 ผลการทดสอบพบว่าสมรรถนะของ AA 5083 อยู่ในช่วงกึ่งกลางการกระจายส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสมรรถนะการป้องกัน แสดงตัวอย่างกราฟระหว่าง V50 ต่อความหนาของโลหะอะลูมิเนียมผสมยิงทดสอบโดยใช้กระสุน 0.50 cal FSP ในรูปที่ 2.14 ซึ่งอยู่ระหว่าง AA 5083 (MIL-DTL-46027J, เส้นสีน้ำเงิน) และ AA 7039 (MIL-DTL-46063, เส้นสีแดง) แสดงให้เห็นว่า AA 5059 มีสมรรถนะเพียงพอที่จะใช้แทน AA 5083 ได้ ต่างจากในรูปที่ 2.16 ที่ยิงด้วยกระสุน 0.30 cal AP จะเห็นว่าผลที่ได้ไม่ต่างกันมากนักในชิ้นงานทดสอบแต่ละชนิด ในรูปที่ 2.17 แสดงผลของการยิงทดสอบด้วยกระสุน 20 mm FSP จะเห็นว่าความเหนียวของชิ้นทดสอบช่วยลดการเกิดการเจาะทะลุบนชิ้นทดสอบโดย AA 5059 สามารถต้านทานการเจาะทะลุได้มากที่สุด ดูจากรอยกระสุนภายหลังการยิงทดสอบในรูปที่ 2.15 และแสดงกราฟของผลการทดสอบด้วยกระสุน 20 mm FSP ในรูปที่ 2.17 จะเห็นว่าเมื่อความหนาเพิ่มขึ้น AA5059 ต้านทานการปะทะได้พอกับ AA 7039



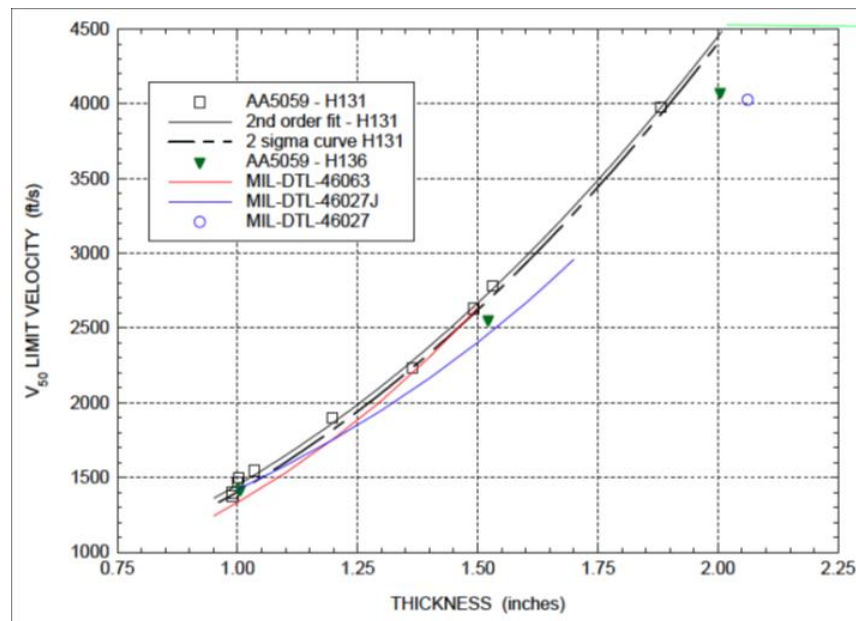
รูปที่ 2. 14 กราฟแสดงผลการยิงทดสอบด้วยกระสุน 0.50 cal FSP [14]



รูปที่ 2. 15 ชิ้นงานทดสอบ AA 7039, AA 5083 และ AA 5059 หลังการยิงทดสอบตามลำดับ [14]



รูปที่ 2. 16 กราฟแสดงผลการยิงขึ้นทดสอบด้วยกระสุน 0.30 cal AP [14]



รูปที่ 2. 17 กราฟแสดงผลการทดสอบการยิงขึ้นทดสอบด้วยกระสุน 20 mm FSP [14]

ตารางที่ 2. 6 ความหนาชิ้นงานตามกระสุนและมุมที่กำหนด [14]

Ordered Thickness (in.)	Projectile	Angle of Obliquity ( ° )
0.500-0.749	0.30 cal AP	30
0.750-1.000	0.50 cal FSP	0
1.001-1.700 <sup>a</sup>	20 mm FSP	0
1.001-2.000	0.30 cal AP M2	0
2.001-3.000	0.50 cal AP M2	0

Note: cal = caliber and FSP = Fragment simulating projectile

<sup>a</sup> Two types of projectile are required for the thickness range for 1.001-1.700 in

เนื่องจากโลหะอะลูมิเนียม AA5083 เป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพกระสุนทดสอบจากการทดสอบในรายงานนี้ได้น้อยที่สุด ประกอบกับอะลูมิเนียมเกรดนี้มีจำหน่ายในประเทศไทย จึงเลือกใช้โลหะอะลูมิเนียมเกรดนี้มาทำการปรับปรุงประสิทธิภาพในการป้องกันกระสุนในงานวิจัยนี้

มีการคำนวณ (ใช้แบบจำลองทางทฤษฎี) และทดสอบจริงในการต้านทานกระสุน NATO 0.30” Armor piercing (AP) ของวัสดุผสม Double-layered โดยวัดระยะความลึกที่เจาะ (Penetration depths) และความเร็วคงค้างหลังการปะทะ (Residual velocities) วัสดุทดสอบประกอบด้วย 5083-H116 Aluminium, 6061-T651 Aluminium, Polycarbonate(PC) และ Polymethylmethacrylate (PMMA) [15] เปรียบเทียบงานทดสอบความเร็วคงค้างหลังการปะทะ มี 4 แบบ ได้แก่ 5083-H116+ 6061-T651, 6061-T651+ 5083-H116, PC+ 5083-H116 และ PC+ 6061-T651 ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 2.7 เปรียบเทียบการทดสอบระยะความลึกการเจาะทะลุ 4 แบบ ได้แก่ 5083-H116+ 6061-T651, 6061-T651+ 5083-H116, PC+ 5083-H116 และ PMMA+ 6061-T651 ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 2.8 ผลการทดสอบทั้งจากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางทฤษฎีและการทดสอบจริงด้วยความเร็วในการปะทะที่ต่างกัน แสดงให้เห็นว่าวัสดุ Double-layered โลหะ-พอลิเมอร์ที่ใช้ 6061-T651 Aluminium เป็นโลหะนั้น มีระยะความลึกการเจาะทะลุ และ ความเร็วคงค้างหลังการปะทะน้อยกว่าวัสดุ Double-layered ที่ใช้ 5083-H116 Aluminium เป็นโลหะ และเมื่อใช้ 6061-T651 Aluminium เป็นวัสดุชั้นหน้าแทน 5083-H116 Aluminium นั้น ค่าความเร็วคงค้างหลังการปะทะและระยะความลึกการเจาะทำลุน้อยกว่าชั้นทดสอบที่ใช้ 5083-H116 Aluminium เป็นวัสดุชั้นหน้า กล่าวได้ว่า 6061-T651 Aluminium มีความสามารถในการเป็นวัสดุกันกระสุน (ที่ใช้รับการปะทะ) มากกว่า 5083-H116 Aluminium

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 2. 7 ความเร็วคงค้างหลังการปะทะของชิ้นงานทดสอบแต่ละเงื่อนไข [15]

Target type	Laminate configuration	Impact velocity (m/s)	Residual velocity (m/s)	
			Test	Model
5083-H116 + 6061-T651	15 mm 5083-H116 + 15 mm 6061-T651	914	686	662
		817	546	527
		756	446	432
		638	168	172
		537	0	0

ตารางที่ 2.7 ความเร็วคงค้างหลังการปะทะของชิ้นงานทดสอบแต่ละเงื่อนไข [15] (ต่อ)

Target type	Laminate configuration	Impact velocity (m/s)	Residual velocity (m/s)	
			Test	Model
6061-T651 + 5083-H116	15 mm 6061-T651 + 15 mm 5083-H116	915	678	668
		893	640	639
		803	511	513
		726	397	389
		631	157	170
PC + 5083-H116	12 mm PC + 15 mm 5083-H116	930	795	791
		815	677	655
		733	564	556
		590	375	354
		487	134	135
PC + 6061-T651	12 mm PC + 15 mm 6061-T651	929	758	763
		813	628	622
		732	543	518
		613	348	333
		509	0	0

ตารางที่ 2. 8 ระยะความลึกการเจาะทะลุของชิ้นงานทดสอบแต่ละเงื่อนไข [15]

Target type	Laminate configuration	Impact velocity (m/s)	Penetration depth (mm)	
			Test	Model
5083-H116 + 6061-T651	15 mm 5083-H116 + 42 mm 6061-T651	924	Perforation	Perforation
		810	42.8	45
		722	34.4	37

ตารางที่ 2.8 ระยะความลึกการเจาะทะลุของชิ้นงานทดสอบแต่ละเงื่อนไข [15] (ต่อ)

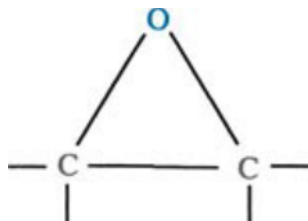
Target type	Laminate configuration	Impact velocity (m/s)	Penetration depth (mm)	
			Test	Model
		640	29.9	31
		517	24.3	22
6061-T651 + 5083-H116	15 mm 6061-T651 + 51 mm 5083-H116	895	66.0	63
		770	52.1	49
		691	39.4	40
		607	30.9	32
		515	22.4	23
PC + 5083-H116	12 mm PC + 51 mm 5083-H116	864	Perforation	Perforation
		778	55.8	56
		719	49.6	49
		632	42.3	41
		530	33.2	33
PMMA+ 6061-T651	12 mm PMMA+ 42 mm 6061-T651	911	Perforation	Perforation
		797	48.8	53
		723	42.1	46
		619	34.7	37
		527	29.5	30

### 2.2.2 พอลิเมอร์เทอร์โมเซตติง

พอลิเมอร์มีโครงสร้างที่ต่างจากเซรามิกและโลหะ คือมีโครงสร้างเป็นสายโซ่ยาวโครงสร้างสายหลัก (Backbone) เป็นคาร์บอนที่เชื่อมกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ ข้อดีของพอลิเมอร์คือมีราคาถูกและง่ายต่อการผลิต ทนต่อสารเคมีได้ดีกว่าโลหะ แต่มีข้อจำกัดคือ อุณหภูมิการใช้งานจะสูงไม่ได้มากเท่าโลหะและเซรามิก [16] วัสดุเนื้อพอลิเมอร์ที่นิยมใช้ผลิตวัสดุผสมแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักได้แก่ พอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมเซตติงเรซิน (Thermosetting resin) และพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติกเรซิน (Thermoplastic resin) เทอร์โมเซตติงพอลิเมอร์ เป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างร่างแหที่

เกิดจากการเชื่อมขวาง (Cross-linked) ของมอนอเมอร์ มีความแข็งแรง ยึดติดกับวัสดุที่นำมาประกอบได้ดี มีการคงรูปที่ดีจึงใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ดีกว่าพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติก มีความต้านทานการคืบตัว (Creep resistance) ได้ดีกว่าเทอร์โมพลาสติก เมื่อได้รับอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะไม่อ่อนตัว และเมื่อเกิดการเสียรูปจากอุณหภูมิและ/หรือความร้อนที่เพิ่มขึ้นแล้ว จะไม่สามารถกลับคืนสภาพเดิมได้ [12, 17] เทอร์โมเซตติงเรซินนิยมใช้เป็นเนื้อพื้นในวัสดุผสมเนื่องจากเป็นของเหลวที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้ขึ้นรูปได้ที่อุณหภูมิห้องโดยไม่ต้องใช้ความร้อนในการหลอม เส้นใยที่เสริมแรงแทรกตัวได้ดี กระบวนการผลิตขึ้นงานเป็นวัสดุผสมจึงมีต้นทุนต่ำกว่าเทอร์โมพลาสติกเรซิน อีกทั้งขึ้นงานผลิตภัณฑ์สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ดีกว่าเทอร์โมพลาสติกเรซิน เทอร์โมเซตติงเรซินที่นิยมใช้ผสมวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยในปัจจุบันได้แก่ พอลิเอสเตอร์เรซิน และ อีพอกซีเรซิน

อีพอกซีเป็นพลาสติกเทอร์โมเซตติงเหมือนพอลิเอสเตอร์ (Polyester) แต่มีความต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion resistance) ในตัวทำละลายเบสได้ดีกว่าพอลิเอสเตอร์ (ในกรดพอลิเอสเตอร์ต้านทานได้ดีกว่า) มีกระบวนการและขั้นตอนในการผลิตที่ง่ายกว่า ทำให้เหมาะจะนำมาผลิตเป็นพลาสติกเสริมแรง (Reinforced Plastic) และ/หรือสารเติมเต็ม (Filler) อีพอกซีเรซิน (Epoxy resin) เกิดจากพันธะของ Epoxide หรือ Compound epoxy หรือโครงสร้าง Oxirane ดังรูปที่ 2.18 แสดงโครงสร้างกลุ่มอีพอกไซด์ (Epoxide group) เมื่อเป็นของเหลวจะมีความหนืดและจะเปราะเมื่อเป็นของแข็ง ในการผลิตขึ้นพื้นฐานเริ่มจากการควบแน่นของ Epichlorohydrin กับ Biphynal-A และใช้สารเร่ง (Curing agent or Catalyst or Hardener) Amine, Anhydride หรือ Latent เป็นตัวเร่งให้เกิดการแข็งตัวขณะบ่ม สารเร่งจะทำให้ความหนืดของอีพอกซีลดลง เปรียบเหมือนกับตัวควบคุมการเรียงตัวของมอนอเมอร์ (Monomers) ช่วยเร่งในการบ่มตัวเกิดเร็วขึ้น [18] คุณสมบัติบางประการของอีพอกซีแสดงดังตารางที่ 2.9 อีพอกซีเรซินสามารถบ่มให้แข็งตัวที่อุณหภูมิห้องได้ แต่การใช้ความร้อนช่วยในการบ่มจะช่วยเร่งการแข็งตัวของเรซินให้เร็วขึ้นจึงนิยมบ่มที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง เส้นใยสามารถแทรกตัวได้ดี ค่าใช้จ่ายในกระบวนการต่ำเมื่อเทียบกับเทอร์โมพลาสติก คงคุณสมบัติทางกลไว้ได้ดีเมื่อได้รับความร้อนและความชื้น ขึ้นงานใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่าเทอร์โมพลาสติก [19]



รูปที่ 2. 18 โครงสร้างพื้นฐานของกลุ่มอีพอกไซด์ (Epoxide group) [16]

ตารางที่ 2. 9 คุณสมบัติสำคัญของอีพอกซีบางชนิด [16]

Density, $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Strength, $\sigma$ (MPa)	Modulus, E (GPa)	Poisson's ratio, $\nu$	CTE, $\alpha$ (10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )	Cure Shrinkage (%)	Use Temp. (°C)
1.2 - 1.3	50 - 125	2.5 - 4	0.2 - 0.33	50 - 100	1 - 5	150

มีการศึกษาการใช้อีพอกซีเป็นเนื้อพื้นวัสดุผสม เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกล และทางกายภาพ เมื่ออีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ผ่าน และไม่ผ่านการปรับปรุงผิว พบว่าคุณสมบัติทางกายภาพของชิ้นทดสอบที่ผ่านการปรับปรุงผิวนั้นดีกว่า ชิ้นทดสอบที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว และคุณสมบัติทางกลก็ให้ผลในทำนองเดียวกัน คือ อีพอกซีมีคุณสมบัติทางกลดีขึ้นจากการเติมตัวเสริมแรง [20]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

### 2.2.3 วัสดุผสมเนื้อพื้นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

ในภาพรวมจะนิยามว่า วัสดุผสม คือ วัสดุที่เกิดจากการผสมของสาร 2 ชนิด หรือ 2 เฟสเข้าด้วยกัน โดยสารทั้ง 2 ชนิด หรือเฟสนี้ จะต้องมีความอยู่มากเพียงพอในวัสดุผสมนั้น (>5%) นอกจากนั้นสารหรือเฟสต้องมีคุณสมบัติดั้งเดิมต่างกันและเมื่อผสมแล้วคุณสมบัติของวัสดุผสมจะแตกต่างกับสารเริ่มแรกอย่างเห็นได้ชัด สุดท้ายคือ วัสดุผสมต้องเกิดจากฝีมือมนุษย์ (manmade) ด้วย โดยพิจารณาว่ามีการผสม (Mixing) และการรวมกัน (Combining) ยกเว้นวัสดุผสมบางชนิดที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เช่น ไม้ กระดุก เป็นต้น [21] ทั้ง 2 เฟสประกอบด้วย เฟสแรกคือเนื้อพื้นซึ่งมีความต่อเนื่องและล้อมรอบเฟสที่สองไว้ เฟสที่สองเรียกว่า เฟสที่กระจาย (Dispersed phase) หรือตัวเสริมแรง (Reinforcement) เฟสที่สองนี้จะแบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลักได้แก่ อนุภาค (ใหญ่/



หยาบ, เล็ก/ละเอียด) เส้นใย (ต่อเนื่อง/ยาว, ไม่ต่อเนื่อง/สั้น; วางตัวแนวเดียวกันหรือกระจายตัว) และวัสดุโครงสร้างเช่น แผ่น (Laminate) หรือแซนวิช (Sandwich) [12]

ปัจจัยที่เป็นตัวกำหนดคุณสมบัติวัสดุผสม

สัดส่วนน้ำหนัก (Weight fraction,  $w$ )

$$w_r = \frac{W_r}{W_c} \quad (2.9)$$

$$w_m = \frac{W_m}{W_c} \quad (2.10)$$

สัดส่วนปริมาตร (Volume fraction,  $v$ )

$$v_r = \frac{V_r}{V_c} \quad (2.11)$$

$$v_m = \frac{V_m}{V_c} \quad (2.12)$$

โดยที่ตัวห้อย r,m,c หมายถึง วัสดุเสริมแรง วัสดุเนื้อพื้น และวัสดุผสม ตามลำดับ [21]

กฎการผสม (Rule of Mixture)

สำหรับค้ำยังมอดูลัส (Young's modulus)

ทิศทางการแนวยาวเส้นใย

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \quad (2.13)$$

ทิศทางการแนวขวางเส้นใย

$$\frac{1}{E_c} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \quad (2.14)$$

โดย  $E$  คือ ค่า Young's Modulus ของแต่ละเฟส

$V$  คือ สัดส่วนปริมาตรของแต่ละเฟส เมื่อ  $V_m = A_m/A_c$  และ  $V_f = A_f/A_c$  โดยที่  $A_m/A_c$  และ  $A_f/A_c$  คือ สัดส่วนพื้นที่ของเนื้อพื้นและเส้นใยตามลำดับ และ  $V_m + V_f = 1$  [12]

เฟสเส้นใย (The fiber phase) จากทฤษฎี การเกิดตำหนิที่ผิววัสดุเป็นตำแหน่งที่ทำให้เกิดบริเวณสะสมความเค้น การมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กเป็นข้อดีที่เส้นใย ที่ทำให้ความน่าจะเป็นที่จะเกิดตำหนิผิววิกฤตลดลง เนื่องจากวัสดุมีปริมาตรลดลง จากการจำแนกเส้นใยตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสามารถจำแนกเส้นใยได้เป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ วิสเกอร์ (Whisker) เส้นใย (Fiber) และเส้นลวด (Wire) โดยมีอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความยาวจากน้อยไปมากตามลำดับ [12]

เราสามารถประมาณสัดส่วนเส้นใยในเนื้อพื้นอย่างง่ายได้จากสมการค่าพื้นที่ผิวเส้นใยต่อปริมาตร (Surface to Volume ratio, S/V) [16] ดังนี้

$$S/V = 2\pi r l / \pi r^2 l = 2/r \quad (2.15)$$

โดยที่  $r$  และ  $l$  คือ รัศมีเส้นใย และความยาวเส้นใย ตามลำดับ ดังนั้นกล่าวได้ว่าพื้นที่ผิวเส้นใยต่อปริมาตรจะเพิ่มขึ้นตามรัศมีของเส้นใย

ความยาววิกฤต ( $l_c$ ) ของเส้นใยมีผลต่อการเพิ่มความแข็งแรง โดยความยาววิกฤตจะขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย ( $d$ ) ความต้านทานแรงดึงสูงสุดของเส้นใย ( $\sigma_f^*$ ) และความแข็งแรงพันธะของเส้นใยต่อเนื้อพื้น หรือความต้านทานเฉือน ณ จุดครากของเนื้อพื้น ( $\tau_c$ ) แสดงความสัมพันธ์ของสมการความยาววิกฤตดังสมการ (2.16)

$$l_c = \frac{\sigma_f^* d}{2\tau_c} \quad (2.16)$$

พบว่าแรงกระทำสูงสุดจะอยู่บริเวณกึ่งกลางเส้นใย ถ้าความยาวเส้นใย ( $l$ ) มีค่ามากกว่าความยาววิกฤตพบว่าตัวเสริมแรงจะมีประสิทธิภาพสูงสุด หากเส้นใยมีความยาวมากกว่าความยาววิกฤตมาก จะเรียกว่า เส้นใยต่อเนื่อง (Continuous fiber) และหากเส้นใยมีความยาวสั้นกว่าความยาววิกฤตจะเรียกว่า เส้นใยไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous fiber) หรือเส้นใยสั้น (Short fiber) [12] ดังนั้นจะดีกว่าหากเส้นใยสั้นนั้นเรียงตัวแบบสุ่มหรือเรียงตัวอิสระในเนื้อพื้น เนื่องจากจะช่วยเสริมความแข็งแรงซึ่งกันและกันในช่วงที่มีแรงกระทำเกินกว่าความยาวที่เส้นใยจะรับได้ โดยจะมีเส้นใยในทุกทิศทางที่ล้อมรอบช่วยกระจายแรงจากเส้นใยหนึ่ง ๆ ที่รับแรงมา ทำให้ลดข้อจำกัดในการเป็นเส้นใยสั้น ลงไปได้

วัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยไม่ต่อเนื่องและเรียงตัวแบบอิสระ (Discontinuous and Randomly oriented fiber composites) สามารถนำกฎการผสมมาหาค่าคุณสมบัติความยืดหยุ่นได้ดังสมการที่ (2.17) ในการเสริมแรงด้วยเส้นใยแบบอิสระค่ามอดุลัสจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณเส้นใยเส้นใย [12]

$$E_{cd} = KE_f V_f + E_m V_m \quad (2.17)$$

โดย  $K =$  ประสิทธิภาพของเส้นใยขึ้นกับ  $V_f$  และ  $\frac{E_f}{E_m}$  มีค่าน้อยกว่า 1 อยู่ในช่วง 0.1-0.6

เส้นใยธรรมชาติ (Natural fiber) เป็นส่วนผสมที่ได้จากธรรมชาติโดยได้จากส่วนต่าง ๆ ของพืช ได้แก่ ลำต้น เปลือก ใบ เมล็ด เช่น หวาย ฟางข้าว กาบมะพร้าว ชานอ้อย ใบสับปะรด ผักตบชวา เส้นใยกล้วย ป่านศรนารายณ์ ปอแก้ว ปอกระเจา ฝ้าย กก เป็นต้น ส่วนผสมธรรมชาติเป็นวัสดุที่สามารถย่อยสลายเองได้โดยกระบวนการทางชีวภาพ ไม่เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม เพื่อเป็นการนำวัสดุธรรมชาติมาใช้ให้เกิดประโยชน์มากขึ้นซึ่งส่วนใหญ่เป็นวัสดุที่เหลือจากผลผลิตทางการเกษตร หรือพืชที่มีการนำไปใช้ประโยชน์ได้น้อย ได้มีการนำวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรเหล่านี้มาเสริมแรงแก้ววัสดุเนื้อ

พื้น (ส่วนมากเป็นพอลิเมอร์) เพื่อนำไปใช้เป็น อุปกรณ์ตกแต่งบ้าน วัสดุปูพื้น วัสดุก่อผนัง อุปกรณ์กีฬา ชิ้นส่วนอากาศยาน ชิ้นส่วนรถยนต์ ฯลฯ เนื่องจากน้ำหนักที่ลดลง ต้นทุนการผลิตที่ต่ำ ความแข็งแรงจำเพาะเหมาะสม ความหนาแน่นต่ำ ฯลฯ จึงมีการพัฒนาเพื่อนำไปใช้งานเชิงพาณิชย์อย่างกว้างขวางขึ้น [22] [23] โดยในตารางที่ 2.10 ได้แสดงข้อดีและข้อเสียหลักของวัสดุธรรมชาติไว้พอสังเขป จะเห็นว่าแม้วัสดุธรรมชาติจะมีข้อเสียอยู่บ้าง แต่เมื่อเทียบกับข้อดีแล้วถือว่าสามารถยอมรับในการนำมาใช้งานได้

ได้มีการศึกษาเปรียบเทียบความเหมาะสมที่จะนำเส้นใยธรรมชาติมาใช้งานแทนเส้นใยแก้ว พบว่าเส้นใยธรรมชาติสามารถนำมาใช้งานทดแทนเส้นใยแก้วได้อย่างเหมาะสม [24] ดังข้อมูลตัวอย่างในตารางที่ 2.11 แสดงการใช้พลังงานในการผลิตเส้นใยของเส้นใยแก้ว กับเส้นใยป่าน และกกจีน จะเห็นว่าเส้นใยแก้วใช้พลังงานในการผลิตมากกว่าเส้นใยธรรมชาติทั้งสองชนิด

ตารางที่ 2. 10 แสดงข้อดีข้อเสียของวัสดุธรรมชาติ [22]

ข้อดี	ข้อด้อย
1. เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมทั้งผลิตภัณฑ์ กระบวนการผลิต และของเสียที่เหลือจากการผลิต เช่น ใช้พลังงานในการผลิตน้อยลง	1. ทนต่อแรงกระแทกไม่ดีนัก
2. ใช้วัสดุได้มากขึ้นเนื่องจากวัสดุมีราคาถูก	2. ปัญหาการในเรื่องระยะเวลาจัดเก็บวัสดุดิบ เนื่องจากมีการเสื่อมสภาพ
3. ต้านทานการคืบตัว (Creep) ทนต่อการดัดโค้ง(Flexural)	3. การทนต่อ UV ไม่ดีเท่าพลาสติก
4. มีความแกร่งสูง	4. การเรียงตัวและการกระจายตัวอาจไม่ดี ต้องมีการปรับปรุงผิว
5. มีความแข็งแรงจำเพาะดีและมอดุลัสสูง	
6. มีความหนาแน่นต่ำ น้ำหนักเบา	

ตารางที่ 2. 11 การใช้พลังงานในการผลิตเส้นใย [23]

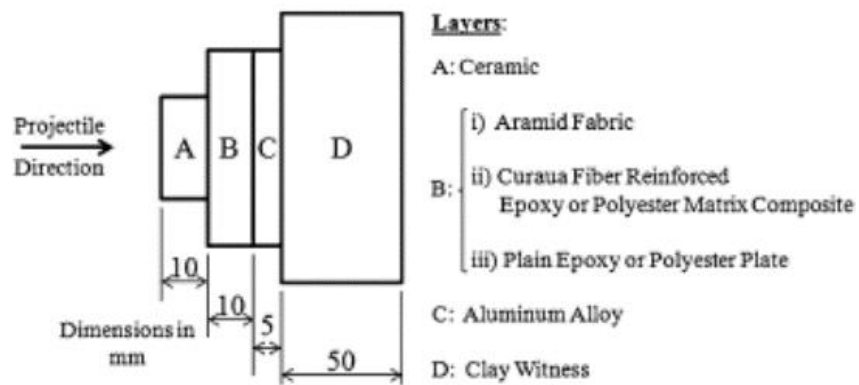
Nonrenewable energy requirements (MJ/kg)		
Glass fiber mat	Flax fiber mat	China reed fiber mat
Raw materials 1.7	Seed production 0.05	Cultivation 2.50
Mixture 1.0	Fertilizers 1.0	Transport plant 0.40
Transport 1.6	Transport 0.9	Fiber extraction 0.08
Melting 21.5	Cultivation 2.0	Fiber grinding 0.40
Spinning 5.9	Fiber separation 2.7	Transport fiber 0.26
Mat production 23.0	Mat production 2.9	
Total 54.7	Total 9.55	Total 3.64

วัสดุเนื้อพื้นพอลิเมอร์ (Polymer Matrix Composites, PMCs) เสริมแรงด้วยเส้นใย มีการใช้งานอย่างกว้างขวางและมากที่สุดของวัสดุผสม เนื่องกระบวนการผลิตง่าย ราคาถูก [12] และส่วนใหญ่สามารถขึ้นรูป หรือผลิตได้ที่อุณหภูมิไม่สูงมาก ในการผลิตวัสดุกันกระสุนเพื่อการวิจัยในที่นี้จึงใช้วัสดุผสมที่ผลิตจากพอลิเมอร์เทอร์โมเซตติงเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติเป็นส่วนประกอบ

มีการศึกษาสมรรถนะของ Curaua fiber (พืชตระกูลสับปะรด) [25] แสดงในรูปที่ 2.19 เพื่อการใช้งานแทน Aramid fiber ในเกราะกันกระสุน MAS (Multilayered Armor Systems) โดยประกอบด้วยแผ่นชั้นหน้าที่เป็นเซรามิก  $Al_2O_3$  ชั้นส่วนกลาง ความหนา 10mm ใช้วัสดุอย่างใดอย่างหนึ่งตามนี้ ได้แก่ 1. Aramid fiber 8 ชั้น 2. Curaua fiber เสริมแรง Epoxy หรือ Polyester 30 vol. % 3. Epoxy หรือ Polyester อย่างเดียว และแผ่นชั้นหลังเป็นแผ่นอะลูมิเนียมผสมเกรด 5052-H34 โดยแสดงการจัดเรียงชั้นงานทดสอบดังรูปที่ 2.20 พบว่า Epoxy ที่เสริมแรง Curaua fiber 30 vol. % สามารถดูดซับแรงกระแทกได้ดีที่สุดเทียบกับ Aramid fiber และ Polyester เสริมแรง Curaua fiber 30 vol. % ดูจากตารางที่ 2.12 พบว่าระยะลึกที่ Witness plate หลังจากยิงทดสอบของ Epoxy ที่เสริมแรง Curaua fiber 30 vol. % มีค่าน้อยที่สุด คือ  $17.13 \pm 1.57$ mm. แสดงว่าชั้นทดสอบสามารถดูดซับแรงจากการปะทะได้ดี ตัวอย่างการตรวจสอบระยะความลึกที่ Clay witness แสดงในรูปที่ 2.21 จากการสรุปผลได้แสดงไว้ว่า Curaua fiber สามารถใช้เสริมแรงแทน Aramid fiber ได้ และได้วัสดุที่มีความเหนียว และเบากว่า



รูปที่ 2. 19 ตัวอย่าง Curaua fiber [25]



รูปที่ 2. 20 การเรียงตัวของชิ้นงานทดสอบ [25]



รูปที่ 2. 21 การตรวจสอบระยะลึกของการเจาะทะลุที่ Clay witness [25]

ตารางที่ 2. 12 ความแตกต่างของระยะลึกที่ Clay witness ด้านหลังชิ้นงานทดสอบ [25]

Intermediate Material Layer	Indentation (mm.)
Aramid fiber plies	22.67 ± 2.79
Epoxy composite reinforced with 30 vol pct curaua fiber	17.13 ± 1.57
Plain epoxy plate	20.69 ± 1.65
Polyester composite reinforced with 30 vol pct curaua fiber	24.31 ± 1.79
Plain polyester plate	23.20 ± 2.58

นอกจากนี้ยังมีเกราะกันกระสุน MAS (Multilayer armor system) ที่วัสดุชั้นแรกเป็นเซรามิกวัสดุผสมชั้นที่สองเป็นอีพอกซีเสริมเส้นใยชานอ้อย [26] ส่วนแรกเป็นแผ่นเซรามิกชั้นแรกหนา 10 mm ส่วนที่สองเป็นแผ่นอีพอกซีเสริมเส้นใยชานอ้อยหนา 10 mm ส่วนสุดท้ายเป็นแผ่นอะลูมิเนียมผสมหนา 5 mm พบว่าเกราะกันกระสุนมีสมรรถนะในการป้องกันกระสุนทดสอบ (7.62 mm ammunition) ได้เทียบเท่ากับเกราะกันกระสุนที่ใช้ส่วนที่สองเป็นแผ่นเคพลาร์ที่มีความหนาเท่ากัน

แต่ด้วยวัสดุผสมจากเส้นใยชานอ้อยมีต้นทุนการผลิตที่น้อยกว่า จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นส่วนที่สองของเกราะกันกระสุนมากกว่า

ชานอ้อย (Sugarcane bagasse or bagasse) เป็นส่วนที่เหลือจากการคั้นน้ำอ้อยออกจากลำอ้อย (Stalk) ชานอ้อยเป็นขยะอุตสาหกรรมที่มีปริมาณมาก แต่การนำไปใช้ประโยชน์ยังไม่ดีเท่าที่ควร 85% ถูกนำไปเผาเป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้ แต่เนื่องจากกระบวนการเผาไหม้นั้นปล่อยควันออกมา ซึ่งไม่เป็นผลดีต่อชั้นบรรยากาศอีก 9% มีการนำไปหมักเป็นแอลกอฮอล์เพื่อเป็นเชื้อเพลิงทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล แต่ก็ยังไม่ดีพอที่จะทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลได้ เนื่องจากมีระดับซูโครสต่ำจึงได้เอทานอลที่ประสิทธิภาพไม่ดี ถึงกระนั้นก็ยังมียังมีชานอ้อยจำนวนมากที่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก การนำชานอ้อยมาใช้เป็นส่วนเสริมแรงเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุผสม จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการจะนำชานอ้อยไปใช้ประโยชน์ และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้ชานอ้อยด้วย [27]

รูปที่ 2.22 แสดงลำดับการแปรรูปอ้อย โดยเริ่มจากต้นอ้อย ได้ออกมาเป็นน้ำตาลและชานอ้อย และสุดท้ายเป็นวัสดุผสมที่เสริมแรงด้วยชานอ้อย



รูปที่ 2. 22 ลำดับการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากอ้อย [22]

องค์ประกอบโดยประมาณของชานอ้อย ได้แก่ เซลลูโลส 50% เฮมิเซลลูโลส 25% และลิกนิน 25% ส่วนประกอบทางเคมีประกอบด้วย แอลฟาเซลลูโลส 50% เพนโทซาน 30% และเถ้าลอย 2.4% ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่น้อยเมื่อเทียบกับฟางที่ได้จากการเก็บเกี่ยวอื่น เช่น ธัญพืช และข้าว ซึ่งจะมีส่วนของเถ้าลอยอยู่ที่ 11.0% และ 17.5% ตามลำดับ ชานอ้อยจึงมีส่วนที่ใช้ประโยชน์ได้มากกว่า [28] หรือมีเถ้าเหลือจากเผาไหม้น้อยกว่า ตารางที่ 2.13 แสดงคุณสมบัติทั่วไปด้านความแข็งแรงของชานอ้อย



ตารางที่ 2. 13 คุณสมบัติด้านความแข็งแรงของชานอ้อย [22]

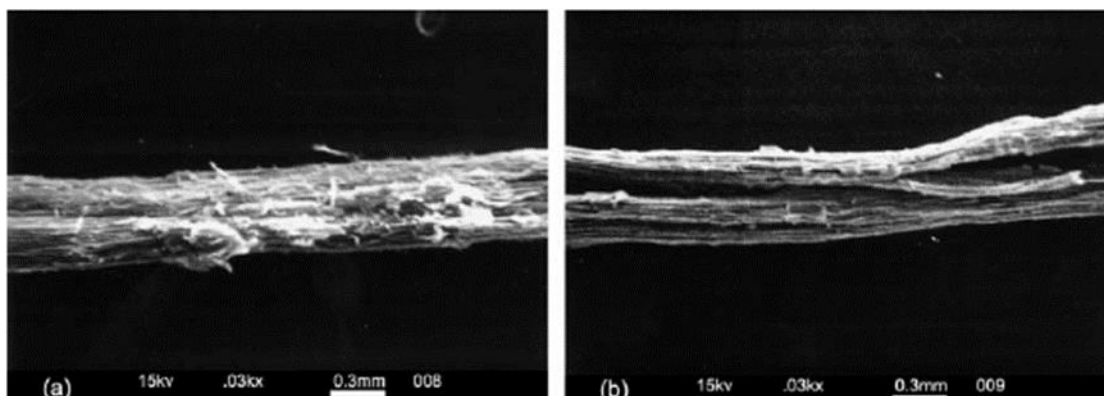
Properties	Values
Tensile strength (MPa)	290
Young's modulus (GPa)	17
Density (g/cm <sup>3</sup> )	1.25

เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติส่วนใหญ่มีพื้นผิวที่ประกอบด้วยสารเคลือบผิว จึงต้องมีการปรับปรุงผิวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเกาะติดกับเนื้อพื้น หรือความสามารถในการเปียกผิว (Wettability) โดยทั่วไปจะใช้สารจำพวกเบส (Alkali) ในการปรับปรุงผิว เช่น Sodium hydroxy (NaOH) เป็นต้น [28-30] และในที่นี้ก็ได้เลือกใช้ NaOH ในการปรับปรุงผิวเส้นใยเช่นกัน

มีการศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกล ได้แก่ Tensile strength, Flexural strength, Flexural modulus และ Impact strength ของวัสดุผสม ชานอ้อยเสริมแรงพอลิเอสเตอร์ชนิดสลายตัวทางชีวภาพได้ ( biodegradable aliphatic polyester, Randy CP-300) ที่ทำการปรับปรุงผิว และไม่ได้ปรับปรุงผิว [28] (ด้วย NaOH ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ) ก่อนนำไปเสริมแรง พบว่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ตัวเสริมแรงมีการปรับปรุงผิวนั้นทำให้คุณสมบัติทางกลดีขึ้น มีรอยต่อระหว่างเนื้อพื้นกับตัวเสริมแรงดีขึ้น และการกระจายตัวของตัวเสริมแรงในเนื้อพื้นดีขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2.14 โดยที่ S.D คือ Standard deviation และรูปที่ 2.23 แสดงความแตกต่างของผิวเส้นใยชานอ้อยที่ได้รับการปรับปรุง และไม่ได้ปรับปรุงผิว จะเห็นว่าภาพด้านซ้ายซึ่งเส้นใยได้รับการปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย NaOH ทำให้ผิวเส้นใยมีความเรียบและยึดติดเนื้อพื้นได้ดี

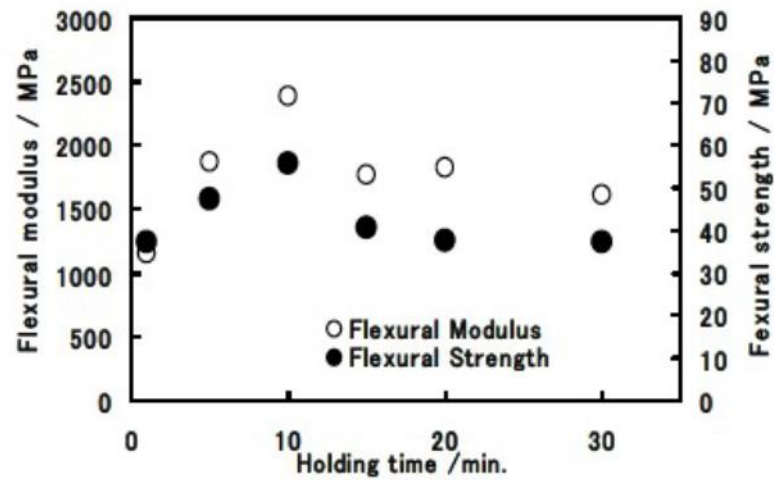
ตารางที่ 2. 14 คุณสมบัติทางกลของวัสดุหลังทดสอบคุณสมบัติทางกล [27]

Fibre (wt%)	Treatment of fibre	Tensile strength (MPa)		Flexural strength (MPa)		Flexural modulus (MPa)		Impact strength (KJ/m <sup>2</sup> )	
		Mean Value	S.D.	Mean Value	S.D.	Mean Value	S.D.	Mean Value	S.D.
20	Untreated	16.52	0.78	31.19	2.18	1136.87	115.14	4.12	0.46
	Alkali treated	18.58	0.73	34.71	2.68	1321.72	56.69	6.07	0.79
35	Untreated	18.60	0.83	38.37	3.04	1451.81	157.64	6.82	0.37
	Alkali treated	21.35	0.69	43.96	3.04	1622.36	185.78	8.29	0.98
50	Untreated	21.09	0.89	40.16	2.36	1841.34	74.60	8.71	0.17
	Alkali treated	23.07	0.53	46.05	2.57	2031.37	155.15	9.52	0.31
65	Untreated	23.47	0.74	43.87	3.78	2292.02	174.52	8.82	0.57
	Alkali treated	26.77	0.75	50.86	3.79	2673.73	165.17	11.27	0.85

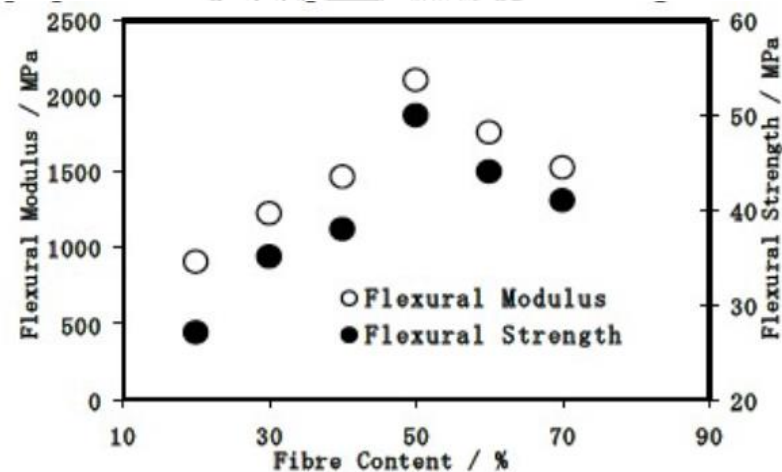


รูปที่ 2. 23 ภาพขยายจากกล้อง SEM (a) เส้นใยที่ไม่ได้ปรับปรุง (b) เส้นใยที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารละลาย 5% NaOH [27]

มีการศึกษาผลของ Holding time และ ปริมาตรโดยน้ำหนักของเส้นใย ขณะที่ทำการขึ้นรูปต่อคุณสมบัติด้านการดัดโค้ง (Flexural properties) ของเส้นใยไฟ และชานอ้อย ที่เสริมแรงแก่พลาสติกทำการขึ้นรูปโดยการกดอัด [29] พบว่าที่เวลา Holdingtime ไม่เกิน 10 นาที ค่า Flexural properties ของขึ้นทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้นโดยให้ผลเหมือนกันในเส้นใยทั้งสองชนิด ดูได้จากรูปที่ 2.24 แสดง Holding time ที่มีผลต่อ Flexural properties ชานอ้อยและปริมาณเส้นใยที่เติมในพลาสติกไม่เกิน 50% ช่วยปรับปรุงให้ค่า Flexural properties เพิ่มขึ้นเช่นกัน ดูจากรูปที่ 2.25 แสดงปริมาณโดยน้ำหนักของเส้นใยในพลาสติกที่มีผลต่อ Flexural properties ของชานอ้อย



รูปที่ 2. 24 ผลของเวลา Holding time ที่มีต่อ Flexural properties ของเส้นใยชานอ้อย [29]



รูปที่ 2. 25 ปริมาณเส้นใยที่มีผลต่อ Flexural properties ของเส้นใยชานอ้อย [29]

#### 2.2.4 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ

การทดสอบคุณสมบัติทางกล เป็นกระบวนการที่จะบอกถึงคุณสมบัติทางกลของวัสดุ ว่ามีความสามารถต้านทานภาระงานที่มากกระทำได้น้อยเพียงใด โดยภาระงานใช้ทดสอบคุณสมบัติวัสดุนั้น เช่น การดึง การกดอัด การดัดโค้ง เป็นต้น โดยข้อมูลจากการทดสอบจะสามารถบอกความแข็งแรงและสมรรถนะของวัสดุ เพื่อประกอบการตัดสินใจในการเลือกวัสดุไปใช้งานด้านต่าง ๆ

การทดสอบแรงดึง (Tension test) และการทดสอบการแรงอัด (Compressive test)

ความเค้นทางวิศวกรรม (Engineering stress) นิยามเป็นความสัมพันธ์ดังสมการ (2.18) มีหน่วยเป็น (MPa หรือ psi)

$$\sigma = F/A_i \quad (2.18)$$

โดยที่  $F$  คือ แรงกระทำตั้งฉากกับชิ้นงานทดสอบ มีหน่วยเป็น N หรือ  $lb_f$   
 $A_i$  คือ พื้นที่หน้าตัดในขณะใด ๆ ของชิ้นงานก่อนมีหน่วยเป็น  $m^2$  หรือ  $in^2$

ความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering strain) นิยามเป็นความสัมพันธ์ดังสมการ (2.19) มีหน่วยเป็น (m/m หรือ in/in)

$$\varepsilon = \frac{l_i}{l_0} \quad (2.19)$$

โดยที่  $l_0$  คือ ความยาวเดิม มีหน่วยเป็น m หรือ in  
 $l_i$  คือ ความที่เปลี่ยนแปลง ณ ตำแหน่งใด ๆ มีหน่วยเป็น m หรือ in

หากไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรระหว่างการทดสอบ จะได้

$$\sigma_T = \sigma(1 - \varepsilon) \quad (2.20)$$

$$\varepsilon_T = \ln(1 - \varepsilon) \quad (2.21)$$

โดยที่  $E$  คือ มอดุลัสยืดหยุ่น (Modulus of elastic) หรือยังมอดุลัส (Young's modulus)

อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio,  $\nu$ ) ขณะที่มีความเค้นปกติกระทำวัสดุจะเกิดกระดิ่งหรืออัดตาม แกน  $x$  ของวัสดุ และจะเกิดการหดตัวตามแกน  $y$  หรือ  $z$  ของชิ้นงานที่ถูกดึงหรืออัด อัตราส่วน ระหว่างการหดตัวตามขวางและความเค้นปกติ [12] จะเขียนได้เป็น

$$\nu = -\frac{\epsilon_{yy}}{\epsilon_{xx}} \quad (2.23)$$

อัตราส่วนดังกล่าวเป็นค่าคงที่ของวัสดุ เรียกว่า อัตราส่วนปัวซอง โดยที่  $\epsilon_{xx} > 0$  และ  $\epsilon_{yy} < 0$  สมการจึงต้องมีเครื่องหมายลบเพื่อให้ค่าเป็นบวก เนื่องจากให้วัสดุมีคุณสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง จะได้

$$\nu = -\frac{\epsilon_{zz}}{\epsilon_{xx}} \text{ อีกสมการเป็นการหดตัวในแนวแกน } z \text{ ต่อการดึงในแกน } x \text{ [12]}$$

การทดสอบแรงดัด (Flexural or Bend test)

ในการทดสอบแรงดัดจะต้องใช้สมการพื้นฐานสองสมการในการพิจารณา ได้แก่สมการที่ (2.24) และ (2.25)

$$\text{จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย} \\ \text{CHULALORN UNIVERSITY} \quad \frac{M}{I} = \frac{E}{R} \quad (2.24)$$

$$\frac{M}{I} = \frac{\sigma}{y} \quad (2.25)$$

โดยที่  $M$  คือ โมเมนต์ดัดที่ให้

$I$  คือ โมเมนต์ลำดับที่สองที่กระทำกับพื้นที่กลางชิ้นงาน (โมเมนต์เฉื่อย)

$E$  คือ Young's modulus of elasticity ของวัสดุ

$R$  คือ รัศมีความโค้งที่ถูกกดของชิ้นงานทดสอบ

$\sigma$  คือ tensile or compressive stress บนชิ้นงานในระยะ

สำหรับชิ้นงานทรงกระบอก จะได้

$$I = \frac{\pi d^4}{64} \quad (2.26)$$

เมื่อ  $d$  คือ หน้าตัดชิ้นงาน

สำหรับชิ้นงานทรงสี่เหลี่ยม

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (2.27)$$

เมื่อ  $b$  และ  $h$  คือ ความกว้างและความสูงของชิ้นงาน ตามลำดับ

ขณะทดสอบชิ้นงานด้านนอกเกิดการดึง และด้านในเกิดการอัด ความยืดหยุ่นสามารถเขียนโดยกฎของฮุก หรือ สมการ (2.22) และจากสมการที่ (2.23), (2.24) และ (2.25) ให้  $y = \frac{h}{2}$  จะได้

$$\varepsilon = \frac{y}{R} \quad (2.28)$$

ดังนั้น ค่า  $\varepsilon R$  แปรผันตรงกับระยะ  $y$  รวมกับความหนาของชิ้นงาน

การทดสอบแรงดัดแบบสามจุด (Three point bending) ให้

$$M = \frac{PS}{4} \quad (2.29)$$

เมื่อ P คือ ภาระงาน และ S คือ ระยะ span

จากสมการ (2.25), (2.27) และ (2.29) ให้  $y = \frac{h}{2}$  จะได้

$$\sigma = \frac{3PS}{2bh^2} \quad (2.30)$$

เมื่อ b และ h คือ ความกว้าง และความสูงของชิ้นงาน

ความเค้นเฉือนในการทดสอบแรงดัดแบบสามจุดมีค่าคงที่ ความเค้นเฉือนสูงสุด ( $\tau_{Max}$ ) มีค่าขึ้นอยู่กับภาระงานสูงสุด ( $P_{Max}$ ) ที่ให้ ดังสมการ

$$\tau_{Max} = \frac{3P}{4bh} \quad (2.31)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การทดสอบแรงกระแทก (Impact test)

การทดสอบเพื่อวัดพลังงานในการดูดซับแรงกระแทกของวัสดุ การให้ภาระงานแก่วัสดุโดยการให้ความเค้น (Stress) หรือ เพิ่มอัตราการแปรรูป (Strain rate) แก่วัสดุ ทำให้เกิดความเครียดอย่างรวดเร็วที่วัสดุ เพื่อหาลักษณะพฤติกรรมการแตกหักของวัสดุ [12] โดยภาระงานที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติทางกลอย่างอื่น เช่น การดึง การอัด และการดัด จะเป็นการให้ความเค้น หรือเพิ่มอัตราการแปรรูปอย่างช้า ๆ พฤติกรรมการแตกหักของวัสดุนั้นพิจารณาได้ทั้งจากความสามารถในการดูดซับพลังงานของวัสดุทดสอบ และ ลักษณะผิวที่เกิดจากการแตกหัก พฤติกรรมข้างต้นจะเป็นสิ่งที่แสดงสมบัติเบื้องต้นของวัสดุว่าเป็นการแตกหักแบบเปราะ หรือการแตกหักแบบเหนียว วิธีการทดสอบแรงกระแทกที่นิยมคือ การทดสอบแบบชาร์ปี (Charpy impact test) และ การทดสอบแบบไอซอด (Izod impact test) การทดสอบทั้งสองแบบต่างก็มีการวางชิ้นงานในขณะทดสอบ การ



ทดสอบแบบชาร์ปีจะวางชิ้นงานในแนวระนาบ ส่วนการทดสอบแบบไอซอด จะวางชิ้นงานในแนวตั้ง ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบจะมีรอยบากตั้งฉากกับความยาวชิ้นงาน หน้าตัดชิ้นงานจะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส รอยบากที่ชิ้นงานจะเป็นตัวแทนตำหนิในชิ้นงาน เนื่องจากตำหนิบนชิ้นงานเป็นศูนย์รวมความเค้นเมื่อวัสดุได้รับการกระทำ หรือแรงกระทำจากภายนอก การทดสอบแรงกระแทกชิ้นงานที่มีรอยบากจะแสดงให้เห็นถึงพลังงานจากการกระแทกที่วัสดุสามารถรับได้ขณะที่มีตำหนิ ซึ่งเป็นการช่วยเพิ่มข้อมูลในการออกแบบเพื่อเลือกวัสดุไปใช้งาน การวิเคราะห์วัสดุหลังเกิดการแตกหักอาจทำได้โดยการตั้งเกณฑ์ค่าพลังงานขึ้นมาค่าหนึ่ง (อาจเป็นพลังงานที่ได้รับจริงในการใช้งานวัสดุ) หากพลังงานที่วัดได้จากการทดสอบแรงกระแทกมีค่ามากกว่าเกณฑ์ที่กำหนด จะถือว่าเป็นวัสดุเหนียว หากมีค่าน้อยกว่าจะถือว่าเป็นวัสดุเปราะโดยทั่วไปจะกำหนดไว้ที่ 20 J สำหรับโลหะ หรืออีกวิธีคือการเปรียบเทียบพื้นที่ผิวที่เกิดการแตกหักระหว่างพื้นที่การแตกหักแบบเหนียวกับพื้นที่การแตกหักแบบเปราะ ตาราง ก๑ เป็นตารางเปรียบเทียบสัดส่วน (เป็นเปอร์เซ็นต์) การเฉือนของพื้นที่บริเวณที่แตกหักระหว่างลักษณะการแตกหักแบบเหนียว และการแตกหักแบบเปราะ เช่นหากวัสดุมีพื้นที่การแตกหักแบบเปราะมากกว่า แสดงว่าเป็นวัสดุเปราะที่อุณหภูมิการทดสอบ เป็นต้น โดยหากมีค่าเปอร์เซ็นต์การเฉือนมาก แสดงว่ามีพื้นที่การแตกหักแบบเหนียวมาก โดยด้าน A (Dimension A) เป็นความยาวด้านที่ขนานรอยบากของพื้นที่รอยเฉือน และด้าน B (Dimension B) เป็นความยาวด้านของด้านที่ตั้งฉากรอยบากของพื้นที่รอยเฉือน [31] (ดูรูปที่ 2.26)

ในการเลือกใช้วัสดุสำหรับงานวิจัยนี้สามารถแบ่งวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ 3 ชนิดได้แก่ อะลูมิเนียมเกรด AA5083 อีพอกซีเรซิน และเส้นใยชานอ้อย สาเหตุที่เลือกอะลูมิเนียมเกรด AA5083 เนื่องจากเป็นเกรดที่ใช้เป็นโครงสร้างภายนอกของรถยนต์หลายรุ่น จาก Shonwalter, D.D. et al. (2008) [14] ที่ทดสอบว่าอะลูมิเนียมเกรด AA5083 เป็นเกรดต่ำที่สุดที่มีความสามารถในการหยุดกระสุน และจาก Chen, H.C. et al. (2012) [15] ที่พบว่าการใช้อะลูมิเนียมเกรด AA5083 เป็นส่วนหน้าของอะลูมิเนียมเกรด AA6061 ในการเป็นวัสดุกันกระสุนแบบสองชั้นนั้นทนต่อการปะทะของกระสุนได้ดีกว่าการใช้ AA6061 เป็นส่วนหน้าในการรับการปะทะ อีกทั้งอะลูมิเนียมเกรด AA5083 ยังมีราคาถูกกว่าอะลูมิเนียมเกรด AA6061 อีกด้วย ในส่วนของอีพอกซีเรซินนั้นเนื่องจากเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้องจึงขึ้นรูปได้ง่ายที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งหากเป็นพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติกนั้นต้องใช้พลังงานและความร้อนที่มากพอที่จะทำให้เป็นของเหลว และอีพอกซีเรซินเป็นพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมเซตติงที่มีกระบวนการขึ้นรูปง่ายกว่าเทอร์โมเซตติงชนิดอื่น เช่น พอลิเอสเตอร์ อีพอกซีเรซินจึงเป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดในงานวิจัยนี้ สุดท้ายเส้นใยชานอ้อยซึ่งเป็นวัสดุเสริมแรงในอีพอกซีเรซินพบว่า ชานอ้อยมีปริมาณเถ้าลอยอยู่น้อยกว่า ข้าว และธัญพืชชนิดอื่น [27] ในกระบวนการปรับปรุงจึงได้ปริมาณเส้นใยมากกว่าธัญพืชชนิดอื่น และพบว่าชานอ้อยแบบไม่ปั่นเส้นใยกับเส้นใยชานอ้อยนั้น

มีความต้านทานกระสุนแตกต่างกัน [26] โดยเส้นใยชานอ้อยเสริมในอีพอกซีนั้นต้านทานกระสุนได้มากกว่าชานอ้อยที่ไม่ได้แยกเป็นเส้นใย (ชานอ้อยเป็นท่อน) แล้วเสริมอีพอกซี อีกทั้งการนำชานอ้อยมาเสริมในอีพอกซีเรซินเพื่อเป็นวัสดุผสม ยังเป็นการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาใช้ให้เกิดประโยชน์ และลดปริมาณวัสดุเหลือทิ้ง ดังนั้นวัสดุกันกระสุนในงานวิจัยนี้จึงเป็นอีพอกซีเสริมด้วยเส้นใยชานอ้อยยึดติดกับแผ่นอะลูมิเนียมเกรด AA5083 ที่มีความหนาต่างกันเพื่อเปรียบเทียบความหนาที่เหมาะสมในการต้านทานกระสุนทดสอบ โดยแผ่นอีพอกซีเสริมเส้นใยชานอ้อยนั้นเพื่อทดแทนความหนาของแผ่นอะลูมิเนียมและเพื่อลดน้ำหนักรวมของอะลูมิเนียมลงซึ่งอีพอกซีเสริมเส้นใยชานอ้อยจะมีความหนาเท่ากัน ทั้งนี้ชานอ้อยที่เสริมอีพอกซีนั้นต้องทำการปรับปรุงผิวด้วย 1% NaOH ซึ่งพบว่าช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้เนื้อพื้นได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับความเข้มข้นอื่น [27]

ส่วนปริมาณเส้นใยที่เสริมเข้าไปนั้น มีรายงานว่าปริมาณเส้นใยที่ช่วยให้สมบัติด้านความยืดหยุ่นของเนื้อพื้นเรซินที่ย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ (Biodegradable resin) เสริมแรงด้วยเส้นใยชานอ้อยดีขึ้นคือ ปริมาณต่ำสุด 30 wt.% และสูงสุด 70 wt.% [29] จึงเลือกปริมาณเส้นใยชานอ้อยที่เสริมในอีพอกซีเท่ากับ 30 wt.%, 50 wt.%, 70 wt.% และ 90 wt.%

### บทที่ 3

#### ระเบียบวิธีวิจัย

##### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

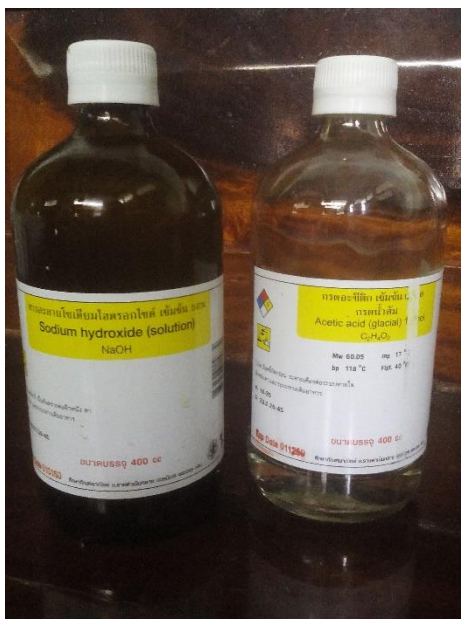
- แผ่นอะลูมิเนียมผสมเกรด AA5083 ความหนา 6 mm 8 mm และ 10 mm
- ใช้อีพอกซีเรซินเหลว (Liquid epoxy resin, E-700) แสดงในรูปที่ 3.1
- สารเร่งปฏิกิริยาการบ่มเรซิน (Curing agent หรือ Hardener, H-777) แสดงในรูปที่ 3.1
- ชานอ้อยที่ผ่านการรีดเอาน้ำอ้อยออกแล้ว (2-3 ครั้ง) 13 kg แสดงในรูปที่ 3.2 ซ้าย
- น้ำดื่มสะอาด (น้ำดื่มตรา จทบ.พช.) แสดงในรูปที่ 3.2 ขวา
- สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 1 Vol.% (เจือจางจากความเข้มข้น 50%) แสดงในรูปที่ 3.4
- สารละลายกรดอะซิติก (CH<sub>3</sub>COOH) ความเข้มข้น 0.24 Vol.% (เจือจางจากความเข้มข้น 12 mol) แสดงในรูปที่ 3.4
- น้ำสะอาด (น้ำประปา)



รูปที่ 3. 1 เนื่ออีพอกซีเรซิน E700 (flasึน้ำเงิน) และฮาร์ดเดนเนอร์ H777 (flasึแดง)



รูปที่ 3. 2 ชานอ้อยที่หีบเอาน้ำอ้อยออกแล้ว (ซ้าย) และน้ำดื่มสะอาดตรา จทบ.พช. (ขวา)



รูปที่ 3. 3 กรดอะซิติกเข้มข้น 12 mol (ซ้าย) โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 50% (ขวา)

### 3.2 อุปกรณ์/เครื่องมือ

#### 3.2.1 อุปกรณ์เตรียมเส้นใย

- บีเกอร์ขนาด 1000 ml และ ขนาด 50 ml ดังแสดงในรูปที่ 3.4
- กะละมังเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 60 cm
- เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล
- ตะแกรงสำหรับตากเส้นใย
- ตะแกรงสำหรับร่อนเส้นใย
- เครื่องปั่นน้ำผลไม้หือ OTTO รุ่น BE-127A
- ถังสำหรับบรรจุเส้นใย
- ซิลิกาเจลใส่ซอง สำหรับดูดความชื้น
- Hygrometer แบบดิจิทัล



รูปที่ 3. 4 ปีกเกอร์ขนาด 50 ml (ซ้าย) และปีกเกอร์ขนาด 1000 ml (ขวา)

### 3.2.2 อุปกรณ์งานเรซินและงานสุญญากาศ

- เครื่องดูดอากาศ
- พิมพ์สำหรับหล่อชิ้นงานเรซิน ขนาดชิ้นงาน 30.5 cm x 30.5 cm
- ถังมือยาง
- วาสลิน สำหรับทาพิมพ์
- ไม้ทาวาสลิน
- ภาชนะสำหรับผสมเนื้อเรซินกับเส้นใย
- ท่อลมยาวประมาณ 1.5 m
- หม้อดักความดันที่ติดตั้งเกจวัดความดัน
- เทปกาวสำหรับงานท่อลม (Cock tape) ยี่ห้อ EVER SEAL
- แผ่นฟิล์มพอลิเอสเตอร์ หรือฟิล์มไมลาร์ หนา 0.05 mm
- เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอล

แสดงภาพอุปกรณ์งานเรซินและงานสุญญากาศในรูปที่ 3.5 ถึง 3.6



รูปที่ 3. 5 อุปกรณ์งานเรซิน



รูปที่ 3. 6 อุปกรณ์งานสุญญากาศ

### 3.2.3 อุปกรณ์ตัดแต่งชิ้นงาน

- ตะไบ สำหรับขัดชิ้นงาน
- เลื่อยมือ
- ไม้บรรทัด เวอร์เนียคาลิปเปอร์ และ ปากกาเคมี
- แปรงทาสีกว้าง 2 นิ้ว สำหรับปิดผงชิ้นงาน

แสดงอุปกรณ์ตัดแต่งชิ้นงานในรูปที่ 3.7



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY  
รูปที่ 3.7 อุปกรณ์การตัดแต่งชิ้นงาน

### 3.2.4 อุปกรณ์/เครื่องมือทดสอบ

- เครื่องทดสอบการดึง - การอัด - การดัดโค้ง (Universal testing machine) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น EZ-S ดังในรูปที่ 3.8 ซ้าย
- เครื่องทดสอบการกระแทกห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมโลหการ ดังในรูปที่ 3.8 ขวา



- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope and Energy Dispersive X-Ray, SEM-EDS (6610LV)/JSM -6610V and X-MaxN 50) ณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- เครื่องมือทดสอบการป้องกันกระสุนวัสดุ ณ โรงงานวัตถุระเบิดทหาร แสดงในรูปที่ 3.9 ภาพหมายเลข 1 เครื่องจับความเร็วกระสุน (Chronograph) ภาพหมายเลข 2 เครื่องอ่านและบันทึกความเร็วกระสุน ภาพหมายเลข 3 กระบอกยิงทดสอบ ภาพหมายเลข 4 ถึง 5 การเตรียมติดตั้งอุปกรณ์ในการยิงทดสอบ



รูปที่ 3. 8 เครื่อง Universal testing machine (ซ้าย) และเครื่องทดสอบการกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy impact test) (ขวา)



รูปที่ 3. 9 เครื่องมือทดสอบการป้องกันกระสุนวัสดุโรงงานวัตถุระเบิดทหาร

### 3.3 วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมเส้นใย

- นำชานอ้อยที่ผ่านการรีดน้ำออกจนหมด ตัดขนาด 2.5-6 cm ดังหมายเลข 1-4 ในรูปที่ 3.11 (ดูขั้นตอนการเตรียมเส้นใยในรูปที่ 3.10)

- บดด้วยเครื่องปั่นน้ำผลไม้ ครั้งละประมาณ 10 g นาน 3 นาที โดยปั่นระดับ 4 เพื่อให้ชานอ้อยละเอียดเกินไปหากปั่นระดับสูงกว่านี้ และเพื่อให้ส่วนอื่นที่ไม่ใช่เส้นใยหลุดออกจากเส้นใยให้มากที่สุด ภาพหมายเลข 5 ในรูปที่ 3.13 แสดงเครื่องปั่นที่ใช้ในการปั่นชานอ้อย

- ล้างด้วยน้ำสะอาด 4 ครั้ง (หรือมากกว่า) ตามด้วยน้ำดื่มสะอาด 1 ครั้ง ดังภาพหมายเลข 1 ในรูปที่ 3.11

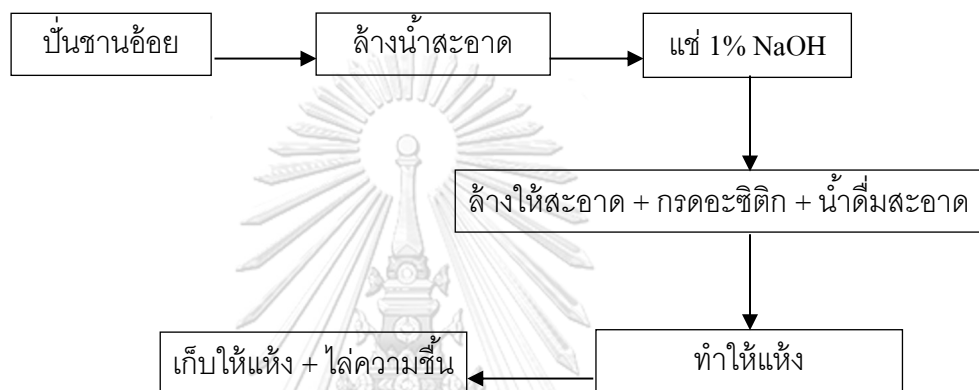
- แช่ NaOH 1% เป็นเวลา 2 ชม. ดังภาพหมายเลข 2 ในรูปที่ 3.12

- ล้างด้วยน้ำสะอาด 1 ครั้ง ตามด้วยน้ำดื่มสะอาด 1 ครั้ง

- ล้างด้วย  $\text{CH}_3\text{COOH}$  0.24% โดยการจุ่มให้เส้นใยเปลี่ยนเป็นสีเดิม (สีเหลืองอ่อน) ดังภาพหมายเลข 3 ในรูปที่ 3.12

- ล้างด้วยน้ำดื่มสะอาด 4 ครั้ง ตามด้วยน้ำดื่มสะอาด 1 ครั้ง

- นำเส้นใยไปตากบนตะแกรงเป็นเวลา 4-5 ชั่วโมง ดังภาพหมายเลข 5 ในรูปที่ 3.12
- นำชานอ้อยแห้งใส่ถุงและดูความชื้น เหลือความชื้นประมาณ 50% โดยจะมี Hygrometer แบบดิจิตอลเพื่อวัดปริมาณความชื้นของเส้นใยดังภาพหมายเลข 6 ในรูปที่ 3.12
- ชั่งน้ำหนักแห้งเพื่อเปรียบเทียบสัดส่วนก่อนนำไปผลิตวัสดุผสมแต่ละเงื่อนไข โดยเส้นใยมีความหนาแน่นเฉลี่ยประมาณ  $0.03 \text{ g/cm}^3$



รูปที่ 3. 10 ขั้นตอนการเตรียมเส้นใย



รูปที่ 3. 11 ลำดับการเตรียมเส้นใยชานอ้อยก่อนล้าง



รูปที่ 3. 12 การเตรียมผิวและจัดเก็บเส้นใย

### 3.3.2 การผลิตชิ้นงานทดสอบ

- ชั่งน้ำหนักเส้นใยชานอ้อยที่เตรียมไว้เติมใส่ในสัดส่วนโดยปริมาตร ตามเงื่อนไข 0 Vol.%, 30 Vol.%, 50 Vol.%, 70 Vol.% และ 90 Vol.% ดังภาพหมายเลข 1 ในรูปที่

3.15

- ผสมอีพอกซีเรซินกับสารเร่งอัตราส่วน 3: 1 โดยการชั่งน้ำหนัก จะใช้น้ำหนักเนื้อเรซินประมาณ 682 g และน้ำหนัก Hardener ประมาณ 227g สำหรับชิ้นงานขนาด 30.5 cm x 30.5 cm x 1.0 cm จำนวน 1 ชิ้น คนส่วนผสมให้เข้ากันช้า ๆ ในภาชนะผสม ดังภาพหมายเลข 2 ในรูปที่ 3.15

- นำเส้นใยใส่ลงในภาชนะที่ผสมอีพอกซีเรซินผสม จากนั้นผสมให้เข้ากัน ดังภาพหมายเลข 3 ในรูปที่ 3.15

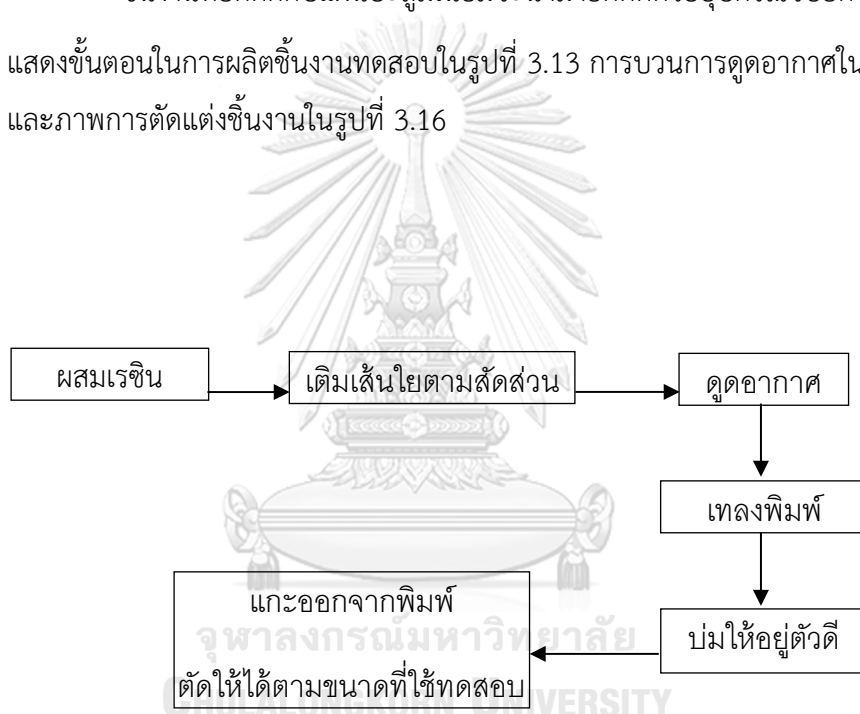
- นำไปดูดอากาศโดยใส่ในหม้อสำหรับดูดอากาศที่ต่อเข้ากับปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) ประมาณ 15 นาที ความดันอยู่ในช่วง 41-44 cmHg ดังภาพหมายเลข 4-5 ในรูปที่ 3.15

- เทลลงบมพิมพ์ (ทาวาสลิน) ดังภาพหมายเลข 6-7 ในรูปที่ 3.15
- บ่มจนชิ้นงานแข็งตัวดี ประมาณ 12 ชม.
- แกะชิ้นงานออกจากพิมพ์ ดังภาพหมายเลข 8 ในรูปที่ 3.15 และทำซ้ำทุกเงื่อนไข

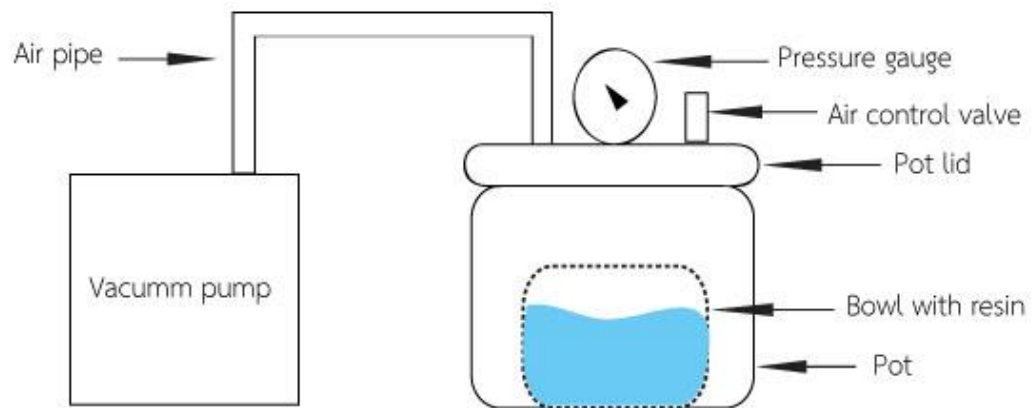
ความหนา

- ตัดแต่งชิ้นงานให้ได้ขนาดตามแต่ละการทดสอบ
- ชิ้นงานที่ยึดติดกับแผ่นอะลูมิเนียมจะนำมายึดติดด้วยอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน

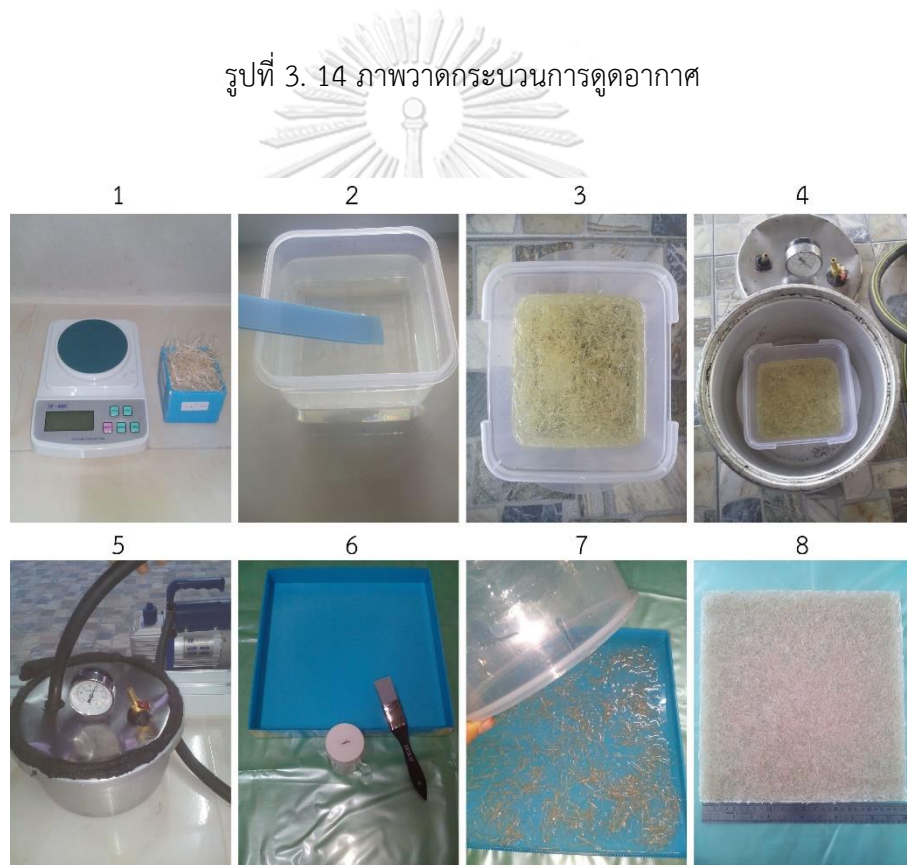
แสดงขั้นตอนในการผลิตชิ้นงานทดสอบในรูปที่ 3.13 การบวมการดูดอากาศในรูปที่ 3.14 และภาพการตัดแต่งชิ้นงานในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3. 13 ขั้นตอนการผลิตชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 3. 14 ภาพวาดกระบวนการดูดอากาศ



รูปที่ 3. 15 การผลิตชิ้นงานอีพอกซีเสริมเส้นใยคาร์บอน



รูปที่ 3. 16 การเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบหมายเลข 1 วัดขนาด หมายเลข 2 เลื่อยตัดตามที่วัดขนาด และหมายเลข 3 ตะโปให้ผิวชิ้นงานเรียบสม่ำเสมอ

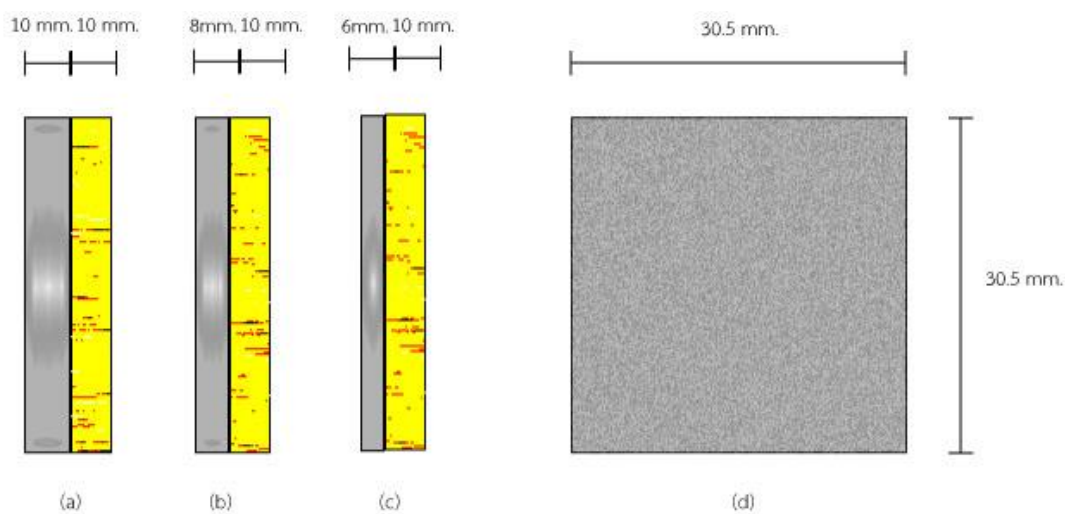
### 3.3.3 การผลิตวัสดุเกราะกันกระสุน

ทำตามขั้นตอนในหัวข้อ 3.3.2 ต่างกันที่ เมื่อแกะออกจากพิมพ์แล้ว ต้องทำการตกแต่งชิ้นงานทดสอบเล็กน้อย ไม่ต้องตัดแบ่งเพื่อนำไปทดสอบทางกล โดยชิ้นงานทดสอบมีขนาด 30.5cm x 30.5cm ความหนาเป็นไปตามแต่ละเงื่อนไขชิ้นงานทดสอบ รูปที่ 3.19 ภาพวาดแสดงด้านข้างชิ้นงานและด้านแผ่นอะลูมิเนียม 1

## 3.4 การทดสอบการป้องกันกระสุน ตามคู่มือทดสอบ NIJ Standard 0108.01

### 3.4.1 ชิ้นงานทดสอบทดสอบ (Sampling)

ชิ้นงานทดสอบควรผลิตให้มีขนาดอย่างน้อย 30.5 cm x 30.5 cm (12 in x 12 in) ดังในรูปที่ 3.17

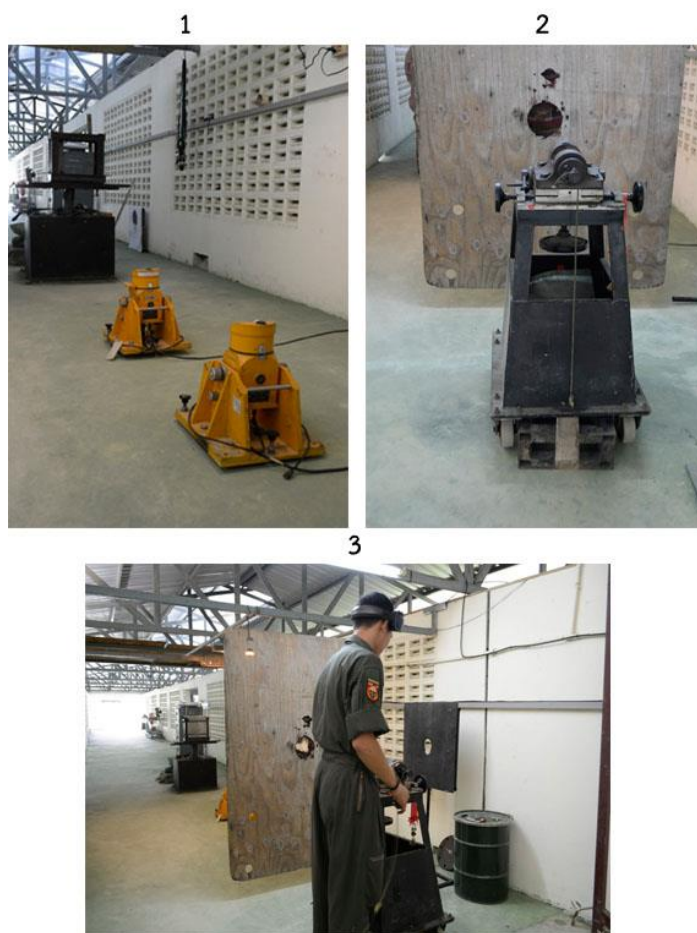


รูปที่ 3. 17 ขนาดชิ้นงานด้านข้าง และหน้าตัด (a) (b) และ (c) ชิ้นงานด้านข้างอีพอกซีเรซินเสริมชานอ้อยยึดติดกับอะลูมิเนียม 10mm 8mm และ 6mm ตามลำดับ (d) หน้าตัดชิ้นงานด้านอะลูมิเนียม

#### 3.4.2 เครื่องมือ/อุปกรณ์การทดสอบ

- อารูทและกระสุนทดสอบระดับ 3A
  - Chronograph (อุปกรณ์จับความเร็วกระสุน)
  - Support fixture จับยึดชิ้นงานและวางให้ชิ้นงานตั้งฉากกับแนวการยิง
  - Witness plate (แผ่นพยาน) วางอยู่หลังชิ้นงานทดสอบ ตั้งฉากกับแนวการยิง
- แสดงตำแหน่งอุปกรณ์การยิงทดสอบดังในรูปที่ 3.18





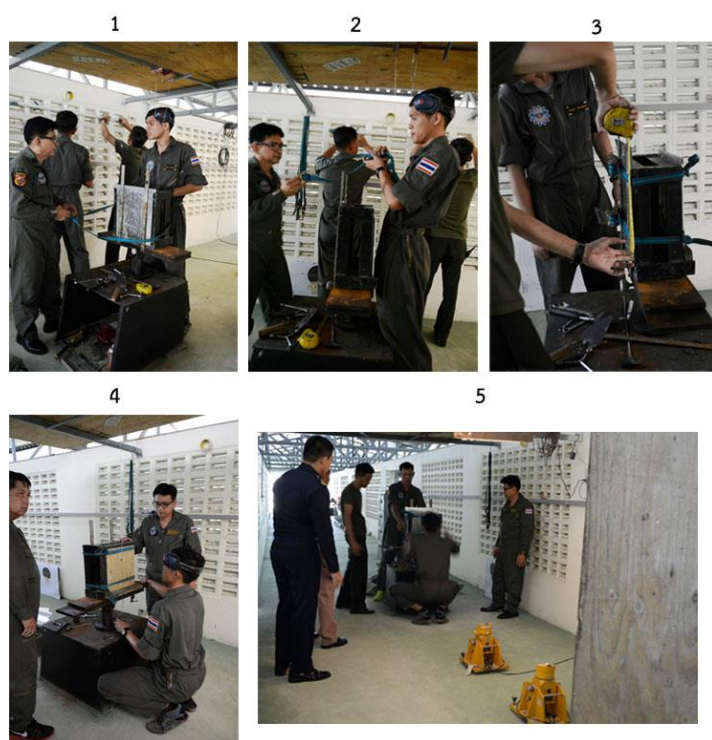
รูปที่ 3. 18 หมายเลข 1 ตำแหน่งจับยึดชิ้นงาน และเครื่องวัดความเร็ว หมายเลข 2 เครื่องยิงทดสอบ  
หมายเลข 3 ตำแหน่งโดยรวมของอุปกรณ์ยิงทดสอบ

CHULALONGKORN UNIVERSITY

### 3.4.3 การทดสอบ Ballistic resistance ตามคู่มือ NIJ Standard 0108.01

- วางอุปกรณ์ตรวจสอบการเหนียวโก ัดระยะห่าง ก่อนที่จะทำการยิงทดสอบ ดังตำแหน่งในรูปที่ 3.18
- ระบุระดับอาวุธที่จะใช้ในการยิงทดสอบ ระดับการป้องกัน และตำแหน่งการยิงทดสอบยิงหนึ่งนัดหรือมากกว่า (ถ้าจำเป็น)
- ก่อนเริ่มการทดสอบ ติดตั้งชิ้นงานทดสอบวาง Witness plate หนา 0.5 mm ด้านหลังชิ้นงานทดสอบ แสดงกระบวนการดังหมายเลข 1 ถึง 4 ในรูปที่ 3.19
- ทำการยิงทดสอบ และบันทึกความเร็วที่ตรวจจับได้จากเครื่องวัด

- ตรวจสอบการเจาะทะลุที่แผ่นพยาน (Witness plate) และตรวจสอบ fair hit ที่ชิ้นงานทดสอบหากไม่เกิดการเจาะทะลุ ให้ติดตั้งอุปกรณ์และชิ้นงานทดสอบไว้ตำแหน่งเดิม ทำการยิงทดสอบซ้ำจะเสร็จสิ้นการทดสอบ โดยในการยิงแต่ละนัดต้องตรวจสอบการเจาะทะลุทุกครั้งที่ยิง และควรวางชิ้นงานให้ใกล้เคียงตำแหน่งเดิมที่สุด ดังแสดงในหมายเลข 5 ในรูปที่ 3.19



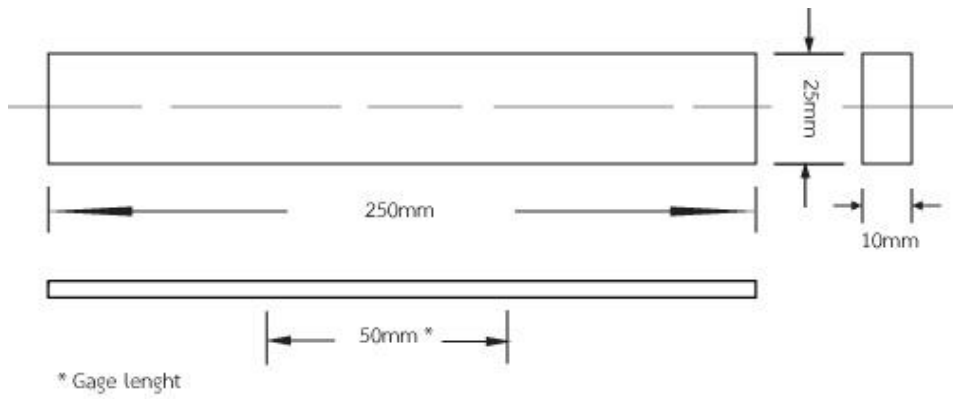
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 3. 19 การติดตั้งชิ้นงาน และตรวจสอบชิ้นงานหลังยิงทดสอบ

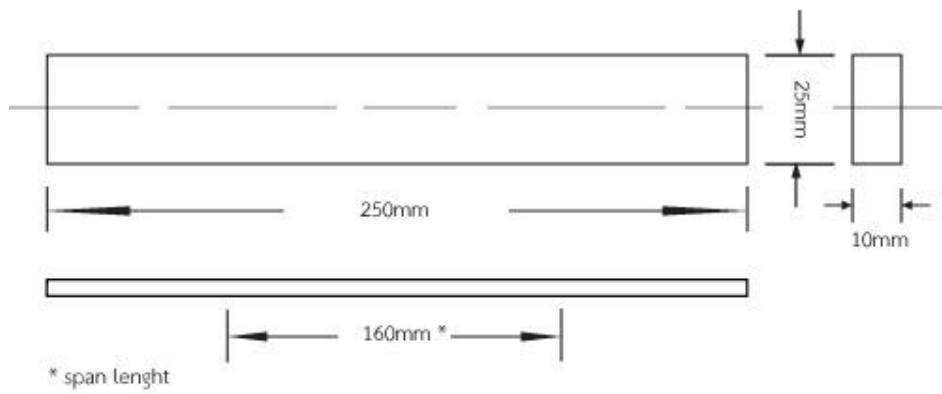
### 3.5 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน

- ตัดชิ้นงานทดสอบให้ได้ใกล้เคียงกับขนาดที่กำหนด ตามคู่มือทดสอบ ASTM D5083-02 [32], ASTM D6108-03 [33] และ ASTM D5023-07 [32] กรณีทดสอบสมบัติทางกลนำชิ้นงานไปทดสอบแรงดึง การกดอัด และการตัดโค้งแบบ 3 จุด ตามลำดับ ภาพวาดขนาด ชิ้นงานสำหรับทดสอบการดึงแสดงในรูปที่ 3.20 ชิ้นงานสำหรับทดสอบการตัดโค้งแสดงในรูป ที่ 3.21 ภาพวาดขนาดชิ้นงานสำหรับการทดสอบการกดอัด แสดงในรูปที่ 3.22

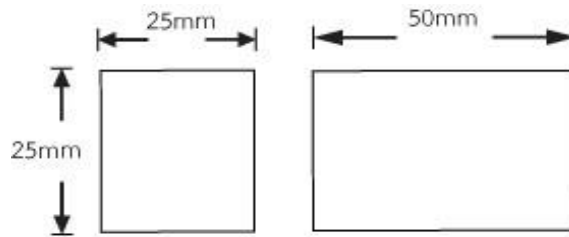
- ตัดชิ้นงานทดสอบให้ได้ใกล้เคียงกับขนาดที่กำหนดตามคู่มือทดสอบ ASTM D6110-09  
 [33] กรณีทดสอบการกระแทก ภาพวาดขนาดชิ้นงานแสดงในรูปที่ 3.23



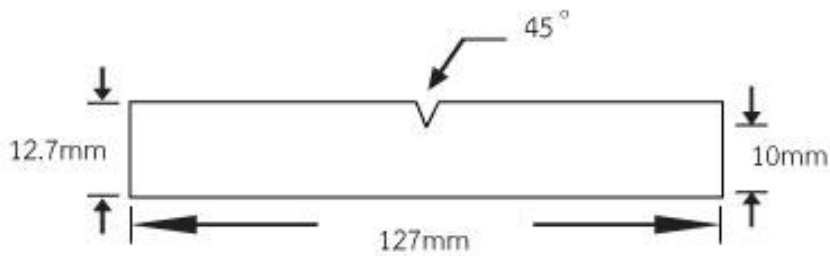
รูปที่ 3. 20 ชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึงตาม ASTM D5083-02 [32]



รูปที่ 3. 21 ชิ้นงานทดสอบการตัดโค้งตามมาตรฐาน ASTM D5023-07 [32]

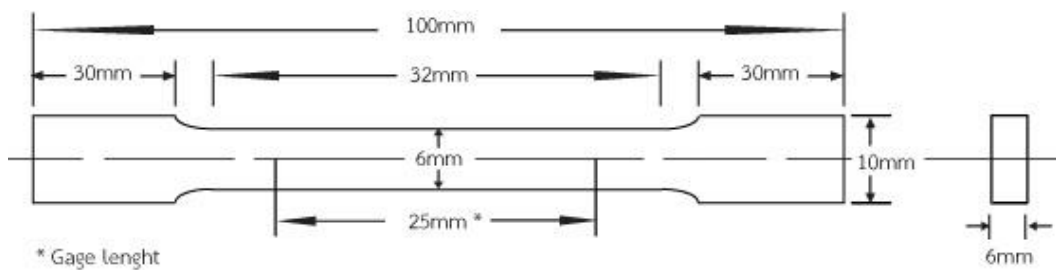


รูปที่ 3. 22 ชิ้นงานสำหรับทดสอบการกดอัดตามมาตรฐาน ASTM D6108-03 [33]

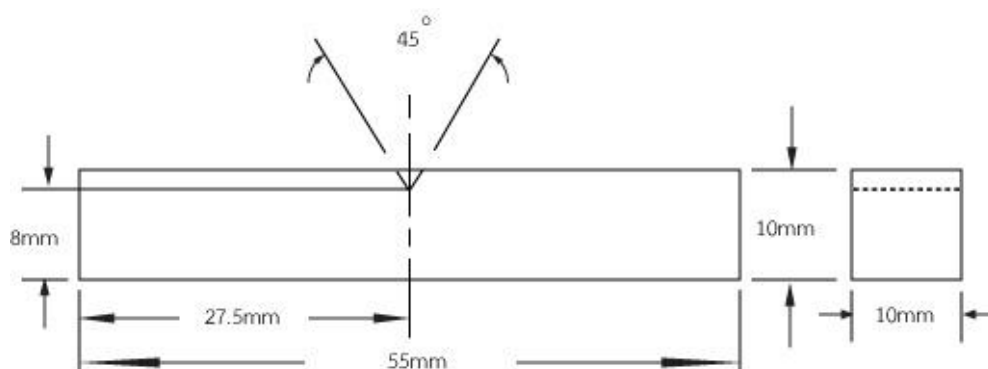


รูปที่ 3. 23 ชิ้นงานสำหรับทดสอบการกระแทกตามมาตรฐาน ASTM D6110-06 [33]

- ตัดชิ้นงานอะลูมิเนียมให้มีขนาดชิ้นงานทดสอบใกล้เคียงกับที่กำหนดใน ASTM B577M-07 [34] และ ASTM E23-07a [31] สำหรับทดสอบการต้านทานแรงดึง และการทดสอบการกระแทกตามลำดับ ภาพวาดลักษณะชิ้นงานทดสอบแสดงในรูปที่ 3.24 และ 3.25

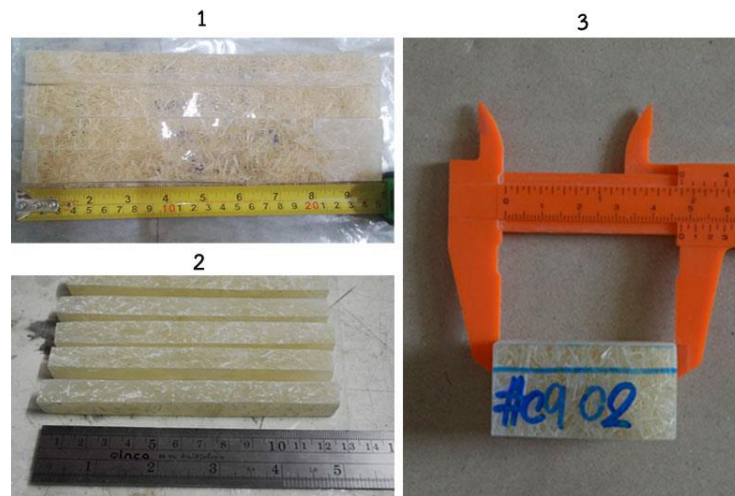


รูปที่ 3. 24 ชิ้นงานสำหรับทดสอบการต้านทานแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM B577M-07 [34]



รูปที่ 3. 25 ชิ้นงานสำหรับทดสอบการกระแทกตามมาตรฐาน ASTM E23-07a [31]

- ทดสอบการดึงตามมาตรฐาน ASTM D5083-02 [32] โดยใช้ความเร็วในการดึง 5mm/min ความยาวเกจ (Gage length) เท่ากับ 50mm แสดงตัวอย่างชิ้นงานอีพอกซีเสริมเส้นใย ในภาพหมายเลข 1 รูปที่ 3.28
- ทดสอบการดึงตามมาตรฐาน ASTM B577M-07 [34] โดยใช้ความเร็วในการดึง 10 MPa/s ความยาวเกจชิ้นงานเท่ากับ 25 mm แสดงตัวอย่างชิ้นงานอะลูมิเนียมในรูปที่ 3.27
- ทดสอบการตัดโค้งตามมาตรฐาน ASTM D5023-07 [32] โดยใช้ความเร็วในการกดตัด 5 mm/min ระยะ Span 16cm ตามที่กำหนดว่าควรมีระยะ Span ต่อ ความหนาชิ้นงาน เท่ากับ 16:1 ชิ้นงานตัวอย่างในภาพหมายเลข 1 รูปที่ 3.26
- ทดสอบการกดตามมาตรฐาน ASTM D6108-03 [33] โดยใช้ความเร็วในการกดอัด 2 mm/min ความสูงชิ้นงานเป็นสองเท่าของหน้าตัดชิ้นงาน แสดงชิ้นงานตัวอย่างในภาพ หมายเลข 3 รูปที่ 3.26
- ทดสอบการกระแทกตามมาตรฐาน ASTM D6110-06 [33] และ ASTM E23-07a [31] โดยติดตั้งชิ้นงานแบบชาร์ปี (Charpy) แสดงตัวอย่างชิ้นงานอีพอกซีเสริมเส้นใยในภาพหมายเลข 2 รูปที่ 3.26 และตัวอย่างชิ้นงานอะลูมิเนียมในรูปที่ 3.28
- ทำทดสอบการดึง การกดอัด การตัดโค้ง และการกระแทกตามลำดับ หลังทดสอบ (ทุกการทดสอบใช้ชิ้นงาน 5 ชิ้น) ทำการบันทึกข้อมูล และรวบรวม เพื่อนำไปวิเคราะห์



รูปที่ 3. 26 ชิ้นงานอีพอกซีเสริมเส้นใยสำหรับทดสอบการดึง การตัดโค้ง การกระแทก และการกดอัด



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
 รูปที่ 3. 27 ชิ้นงานอะลูมิเนียมสำหรับทดสอบการดึง



รูปที่ 3. 28 ชิ้นงานอะลูมิเนียมสำหรับทดสอบการกระแทก



1



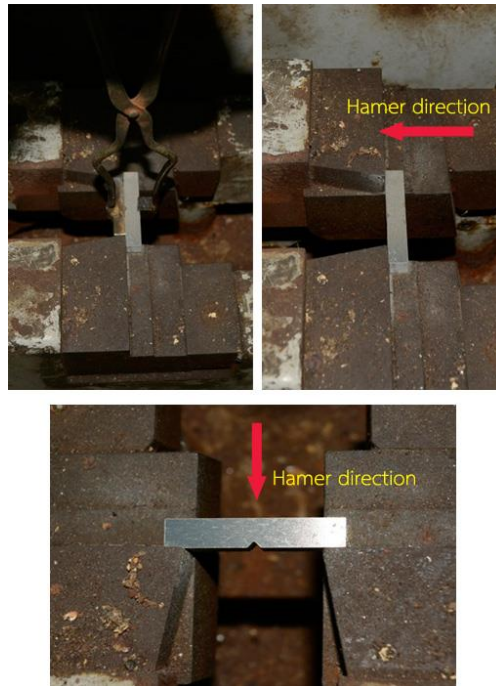
2



3



รูปที่ 3. 29 การทดสอบการกระแทก หมายเลข 1 ติดตั้งชิ้นงานในตำแหน่งที่จะกระแทก หมายเลข 2 ติดตั้งค้อนในตำแหน่งที่จะปล่อย หมายเลข 3 ปล่อยค้อนกระแทกชิ้นงาน



รูปที่ 3. 30 การจัดวางชิ้นงานอะลูมิเนียมเพื่อทดสอบการกระแทก

### 3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการทดสอบมาทำการวิเคราะห์ และสรุปผล เพื่อเปรียบเทียบการป้องกันกระสุน และคุณสมบัติทางกลของวัสดุทดสอบในทุกเงื่อนไขการทดสอบ

#### 3.5.1 การกระจายตัวของเส้นใย

นำสมการ 2.15 มาใช้คาดคะเนการกระจายตัวของเส้นใยชานอ้อยในเนื้อพื้ได้ ปริมาณพื้ที่

ผิวเส้นใยต่อปริมาตรเนื้อพื้คำนวณได้จากสมการ 
$$S/V = \frac{\pi(D+d)}{2} l / \frac{\pi}{4} \times D \times d \times l$$

และสามารถประยุกต์หาจำนวนเส้นใยต่อหน่วยปริมาตรได้โดยการคำนวณพื้ที่ผิวเส้นใยจากสมการ พื้ที่ผิวทรงกระบอก  $A = \frac{\pi}{4} \times D \times d \times l$  นำค่าพื้ที่ผิวเส้นใยที่ได้หารด้วยปริมาณพื้ที่ผิวเส้นใยต่อปริมาตรเนื้อพื้ จะสามารถประมาณจำนวนเส้นใยต่อปริมาตรเนื้อพื้ได้ ส่วนการประมาณจำนวนเส้นใยตามเงื่อนไข 30, 50, 70, และ 90 Vol.% สามารถนำร้อยละ โดยปริมาตร ของเส้นใยในเนื้อพื้คูณจำนวนเส้นใยต่อปริมาตรเนื้อพื้ที่คำนวณไว้ได้

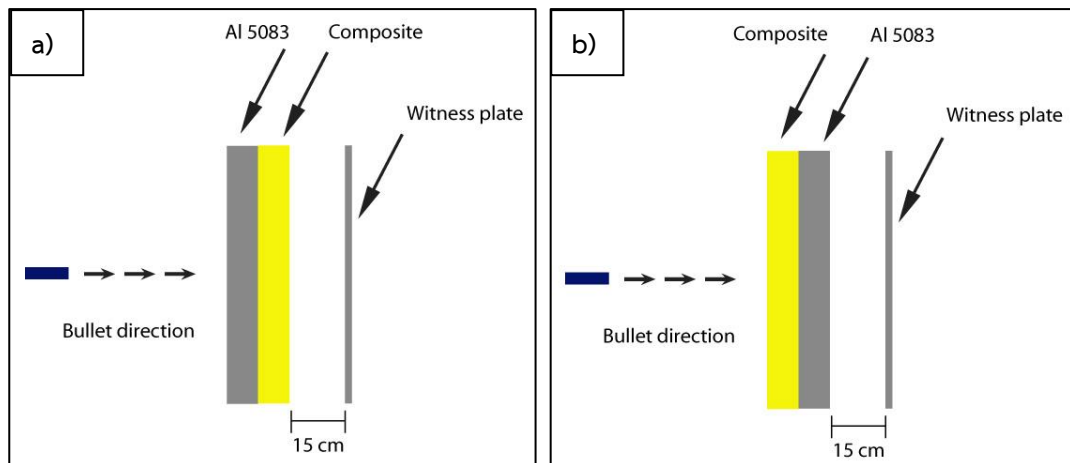


### 3.5.2 การทดสอบการต้านทานแรงดัดโค้ง

ในการทดสอบการดัดโค้งนั้นต้องนำข้อมูลที่ได้จากเครื่องทดสอบมาคำนวณหาค่าโมเมนต์ดัด (Flexural moment) โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) และความเค้นเฉือน (Shear stress) จากสมการในบทที่ 2 โดยเริ่มจากการหาโมเมนต์เฉื่อย (Moment of inertia or Secondary moment) ของชิ้นงานจากสมการ  $I = \frac{bh^3}{12}$  ในที่นี้  $b=25$  mm และ  $h=10$  mm ในการทดสอบการดัดโค้งไม่สามารถหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นได้จากจุดครากในกราฟ แต่หาได้จากสมการ  $\frac{M}{I} = \frac{E}{R}$  แก้สมการเพื่อหาค่าจากชิ้นงานทรงสี่เหลี่ยมจะได้  $E = \frac{Mh}{2\delta l}$

### 3.5.3 การทดสอบการป้องกันกระสุน

ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบนั้น หลังการยิงด้วยกระสุนทดสอบ (9mm Parabellum ความเร็ว  $436 \pm 15$  m/s) ทุกนัดต้องมีการตรวจสอบชิ้นงานทดสอบ และแผ่นพยาน หากสะเก็ด หรือกระสุนทะลุแผ่นพยาน ทำให้แผ่นพยานเกิดรู/ช่องที่แสงไฟส่องทะลุไปได้ จะถือว่าชิ้นงานทดสอบนั้นไม่ผ่านการทดสอบในการเป็นวัสดุกันกระสุน โดยในการยิงแต่ละนัดบนชิ้นงานทดสอบต้องห่างจากนัดก่อนหน้า 2 นิ้ว และห่างจากมุมของชิ้นงานเข้ามา 2 นิ้วเช่นกัน ชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบคือชิ้นงานที่ไม่เกิดการเจาะทะลุที่ชิ้นงานด้านหน้า และ/หรือ ชิ้นส่วน/สะเก็ดชิ้นงานไม่ทำให้เกิดรู/ช่องที่แผ่นพยานด้านหลังจนเห็นแสงไฟจากหลอดไฟลอดผ่านไปได้ ทั้งนี้ต้องผ่านการทดสอบหมดทั้ง 5 ที่ยิง หากมีนัดใดใน 5 นัดไม่ผ่านการทดสอบแม้ไม่ใช่นัดแรกจะถือว่าชิ้นงานไม่ผ่านการทดสอบในการเป็นวัสดุกันกระสุนเช่นกัน โดยเงื่อนไขการทดสอบแบ่งออกเป็นสองเงื่อนไข คือ วัสดุกันกระสุนที่มีแผ่นอะลูมิเนียมอยู่ด้านหน้า และวัสดุกันกระสุนที่มีแผ่นวัสดุผสมอยู่ด้านหน้า ดังแสดงภาพวาดการจัดเรียงชิ้นงานในรูปแบบที่ 3.31



รูปที่ 3. 31 การจัดเรียงชิ้นงาน (a) อะลูมิเนียมเป็นส่วนหน้า (b) วัสดุผสมเป็นส่วนหน้า

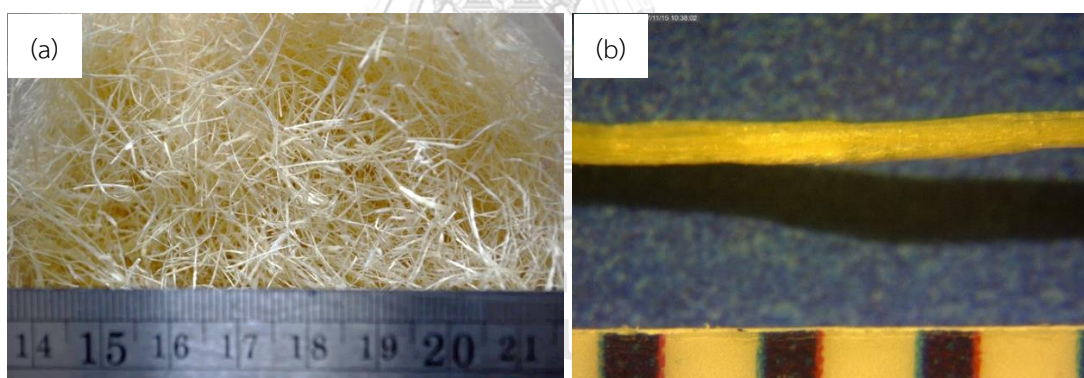


## บทที่ 4

## ผลการวิจัย

## 4.1 เส้นใยชานอ้อย

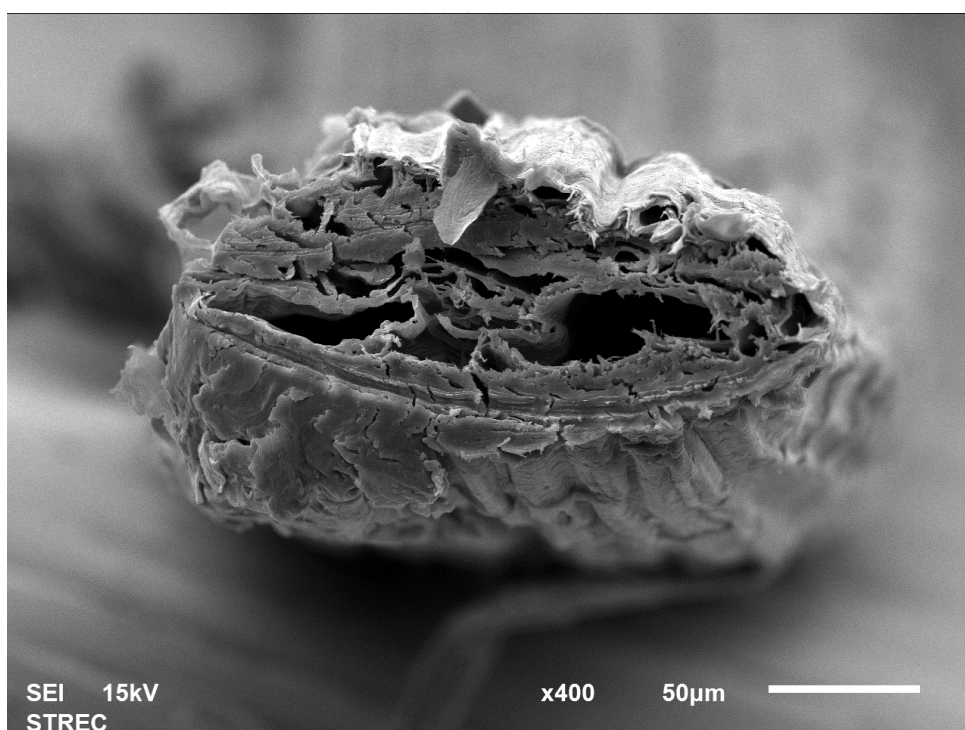
ชานอ้อยที่นำมาผลิตเป็นเส้นใยคือ ชานอ้อยที่ผ่านกรรมวิธีรีดน้ำออกแล้ว และเมื่อนำไปผ่านกระบวนการปรับปรุงผิว จะได้เส้นใยที่มีลักษณะคล้ายเส้นใยของรังนก เส้นใยมีสีเหลืองอ่อน เกาะกลุ่มกันแบบหลวม ๆ เมื่อนำมาขยี้ หรือแฉกด้วยมือ จะหลุดออกจากกันได้ง่าย ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.1 เส้นใยความยาวเฉลี่ยประมาณ 3.29 cm (ข้อมูลกายภาพของเส้นใยแสดงในตารางที่ 4.1) และจากรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าเส้นใยชานอ้อยมีลักษณะรูปร่างหน้าตัดเป็นวงรีและมีช่องว่างอยู่ภายใน



รูปที่ 4. 1 เส้นใยชานอ้อยที่ผ่านการปรับปรุงผิว (a) ภาพจากกล้องถ่ายภาพ และ (b) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แสงที่กำลังขยาย x100

ตารางที่ 4. 1 ข้อมูลทางกายภาพของเส้นใยชานอ้อย

Material	Density (g/cm <sup>3</sup> )	D (mm)	d (mm)	Length (cm)	Surface to Volume (mm <sup>2</sup> /mm <sup>3</sup> )	Fiber amount to Volume (fibers/mm <sup>3</sup> )
Bagasse fiber	0.03	0.24	0.13	3.29	24.07	306.19



รูปที่ 4. 2 ภาพ SEM แสดงเส้นใยชานอ้อยภายหลังการปรับปรุงผิว

## 4.2 ผลการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างของชิ้นงานทดสอบ

### 4.2.1 แผ่นอะลูมิเนียมผสมเกรด AA5083

แผ่นอะลูมิเนียมผสมเกรด AA5083 มีผิวเรียบสม่ำเสมอทั้งสองด้าน ขอบของแผ่นอะลูมิเนียมทุกแผ่นผ่านการขัดลบคมด้วยกระดาษทราย อะลูมิเนียมทั้งแผ่นมีสีเทาเข้ม มีความเงา และสะท้อนแสง สามารถมองเห็นเส้นแนวการรีดเป็นเส้นเล็กก่อนข้างขัดที่ผิวของแผ่นอะลูมิเนียม ตัวอย่างแผ่น

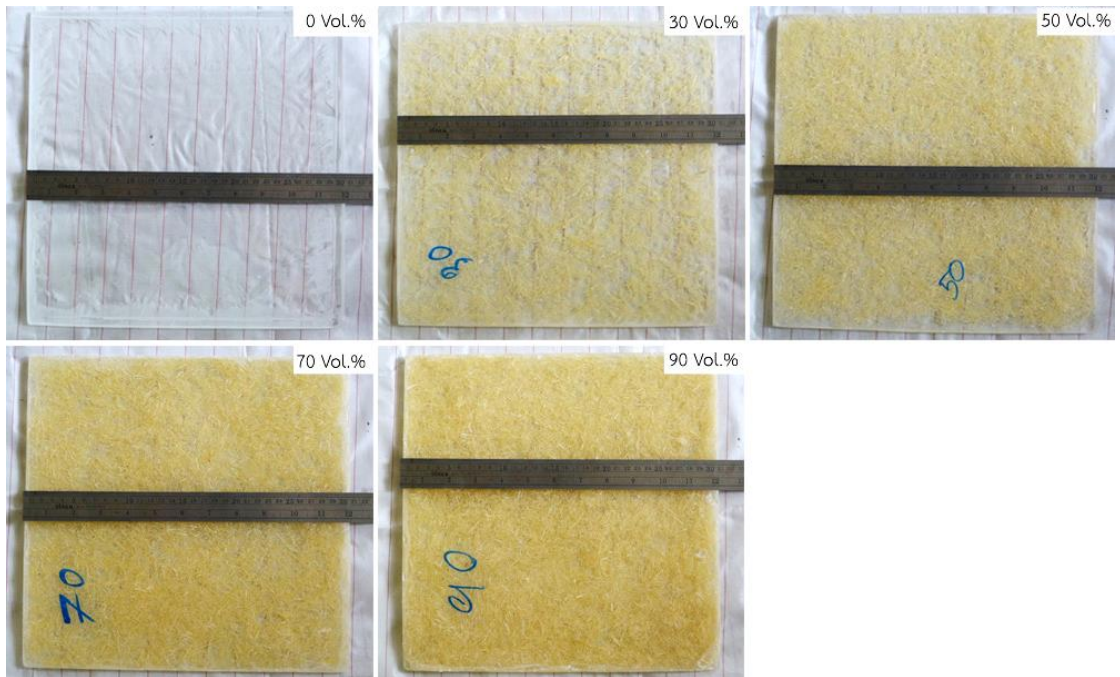
อะลูมิเนียมแสดงในรูปที่ 4.3 ชิ้นงานมีขนาดหน้าตัด 30.5 cm x 30.5 cm เท่ากันทุกแผ่น ส่วนความหนาที่ใช้นั้นเท่ากับ 6 mm 8 mm และ 10 mm



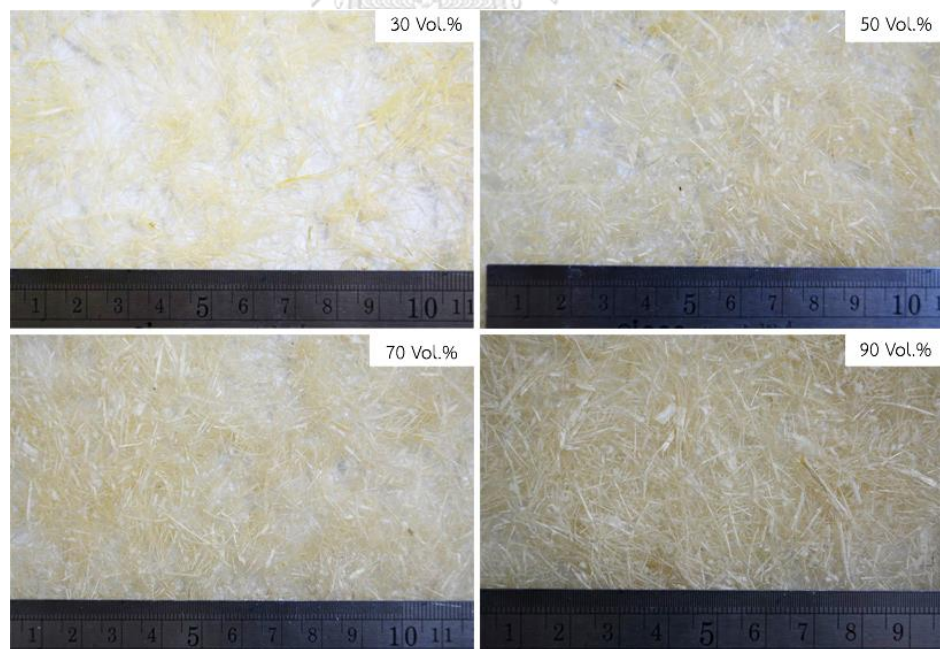
รูปที่ 4.3 แผ่นอะลูมิเนียมเกรด AA5083

#### 4.2.2 แผ่นวัสดุผสม

แผ่นวัสดุผสมมีผิวเรียบสม่ำเสมอ แผ่นวัสดุผสมที่มีการเสริมเส้นใย พบว่าไม่มีส่วนของเส้นใยยื่นออกมาจากผิว เส้นใยมีการกระจายตัวดีในเนื้อเรซิน แผ่นวัสดุผสมมีความหนา 10 mm เท่ากันทุกแผ่น ตัวอย่างแผ่นวัสดุผสมแสดงในรูปที่ 4.4 ที่ขอบชิ้นงานมีการขัดผิวเพื่อลบคมด้วยกระดาษทราย ชิ้นงานมีขนาด 30.5 cm x 30.5 cm เท่ากันทุกแผ่น ความแตกต่างของปริมาณเส้นใยในแผ่นวัสดุผสม คือ 0, 30, 50, 70 และ 90 Vol.% ดังแสดงในรูปที่ 4.5

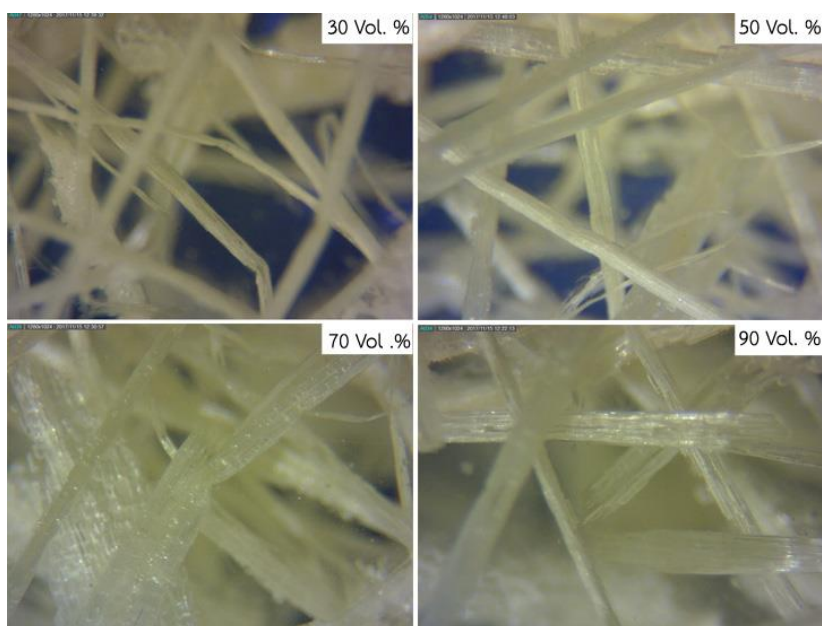


รูปที่ 4. 4 ลักษณะกายภาพด้านหน้าของแผ่นวัสดุผสม



รูปที่ 4. 5 การกระจายตัวของเส้นใยในแผ่นวัสดุผสม

รูปที่ 4.6 แสดงการกระจายตัวและลักษณะการเรียงตัวของเส้นใยในแผ่นวัสดุผสมจากกล่อง จุลทรรศน์แสงกำลังขยาย 100 เท่า จะเห็นว่าเส้นใยมีการกระจายตัวทุกทิศทาง มีทิศทางไม่แน่นอน และไม่ต่อเนื่องกัน เมื่อขยายภาพจะเห็นชัดว่าเนื้อพื้นมีความใสมาก ทำให้เห็นลักษณะ และการวางตัวของเส้นใยชัดเจน ในส่วนของปริมาณเส้นใยนั้นจะมากขึ้นตามสัดส่วนโดยปริมาตรที่เพิ่มขึ้น สีของเส้นใยไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่มีลักษณะเหมือนเส้นใยก่อนที่จะใส่ในเรซิน



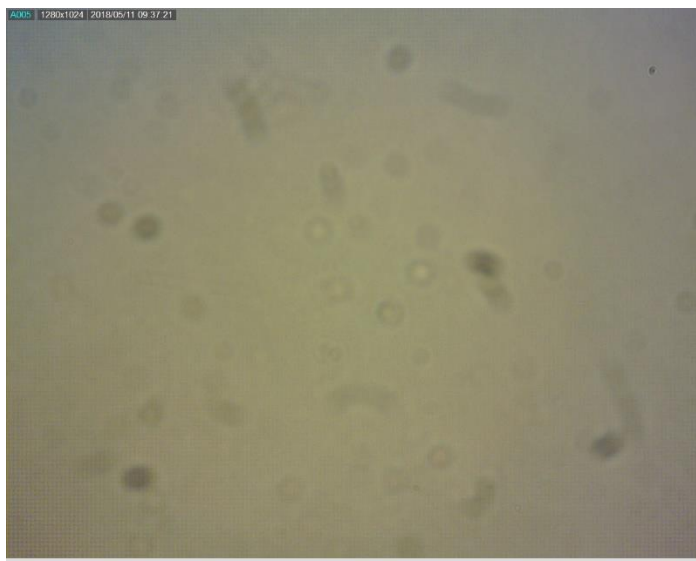
รูปที่ 4. 6 ลักษณะของเส้นใยชานอ้อยที่เสริมในชิ้นงานวัสดุผสมในปริมาณต่าง ๆ

CHULALONGKORN UNIVERSITY

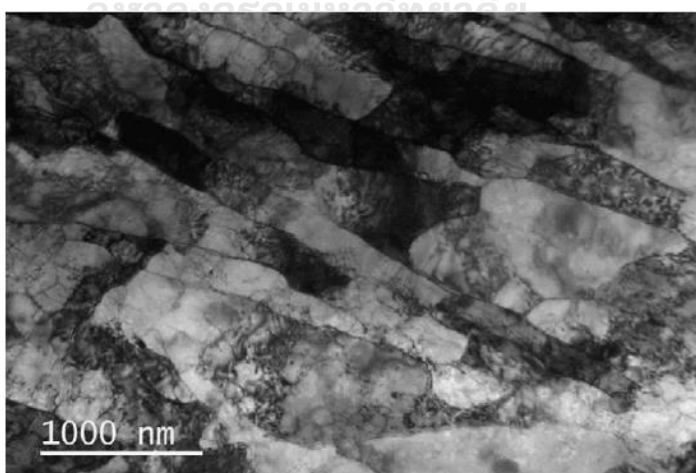
#### 4.2.4 ชิ้นงานทดสอบการป้องกันกระสุน

ในรูปที่ 4.7 แสดงผิวของอะลูมิเนียมเกรด AA 5083-H116 จากกล่องจุลทรรศน์แสง ส่วนในรูปที่ 4.8 รูปจากกล่อง TEM แสดงโครงสร้างระดับจุลภาคภายในเกรนเรียงกันเป็นชั้นตามทิศทางการรีด มีดีสโลเคชันกระจายอยู่ จะเห็นส่วนของส่วนผสมใหม่คือส่วนผสมระหว่างอะลูมิเนียม-แมงกานีส (Al-Mn) เป็นสีดำ เนื้อสีเทาเป็นส่วนของอะลูมิเนียม และอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม (Al-Mg) [35] แผ่นอะลูมิเนียมและวัสดุผสมที่ยึดติดกันเป็นวัสดุกันกระสุนนั้น สามารถยึดติดกันอย่างแน่นหนา (ดูรูปที่ 4.9) เมื่อประกอบแผ่นวัสดุผสมและแผ่นอะลูมิเนียมเข้าด้วยกันแล้วพบว่า ไม่มีส่วนที่ยื่นออกมาจากผิวทั้งสองด้าน รอยต่อระหว่างแผ่นวัสดุผสมและแผ่นอะลูมิเนียม ชิ้นงานวัสดุกันกระสุนสามารถมองเห็นส่วนที่เป็นแผ่นอะลูมิเนียมและแผ่นวัสดุผสมชัดเจน ตารางที่ 4.2 แสดงข้อมูลและสมบัติจำเพาะของ

ชิ้นงานวัสดุผสม จะเห็นได้ว่าแผ่นวัสดุผสมมีความหนาแน่นน้อยกว่าแผ่นอะลูมิเนียม ดังนั้นเมื่อนำมาประกอบเป็นชิ้นงานวัสดุกันกระสุนจะมีความหนารวม 2 cm จึงทำให้น้ำหนักรวมของชิ้นงานทดสอบ (น้ำหนักรวม 3,387 g) น้อยกว่าเมื่อเทียบกับการใช้แผ่นอะลูมิเนียมความหนา 2 cm ทั้งแผ่น (น้ำหนักรวม 4,924 g)

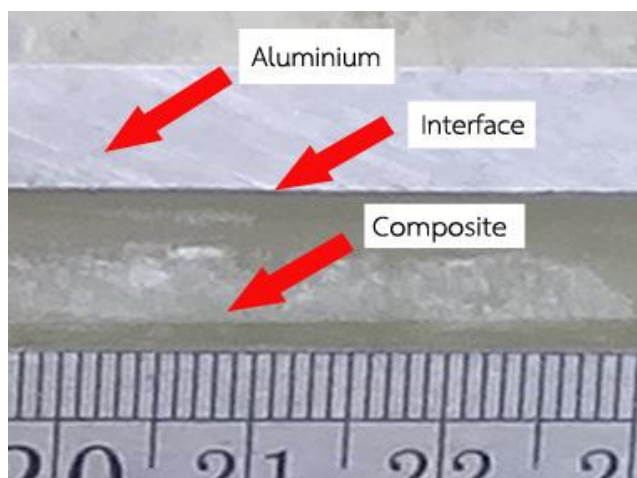


รูปที่ 4. 7 โครงสร้างอะลูมิเนียม AA5083-H116 กำลังขยาย 100 เท่า



รูปที่ 4. 8 โครงสร้างอะลูมิเนียม AA 5083-H116 จากกล้อง TEM [35]





รูปที่ 4. 9 การยึดติดกันระหว่างแผ่นวัสดุผสมและแผ่นอะลูมิเนียม

ตารางที่ 4. 2 สมบัติจำเพาะของวัสดุกันกระสุน

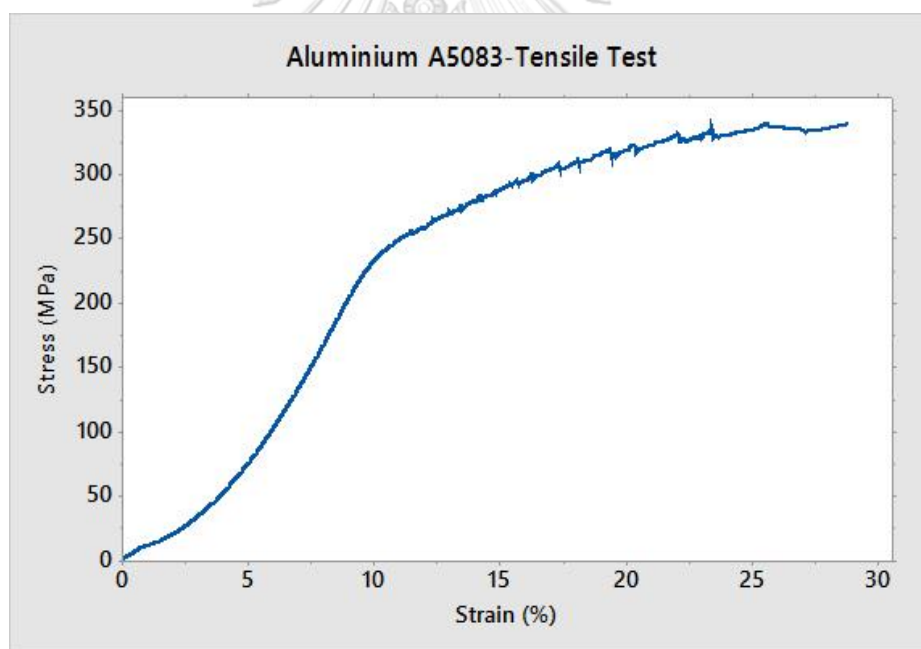
Material Component	Volume (cm <sup>3</sup> )	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Weight (g)
Al-6mm	558.15	2.67	1448
Al-8mm	744.2	2.67	2042
Al-10mm	930.25	2.67	2462
epoxy-0%	930.25	0.94	880
epoxy-30%	930.25	0.98	910
epoxy-50%	930.25	0.99	925
epoxy-70%	930.25	1.00	930
epoxy-90%	930.25	1.00	935

#### 4.3 ผลการทดสอบสมบัติทางกลในห้องปฏิบัติการ

##### 4.3.1 ผลการทดสอบแรงดึง (Tensile test)

- อะลูมิเนียมผสมเกรด AA5083

ผลการทดสอบสมบัติทางกลแสดงในตารางที่ 4.3 จากกราฟในรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่า ความเครียดเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น โดยบริเวณจุดคราก (ความเค้นประมาณ 311.50 MPa) และค่าความเค้นสูงสุด เท่ากับ 339.12 MPa (ดูตารางที่ 4.3) เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจะลดลง และตกลงอย่างชัดเจนทันทีที่ถึงจุดที่ชิ้นงานอะลูมิเนียมเกิดการแตกหัก จากสมบัติของอะลูมิเนียมผสมเกรด AA5083 ที่แสดงในตารางที่ 2.3 ในบทที่ 2 ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดนั้นมีค่าเท่ากับ 317 MPa ซึ่งน้อยกว่าค่าที่ได้จากค่ามาตรฐานที่ใช้อ้างอิง [13] โดยมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 7 % ในรูปที่ 4.11 เป็นรูปการทดสอบแรงดึงอะลูมิเนียม AA5083-H116



รูปที่ 4. 10 กราฟความเค้น-ความเครียดจากแรงดึงของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม

ตารางที่ 4. 3 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงของอะลูมิเนียมผสม AA5083

Specimen	Energy (J)	Tensile strength (MPa)	Elongation at maximum stress (%)	Modulus of elasticity (MPa)	Yield point-stress 0.2%(MPa)	Yield point-strain 0.2% (%)
Sample	74.19	339	25.63	17.86	309.87	17.35
Standard	-	317	-	7.03	228	-



รูปที่ 4. 11 การดึงทดสอบชิ้นงานอะลูมิเนียม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

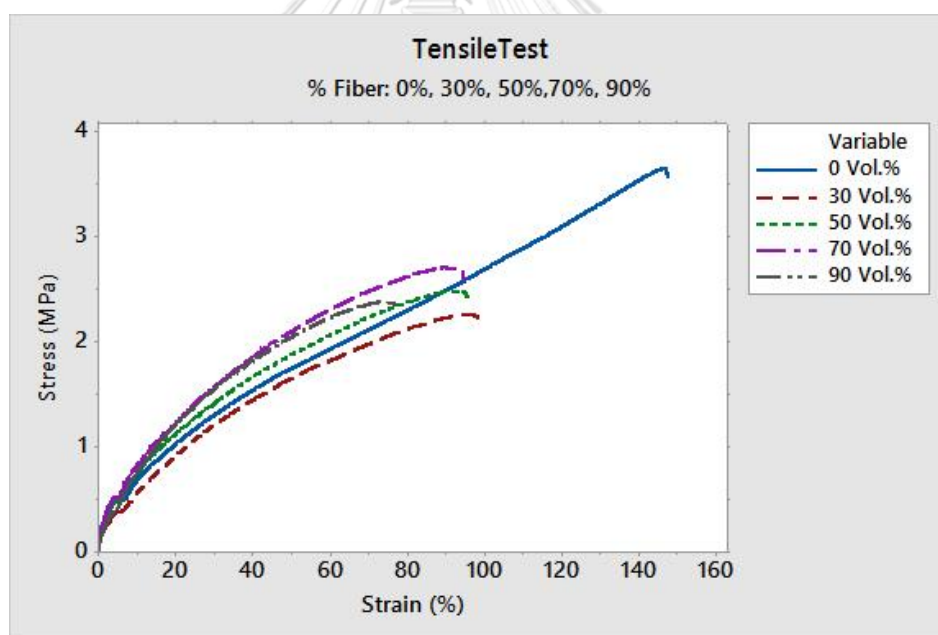
CHULALONGKORN UNIVERSITY

- วัสดุผสม

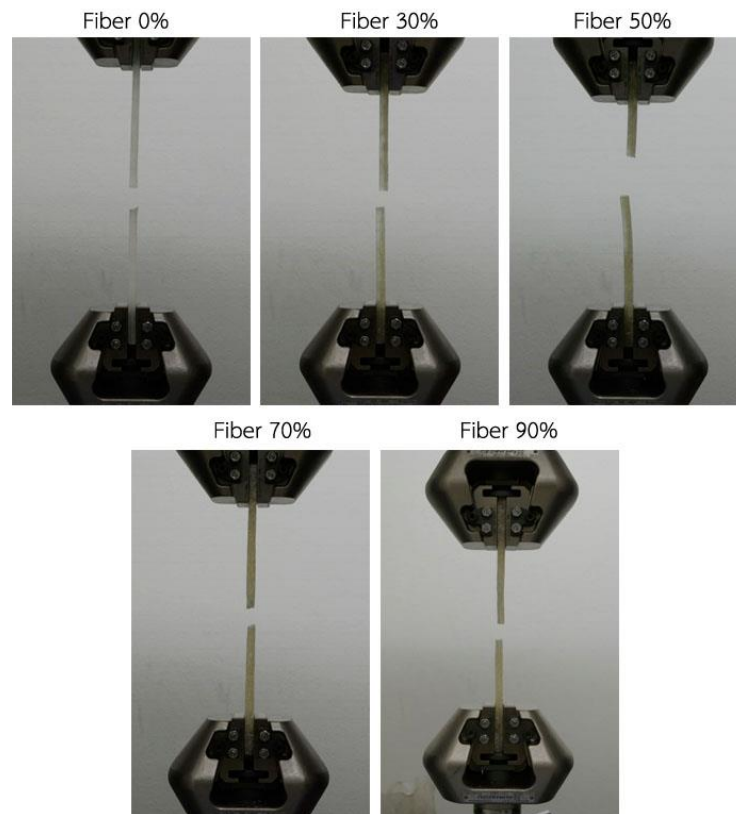
กราฟความเค้น-ความเครียดที่ได้จากการทดสอบชิ้นงานวัสดุผสมที่เสริมและไม่เสริมเส้นใย แสดงเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดในรูปที่ 4.12 จะเห็นว่าชิ้นงานที่ไม่เสริมเส้นใย เป็นชิ้นงานวัสดุผสมที่มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด เท่ากับ 3.64 MPa ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.12 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานเสริมเส้นใยด้วยกันเอง ชิ้นงานวัสดุผสมที่มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดในบรรดาชิ้นงานวัสดุผสมที่เสริมเส้นใยคือชิ้นงานที่เสริมเส้นใยปริมาณ 70 Vol.% ซึ่งมีค่าความต้านทานแรงดึงเท่ากับ 2.69 MPa จะเห็นว่าค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานวัสดุผสมนั้นเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของอีพอกซีเรซินนั้นเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเสริมเส้นใยในชิ้นงาน โดยชิ้นงานที่มีค่ามอดุลัสยืดหยุ่นสูงสุดคือ ชิ้นงานที่เสริมเส้นใยปริมาณ 70 Vol.% มีค่าเท่ากับ 13.93 MPa ในรูปที่ 13 แสดงการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานวัสดุผสม

ตารางที่ 4. 4 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานวัสดุผสม

Specimen	Energy (J)	Maximum stress (MPa)	Elongation at maximum stress (%)	Modulus of elasticity (MPa)	Yield-stress 0.2% (MPa)	Yield-strain 0.2% (%)
0 Vol.%	32.93	3.64	146	10.58	0.47	4.43
30 Vol.%	16.09	2.25	96.20	6.50	0.37	5.67
50 Vol.%	17.91	2.47	93.38	12.33	0.45	3.69
70 Vol.%	20.01	2.69	89.67	13.93	0.47	3.35
90 Vol.%	14.25	2.37	74.24	10.05	0.36	3.62

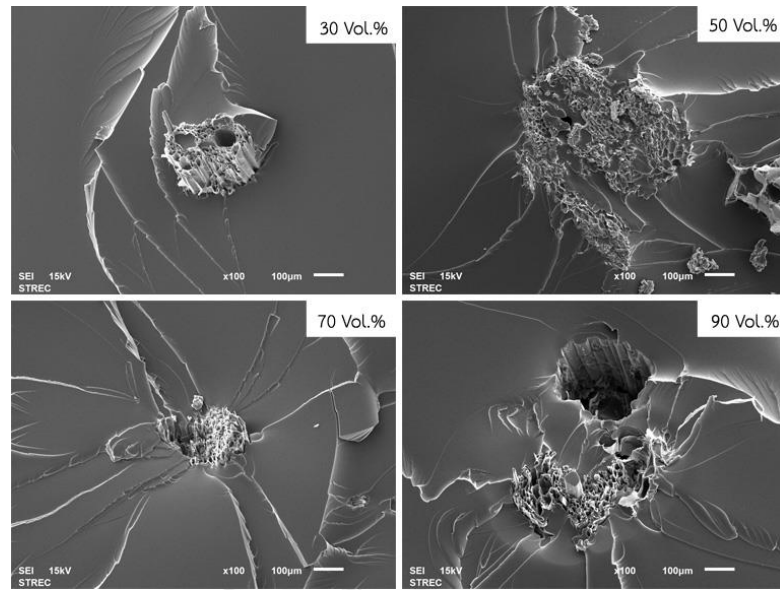


รูปที่ 4. 12 กราฟความเค้น-ความเครียดจากแรงดึงของชิ้นงานวัสดุผสม

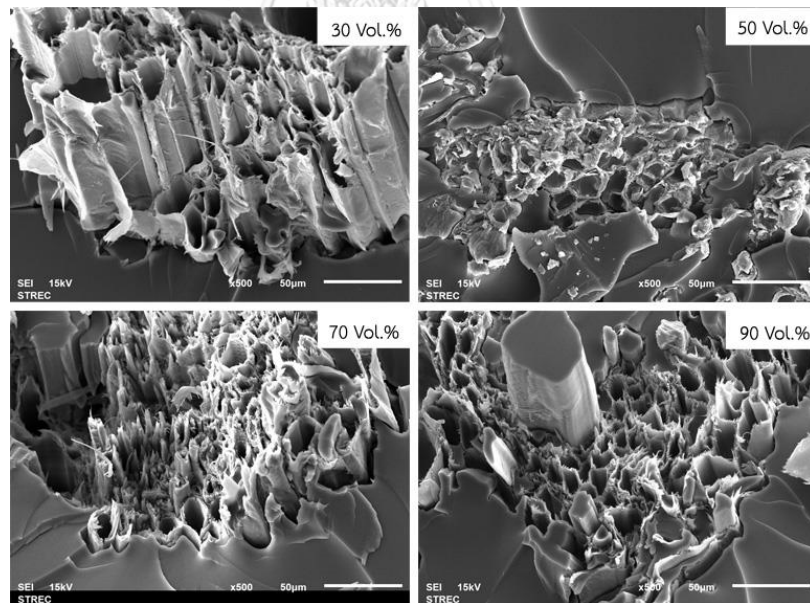


รูปที่ 4. 13 การทดสอบแรงดึง

ผิวรอยขาดของชิ้นงานวัสดุผสมในรูปที่ 4.14 รูปจากกล้อง SEM แสดงให้เห็นส่วนที่เป็นเนื้อพื้น และส่วนของเส้นใยที่ขาดออกจากกัน จะเห็นว่ารอยขาดบนเนื้อพื้นนั้นคล้ายลักษณะความเสียหายที่เกิดกับวัสดุ ผิวที่ไม่เรียบจะพบบริเวณใกล้กับเส้นใย แสดงให้เห็นว่าเส้นใยมีส่วนช่วยยึดเนื้อพื้นไม่ให้ขาดออกจากกัน เมื่อเพิ่มกำลังขยายเป็น 500 เท่า ในรูปที่ 4.15 จะเห็นว่าเนื้อพื้นรอยเส้นใย มีรอยขาดที่ผิวไม่เรียบอยู่มาก สันนิษฐานได้ว่าเส้นใยช่วยยึดเนื้อพื้นไว้ขณะที่รับแรงดึง ประกอบกับค่ามอดุลัสยืดหยุ่นที่เพิ่มขึ้นเมื่อเสริมเส้นใยปริมาณ 70 Vol.%



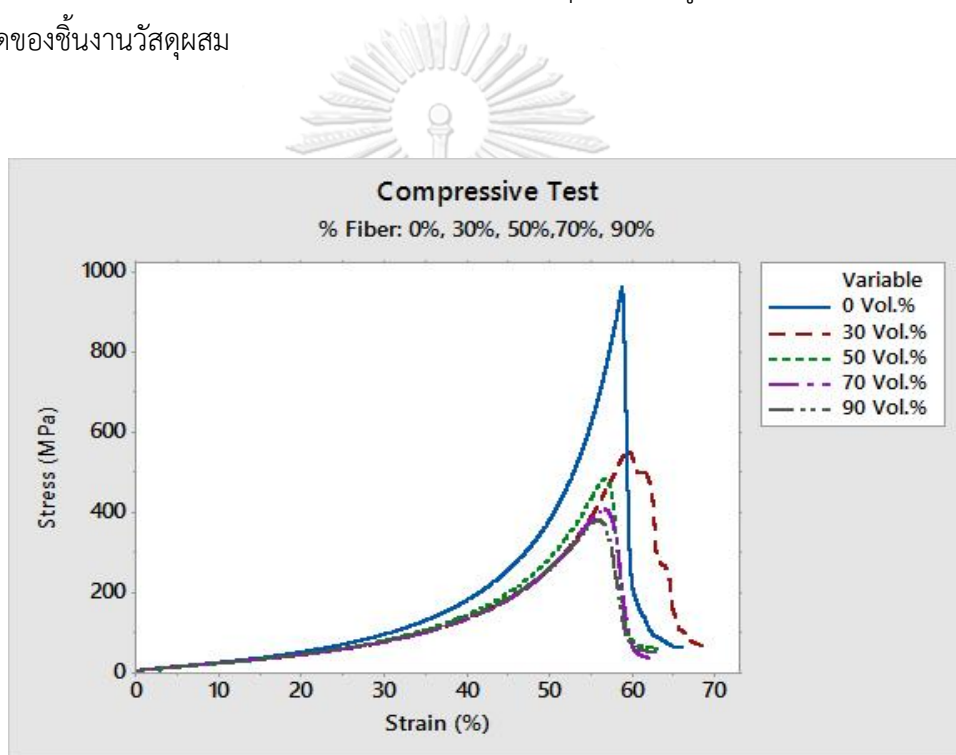
รูปที่ 4. 14 ผิวยรอยขาดจากการดึงทดสอบของวัสดุผสมที่เสริมเส้นใยปริมาณต่างกัน (กำลังขยาย  $\times 100$ )



รูปที่ 4. 15 ผิวยรอยขาดจากการดึงทดสอบของวัสดุผสมที่เสริมเส้นใยปริมาณต่างกัน (กำลังขยาย  $\times 500$ )

#### 4.3.2 ผลการทดสอบแรงอัด

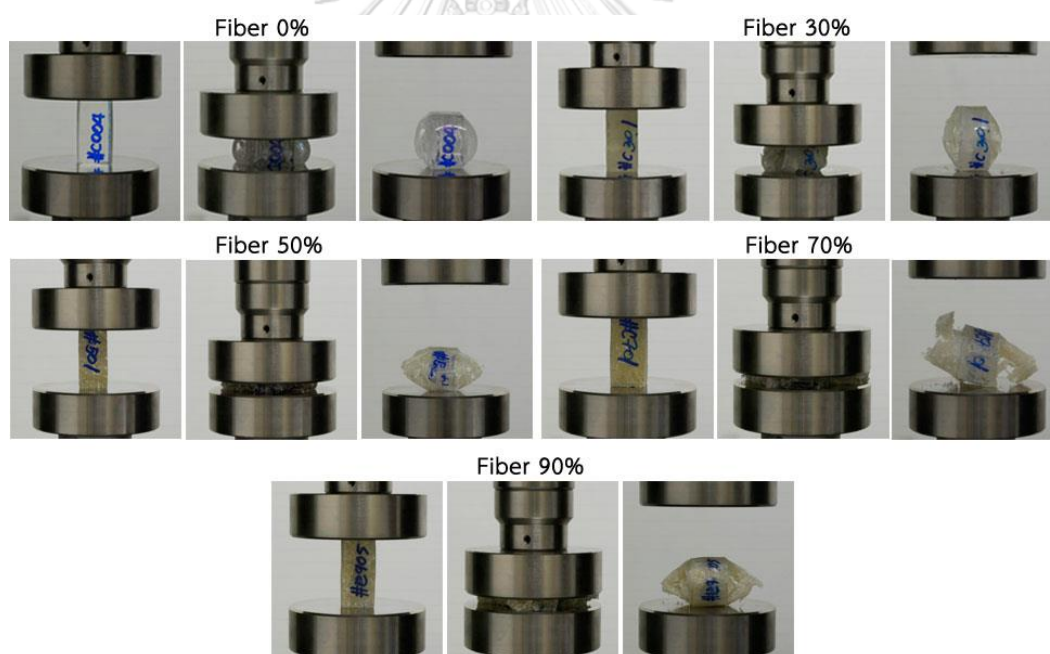
ผลการทดสอบที่แสดงในตารางที่ 4.5 จะเห็นว่าค่าความแข็งแรงอัดสูงสุด (Maximum compressive strength) ในชิ้นงานที่ไม่ได้เสริมเส้นใยนั้นมีค่ามากที่สุด คือ 965 MPa และค่าความแข็งแรงอัดสูงสุดของวัสดุจะลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น ชิ้นงานวัสดุผสมที่มีค่าความแข็งแรงอัดน้อยสุดคือชิ้นงานที่เสริมเส้นใยปริมาณ 90 Vol.% คือมีค่าเท่ากับ 378 MPa ส่วนค่ามอดุลัสยืดหยุ่นนั้นชิ้นงานที่มีค่าสูงสุดยังคงเป็นของชิ้นงานที่เสริมเส้นใยปริมาณ 70 Vol.% คือมีค่าเท่ากับ 666 MPa ขณะที่ชิ้นงานที่ไม่ได้เสริมเส้นใยมีค่ามอดุลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 640 MPa รูปที่ 4.16 แสดงกราฟความเค้น-ความเครียดของผลการทดสอบแรงอัดของชิ้นงานวัสดุผสม ส่วนรูปที่ 4.17 เป็นการทดสอบแรงอัดของชิ้นงานวัสดุผสม



รูปที่ 4. 16 กราฟความเค้น-ความเครียดจากแรงอัดของชิ้นงานวัสดุผสม

ตารางที่ 4. 5 ผลการทดสอบแรงอัดของชิ้นงานวัสดุผสม

Specimen	Energy (J)	Maximum stress (MPa)	Elongation (%)	Modulus of elasticity (MPa)	Yield-stress 0.2%(MPa)	Yield-strain 0.2%(%)
0 Vol.%	438	965	58.93	640	2.40	0.37
30 Vol.%	199	553	59.53	444	2.55	0.57
50 Vol.%	298	481	56.88	512	2.26	0.44
70 Vol.%	377	383	56.36	666	2.69	0.40
90 Vol.%	402	378	56.08	513	2.54	0.39



รูปที่ 4. 17 การทดสอบการกดอัดชิ้นงานแต่ละสัดส่วนเส้นใย

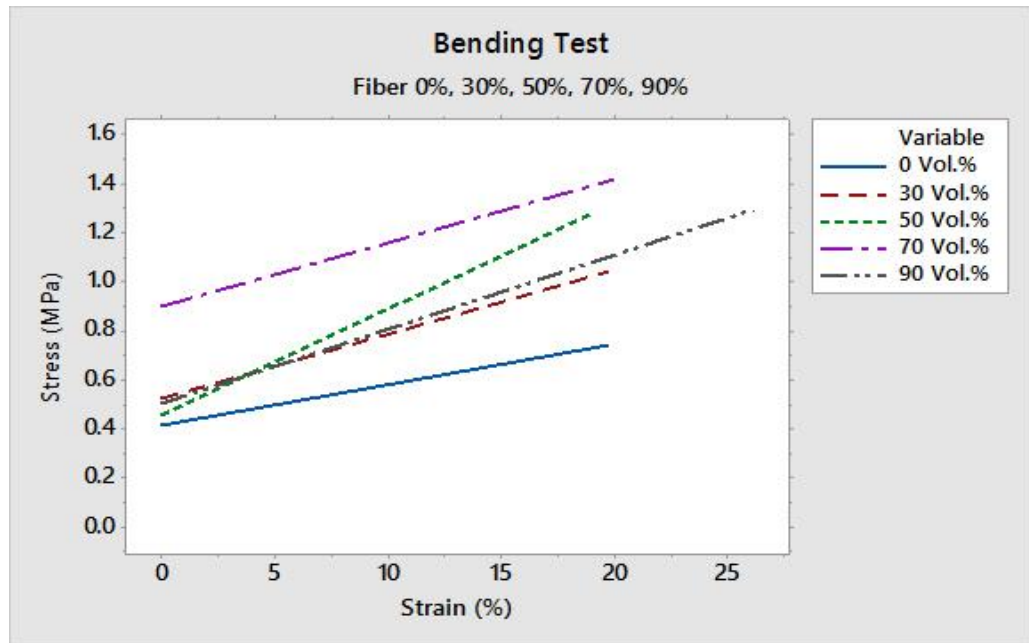


#### 4.3.3 ผลการทดสอบแรงดัด

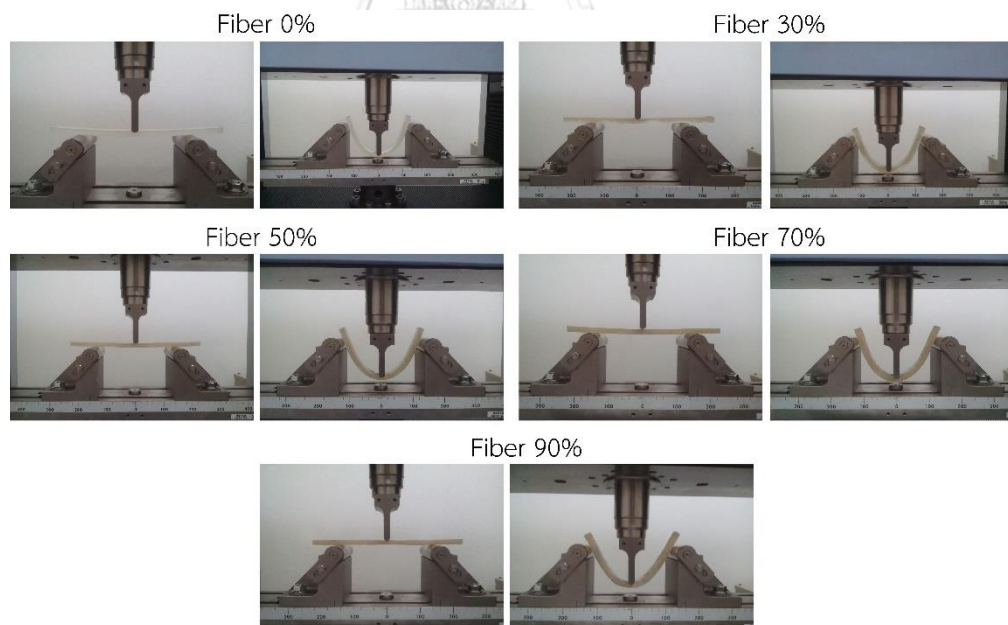
จากผลการทดสอบแรงดัดแบบสามจุดในตารางที่ 4.6 (ดูรูปที่ 4.18 ประกอบ) จะเห็นว่าความเค้นสูงสุดในการดัดที่มีค่ามากที่สุดได้จากชิ้นงานที่เสริมเส้นใยปริมาณ 70 Vol.% คือมีค่าเท่ากับ 1.56 MPa โดยค่าความเค้นสูงสุดที่น้อยสุดนั้นได้จากชิ้นงานที่ไม่ได้เสริมเส้นใย มีค่าเท่ากับ 0.79 MPa ส่วนชิ้นงานที่มีค่ามอดุลัสยืดหยุ่นมากที่สุดคือชิ้นงานที่เสริมเส้นใยปริมาณ 70 Vol.% คือมีค่าเท่ากับ 16.07 MPa ส่วนชิ้นงานที่มีค่ามอดุลัสยืดหยุ่นน้อยที่สุดได้แก่ชิ้นงานที่เสริมเส้นใยปริมาณ 90 Vol.% คือมีค่าเท่ากับ 6.21 MPa

ตารางที่ 4. 6 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นงานอีพอกซีเรซิน

Specimen	Energy (J)	Maximum stress (MPa)	Elongation at maximum stress (%)	Modulus of elastic (MPa)	Flexural moment (N·mm)	Shear stress (MPa)
0 Vol.%	0.49	0.79	7.29	10.42	316	0.024
30 Vol.%	0.69	1.11	9.80	11.31	462	0.035
50 Vol.%	0.73	1.30	10.53	12.36	542	0.041
70 Vol.%	1.03	1.56	9.74	16.08	652	0.049
90 Vol.%	0.51	1.31	14.78	6.21	382	0.029



รูปที่ 4. 18 กราฟความเค้น-ความเครียดจากการทดสอบการดัดของชิ้นงานวัสดุผสม

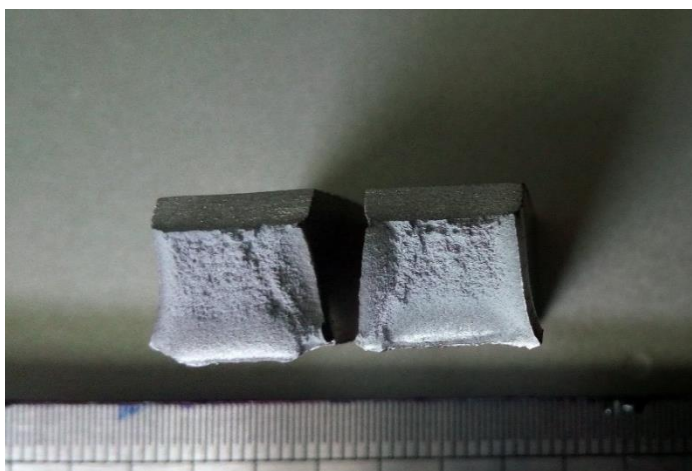


รูปที่ 4. 19 การทดสอบการดัดโค้ง

#### 4.3.4 ผลการทดสอบการต้านทานแรงกระแทก (Impact test)

- อะลูมิเนียมผสม AA5083

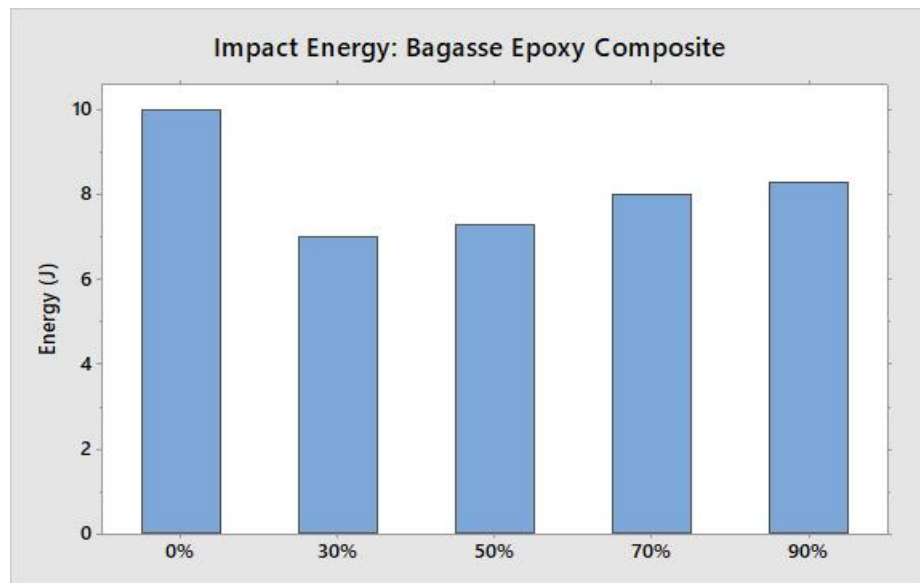
ค่าพลังงานการกระแทกที่ได้จากการทดสอบชิ้นงาน คือ 77J (ดูรูปที่ 4.20 ประกอบ) นำการพิจารณาผิวรอยขาดตามตาราง 2.14 ในบทที่ 2 มาใช้ตรวจสอบผิวรอยขาด จะได้เปอร์เซ็นต์การฉีกบนผิวรอยขาดเท่ากับ 70% (ด้าน A มีขนาด 6 mm ด้าน B มีขนาด 4 mm)



รูปที่ 4. 20 ผิวรอยขาดจากการกระแทกของชิ้นงานอะลูมิเนียมเกรด AA5083

- วัสดุผสม

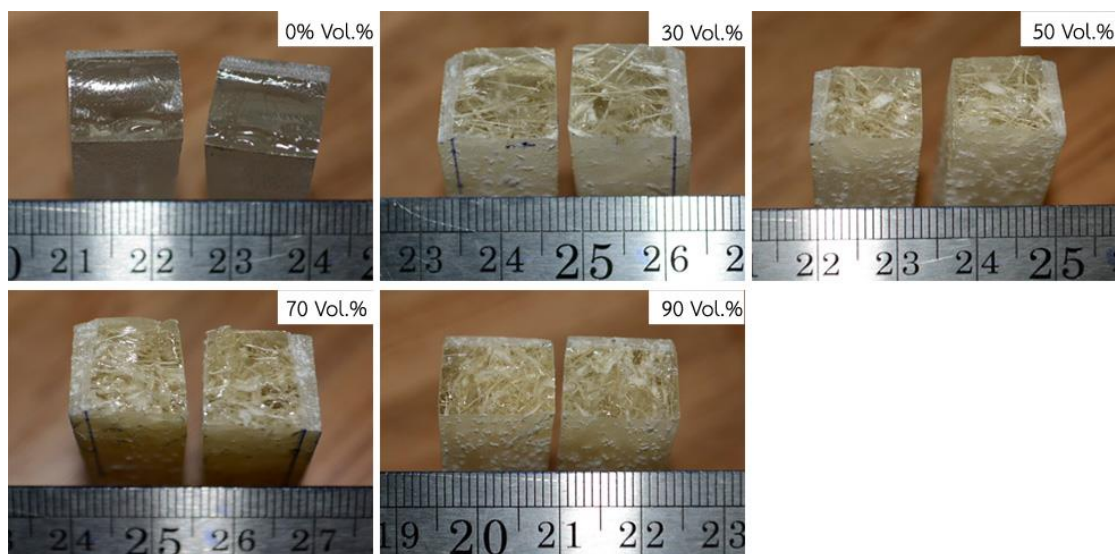
จากผลที่แสดงในตารางที่ 4.7 พบว่าชิ้นงานวัสดุผสมที่มีค่าเฉลี่ยของพลังงานสูงสุด คือ ชิ้นงานที่ไม่ได้เสริมด้วยเส้นใยชานอ้อย มีค่าพลังงานการกระแทกเท่ากับ 10 J และชิ้นงานเสริมเส้นใยชานอ้อยที่มีค่าพลังงานการกระแทกใกล้เคียงกับค่าสูงสุด คือ ชิ้นงานที่เสริมเส้นใยชานอ้อยปริมาณ 90 Vol.% มีค่าพลังงานการกระแทกเท่ากับ 8.3 J โดยชิ้นงานเสริมเส้นใยชานอ้อยในปริมาณอื่นจะมีค่าพลังงานการกระแทกน้อยกว่าค่าพลังงานการกระแทกของชิ้นงานที่ไม่ได้เสริมเส้นใยเฉลี่ย 23% ในรูปที่ 4.21 แสดงความแตกต่างของพลังงานการกระแทกของชิ้นงานวัสดุผสมในรูปแบบกราฟแท่ง และรูปที่ 4.22 แสดงผิวรอยขาดของวัสดุผสมหลังทดสอบแรงกระแทก



รูปที่ 4. 21 กราฟแท่งเปรียบเทียบพลังงานการกระแทกของชิ้นงานวัสดุผสม

ตารางที่ 4. 7 ผลการทดสอบแรงกระแทกของวัสดุผสม

Specimen	Impact energy (J)
0 Vol.%	10
30 Vol.%	7
50 Vol.%	7.3
70 Vol.%	8
90 Vol.%	8.3

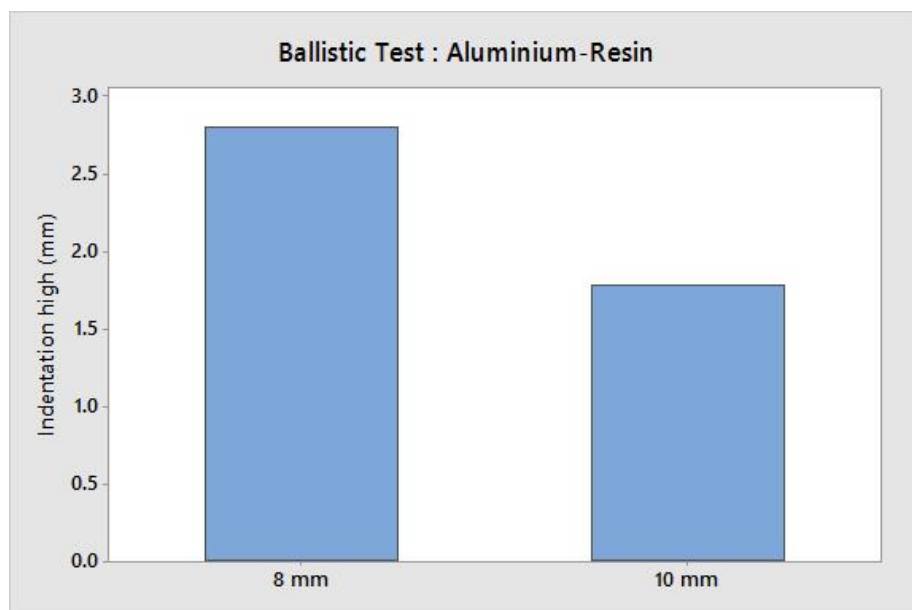


รูปที่ 4. 22 ผิวชิ้นงานวัสดุผสมที่แตกหักจากการกระแทก

#### 4.4 ผลการทดสอบการต้านทานกระสุน

##### 4.4.1 วัสดุกันกระสุนที่มีแผ่นอะลูมิเนียมเป็นส่วนหน้า

การทดสอบโดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมเป็นส่วนหน้าในการรับการปะทะของกระสุนทดสอบพบว่าชิ้นงานวัสดุกันกระสุนที่มีการใช้แผ่นอะลูมิเนียมทุกความหนาไม่สามารถนำไปใช้งานป้องกันกระสุนในสถานการณ์จริงได้ เนื่องจากสะเก็ดแผ่นวัสดุผสมของชิ้นงานวัสดุกันกระสุนที่ใช้แผ่นอะลูมิเนียมหนา 8 mm และ 10 mm เข้าปะทะกับแผ่นพยาน ทำให้แผ่นพยานเกิดรู/ช่องที่แสงจากหลอดไฟลอดผ่านได้ แม้แผ่นอะลูมิเนียมด้านหน้าไม่เกิดการเจาะทะลุก็ตาม ทั้งยังมีรอยร้าวขยายตัวมากขึ้นตามการปะทะที่เพิ่มขึ้น โดยมีขนาดหน้าตัดรูที่แตกน้อยสุดประมาณ 3.5 cm (แผ่นวัสดุผสมเสริมเส้นใยชานอ้อย 30 Vol.% ยึดติดกับแผ่นอะลูมิเนียมหนา 10 mm ในตารางที่ 4.9) ส่วนขนาดหน้าตัดของรอยกระสุนบนแผ่นอะลูมิเนียมที่มีความหนา 8 mm และ 10 mm (อะลูมิเนียมเป็นส่วนหน้า) นั้นมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 1.3 cm (ดูตารางที่ 4.8 และ 4.9) และในชิ้นงานที่แผ่นอะลูมิเนียมหนา 6 mm ชิ้นงานทดสอบเกิดการเจาะทะลุตั้งแต่ครั้งแรกที่ยิง ทำให้การวัดความสูงรอยนูนบนแผ่นอะลูมิเนียมหลังการทดสอบ สามารถวัดได้เฉพาะชิ้นงานที่แผ่นอะลูมิเนียมหนา 8 mm และ 10 mm ดังแสดงผลในตารางที่ 4.8 และ 4.9 จะเห็นว่าเมื่อความหนาของแผ่นอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น ความสูงรอยนูนที่วัดได้จะลดลง (ดูรูปที่ 4.23) แสดงว่าความหนาของแผ่นอะลูมิเนียมมีผลต่อการลดลงของความสูงรอยนูน ลักษณะของรอยกระสุนบนแผ่นอะลูมิเนียมแสดงในรูปที่ 4.24 และ 4.25



รูปที่ 4. 23 กราฟแท่งเปรียบเทียบความหนาของแผ่นอะลูมิเนียมและความสูงรอยบุ๋นของชิ้นงานวัสดุกันกระสุนที่ใช้แผ่นอะลูมิเนียมเป็นส่วนหน้า

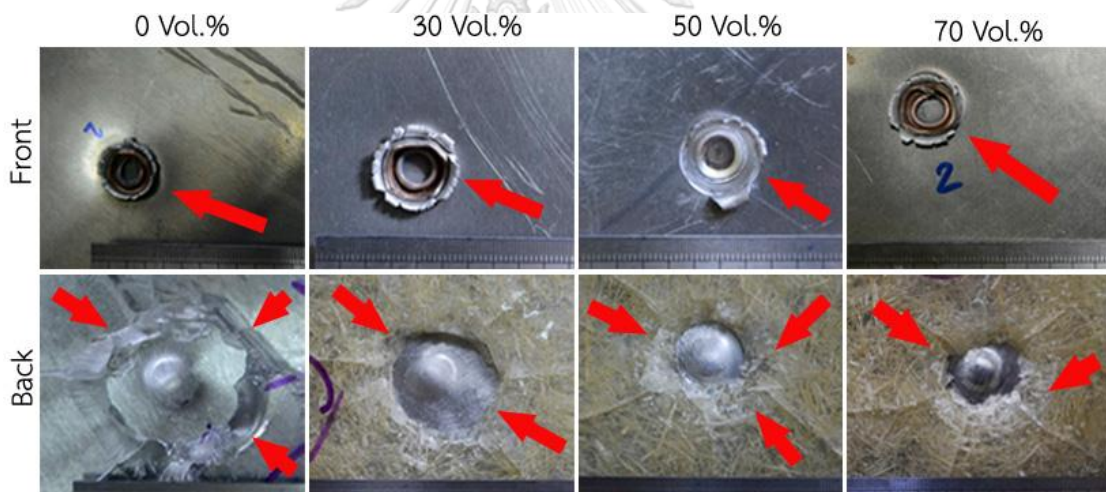
ตารางที่ 4. 8 ผลการตรวจสอบชิ้นงานวัสดุกันกระสุนที่มีแผ่นอะลูมิเนียมหนา 8 mm เป็นส่วนหน้าของแผ่นวัสดุผสม

เส้นใย	หน้าตัดรอยกระสุน บนวัสดุผสม (cm)	หน้าตัดรอยกระสุน บนอะลูมิเนียม (mm)	ความสูงรอยบุ๋น (mm)	หน้าตัดรอยบุ๋น (cm)
0 Vol.%	6.04	1.31	2.97	1.30
30 Vol.%	7.5	1.43	2.25	1.16
50 Vol.%	4.7	1.54	2.75	1.24
70 Vol.%	4.05	1.195	3.12	1.42
90 Vol.%*	-	-	-	-

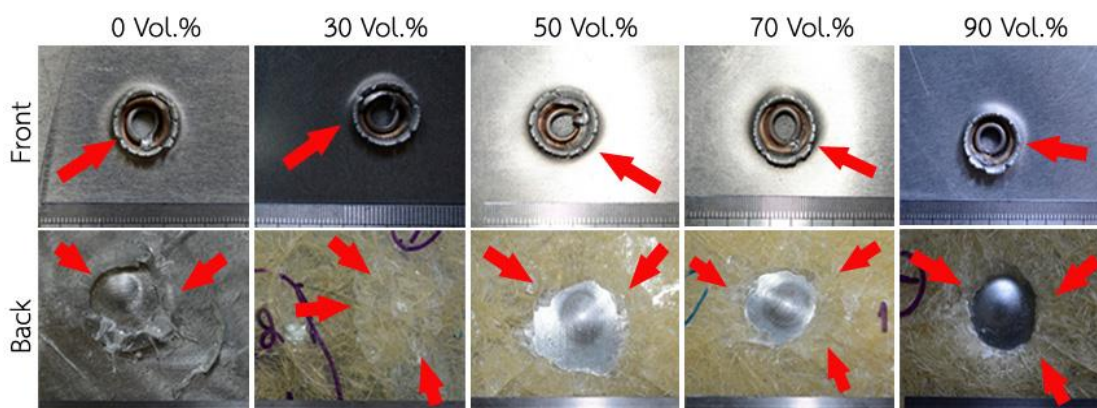
\*ไม่ได้ทดสอบยิงเนื่องจากทราบว่าสะเก็ดจะทำให้แผ่นพยานเกิดความเสียหาย และจะไม่ผ่านเกณฑ์การทดสอบ

ตารางที่ 4. 9 ผลการตรวจสอบชิ้นงานวัสดุกันกระสุนที่มีแผ่นอะลูมิเนียมหนา 10 mm เป็นส่วนหน้าของแผ่นวัสดุผสม

เส้นใย	หน้าตัดรอยกระสุนบนวัสดุผสม (cm)	หน้าตัดรอยกระสุนบนอะลูมิเนียม (mm)	ความสูงรอยบุ๋ม (mm)	หน้าตัดรอยบุ๋ม (cm)
0 Vol.%	5.45	1.4	2	1.2
30 Vol.%	3.54	1.22	1.6	1.4
50 Vol.%	7	1.27	1.55	1.36
70 Vol.%	5.9	1.3	2	1.41
90 Vol.%	5.5	1.3	1.35	1.35



รูปที่ 4. 24 ภาพความเสียหายของชิ้นงานวัสดุกันกระสุนที่มีส่วนหน้าเป็นแผ่นอะลูมิเนียมหนา 8 mm



รูปที่ 4. 25 ภาพความเสียหายของชิ้นงานวัสดุกันกระสุนที่มีส่วนหน้าเป็นแผ่นอะลูมิเนียมหนา 10 mm

#### 4.4.2 วัสดุกันกระสุนที่มีแผ่นวัสดุผสมเป็นส่วนหน้า

การทดสอบโดยใช้วัสดุผสมเป็นส่วนหน้าในการรับการปะทะของกระสุนทดสอบพบว่าการใช้แผ่นวัสดุผสมเป็นส่วนหน้าทำให้ชิ้นงานทดสอบสามารถรับการปะทะของกระสุนทดสอบได้ดีกว่าการใช้แผ่นอะลูมิเนียมเป็นส่วนหน้า สังเกตจากชิ้นงานวัสดุกันกระสุนที่แผ่นอะลูมิเนียมหนา 6 mm หากเทียบกับการใช้แผ่นอะลูมิเนียมเป็นส่วนหน้าในการรับการปะทะแล้ว การใช้แผ่นวัสดุผสมเป็นส่วนหน้าจะเกิดการเจาะทะลุบนชิ้นงานวัสดุกันกระสุนในนัดที่ 3 (กรณีแผ่นอะลูมิเนียมหนา 6 mm) ซึ่งการใช้แผ่นอะลูมิเนียมเป็นส่วนหน้านั้นเกิดการเจาะทะลุตั้งแต่นัดแรก ส่วนชิ้นงานวัสดุกันกระสุนที่ใช้แผ่นอะลูมิเนียมหนา 8 mm และ 10 mm นั้นไม่เกิดการเจาะทะลุ และไม่มีสะเก็ดของชิ้นงานวัสดุกันกระสุนที่ไปปะทะกับแผ่นพยานที่วางอยู่ด้านหลัง ในการใช้แผ่นวัสดุผสมเป็นส่วนหน้ายึดติดกับแผ่นอะลูมิเนียมที่เป็นส่วนหลังนั้น ให้ผลในการทดสอบยิ่งด้วยกระสุนทดสอบดีกว่าการใช้แผ่นอะลูมิเนียมเป็นส่วนหน้า ในส่วนของรูกระสุนที่เกิดบนแผ่นวัสดุผสมด้านหน้าของชิ้นงานวัสดุกันกระสุนนั้น ก็มีขนาดเล็กกว่ารูบนแผ่นวัสดุผสมในการทดสอบที่ใช้แผ่นวัสดุผสมเป็นส่วนหลัง คือมีขนาดประมาณ 5 mm (ดูตารางที่ 4.10 ถึง 4.12) และไม่มีรอยร้าวที่ขยายตัวออกไปยังรูอื่นบนชิ้นงานทดสอบ ดูจากรูปที่ 4.26 ถึง 4.28 ที่แสดงลักษณะของรอยกระสุนหลังการทดสอบ โดยภาพแถวบนเป็นส่วนหน้า-แถวล่างเป็นส่วนหลัง และยังพบว่าการใช้วัสดุผสมเป็นส่วนหน้าในการรับการปะทะนั้นไม่มีผลในการลดความสูงรอยยูนที่เกิดบนแผ่นอะลูมิเนียม โดยความสูงรอยยูนที่ลดลงยังมีอิทธิพลมาจากความหนาที่เพิ่มขึ้นของแผ่นอะลูมิเนียมคือ ความสูงรอยยูนมีขนาดเฉลี่ย 2.99 mm 2 mm และ 1.3 mm สำหรับความสูงรอยยูนบนแผ่นอะลูมิเนียมหนา 6 mm 8 mm และ 10 mm ตามลำดับ (ดูรูปที่



4.29) ดังแสดงผลการตรวจวัดรอยร้าวในตารางที่ 4.10 ถึง 4.12 สำหรับข้อมูลวัสดุกันกระสุนที่ใช้ ความหนาแผ่นอะลูมิเนียมผสมเกรด AA 5083 เป็นส่วนหลัง ความหนาแผ่นอะลูมิเนียม 6 mm 8 mm และ 10 mm ตามลำดับ จะเห็นว่าค่าความสูงรอยร้าวที่ได้ไม่แตกต่างจากค่าที่วัดได้จากชิ้นงานที่ใช้แผ่นอะลูมิเนียมเป็นส่วนหน้ามากนักในแผ่นอะลูมิเนียมที่มีความหนาเท่ากัน

ตารางที่ 4. 10 ผลการตรวจสอบชิ้นงานวัสดุกันกระสุนที่มีส่วนหลังเป็นแผ่นอะลูมิเนียมหนา 6 mm

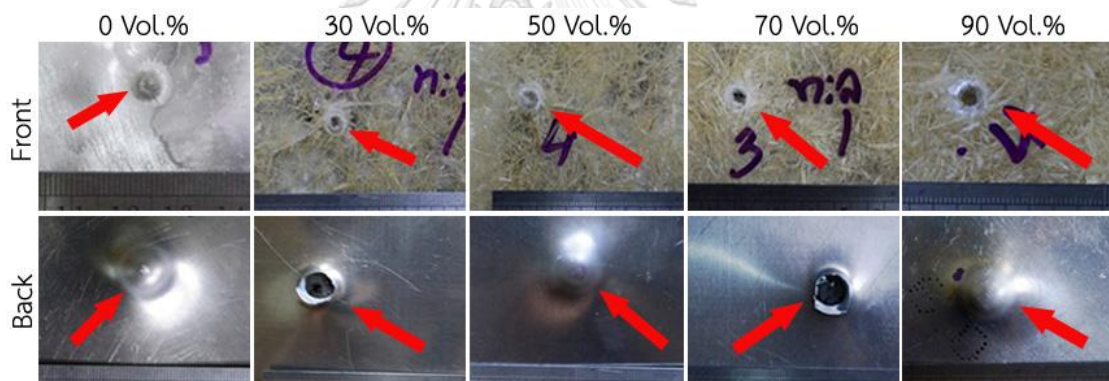
เส้นใย	หน้าตัดรอย กระสุนบนวัสดุ ผสม (mm)	ความลึกรอย กระสุนบน อะลูมิเนียม (mm)	ความสูงรอยร้าว (mm)	หน้าตัดรอยร้าว (mm)
0 Vol.%	4.97	5.22	3.11	1.47
30 Vol.%	4.2	5	2.95	1.47
50 Vol.%	5	5.14	2.95	1.41
70 Vol.%	6.13	4.3	2.95	1.42
90 Vol.%	4.9	5.12	3.02	1.29

ตารางที่ 4.11 ผลการตรวจสอบชิ้นงานวัสดุกันกระสุนที่มีส่วนหลังเป็นแผ่นอะลูมิเนียมหนา 8 mm

เส้นใย	หน้าตัดรอย กระสุนบนวัสดุ ผสม (mm)	ความลึกรอย กระสุนบน อะลูมิเนียม (mm)	ความสูงรอยร้าว (mm)	หน้าตัดรอยร้าว (mm)
0 Vol.%	5	4	1.75	1.2
30 Vol.%	4.4	3.8	2.75	1.35
50 Vol.%	6.1	4	1.85	1.32
70 Vol.%	4.8	3.35	1.65	1.52
90 Vol.%	4.73	4.28	2.00	1.178

ตารางที่ 4.12 ผลการตรวจสอบชิ้นงานวัสดุกันกระสุนที่มีส่วนหลังเป็นแผ่นอะลูมิเนียมหนา 10 mm

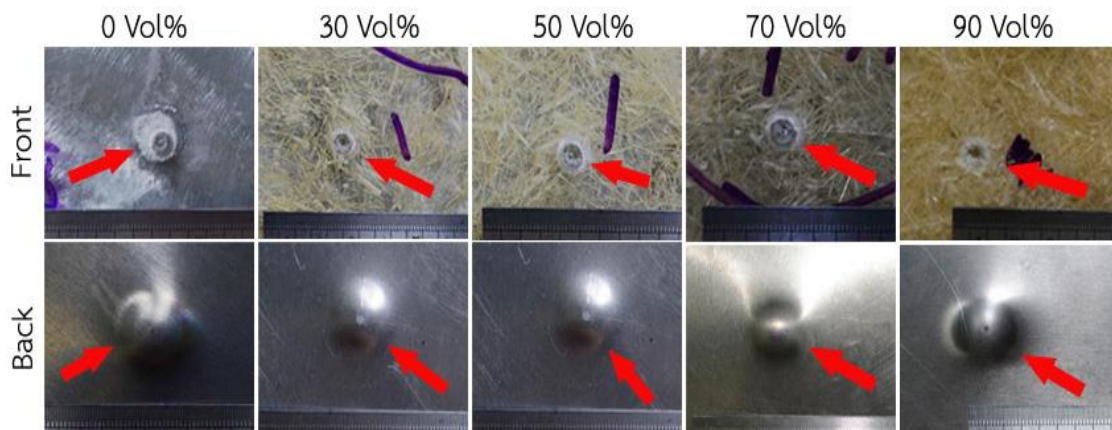
เส้นใย	หน้าตัดรอย กระสุนบนวัสดุ ผสม (mm)	ความลึกรอยกระสุน บนอะลูมิเนียม (mm)	ความสูงรอยบุ๋ม (mm)	หน้าตัดรอยบุ๋ม (mm)
0 Vol.%	5.85	3	1	1.33
30 Vol.%	5.4	4	1.1	1.52
50 Vol.%	4.8	3.55	1.65	1.45
70 Vol.%	5.7	4	1.35	1.6
90 Vol.%	6.3	4	1.35	1.3



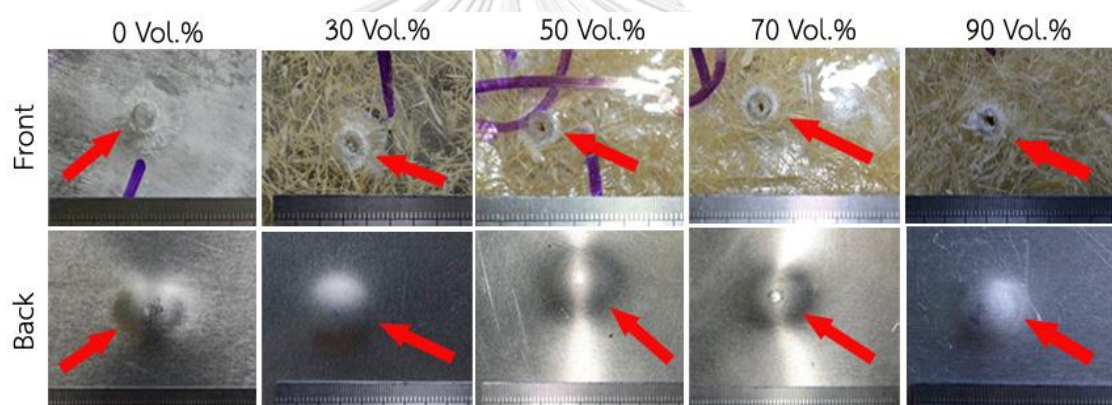
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

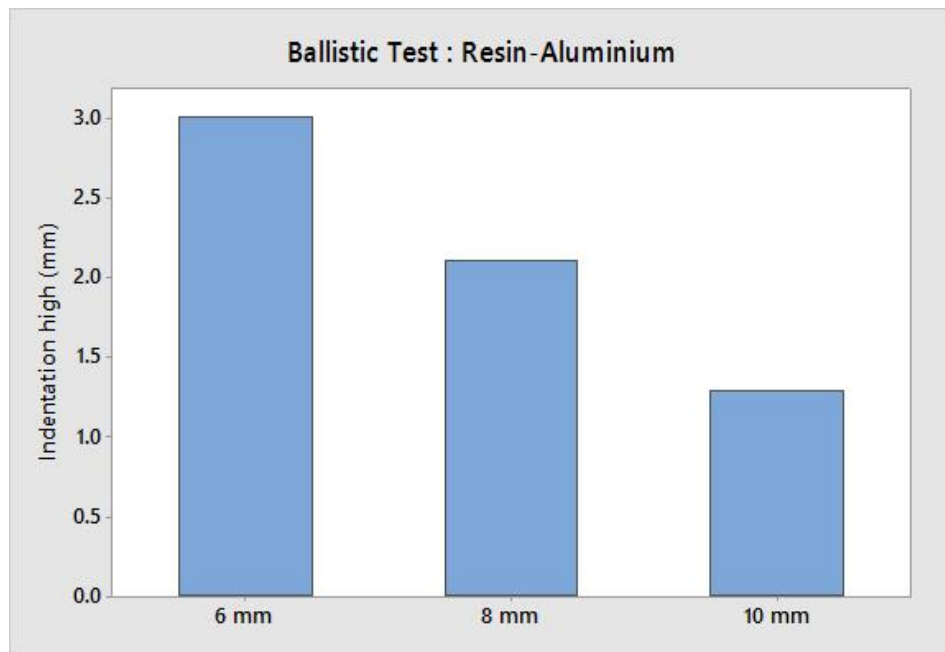
รูปที่ 4. 26 ภาพความเสียหายของชิ้นงานวัสดุกันกระสุนที่มีส่วนหลังเป็นแผ่นอะลูมิเนียมหนา 6 mm



รูปที่ 4. 27 ภาพความเสียหายของชิ้นงานวัสดุกันกระสุนที่มีส่วนหลังเป็นแผ่นอะลูมิเนียมหนา 8 mm



รูปที่ 4. 28 ภาพความเสียหายของชิ้นงานวัสดุกันกระสุนที่มีส่วนหลังเป็นแผ่นอะลูมิเนียมหนา 10 mm



รูปที่ 4. 29 กราฟแท่งเปรียบเทียบความหนาของแผ่นอะลูมิเนียมและความสูงรอยบุ๋นของชิ้นงานวัสดุกันกระสุนที่ใช้ส่วนหน้าเป็นแผ่นวัสดุกันกระสุน

## บทที่ 5

### วิเคราะห์ผลการวิจัย

#### 5.1 เส้นใยชานอ้อย

จากตารางที่ 4.1 ข้อมูลทางกายภาพของเส้นใย ทำให้สามารถประมาณการกระจายตัวของเส้นใยชานอ้อยในเนื้อพื้น โดยคำนวณพื้นที่ผิวเส้นใยต่อปริมาตรเนื้อพื้นได้จากสมการที่ 2.15 และคำนวณพื้นที่ผิวทรงกระบอกไว้ในหัวข้อ 3.5.1 เรื่องการกระจายตัวของเส้นใย จะได้พื้นที่ผิวเส้นใยเท่ากับ  $0.08 \text{ mm}^2$  พื้นที่ผิวทรงกระบอกที่คำนวณได้จากหัวข้อ 3.5.1 เรื่องการกระจายตัวของเส้นใยไปหาร  $24.07 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$  จะได้จำนวนเส้นใยต่อปริมาตรเนื้อพื้นโดยประมาณ  $306.19 \text{ fibers/mm}^3$  หรือ 370 เส้นต่อหนึ่งลูกบาศก์มิลลิเมตร เทียบกับปริมาณเส้นใยที่เสริมเข้าไปในอีพอกซีเรซิน จะได้ 91 เส้น, 153 เส้น, 214 เส้น และ 275 เส้นต่อหนึ่งลูกบาศก์มิลลิเมตร สำหรับสัดส่วนเส้นใย 30, 50, 70 และ 90 Vol.% ตามลำดับ และจากสมการที่ 2.13 และ 2.14 สามารถประมาณค่ามอดุลัสยืดหยุ่นจากแรงดึงของเส้นใยชานอ้อยได้ เนื่องจากเส้นใยชานอ้อยเรียงตัวกันแบบสุ่มจึงมีค่ามอดุลัสสองแนว โดยค่าการรับแรงตามยาวของเส้นใยเท่ากับ  $14.07 \text{ MPa}$  และค่าการรับแรงตามขวางของเส้นใยเท่ากับ  $18.65 \text{ MPa}$

เนื่องจากเส้นใยไม่ได้เรียงตัวไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งแต่เป็นการเรียงกันแบบกระจายตัวอย่างอิสระ อีกทั้งเส้นใยชานอ้อยที่ใช้ไม่ใช่เส้นใยยาวต่อเนื่องที่สามารถส่งผ่าน/กระจายแรงได้ต่อเนื่องกันในทิศทางใดทิศทางหนึ่งของการเรียงตัว ซึ่งการเป็นเส้นใยสั้นที่ไม่ต่อเนื่อง จะมีการเรียงตัวแบบสุ่มและกระจายไปทุกทิศทาง เพื่อไม่ให้ขาดช่วงในการส่งผ่าน/กระจายแรง และเป็นการเรียงตัวอิสระสลับกันต่อเนื่องคล้ายกับการเรียงตัวแบบยาวต่อเนื่องแต่มีทิศทางหลากหลายกว่า ไม่ต้องนำมาวางเรียงกันหลายแผ่นให้ครบทุกทิศทางการรับแรงเหมือนเส้นใยที่เรียงตัวในแนวเดียว

ปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นทำให้แผ่นวัสดุผสมมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ดังนั้นน้ำหนักของแผ่นวัสดุผสมจึงเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่เสริมเข้าไป ดังแสดงข้อมูลในตารางที่ 5.2 และเนื่องจากชิ้นงานวัสดุกันกระสุนที่ผลิตขึ้นมีจุดประสงค์จะพัฒนาให้เป็นเกราะของยานพาหนะ ดังนั้นหากวัสดุมีน้ำหนักน้อยยิ่งจะช่วยให้ยานพาหนะเคลื่อนที่ได้คล่องตัวและสะดวก อีกทั้งยังทำให้การปฏิบัติงานในการขับเคลื่อนน้อยลง ดังนั้นปริมาณเส้นใยและน้ำหนักของชิ้นงานวัสดุกันกระสุนที่เหมาะสมจึงเป็นปัจจัย

สำคัญในการตัดสินใจเลือกวัสดุ ชิ้นงานวัสดุผสมที่ใช้เส้นใยชานอ้อยในการเสริมรอยและค่าที่ได้จากการทดสอบสมบัติทางกลเหมาะสม (ความแข็งแรงหรือสมบัติทางกลดีกว่าวัสดุผสมที่ไม่เสริมเส้นใยชานอ้อย) จะเป็นชิ้นงานที่สมควรถูกเลือกเป็นชิ้นงานที่ดีที่สุดในการใช้เป็นวัสดุกันกระสุนในงานวิจัยนี้

## 5.2 ผลของปริมาณเส้นใยในชิ้นงานวัสดุผสม

จากการตรวจสอบลักษณะการกระจายตัวและความยาวของเส้นใยชานอ้อย พบว่าไม่มีผลต่อสมบัติทางกลของวัสดุผสมมากเท่ากับสัดส่วนโดยปริมาตรของปริมาณเส้นใยชานอ้อย จากการทดสอบในหัวข้อ 4.3 เรื่องผลการทดสอบตีทางกลในห้องปฏิบัติการ พบว่าปริมาณเส้นใยชานอ้อยส่งผลดีต่อ ความเค้นแรงดึง แรงดัดโค้ง และแรงกระแทก จะมีปริมาณเส้นใยชานอ้อยอยู่ระหว่าง 50-70 Vol.% เนื่องจากปริมาณเส้นใยชานอ้อยในช่วงดังกล่าวมีสัดส่วนที่เหมาะสมไม่มากไม่น้อยเกินไป จะเห็นว่าหากปริมาณเส้นใยชานอ้อยในช่วงดังกล่าวมีสัดส่วนที่เหมาะสมไม่มากไม่น้อยเกินไป จะเห็นว่าหากปริมาณเส้นใยชานอ้อยมากถึง 90 Vol.% สมบัติทางกลคือ แรงดึง แรงอัด แรงดัดโค้ง และแรงกระแทก ของวัสดุผสมที่กำลังเพิ่มขึ้นอยู่นั้นมีค่าลดลง ปริมาณเส้นใยชานอ้อยหนาแน่นเกินไปจึงไม่ส่งผลดีต่อสมบัติทางกลของชิ้นงานวัสดุผสม เนื่องจากปริมาณเส้นใยที่มากเกินไปทำให้ช่วงห่างในเนื้อพื้นมีน้อย ภายในจึงแน่นคล้ายหลักการของการเรียงตัวในโลหะ (แต่ไม่เป็นระเบียบและไม่แน่นเท่าโลหะ) ตัวอย่างเช่นในการทดสอบการดึงค่าความเครียด (Strain) ในชิ้นงานวัสดุผสมที่เสริมเส้นใยชานอ้อย 90 Vol.% มีค่าลดลงจากค่าความเครียดของชิ้นงานวัสดุผสมที่เสริมเส้นใยชานอ้อย 70 Vol.%

จากการทดสอบพบว่าความเค้นสูงสุดในการทดสอบแรงดึง และแรงอัดของชิ้นงานวัสดุผสมที่เสริมเส้นใยชานอ้อยมีค่าน้อยกว่าชิ้นงานวัสดุผสมที่ไม่เสริมเส้นใยชานอ้อย แต่การเสริมเส้นใยชานอ้อยในชิ้นงานทำให้ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของชิ้นงานวัสดุผสมเพิ่มขึ้นจากชิ้นงานวัสดุผสมที่ไม่เสริมเส้นใยชานอ้อย ผลการทดสอบแสดงในหัวข้อ 4.3 เรื่องผลการทดสอบสมบัติทางกลในห้องปฏิบัติการ ซึ่งค่ามอดูลัสยืดหยุ่นที่เพิ่มขึ้นนั้นเนื่องมาจากเส้นใยชานอ้อยที่เสริมเข้าไปนั้นเป็นส่วนช่วยให้เนื้ออีพอกซีเรซินทนต่อการเสียรูปได้มากขึ้น หรือยืดหยุ่นต่อการเสียรูปได้มากขึ้น

## 5.3 ผลของความหนาของแผ่นอะลูมิเนียมผสมเกรด AA 5083

ความหนาของแผ่นอะลูมิเนียมผสมเกรด AA 5083 ที่ใช้เป็นส่วนหนึ่งของชิ้นงานวัสดุกันกระสุนนั้น มีผลต่อความสามารถในการต้านทานกระสุนของชิ้นงานวัสดุกันกระสุนโดยตรง จากผลการวัดความสูงรอยนูนที่แสดงในหัวข้อ 4.4 เรื่องผลการทดสอบความต้านทานกระสุน พบว่าแผ่นอะลูมิเนียมที่มีความหนามากจะมีความสูงรอยนูนน้อย ผลของความหนาของแผ่นอะลูมิเนียมต่อความสูงรอยนูนนี้สอดคล้องกัน ทั้งในการทดสอบที่ใช้แผ่นอะลูมิเนียมเป็นวัสดุส่วนหน้าในการรับการปะทะ และการทดสอบที่ใช้แผ่นวัสดุผสมเป็นวัสดุส่วนหน้าในการรับการปะทะคือ ความสูงรอยนูนจะลดลง

เมื่อแผ่นอะลูมิเนียมมีความหนาเพิ่มขึ้น โดยไม่ขึ้นลำดับการจัดวางแผ่นวัสดุ (แผ่นอะลูมิเนียมผสมเกรด AA5083 และแผ่นวัสดุผสม) ที่ใช้เป็นวัสดุส่วนหน้าในการรับการปะทะ การวิเคราะห์ลักษณะชิ้นงานวัสดุกันกระสุนหลังยิงทดสอบจะได้อ้างอิงดังนี้

- แผ่นอะลูมิเนียมหนา 6 mm

ในการใช้แผ่นอะลูมิเนียมหนา 6 mm เป็นส่วนหน้านั้นไม่สามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนทดสอบได้ คือเกิดการเจาะทะลุที่ชิ้นงานทดสอบทั้งบนแผ่นอะลูมิเนียมและแผ่นวัสดุผสม อีกทั้งยังทำให้แผ่นพยานเกิดรูที่แสงสามารถลอดผ่าน จากที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.1.2.3 การต้านทานกระสุนและสะเก็ดอาวุธ และหัวข้อ 3.5.3 การทดสอบการป้องกันกระสุน กล่าวได้ว่าแผ่นอะลูมิเนียมหนา 6 mm มีความหนาไม่เพียงพอจะใช้เป็นส่วนหน้าของชิ้นงานวัสดุกันกระสุนได้ เนื่องจากมีความหนาเพียง 6 mm ประกอบกับการที่อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่กระจายพลังงานได้ไม่ดีเท่าพอลิเมอร์ จึงทำให้เมื่อรับการปะทะแล้วมีการกระจายแรงได้ไม่ดีนัก [25]

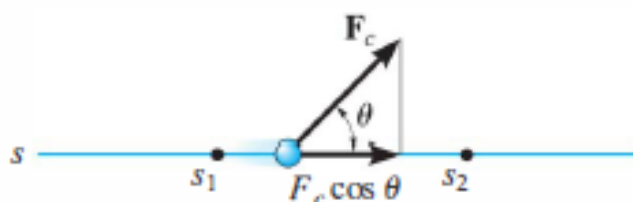
ในส่วนของการใช้แผ่นอะลูมิเนียมความหนา 6 mm เป็นส่วนหลังนั้น สามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนได้ดีกว่าในตอนที่ใช้แผ่นอะลูมิเนียมเป็นส่วนหน้า คือไม่เกิดการเจาะทะลุขึ้นในนัดแรกที่ยิง แต่เกิดการเจาะทะลุในชิ้นงานวัสดุกันกระสุนที่ใช้แผ่นวัสดุผสมเสริมเส้นใยชานอ้อย 30 และ 70 Vol.% เป็นวัสดุส่วนหลัง ซึ่งเกิดการเจาะทะลุในนัดที่ 4 และ 3 ตามลำดับ เหตุที่เกิดการเจาะทะลุขึ้นเนื่องจากชิ้นงานวัสดุกันกระสุนได้รับการระงับจากการกระแทกหลัก ๆ ได้แก่ แรงจากกระสุนที่มาปะทะโดยตรง และคลื่นกระแทกหลังยิงกระสุน ทำให้เกิดความเครียดสะสมเมื่อได้รับภาระงานการกระแทกต่อเนื่องกันจึงเกิดการเจาะทะลุในที่สุด แต่ถือว่าต้านทานกระสุนได้ดีกว่าการใช้แผ่นอะลูมิเนียมหนา 6 mm เป็นวัสดุส่วนหน้า (คือไม่เจาะทะลุในนัดแรก) เพราะมีแผ่นวัสดุผสมช่วยส่งผ่าน/กระจายแรงจากการปะทะของกระสุน

- แผ่นอะลูมิเนียมหนา 8 และ 10 mm

ในการใช้แผ่นอะลูมิเนียมหนา 8 และ 10 mm เป็นวัสดุส่วนหน้า และวัสดุส่วนหลังนั้นให้ผลการทดสอบคล้ายกัน ตรวจสอบชิ้นงานวัสดุกันกระสุนหลังยิงทดสอบพบว่าไม่เกิดการเจาะทะลุบนแผ่นอะลูมิเนียม แต่แผ่นวัสดุผสมเสริมเส้นใย 0, 30, 50, 70, และ 90 Vol.% ด้านหลังนั้นหลุดออกเป็นชิ้น บริเวณที่หลุดออกบนแผ่นวัสดุผสมเสริมเส้นใย 0 Vol.% มีรอยแตกขยายออกไปจากปลายของบริเวณที่ชิ้นส่วนหลุด ดูในรูปที่ 4.16 และ 4.17 แสดงความเสียหายด้านหน้าและด้านหลังของชิ้นงานวัสดุกันกระสุนหลังยิงด้วยกระสุนทดสอบ ทำให้เห็นว่ามีความเหนียวอยู่มากกว่าแผ่นวัสดุผสมที่เสริมเส้นใยชานอ้อย เนื่องจากเป็นรอยฉีกขาดไม่ใช่ลักษณะรอยแตกกร้าว และเนื่องด้วยไม่มีส่วน

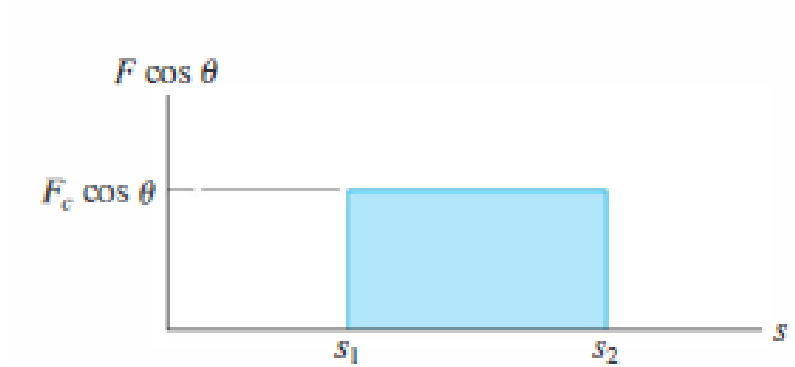
ของเส้นใยที่ทำให้เนื้อของแผ่นวัสดุผสมแน่นและส่งผ่านกระจายแรงจึงเกิดรอยฉีกรอยแยกหลายรอย ขึ้นแทน ขึ้นส่วนของแผ่นวัสดุผสมที่หลุดไปนั้นยังคงมีพลังงานจากกระแทกเหลืออยู่ ส่งผลให้ชิ้นส่วนของแผ่นวัสดุผสม ที่หลุดออกไปนั้นไปปะทะกับแผ่นพยานด้านหลัง และแผ่นพยานเกิดการเจาะทะลุมีรู ทำให้ชิ้นงานวัสดุกันกระสุนที่ใช้แผ่นอะลูมิเนียมหนา 8 และ 10 mm เป็นวัสดุส่วนหน้านั้นไม่ผ่านการทดสอบในการจะนำไปใช้เป็นวัสดุกันกระสุนตาม NIJ Standard 0108.01 ระดับ 3A ส่วนการใช้แผ่นวัสดุผสมเป็นส่วนหน้านั้นไม่เกิดการเจาะทะลุบนแผ่นอะลูมิเนียม แต่เกิดการเจาะทะลุบนแผ่นวัสดุผสม โดยไม่มีกระสุน หรือสะเก็ดไปกระทบกับแผ่นพยานที่อยู่ด้านหลังชิ้นงานวัสดุกันกระสุน เนื่องจากกระสุนทดสอบหยุดอยู่ที่แผ่นอะลูมิเนียม รู/รอยบนแผ่นวัสดุผสมที่ถูกกระสุนปะทะ และไม่มีรอยแตกขยายออกไปมากจากรูกระสุนบนแผ่นวัสดุผสม ดังรูปที่ 4.20 และ 4.21 แสดงความเสียหายด้านหน้าและด้านหลังของชิ้นงานวัสดุกันกระสุนหลังยิงด้วยกระสุนทดสอบ

ผลของความหนาของชั้นวัสดุต่อความสามารถในการต้านทานกระสุนของวัสดุกันกระสุนสามารถอธิบายเพิ่มเติมได้จากงานที่กระสุนทดสอบกระทำกับชิ้นงานวัสดุกันกระสุน ระยะทางที่กระสุนเคลื่อนที่ในแผ่นวัสดุแต่ละชิ้นเป็นระยะที่กระสุนทำงานดังในรูปที่ 5.1 ถึง 5.3 แต่พลังงานจลน์ของกระสุนทดสอบเมื่อปะทะกับแผ่นวัสดุที่เป็นวัสดุส่วนหน้าในการรับการปะทะจะค่อย ๆ ลดลงหลังจากปะทะกับวัสดุส่วนหน้าแล้ว เช่นเดียวกับพลังงานความเครียดที่ลดลงในแต่ละชั้นของวัสดุทั้ง 8 ชั้นของเกราะกันสุน [36] ดังกราฟในรูปที่ 5.4 ซึ่งจำนวนชั้นที่เพิ่มขึ้นเทียบได้กับความหนาของวัสดุที่เพิ่มขึ้น หากระยะหรือความหนาของแผ่นอะลูมิเนียมมีมากกว่าระยะหรือความหนาสูงสุดที่กระสุนทดสอบสามารถเจาะทะลุได้ ระยะที่กระสุนจะต้องทำงานจึงเพิ่มขึ้นขณะที่กระสุนไม่มีพลังงานจลน์พอจะขับเคลื่อนให้ทำงานต่อได้จึงหยุดและไม่เกิดการเจาะทะลุ แต่ด้วยคลื่นกระแทกหลังยิงและพลังงานส่วนหนึ่งส่งต่อมาถึงด้านหลังวัสดุกันกระสุนทำให้แผ่นวัสดุผสมที่อยู่ด้านหลังเมื่อใช้แผ่นอะลูมิเนียมเป็นส่วนหน้านั้นได้รับผลกระทบ คือทำให้เกิดรอยแตกกร้าวและชิ้นส่วนหลุดเป็นชิ้น

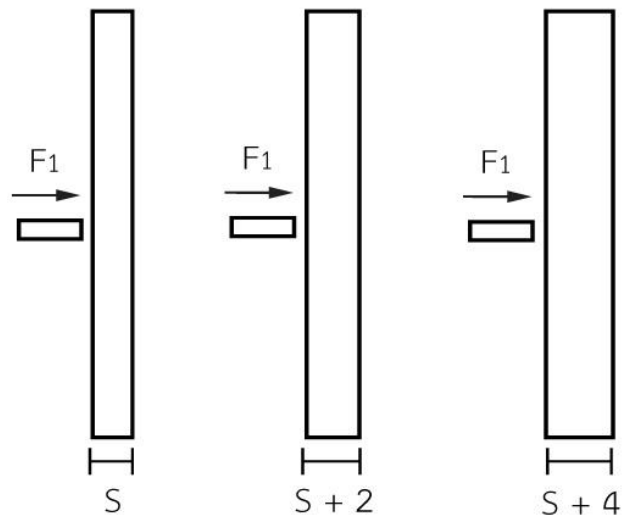


รูปที่ 5. 1 มวลที่เคลื่อนที่จากระยะ  $s_1$  ถึง  $s_2$  [4]

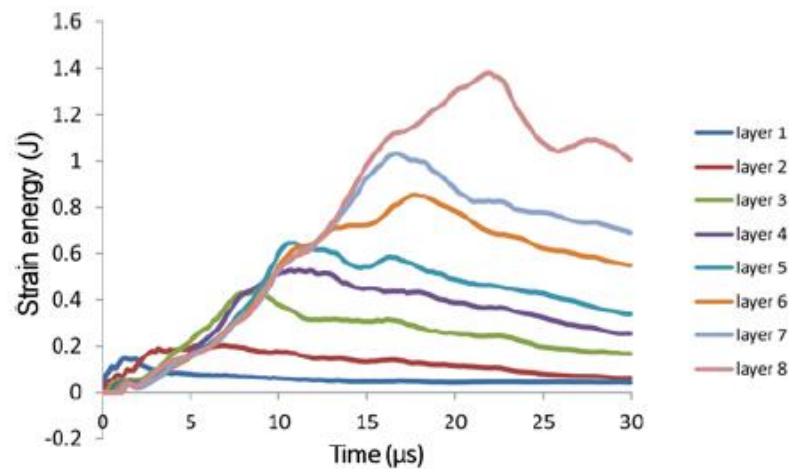




รูปที่ 5. 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะทาง [4]



รูปที่ 5. 3 ภาพวาดจำลองแรงกระสุนที่ปะทะแผ่นอะลูมิเนียมที่มีความหนาไม่เท่ากัน



รูปที่ 5. 4 กราฟความแตกต่างของพลังงานความเครียดในวัสดุแต่ละชั้นต่อช่วงเวลาเปลี่ยนแปลง [36]

#### 5.4 ผลของการจัดเรียงวัสดุ

วัสดุส่วนหน้าในการรับการปะทะของกระสุนนั้น มีผลกับความสามารถในการป้องกันกระสุนของชิ้นงานวัสดุกันกระสุน เนื่องจากวัสดุส่วนหน้านั้นเป็นส่วนแรกที่กระสุนจะเข้าปะทะ วัสดุส่วนนี้จึงควรดูดซับ หรือกระจายแรง และพลังงานจากการปะทะให้ได้มากที่สุด ส่วนใหญ่จะให้วัสดุส่วนหน้าเป็นเซรามิก หรือพอลิเมอร์เนื่องจากสมบัติที่แข็งและเปราะของเซรามิกทำให้เมื่อถูกปะทะโดยกระสุนจะสามารถส่งผ่านแรง และพลังงานจากการปะทะผ่านรอยแตก/แยก ของตัววัสดุไปได้เร็วแม้จะมีสะเก็ดมากแต่เซรามิกช่วยลดพลังงานที่ชั้นต่อไปจะรับได้มาก [25] ส่วนใหญ่จึงใช้เป็นวัสดุส่วนหน้าของระบบเกราะกันกระสุนหลายชั้น (Multilayers Armor System, MAS) [25] ในส่วนของพอลิเมอร์นั้นมีความยืดหยุ่นอยู่มาก เนื่องจากโมเลกุลส่วนใหญ่เป็นสายยาวขดรวมกัน เมื่อได้รับแรง หรือพลังงานมากจะทำให้เกิดการยืดหยุ่นได้ดี ส่วนโลหะนั้นมีความเหนียวกว่าเซรามิกแต่มีความแข็งแรงกว่าพอลิเมอร์ ด้วยโลหะมีการจัดเรียงของอะตอมภายในอย่างเป็นระเบียบ และการเสียรูปเมื่อถูกกระทำจะมีช่วงการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น ช่วงการเปลี่ยนรูปถาวร และช่วงที่เกิดความเสียหาย การจะนำโลหะมาใช้เป็นวัสดุส่วนหน้าในการรับการปะทะนั้นจะกระจายแรงได้ไม่ดีเหมือนเซรามิกหรือพอลิเมอร์ เนื่องจากโลหะมีโครงสร้างที่เป็นระเบียบการส่งต่อ/กระจายแรงจึงทำได้ไม่กว้างมาก เนื่องจากไม่มีช่องว่างที่กว้างพอให้เกิดการสูญเสียแรงที่ได้รับมา การส่งต่อ/กระจายแรงไม่ยืดหยุ่นเหมือนโครงสร้างเซรามิก และพอลิเมอร์ ที่ความเปราะของเซรามิกทำให้เกิดรอยร้าว/แตกได้ง่าย เมื่อรอยร้าว/แตกขยายตัวก็จะเป็นการส่งต่อ/กระจายแรงที่ได้รับไปพร้อม ๆ กัน [27] และแรงยังลดลงไปโดยการที่

ขึ้นส่วนเซรามิกได้หลุดออกไป ส่วนพอลิเมอร์นั้นเมื่อได้รับแรงที่มากระทำไม่ว่าจะเป็นแรงดึง แรงอัด แรงดัดโค้ง หรือแรงกระแทก โมเลกุลของพอลิเมอร์จะคลายตัว และมีการจัดเรียงตัวใหม่ [12] และด้วยโมเลกุลของพอลิเมอร์หดตัว และเรียงกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ระยะระหว่างสายแต่ละสายโซ่และแต่ละโมเลกุลจึงมากน้อยไม่เท่ากัน จึงมีช่องที่อะตอมไม่ติดกันเป็นส่วนที่รับแรงจะหายไประหว่างส่งผ่าน/กระจายแรง คล้ายกับมีช่องที่ช่วยผ่อนแรงก่อนจะส่งผ่าน/กระจายแรงไปยังส่วนถัดไป พอลิเมอร์จึงยืดหยุ่น และส่งผ่าน/กระจายแรงได้ดี เป็นเหตุให้นิยมใช้เซรามิก หรือพอลิเมอร์เป็นชั้นแรก ๆ ของเกราะ หรือวัสดุกันกระสุน ก่อนจะเป็นชั้นของโลหะ [25] ดังจะได้พิจารณาความแตกต่างของการใช้แผ่นอะลูมิเนียมผสมเกรด AA 5083 เป็นวัสดุส่วนหน้า และการใช้แผ่นวัสดุผสมเป็นส่วนหน้าในการรับการปะทะของกระสุนทดสอบ ดังนี้

- ผลของการใช้แผ่นอะลูมิเนียมผสมเกรด AA 5083 เป็นวัสดุส่วนหน้า

ในการใช้แผ่นอะลูมิเนียมหนา 6 mm เป็นส่วนหน้า ส่งผลให้ชิ้นงานวัสดุกันกระสุนไม่สามารถป้องกันการเจาะทะลุของกระสุนทดสอบได้ โดยเกิดการเจาะทะลุในนัดแรกที่เริ่มยิงทดสอบ แสดงให้เห็นว่าแผ่นอะลูมิเนียมมีความหนาไม่พอจะป้องกันไม่ให้เกิดการเจาะทะลุขึ้นที่ชิ้นงานวัสดุกันกระสุน ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 5.2 โดยกระสุนทะลุออกจากชิ้นงานวัสดุกันกระสุน และทะลุแผ่นพยานออกไปอีกต่อหนึ่ง

ในการใช้แผ่นอะลูมิเนียมหนา 8 และ 10 mm เป็นวัสดุส่วนหน้า นั้นไม่เกิดการเจาะทะลุบนแผ่นอะลูมิเนียมแต่แผ่นวัสดุผสมด้านหลังหลุดเป็นชิ้นและมีการแตกร้าวจากการที่รับพลังงานจลน์ต่อมาจากแผ่นอะลูมิเนียมด้านหน้า หน้าตัดที่มาปะทะกับแผ่นวัสดุผสมไม่ใช้หน้าตัดขนาดเท่ากับหัวกระสุนแต่เป็นส่วนโค้งของอะลูมิเนียมที่กว้างกว่าหัวกระสุน และยังมีแรงที่กระจายออกจากศูนย์กลางบริเวณที่กระสุนมาปะทะอีก ทำให้รอยแตกบนแผ่นวัสดุผสมกว้างกว่ารอยกระสุนบนแผ่นอะลูมิเนียมด้านหน้า และมีรอยร้าวที่เกิดจากแรงที่กระจายมาจากแผ่นอะลูมิเนียมและในเนื้อวัสดุผสมเองส่วนหนึ่งด้วย การที่กระสุนไม่เจาะทะลุแผ่นอะลูมิเนียมนั้นบอกได้ว่าความหนาของอะลูมิเนียมเพียงพอที่จะป้องกันไม่ให้เกิดการเจาะทะลุจากกระสุนระดับนี้ได้ แต่การที่แผ่นวัสดุผสมด้านหลังเกิดความเสียหายบอกเราว่าการกระจายหรือดูดซับแรงของแผ่นอะลูมิเนียม AA 5083 ความหนา 8 และ 10 mm ยังไม่เพียงพอที่จะนำไปใช้เป็นส่วนวัสดุกระสุนแผ่นเดียว ๆ จะต้องได้มีการใช้วัสดุอื่นเสริมเข้าไปเพื่อความปลอดภัยของวัตถุด้านหลังวัสดุกันกระสุนที่ต้องการป้องกัน (พิจารณาจากความเสียหายบนแผ่นวัสดุผสมประกอบ) ขณะที่แผ่นอะลูมิเนียมถูกกระสุนทดสอบปะทะจะเกิดความเครียดสะสมที่แผ่นอะลูมิเนียมทำให้แผ่นอะลูมิเนียมเกิดการเปลี่ยนรูป เนื่องจากแผ่นอะลูมิเนียม AA 5083 ความหนา

ตั้งแต่ 8 mm เพียงพอที่จะต้านทานการปะทะของกระสุนทดสอบได้จึงไม่เกิดการเจาะทะลุ ส่วนการดูดซับพลังงาน หรือกระจายแรงนั้นยังไม่ดีเท่าที่ควรจากที่ทราบกันว่าโลหะมีอะตอมที่เรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบมีช่องหรือส่วนที่ว่างที่ทำให้สูญเสียพลังงานน้อย การถ่ายเทพลังงานจึงส่งต่อแบบติดใกล้กันมาก ทำให้พลังงานที่เหลือส่งออกไปที่แผ่นวัสดุผสมนั้นยังคงรุนแรงและมากพอจะทำความเสียหายแก่แผ่นวัสดุผสมหรือวัตถุด้านหลังได้

- ผลของการใช้แผ่นวัสดุผสมเป็นวัสดุส่วนหน้า

การใช้แผ่นวัสดุผสมเป็นวัสดุส่วนหน้าในการรับการปะทะ สามารถป้องกันการเจาะทะลุของกระสุนทดสอบ ได้มากกว่าการใช้แผ่นอะลูมิเนียมความหนา 6, 8 และ 10 mm เป็นส่วนหน้า การที่ใช้แผ่นวัสดุผสมเป็นวัสดุส่วนหน้าสามารถทนต่อการปะทะ/เจาะทะลุของกระสุนทดสอบได้ดีกว่าการใช้แผ่นอะลูมิเนียมความหนา 6, 8 และ 10 mm เป็นส่วนหน้านั้น เนื่องจากโดยทั่วไปเมื่อพอลิเมอร์ได้รับภาระงานแล้วมีการเปลี่ยนรูปเกิดขึ้น พอลิเมอร์จะมีการจัดเรียงตัวของสายโมเลกุลใหม่ให้เป็นระเบียบขึ้น [12] ระหว่างนั้นก็จะมีพลังงานที่ส่งผ่านภาระงานที่ได้รับต่อกันไปตามความยาวของสายโมเลกุล เมื่อชิ้นงานทดสอบถึงจุดที่มีการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกชิ้นงานทดสอบจะยึดออกในแนวเดียวกับทิศทางการตั้งของเครื่องทดสอบ หน้าตัดชิ้นงานที่ลดลงนั้น จะลดลงต่อเนื่องออกจากจุดรวมความเค้น ในช่วงความยาวเกจ หน้าตัดที่ลดลงจะไม่มีการคอดเข้ามาที่กลางชิ้นงานโลหะที่ถูกตั้งทดสอบ ระหว่างการจัดเรียงตัวของสายโมเลกุลพอลิเมอร์ (ในที่นี้คือ อีพอกซีเรซิน) นั้น มีการส่งผ่านภาระงานที่วัสดุได้รับมาด้วย ทำให้พอลิเมอร์มีการกระจายพลังงาน หรือแรงกระทำได้ดีกว่าโลหะที่มีโครงสร้างที่จัดเรียงกันเป็นระเบียบ [11] ในการกระจาย/ส่งต่อแรงได้ดีนี้เองทำให้ชิ้นงานวัสดุกันกระสุนที่มีส่วนหน้าเป็นแผ่นวัสดุผสมทนทานต่อการปะทะ/เจาะทะลุของกระสุนทดสอบได้ค่อนข้างดีว่าการที่ใช้วัสดุส่วนหน้าเป็นแผ่นอะลูมิเนียมหนา 6, 8 และ 10 mm โดยขนาดหน้าตัดของรู/รอยกระสุนบนแผ่นวัสดุผสมที่ใช้เป็นวัสดุส่วนหน้าของทุกความหนาของแผ่นอะลูมิเนียมด้านหลัง (6, 8 และ 10 mm) นั้นมีขนาดเล็กกว่าตอนที่ใช้แผ่นวัสดุผสมเป็นวัสดุส่วนหลัง แม้ในชิ้นงานวัสดุกันกระสุนที่มีแผ่นอะลูมิเนียมหนา 6 mm เป็นวัสดุส่วนหลังจะเกิดการเจาะทะลุในนัดที่ 4 และ 3 เมื่อใช้แผ่นวัสดุผสมเสริมเส้นใยชานอ้อย 30 และ 70 Vol.% เป็นวัสดุส่วนหน้าตามลำดับ แต่ถือว่าทนทานกว่าการใช้แผ่นวัสดุผสมเป็นวัสดุส่วนหน้าที่เกิดการเจาะทะลุตั้งแต่นัดแรก

จากการวิเคราะห์การทดสอบโดยใช้แผ่นวัสดุผสมเป็นวัสดุส่วนหน้าในการรับการปะทะนั้น ชิ้นงานวัสดุกันกระสุนที่เหมาะสมที่จะใช้งานที่สุดคือ ชิ้นงานวัสดุกันกระสุนที่มีแผ่นอะลูมิเนียมหนา 8 mm เป็นส่วนหลังและแผ่นวัสดุผสมเสริมเส้นใยชานอ้อย 50 Vol.% เป็นส่วนหน้า เนื่องจากแผ่น

อะลูมิเนียมหนา 8 mm นั้นไม่เกิดการเจาะทะลุและมีน้ำหนักเบากว่าแผ่นอะลูมิเนียมหนา 10 mm จึงทำให้น้ำหนักรวมของแผ่นวัสดุกันกระสุนน้อยกว่าแผ่นอะลูมิเนียมหนา 10 mm ประกอบกับแผ่นวัสดุผสมเสริมเส้นใยชานอ้อย 50 Vol.% ที่เป็นวัสดุส่วนหลังไม่หนักเท่ากับแผ่นวัสดุผสมเสริมเส้นใยชานอ้อย 70 Vol.% และ 90 Vol.% อีกทั้งชิ้นงานวัสดุผสมเสริมเส้นใยชานอ้อย 50 Vol.% สามารถทนต่อพลังงานการกระแทกมากกว่าชิ้นงานวัสดุผสมเสริมเส้นใยชานอ้อย 30 Vol.% และมีมอดูลัสยืดหยุ่นในการดัดโค้งสูงกว่าชิ้นงานวัสดุผสมเสริมเส้นใยชานอ้อย 0 Vol.%

งานวิจัยชิ้นนี้ยังมีส่วนที่ต้องปรับปรุงอีกมาก ในเรื่องของการเปรียบเทียบการเสริมเส้นใยชานอ้อยที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงผิว เพื่อเปรียบเทียบผลของการปรับปรุงผิวเส้นใยชานอ้อยยังไม่ได้มีการเปรียบเทียบให้เห็น เนื่องจากงานวิจัยหลายชิ้นแนะนำว่าการปรับปรุงผิวเส้นใยด้วย NaOH นั้นจะช่วยให้เส้นใยยึดกับเนื้อพื้นได้ดีขึ้น ทำให้ทำการปรับปรุงผิวเส้นใยก่อนมาเสริมในเนื้อพื้น หากมีการต่อยอดเพื่อปรับปรุงงานวิจัยควรมีการเปรียบเทียบผลของการปรับปรุงผิวเส้นใยด้วย ส่วนจำนวนชั้นในของแผ่นวัสดุผสมควรมีการเพิ่มจำนวนชั้นขึ้นไปเพื่อทดสอบความสามารถในการต้านทานกระสุนทดสอบในระดับที่สูงขึ้น เช่น ระดับ 3 หรือ 4 ได้ ในการยืนยันผลการทดสอบหลังการเจาะทะลุควรมีข้อพิจารณาเพื่อให้เห็นใจว่าในนัดต่อไปจะเกิดการเจาะทะลุเช่นกัน หรือหากไม่เกิดการเจาะทะลุต่ออาจพิจารณาว่าเป็นเหตุจากการจัดเรียงเส้นใยในวัสดุผสมหรือ สาเหตุอื่นที่ต้องพิจารณากันต่อไป

## บทที่ 6

### สรุปผลวิจัย

จากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

-เส้นใยชานอ้อยที่เสริมในอีพอกซีเรซิน มีผลช่วยเพิ่มมอดูลัสยืดหยุ่นในการดึง การอัด และการตัดโค้งให้กับเนื้อพื้นอีพอกซีเรซิน

-จากผลการทดสอบในงานวิจัยนี้ปริมาณเส้นใย 65-80 Vol.% โดยปริมาตรเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลให้กับอีพอกซีเรซิน

-แผ่นอะลูมิเนียมและแผ่นวัสดุผสมยึดติดกันได้อย่างดี และน้ำหนักของชิ้นงานวัสดุกันกระสุนที่ผลิตขึ้นมีน้ำหนักรวมน้อยกว่าแผ่นอะลูมิเนียมที่มีความหนาเท่ากัน

-วัสดุผสมที่ยึดติดกับแผ่นอะลูมิเนียมช่วยลดน้ำหนักรวมของวัสดุกันกระสุนเมื่อเทียบกับการใช้แผ่นอะลูมิเนียมทั้งแผ่นที่มีความหนาเท่ากัน

-วัสดุกันกระสุนที่ผลิตขึ้นสามารถป้องกันกระสุนทดสอบได้ตาม NIJ Standard 0108.01 ระดับ 3A

-วัสดุกันกระสุนที่ผ่านการทดสอบการป้องกันกระสุนได้นั้น คือวัสดุกันกระสุนที่ใช้แผ่นวัสดุผสมที่เสริมและไม่เสริมเส้นใยชานอ้อยเป็นส่วนแรกในการรับการปะทะ โดยยึดติดกับแผ่นอะลูมิเนียมความหนา 8 mm และ 10 mm

-ความสูงรอยนูนที่ด้านหลังแผ่นอะลูมิเนียมนั้นจะลดลงตามความหนาของแผ่นอะลูมิเนียม โดยความหนาเริ่มต้นของแผ่นอะลูมิเนียม AA 5083 ที่สามารถต้านทานการปะทะของกระสุนทดสอบคือ 8 m

-แผ่นวัสดุผสมด้านหน้าไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของความสูงรอยนูนบนแผ่นอะลูมิเนียมด้านหลัง

## รายการอ้างอิง

1. Ma, Z., Wang, H., and Cui, Y. Designing an Innovative Composite Armor System for Affordable Ballistic Protection. 2006.
2. McLeod, K., Medium Tactical Vehicle Underbody Armor Development, in U.S. ARMY TANK AUTOMOTIVE RESEARCH, DEVELOPMENT, AND ENGINEERING CENTER. 2010, KETTERING UNIVERSITY: US Army RDECOM-TARDEC 6501 E 11 Mile Rd Warren, MI 48397-5000, USA. p. 61.
3. อิบเบลเลอร์ อาร์ ซี, กลศาสตร์วิศวกรรม ภาคพลศาสตร์. 2548, กรุงเทพฯ: บริษัท เพียร์สัน เอ็ดดูเคชั่น อินโดไชน่า จำกัด. 538.
4. Hibbeler, R.C., Engineering Mechanics Dynamics. 12 ed. 2010, U.S.A: PearsonPrentice Hall. 732.
5. Abrate, S., Impact Engineering of Composite Structures. Vol. 526. 2011, Italy: SpringerWienNewYork. 409.
6. U.S. Department of Justice, N.I.O.J. NIJ Standard and Testing. 2015 [cited 2016 January 8]; Available from: <http://www.nij.gov/topics/technology/standards-testing/>.
7. Program, T.A., Ballistic Resistance Protective Material NIJ Standard 0108.01. 1985, National Institute of Justice, U.S. Department of Justice: Washington, DC.
8. No.8, R. กระสุนปืน. กองพันเสนารักษ์ที่ 4 18 Jan. 2016 [cited 2016 September, 29]; Available from: [http://senarak4.blogspot.com/p/blog-page\\_19.html](http://senarak4.blogspot.com/p/blog-page_19.html)
9. Common Handgun Cartridge [cited 2016 March 13]; Available from: [www.genitron.com/Basics/Common-Handgun-Cartridges](http://www.genitron.com/Basics/Common-Handgun-Cartridges).
10. คุณาสวรรค์, จ., รายงานการสืบค้นข้อมูลความก้าวหน้าและสถานภาพเทคโนโลยีวัสดุ เพื่อการพัฒนาและการผลิตในประเทศสหรัฐอเมริกา. 2554, สำนักงานที่ปรึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประจำกรุงวอชิงตัน ดี.ซี: สำนักงานที่ปรึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. p. 10-14.

11. Askeland, D.R., and Phule, P.P., วัสดุวิศวกรรม. 1 ed. 2010, กรุงเทพฯ: เซนเกจ เลิ  
นิง (ประเทศไทย). 525.
12. วิลเลียมส์ ดี คาลิสเตอร์, วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน. 2548, กรุงเทพฯ:  
สำนักพิมพ์ท็อป. 752.
13. Inc., A.A.S.M. Aluminum 5083-H116; 5083-H321 [cited 2016 October. 8];  
Available from:  
<http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA5083H116>.
14. Shonwalter, D.D., Placzankis, B.E, and Burkins, M.S, Ballistic Performance  
Testing of Aluminum Alloy 5059-H131 and 5059-H136 for Armor Application. 2008,  
Weapon and Materials Research Directorate: U.S. Army Research Laboratory  
Weapons and Materials Research Directorate ATTN: AMSRD ARL WM BD TA  
Aberdeen Proving Ground, MD 21005-5066.
15. Chen, H.C., Chen, Y.L, and Shen, B.C., Ballistic resistance analysis of double-  
layered composite material structures. Theoretical and Applied Fracture Mechanics,  
2012. 62: p. 15-25.
16. Chawla, K.K., Composite Materials: Science and Engineering. 3 ed. 2012, New  
York: Springer Science+Business Media. 552.
17. Brinson, H.F., Brison L.C., Polymer Engineering Science and viscoelasticity:  
An Introduction. 2008, New York: Springer Science&Business Media.
18. Gaulord, M.W., Reinforced Plastic Theory and Practice. 2 ed. 1974,  
Massachusetts: Division of Cahners Publishing.
19. Hyer, M.W., Stress Analysis of Fiber-Reinforced Composite Materials. 1998,  
Singapore: McGraw-Hill Book Co-Singapore. 627.
20. Bisanda, E.T.N., and Ansell, M.P, The Effect of Silane Treatment on the  
Mechanical and Physical Properties of Sisal-Epoxy composites. Composite Science  
and Technology, 1991. 41: p. 165-178.



21. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร, วัสดุผสม1 (เอกสารประกอบการสอน). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพฯ.
22. Balaji, A., Karthikeyan, B., and Sundar Raj, C, Bagasse Fiber – The Future Biocomposite Material: A Review. International Journal of ChemTech Research 2015. 7(01): p. 223-233.
23. Verma, D., Gope, P.C., Marheshwari, M.K., and Sharma, R.K, Bagasse Fiber Composites-A Review. Journal of Materials and Environment Science 2012. 3(6): p. 1079-1092.
24. Joshi, S.V., Drzalb, L.T., Mohanty, A.K., and Arora, S., Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites? Composites: Part A 2004. 35: p. 371–376.
25. Monteiro, S.N., et al., Natural Curaua Fiber - Reinforced Composites in Multilayered Ballistic Armor. The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International, 2015. 46A: p. 4567-4577.
26. Sergio N. Moterio, V.S.C., Fabio O. Braga, Lucas T. Bolzan, Ricardo P. Webar, Jarosalaw W. Drelich, Sugarcane bagasse waste in composite for multilayered armor. European Polymer Journal, 2016. 78: p. 173-185.
27. Cao, Y., Shibata, S., and Fukumoto, I., Mechanical properties of biodegradable composites reinforced with bagasse fibre before and after alkali treatments. Composites: Part A 2006. 37: p. 423-429.
28. Manalo, A.C., Wani, E., Zukarnain, N.A., Karunasena, W., and Lau, K., Effects of alkali treatment and elevated temperature on the mechanical properties of bamboo fibre-polyester composites. Composites Part B, 2007. 80: p. 73-83.
29. Bozlu, R.M., Sibata, S., Diba, S.F., and Uono, M, Effect of holding time and the amount of fiber content on the flexural properties of Bagasse /bamboo fiber reinforced biodegradable composite. International Conference on Environmental Aspects of Bangladesh (ICEAB10), 2010: p. 51-54.

30. Trindade, W.G.e.a., Phenolic Thermoset Matrix Reinforced with Sugar Cane Bagasse Fiber: Attempt to Develop a New Fiber Surface Chemical Modification Involving Formation of Quinones Followed by Reaction with Furfuryl Alcohol. *Macromolecular Materials and Engineering* 2004. 289: p. 728-736.
31. Vernice A, M., Annual Book of ASTM Standard 2008. Metals-Mechanical Testing, Elevated and Low-Temperature Test, Metallography, ed. N.C.B. Sean J. Bailey Vol. 03. 2008, Baltimore, MD, U.S.A: ASTM International.
32. Vernice A, M., Annual Book of ASTM Standard 2008. Plastic (II), ed. N.C.B. Sean J. Bailey Vol. 08. 2008, Baltimore, MD, U.S.A: ASTM International.
33. Vernice A, M., Annual Book of ASTM Standard 2008. Plastic(III), ed. N.C.B. Sean J. Bailey Vol. 08. 2008, Baltimore, MD, U.S.A: ASTM International.
34. Vernice A, M., Annual Book of ASTM Standards 2008. Nonferrous Metal Products, ed. N.C.B. Sean J. Bailey Vol. 02. 2008, Baltimore, MD, U.S.A: ASTM International.
35. Patrick T. Summers, A.P.M., Scott W. Case, Brian Y. Lattimer, Microstructure-based modeling of residual yield strength and strain hardening after fire exposure of aluminum alloy 5083-H116. *Materials Science & Engineering A*, 2015. 632: p. 14-28.
36. Weilan Liu, Z.C., Zhaofeng Chen , Xingwang Cheng, YangweiWang, Xianhui Chen, and B.L. Jingyi Liu, Shaogang Wang, Influence of different back laminate layers on ballistic performance of ceramic composite armor. *Materials and Design*, 2015. 87: p. 421-427.

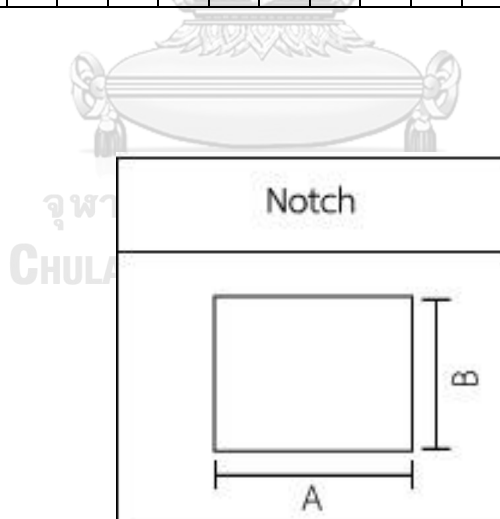


ภาคผนวก ก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

ตาราง ก๑ เปอร์เซ็นต์การเดือนวัดในหน่วยมิลลิเมตร [31]

Dimension B, mm	Dimension A, mm																			
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10	
1.0	99	98	98	97	96	96	95	94	94	93	92	92	91	91	90	89	89	88	88	
1.5	98	97	96	95	94	93	92	92	91	90	89	88	87	86	85	84	83	82	81	
2.0	98	96	95	94	92	91	90	89	88	86	85	84	82	81	80	79	77	76	75	
2.5	97	95	94	92	91	89	88	86	84	83	81	80	78	77	75	73	72	70	69	
3.0	96	94	92	91	89	87	85	83	81	79	77	76	74	72	70	68	66	64	62	
3.5	96	93	91	89	87	85	82	80	78	76	74	72	69	67	65	63	61	58	56	
4.0	95	92	90	88	85	82	80	77	75	72	70	67	65	62	60	57	55	52	50	
4.5	94	92	89	86	83	80	77	75	72	69	66	63	61	58	55	52	49	46	44	
5.0	94	91	88	85	81	78	75	72	69	66	62	59	56	53	50	47	44	41	37	
5.5	93	90	86	83	79	76	72	69	66	62	59	55	52	48	45	42	38	35	31	
6.0	92	89	85	81	77	74	70	66	62	59	55	51	47	44	40	36	33	29	25	
6.5	92	88	84	80	76	72	67	63	59	55	51	47	43	39	35	31	27	23	19	
7.0	91	87	82	78	74	69	65	61	56	52	47	43	39	34	30	26	21	17	12	
7.5	91	86	81	77	72	67	62	58	53	48	44	39	34	30	25	20	16	11	6	
8.0	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5	0	



รูป ก1 ภาพวาดตัวอย่างพื้นผิวรอยขาดหลังการกระแทก

## มาตรฐาน NIJ 0108.01 สำหรับวัสดุกันกระสุน

(NIJ Standard 0108.01 Ballistic resistance materials)

### วัตถุประสงค์

เพื่อกำหนดวิธีการทดสอบสมรรถนะขั้นต่ำในการนำไปใช้งานของวัสดุกันกระสุน และในการปรับปรุงข้อกำหนดครั้งนี้มีการเพิ่มการป้องกันระดับ III-A เพื่อให้ข้อกำหนดมีความครอบคลุมมากขึ้น

### ขอบเขตของมาตรฐาน

มาตรฐานนี้ใช้รับรองวัสดุกันกระสุน (เกราะ) ทุกชนิดนอกเหนือจากที่มีการรองรับในมาตรฐานเกราะบุคคล (Body Armor) และหมวกสนาม (Helmet) วัสดุกันกระสุนมีหลายประเภท ตั้งแต่โล่กันกระสุน เช่น โล่สนามของเจ้าหน้าที่ตำรวจ เป็นต้น วัสดุที่เป็นโครงสร้างถาวร เช่น ป้อมสนาม เป็นต้น ไปจนถึงวัสดุกันกระสุนที่ใช้กับยานพาหนะ ซึ่งวัสดุกันกระสุนสามารถผลิตจากวัสดุหลายชนิด เช่น โลหะ เซรามิก กระจกใส เส้นใย พลาสติกเสริมเส้นใย และอาจใช้วัสดุชนิดเดียวหรือหลายชนิดรวมกัน

ความรุนแรงในการปะทะของกระสุนขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยทั้ง รูปร่างของกระสุน ส่วนประกอบกระสุน ปลอกกระสุน มวลกระสุน และความเร็วของกระสุน เนื่องจากมีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้องจึงกำหนดช่วงการทดสอบโดยใช้ความเร็วกระสุน และมวลกระสุนเป็นหลัก เนื่องจากกระสุนชนิดเดียวกันแต่มีความเร็วต่างกันความรุนแรงในการปะทะต่างกันด้วย

### การแบ่งประเภทสมรรถนะกระสุน

#### 1. Type I (22 LR; 38 Special)

สามารถต้านทานกระสุนปืนตามที่ระบุในวิธีการทดสอบ Type I และกระสุนปืนพกที่ความรุนแรงต่ำกว่าได้ เช่น 12 gauge No.4 และปืนพกที่ใช้กระสุน 25 และ 32

#### 2. Type II-A (Lower Velocity 357 Magnum; 9 mm)

สามารถต้านทานกระสุนปืนตามที่ระบุในวิธีการทดสอบ Type II-A และกระสุนปืนพกที่ความรุนแรงต่ำกว่าได้ เช่น 12 gauge 00 buckshot, 45 Auto., 38 Special – P และกระสุนที่ผลิตจากโรงงาน เช่น 357 Magnum and 9 mm รวมถึงกระสุนความรุนแรงใน Type I

### 3. Type II (Higher Velocity 357 Magnum; 9 mm)

สามารถต้านทานกระสุนปืนตามที่ระบุในวิธีการทดสอบ Type II และกระสุนปืนพกที่ความรุนแรงต่ำกว่าได้ ได้แก่ กระสุนที่ผลิตจากโรงงาน เช่น 357 Magnum and 9 mm รวมถึงกระสุนความรุนแรงใน Type I และ Type II-A

### 4. Type III-A (44 Magnum; Submachine Gun 9 mm)

สามารถต้านทานกระสุนปืนตามที่ระบุในวิธีการทดสอบ Type III-A และกระสุนปืนพกที่ความรุนแรงต่ำกว่าได้ รวมถึงกระสุนความรุนแรงใน Type I, Type II-A และ Type II

### 5. Type III (High-Powered Rifle)

สามารถต้านทานกระสุนปืนตามที่ระบุในวิธีการทดสอบ Type III และกระสุนปืนพกที่ความรุนแรงต่ำกว่าได้ เช่น 223 Remington (5.56 mm FMJ), 30 Carbine FMJ, และ 12 gauge rifle slug รวมถึงกระสุนความรุนแรงใน Type I, Type II-A, Type II และ Type III-A

### 6. Type IV (Armor-Piercing Rifle)

สามารถต้านทานกระสุนปืนตามที่ระบุในวิธีการทดสอบ Type III-A และกระสุนปืนพกที่ความรุนแรงต่ำกว่าได้ รวมถึงกระสุนความรุนแรงใน Type I, Type II-A, Type II, Type III-A และ Type III

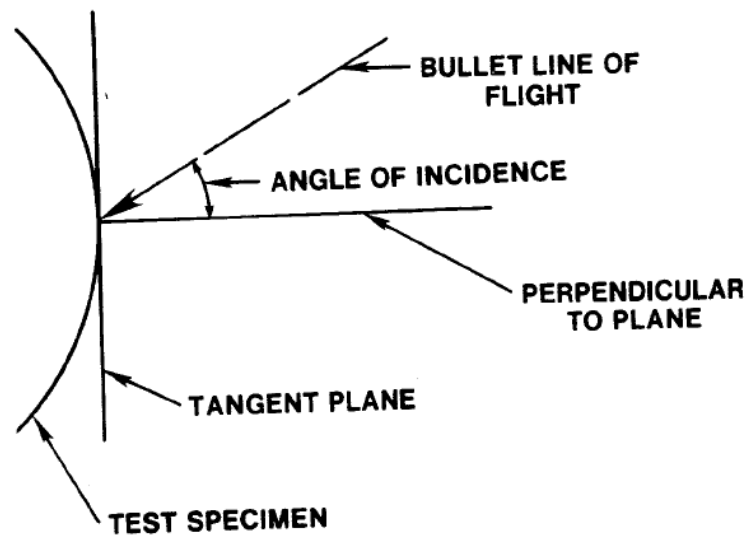
### 7. Special Type

ผู้ผลิตหรือผู้ซื้อสามารถกำหนดระดับความต้านทานนอกเหนือจากที่มีในมาตรฐานได้ และสามารถเพิ่มข้อกำหนดอื่น ๆ ในการทดสอบให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานได้

## คำนิยาม

### 1. Angle of incidence

มุมระหว่างแนวการยิงกระสุน และเส้นที่ตั้งฉากกับผิวหน้าของเป้าหมาย (ด้านหน้าของวัสดุส่วนหน้าในการรับการปะทะ) ดังแสดงในรูป g2



รูป ก2 Angle of incidence [7]

## 2. Fair hit

ข้อกำหนดตำแหน่งระยะห่างรอยกระสุนบนชิ้นงานวัสดุกันกระสุนโดยกระสุนทำมุมปรากฏ (Angle of incidence) ไม่เกิน 5° รอยกระสุนห่างจากมุมและขอบของชิ้นงานวัสดุกันกระสุนอย่างน้อย 5 cm (2 in) และนัดถัดมามีระยะห่างจากนัดแรก รวมถึงมุมและขอบของชิ้นงานวัสดุกันกระสุนอย่างน้อย 5 cm (2 in) โดยนัดก่อนหน้าไม่เกิดการเจาะทะลุ

## 3. Full metal jacketed (FMJ) bullet

ปลอกกระสุนทองเหลืองฐานเป็นทองแดงผสม (90 Cu-10 Zn)

## 4. Jacketed soft point (JSP) bullet

ปลอกกระสุนทองเหลืองบางส่วนเป็นทองแดงผสม (90 Cu-10 Zn)

## 5. Lead bullet

ปลอกกระสุนทองเหลืองเติมธาตุผสมเพิ่มความแข็ง

## 6. Penetration

การที่แผ่นพยานเกิดการเจาะทะลุเนื่องจากสะเก็ด หรือกระสุนมาปะทะจนเกิดรูที่ทำให้แสงจากหลอดไฟ 60-W สามารถส่องลอดผ่านได้

#### 7. Strike face

พื้นผิวของชิ้นงานวัสดุกันกระสุนที่เป็นวัสดุส่วนหน้าในการรับการปะทะของกระสุนทดสอบหรือส่วนที่เป็นบรรจุภัณฑ์

#### 8. Semiwadcutter

กระสุนหัวตัดที่หัวกระสุนเป็นร่อง เมื่อปะทะเป้าหมายจะเกิดการฉีกแหวกเพื่อทะลุเป้าหมาย

#### 9. Witness plate

แผ่นอะลูมิเนียมบางที่วางอยู่ด้านหลังชิ้นงานวัสดุกันกระสุนเพื่อวัดศักยภาพความปลอดภัยในการต้านทานของชิ้นงานวัสดุกันกระสุน

#### ระเบียบวิธีทดสอบ

##### 1. ชิ้นงานวัสดุกันกระสุน (Sampling)

ชิ้นงานวัสดุกันกระสุนที่นำมาทดสอบควรเป็นขนาดจริง และควรมีขนาดหน้าตัดอย่างน้อย 30.5 cm x 30.5 cm (12 in x 12 in)

##### 2. อุปกรณ์การทดสอบ (Test equipment)

###### 2.1 Type I

22 LR ; ปืนพก 22-caliber หรือเครื่องยิงทดสอบ กระบอกปืนยาว 10-12 cm กระสุนปืน 22 Long Rifle High Velocity Lead มวลกระสุน 2.6 g ความเร็วกระสุน  $320 \pm 12$  m/s ( $1050 \pm 40$  ft/s)

38 Special ; ปืนพก 38 Special หรือเครื่องยิงทดสอบ กระบอกปืนยาว 15-16 cm กระสุนปืน 38 Special round-nose lead มวลกระสุน 2.6 g ความเร็วกระสุน  $259 \pm 15$  m/s ( $850 \pm 50$  ft/s)



## 2.2 Type II-A

Lower Velocity 357 Magnum ; ปืนพก 357 Magnum หรือเครื่องยิงทดสอบ กระบอกปืนยาว 10-12 cm กระสุนปืน 357 Magnum jacketed soft point มวลกระสุน 10.2 g ความเร็วกระสุน  $381\pm 15$  m/s ( $1250\pm 50$  ft/s)

Lower Velocity 9 mm; ปืนพก 9 mm หรือเครื่องยิงทดสอบ กระบอกปืนยาว 10-12 cm กระสุนปืน 9 mm full metal jacketed มวลกระสุน 8.0 g ความเร็วกระสุน  $332\pm 12$  m/s ( $1090\pm 40$  ft/s)

## 2.3 Type II

Higher Velocity 357 Magnum ; ปืนพก 357 Magnum หรือเครื่องยิงทดสอบ กระบอกปืนยาว 15-16.5 cm กระสุนปืน 357 Magnum jacketed soft point มวลกระสุน 10.2 g ความเร็วกระสุน  $425\pm 15$  m/s ( $1395\pm 50$  ft/s)

Higher Velocity 9 mm ; ปืนพก 9 mm หรือเครื่องยิงทดสอบ กระบอกปืนยาว 10-12 cm กระสุนปืน 9 mm full metal jacketed มวลกระสุน 8.0 g ความเร็วกระสุน  $358\pm 12$  m/s ( $1175\pm 40$  ft/s)

## 2.4 Type III-A

44 Magnum ; ปืนพก 44 Magnum หรือเครื่องยิงทดสอบ กระบอกปืนยาว 14-16 cm กระสุนปืน 44 Magnum, lead semiwadcutter with gas checks มวลกระสุน 15.55 g ความเร็วกระสุน  $426\pm 15$  m/s ( $1400\pm 50$  ft/s)

Submachine Gun (SMG) 9 mm ; ปืนพก 9 mm SMG หรือเครื่องยิงทดสอบ กระบอกปืนยาว 24-26 cm กระสุนปืน 9 mm full metal jacketed มวลกระสุน 8.0 g ความเร็วกระสุน  $426\pm 15$  m/s ( $1400\pm 50$  ft/s)

## 2.5 Type III

ปืนไรเฟิล (Rifle) หรือเครื่องยิงทดสอบ กระบอกปืนยาว 56 cm กระสุน 7.62 mm full metal jacketed (U.S. military designation M80) มวลกระสุน 9.7 g ความเร็วกระสุน  $838\pm 15$  m/s ( $2850\pm 50$  ft/s)

## 2.6 Type IV

ปืนไรเฟิล หรือเครื่องยิงทดสอบ กระบอกปืนยาว 56 cm กระสุน 30 caliber armor piercing (U.S. military designation APM2) มวลกระสุน 10.8 g ความเร็วกระสุน  $868 \pm 15$  m/s ( $2850 \pm 50$  ft/s)

## 2.7 Special Type

ข้อกำหนดอาวุธทดสอบ ขนาดกระสุนทดสอบ ความเร็วกระสุนทดสอบ ฯลฯ เป็นไปตามที่ผู้ผลิตและผู้ซื้อกำหนดสำหรับผู้ใช้เฉพาะกลุ่ม

### 3. เครื่องวัดความเร็วกระสุน (Chronograph)

อ่านค่าความเร็วกระสุนคลาดเคลื่อนได้  $1 \mu\text{s}$  แต่ไม่เกิน  $2 \mu\text{s}$  เครื่องวัดความเร็วกระสุนต้องไวต่อแสงและนำไฟฟ้า

### 4. อุปกรณ์จับยึด (Support fixture)

ชิ้นงานวัสดุกันกระสุนต้องมีอุปกรณ์จับยึดที่มั่นคง วางตั้งฉากกับแนวการยิงของกระสุนในจุดที่ปะทะเป้าหมาย (ชิ้นงานวัสดุกันกระสุน) ได้ ในตำแหน่งการวางที่กำหนด

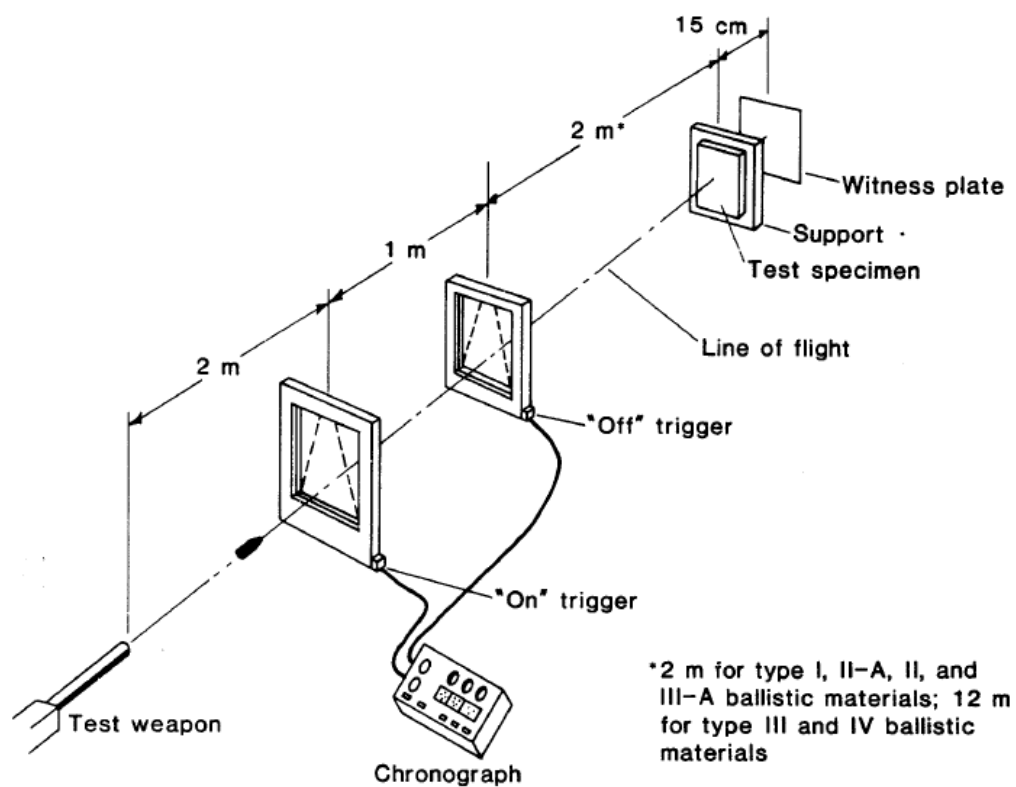
### 5. แผ่นพยาน (Witness plate)

แผ่นพยานควรเป็นแผ่นอะลูมิเนียมผสม 2024-T3 หรือ 2024-T4 ความหนา 0.5 mm จับยึดอย่างมั่นคง วางอยู่ด้านหลังห่างจากชิ้นงานวัสดุกันกระสุน 15 cm ตั้งฉากกับแนวการยิงกระสุน

### การทดสอบการต้านทานกระสุน (Ballistic resistance test) ล้าย

1. เก็บชิ้นงานที่อุณหภูมิ 20-28 °C (68-82 °F) 24 ชั่วโมงก่อนการทดสอบ
2. ติดตั้งเครื่องวัดความเร็วกระสุนห่างจากปากกระบอกปืนทดสอบ 3 m ดังรูป 2
3. ทดสอบยิงหลังติดตั้งอุปกรณ์ตรวจสอบความเร็วให้ได้ตามระดับที่เลือกทดสอบ
4. ติดตั้งชิ้นงานวัสดุกันกระสุนเพื่อทำการทดสอบห่างจากปากกระบอกปืนทดสอบ 5 m สำหรับระดับ I, II-A, II และ III-A และ 12 m สำหรับระดับ III และ IV
5. ติดตั้งแผ่นพยานด้านหลังชิ้นงานวัสดุกันกระสุน 15 cm
6. ยิงทดสอบและบันทึกความเร็วกระสุนทุกครั้งที่ยิงทดสอบ

7. ตรวจสอบ Fair hit บนชิ้นงานวัสดุกันกระสุนและตรวจสอบแผ่นพยานหลังยิงทุกครั้ง หากไม่เกิดการเจาะทะลุให้ยิงทดสอบจนจบการทดสอบ (อย่างน้อย 5 นัด) หากเกิดการเจาะทะลุให้หยุดทำการทดสอบทันที



CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูป ก3 ตำแหน่งอุปกรณ์การทดสอบ

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวนนทลี อึ้งแก้ว เกิดเมื่อวันที่ 22 มกราคม พ.ศ. 2534 ที่โรงพยาบาลเพชรบูรณ์  
จบการศึกษาระดับปริญญาตรีบัณฑิต ปีการศึกษา 2555  
จากภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์  
ในปี พ.ศ. 2557 ได้เข้าศึกษาระดับมหาบัณฑิต ในสาขาวิศวกรรมและเทคโนโลยีการ  
ป้องกันประเทศ  
ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

