

การพัฒนาหมวกกันกระสุนน้ำหนักเบาจากพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต
จากเมทริกซ์ประเภทเบนซอซายซีนอัลลอยด์เสริมแรงด้วยเส้นใยสมรรถนะสูง



นางสาวจัสมิน ดวงคำสวัสดิ์

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Development of Light Weight Polymer Nanocomposite Ballistic Helmet
Based on Benzoxazine Alloys Reinforced with High Performance Fiber



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

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาหมวกกันกระสุนน้ำหนักรเบาจากพอลิเมอร์นาโน
คอมพอสิตจากเมทริกซ์ประเภทเบนซอซซีนอัลลอยด์
เสริมแรงด้วยเส้นใยสมรรถนะสูง

โดย

นางสาวจัสมิน ดวงคำสวัสดิ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ศาสตราจารย์ ดร.ศราวุธ ริมดุสิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล กิตติสุขุมกร)

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

..... กรรมการ
(ดร. ปารวี วาสน์อำนวย)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. จันจิรา จับศิลป์)

จัสมีน ดวงคำสวัสดิ์ : การพัฒนาหมวกกันกระสุนน้ำหนักเบาจากพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตจากเมทริกซ์ประเภทเบนซอกซาซีนอัลลอยด์เสริมแรงด้วยเส้นใยสมรรถนะสูง (Development of Light Weight Polymer Nanocomposite Ballistic Helmet Based on Benzoxazine Alloys Reinforced with High Performance Fiber) อ.ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์หลัก: ศ. ดร.ศราวุธ ริมดุสิต, 82 หน้า.

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อพัฒนาวัสดุจากพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตจากเมทริกซ์ประเภทพอลิเบนซอกซาซีนอัลลอยด์ร่วมกับพอลิยูรีเทน ในอัตราส่วน 80/20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ เสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิด สำหรับผลิตเป็นหมวกกันกระสุน โดยศึกษาปริมาณการเติมอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้น (Multi-walled carbon nanotubes, MWCNT) ที่ 0.0, 0.25, 0.50, 1.0 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ต่อสมบัติทางกลของวัสดุ พบว่าการเติมอนุภาค MWCNT ส่งผลต่อสมบัติทางกลของวัสดุ โดยชิ้นงานที่ไม่เติมอนุภาค MWCNT มีค่าความแข็งแรงภายใต้แรงดึง และพลังงาน ฆ จุดขาดเท่ากับ 428 ± 40.6 MPa และ 20.8 ± 2.8 J ตามลำดับ เมื่อเติมอนุภาค MWCNT ที่ 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความแข็งแรงภายใต้แรงดึง และพลังงาน ฆ จุดขาด สูงขึ้น เท่ากับ 507 ± 31.4 MPa และ 28.1 ± 0.8 J ตามลำดับ เมื่อนำวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ปริมาณการเติม MWCNT 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มาขึ้นรูปเป็นแผ่นกันกระสุนที่จำนวนชั้นเส้นใยอะรามิดที่ 10, 15 และ 20 ชั้น ทดสอบด้วย กระสุนขนาด 9 มม. ตามมาตรฐาน NIJ-0106.01 พบว่าสามารถป้องกันการเจาะทะลุได้ที่ทุกจำนวนชั้นเส้นใยอะรามิด โดยที่ 20 ชั้นเส้นใยอะรามิดมีประสิทธิภาพในการป้องกันแรงปะทะทางซิปนยะดีที่สุด จึงนำลักษณะการเสียรูปของแผ่นเกราะดังกล่าวมาจำลองแรงปะทะทางซิปนยะด้วยโปรแกรม ANSYS-AUTODYN เพื่อหาสมบัติของวัสดุ (Material properties) ทั้งสามแนวแกนหลัก พบว่าการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และจากวิธีการทดลองมีความคลาดเคลื่อนเพียง 10.23 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำสมบัติวัสดุที่ได้มาจำลองเป็นหมวกกันกระสุน พบว่า หมวกกันกระสุนสามารถต้านทานการเจาะทะลุด้วยกระสุน 9 มม. ที่ความเร็ว 358 เมตรต่อวินาที (NIJ-0106.01 ระดับที่ 2) ได้ และมีรอยยุบตัวที่เกิดขึ้นไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ตั้งมาตรฐาน NIJ-0106.01 ที่ทุกตำแหน่งทดสอบ พร้อมทั้งหมวกกันกระสุนมีขีดจำกัดทางซิปนยะเท่ากับ 632 เมตรต่อวินาที เมื่อทดสอบด้วยกระสุนจำลองสะเก็ดระเบิด

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2560

5970122621 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: , POLYBENZOXAZINE/POLYURETHANE COMPOSITE / CARBON NANOTUBES / BALLISTIC HELMET / FINITE ELEMENT ANALYSIS

JUSMIN DAUNGKUMSAWAT: Development of Light Weight Polymer Nanocomposite Ballistic Helmet Based on Benzoxazine Alloys Reinforced with High Performance Fiber. ADVISOR: PROF. SARAWUT RIMDUSIT, Ph.D., 82 pp.

This study aims to develop a light weight ballistic helmet from a light weight nanocomposite ballistic helmet based on polybenzoxazine/urethane (PBA/PU) alloys at mass ratio of 80:20 reinforced with aramid fibers having a protection level II according NIJ-0106.01. Effects of Multi-walled carbon nanotubes (MWCNT) contents in a range of 0.0 to 2.0 wt% on mechanical properties, physical properties and ballistic performance as well as ballistic impact resistance to 9 mm Full Metal Jacketed based on National Institute of Justice (NIJ standard-0106.01) level II were investigated. The results revealed that the tensile strength and energy at break of PBA/PU composite filled with MWCNT of 0.25wt% exhibited the greatest values of 507 ± 31.4 MPa and 28.1 ± 0.8 J, respectively, when compared with the others. In addition, 20 plies of PBA/PU composite filled with MWCNT of 0.25 wt% showed the lowest back face deformation (BFD) depth which was suitable for ballistic helmet simulation. The obtained properties of ballistic armor plate were used to evaluate the ballistic helmet performance by ANSYS-AUTODYN program. The results indicated that the ballistic helmet which was prepared from the PBA/PU composite filled with MWCNT of 0.25 wt% can protect against 9 mm Full Metal Jacketed based on National Institute of Justice (NIJ standard-0106.01) level II and Fragment simulating projectile (FSP) based on MIL-STD-622F. Moreover, the ballistic helmet composite also exhibited good ballistic performance i.e. low BFD and high ballistic limit (V_{50}), suitable for ballistic helmet application.

Department: Chemical Engineering Student's Signature

Field of Study: Chemical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2017

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับการช่วยเหลือจากหลายๆท่าน ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ศราวุธ ริมดุสิต อาจารย์ที่ปรึกษา เป็นอย่างสูงสำหรับการให้คำปรึกษา เกี่ยวกับงานวิจัย การวางแผนงานวิจัย การตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ และแนวทางในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการ ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติศุภกร ประธานกรรมการ, อาจารย์ ดร.ปารวี วาศน์อำนวย และรองศาสตราจารย์ ดร. จันจิรา จับศิลป์ กรรมการ ที่ท่านได้สละเวลาอันมีค่าในการมาสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร. สนอง เอกสิทธิ์ สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับเครื่องตัดชิ้นงานและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ นางสาวภัทริน โมรา, นางสาวมนัญญา โอษฐ์วิไล, ดร. เทวรักษ์ ปานกลาง และนายคณศ รอดพูล รวมถึงเพื่อนๆ สาขาพอลิเมอร์ วิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณครอบครัว ที่เป็นกำลังใจสนับสนุนในทุกๆ ทางตลอดมา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป	ก
สารบัญตาราง.....	จ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	4
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	7
2.1 การทดสอบหมวกกันกระสุน	7
2.1.1 มาตรฐานการทดสอบการเจาะทะลุของหมวกกันกระสุน	7
2.1.2 การวัดรอยยุบตัวของหมวกกันกระสุน	9
2.1.3 การทดสอบขีดจำกัดทางชีปนะ (Ballistic limit, V_{50}).....	9
2.1.4 น้ำหนักของหมวกกันกระสุน.....	10
2.2 กลไกการดูดซับพลังงานของวัสดุคอมโพสิตเมื่อได้รับแรงปะทะทางชีปนะ.....	11
2.3 วัสดุคอมโพสิต (Composite Materials).....	11
2.3.2 วัสดุเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิต	17
2.4 การจำลองด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์	22
2.4.1 สมการสถานะที่เกี่ยวข้อง.....	23

สมการสภาวะออร์โธโทรปิก (Orthotropic EOS) สำหรับวัสดุคอมพอสิต	24
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	26
บทที่ 3 วัสดุและวิธีดำเนินงานวิจัย	44
3.1 วัสดุและสารเคมี	44
3.2 อุปกรณ์	44
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	45
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	54
4.1 ความต้านทานแรงดึง (Tensile test) ของพอลิเมอร์คอมพอสิตจากเมทริกซ์ประเภท เบน ชอกซาซีน-ยูรีเทนอัลลอยด์ที่ปริมาณการเติม MWCNT ต่างๆ เสริมแรงด้วยเส้นใยอะรา มิด	54
4.2 ความต้านทานแรงดัดโค้ง (Flexural test) ของพอลิเมอร์คอมพอสิตจากเมทริกซ์ประเภท เบนชอกซาซีน-ยูรีเทนอัลลอยด์ที่ปริมาณการเติม MWCNT ต่างๆ เสริมแรงด้วยเส้นใยอะ รามิด	57
4.3 ลักษณะสัญญาณของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตจากเมทริกซ์ประเภทพอลิเบนชอกซาซีน-ยูรี เทน ที่ปริมาณการเติม MWCNT ต่างๆ เสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิด	58
4.4 ผลของปริมาณการเติมอนุภาค MWCNT และจำนวนชั้นเส้นใยอะรามิดต่อการทดสอบ ทางซีปนและรอยยุบตัวที่เกิดขึ้นของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิต	60
4.5 การจำลองแรงปะทะทางซีปนบนแผ่นเกราะกันกระสุน โดยโปรแกรม ANSYS- AUTODYN และการเปรียบเทียบรูปแบบความเสียหายจากการทดลอง	66
4.6 การจำลองแรงปะทะทางซีปนบนหมวกกันกระสุนด้วยโปรแกรม ANSYS-AUTODYN	70
4.7 การหาค่าขีดจำกัดทางซีปน (Ballistic limit, V_{50}) ด้วยกระสุนจำลองสะเก็ดระเบิด ตาม มาตรฐาน MIL-STD-622F	73
รายการอ้างอิง	75
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	82

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 (ก) กระสุน 9 มม. และ (ข) แสดงตำแหน่งที่ใช้ทดสอบแรงปะทะทางซิปนะของหมวกกันกระสุน	8
รูปที่ 2.2 รายละเอียดระยะเวลาในการทดสอบหมวกกันกระสุนตามมาตรฐาน NIJ-0106.01 [32]	9
รูปที่ 2.3 กระสุน Fragment Simulating Projectile (FSP) สำหรับทดสอบซิปจำกัดทางซิปนะ [37].....	10
รูปที่ 2.4 การเสียรูปของแผ่นคอมพอสิตเนื่องจากคลื่นตามแนวยาว (Longitudinal waves) และคลื่นตามแนวขวาง (Transverse waves) ที่เกิดขึ้นภายในเส้นใย [39].....	11
รูปที่ 2.5 การสังเคราะห์เบนซอกซาซีนเรซินจากมอนอเมอร์	14
รูปที่ 2.6 กระบวนการพอลิเมอไรเซชันของพอลิเบนซอกซาซีน	14
รูปที่ 2.7 การสังเคราะห์พอลิยูรีเทนจากโพลูอินไดไฮโดรไซยานาตและพอลิโพรพิลีนพอลิออล.....	15
รูปที่ 2.8 โครงสร้างโมเลกุลของเบนซอกซาซีน-ยูรีเทนอัลลอยด์	17
รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของ (ก) เมต้าอะรามิด (ข) พาราอะรามิด	19
รูปที่ 2.10 โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ แบบผนังชั้นเดียว (SWCNT) และผนังหลายชั้น (MWCNT).....	21
รูปที่ 2.11 กระสุน 0.44 Magnum SJHP	27
รูปที่ 2.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับพลังงานและค่าการดูดซับพลังงานต่อความหนา กับอัตราส่วนพอลิยูรีเทนโดยน้ำหนัก.....	28
รูปที่ 2.13 กระสุน 7.62X51 มม. FMJ NATO ตามมาตรฐาน NIJ ในระดับที่ 3.....	29
รูปที่ 2.14 การเรียงตัวของแผ่นปะทะจำนวน 2 แผ่นจากพอลิเบนซอกซาซีนเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว และแผ่นดูดซับพลังงานจากเบนซอกซาซีน-ยูรีเทนอัลลอยด์ เสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิด	29
รูปที่ 2.15 ภาพชิ้นงานทดสอบยิงด้วยกระสุน 7.62x51 มม. FMJ NATO ตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3.....	30

รูปที่ 2.16 ผลจากการเติม MWCNT ต่อค่ามอดูลัสสะสม (E') ของนาโนคอมโพสิต โดย (a) 0, (b) 0.2 wt%, (c) 0.5 wt%, (d) 1 wt%, (e) 1.5 wt%, และ (f) 2.0 wt%	31
รูปที่ 2.17 ภาพการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TEM ของพอลิเบนซอกซาซีนที่เติมด้วยอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่อัตราส่วน (ก) 1.0 wt% (ข) 2.0 wt%	31
รูปที่ 2.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของพอลิยูรีเทนและพอลิยูรีเทนคอมพอสิตที่เติมอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	32
รูปที่ 2.19 ภาพการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TEM ของพอลิยูรีเทนที่เติมด้วยอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ (ก) ความเข้มข้นต่ำ (ข) ความเข้มข้นสูง	32
รูปที่ 2.20 (ก) การทดสอบชิ้นงานคอมพอสิตด้วยวิธี Charpy impact test (ข) อุปกรณ์การทดสอบยิงด้วยอาวุธปืนที่ยิงด้วยความเร็วสูงบนชิ้นงานคอมพอสิตแผ่นตรงที่เสริมแรงด้วยเส้นใยเคพลาร์ชนิด 29	33
รูปที่ 2.21 ทดสอบยิงชิ้นงานแผ่นตรงจากอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยเคพลาร์ 29 และเติมอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ 0.5 wt% ด้วยกระสุน NATO ภายใต้มาตรฐาน UNI EN 1063 European standard	34
รูปที่ 2.22 ภาพการเปรียบเทียบผลจากการทดลองและการจำลองด้วยโปรแกรม AUTODYN ที่แสดงให้เห็นว่ากระสุนปืนสแตนเลสทรงกลมที่ความเร็ว 205 เมตรต่อวินาที.....	37
รูปที่ 2.23 แบบจำลองการกระแทกหมวกกันกระสุนที่สามารถต้านทานการเจาะทะลุด้วยกระสุนปืนชนิด 9 มม. FMJ ที่ความเร็ว 358 เมตรต่อวินาที ได้ ซ้าย: ด้านบน ขวา: ด้านข้าง	37
รูปที่ 2.24 ภาพแสดงแผ่นเกราะหลังการทดสอบทั้งด้านหน้าและหลังด้วยมาตรฐาน NIJ Standard 0106.01 ทดสอบทั้งหมด 7 นัด.....	38
รูปที่ 2.25 แสดงลักษณะของหมวกหลังการทดสอบตามมาตรฐาน NIJ Standard-0106.01 จากโปรแกรม ABAQUS และจากการทดลอง	38
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	45
รูปที่ 3.2 การทดสอบความต้านทานแรงดึงด้วยเครื่อง Universal testing machine (Instron รุ่น 8872).....	46

รูปที่ 3.3 การทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้งด้วยเครื่อง Universal testing machine (Instron รุ่น 5567).....	47
รูปที่ 3.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ...	48
รูปที่ 3.5 (ก) การทดสอบแรงปะทะทางซีปนอะ (ข) กระสุนขนาด 9 มม. มาตรฐาน NIJ-0106.01 ระดับ 2.....	48
รูปที่ 3.6 แบบจำลองกระสุน 9 มม. ด้วยโปรแกรม ANSYS-AUTODYN แกนชั้นในทำจากตะกั่ว และปลอกนอกของกระสุนทำจากทองแดง	50
รูปที่ 3.7 แบบจำลอง (ก) แผ่นเกราะกันกระสุน (ข) หมวกกันกระสุน ด้วยโปรแกรม ANSYS-AUTODYN.....	50
รูปที่ 3.8 กระสุนจำลองสะเก็ดระเบิด (Fragment simulating projectile, FSP) ทำจาก เหล็กกล้า AISI 4340.....	51
รูปที่ 4.1 ชิ้นงานพอลิเมอร์คอมพอสิตที่เสียหายจากการทดสอบความต้านทานแรงดึง ที่ปริมาณ การเติม MWCNT (ก) 0.0 (ข) 0.25 (ค) 0.5 (ง) 1.0 และ (จ) 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ.....	57
รูปที่ 4.2 ลักษณะสัณฐานของ (ก) เส้นใยอะรามิด และวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ปริมาณการ เติม MWCNT ที่ (ข) 0.0 wt% (ค) 0.25 wt% (ง) 0.5 wt% ที่กำลังขยาย 5000x (จ) 0.5 wt% ที่กำลังขยาย 30,000x และ (ฉ) 2.0 wt% เสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิด.....	59
รูปที่ 4.3 ความเสียหายของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตหลังทดสอบแรงปะทะทางซีปนอะ ด้วย กระสุน 9 มม. ที่ปริมาณการเติม MWCNT ที่ 0, 0.25 และ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จำนวน ชั้นเส้นใยอะรามิด 10 ชั้น.....	62
รูปที่ 4.4 ความเสียหายของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตหลังทดสอบแรงปะทะทางซีปนอะ ที่ปริมาณ การเติม MWCNT ที่ 0.25 และ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จำนวนชั้นเส้นใยอะรามิด 15 ชั้น.....	64
รูปที่ 4.5 ความเสียหายของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตหลังทดสอบแรงปะทะทางซีปนอะ ที่ปริมาณ การเติม MWCNT ที่ 0.25 และ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จำนวนชั้นเส้นใยอะรามิด 20 ชั้น.....	65
รูปที่ 4.6 ด้านข้างของชิ้นงานวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิต ที่ปริมาณการเติม MWCNT ที่ 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ก) จำนวนเส้นใยอะรามิด 15 ชั้น (ข) จำนวนเส้นใยอะรามิด 20 ชั้น.....	66

รูปที่ 4.7 ขนาดแบบจำลองแผ่นเกราะกันกระสุนจากโปรแกรม ANSYS-AUTODYN.....	67
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานภายในและเวลาที่กระสุนเข้าปะทะชิ้นงาน.....	68
รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบรูปแบบความเสียหายระหว่างวิธีการทดลองและวิธีการจำลองด้วย ANSYS-AUTODYN ที่เกิดขึ้นหลังรับแรงทางซิปนะด้วย 9 มม. ความเร็ว 394 เมตรต่อวินาที	69
รูปที่ 4.10 ตำแหน่งบนหมวกกันกระสุนที่ทดสอบแรงปะทะทางซิปนะ ด้วยกระสุน 9 มม.	70
รูปที่ 4.11 รอยยุบตัวที่เกิดขึ้นด้านในหมวกกันกระสุนเมื่อได้รับแรงปะทะทางซิปนะจากกระสุน 9 มม.	71
รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ของรอยยุบตัวที่เกิดขึ้นในตำแหน่งที่ได้รับแรงปะทะทางซิปนะบนหมวกกันกระสุนที่เวลาต่างๆ	72
รูปที่ 4.13 ความเค้นสูงสุดที่เกิดบนหมวกกันกระสุนเมื่อได้รับแรงปะทะทางซิปนะด้วยกระสุน 9 มม.	73
รูปที่ 4.14 การทดสอบแรงปะทะทางซิปนะ ด้วยกระสุนจำลองสะเก็ดระเบิด	74
รูปที่ 4.15 การทดสอบขีดจำกัดทางซิปนะที่ความเร็วกระสุน (ก) 610 เมตรต่อวินาที (ข) 670 เมตรต่อวินาที ที่ทำให้เกิดการเจาะทะลุเพียงบางส่วน และเจาะทะลุอย่างสมบูรณ์ ตามลำดับ.....	74

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงมาตรฐานการทดสอบหมวกกันกระสุนตามระดับภัยคุกคาม (NIJ-0106.01).....	8
ตารางที่ 2.2 มาตรฐานน้ำหนักสูงสุดของหมวกกันกระสุนแต่ละขนาดตามมาตรฐาน CO/PD-05-04 [38].....	10
ตารางที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติของเทอร์โมเซตเรซินชนิดต่างๆ.....	12
ตารางที่ 2.4 สมบัติของเส้นใยสมรรถนะสูงเปรียบเทียบกับโลหะ [44].....	18
ตารางที่ 2.5 สมบัติของเส้นใยเคฟลาร์อะรามิตระดับต่างๆ [46].....	20
ตารางที่ 2.6 แสดงสมบัติของอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ [55].....	21
ตารางที่ 2.7 ผลการทดสอบสมบัติด้านความยืดหยุ่นของระบบเบนซอกซาซีน-ยูรีเทนอัลลอยด์เสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิต.....	26
ตารางที่ 2.8 แสดงผลการทดสอบในช่วงพลังงานกระแทกต่ำ ด้วยวิธี Charpy impact test.....	34
ตารางที่ 2.9 ผลการทดสอบยิงเปรียบเทียบระหว่างแผ่นคอมโพสิตจากอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยเคฟลาร์ชนิด 29 ที่เต็มและไม่เต็มอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	35
ตารางที่ 2.10 การเปรียบเทียบผลของการเติมอนุภาคนาโนชนิดต่างๆต่อเมทริกซ์อีพอกซีเรซิน.....	36
ตารางที่ 3.1 สมบัติของกระสุน 9 มม. ANSYS-AUTODYN.....	49
ตารางที่ 3.2 สมบัติของเหล็กกล้า AISI4340 ตาม ANSYS-AUTODYN (Material library).....	51
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิตที่ปริมาณการเติมอนุภาค MWCNT ต่าง ๆ.....	54
ตารางที่ 4.2 ผลของปริมาณการเติมอนุภาค MWCNT ที่ 0.0, 0.25 และ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่จำนวนชั้นเส้นใยอะรามิต 10 ชั้น ต่อประสิทธิภาพในการป้องกันแรงปะทะทางซิปนะ.....	60

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบแรงปะทะทางซีปนะที่จำนวนชั้นเส้นใยอะรามิดที่ 15 และ 20 ชั้น ที่ปริมาณการเติมอนุภาค MWCNT ที่ 0.25 และ 0.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	63
ตารางที่ 4.4 สมบัติของวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิตจากเมทริกซ์พอลิเบนซอกซาซีน-ยูรีเทน ปริมาณการเติม MWCNT ที่ 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิด	67



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

จากในอดีตจนถึงปัจจุบันมนุษย์ได้พัฒนาอาวุธขึ้นมาอย่างหลากหลาย ทั้งกระสุนปืนรูปแบบต่างๆ รวมไปถึงอาวุธที่มีประสิทธิภาพในการทำลายล้างสูงอื่นๆ ดังนั้นเพื่อให้เจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติการทางทหารสามารถปฏิบัติการกิจเป็นไปได้อย่างปลอดภัย อุปกรณ์ป้องกันอย่างเกราะและหมวกกันกระสุนจึงถูกพัฒนาตามไปด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งหมวกกันกระสุนที่เป็นส่วนสำคัญในการป้องกันการบาดเจ็บของศีรษะจากกระสุนปืน แม้ศีรษะรวมถึงลำคอจะมีพื้นที่เพียง 12% ของร่างกาย แต่คิดเป็น 25% ของพื้นที่ที่จะถูกยิงได้ [1] อีกทั้งยังมีภัยคุกคามจากการใช้ระเบิดชนิดแสงเครื่อง (Improvised explosive devices, IEDs) ที่สามารถทำให้เกิดการบาดเจ็บจากการกระแทกของแรงระเบิดที่สามารถทำให้หมวกกันกระสุนเกิดการยุบตัว (Behind helmet blunt trauma, BHBT) [2, 3] ซึ่งการบาดเจ็บที่เกิดขึ้นจากแรงกระแทกนี้อาจทำให้เกิดการบอบช้ำของสมอง (Traumatic brain injury, TBI) ด้วย ดังนั้นในการพัฒนาหมวกกันกระสุนนอกจากจะต้องมีน้ำหนักเบาเพื่อความสะดวกในการใช้งานและสามารถป้องกันกระสุนได้แล้วยังต้องพิจารณาถึงความสามารถของการทรงรูปของหมวกกันกระสุนให้มียุบตัวต่ำร่วมด้วย

หมวกกันกระสุนเริ่มมีการใช้งานตั้งแต่สมัยสงครามโลกครั้งที่ 1 และ 2 ซึ่งจะเป็นหมวกกันกระสุนที่ทำมาจากโลหะ ทำให้มีน้ำหนักมากรวมถึงการขึ้นรูปยาก ในปัจจุบันจึงได้มีการพัฒนาหมวกกันกระสุนโดยการนำความรู้ทางด้านวัสดุมาใช้ เพื่อให้หมวกกันกระสุนมีน้ำหนักเบาสามารถปฏิบัติการกิจเป็นไปได้อย่างคล่องแคล่ว และมีประสิทธิภาพในการป้องกันสูงนั่นคือ หมวกกันกระสุนจากวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิต ซึ่งประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นเนื้อหลักหรือพอลิเมอร์เมทริกซ์ (Polymer matrix) ทำหน้าที่เป็นกาวประสานยึดวัสดุเสริมแรงเข้าด้วยกัน โดยพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่นิยมนำมาใช้ในงานหมวกกันกระสุนมักเป็นเทอร์โมเซตเรซิน ได้แก่ อีพ็อกซี (Epoxy) ฟีนอลิก (Phenolics) ไวนิลเอสเตอร์ (Vinyl ester) และพอลิเบนซอกซาซีน (BA-a) [4-14] เป็นต้น และอีกส่วนเป็นวัสดุเสริมแรง (Reinforcement materials) ซึ่งอาจอยู่ในรูปอนุภาคหรือเส้นใยเสริมแรงก็ได้ โดยเส้นใยเสริมแรงที่นิยมใช้ในการผลิตหมวกกันกระสุนควรมีสมบัติที่ดีในการต้านแรงกระแทก ความสามารถในการดูดซับพลังงานกระแทกสูง และสามารถกระจายพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นจากแรงปะทะได้ [15] เช่น เส้นใยพอลิเอธิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (UHMWPE) และเส้นใยอะรามิด (Aramid fiber) เป็นต้น ส่วนอนุภาคเสริมแรง ที่มีรายงานการใช้งานเพื่อปรับปรุงความแข็งแรง

ของพอลิเมอร์เมทริกซ์ เช่น อนุภาคนาโนเคลย์ [26, 27] อนุภาคนาโนซิลิกา [28-30] อนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ [31] อนุภาคยวงนาโน [32] และอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ [33, 34] เป็นต้น

พอลิเบนซอกซาซิน (BA-a) [5, 11, 16] เป็นเทอร์โมเซตเรซินที่พัฒนาจากฟีนอลิกเรซิน มีสมบัติที่โดดเด่น คือ สักคราะห์ง่าย ไม่เกิดผลิตภัณฑ์อื่นจากการบ่มมอนอเมอร์ให้เป็นพอลิเมอร์ มีเสถียรภาพทางความร้อนและทางกลสูง ค่าการหดตัวจากการขึ้นรูปใกล้ศูนย์ ค่าการดูดซึมน้ำและค่าความหนืดก่อนการขึ้นรูปต่ำ และสามารถทำอัลลอยด์ร่วมกับเรซินอื่นได้หลายชนิด [17] เช่น ระบบของพอลิเบนซอกซาซินกับอีพอกซี [18] พอลิเบนซอกซาซินกับสารไดแอนไฮโดรด์ [19] และพอลิเบนซอกซาซินกับยูรีเทน [20-22] เป็นต้น ในส่วนของวัสดุเสริมแรง เส้นใยอะรามิดเป็นเส้นใยที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการทำหมวกกันกระสุน อีกทั้งยังมีสมบัติโดดเด่น เช่น น้ำหนักเบา สามารถทนแรงดึงได้มาก มีค่ามอดูลัสสูง [23] ซึ่งมีงานวิจัยของ Okhawilai และ Rimdusit [17] ที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับแผ่นหลังหรือแผ่นดูดซับพลังงาน พบว่าใช้เมทริกซ์เรซินเบนซอกซาซินและยูรีเทนที่อัตราส่วน 80:20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิด ให้ค่าดูดซับพลังงานสูงสุดคือ 399 ± 14 J อีกทั้งยังสามารถป้องกันกระสุน 7.62×51 มม. ตามมาตรฐานกระสุน NIJ-0101.06 ระดับ 3 [24] ได้ เมื่อใช้แผ่นหลังที่ทำจากเส้นใยอะรามิด 25 ชั้น ร่วมกับแผ่นหน้าหรือแผ่นปะทะที่ใช้พอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิด E ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจนำเบนซอกซาซิน-ยูรีเทนอัลลอยด์ในอัตราส่วน 80:20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ มาใช้เป็นเมทริกซ์เรซิน และเสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิดในการทำเป็นแผ่นคอมโพสิตเพื่อพัฒนาเป็นหมวกกันกระสุน นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่พบว่าใช้อนุภาคระดับนาโนจะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพด้านการรับแรงและป้องกันการเจาะทะลุของกระสุนให้เพิ่มขึ้น เช่น งานวิจัยของ Laurenzi และคณะ (2013) [25] ที่ได้ศึกษาแผ่นเกราะกันกระสุนที่ทำจากอีพอกซีเรซินที่เติมด้วยอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้น (Multi-walled carbon nanotubes, MWCNT) ที่อัตราส่วนต่างๆเสริมแรงด้วย เส้นใยเคฟลาร์อะรามิด พบว่าเมื่อเติมอนุภาค MWCNT ที่ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้แผ่นคอมโพสิต ป้องกันกระสุน 7.62×51 มม. ในช่วงความเร็วปะทะ 432.2-435.7 เมตรต่อวินาที ได้ และใช้จำนวนชั้นของคอมโพสิตในการหยุดกระสุนน้อยกว่าเมื่อเทียบกับแผ่นคอมโพสิตที่ใช้เพียงอีพอกซีเรซินร่วมกับ เส้นใยเคฟลาร์อะรามิดเท่านั้น แสดงให้เห็นว่าการเติมอนุภาค MWCNT มีผลต่อประสิทธิภาพการป้องกันการเจาะทะลุของกระสุน นอกจากนี้งานวิจัยของ Qiao Chen และคณะ (2006) [26] ที่ศึกษาสมบัติทางกลของนาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิเบนซอกซาซินที่เติมด้วยอนุภาค MWCNT ที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าการเติมอนุภาค MWCNT ที่ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้ค่ามอดูลัสสะสมมีค่าสูงขึ้นประมาณ 3 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่เติมอนุภาค MWCNT และ J. Xiong และคณะ [27] ศึกษาสมบัติทางกลและทางความร้อนของนาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิยูรีเทนและอนุภาค MWCNT พบว่าการเติมอนุภาค MWCNT ทำให้ค่าความเค้น ค่ามอดูลัส และค่าความแข็งแรง ณ จุดแตกหักมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อ

เปรียบเทียบกับระบบที่ไม่เติม MWCNT แสดงให้เห็นว่าการเติมอนุภาค MWCNT มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มความแข็งแรงของเมทริกซ์ทั้งพอลิเบนซอกซาซินและพอลิยูรีเทน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจนำอนุภาค MWCNT มาเป็นวัสดุเสริมแรงร่วมกับเส้นใยอะรามิดที่มีพอลิเมอร์เมทริกซ์เป็นเบนซอกซาซิน-ยูรีเทนอัลลอยด์ในอัตราส่วน 80:20 โดยน้ำหนักตามลำดับ เพื่อพัฒนาเป็นหมวกกันกระสุน

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ได้ศึกษาการเสีรูปร่างของหมวกกันกระสุนผ่านโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ด้วย [28-31] เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถลดต้นทุนจากการทดลอง มีประสิทธิภาพรวดเร็ว แต่อย่างไรก็ตามวิธีการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ก็จำเป็นต้องพึ่งพาผลจากวิธีการทดลองบางส่วนด้วย [17] อย่างเช่นงานวิจัยของ Rodríguez-Millán 2016) [30] ที่ศึกษาการออกแบบหมวกกันกระสุนด้วยวิธีการทดลองและด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาการเสีรูปร่างของหมวกกันกระสุนและหารอยยุบตัว โดยใช้ข้อมูลจากผลการทดลองด้วยจากแผ่นคอมพอสิตเมทริกซ์ประเภทพอลิไวนิลบิวทีรอลร่วมกับพีนอลิกเรซิน เสริมแรงด้วยเส้นใยเคฟลาร์อะรามิด พบว่าสามารถต้านทานกระสุน 9 มม. ที่ความเร็ว 425 ± 15 เมตรต่อวินาที ตามมาตรฐาน NIJ-0106.01 ได้ รอยยุบตัวของแผ่นคอมพอสิตที่ได้จากการทดลองและการจำลองด้วยโปรแกรมมีค่าใกล้เคียงกัน คือ 21.8 ± 1.35 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตร ตามลำดับ หลังจากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการจำลองแผ่นคอมพอสิตไปจำลองเป็นหมวกกันกระสุน พบว่ารอยยุบตัวของหมวกกันกระสุนที่ได้มีค่าไม่เกิน 10 มิลลิเมตรที่แต่ละตำแหน่งทดสอบ 5 ตำแหน่ง ได้แก่ ด้านหน้า ด้านหลัง ด้านซ้ายและขวา และที่ด้านบนของหมวกกันกระสุน ซึ่งสอดคล้องกับรอยยุบตัวที่ได้จากการทดลองในภายหลังว่ามีค่ารอยยุบตัวไม่เกิน 12 มิลลิเมตร พบว่ามีความคลาดเคลื่อนระหว่างวิธีการทดลองและการจำลองด้วยโปรแกรมไม่เกิน 10% ที่ทุกตำแหน่งทดสอบ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะพัฒนาวัสดุสำหรับหมวกกันกระสุนน้ำหนักเบาจากแผ่นพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต ด้วยการเติมอนุภาค MWCNT ในระบบเบนซอกซาซิน-ยูรีเทนอัลลอยด์ อัตราส่วน 80:20 ตามลำดับ โดยใช้เส้นใยอะรามิดเป็นเส้นใยเสริมแรง โดยศึกษาผลของปริมาณการเติมอนุภาค MWCNT ที่เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่าง ๆ ต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมพอสิตดังกล่าว พร้อมทั้งหาจำนวนชั้นและรอยยุบตัวที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการป้องกันการเจาะทะลุด้วยกระสุน 9 มม. ที่ความเร็ว 358 ± 15 เมตรต่อวินาที ตามมาตรฐานการทดสอบการวัดการเจาะทะลุของหมวกกันกระสุน NIJ-0106.01 [32] ในระดับที่ 2 เปรียบเทียบการเสีรูปร่างที่ได้จากการทดลองบนแผ่นคอมพอสิตมาจำลองเป็นหมวกกันกระสุนด้วยโปรแกรม ANSYS-AUTODYN เพื่อนำไปหารูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองหมวกกันกระสุน

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อพัฒนาวัสดุสำหรับหมวกกันกระสุนน้ำหนักเบาโดยใช้วัสดุคอมพอสิตจากเบนซอกซาซีน-ยูรีเทนอัลลอยด์ ร่วมกับอนุภาค MWCNT เสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิด

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของการเติมอนุภาค MWCNT อัตราส่วนต่างๆต่อสมบัติทางกลของวัสดุคอมพอสิตจากเบนซอกซาซีน-ยูรีเทนอัลลอยด์เสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิด

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของจำนวนชั้นที่เหมาะสมและประเมินความเสียหายจากรอยยุบตัวที่เกิดขึ้นของวัสดุคอมพอสิตที่สามารถใช้ด้านการเจาะทะลุของกระสุนตามมาตรฐาน NIJ standard-0106.01 ระดับ 2 โดยยังรักษาโครงสร้างโดยรวมของแผ่นเกราะกันกระสุนไว้ได้ ระหว่างวัสดุคอมพอสิตจากเบนซอกซาซีน-ยูรีเทนอัลลอยด์ ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิดเปรียบเทียบกับระบบที่เติมและไม่เติมอนุภาค MWCNT

1.2.4 สร้างแบบจำลองแผ่นเกราะกันกระสุนด้วยโปรแกรม ANSYS-AUTODYN เพื่อเปรียบเทียบการเสียรูปที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยโปรแกรม เพื่อนำมาจำลองเป็นหมวกกันกระสุนด้วยโปรแกรม ANSYS-AUTODYN และหารูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นบนแบบจำลอง

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 สังเคราะห์เบนซอกซาซีนเรซินโดยใช้บิสฟีนอล-เอ (Bisphenol-A) และอนิลีน (Aniline) โดยเทคนิคไมใช้ตัวทำละลาย ที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 40 นาที

1.3.2 สังเคราะห์ยูรีเทนจากสารพอลิโพรพิลีนพอลิออล (Polypropylene polyol) และโทลูอินไดไอโซไซยาเนต (Toluene diisocyanate: TDI) ในอัตราส่วน 1:2

1.3.3 เตรียมเบนซอกซาซีน-ยูรีเทนอัลลอยด์ที่เป็นเมทริกซ์เรซินในอัตราส่วน 80:20 โดยน้ำหนักตามลำดับ

1.3.4 เตรียมวัสดุคอมพอสิตโดยใช้เบนซอกซาซีน-ยูรีเทนอัลลอยด์ร่วมกับอนุภาค MWCNT ที่อัตราส่วน 0, 0.25, 0.5, 1.0 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์อัลลอยด์ เสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิดและขึ้นรูปเป็นแผ่นคอมพอสิต

1.3.5 วิเคราะห์สมบัติทางกลของวัสดุคอมพอสิตจากเบนซอกซาซีน-ยูรีเทนอัลลอยด์ร่วมกับอนุภาค MWCNT โดยเครื่องทดสอบแรงดึงแรงอัด (Universal Testing Machine) ดังนี้

1.3.5.1 ความแข็งแรงภายใต้แรงดึงและมอดูลัสแรงดึง

1.3.5.2 ความแข็งแรงภายใต้แรงดัดโค้งและมอดูลัสของแรงดัดโค้ง

1.3.6 วิเคราะห์หาจำนวนชั้นที่เหมาะสมของวัสดุคอมพอสิตตั้งแต่ 10-25 ชั้น ประเมินและเปรียบเทียบรอยยุบตัวที่เกิดขึ้นของวัสดุคอมพอสิต ระหว่างระบบเบนซอกซาซีน-ยูรีเทนอัลลอยด์ที่

เต็มและไม่เต็มอนุภาค MWCNT เมื่อทดสอบการต้านการเจาะทะลุของกระสุนตามมาตรฐาน NIJ-0106.01

1.3.6.1 ทดสอบภัยคุกคามระดับ 2 ด้วยกระสุนปืนขนาด 9 มม. FMJ ที่ความเร็ว 358 ± 15 เมตร/วินาที

1.3.7 สร้างแบบจำลองแผ่นคอมพอสิตที่ทดสอบตามมาตรฐาน NIJ-0106.01 ระดับ 2 เพื่อนำไปสร้างเป็นแบบจำลองหมวกกันกระสุน ด้วยโปรแกรม ANSYS-AUTODYN

1.3.7.1 หารูปแบบและพื้นที่ความเสียหายที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองหมวกกันกระสุน เมื่อทดสอบด้วยกระสุน 9 มม. FMJ ตามมาตรฐาน NIJ-0106.01

1.3.7.2 หาขีดจำกัดทางชีปะนะ (Ballistic limit, V_{50}) ที่ทดสอบตามมาตรฐาน MIL-STD-622F

1.3.7.3 หาขนาดรอยยุบตัว (Back face deformation, BFD) ที่เกิดขึ้นบนหมวกกันกระสุน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถพัฒนาวัสดุสำหรับใช้เป็นหมวกกันกระสุนจากวัสดุพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตให้มีน้ำหนักลดลงและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ซึ่งต้องสามารถป้องกันการเจาะทะลุของกระสุนขนาด 9 มม. ตามมาตรฐาน NIJ-0106.01 ระดับ 2 และสามารถสร้างแบบจำลองหมวกกันกระสุน และคาดการณ์ความเสียหายหรือรอยยุบตัวที่เกิดขึ้นได้ ด้วยโปรแกรม ANSYS-AUTODYN

บทที่ 2

ทฤษฎี

ในการป้องกันภัยคุกคามทางซีปนระของหมวกกันกระสุนอาจก่อให้เกิดความเสียหายที่สำคัญ 2 ประการ ได้แก่ ความเสียหายทางตรงที่เกิดจากการเจาะทะลุของกระสุนปืน และความเสียหายทางอ้อมที่ไม่ได้เกิดจากการเจาะทะลุของกระสุนปืนแต่เกิดจากแรงกระแทกที่ทำให้เกิดการเสียรูปอย่างรวดเร็วของหมวก หรือที่เรียกว่าการเกิดรอยยุบตัวของวัสดุรองหลัง (Back face deformation, BFD) ซึ่งหากเกินมาตรฐานที่กำหนดจะส่งผลทำให้ศีรษะถูกแรงกระแทกจากหมวกกันกระสุน ทำให้เกิดการบอบช้ำของสมองหรือเกิดแผลบาดเจ็บที่สมอง (Traumatic brain injury, TBI) ดังนั้นในการพัฒนาหมวกกันกระสุนนอกจากต้องพิจารณาถึงความสามารถในการป้องกันกระสุนได้แล้ว ยังต้องพิจารณาถึงรอยยุบตัวที่เกิดขึ้น เพื่อลดความเสียหายจาก BFD ด้วย [1] ซึ่งจะแบ่งการทดสอบออกเป็นมาตรฐานการทดสอบการเจาะทะลุของหมวกกันกระสุนและการวัดรอยยุบตัวที่เกิดขึ้น

2.1 การทดสอบหมวกกันกระสุน

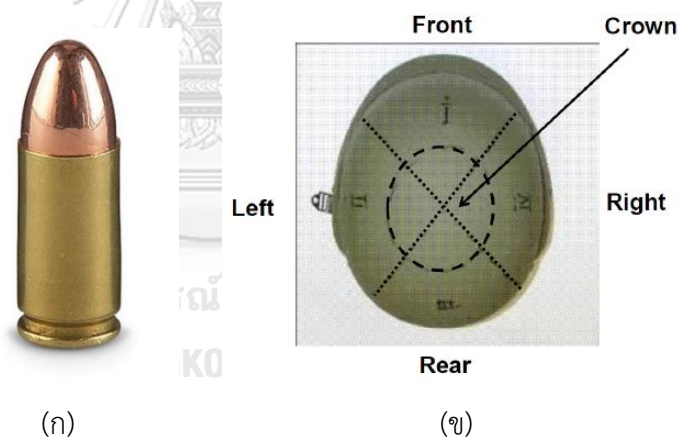
2.1.1 มาตรฐานการทดสอบการเจาะทะลุของหมวกกันกระสุน

ในการทดสอบประสิทธิภาพการป้องกันของหมวกกันกระสุน อ้างอิงมาตรฐานของ NIJ (The National Institute of Justice) ประเทศสหรัฐอเมริกา คือ NIJ- 0106.01 [32] ซึ่งจะแบ่งมาตรฐานออกเป็น 3 ระดับด้วยกัน ได้แก่ ระดับ 1, ระดับ 2-A และระดับ 2 ในแต่ละระดับจะกำหนดชนิดพร้อมน้ำหนักกระสุนที่ใช้ทดสอบ ช่วงความเร็วของกระสุนที่ใช้ทดสอบ แสดงดังตารางที่ 2.1 โดยทั้ง 3 ระดับ จะเป็นการป้องกันภัยคุกคามของปืนพกสั้น ที่ระดับสูงสุดทดสอบด้วยกระสุนขนาด 9 มม. ทดสอบบนตำแหน่งทั้ง 5 ตำแหน่ง [1] ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ดังนี้

- ด้านหน้าของหมวกกันกระสุน เนื้อขอบหมวก 85 มิลลิเมตร
- ด้านหลังของหมวกกันกระสุน เนื้อขอบหมวก 75 มิลลิเมตร
- ด้านซ้ายของหมวกกันกระสุน เนื้อขอบหมวก 50 มิลลิเมตร
- ด้านขวาของหมวกกันกระสุน เนื้อขอบหมวก 50 มิลลิเมตร
- บริเวณกลางหมวกกันกระสุน

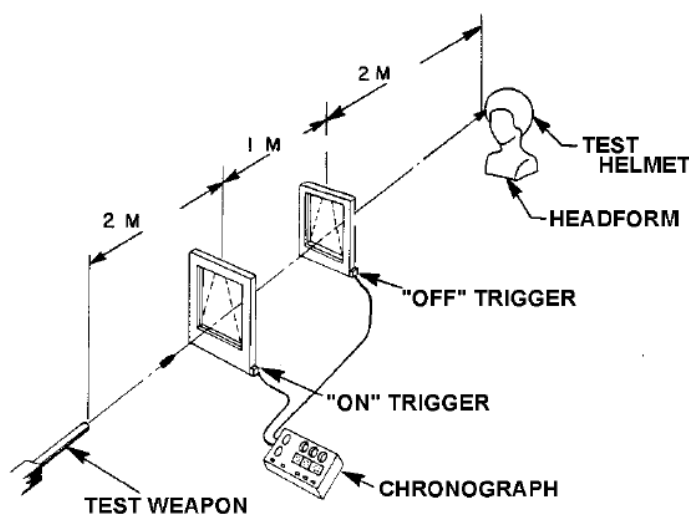
ตารางที่ 2.1 แสดงมาตรฐานการทดสอบหมวกกันกระสุนตามระดับภัยคุกคาม (NIJ-0106.01)

ระดับภัยคุกคาม	ชนิดของกระสุนที่ใช้ทดสอบ	น้ำหนักกระสุน (กรัม)	ความเร็วกระสุน (เมตรต่อวินาที)
1	22 LRHV Lead	2.6	320±12
	38 Special RN Lead	10.2	259±15
2-A	357 Magnum JSP	10.2	381±15
	9 mm FMJ	8.0	332±15
2	357 Magnum JSP	10.2	425±15
	9 mm FMJ	8.0	358±15



รูปที่ 2.1 (ก) กระสุน 9 มม. และ (ข) แสดงตำแหน่งที่ใช้ทดสอบแรงปะทะทางซิปนะของหมวกกันกระสุน

อุปกรณ์และระยะในการทดสอบยิงหมวกกันกระสุนตามมาตรฐาน NIJ-0106.01 แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 2.2 โดยชิ้นงานที่ใช้ทดสอบจะต้องอยู่ห่างจากปากกระบอกปืนที่ทดสอบเป็นระยะ 5 เมตร โดยที่ระยะ 2 และ 3 เมตร จากปากกระบอกปืนจะมีเครื่องวัดความเร็วกระสุน (Chronograph) โดยเครื่องวัดความเร็วกระสุนจะทำหน้าที่จับเวลาที่กระสุนวิ่งผ่านเครื่องแล้วนำมาคำนวณเป็นความเร็วกระสุนที่ปะทะชิ้นงาน



รูปที่ 2.2 รายละเอียดระยะในการทดสอบหมวกกันกระสุนตามมาตรฐาน NIJ-0106.01 [32]

2.1.2 การวัดรอยยุบตัวของหมวกกันกระสุน

การวัดรอยยุบตัวตามมาตรฐาน NIJ-0106.01 หรือเรียกว่าการวัดค่า BFD (Back face deformation) ที่เกิดขึ้นหลังได้รับแรงปะทะทางซิปนะ โดยการทดสอบรอยยุบตัวต้องทดสอบทั้งหมด 5 ตำแหน่ง เช่นเดียวกับการวัดการเจาะทะลุของหมวกกันกระสุน ยิ่งด้วยกระสุน 1 นัดต่อตำแหน่งได้แก่ บริเวณด้านหน้าและด้านหลังของหมวกกันกระสุน กำหนดรอยยุบตัวไม่เกิน 25.4 มิลลิเมตร ที่บริเวณด้านซ้าย ด้านขวา และด้านบนของหมวกต้องมีค่ารอยยุบตัวไม่เกิน 16 มิลลิเมตร ตามลำดับ [1, 33]

2.1.3 การทดสอบขีดจำกัดทางซิปนะ (Ballistic limit, V_{50})

ในการทดสอบขีดจำกัดทางซิปนะของหมวกกันกระสุน (Ballistic limit, V_{50}) คือการทดสอบหาค่าความเร็วสูงสุดที่หมวกสามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนได้ [34] โดยทดสอบด้วยกระสุน Fragment Simulating Projectile (FSP) เป็นกระสุนที่ใช้จำลองแรงปะทะจากสะเก็ดระเบิดวัสดุของกระสุนทำมาจากเหล็กกล้า (AISI 4340 steel) แสดงในรูปที่ 2.3 ตามมาตรฐาน Military Standard ของประเทศสหรัฐอเมริกาซึ่งการทดสอบหมวกกันกระสุนใช้มาตรฐาน MIL-H-44099A [35] และการวัดค่า V_{50} เป็นไปตามข้อกำหนดของ MIL-STD-622F [34] โดยใช้ความเร็วปะทะเริ่มต้นที่ 610 เมตรต่อวินาที [36] กล่าวคือกระสุนนัดที่ 1 จะยิงทดสอบด้วยความเร็วที่สูงกว่า V_{50} (Ballistic limit) ของวัสดุประมาณ 20-30 เมตรต่อวินาที หากเกิดการเจาะทะลุอย่างสมบูรณ์ กระสุนนัดที่ 2 จะยิงทดสอบด้วยความเร็วต่ำกว่าความเร็วที่ทะลุ ประมาณ 15 หรือ 30 เมตรต่อวินาที เพื่อให้เกิดการเจาะทะลุเพียงบางส่วนเท่านั้น แต่หากกระสุนนัดที่ 1 ทำให้เกิดการเจาะทะลุของวัสดุเพียงบางส่วน

เท่านั้น กระสุนนัดที่ 2 จะยิงทดสอบด้วยความเร็วสูงกว่าความเร็วนัดที่ 1 ของวัสดุ 15 เมตรต่อวินาที เพื่อให้เกิดการเจาะทะลุอย่างสมบูรณ์ [34] โดยตามมาตรฐานจะทดสอบยิงทั้งหมด 6 นัด ประกอบด้วยช่วงความเร็วต่ำสุดทั้งหมด 3 นัด ที่จะทำให้เกิดการเจาะทะลุอย่างสมบูรณ์ และช่วงความเร็วสูงสุด 3 นัด ที่จะทำให้เกิดการเจาะทะลุเพียงบางส่วนของชิ้นงานทดสอบ [36] โดยค่า V_{50} จะเป็นค่าเฉลี่ยของความเร็วทดสอบ ที่ประกอบด้วยความเร็วนัดที่เกิดการทะลุอย่างสมบูรณ์ และนัดที่เกิดการเจาะทะลุเพียงบางส่วนในจำนวนนัดที่เท่ากัน



รูปที่ 2.3 กระสุน Fragment Simulating Projectile (FSP) สำหรับทดสอบขีดจำกัดทางซีปนะ [37]

2.1.4 น้ำหนักของหมวกกันกระสุน

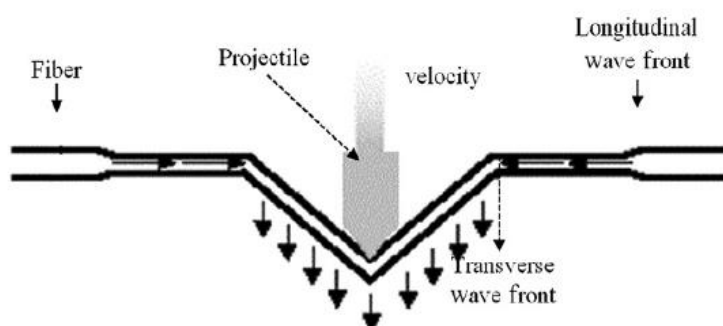
น้ำหนักรวมของหมวกกันกระสุนแต่ละขนาดต้องมีน้ำหนักดังแสดงในตารางที่ 2.2 หรือมีความหนาแน่นต่อพื้นที่ 1.17 กรัมต่อตารางเซนติเมตร [36] โดยอ้างอิงน้ำหนักหมวกตามมาตรฐานการทดสอบการกระแทกสำหรับหมวกกันกระสุนของประเทศสหรัฐอเมริกา (CO/PD-05-04) [38]

ตารางที่ 2.2 มาตรฐานน้ำหนักสูงสุดของหมวกกันกระสุนแต่ละขนาดตามมาตรฐาน CO/PD-05-04 [38]

ขนาดของหมวกกันกระสุน	น้ำหนักสูงสุดของหมวกกันกระสุน (กิโลกรัม)
ขนาดเล็ก (S)	1.3
ขนาดปานกลาง (M)	1.4
ขนาดใหญ่ (L)	1.5
ขนาดใหญ่พิเศษ (XL)	1.7

2.2 กลไกการดูดซับพลังงานของวัสดุคอมโพสิตเมื่อได้รับแรงปะทะทางซิปนะ

เมื่อเส้นใยได้รับแรงปะทะจากกระสุนในทิศตั้งฉากจะเกิดการเสียรูปของเส้นใย ดังรูปที่ 2.4 ก่อให้เกิดการแพร่กระจายของคลื่นสองชนิดภายในเส้นใย ได้แก่ คลื่นตามแนวยาว (Longitudinal waves) ซึ่งแผ่ในทิศตามแนวเส้นใยเข้าสู่กลางจุดกึ่งกลางที่ได้รับแรงกระทบ และคลื่นความแนวขวาง (Transverse waves) ที่จะแผ่ออกในทิศความหนาของเส้นใย ผลจากคลื่นทั้งสองทิศทางนี้ทำให้เกิดการก่อตัวของการเสียรูปที่มีลักษณะคล้ายทรงกรวยที่หลังแผ่นคอมโพสิต โดยการดูดซับพลังงานจะมากขึ้นตามการเคลื่อนที่ของการเสียรูป



รูปที่ 2.4 การเสียรูปของแผ่นคอมโพสิตเนื่องจากคลื่นตามแนวยาว (Longitudinal waves) และคลื่นตามแนวขวาง (Transverse waves) ที่เกิดขึ้นภายในเส้นใย [39]

2.3 วัสดุคอมโพสิต (Composite Materials)

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาหวมกกันกระสุนจากพอลิเมอร์คอมโพสิตมาใช้มากขึ้น เนื่องจากวัสดุที่ทำจากพอลิเมอร์คอมโพสิตสามารถรับแรงปะทะได้ในจำนวนหลายนัด อีกทั้งยังมีน้ำหนักเบา ใช้พลังงานในการขึ้นรูปต่ำและมีประสิทธิภาพการป้องกันที่ดีกว่าวัสดุจากโลหะอีกด้วย

วัสดุคอมโพสิต คือ วัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีหรือโครงสร้างแตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปมาผสมกันโดยที่ไม่ละลายเข้าด้วยกัน วัสดุจากพอลิเมอร์คอมโพสิตสามารถปรับปรุงสมบัติให้เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างหลากหลาย มีส่วนประกอบสำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นเนื้อหลักหรือพอลิเมอร์เมทริกซ์ (Polymer matrix) ที่ทำหน้าที่เป็นกาวประสานยึดสารตัวเติมอื่นๆเข้าด้วยกัน ทำให้เกิดความคงรูปของชิ้นงาน และอีกส่วนเป็นวัสดุเสริมแรง (Reinforcement materials) ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของเส้นใย แผ่นขนาดเล็ก หรือเป็นอนุภาคที่ฝังตัวอยู่ในเนื้อเมทริกซ์ก็ได้ ซึ่งพอลิเมอร์ คอมโพสิตที่ได้จะต้องมีสมบัติที่ดีกว่าสมบัติของแต่ละองค์ประกอบ เช่น มีสมบัติทางกลสูงขึ้น มีความคงรูปของชิ้นงานและสามารถรับแรงได้สูงขึ้น เป็นต้น

2.3.1 วัสดุเนื้อหลักหรือเมทริกซ์ (Matrix)

วัสดุเนื้อหลักหรือเมทริกซ์ที่ทำหน้าที่เป็นกาวยเชื่อมประสานเส้นใยเสริมแรง หรือวัสดุเสริมแรง อื่นๆ ที่นิยมนำมาผลิตในหมวกกันกระสุนมักเป็นประเภทเทอร์โมเซตเรซิน ได้แก่ อีพ็อกซี (Epoxy) ฟีนอลิก (Phenolics) ไวนิลเอสเทอร์ (Vinyl ester) และพอลิเบนซอกซาซีน (BA-a) [4-14] เป็นต้น โดยสมบัติของเทอร์โมเซตเรซินชนิดต่างๆแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติของเทอร์โมเซตเรซินชนิดต่างๆ

สมบัติ	อีพ็อกซี (Epoxy)	ฟีนอลิก (Phenolics)	ไซยาเนต เอสเทอร์ (Cyanate ester)	พอลิเบนซอกซาซีน (Polybenzoxazine)
ความหนาแน่น Density (g/cc)	1.2-1.25	1.24-1.32	1.1-1.35	1.19
อุณหภูมิใช้งาน สูงสุด Max use temperature (°C)	180	~200	150-200	130-280
ความแข็งแรง ภายใต้แรงดึง Tensile strength (MPa)	90-120	24-25	70-130	100-125
การยืดตัว Elongation (%)	3.0-4.3	0.3	0.2-0.4	2.3-2.9
ค่าคงตัวของ ไดอิเล็กทริก Dielectric constant (1MHz)	3.8-4.5	0.4-10	2.7-3.0	3-3.5

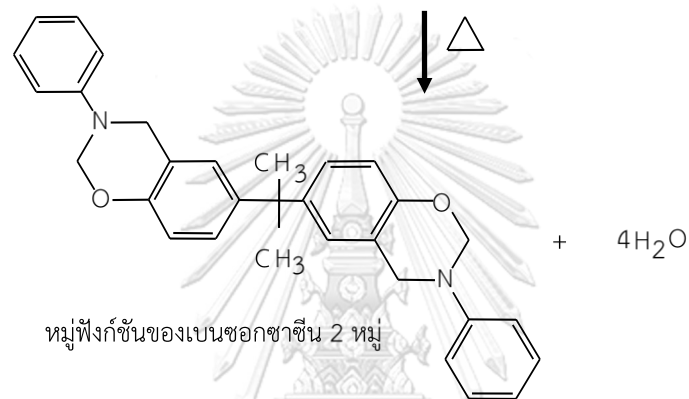
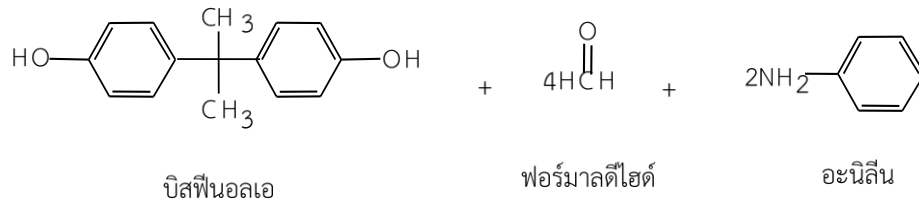
ตารางที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติของเทอร์โมเซตเรซินชนิดต่างๆ (ต่อ)

สมบัติ	อีพอกซี (Epoxy)	ฟีนอลิก (Phenolics)	ไซยาเนต เอสเทอร์ (Cyanate ester)	พอลิเบนซอกซาซีน (Polybenzoxazine)
อุณหภูมิการบ่ม Cure temperature (°C)	RT-180	150-190	180-250	160-220
การหดตัวจากการบ่ม Cure shrinkage (%)	>3	0.002	~3	~0
อุณหภูมิการเปลี่ยน สถานะคล้ายแก้ว T_g (°C)	150-220	170	250-270	170-340

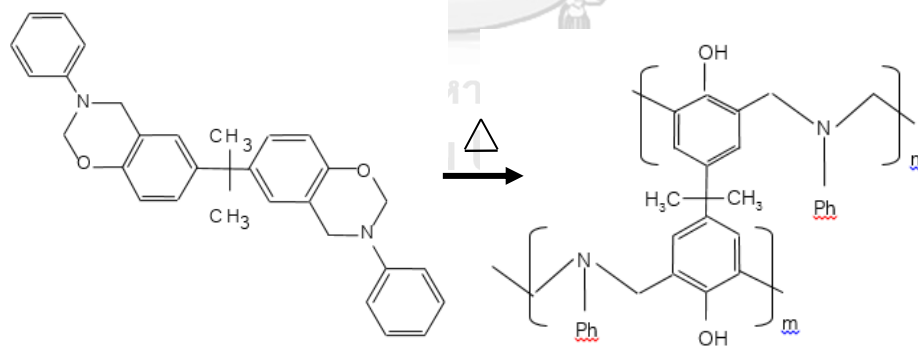
2.3.1.1 พอลิเบนซอกซาซีนเรซิน (Polybenzoxazine resin)

พอลิเบนซอกซาซีน (BA-a) เป็นพอลิเมอร์ในตระกูลฟีนอลิกถูกค้นพบโดย Cope และ Holy ในปี ค.ศ.1940 [40] โดยในปี ค.ศ.1996 Ishida [18, 41] ได้สังเคราะห์เบนซอกซาซีนเรซินโดยเทคนิคไม่ใช้ตัวทำละลาย โดยสังเคราะห์จากบิสฟีนอลเอ (Bisphenol A) ฟอรัมาลดีไฮด์ (Formaldehyde) และอะนิลีน (Aniline) ในอัตราส่วน 1:4:2 โดยโมลตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ดังรูป 2.5 ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้เมทริกซ์จากพอลิเบนซอกซาซีน เนื่องจากมีสมบัติที่โดดเด่นหลายประการ เช่น สังเคราะห์ได้ง่าย กระบวนการพอลิเมอไรเซชันหรือกระบวนการบ่มเบนซอกซาซีนโดยการให้ความร้อนเพื่อเปิดวงแหวนพบว่าปฏิกิริยาสิ้นสุดโดยไม่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาอีกทั้งไม่เกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียงในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน แสดงดังรูปที่ 2.6 สามารถเก็บรักษาได้นาน มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง มีสมบัติทางกลที่ดี มีค่าการดูดซึมน้ำและค่าความหนืดการหลอมต่ำ (<1000 เซนติพอยส์ ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส) ทำให้ไหลเคลือบเส้นใยหรือสารตัวเติมอื่นๆ ได้ดี การหดตัวจากการขึ้นรูปใกล้ศูนย์ สามารถเชื่อมประสานเส้นใยสมรรถนะสูงได้หลายชนิด และทำอัลลอยด์ร่วมกับเรซินอื่นได้หลายชนิดเพื่อให้ได้เรซินที่มีสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานได้อย่างหลากหลาย

[17] โดยในงานวิจัยนี้สนใจที่จะใช้ระบบเบนซอกซาซีน-ยูรีเทนอัลลอยด์เป็นเมทริกซ์ในการพัฒนาหมวกกันกระสุน



รูปที่ 2.5 การสังเคราะห์เบนซอกซาซีนเรซินจากมอนอเมอร์

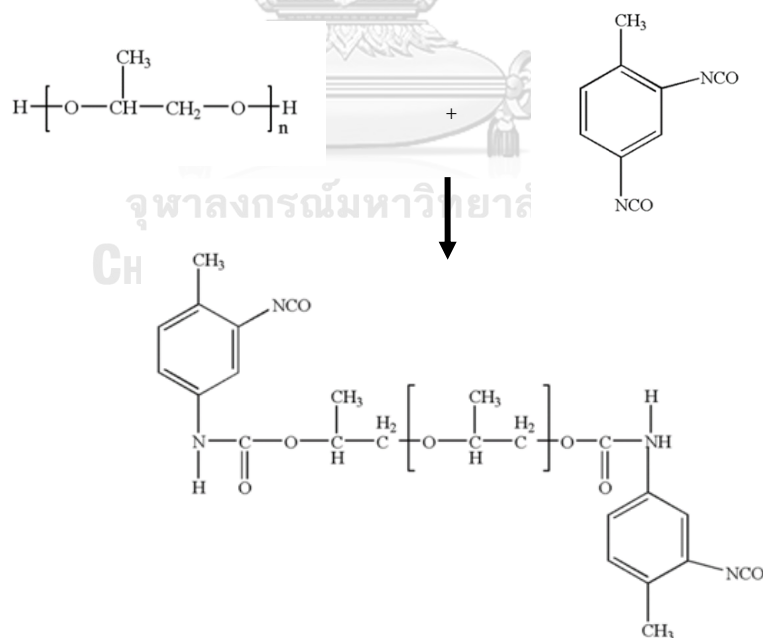


รูปที่ 2.6 กระบวนการพอลิเมอไรเซชันของพอลิเบนซอกซาซีน

2.3.1.2 พอลิยูรีเทน (Polyurethane)

พอลิยูรีเทน (Polyurethane, PU) เป็นพอลิเมอร์ที่เป็นได้ทั้งเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซต ที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบควบแน่นระหว่างไอโซไซยาเนตและโพลีออลชนิดต่างๆ ทำให้พอลิยูรีเทนสามารถใช้งานได้หลายรูปแบบและมีสมบัติที่หลากหลายเนื่องจากสมบัติของสารตั้งต้น เช่น มีค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นสูง สามารถทนต่อการฉีกขาด การขีดถู และทนต่อรังสี UV ได้ดี สมบัติของพอลิยูรีเทนทั้งด้านความร้อน ทางเคมีและทางกลสามารถทำนายได้จากปฏิกิริยาระหว่างหมู่ไอโซไซยาเนต (Isocyanate, -NCO) และหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group, -OH) ที่ทำให้เกิดพอลิยูรีเทน [42] ซึ่งสารที่มีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นองค์ประกอบ มีน้ำหนักโมเลกุลและชนิดที่หลากหลาย ได้แก่ พอลิเอสเทอร์ (Polyester) พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate) และพอลิโพรพิลีนพอลีออล (Polypropylene polyol) เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้เลือกสังเคราะห์พอลิยูรีเทนจากสารตั้งต้นโทลูอินไดไอโซไซยาเนต (Toluene diisocyanate : TDI) และพอลิโพรพิลีนพอลีออล (Polypropylene polyol) ในอัตราส่วน 2:1 โดยโมล ตามลำดับ ทำปฏิกิริยาดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยการเกิดปฏิกิริยาส่วนใหญ่หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของพอลิโพรพิลีนพอลีออลจะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไอโซไซยาเนตของโทลูอินไดไอโซไซยาเนตตรงตำแหน่งพารา (para) ตามคำอธิบายของ Pegoraro และคณะ [43]

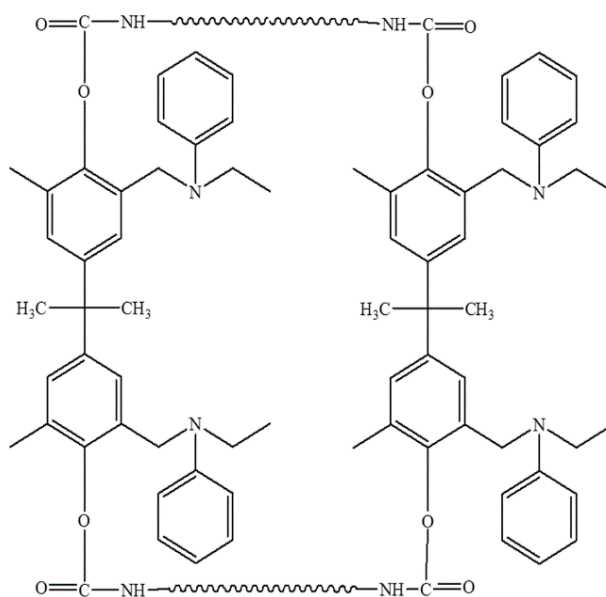


รูปที่ 2.7 การสังเคราะห์พอลิยูรีเทนจากโทลูอินไดไอโซไซยาเนตและพอลิโพรพิลีนพอลีออล

2.3.1.3 เบนซอกซาซีน-ยูรีเทนอัลลอยด์

การสังเคราะห์เบนซอกซาซีน-ยูรีเทนอัลลอยด์ เกิดขึ้นจากการบ่มความร้อน เมื่อวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของสารด้วยเทคนิคการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารในช่วงอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy : FTIR) ในระหว่างการบ่มความร้อนพบว่าวงเบนซีนของพอลิเบนซอกซาซีนถูกเปิดออกทำปฏิกิริยากับหมู่ไอโซไซยาเนต (-NCO) ของพอลิยูรีเทน และกลุ่มฟีนอลของพอลิเบนซอกซาซีนทำปฏิกิริยากับหมู่ไอโซไซยาเนต (-NCO) ของพอลิยูรีเทน ซึ่งโครงสร้างของเมทริกซ์เบนซอกซาซีน-ยูรีเทนอัลลอยด์ แสดงดังรูปที่ 2.8

ในงานวิจัยเลือกใช้เมทริกซ์จากเบนซอกซาซีน-ยูรีเทนอัลลอยด์ มาใช้ในการพัฒนาหมวกกันกระสุนเนื่องจากสมบัติของพอลิยูรีเทนที่มีความยืดหยุ่นสูง สามารถนำมาใช้ปรับปรุงสมบัติของพอลิเบนซอกซาซีนที่มีลักษณะแข็งเกร็งให้มีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นได้ อีกทั้ง Okhawilai และ Rimdusit [17] พบว่าการเติมพอลิยูรีเทนในพอลิเบนซอกซาซีนที่อัตราส่วนต่างๆมีผลต่อเมทริกซ์เบนซอกซาซีน-ยูรีเทนอัลลอยด์ พบว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) มีค่าเพิ่มขึ้น ($T_g > 200$ °C) เมื่อเพิ่มปริมาณพอลิยูรีเทนในระบบ อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของเบนซอกซาซีน-ยูรีเทนอัลลอยด์ ยังมีค่ามากกว่าพอลิเบนซอกซาซีน ($T_g = 165$ °C) และพอลิยูรีเทน ($T_g = -71$ °C) เองอีกด้วย ที่อัตราส่วน 80:20 โดยน้ำหนักของพอลิเบนซอกซาซีนและยูรีเทนเสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิดให้ค่าความเครียดแรงดัดโค้ง ณ ความเค้นสูงสุด และมีค่าการดูดซับพลังงานสูงสุดด้วย เมื่อพัฒนาเป็นแผ่นเกราะหลังหรือแผ่นดูดซับพลังงานที่ใช้เบนซอกซาซีน-ยูรีเทนอัลลอยด์ ที่อัตราส่วน 80:20 เป็นเมทริกซ์เรซิน เสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิดจำนวน 25 ชั้น สามารถป้องกันกระสุน 7.62 x 51 มม. ตามมาตรฐานเกราะกันกระสุน NIJ-0101.06 ระดับ 3 ได้ เมื่อใช้ร่วมกับแผ่นหน้าหรือแผ่นปะทะที่ใช้พอลิเบนซอกซาซีนเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิด E ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจนำเบนซอกซาซีนอัลลอยด์ร่วมกับยูรีเทนในอัตราส่วน 80:20 มาใช้เป็นเมทริกซ์ของแผ่นคอมพอสิต และเสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิดเพื่อพัฒนาเป็นหมวกกันกระสุน



รูปที่ 2.8 โครงสร้างโมเลกุลของเบนซอกซาซีน-ยูรีเทนอัลลอยด์

2.3.2 วัสดุเสริมแรงในวัสดุคอมพอสิต

วัสดุเสริมแรงในวัสดุคอมพอสิตสามารถแบ่งตามลักษณะต่างๆ เช่น เส้นใย อนุภาค และ วัสดุเกร็ด อนุภาคเสริมแรงจะมีลักษณะเป็นเม็ดหรือผง ผังตัวอยู่ในเนื้อเมทริกซ์ การพัฒนาหมวกกันกระสุนนั้นมีหลักการในรับแรงเช่นเดียวกับเสื้อเกราะกันกระสุนในระดับเสื้อเกราะอ่อน ซึ่ง ณ ปัจจุบันหมวกกันกระสุนมีการใช้เส้นใยชนิดต่างๆเป็นส่วนประกอบ เส้นใยเสริมแรงที่ใช้ควรมีสมบัติที่ดีในการต้านแรงกระแทก มีความสามารถในการดูดซับพลังงานกระแทกสูง และสามารถกระจายพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นจากแรงปะทะได้ [15] เช่น เส้นใยพอลิเอธิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (UHMWPE) หรือชื่อทางการค้าคือ สเปกตรา (Spectra) และไดเนีมา (Dyneema) เส้นใยอะรามิด (Aramid fiber) หรือที่รู้จักในชื่อทางการค้าคือ ทวารอน (Twaron) และ เคพลาร์ (Kevlar) เป็นต้น

2.4

ตารางที่ 2.4 สมบัติของเส้นใยสมรรถนะสูงเปรียบเทียบกับโลหะ [44]

สมบัติ	โลหะ (Steel)	เส้นใยพอลิเอธิลีนน้ำหนัก โมเลกุลสูงยิ่งยวด (UHMWPE)	เส้นใยอะรามิด (Aramid fiber)
ความหนาแน่น (g/cm ³)	~7.75	0.97	1.44
ความแข็งแรง ภายใต้แรงดึง Tensile strength (GPa)	~2	2.5-3.7	3.0-3.4
ค่ามอดูลัสแรงดึง Tensile modulus (GPa)	~200	70-133	70-185

2.3.2.1 เส้นใยอะรามิด (Aramid fiber)

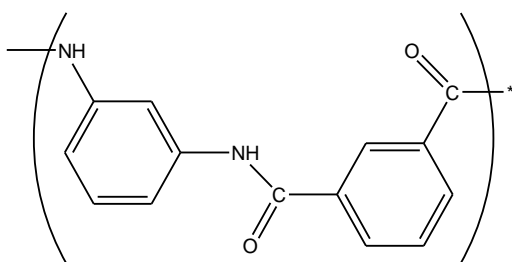
สำหรับเส้นใยอะรามิดนั้นเป็นเส้นใยสังเคราะห์ที่มีความหนาแน่นต่ำ ความแข็งแรงสูง ทนต่อการกระแทกได้ดี ทนต่อสารเคมีและทนความร้อนได้ดี ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. เส้นใยชนิดเมตาอะรามิด (*meta*-Aramid)

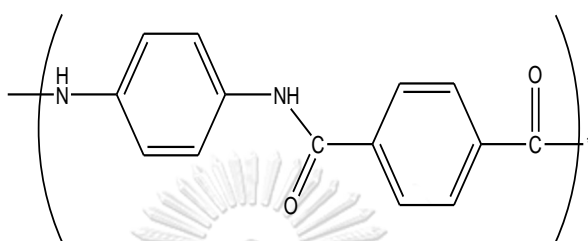
เส้นใยที่มีสมบัติความเหนียวปานกลาง เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี มีค่ามอดูลัสต่ำแต่มีความสามารถในการทนความร้อนได้สูงถึง 600-800°C จึงมักใช้ผลิตเป็นเสื้อผ้าทนความร้อน มีโครงสร้าง ดังรูปที่ 2.9 (ก)

2. เส้นใยชนิดพาราอะรามิด (*para*-Aramid)

เส้นใยชนิดนี้มีความแข็งแรงสูง ค่ามอดูลัสสูง ทนความร้อนได้ดี การจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลในเส้นใยชนิดพาราอะรามิด แสดงดังรูปที่ 2.9 (ข) ซึ่งนิยมนำมาใช้ผลิตเป็นเสื้อเกราะกันกระสุน โดยใช้เป็นเส้นใยเสริมแรงในวัสดุคอมพอสิตร่วมกับเมทริกซ์หลายชนิด



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของ (ก) เมตาอะรามิด (ข) พาราอะรามิด

เส้นใยอะรามิด (Aramid fiber) หรือที่รู้จักในชื่อทางการค้าคือ ทวารอน (Twaron) และเคพลาร์ (Kevlar) ซึ่งเส้นใยเคพลาร์นั้นมีหลากหลายระดับด้วยกัน การนำไปใช้งานของเส้นใยเคพลาร์แต่ละระดับจะต่างกันด้วย [45] โดยสมบัติของเคพลาร์ระดับต่างๆแสดงดังตารางที่ 2.5 ดังนี้

- เคพลาร์ 29 (K29) นิยมใช้ทำเสื้อเกราะกันกระสุน เชือก และสายเคเบิลรับน้ำหนัก หมวกกันกระสุน
- เคพลาร์ 49 (K49) นิยมใช้เพิ่มความแข็งแรงกับชิ้นส่วนอากาศยาน เชือก อุปกรณ์กีฬา
- เคพลาร์ 119 (K119) มีสมบัติความทนทานสูง ใช้เสริมความแข็งแรงใน ยางรถยนต์และสายพาน
- เคพลาร์ 129 (K129) มีความแข็งแรงภายใต้แรงดึงสูง ใช้ทำเชือก เสื้อเกราะกันกระสุน ยางรถยนต์
- เคพลาร์ 149 (K149) มีค่ามอดูลัส สูงเป็นพิเศษ ใช้ทำเชือก และสายเคเบิล

ตารางที่ 2.5 สมบัติของเส้นใยเคฟลาร์อะรามิดระดับต่างๆ [46]

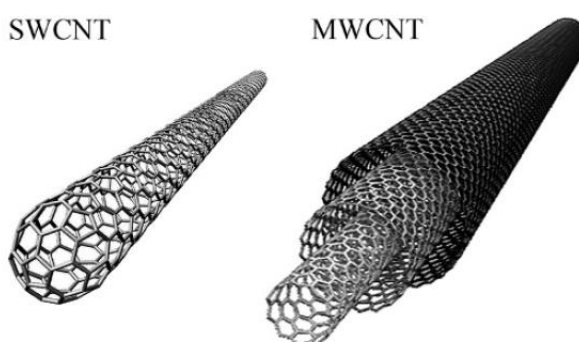
สมบัติ	K29	K49	K119	K129	K149
ความหนาแน่น (g/cm ³)	1.44	1.45	1.44	1.45	1.47
ความแข็งแรงภายใต้แรงดึง Tensile strength (GPa)	2.8	2.8	3.0	3.4	2.4
การยืดตัว Elongation (%)	3.5-4.0	2.8	4.4	3.3	1.5-1.9
ค่ามอดูลัสแรงดึง Tensile modulus (GPa)	65	125	55	100	47
การดูดซึมความชื้น Moisture absorption (%) 25 °C, 65% RH	6	4.3	-	-	1.5

2.3.2.1 อนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์

นอกจากวัสดุคอมพอสิต์ที่เกิดจากพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยสมรรถนะสูง จะนิยมนำมาพัฒนาเป็นวัสดุในการผลิตหมวกกันกระสุนเนื่องจากการเพิ่มกลไกการรับแรงกระแทกและสลายพลังงานปะทะแบบซีปนยะแล้ว การดัดแปลงพอลิเมอร์เมทริกซ์โดยการเติมอนุภาคในระดับนาโนพบว่าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการรับแรงกระแทกหรือป้องกันการเจาะทะลุของกระสุนได้เพิ่มขึ้นอีกด้วย ตัวอย่างอนุภาคที่เติมที่มีรายงานการใช้งานเพื่อเพิ่มสมบัติการรับแรงกระแทกดังกล่าว เช่น อนุภาคนาโนเคลย์ [47, 48] อนุภาคนาโนซิลิกา [49-51] อนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ [52] อนุภาคยางนาโน [53] และอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ [25, 54] เป็นต้น

อนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1991 โดย Dr. Sumio Iijima เป็นวัสดุสังเคราะห์ขนาดนาโนที่เกิดจากแผ่นแกรฟีนม้วนตัวขึ้นเป็นทรงกระบอก ซึ่งอะตอมของคาร์บอนจะเรียงต่อกันเป็นรูปร่างหกเหลี่ยม (Hexagonal) เชื่อมต่อระหว่างอะตอมด้วยพันธะโคเวเลนต์ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามจำนวนชั้นของแผ่นแกรฟีนที่ม้วนตัว ได้แก่ แบบผนังชั้นเดียว (Single-wall carbon nanotubes, SWCNTs) ที่มีแผ่นแกรฟีนม้วนตัวขึ้นเพียงชั้นเดียวเป็นท่อปิด และแบบผนังหลายชั้น (Multiwall carbon nanotubes, MWCNTs) ที่ประกอบด้วยแผ่นแกรฟีนม้วนตัวขึ้นเป็นท่อหลายชั้นซ้อนกัน ดังรูปที่ 2.10 อนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์มีค่าอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio) มีค่าสูงมาก เนื่องจากความยาวของคาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถยาวได้ถึง

ระดับมิลลิเมตร ในขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 1-100 นาโนเมตร [55] ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ อนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์เนื่องจากอะตอมของคาร์บอนที่จัดเรียงตัวกันทำให้เกิดสมบัติพิเศษที่ดีหลายประการ มีความแข็งแรงที่สูง น้ำหนักเบา และมีความยืดหยุ่นสูงซึ่งสามารถดูดกลืนพลังงานจลน์ได้เป็นจำนวนมาก มีสมบัติดังแสดงในตารางที่ 2.6



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ แบบผนังชั้นเดียว (SWCNT) และผนังหลายชั้น (MWCNT)

ตารางที่ 2.6 แสดงสมบัติของอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ [55]

สมบัติ	SWCNT	MWCNT
มอดูลัสความยืดหยุ่น Elastic modulus (TPa)	0.32-1.47	0.27-0.95
ความแข็งแรงทางกล Mechanical strength (GPa)	10-52	11-63
ค่าความถ่วงจำเพาะ Specific gravity	0.8	1.8
การนำไฟฟ้า Electrical conductivity (S/m)	10^2-10^6	10^3-10^5

ตารางที่ 2.6 แสดงสมบัติของอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ (ต่อ) [55]

สมบัติ	SWCNT	MWCNT
การนำความร้อน Thermal conductivity (W/m.K)	6×10^3	2×10^3

2.4 การจำลองด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

การจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นการคำนวณทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ นับว่าเป็นวิธีที่มีประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่น ลดต้นทุนและลดเวลาที่ใช้ในขั้นตอนการทำวิจัย โดยมีรายงานการวิจัยที่ได้ใช้โปรแกรมเข้ามาช่วยวิเคราะห์ข้อมูลที่เกี่ยวกับแรงปะทะทางซีปนะ ได้แก่ โปรแกรม ABAQUS, LS-DYNA และ ANSYS-AUTODYN

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นกระบวนการเชิงตัวเลขเพื่อหาผลลัพธ์โดยประมาณ (Approximate solution) สำหรับปัญหาที่ประกอบไปด้วย 3 องค์ประกอบหลัก ซึ่งก็คือสมการเชิงอนุพันธ์ เงื่อนไขขอบเขต และรูปร่างของปัญหาได้โดยครบบถ้วน แนวคิดหลักของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คือการแบ่งโดเมน (Domain) ของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ (Element) ย่อยๆ จากนั้นสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์จากสมการเชิงอนุพันธ์สำหรับเอลิเมนต์เหล่านี้ ก่อนนำสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของทุกเอลิเมนต์มารวมกันเข้าเพื่อก่อให้เกิดระบบสมการขนาดใหญ่ แล้วจึงประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตลงบนระบบสมการใหญ่เพื่อแก้หาผลลัพธ์ โดยขั้นตอนในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เริ่มจากการสร้างโดเมนรูปร่างของปัญหา ซอร์ฟแวร์ส่วนใหญ่มีวิธีการสร้างรูปทรงเรขาคณิตที่มักมีขั้นตอนจำเพาะในตัวเอง จากนั้นซอร์ฟแวร์จะแบ่งโดเมนรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ เหล่านี้ต่อกันที่จุดต่อ (Node) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะหาตัวไม่รู้ค่า (Unknown)

ขั้นตอนที่ 2 เอลิเมนต์ย่อยๆ ที่เกิดขึ้นอาจเป็นรูปสามเหลี่ยม (Triangular element) หรือสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า (Quadrilateral element) หากเป็น 2 มิติ ส่วนโดเมนในปัญหา 3 มิติอาจแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์ทรงตันย่อยๆ เช่นรูปทรงสี่หน้า (Tetrahedral element) และเอลิเมนต์ทรงหกหน้า (Hexahedral element)

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณสมการไฟไนต์เอลิเมนต์จากสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้น ขั้นตอนนี้เกี่ยวข้องกับกระบวนการทางคณิตศาสตร์

ขั้นตอนที่ 4 นำสมการไฟไนต์เอลิเมนต์มารวมกันขึ้นเป็นระบบสมการ

ขั้นตอนที่ 5 ประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตของปัญหาเข้ากับระบบสมการแล้วแก้ปัญหาเพื่อหาผลลัพธ์ที่จุดต่อต่างๆ ขั้นตอนนี้ใช้เวลาในการคำนวณมาก

ขั้นตอนที่ 6 เมื่อได้ผลลัพธ์ที่จุดต่อจากขั้นตอนที่ 5 แล้ว ค่าอื่นๆจึงสามารถหาตามมาได้ เช่น เมื่อได้ค่าการเสียรูปที่จุดต่อต่างๆของโครงสร้างแล้ว ก็สามารถคำนวณหาค่าความเครียด (Strain) ความเค้น (Stresses) ที่เกิดขึ้นได้ตามลำดับ

2.4.1 สมการสถานะที่เกี่ยวข้อง

สมการสถานะ Mie-Gruneisen (Shock EOS)

ความแม่นยำในการอธิบายปรากฏการณ์คลื่นกระแทกที่เกิดขึ้นถือเป็นสิ่งสำคัญในการสร้างการจำลองการกระแทก สมการสถานะของ Mie-Gruneisen เหมาะสำหรับสถานะที่เกิดอัตราความเครียดสูง (High-strain rate) หรือในกรณีที่เกิดแรงกระแทกสูงจนก่อให้เกิดแรงอัดขนาดใหญ่ โดยการเกิดคลื่นกระแทกผ่านวัสดุจะทำให้เกิดแรงอัดในช่วงเวลาหนึ่ง

สมการของ Mie-Gruneisen เรียกอีกอย่างว่า Shock EOS ให้คำนิยามการเปลี่ยนแปลงความดันและการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในจำเพาะที่ปริมาตรคงที่ เรียกว่าสัมประสิทธิ์ของ Gruneisen (Γ)

$$\Gamma = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\delta p}{\delta e} \right)_v \quad (3)$$

เมื่ออินทิเกรตสมการที่ (3) จะได้ความแตกต่างของของความดันและพลังงานภายในที่สถานะหนึ่งและสถานะอ้างอิง (ที่ 0 องศาเคลวิน) ดังสมการที่ (4) คือสมการสถานะของ Mie-Gruneisen

$$p = p_{ref} + \Gamma \rho (e - e_{ref}) \quad (4)$$

อ้างอิงกราฟความสัมพันธ์ของ Hugoniot [56] สามารถหาค่าความดันและพลังงานภายในจำเพาะที่สถานะอ้างอิงในสมการที่ (4) สรุปดังสมการที่ (5)

$$p = \frac{\rho_0 C_1^2 \eta}{(1 - \eta S_1)^2} \left(1 - \frac{\eta \Gamma_0}{2} \right) + \Gamma_0 \rho_0 e \quad (5)$$

เมื่อ ρ_0 คือ ความหนาแน่นวัสดุเริ่มต้น (g/cm^3)

C_1 คือ ความเร็วเสียงของวัสดุ (cm/ μ s)

Γ_0 คือ สัมประสิทธิ์ของ Gruneisen หาค่าได้จาก $\Gamma_0 = 2S_1 - 1$

e คือ พลังงานภายในจำเพาะ

η คือ ความเครียดแรงกดเชิงปริมาตร ซึ่ง $\eta = 1 - \left(\frac{\rho_0}{\rho} \right)$

สมการสภาวะออร์โททรอปิก (Orthotropic EOS) สำหรับวัสดุคอมพอสิต

วัสดุที่มีสมบัติแบบออร์โททรอปิก (Orthotropic material) คือวัสดุที่มีสมบัติขึ้นอยู่กับแนวแกนทั้ง 3 ทิศทาง สามารถอธิบายเป็นความสัมพันธ์ของแรงความเค้น (Total stresses, σ_{ij}) และแรงความเครียด (Total strain, ϵ_{ij}) ผ่านเมทริกซ์ความแข็งเกร็ง (Stiffness matrix, C_{ij}) ได้ดังสมการที่ (8) ซึ่งเมทริกซ์ความแข็งเกร็งจะสัมพันธ์กับค่าคงที่ของสมบัติความยืดหยุ่นของวัสดุ [57] เช่น ค่ามอดูลัสของ (Young's modulus, E_{ii}) ค่ามอดูลัสเฉือน (Shear modulus, G) และค่าอัตราส่วนปัวซองส์ (Poisson's ratio, ν) ดังสมการที่ (9)

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} \\ \epsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{11}} & \frac{-\nu_{12}}{E_{22}} & \frac{-\nu_{31}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{12}}{E_{22}} & \frac{1}{E_{22}} & \frac{-\nu_{23}}{E_{22}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{31}}{E_{33}} & \frac{-\nu_{23}}{E_{22}} & \frac{1}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{23}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{31}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

เมื่อแรงความเครียด ε_{ij} เป็นผลรวมของค่าความเครียดเฉลี่ย (Average strain, ε_{avg}) และความเครียดเบี่ยงเบน (Deviatoric strain, ε_{ij}^d) ตามสมการที่ (10) ซึ่งความเครียดเฉลี่ย (Average strain, ε_{avg}) เป็นค่าเฉลี่ยของความเครียดในแนวแกนหลัก และสัมพันธ์กับความเครียดเชิงปริมาตร (Volumetric strain, ε_{vol}) ตามสมการที่ (11)

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{avg} + \varepsilon_{ij}^d \quad (10)$$

$$\varepsilon_{avg} = \frac{1}{3}(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) = \frac{1}{3}\varepsilon_{vol} \quad (11)$$

เมื่อแทนสมการที่ (10) และ (11) และกระจายเมทริกซ์ในสมการที่ (8) จะได้แรงเค้นในแนวแกนหลัก ดังนี้

$$\sigma_{11} = \frac{1}{3}(C_{11} + C_{12} + C_{13})\varepsilon_{vol} + C_{11}\varepsilon_{11}^d + C_{12}\varepsilon_{22}^d + C_{13}\varepsilon_{33}^d \quad (12ก)$$

$$\sigma_{22} = \frac{1}{3}(C_{21} + C_{22} + C_{23})\varepsilon_{vol} + C_{21}\varepsilon_{11}^d + C_{22}\varepsilon_{22}^d + C_{23}\varepsilon_{33}^d \quad (12ข)$$

$$\sigma_{33} = \frac{1}{3}(C_{31} + C_{32} + C_{33})\varepsilon_{vol} + C_{31}\varepsilon_{11}^d + C_{32}\varepsilon_{22}^d + C_{33}\varepsilon_{33}^d \quad (12ค)$$

สามารถหาค่าความดันได้ เมื่อนิยามความดัน คือ ค่าเฉลี่ยของแรงเค้นที่กระทำในแนวแกนหลักในทิศตรงกันข้าม ตามสมการที่ (13) จะสามารถหาค่าความดันที่สัมพันธ์กับความเครียดเบี่ยงเบนและความเครียดเชิงปริมาตรได้ โดยการแทนสมการที่ (12) ในสมการที่ (13) จะได้สมการความดัน ดังสมการที่ (14)

$$P = -\frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) \quad (13)$$

$$P = -\frac{1}{9}[C_{11} + C_{22} + C_{33} + 2(C_{12} + C_{23} + C_{31})]\varepsilon_{vol} - \frac{1}{3}[C_{11} + C_{12} + C_{13}]\varepsilon_{11}^d - \frac{1}{3}[C_{21} + C_{22} + C_{23}]\varepsilon_{22}^d - \frac{1}{3}[C_{31} + C_{32} + C_{33}]\varepsilon_{33}^d \quad (14)$$

สำหรับวัสดุที่มีสมบัติแบบอโรโทรปิก พจน์แรกของสมการที่ (14) สามารถแทนค่าได้ด้วยสมการที่ (4) คือสมการสถานะของ Mie-Gruneisen จะได้ค่าความดัน ตามสมการที่ (15)

$$P = p_{ref} + \Gamma \rho (e - e_{ref}) - \frac{1}{3} [C_{11} + C_{12} + C_{13}] \varepsilon_{11}^d - \frac{1}{3} [C_{21} + C_{22} + C_{23}] \varepsilon_{22}^d - \frac{1}{3} [C_{31} + C_{32} + C_{33}] \varepsilon_{33}^d \quad (15)$$

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วัสดุในการผลิตหมวกกันกระสุนมีลักษณะเช่นเดียวกับเกราะอ่อนหรือแผ่นหลังของเกราะกันกระสุน โดยปกติเส้นใยพื้นฐานในการผลิตวัสดุคอมโพสิตเป็นหมวกกันกระสุนมักเป็นเส้นใยอะรามิด โดยมีงานวิจัยของ Okhawilai และ Rimdusit [17] ที่ได้ศึกษาแผ่นเกราะหลังหรือเกราะอ่อนกันกระสุน ซึ่งใช้เบนซอกซาซีน-ยูรีเทนอัลลอยด์ เป็นเมทริกซ์เรซิน ปรับปรุงเมทริกซ์เรซินด้วยการปรับอัตราส่วนของยูรีเทนในเบนซอกซาซีนอัลลอยด์ที่ 0-40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิด ผลการทดลองพบว่าที่อัตราส่วนพอลิเบนซอกซาซีนและพอลิยูรีเทน 80:20 ตามลำดับ ประกอบกับใช้จำนวนเส้นใยอะรามิด 30 และ 50 ชั้น สามารถต้านทานแรงปะทะทางซีปะนาระดับ 3A และ 3 ตามมาตรฐาน NIJ ได้ [24] โดยการเติมพอลิยูรีเทน 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีผลทำให้วัสดุคอมโพสิตนี้ต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนได้เมื่อเทียบกับระบบที่ไม่เติมพอลิยูรีเทน มีเพียงเบนซอกซาซีนเสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิดเพียงอย่างเดียว ที่เกิดการเจาะทะลุขึ้นเมื่อทดสอบในระดับเดียวกัน และผลการทดสอบวัดสมบัติด้านความยืดหยุ่นของระบบเบนซอกซาซีน-ยูรีเทนอัลลอยด์ที่อัตราส่วนพอลิยูรีเทนต่างๆเสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิด แสดงดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ผลการทดสอบสมบัติด้านความยืดหยุ่นของระบบเบนซอกซาซีน-ยูรีเทนอัลลอยด์เสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิด

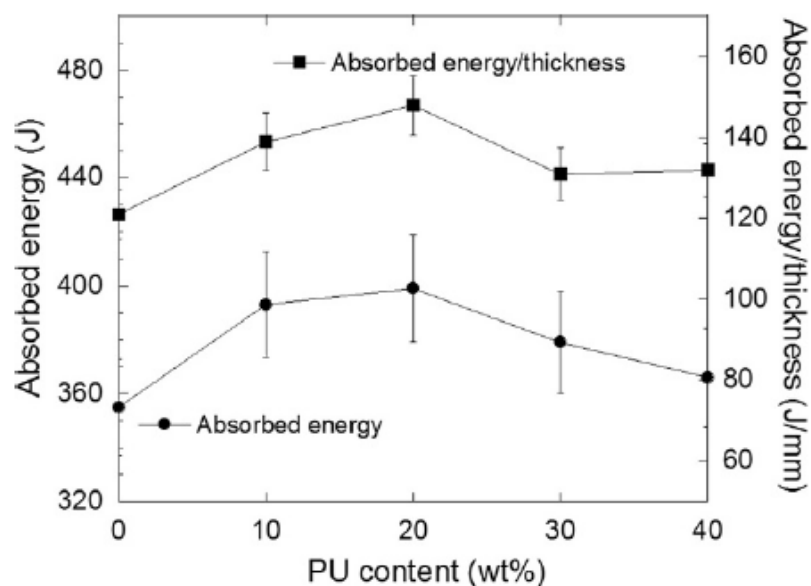
อัตราส่วนพอลิเบนซอกซาซีน/พอลิยูรีเทน เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิด	ความแข็งแรง ภายใต้แรงดัด โค้ง (MPa)	มอดูลัส การดัดโค้ง (GPa)	ความเครียดแรงดัด โค้ง ณ ความเค้น สูงสุด (%)
100/0	153±12	22±1	1.26±0.10
90/10	127±8	17±1	1.27±0.10
80/20	104±10	15±2	1.35±0.17
70/30	95±10	14±1	1.19±0.15
60/40	74±10	12±1	0.87±0.10

จากผลการทดสอบสมบัติด้านความยืดหยุ่นพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนพอลิยูรีเทนในระบบ ส่งผลให้ความแข็งแรงภายใต้แรงดัดโค้งและค่ามอดูลัสการดัดโค้งมีค่าลดลง และมีค่าสูงสุดที่ 0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของพอลิยูรีเทน แสดงให้เห็นว่าการเติมพอลิยูรีเทนที่มีความยืดหยุ่นลงในพอลิเบนซอกซาซีนที่มีความแข็งแรงสูงนั้น ทำให้ลดความแข็งแรงภายใต้แรงดัดโค้งและค่ามอดูลัสการดัดโค้ง และโครงสร้างมีความสามารถในการต้านทานการเสียรูป และการโก่งตัวของวัสดุมากขึ้น เนื่องจากค่าความเครียดแรงดัดโค้ง ณ ความเค้นสูงสุดเมื่อเติมพอลิยูรีเทน 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีค่าสูงสุดด้วย

นอกจากนี้ยังหาค่าการดูดซับพลังงานของการเติมพอลิยูรีเทนอัตราส่วนต่างๆในระบบ เบนซอกซาซีน-ยูรีเทนอัลลอยด์ โดยการใช้ชิ้นงานขนาด 150x150 มิลลิเมตร มีจำนวนชั้นเส้นใยอะรามิต 8 ชั้นเพื่อทำให้เกิดการทะลุอย่างสมบูรณ์ของชิ้นงานและหาค่าความเร็วกระสุนหลังปะทะชิ้นงานได้ ทดสอบด้วยกระสุน 0.44 Magnum SJHP ที่มีความเร็ว 428 เมตรต่อวินาที ดังรูปที่ 2.11 ตามมาตรฐาน NIJ ในระดับที่ 3A มีระยะยิง 5 เมตรจากปากกระบอกปืน ความเร็วกระสุนก่อนปะทะชิ้นงานจะถูกบันทึกด้วยเครื่อง Chronograph ผลการทดสอบค่าการดูดซับพลังงาน พบว่าที่อัตราส่วนพอลิเบนซอกซาซีน-ยูรีเทน 80:20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ ให้ค่าการดูดซับพลังงานและค่าการดูดซับพลังงานต่อความหนาสูงสุดคือ 399 ± 14 จูล และ 148 ± 5 จูลต่อมิลลิเมตร ตามลำดับ รองลงมาพบว่าที่อัตราส่วน 90:10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้ค่าการดูดซับพลังงานและค่าการดูดซับพลังงานต่อความหนา เท่ากับ 393 ± 14 จูล 139 ± 15 จูลต่อมิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 2.12 เนื่องจากที่อัตราส่วนเบนซอกซาซีน-ยูรีเทนอัลลอยด์ 80:20 ตามลำดับ มีความเหมาะสมของแรงยึดติดระหว่างเรซินและเส้นใยอะรามิตทำให้เกิดการโค้งงอ และกระจายแรงภายในชิ้นงานได้ดี ส่งผลให้กลไกการดูดซับพลังงานมีค่าสูงสุด



รูปที่ 2.11 กระสุน 0.44 Magnum SJHP

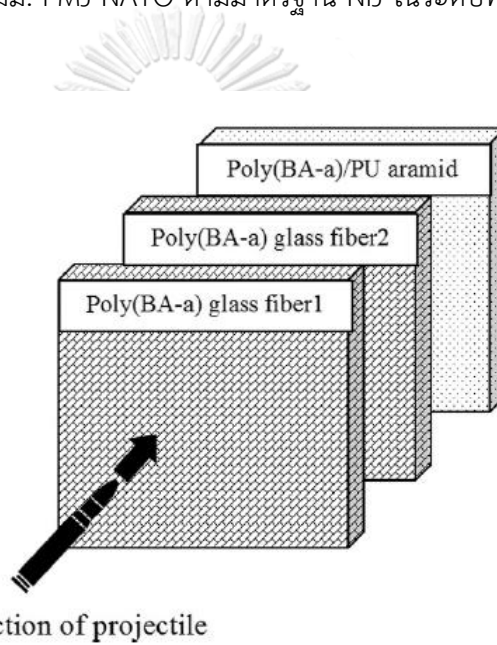


รูปที่ 2.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับพลังงานและค่าการดูดซับพลังงานต่อความหนา กับอัตราส่วนพอลิยูรีเทนโดยน้ำหนัก

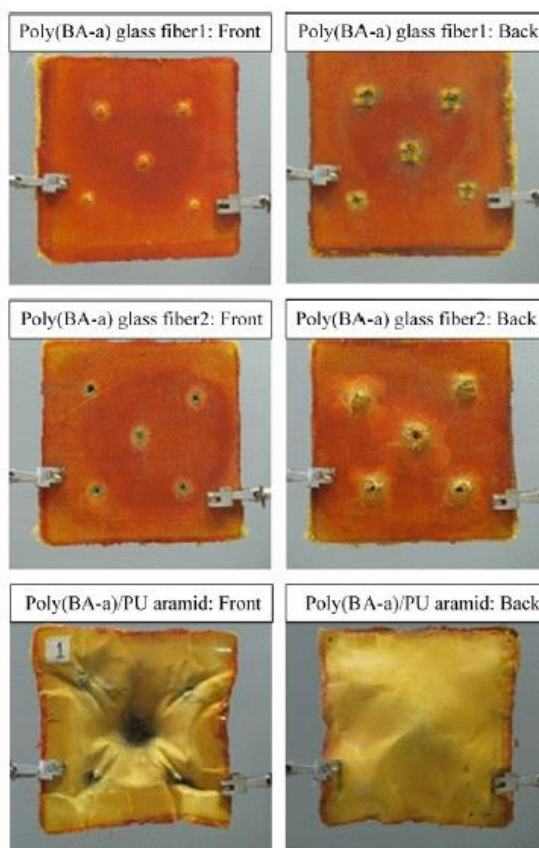
ต่อมาได้ทำการทดสอบตามมาตรฐานในระดับที่สูงขึ้นคือ NIJ ระดับ 3 ที่ทดสอบด้วยกระสุน 7.62x51 มม. FMJ NATO แสดงดังรูปที่ 2.13 บนแผ่นคอมพอสิตขนาด 150x150 มิลลิเมตร ที่ประกอบไปด้วยแผ่นหน้าหรือแผ่นปะทะมีหน้าที่ทำลายหัวกระสุนจำนวน 2 แผ่น จากพอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วชนิด E แผ่นละ 25 ชั้น และแผ่นหลังที่เป็นแผ่นดูดซับพลังงานจากเบนซอกซาซิน-ยูรีเทนอัลลอยด์ เสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิด จำนวน 25 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.14 พบว่าสามารถต้านทานกระสุน 7.62x51 มม. ได้ กระสุนเจาะทะลุเพียงแผ่นหน้าไม่ทะลุมาถึงแผ่นหลัง และแผ่นหลังเกิดการเสียรูปจากแรงที่กระสุนกระทำเส้นใยหลัก (Primary yarns) และเส้นใยรอง (Secondary yarns) เกิดเป็นการเสียรูปมีลักษณะคล้ายทรงกรวยเกิดขึ้นบริเวณหลังแผ่นคอมพอสิต แสดงดังรูปที่ 2.15 ซึ่งปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นถือเป็นกลไกการดูดซับพลังงานอย่างหนึ่ง



รูปที่ 2.13 กระสุน 7.62X51 มม. FMJ NATO ตามมาตรฐาน NIJ ในระดับที่ 3



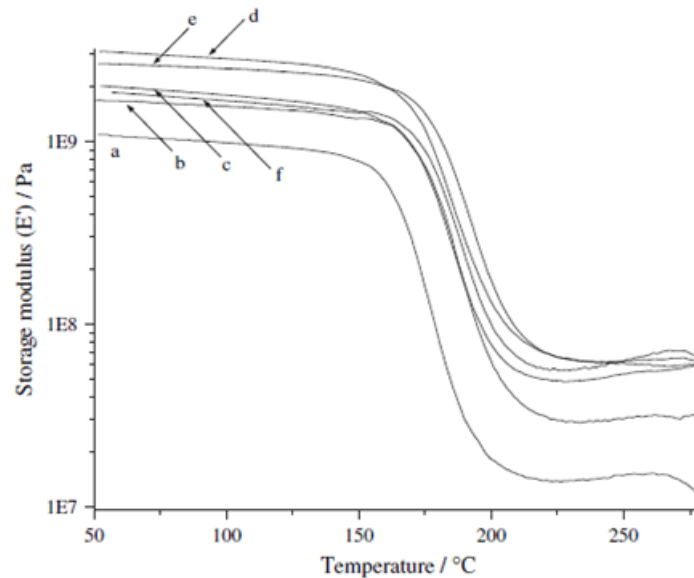
รูปที่ 2.14 การเรียงตัวของแผ่นปะทะจำนวน 2 แผ่นจากพอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว และแผ่นดูดซับพลังงานจากเบนซอกซาซิน-ยูรีเทนอัลลอยด์ เสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิด



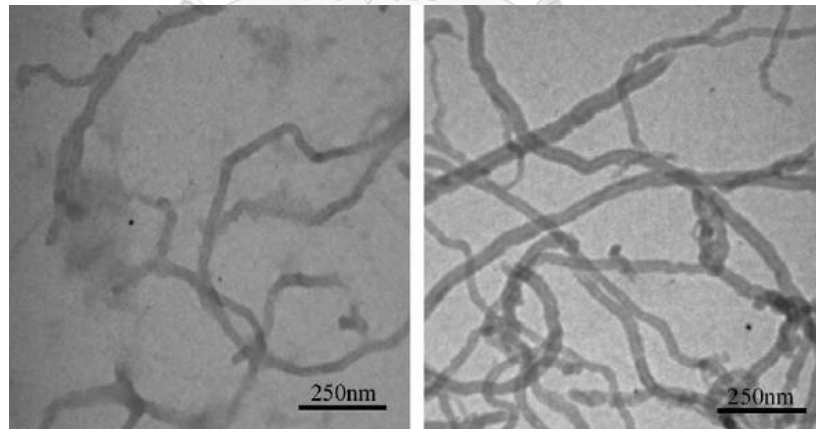
รูปที่ 2.15 ภาพชิ้นงานทดสอบยิงด้วยกระสุน 7.62x51 มม. FMJ NATO ตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3

งานวิจัยของ Qiao Chen และคณะ (2006) [26] ได้ศึกษาสมบัติของพอลิเบนซอกซาซินเมื่อเติมอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้น (MWCNT) ที่อัตราส่วน 0, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ จากการทดสอบด้วยเครื่อง Dynamic mechanical analysis (DMA) พบว่าการเติมคาร์บอนนาโนทิวบ์มีผลต่อค่ามอดูลัสสะสม (Storage modulus, E') ของพอลิเบนซอกซาซินให้มามีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยที่อัตราส่วนการเติมคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าค่ามอดูลัสสะสมของนาโนคอมโพสิตที่อุณหภูมิ 50 °C มีค่าสูงสุดคือ 3.11 GPa ซึ่งมีค่าสูงกว่าระบบที่ไม่เติมอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่มีค่ามอดูลัสสะสม 1.09 GPa แสดงดังรูปที่ 2.16 เนื่องจากชั้นพอลิเบนซอกซาซินที่อยู่รอบๆอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ถูกจำกัดการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุล ส่งผลให้ค่ามอดูลัสสะสมของนาโนคอมโพสิตมีค่าสูงขึ้นหรือมีความแข็งแรงมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการเติมอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่มากเกินไปอาจทำให้เกิด การเกี่ยวพันกันของอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ การจับเป็นกลุ่มก้อนภายในเนื้อเมทริกซ์แสดงดังรูปที่ 2.17 ที่ได้จากการ

วิเคราะห์ด้วยเครื่อง TEM จึงเป็นผลทำให้ค่ามอดูลัสสะสมมีค่าลดลงที่การเติมอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์มากกว่า 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



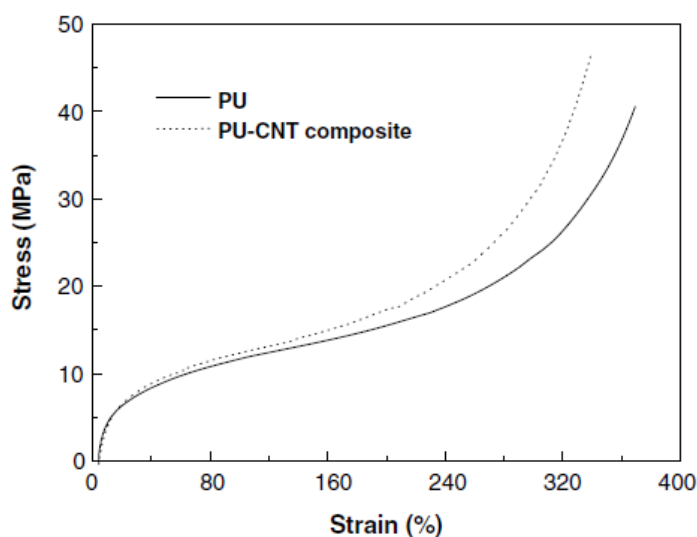
รูปที่ 2.16 ผลจากการเติม MWCNT ต่อค่ามอดูลัสสะสม (E') ของนาโนคอมโพสิต โดย (a) 0, (b) 0.2 wt%, (c) 0.5 wt%, (d) 1 wt%, (e) 1.5 wt%, และ (f) 2.0 wt%



รูปที่ 2.17 ภาพการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TEM ของพอลิเบนซอกซาซีนที่เติมด้วยอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่อัตราส่วน (ก) 1.0 wt% (ข) 2.0 wt%

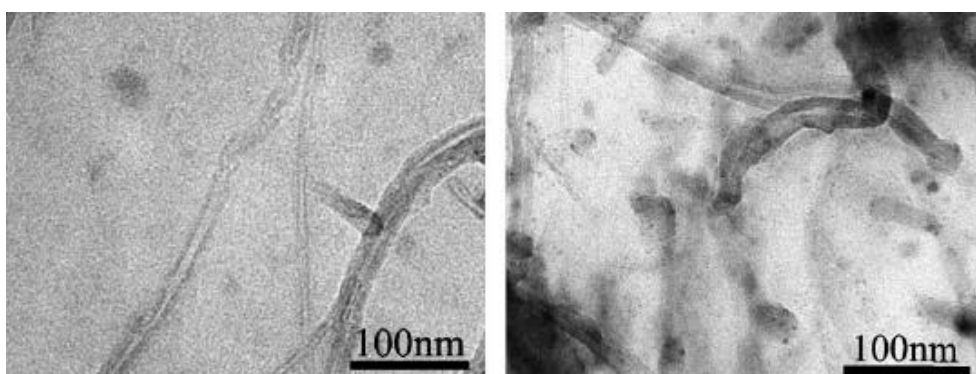
งานวิจัยของ Jiawen Xiong และคณะ (2006) [27] ที่ศึกษาสมบัติของคอมโพสิตระหว่างพอลิยูรีเทนและอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ เมื่อเติมอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากรูปที่ 2.18 แสดงให้เห็นว่าที่ความเครียด (Strain) เดียวกันจะพบว่าระบบที่มีการเติม

อนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์มีความเค้น (Stress) สูงกว่า บ่งบอกถึงค่ามอดูลัสหรือความสามารถในการทรงรูปของคอมพอสิตถูกปรับปรุงให้สูงขึ้นโดยการเติมอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ อีกทั้งค่าความแข็งแรง ณ จุดแตกหัก (Strength at break) ของระบบพอลิยูรีเทนที่เติมอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์มีค่าสูงกว่าระบบที่ไม่เติมอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ แต่พบว่าค่าการยืดตัว ณ จุดแตกหัก (Elongation at break) มีค่าลดลง อาจเกิดจากการกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ไม่สม่ำเสมอบนเนื้อเมทริกซ์ ดังรูปที่ 2.19 ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TEM



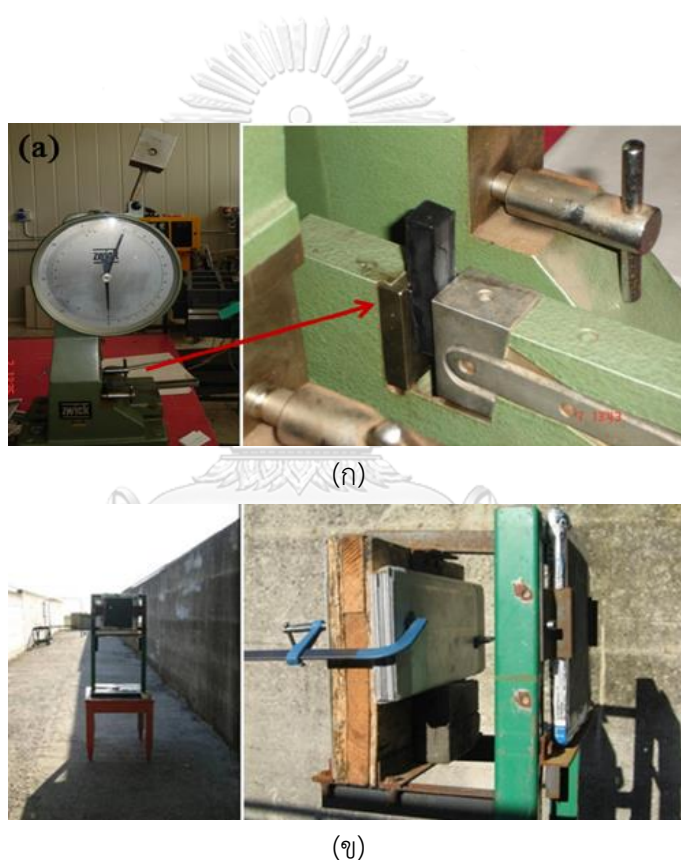
รูปที่ 2.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของพอลิยูรีเทนและพอลิยูรีเทนคอมพอสิตที่เติมอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 2.19 ภาพการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TEM ของพอลิยูรีเทนที่เติมด้วยอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ (ก) ความเข้มข้นต่ำ (ข) ความเข้มข้นสูง

นอกจากนี้ยังได้มีงานวิจัยของ Laurenzi S. และคณะ (2013) [25] ที่ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาวัสดุนาโนคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้น (MWCNT) ที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักที่แตกต่างกันในอีพอกซีเรซิน ได้แก่ 0, 0.1, 0.5 และ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยศึกษาความสามารถในการดูดซับพลังงานทั้งในช่วงพลังงานกระแทกต่ำด้วยการทดสอบแบบ Charpy impact test และทดสอบด้วยอาวุธปืนที่ยิงด้วยความเร็วสูงในรูปของแผ่นคอมพอสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยเคพลาร์ชนิด 29 การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน UNI EN 1063 European standard โดยใช้กระสุน NATO ความเร็วกระสุนถูกวัดที่ระยะ 2.5 เมตร จากปากกระบอกปืน ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 (ก) การทดสอบชิ้นงานคอมพอสิตด้วยวิธี Charpy impact test (ข) อุปกรณ์การทดสอบยิงด้วยอาวุธปืนที่ยิงด้วยความเร็วสูงบนชิ้นงานคอมพอสิตแผ่นตรงที่เสริมแรงด้วยเส้นใยเคพลาร์ชนิด 29

ผลการทดสอบในช่วงพลังงานกระแทกต่ำ ด้วยวิธี Charpy impact test บนชิ้นงานคอมพอสิต ระหว่างอีพอกซีเรซินที่เติมด้วยอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์พบว่าการเติมอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สัดส่วนต่างๆกันส่งผลต่อค่าความแข็งแรงภายใต้แรงกระแทก (Impact strength) โดยมี

ค่าสูงสุดคือ 0.3 ± 0.02 kJ/m² ที่การเติมอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และค่าความแข็งแรงภายใต้แรงกระแทกลดลงเมื่อเติมอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 แสดงผลการทดสอบในช่วงพลังงานกระแทกต่ำ ด้วยวิธี Charpy impact test

สัดส่วนการเติมอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ (wt%)	ความแข็งแรงภายใต้แรงกระแทก Impact strength (kJ/m ²)
0.0	0.25 ± 0.04
0.1	0.28 ± 0.02
0.5	0.30 ± 0.02
1.0	0.19 ± 0.05

จากผลการทดสอบ Charpy impact test จึงเลือกใช้สัดส่วนการเติมอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อขึ้นรูปชิ้นงานคอมพอสิตแผ่นตรงเสริมแรงด้วยเส้นใยเคฟลาร์ 29 ซึ่งจะทดสอบด้วยอาวุธปืนที่ยิงด้วยกระสุน NATO ตามมาตรฐาน UNI EN 1063 European standard ที่ความเร็วกระสุนทั้งหมด 3 ระดับ และตรวจวัดความลึกของชิ้นงานหลังยิง ซึ่งตามมาตรฐานนี้ต้องทดสอบการยิง 3 นัดต่อ 1 แผ่นทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ทดสอบยิงชิ้นงานแผ่นตรงจากอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยเคฟลาร์ 29 และเติมอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ 0.5 wt% ด้วยกระสุน NATO ภายใต้มาตรฐาน UNI EN 1063 European standard

ผลการทดสอบยิงแสดงดังตารางที่ 2.9 พบว่าเมื่อทดสอบด้วยพลังงานกระแทกที่ 4202 MJ แผ่นทดสอบที่เต็มและไม่เต็มอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไม่สามารถต้านทานแรงปะทะได้ โดยกระสุนเจาะแผ่นทดสอบทะลุมีรอยยุบตัวลึก 20 มิลลิเมตร และเมื่อทดสอบที่พลังงานกระแทก 1750 MJ พบว่าแผ่นทดสอบที่เต็มอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ลตรอยยุบตัวของกระสุนได้เมื่อเทียบกับแผ่นที่ไม่เต็ม จากรอยยุบตัว 4.8 มิลลิเมตร เป็น 1.2 มิลลิเมตร เมื่อทดสอบที่ค่าพลังงานกระแทกต่ำสุด พบว่าทั้งเต็มและไม่เต็มอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สามารถป้องกันกระสุนได้ โดยที่ชิ้นงานที่เต็มอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถป้องกันการทะลุของกระสุนโดยใช้เพียง 9-10 ชั้น เท่านั้น โดยชิ้นงานที่ไม่เต็มอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ป้องกันกระสุนโดยใช้ชิ้นงานทั้งหมด 16 ชั้น ดังนั้นผลจากงานวิจัยของ Laurenzi S. และคณะ (2013) แสดงให้เห็นว่าการเติมอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์มีผลต่อประสิทธิภาพในการป้องกันกระสุนและสามารถลดรอยยุบตัวหลังจากการปะทะได้

ตารางที่ 2.9 ผลการทดสอบยิงเปรียบเทียบระหว่างแผ่นคอมพอสิตจากอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยเส้นใยเคฟลาร์ชนิด 29 ที่เต็มและไม่เต็มอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

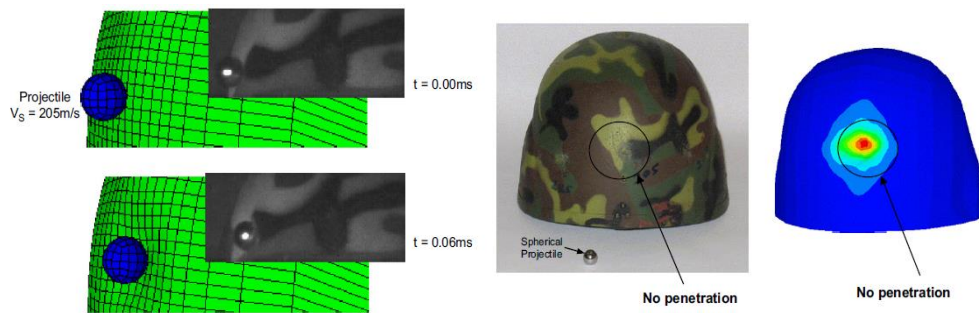
ความเร็วกระสุน (m/s)	พลังงานกระแทก (MJ)	อนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ 0.5 wt%	รอยยุบตัวที่วัดได้ (mm)		
			นัดที่ 1	นัดที่ 2	นัดที่ 3
930.4-935.5	4204	เต็ม	20	-	-
		ไม่เต็ม	20	-	-
935.5-946.7	1750	เต็ม	1.2	2.4	2.4
		ไม่เต็ม	4.8	2.4	2.4
432.2-435.7	377	เต็ม	ไม่ทะลุ (กระสุนหยุด ณ ชั้นเส้นใยที่ 9-10)	ไม่ทะลุ	ไม่ทะลุ
		ไม่เต็ม	ไม่ทะลุ (กระสุนหยุด ณ ชั้นเส้นใยที่ 16)	ไม่ทะลุ	ไม่ทะลุ

มีงานวิจัยที่ได้วิเคราะห์สมบัติทางกลของวัสดุคอมพอสิตในการใช้อนุภาคนาโนชนิดต่างๆ ร่วมกับอีพอกซีเป็นเมทริกซ์เรซิน [58-60] สรุปดังตารางที่ 2.10 เมื่อเปรียบเทียบเป็นอัตราส่วนค่าความแข็งแรงภายใต้แรงดึง (Tensile strength) ของอีพอกซีเรซินหลังเติมอนุภาคนาโนกับก่อนเติมอนุภาคนาโนในระบบนั้นๆ (σ/σ_0) และค่ามอดูลัสแรงดึง (Tensile modulus) ของอีพอกซีเรซินหลังเติมอนุภาคนาโนเทียบกับก่อนเติมอนุภาคนาโนในระบบนั้นๆ (E/E_0) ด้วยเช่นกัน พบว่าอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้น (MWCNT) สามารถให้ค่าอัตราส่วนความแข็งแรงภายใต้แรงดึง (Tensile strength) และค่ามอดูลัสแรงดึง (Tensile modulus) สูงสุดที่อัตราส่วนการเติมปริมาณน้อยสุด แสดงให้เห็นว่าปริมาณการเติมอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถช่วยทำให้สมบัติทางกลของพอลิเมอร์เรซินดีขึ้นได้เมื่อเทียบกับอนุภาคนาโนชนิดอื่นๆ

ตารางที่ 2.10 การเปรียบเทียบผลของการเติมอนุภาคนาโนชนิดต่างๆต่อเมทริกซ์อีพอกซีเรซิน

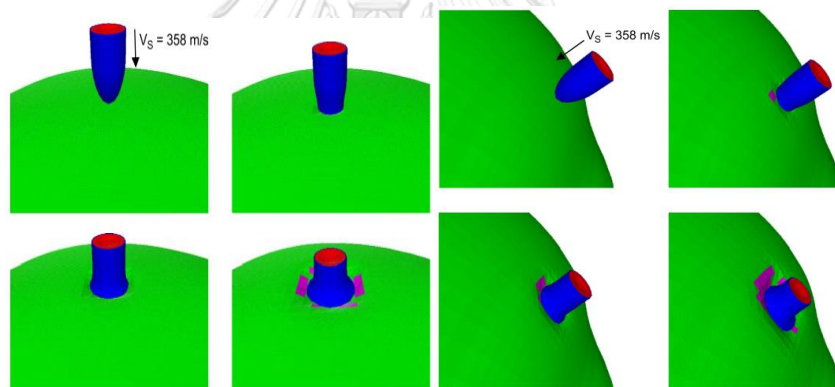
Nanoparticles	Polymer matrix	wt%	σ/σ_0	E/E_0	Ref.
SWCNT	Epoxy	5.0	1.07	1.00	[58]
Nanosilica	Epoxy	5.0	1.16	1.13	[59]
Silicon carbide	Epoxy	1.0	1.29	1.17	[60]
MWCNT	Epoxy	0.5	1.62	1.54	[58]

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่นำเทคนิคการคำนวณด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามาช่วยในการพัฒนาออกแบบหมวกกันกระสุน จากรายงานการวิจัยที่ผ่านมา Tham C.Y. และคณะ (2008) [31] ได้ทำการพัฒนาหมวกกันกระสุนโดยใช้เส้นใยเสริมแรงชนิดอะรามิด (เส้นใยเคฟลาร์ 29) ในเรซินประเภทพอลิบิวทีรอล-ฟีนอลิก (Polyvinyl butyral-phenolic) ที่ปริมาณเรซิน 15-18 % โดยน้ำหนัก และทดสอบยิงด้วยกระสุนปืน สแตนเลสทรงกลม (Stainless steel spherical projectile) ขนาด 11.9 มม. ด้วยความเร็ว 205 เมตรต่อวินาที พบว่ากระสุนปืนสแตนเลส ไม่สามารถเจาะทะลุหมวกกันกระสุนที่ผลิตขึ้นได้ โดยพบเพียงเศษของสีที่หมวกกันกระสุนหลุดออกมาเท่านั้น แสดงดังรูปที่ 2.22 โดยค่าการยุบตัวของหมวกที่ทดสอบด้วยกระสุน FSP จากวิธีการทดลองมีค่า 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากโปรแกรมคือ 0.7 มิลลิเมตร



รูปที่ 2.22 ภาพการเปรียบเทียบผลจากการทดลองและการจำลองด้วยโปรแกรม AUTODYN ที่แสดงให้เห็นว่ากระสุนปืนสแตนเลสทรงกลมที่ความเร็ว 205 เมตรต่อวินาที

เมื่อทำการสร้างแบบจำลองทดสอบการเจาะทะลุหมวกกันกระสุนที่ด้านบนและด้านข้างด้วยการจำลองกระสุนปืนชนิด 9 มม. FMJ ที่ความเร็ว 358 เมตรต่อวินาที โดยพบว่าหมวกกันกระสุนจากแบบจำลองสามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนได้ แสดงดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 แบบจำลองการกระแทกหมวกกันกระสุนที่สามารถต้านทานการเจาะทะลุด้วยกระสุนปืนชนิด 9 มม. FMJ ที่ความเร็ว 358 เมตรต่อวินาที ได้ ซ้าย: ด้านบน ขวา: ด้านข้าง

งานวิจัยของ Rodríguez-Millán M. และคณะ (2016) [30] ที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบหมวกกันกระสุนเพื่อจะรวมความสามารถในการต้านแรงกระแทกและมีน้ำหนักที่เบาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการทดลองเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตที่ประกอบด้วยเส้นใยอะรามิด (เส้นใยเคฟลาร์ 29) ในเรซินประเภทพอลิบิวทีรอล-ฟีนอลิก (Polyvinyl butyral-phenolic) ที่จำนวนชั้นมากกว่า 20 ชั้น ทดสอบด้วยกระสุน 9 มม. FMJ เพื่อวัดรอยยุบตัวตามมาตรฐาน NIJ standard-0106.01 ในระดับ 2 โดยภาพหลังการทดสอบแสดงในรูปที่ 2.24 พบว่าค่าการยุบตัว (BFD) ที่เกิดขึ้นบนแผ่นเกราะจากการทดสอบด้วย 9 มม. FMJ ความเร็ว 425 ± 15 เมตรต่อวินาที มีค่าเฉลี่ยคือ 21.8 ± 1.35 มิลลิเมตร



ด้านหน้า

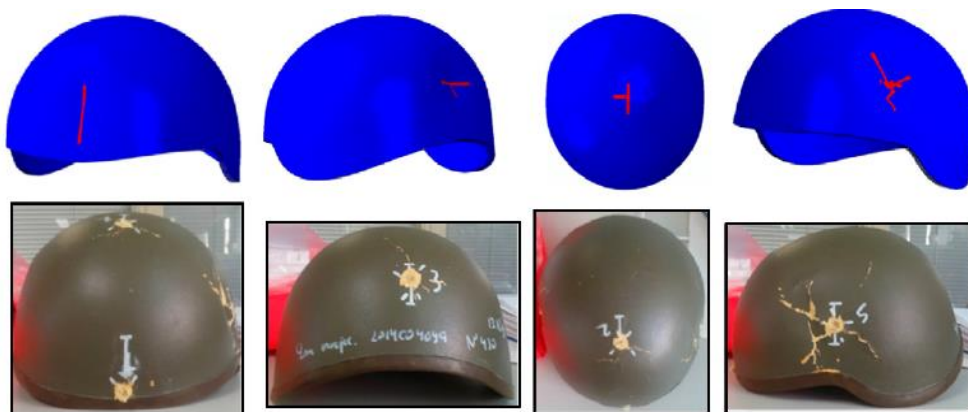


ด้านหลัง

รูปที่ 2.24 ภาพแสดงแผ่นเกราะหลังการทดสอบทั้งด้านหน้าและหลังด้วยมาตรฐาน NIJ Standard 0106.01 ทดสอบทั้งหมด 7 นัด

เมื่อทดสอบแรงปะทะทางซิปนะบนหมวกกันกระสุน ค่าการยุบตัว BFD จากการยิง 5 นัดที่ตำแหน่งต่างๆพบว่า มีค่า 12, 6, 11, 9 และ 11 มิลลิเมตรที่บริเวณด้านบน ด้านหน้า ด้านหลัง ด้านซ้ายและขวา ตามลำดับ เปรียบเทียบกับผลการจำลองหมวกกันกระสุนด้วยโปรแกรม ABAQUS พบว่าได้ค่า รอยยุบตัวเท่ากับ 10.33, 10.1, 9.67, 5.13 และ 5.35 มิลลิเมตร ที่บริเวณด้านบน ด้านหน้า ด้านหลัง ด้านซ้ายและขวา ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.25 ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่างวิธีการทดลองและการคำนวณด้วยโปรแกรมเฉลี่ยคือ 10.9 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นได้ว่าการจำลองโครงสร้างที่ซับซ้อนด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์มีความแม่นยำสูงและสามารถใช้ควบคู่กับผลการทดลองเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูงได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.25 แสดงลักษณะของหมวกหลังการทดสอบตามมาตรฐาน NIJ Standard-0106.01 จากโปรแกรม ABAQUS และจากการทดลอง

บทที่ 3

วัสดุและวิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุและสารเคมี

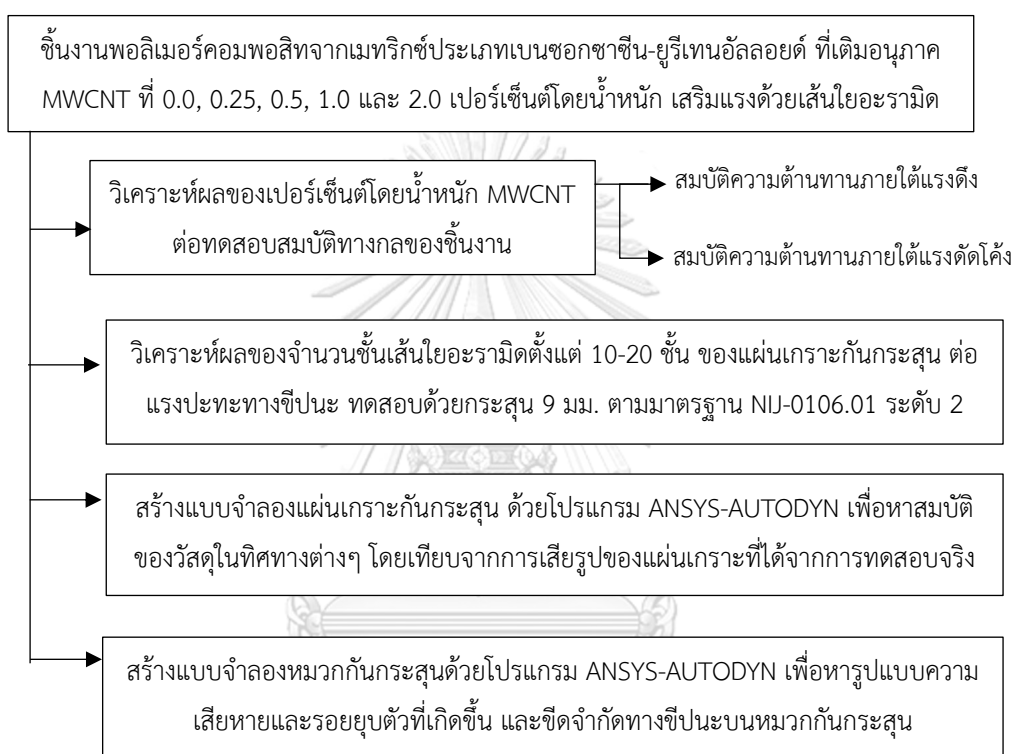
- 3.1.1 บิสฟีนอลเอ (Bisphenol A) บริษัท PTT Phenol ประเทศไทย
- 3.1.2 ฟอรัมาลดีไฮด์ (Formaldehyde) บริษัท Merck-chemical Co. Ltd. ประเทศเยอรมนี
- 3.1.3 อะนิลีน (Aniline) บริษัท LOBA Chemie Pvt. Ltd. ประเทศอินเดีย
- 3.1.4 พอลิโพรพิลีนพอลิโออล (Polypropylene polyol) มวลโมเลกุล 2000 บริษัท TPI Polyol Co. Ltd. ประเทศไทย
- 3.1.5 โทลูอินไดไอโซไซยาเนต (Toluene diisocyanate : TDI) บริษัท South City Group ประเทศไทย
- 3.1.6 เส้นใยอะรามิด (Aramid fiber) โดยมีค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่ 340 กรัม/ตารางเมตร ตามลำดับ จากบริษัท Thai Polyadd Limited Partnership ประเทศไทย
- 3.1.7 อนุภาค Multi-walled carbon nanotubes, MWCNT ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.9 นาโนเมตร ความยาว 3-12 ไมโครเมตร บริษัท NANO GENERATION CO. LTD.

3.2 อุปกรณ์

- 3.2.1 เครื่องให้ความร้อน (Hot Plate) ยี่ห้อ IKA บริษัท S.N.P. Scientific Co, Ltd. ประเทศไทย
- 3.2.2 เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molder) บริษัท Labtech Engineering Co, Ltd. ประเทศไทย
- 3.2.3 ตู้อบลมร้อน (Oven) บริษัท Worldco Co, Ltd. ประเทศไทย
- 3.2.4 เครื่องทดสอบแรงดึงแรงอัด (Universal Testing Machine) บริษัท Instron Co, Ltd. ประเทศไทย
- 3.2.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)
- 3.2.8 อุปกรณ์ทดสอบยิงตามมาตรฐาน NIJ-0106.01 ระดับภัยคุกคามระดับที่ 2

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในการศึกษาผลของเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของการเติมอนุภาค MWCNT ที่ 0.0, 0.25, 0.5, 1.0 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ต่อสมบัติทางกล และวิเคราะห์ผลของจำนวนชั้นของชั้นงานคอมพอสิตเมื่อทดสอบด้วยวิธีทางซีปนะ ตลอดจนการใช้โปรแกรม ANSYS-AUTODYN ในการสร้างแบบจำลอง สามารถสรุปขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การเตรียมเมทริกซ์เรซิน

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

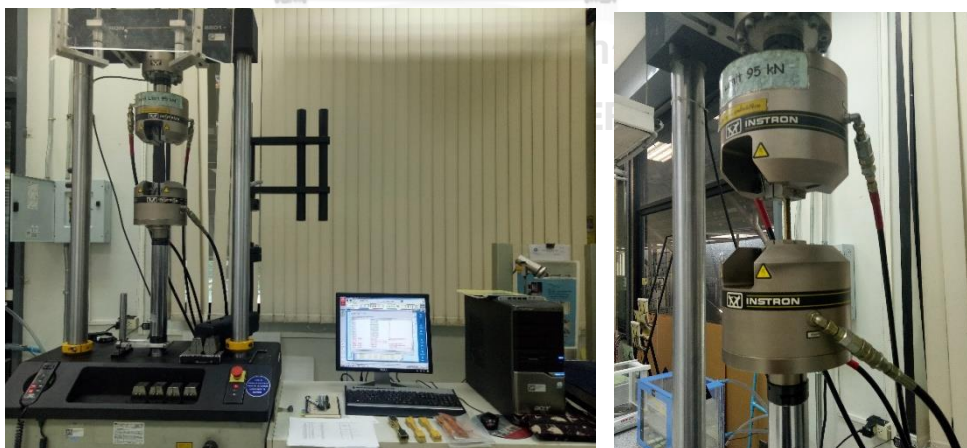
พอลิยูรีเทน (PU) สังเคราะห์จากโทลูอีนไดไอโซไซยาเนต (Toluene diisocyanate : TDI) และพอลิโพรพิลีนพอลิออล (Polypropylene polyol) ในอัตราส่วน 2:1 โดยโมล ตามลำดับ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้สภาวะไนโตรเจน

3.3.2 การเตรียมวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตจากเมทริกซ์เบนซอกลูซีน-ยูรีเทนอัลลอยด์ ที่เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก MWCNT ต่างๆ เสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิด

แผ่นกันกระสุนจากวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตจากเมทริกซ์ประเภทพอลิเบนซอกลูซีน-ยูรีเทนอัลลอยด์ อัตราส่วน 80:20 โดยน้ำหนักตามลำดับ ที่เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก MWCNT ต่าง ๆ ได้แก่ 0.25, 0.5, 1.0 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิด เตรียมโดยผสมพอลิเบนซอกลูซีน ยูรีเทน และอนุภาค MWCNT บนเตาให้ความร้อนที่มีอุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส กวนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน ทาลงบนแผ่นเส้นใยอะรามิดบนเตาให้ความร้อนที่มีอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เรียงแผ่นเส้นใยอะรามิดที่ทาเมทริกซ์เรซินที่ผสม MWCNT แล้วให้เป็นชั้น ศึกษาจำนวนชั้นเส้นใยอะรามิดที่ 10, 15 และ 20 ชั้น จากนั้นนำไปให้ความร้อนก่อนการอัดขึ้นรูป (Preheat) ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที และ 180 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 นาที และนำไปกดอัดด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molder) ที่ความดัน 100 บาร์ ด้วยอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.3.3 ทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile test)

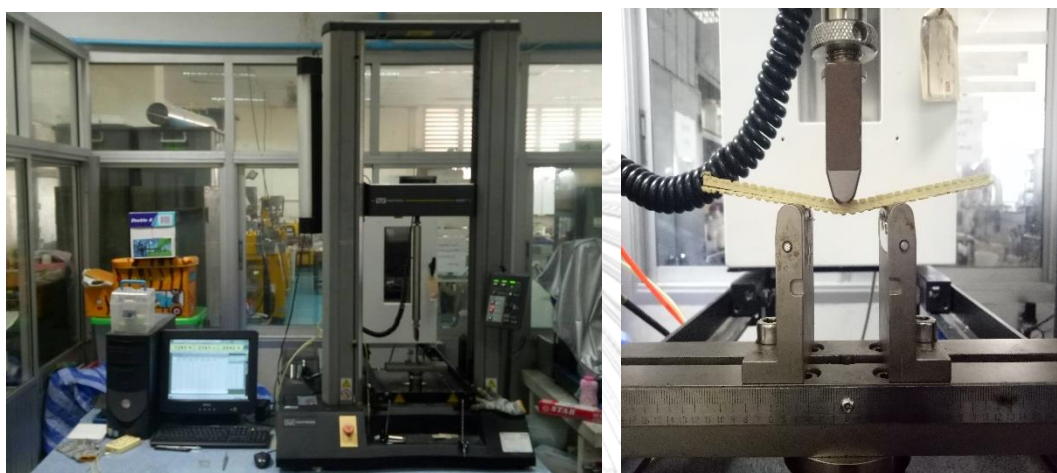
การทดสอบความต้านทานแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM D3039 ทดสอบด้วยเครื่อง Universal testing machine (Instron รุ่น 8872) ดังรูปที่ 3.2 โดยใช้ความเร็วในการดึง (Test speed) 2 มิลลิเมตร/นาที ด้วยน้ำหนักกด 25 กิโลนิวตัน และความยาวของเกจ (Gage length) 70 มิลลิเมตร ซึ่งใช้ชิ้นงาน พอลิเมอร์คอมพอสิต จำนวน 8 ชิ้น



รูปที่ 3.2 การทดสอบความต้านทานแรงดึงด้วยเครื่อง Universal testing machine (Instron รุ่น 8872)

3.3.4 การทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้ง (Flexural test)

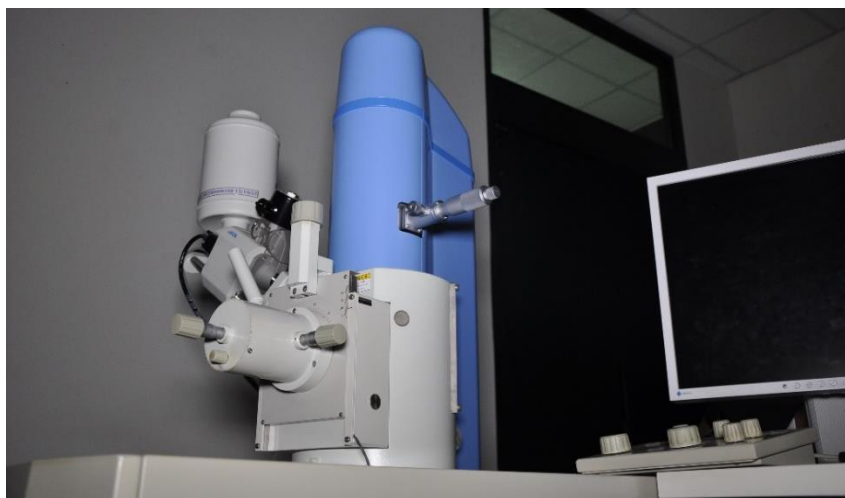
การทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้ง ตามมาตรฐาน ASTM D790 ทดสอบแบบ 3 จุด (3-points bending) ทดสอบด้วยเครื่อง Universal testing machine (Instron รุ่น 5567) ดังรูปที่ 3.3 ใช้ความเร็วในการกด (Test speed) เท่ากับ 2 มิลลิเมตร/นาที ด้วยน้ำหนักกด 1 กิโลนิวตัน และระยะห่างของขารองรับชิ้นงาน (Ratio of span to depth) เท่ากับ 16:1 ใช้ชิ้นงานพอลิเมอร์คอมพอสิตจำนวน 8 ชิ้น



รูปที่ 3.3 การทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้งด้วยเครื่อง Universal testing machine (Instron รุ่น 5567)

3.3.5 การวิเคราะห์โครงสร้างสัณฐาน (Morphology)

วิเคราะห์อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเมทริกซ์พอลิเบนซอกลาซีน-ยูรีเทนในระบบที่เติมและไม่เติมและไม่เติมอนุภาค MWCNT กับเส้นใยอะรามิต และความสามารถในการอบเส้นใยอะรามิตของเมทริกซ์พอลิเบนซอกลาซีน-ยูรีเทน ทั้งในระบบที่เติมและไม่เติมอนุภาค MWCNT ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) แสดงดังรูปที่ 3.4 โดยชิ้นงานจะถูกเคลือบพื้นผิวด้วยทองคำก่อนนำไปวิเคราะห์โครงสร้างสัณฐาน



รูปที่ 3.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

3.3.6 การทดสอบทางชีพนะและรอยยุบตัวที่เกิดขึ้นบนแผ่นเกราะกันกระสุนจากวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตจากเมทริกซ์เบนซอกซาซีน-ยูรีเทนอัลลอยด์ ที่เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก MWCNT ต่างๆ เสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิต ตามมาตรฐาน NIJ-0106.01

การทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงปะทะทางชีพนะทำการทดสอบด้วยกระสุนปืนขนาด 9 มม. โดยกำหนดระยะห่างระหว่างปากกระบอกปืนทดสอบกับแผ่นเกราะกันกระสุนเท่ากับ 5 เมตร ตามมาตรฐาน NIJ-0106.01 ระดับ 2 อุปกรณ์และกระสุนที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.5 (ก) และ 3.5(ข) โดยในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบแผ่นเกราะกันกระสุนจากวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตขนาด 150 x 150 ตารางมิลลิเมตร ซึ่งจะทดสอบยิงจำนวน 1 นัดต่อ 1 ชิ้นงาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)

(ข)

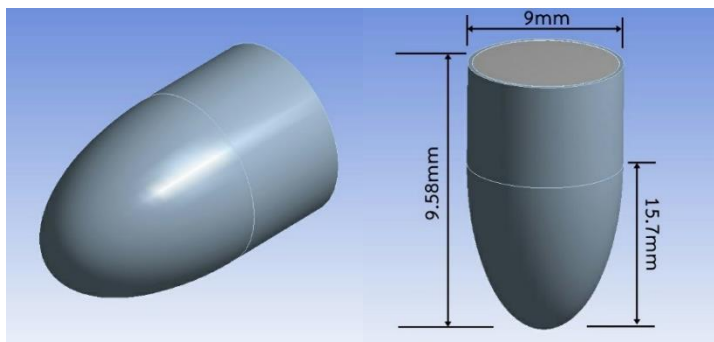
รูปที่ 3.5 (ก) การทดสอบแรงปะทะทางชีพนะ (ข) กระสุนขนาด 9 มม. มาตรฐาน NIJ-0106.01 ระดับ 2

3.3.7 ศึกษาแรงปะทะทางซีปนด้วยกระสุนขนาด 9 มม. บนแผ่นกันกระสุนและหมวกกันกระสุนด้วยโปรแกรม ANSYS-AUTODYN

ในการศึกษาแรงปะทะทางซีปนด้วย ANSYS-AUTODYN นี้ ต้องสร้างแบบจำลองของชิ้นงานและกระสุน 9 มม. โดบกระสุน 9 มม. จะประกอบไปด้วย 2 ส่วนด้วยกัน ได้แก่ บริเวณแกนหลักของกระสุน (Core) ที่ทำจากตะกั่ว และปลอกนอกของกระสุน (Jacket) ที่ทำมาจากทองแดง ความเร็วปะทะของกระสุนเป็นไปตามการทดสอบแรงปะทะทางซีปนในข้อ 3.3.6 สมบัติของวัสดุของกระสุนเป็นไปตามที่กำหนดในโปรแกรม ANSYS-AUTODYN (Material library) แสดงไว้ดังตารางที่ 3.1 ขนาดของกระสุน 9 มม. แสดงดังรูปที่ 3.6

ตารางที่ 3.1 สมบัติของกระสุน 9 มม. ANSYS-AUTODYN

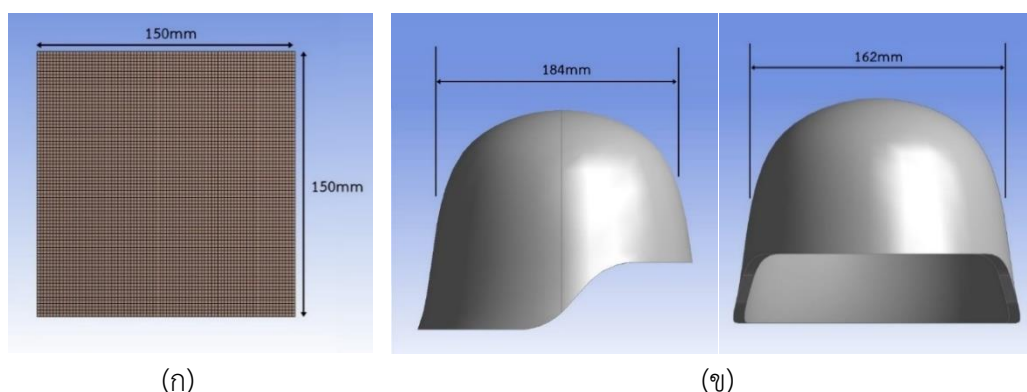
ตะกั่ว	
ความหนาแน่น	11.34 g/cm ³
Gruneisen coefficient	2.74
Parameter C1	2006 m/s
Parameter S1	1.429
Shear modulus	8,600 MPa
Yield stress	8 MPa
Hardening constant	110
Hardening exponent	0.052
Derivative dG/dP	1.0
Derivative dG/dT	-9.976 MPa/°C
Derivative dY/dP	0.0009304
Melting temperature	760 K
ทองแดง	
ความหนาแน่น	8.93 g/cm ³
Gruneisen coefficient	1.99
Parameter C1	3940 m/s
Parameter S1	1.48



รูปที่ 3.6 แบบจำลองกระสุน 9 มม. ด้วยโปรแกรม ANSYS-AUTODYN แกนชี้ในทำจากตะกั่วและปลอกนอกของกระสุนทำจากทองแดง

ในส่วนของแบบจำลองแผ่นเกราะกันกระสุนจากวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิต กำหนดให้ใช้สมการสถานะ (Equation of state, EOS) เป็นแบบฮอโรทอปิก เนื่องจากวัสดุคอมพอสิตเป็นวัสดุที่มีสมบัติทางกลที่แตกต่างกันในแกนตั้งฉากหลัก 3 แนวแกน โดยแผ่นเกราะมีขนาด 150x150 ตารางมิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.7(ก) กำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแผ่นเกราะโดยให้ขอบทั้ง 4 ด้านถูกยึดอยู่กับที่ ซึ่งจะไม่สามารถเคลื่อนไหวหรือหมุนได้ในทุกแนวแกนเมื่อได้รับแรงปะทะจากกระสุน

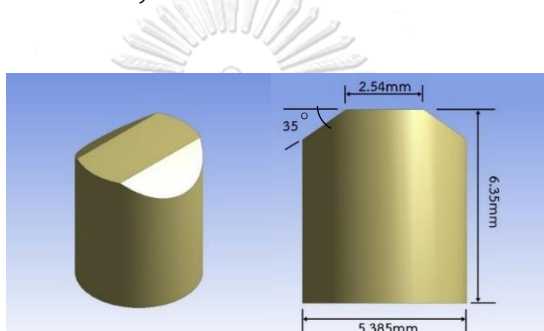
หมวกกันกระสุนที่ทดสอบแรงปะทะด้วยกระสุน 9 มม. ใช้สมการสถานะแบบฮอโรทอปิก และมีสมบัติของวัสดุเช่นเดียวกับแผ่นเกราะกันกระสุน หมวกกันกระสุนที่ใช้ในการคำนวณด้วยโปรแกรม ANSYS-AUTODYN แสดงดังรูปที่ 3.7(ข) โดยสร้างแบบจำลองขนาดหมวกโดยใช้ขนาดของหมวกขนาดเล็ก ซึ่งต้องมีขนาดรอบศีรษะ 538 มิลลิเมตร ความกว้างของศีรษะ 162 มิลลิเมตร และขนาดความยาวศีรษะ 184 มิลลิเมตร ซึ่งกำหนดให้ที่บริเวณขอบด้านล่างของหมวกกันกระสุนถูกยึดอยู่กับที่ ไม่สามารถเคลื่อนไหวได้ในทุกแนวแกนเมื่อได้รับแรงปะทะจากกระสุน



รูปที่ 3.7 แบบจำลอง (ก) แผ่นเกราะกันกระสุน (ข) หมวกกันกระสุน ด้วยโปรแกรม ANSYS-AUTODYN

3.3.8 ศึกษาขีดจำกัดทางซีปะนะ (Ballistic limit, V_{50}) บนหมวกกันกระสุนด้วยโปรแกรม ANSYS-AUTODYN

การทดสอบขีดจำกัดซีปะนะ (Ballistic limit, V_{50}) ตามมาตรฐาน Military Standard ของประเทศสหรัฐอเมริกา ตามข้อกำหนดของ MIL-STD-622F นิยามไว้ว่าขีดจำกัดซีปะนะ (Ballistic limit, V_{50}) คือค่าความเร็วที่เป็นค่าเฉลี่ยของความเร็วกระสุนนัดที่เกิดการเจาะทะลุอย่างสมบูรณ์ และนัดที่เกิดการเจาะทะลุเพียงบางส่วนในจำนวนนัดที่เท่ากัน ซึ่งจะต้องทดสอบด้วยกระสุนจำลองสะเก็ดระเบิด (Fragment simulating projectile, FSP) ที่ทำจากเหล็กกล้า (AISI 4340) แสดงดังรูปที่ 3.8 โดยจะใช้ความเร็วปะทะเริ่มต้นที่ 610 เมตรต่อวินาที สมบัติของเหล็กกล้าที่กำหนดตาม ANSYS-AUTODYN (Material library) แสดงดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.8 กระสุนจำลองสะเก็ดระเบิด (Fragment simulating projectile, FSP) ทำจากเหล็กกล้า AISI 4340

ตารางที่ 3.2 สมบัติของเหล็กกล้า AISI4340 ตาม ANSYS-AUTODYN (Material library)

เหล็กกล้า (AISI 4340 steel)	
ความหนาแน่น	7.83 g/cm ³
Bulk modulus	1.59×10 ⁸ kPa
Reference temperature	300 K
Specific heat	477 J/kgK
Shear modulus	8.18×10 ⁷ kPa
Yield stress	7.92×10 ⁵
Hardening constant	5.1×10 ⁵
Hardening exponent	0.26
Strain rate constant	0.014
Thermal softening Exponent	1.03
Melting temperature	1.793×10 ³ K

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ความต้านทานแรงดึง (Tensile test) ของพอลิเมอร์คอมพอสิตจากเมทริกซ์ประเภทเบนซอกซาซีน-ยูรีเทนอัลลอยด์ที่ปริมาณการเติม MWCNT ต่างๆ เสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิด

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความแข็งแรงภายใต้แรงดึง (Tensile strength), โมดูลัสของยัง (Young's modulus), เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (% Elongation) และพลังงาน ณ จุดขาด (Energy at break) ของพอลิเมอร์คอมพอสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิดที่เติมอนุภาค MWCNT ที่เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่างๆ

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงของพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิดที่ปริมาณการเติมอนุภาค MWCNT ต่าง ๆ

ปริมาณการเติมอนุภาค MWCNT (wt%)	ความแข็งแรงภายใต้แรงดึง (MPa)	พลังงาน ณ จุดขาด (J)	เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%)	โมดูลัสของยัง (GPa)
0.00	428±40.6	20.8±2.8	4.6±0.2	12.9±1.6
0.25	507±31.4	28.1±0.8	4.5±0.2	13.2±0.3
0.50	463±5.92	24.9±2.8	4.4±0.2	12.9±0.2
1.00	433±1.25	21.3±0.22	4.3±0.1	13.3±1.8
2.00	414±68.1	21.2±1.43	4.1±0.1	13.3±0.5

จากตารางที่ 4.1 พบว่าพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ไม่เติมอนุภาค MWCNT ที่มีค่าความแข็งแรงภายใต้แรงดึงเท่ากับ 428±40.6 MPa ในขณะที่ระบบพอลิเมอร์คอมพอสิตที่เติม MWCNT มีค่าความแข็งแรงภายใต้แรงดึงอยู่ในช่วง 414-507 MPa ซึ่งมีค่าสูงกว่าระบบพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ไม่เติมอนุภาค MWCNT แสดงให้เห็นว่าการเติมอนุภาค MWCNT มีผลต่อความแข็งแรงภายใต้แรงดึงของชิ้นงาน เนื่องจาก อนุภาค MWCNT เกิดอันตรกิริยาที่ติดกับเมทริกซ์ และเกิดอันตรกิริยาระหว่างเมทริกซ์กับเส้นใยที่เหมาะสม โดยค่าความแข็งแรงภายใต้แรงดึงมีค่าสูงสุดเป็น 507±31.4 MPa ที่ปริมาณ

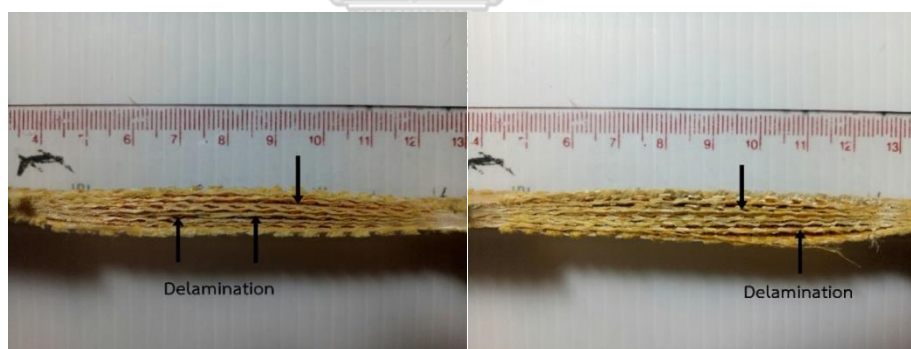
การเติม MWCNT ที่ 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากการเติม MWCNT ในปริมาณที่เหมาะสม จะช่วยส่งเสริมให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคที่ดีทำให้กลไกในการถ่ายเทแรงดีขึ้น [61] จึงทำให้ระบบพอลิเมอร์คอมพอสิตที่เติม MWCNT ที่ 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าความแข็งแรงภายใต้แรงดึงสูงที่สุด แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณการเติมอนุภาค MWCNT ที่ 0.5, 1.0 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความแข็งแรงภายใต้แรงดึงมีค่าลดลง เนื่องจากการเติมอนุภาค MWCNT ที่มากขึ้น มีโอกาสที่อนุภาคจะเกิดการรวมกัน (Aggregation) ทำให้อนุภาคจับตัวกันเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น [27, 62] ซึ่งไปขัดขวางการเกิดอันตรกิริยาระหว่างเมทริกซ์กับเส้นใย รวมถึงการเติมปริมาณ MWCNT เข้าไปแทนที่ปริมาณเมทริกซ์ กล่าวคือปริมาณของพอลิเมอร์เมทริกซ์จะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของ MWCNT จึงจะทำให้พอลิเมอร์เมทริกซ์ไม่เพียงพอที่จะอาบพื้นผิวของอนุภาคและเส้นใยโอะรามิดได้ทั่วถึง ดังนั้น อันตรกิริยาระหว่างเมทริกซ์และเส้นใยโอะรามิดจึงลดลง [63] ความแข็งแรงภายใต้แรงดึงของระบบพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ปริมาณการเติม MWCNT มากกว่า 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจึงลดลงไปด้วย

ค่าพลังงาน ณ จุดขาดแสดงถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิต จากตารางที่ 4.1 พบว่าค่าพลังงาน ณ จุดขาด ของระบบพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ไม่เติม MWCNT มีค่าเท่ากับ 20.8 ± 2.9 J ที่อัตราส่วนการเติม MWCNT ที่ 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่าพลังงาน ณ จุดขาดของระบบพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเป็น 28.1 ± 0.8 J เมื่อปริมาณการเติม MWCNT เพิ่มสูงขึ้นเป็น 0.5, 1.0 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์ ค่าพลังงาน ณ จุดขาดของระบบพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีค่าลดลงเป็น 24.9 ± 2.8 , 21.3 ± 0.22 และ 21.2 ± 1.43 J ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตมีความสามารถในการดูดซับพลังงานได้ดีที่สุดที่ปริมาณการเติม MWCNT ที่ 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากการเติม MWCNT ในปริมาณที่เหมาะสมจะช่วยส่งเสริมให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคที่ดี และอนุภาค MWCNT ช่วยส่งเสริมการถ่ายเทแรงภายในชิ้นงานให้มีความสม่ำเสมอในเนื้อเมทริกซ์ [27, 63] ส่งผลให้ค่าการดูดซับพลังงานที่อัตราส่วนการเติม MWCNT ที่ 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีค่าสูงที่สุด ในขณะที่การเติมปริมาณ MWCNT ที่มีค่ามากกว่า 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก การรวมตัวกันของอนุภาคอาจจะขัดขวางอันตรกิริยาระหว่างเมทริกซ์และเส้นใยโอะรามิด ทำให้ระหว่างชั้นเส้นใยไม่สามารถยึดเกาะกันได้ดีเท่าที่ควร แสดงดังรูปที่ 4.1 ชิ้นงานที่เสียหายจากการทดสอบความต้านทานแรงดึงแล้วจะเห็นได้ว่าที่ปริมาณการเติม MWCNT ที่สูงขึ้นส่งผลให้เกิดการแตกออกระหว่างชั้นเส้นใยโอะรามิดมากขึ้น ชิ้นงานไม่สามารถกระจายแรงได้ดีและมีความสามารถในการดูดซับพลังงานลดลง

ค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิต แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวที่สูงที่สุดพบในระบบพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ไม่เติมอนุภาค MWCNT มีค่าเท่ากับ 4.6 ± 0.2 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าเมทริกซ์พอลิเบนซอซอกซาซินอัลลอยด์ที่ไม่เติม MWCNT มีความยืดหยุ่นที่สูง

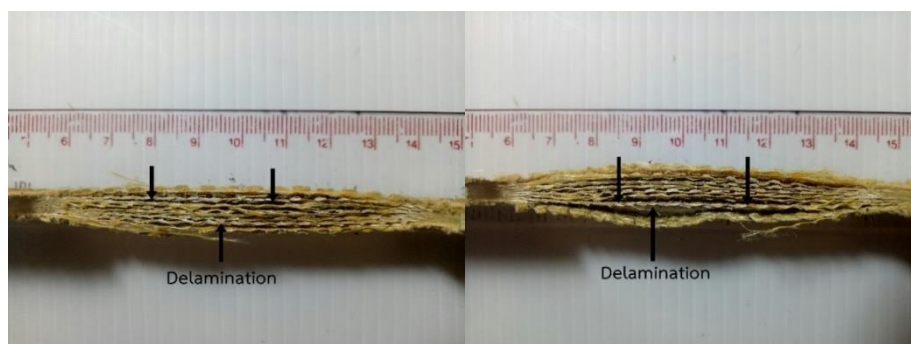
ที่สุด และเปอร์เซ็นต์การยึดตัวจะลดลงเป็น 4.5 ± 0.2 , 4.4 ± 0.2 , 4.3 ± 0.1 และ 4.1 ± 0.1 เปอร์เซ็นต์ เมื่อปริมาณการเติมอนุภาค MWCNT ในพอลิเมอร์คอมพอสิตมีค่าเท่ากับ 0.25, 0.5, 1.0 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยค่าการยึดตัวของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตลดลงเมื่อปริมาณการเติม MWCNT เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเติม MWCNT ซึ่งมีความแข็งแรงสูงกว่าลงไปแทนที่พอลิเมอร์เมทริกซ์ซึ่งมีความยืดหยุ่นมากกว่า จึงทำให้ความสามารถในการยึดตัวของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่เติม MWCNT ลดลง [27, 64]

เมื่อพิจารณาค่ามอดูลัสของยัง ดังที่แสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าค่ามอดูลัสของวัสดุคอมพอสิตที่ไม่เติม MWCNT มีค่าเท่ากับ 12.913 ± 1.58 ในขณะที่ค่ามอดูลัสของยังของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตที่เติม MWCNT มีค่าเท่ากับ 13.078 ± 0.33 , 12.914 ± 0.18 , 13.273 ± 1.81 และ 13.333 ± 0.53 GPa ที่อัตราส่วนการเติม MWCNT ที่ 0.25, 0.5, 1.0 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งค่ามอดูลัสของวัสดุคอมพอสิตที่เติม MWCNT มีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญที่เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ MWCNT ต่าง ๆ โดยการเพิ่มขึ้นของมอดูลัสในระบบที่เติม MWCNT เมื่อเทียบกับระบบที่ไม่เติมนั้น เนื่องมาจากอนุภาค MWCNT ที่มีค่ามอดูลัสที่สูง (1 TPa) [65] เมื่อเติม MWCNT ที่มีความแข็งแรงสูงกว่าเข้าไปแทนที่ปริมาณพอลิเมอร์เมทริกซ์ จึงส่งผลให้ค่ามอดูลัสของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตมีแนวโน้มสูงขึ้น



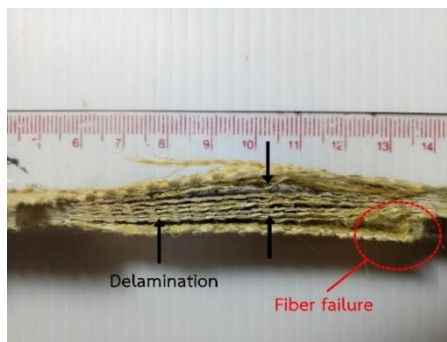
(ก)

(ข)



(ค)

(ง)



(จ)

รูปที่ 4.1 ชิ้นงานพอลิเมอร์คอมพอสิตที่เสียหายจากการทดสอบความต้านทานแรงดึง ที่ปริมาณการเติม MWCNT (ก) 0.0 (ข) 0.25 (ค) 0.5 (ง) 1.0 และ (จ) 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

4.2 ความต้านทานแรงดัดโค้ง (Flexural test) ของพอลิเมอร์คอมพอสิตจากเมทริกซ์ประเภทเบนซอกซาซีน-ยูรีเทนอัลลอยด์ที่ปริมาณการเติม MWCNT ต่างๆ เสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิด

ค่าความแข็งแรงภายใต้แรงดัดโค้ง (Flexural strength) เป็นสมบัติที่ใช้ประเมินความแข็งแรงของวัสดุ วัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิด ที่มีปริมาณการเติม MWCNT ที่ 0, 0.25, 0.5, 1.0 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าความแข็งแรงภายใต้แรงดัดโค้งเท่ากับ 97 ± 18.3 , 113 ± 6.19 , 125 ± 8.84 , 120 ± 8.27 และ 112 ± 7.57 MPa ตามลำดับ จากผลการทดสอบที่ได้จะพบว่าระบบพอลิเมอร์คอมพอสิตที่เติมอนุภาค MWCNT ที่ทุกเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าความแข็งแรงภายใต้แรงดัดโค้งสูงกว่าในระบบที่ไม่เติม แสดงให้เห็นว่าการเติมอนุภาค MWCNT ช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงดัดโค้งให้สูงขึ้นได้ เนื่องจากอนุภาค MWCNT เป็นอนุภาคที่มีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio) ที่สูง ส่งผลให้ระบบที่เติมอนุภาค MWCNT มีค่าความแข็งแรงภายใต้แรงดัดโค้งที่มากกว่าระบบที่ไม่เติม [64] และการเกิดการเกาะเกี่ยวกัน (Bridging) ระหว่างอนุภาค MWCNT ภายในเนื้อเมทริกซ์และบนเส้นใย ทำให้สามารถทนแรงดัดโค้งได้สูงขึ้น โดยที่ปริมาณการเติม MWCNT ที่ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้ค่าความแข็งแรงภายใต้แรงดัดโค้งสูงสุด เนื่องจากที่ปริมาณการเติม MWCNT นี้มีปริมาณที่เหมาะสมที่เกิดการกระจัดของอนุภาคในพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดีและเกิดการเกาะเกี่ยวกันระหว่างอนุภาค MWCNT ภายในเนื้อเมทริกซ์และบนเส้นใยที่มากเพียงพอที่จะรับแรงดัดโค้งได้สูงขึ้น นอกจากนี้ค่าความแข็งแรงภายใต้แรงดัดโค้งจะค่อยๆ ลดลงที่ปริมาณการเติมที่ 1.0 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากอนุภาคเข้าไปแทนที่ปริมาณพอลิเมอร์เมทริกซ์ในระบบเกิดการเกาะเกี่ยวกันระหว่างอนุภาค MWCNT ภายในเนื้อเมทริกซ์ที่มากเกินไปจนเกิดการรวมกลุ่มกันของอนุภาค MWCNT ระหว่างชั้นเส้นใย ส่งผลให้แรงยึดเกาะระหว่างชั้นเส้นใยลดลง ก่อให้เกิดเป็นจุดเริ่มต้นของรอยแตก (Crack initiation)

ภายในระบบพอลิเมอร์คอมพอสิตเมื่อได้รับแรงดัดโค้งด้วย [64] จึงส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงดัดโค้งลดลงนั่นเอง

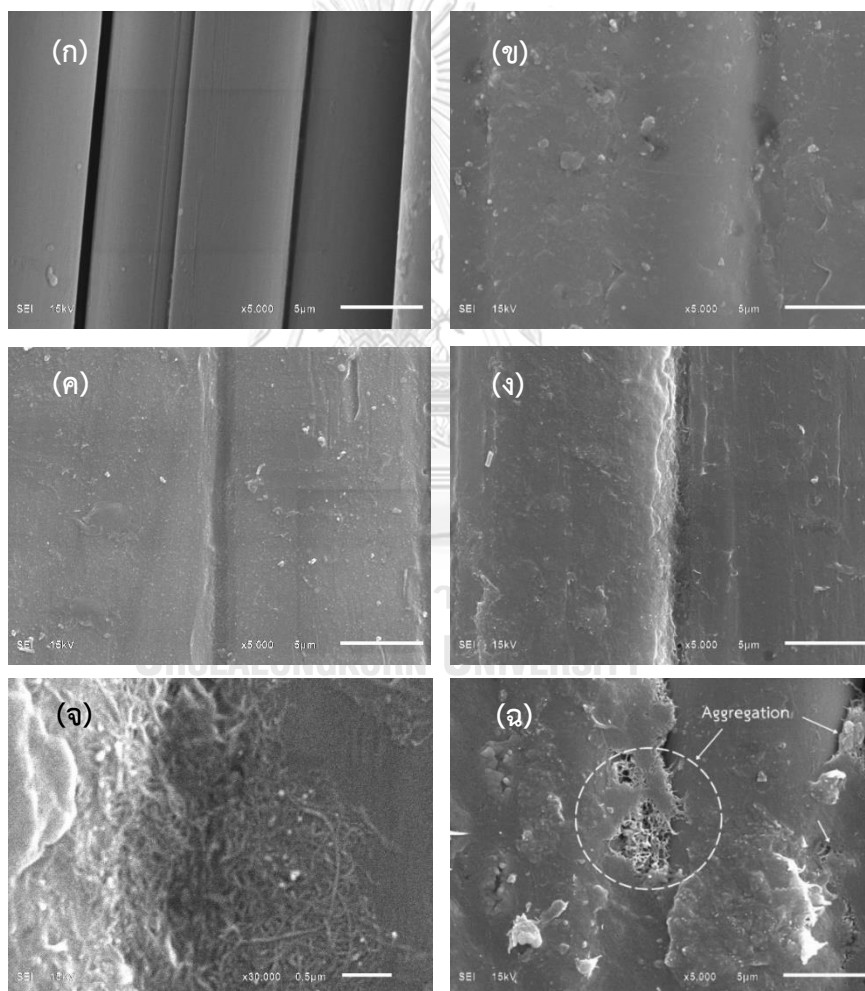
ค่ามอดูลัสแรงดัดโค้ง (Flexural modulus) ของระบบพอลิเมอร์คอมพอสิตที่เติมอนุภาค MWCNT ที่ 0, 0.25, 0.5, 1.0 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าเท่ากับ 18.32 ± 3.26 , 18.95 ± 1.41 , 21.73 ± 1.21 , 16.89 ± 1.47 และ 15.17 ± 3.02 GPa ตามลำดับ โดยพบว่าที่ปริมาณการเติม MWCNT ที่ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้ค่ามอดูลัสดัดโค้งสูงที่สุด เนื่องจากการเติมอนุภาค MWCNT ที่มีความแข็งแรงสูงกว่าเข้าไป จะส่งผลให้ค่ามอดูลัสของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตมีแนวโน้มสูงขึ้น สอดคล้องกับผลการทดลองของค่ามอดูลัสในการรับแรงดึง และค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งมีค่าลดลงตามลำดับที่ปริมาณการเติมที่ 1.0 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากที่ปริมาณการเติมดังกล่าวมีแรงยึดเกาะระหว่างชั้นเส้นใยเนื่องมาจากอันตรกิริยาของพอลิเมอร์เมทริกซ์และเส้นใยต่ำลง ส่งผลให้ชิ้นงานพอลิเมอร์คอมพอสิตไม่สามารถทรงรูปได้ดีเมื่อได้รับแรงดัดโค้ง

4.3 ลักษณะพื้นฐานของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตจากเมทริกซ์ประเภทพอลิเบนซอกซาซิน-ยูรีเทน ที่ปริมาณการเติม MWCNT ต่างๆ เสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิด

การศึกษาพื้นฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อวิเคราะห์อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเมทริกซ์พอลิเบนซอกซาซิน-ยูรีเทนในระบบที่เติมและไม่เติมอนุภาค MWCNT กับเส้นใยอะรามิด และความแตกต่างกันของพื้นผิวของพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่เติมและไม่เติม MWCNT ที่เคลือบบนเส้นใยอะรามิด แสดงดัง 4.2

จากรูปที่ 4.2(ก) แสดงลักษณะพื้นฐานของเส้นใยอะรามิดที่ไม่มีพอลิเมอร์เมทริกซ์เคลือบจะเห็นช่องว่างระหว่างเส้นใยชัดเจน ส่วนในรูปที่ 4.2(ข) แสดงเส้นใยอะรามิดที่ถูกเคลือบด้วยพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ไม่เติมอนุภาค MWCNT จะเห็นว่าพอลิเบนซอกซาซิน-ยูรีเทนเรซินมีความสามารถในการอาบเส้นใยได้ทั่วถึงและเกิดการยึดเกาะระหว่างเส้นใยได้ดี เมื่อพิจารณาเส้นใยอะรามิดที่ถูกอาบด้วยพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ปริมาณการเติม MWCNT ที่ 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่แสดงในรูปที่ 4.2(ค) จะเห็นว่าพื้นผิวของพอลิเมอร์เมทริกซ์มีความขรุขระขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากพอลิเมอร์เมทริกซ์อาบเส้นใยอะรามิดและอนุภาค MWCNT ได้อย่างทั่วถึง และยังสามารถอาบเส้นใยได้อย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งผืน เมื่อพิจารณารูปที่ 4.2(ง) เส้นใยอะรามิดถูกอาบด้วยพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่เติม MWCNT ที่ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าพื้นผิวของพอลิเมอร์เมทริกซ์มีความขรุขระมากขึ้นกว่าที่ปริมาณการเติม MWCNT 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และจะสามารถเห็นร่องระหว่างเส้นใยอะรามิดได้ชัดเจน เนื่องจากปริมาณพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ปริมาณการเติม MWCNT ที่ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณไม่เพียงพอที่จะอาบเส้นใยได้ทั่วถึง อันเกิดจากการรวมกลุ่มกันของอนุภาค MWCNT แสดงดัง

ภาพที่ 4.2(จ) และเมื่อพิจารณาที่ปริมาณการเติม MWCNT ที่ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังรูป 4.2(ฉ) จะเห็นว่าพื้นผิวของพอลิเมอร์เมทริกซ์มีความขรุขระและไม่สม่ำเสมอ พอลิเมอร์เมทริกซ์ไม่สามารถอบเส้นใยและอนุภาคได้ทั่วถึง และยังพบการรวมเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาค MWCNT ได้ อย่างชัดเจนอีกด้วย เป็นผลให้อันตรกิริยาระหว่างเมทริกซ์และเส้นใยอะรามิตลดลง ซึ่งสอดคล้องกับ ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงในข้อ 4.1 ที่ปริมาณการเติม MWCNT ที่มากขึ้นทำให้สมบัติทาง กลลดลง เนื่องจากการเติม MWCNT ที่สูงขึ้น มีโอกาสก่อให้เกิดการรวมเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาค ได้มากขึ้น [27, 63] ส่งผลให้การอบเส้นใยของพอลิเมอร์เมทริกซ์เกิดความไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากเมทริกซ์จะไปรวมอยู่บนกลุ่มก้อนอนุภาค MWCNT มากกว่าที่จะอบอยู่บนเส้นใยอะรามิต



รูปที่ 4.2 ลักษณะสัณฐานของ (ก) เส้นใยอะรามิต และวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ปริมาณการเติม MWCNT ที่ (ข) 0.0 wt% (ค) 0.25 wt% (ง) 0.5 wt% ที่กำลังขยาย 5000x (จ) 0.5 wt% ที่กำลังขยาย 30,000x และ (ฉ) 2.0 wt% เสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิต

4.4 ผลของปริมาณการเติมอนุภาค MWCNT และจำนวนชั้นเส้นใยอะรามิตต่อการทดสอบทางซีปนและรอยยุบตัวที่เกิดขึ้นของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิต

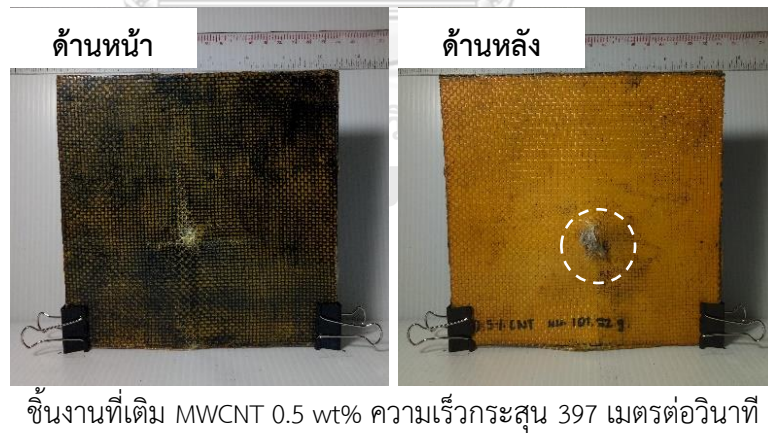
จากผลการทดสอบสมบัติทางกลด้วยความต้านทานแรงดึงพบว่าที่ปริมาณการเติม MWCNT ที่ 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้ค่าความแข็งแรงภายใต้แรงดึงและค่าพลังงาน ณ จุดขาดสูงสุด มีค่าเท่ากับ 507 ± 31.4 MPa และ 463 ± 5.92 J ตามลำดับ และที่ปริมาณการเติมที่ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีค่าที่ต่ำกว่า ดังนั้นในขั้นตอนทดสอบแรงปะทะทางซีปนจะจึงจะศึกษาผลของปริมาณการเติมอนุภาค MWCNT ที่ 0.25 และ 0.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่เติม MWCNT ที่จำนวนชั้นเส้นใยอะรามิตที่เท่ากันต่อประสิทธิภาพการป้องกันแรงปะทะทางซีปน โดยทดสอบด้วยกระสุน 9 มม. ระยะยิงจากปากกระบอกปืนจนถึงชิ้นงานเป็นระยะ 5 เมตร ตามมาตรฐาน NIJ-0106.01 ความเร็วกระสุนที่ทดสอบและรอยยุบตัวที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 4.2 ผลของปริมาณการเติมอนุภาค MWCNT ที่ 0.0, 0.25 และ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่จำนวนชั้นเส้นใยอะรามิต 10 ชั้น ต่อประสิทธิภาพในการป้องกันแรงปะทะทางซีปน

จำนวนชั้นเส้นใยอะรามิต	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก MWCNT	ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ (กรัม/ตร.ซม.)	ความเร็วกระสุน (เมตรต่อวินาที)	ผลการทดสอบ	รอยยุบตัว (มิลลิเมตร)
10	0.00	0.47	333	ทะลุ	-
	0.25	0.44	407	ไม่ทะลุ	24
	0.50	0.45	397	ทะลุ	-

โดยตารางที่ 4.2 แสดงความสามารถในการรับแรงปะทะทางซีปนของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ไม่เติม MWCNT และที่เติม MWCNT ที่ 0.25 และ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่จำนวนชั้นเส้นใยอะรามิต 10 ชั้น จะเห็นว่าการเติมอนุภาค MWCNT ที่ 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุน 9 มม. ที่ความเร็ว 407 เมตรต่อวินาทีได้ ในขณะที่ชิ้นงานที่ไม่เติมอนุภาค MWCNT และที่เติมอนุภาค MWCNT ที่ 0.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไม่สามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุน 9 มม. ที่ความเร็ว 333 และ 397 เมตรต่อวินาที ตามลำดับได้ โดยชิ้นงานที่เติมอนุภาค MWCNT ที่ 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สามารถต้านทานการเจาะทะลุได้ที่ความเร็วสูงถึง 407 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นค่าความเร็วที่สูงกว่าความเร็วกระสุนในระบบที่ไม่เติมและเติมอนุภาคที่ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และยังเป็นความเร็วที่เกินกว่าช่วงความเร็วตามมาตรฐาน NIJ-0106.01 ที่

มีค่า 358 ± 15 เมตรต่อวินาที อีกด้วย แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานในระบบที่เติมอนุภาค MWCNT ที่ 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สามารถต้านทานแรงปะทะทางซีปนอะได้ดีกว่าระบบที่ไม่เติมและเติมอนุภาค MWCNT ที่ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ได้อย่างชัดเจน เนื่องจากปริมาณการเติมอนุภาคที่ 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่เกิดอันตรกิริยาที่ติระหว่างอนุภาคกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ และที่ปริมาณการเติมอนุภาคที่เหมาะสมนี้ทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคที่ดีในเนื้อเมทริกซ์ ทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์และเส้นใยอะรามิดที่เหมาะสม ส่งผลให้การยึดเกาะระหว่างชั้นเส้นใยอะรามิดยังสามารถยึดเกาะกันได้ดี ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้น [66] ความสามารถในการต้านทานการแรงปะทะทางซีปนอะจึงมากขึ้นไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติทางกลว่าที่ปริมาณการเติมอนุภาคที่ 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้ค่าความแข็งแรงภายใต้แรงดึงและค่าพลังงาน ณ จุดขาดที่มีค่าสูงที่สุด อันเนื่องมาจากการรับแรงปะทะแบบซีปนอะเป็นการรับแรงที่ก่อให้เกิดการเสียรูปเนื่องมาจากแรงดึงที่เกิดขึ้นบนแนวเส้นใยหลัก (Primary yarns) ที่เป็นแนวเส้นใยที่ได้รับการปะทะจากกระสุนโดยตรง การเสียรูปที่ทำให้เกิดแรงดึงในแนวเส้นใยหลักนี้เป็นกลไกการดูดซับพลังงานเมื่อได้รับแรงปะทะด้วย ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าที่ปริมาณการเติมอนุภาค MWCNT ที่ 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีประสิทธิภาพในการต้านแรงปะทะแบบซีปนอะที่ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่เติมและเติมอนุภาคที่ 0.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยความเสียหายของแผ่นเกราะกันกระสุนหลังทดสอบแรงปะทะทางซีปนอะ ที่ไม่เติมและเติมอนุภาค MWCNT ที่ 0.25 และ 0.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่จำนวนชั้นเส้นใยอะรามิด 10 ชั้น แสดงดังรูปที่ 4.3



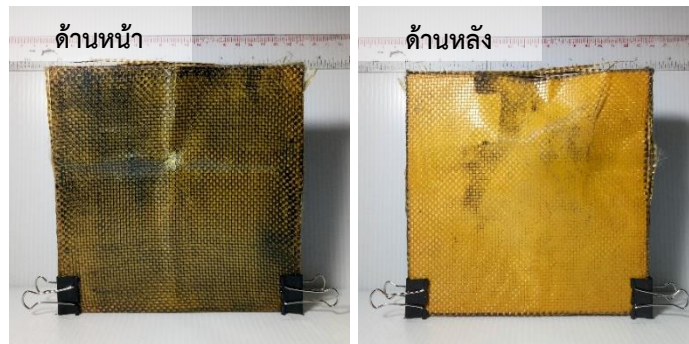
รูปที่ 4.3 ความเสียหายของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตหลังทดสอบแรงปะทะทางซิปนะ ด้วยกระสุน 9 มม. ที่ปริมาณการเติม MWCNT ที่ 0, 0.25 และ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จำนวนชั้นเส้นใยอะรามิด 10 ชั้น

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบแรงปะทะทางซีปนะที่จำนวนชั้นเส้นใยอะรามิดที่ 15 และ 20 ชั้น ที่ปริมาณการเติมอนุภาค MWCNT ที่ 0.25 และ 0.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าชิ้นงานสามารถป้องกันการเจาะทะลุของกระสุน 9 มม. ได้ในช่วงความเร็วปะทะที่สูงกว่ามาตรฐาน NIJ-0106.01 ทั้งหมด

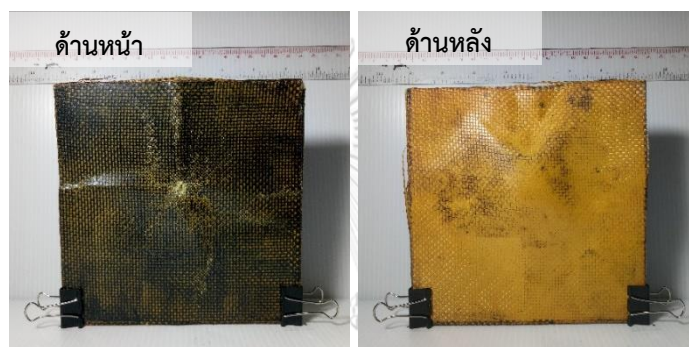
เมื่อพิจารณารอยยุบตัวที่เกิดขึ้นที่จำนวนชั้นเส้นใยอะรามิดที่ 15 ชั้นและ 20 ชั้นที่เท่ากัน พบว่าชิ้นงานที่มีปริมาณการเติมอนุภาค MWCNT ที่ 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่ารอยยุบตัวหลังการปะทะที่น้อยกว่าชิ้นงานที่เติม MWCNT ที่ 0.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยความเร็วกระสุนที่ทดสอบมีค่าสูงกว่า จึงเป็นการยืนยันได้ว่าที่ปริมาณการเติม MWCNT ที่ 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีประสิทธิภาพในการต้านทานแรงปะทะทางซีปนะได้ดีกว่าที่ปริมาณการเติมที่ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่จำนวนชั้นเส้นใยอะรามิดที่เท่ากัน ความเสียหายหลังชิ้นงานได้รับแรงปะทะทางซีปนะแล้วแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบแรงปะทะทางซีปนะที่จำนวนชั้นเส้นใยอะรามิดที่ 15 และ 20 ชั้น ที่ปริมาณการเติมอนุภาค MWCNT ที่ 0.25 และ 0.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

จำนวนชั้นเส้นใยอะรามิด	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก MWCNT	ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ (กรัม/ตร.ซม.)	ความเร็วกระสุน (เมตรต่อวินาที)	ผลการทดสอบ	รอยยุบตัว (มิลลิเมตร)
15	0.25	0.66	408	ไม่ทะลุ	10
	0.50	0.68	396	ไม่ทะลุ	12
20	0.25	0.89	394	ไม่ทะลุ	8
	0.50	0.92	401	ไม่ทะลุ	11

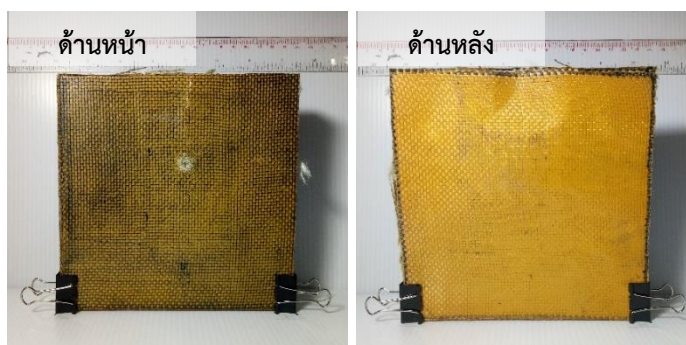


ชิ้นงานที่เติม MWCNT 0.25 wt% ความเร็วกระสุน 408 เมตรต่อวินาที

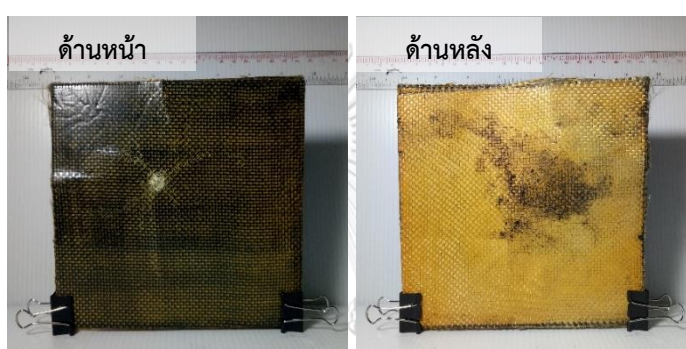


ชิ้นงานที่เติม MWCNT 0.5 wt% ความเร็วกระสุน 396 เมตรต่อวินาที

รูปที่ 4.4 ความเสียหายของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตหลังทดสอบแรงปะทะทางซีปนอะ ที่ปริมาณการเติม MWCNT ที่ 0.25 และ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จำนวนชั้นเส้นใยอะรามิด 15 ชั้น



ชิ้นงานที่เติม MWCNT 0.25 wt% ความเร็วกระสุน 394 เมตรต่อวินาที



ชิ้นงานที่เติม MWCNT 0.5 wt% ความเร็วกระสุน 401 เมตรต่อวินาที

รูปที่ 4.5 ความเสียหายของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตหลังทดสอบแรงปะทะทางซีปนอะ ที่ปริมาณการเติม MWCNT ที่ 0.25 และ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จำนวนชั้นเส้นใยอะรามิต 20 ชั้น

เมื่อเปรียบเทียบผลของจำนวนชั้นเส้นใยอะรามิตระหว่าง 15 และ 20 ชั้น ที่ปริมาณการเติมอนุภาค MWCNT ที่เท่ากันที่ปริมาณ 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยวิเคราะห์จากการเสียรูปที่เกิดขึ้นหลังชิ้นงานได้รับแรงปะทะทางซีปนอะแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ที่ด้านข้างของชิ้นงาน พบว่าถึงที่จำนวนชั้นเส้นใยอะรามิตที่ 15 ชั้น มีรอยยุบตัวหลังปะทะมากกว่ารอยยุบตัวที่จำนวน 20 ชั้นเส้นใยอะรามิตเพียงเล็กน้อย เนื่องจากรับแรงปะทะจากความเร็วกระสุนที่สูงกว่า แต่อย่างไรก็ตามที่จำนวนชั้นเส้นใยอะรามิตที่ 15 ชั้น เกิดการแตกระหว่างชั้นเส้นใย (Delamination) หลังได้รับแรงปะทะทางซีปนอะมากกว่าที่จำนวนชั้นเส้นใยอะรามิตที่ 20 ชั้น อาจจะเป็นผลจากความหนาของจำนวนชั้นที่น้อยเกินไป ดังนั้นจำนวนชั้นเส้นใยอะรามิตที่ 20 ชั้น จึงเป็นจำนวนชั้นที่เหมาะสมมากกว่า โดยมีประสิทธิภาพในการป้องกันกระสุนได้และมีรอยยุบตัวต่ำ มีความสามารถในการทรงรูปโดยรวมเมื่อได้รับแรงปะทะได้ดีกว่าที่จำนวนเส้นใยอะรามิตที่ 15 ชั้น ที่อาจไม่แข็งแรงเพียงพอหากได้รับแรงปะทะในนัดถัดไปในการรับแรงซีปนอะแบบหลายนัด ดังนั้นที่จำนวนชั้นเส้นใยอะรามิตที่ 20 ชั้น ที่ปริมาณการเติมอนุภาค MWCNT ที่ 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จึงมีประสิทธิภาพการป้องกันแรง

ปะทะทางซีปนะที่ดีที่สุด ซึ่งรูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นหลังได้รับแรงปะทะทางซีปนะจะถูกนำไปจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS-AUTODYN ต่อไป



(ก)

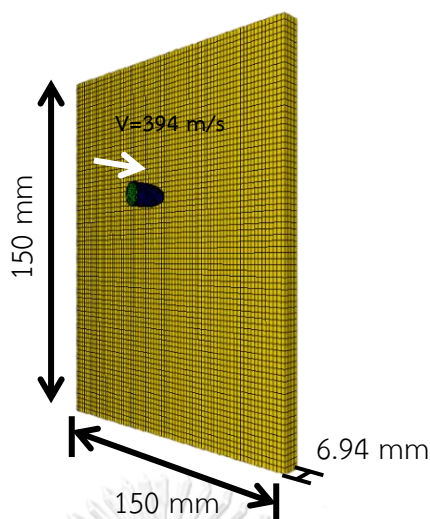


(ข)

รูปที่ 4.6 ด้านข้างของชิ้นงานวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิต ที่ปริมาณการเติม MWCNT ที่ 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ก) จำนวนเส้นใยอะรามิด 15 ชั้น (ข) จำนวนเส้นใยอะรามิด 20 ชั้น

4.5 การจำลองแรงปะทะทางซีปนะบนแผ่นเกราะกันกระสุน โดยโปรแกรม ANSYS-AUTODYN และการเปรียบเทียบรูปแบบความเสียหายจากการทดลอง

จากการทดสอบแรงปะทะทางซีปนะด้วยวิธีการทดลองพบว่าชิ้นงานที่ให้ประสิทธิภาพในการป้องกันแรงปะทะทางซีปนะที่ดีที่สุดและมีรอยยุบตัวต่ำคือ ชิ้นงานพอลิเมอร์คอมพอสิตจากเมทริกซ์พอลิเบนซอซอกซาซีน-ยูรีเทนที่ปริมาณการเติมอนุภาค MWCNT ที่ 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยจำนวนชั้นเส้นใยอะรามิด 20 ชั้น จึงนำชิ้นงานดังกล่าวมาจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS-AUTODYN โดยสร้างแบบจำลองสามมิติให้มีขนาด $150 \times 150 \text{ mm}^2$ และมีความหนา 6.94 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 4.7 ทดสอบด้วยกระสุน 9 มม. ที่ความเร็วปะทะ 394 เมตรต่อวินาที ตามความเร็วกระสุนที่ใช้ในการทดสอบแรงปะทะทางซีปนะในหัวข้อ 4.4 โดยตั้งสมมติฐานในการจำลองให้สมบัติของวัสดุในแนวระนาบมีค่าเท่ากัน ขอบทั้ง 4 ด้านของแบบจำลองถูกยึดอยู่กับที่ ไม่สามารถขยับหรือหมุนได้ทุกแนวแกน และการเสียรูปของวัสดุจะเกิดขึ้นเมื่อได้รับความเค้น หรือความเครียดที่มีค่าเกินกว่าค่าที่กำหนดไว้



รูปที่ 4.7 ขนาดแบบจำลองแผ่นเกราะกันกระสุนจากโปรแกรม ANSYS-AUTODYN

สมบัติของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ได้จากการจำลองด้วย ANSYS-AUTODYN แสดงดังตารางที่ 4.4 ค่าที่ใช้ในการเปรียบเทียบการเสียรูปที่เกิดขึ้นระหว่างการจำลองด้วย ANSYS-AUTODYN และวิธีการทดลอง ได้แก่ พื้นที่ความเสียหาย ความลึกของรอยยุบตัวที่เกิดขึ้น และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกระสุนที่ได้รับความเสียหายหลังปะทะชิ้นงาน

ตารางที่ 4.4 สมบัติของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตจากเมทริกซ์พอลิเบนซอซาซีน-ยูรีเทน ปริมาณการเติม MWCNT ที่ 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิด

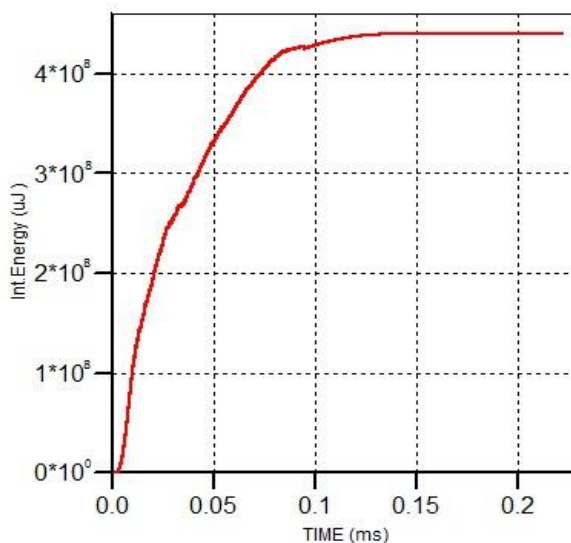
Equation of state	Orthotropic	Density (g/cm ³)	1.3
Young's modulus (kPa)	E_{xx}	E_{yy}	E_{zz}
	1.32×10^7	1.32×10^7	5.00×10^7
Poisson's ratio	ν_{xy}	ν_{yz}	ν_{zx}
	0.08	0.698	0.08
Shear modulus (kPa)	G_{xy}	G_{yz}	G_{zx}
	4.5×10^6	3.5×10^5	3.5×10^6
Strength: Elastic	Failure	Material stress/strain	
	ϵ_{xx}	ϵ_{yy}	ϵ_{zz}
	0.06	0.06	0.02

จากการจำลองด้วย ANSYS-AUTODYN พบว่าคุณสมบัติในการต้านทานแรงเฉือนมีความสำคัญอย่างมากในการเพิ่มความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุ วัสดุที่มีความต้านทานแรงเฉือนมากจะมีการเสียรูปที่ด้านหลังชิ้นงานลดลง และสมบัติด้านการต้านทานแรงดึงพบว่าเกี่ยวข้องกับพื้นที่ความเสียหายของชิ้นงาน วัสดุที่มีความต้านทานแรงดึงมาก พื้นที่ความเสียหายในแนวราบก็จะลดลง

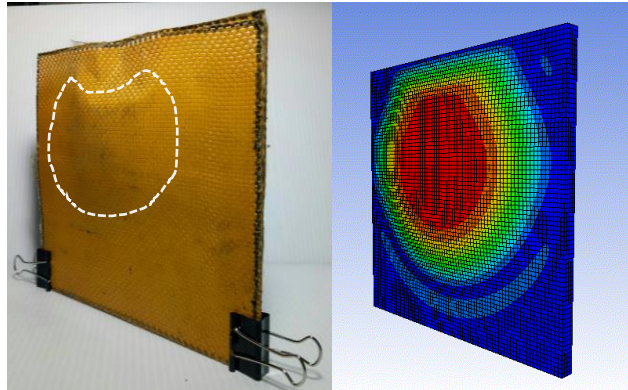
รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานภายในและเวลาที่กระสุนเข้าปะทะชิ้นงานที่ได้จากโปรแกรม ANSYS-AUTODYN พบว่าชิ้นงานมีค่าพลังงานภายในสูงสุดคือ 4×10^8 μJ โดยค่าพลังงานภายในมีค่าสูงขึ้นเมื่อกระสุนเข้าปะทะชิ้นงาน โดยในช่วงเวลาที่ 0 ถึง 0.1 มิลลิวินาที ค่าพลังงานภายในของชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและค่อยๆคงที่หลังจากเวลาที่ 0.13 มิลลิวินาที

จากการจำลองด้วย ANSYS-AUTODYN พบว่าพื้นที่ความเสียหายมีค่าเท่ากับ 131 ตารางเซนติเมตร รอยยุบตัวที่เกิดขึ้น 8.79 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางของกระสุนหลังได้รับแรงปะทะมีขนาด 18.99 มิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนค่าที่ได้จากวิธีการทดลองที่มีค่าพื้นที่ความเสียหายเท่ากับ 141 ตารางเซนติเมตร รอยยุบตัว 8 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางกระสุนที่ได้รับความเสียหายหลังได้รับแรงปะทะมีขนาด 22.01 มิลลิเมตร เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่างวิธีที่ได้จาก ANSYS-AUTODYN และวิธีการทดลอง พบว่าพื้นที่ความเสียหายมีความคลาดเคลื่อน 7.09% รอยยุบตัว 9.88% และเส้นผ่านศูนย์กลางกระสุนที่เสียรูป 13.72% แสดงดังรูปที่ 4.9 ดังนั้นสมบัติของวัสดุที่ใช้ในวิธีการจำลองแรงปะทะทางซีปนระบบแผ่นเกราะกันกระสุนที่แสดงในตารางที่ 4.4 มีความแม่นยำ และสามารถใช้อัตราสมบัติของวัสดุดังกล่าวไปใช้ในแบบจำลองหมวกกันกระสุนต่อไป

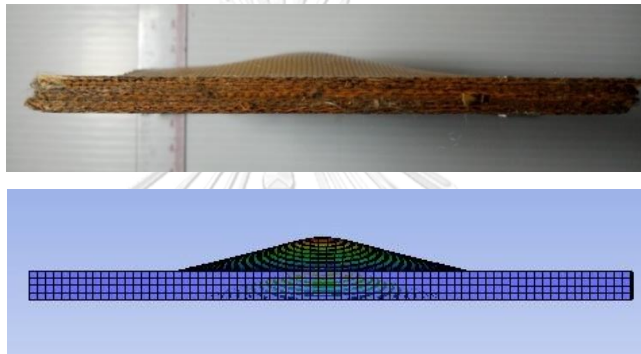
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



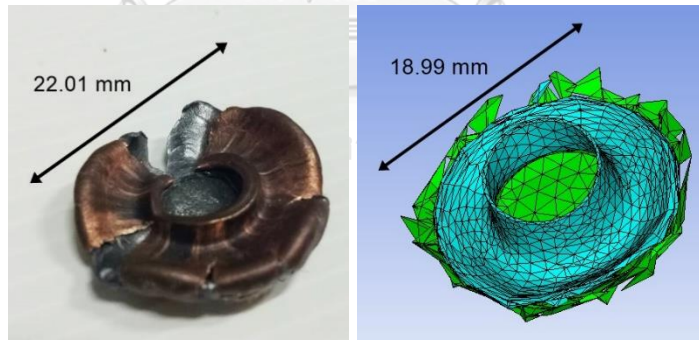
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานภายในและเวลาที่กระสุนเข้าปะทะชิ้นงาน



การเปรียบเทียบพื้นที่ความเสียหายจากวิธีการทดลองและวิธีการจำลองด้วย ANSYS-AUTODYN



การเปรียบเทียบรอยยุบตัวจากวิธีการทดลองและวิธีการจำลองด้วย ANSYS-AUTODYN



การเปรียบเทียบเส้นผ่านศูนย์กลางของกระสุนหลังได้รับแรงปะทะทางซีปนนะ
จากวิธีการทดลองและวิธีการจำลองด้วย ANSYS-AUTODYN

รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบรูปแบบความเสียหายระหว่างวิธีการทดลองและวิธีการจำลองด้วย ANSYS-AUTODYN ที่เกิดขึ้นหลังรับแรงทางซีปนนะด้วย 9 มม. ความเร็ว 394 เมตรต่อวินาที

4.6 การจำลองแรงปะทะทางซิปบนหมวกกันกระสุนด้วยโปรแกรม ANSYS-AUTODYN

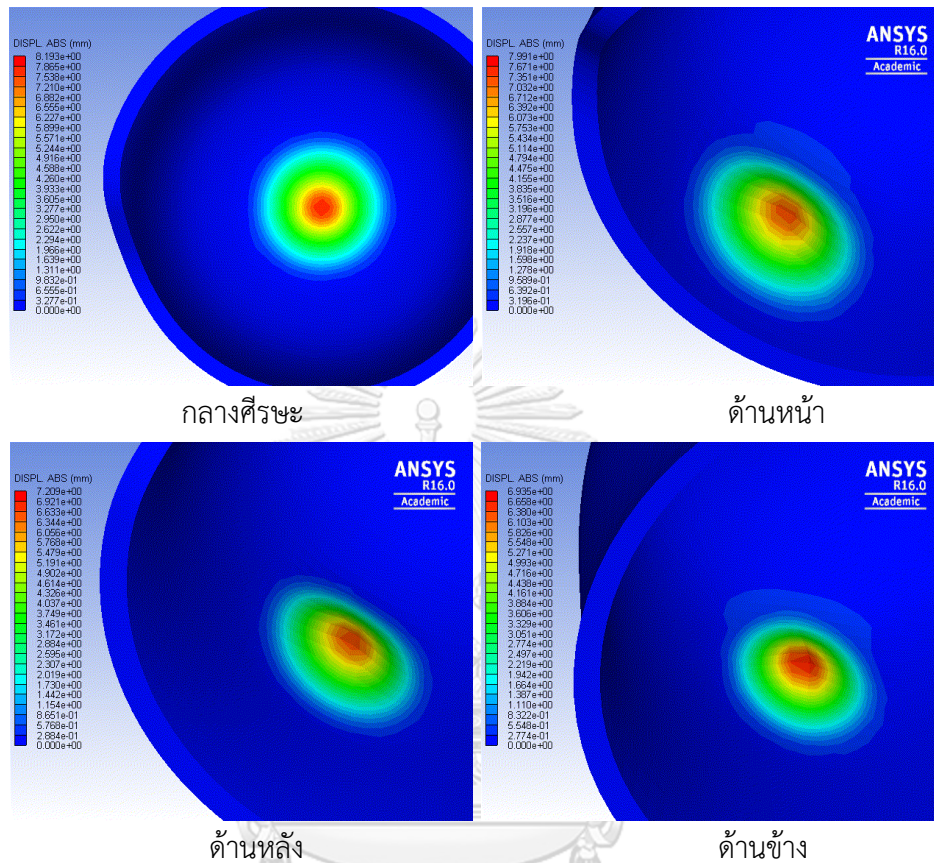
การทดสอบแรงปะทะทางซิปบนหมวกกันกระสุนที่ความหนาเท่ากับแผ่นเกราะ คือ 6.94 มิลลิเมตร (เส้นใยอะรามิดจำนวน 20 ชั้น) ทดสอบยิงด้วยกระสุน 9 มม. ที่ความเร็ว 358 เมตรต่อวินาที ตามมาตรฐาน NIJ-0106.01 ในระดับที่ 2 โดยทดสอบทั้งหมด 4 ตำแหน่ง ได้แก่ บริเวณด้านหน้า กลางศีรษะ ด้านข้าง และด้านหลัง ดังแสดงในรูปที่ 4.10 เพื่อหาค่ารอยยุบตัวที่เกิดขึ้นหลังได้รับแรงปะทะทางซิปนะ โดยกำหนดให้ขอบหมวกกันกระสุนถูกยึดอยู่กับที่ ไม่สามารถเคลื่อนไหวได้ในทุกแนวแกน และการเสียรูปจะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุได้รับค่าความเค้นหรือความเครียดเกินกว่าที่กำหนดไว้



รูปที่ 4.10 ตำแหน่งบนหมวกกันกระสุนที่ทดสอบแรงปะทะทางซิปนะ ด้วยกระสุน 9 มม.

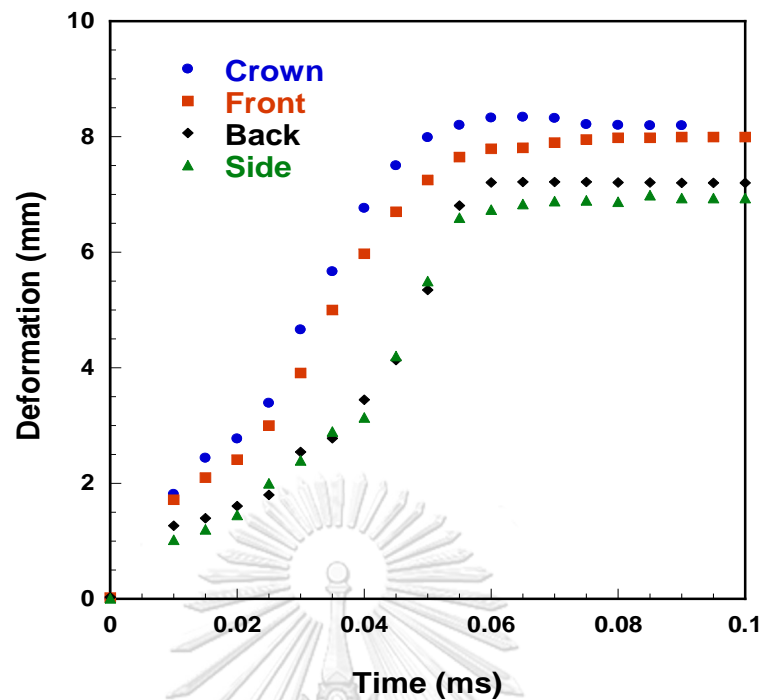
ผลการจำลองที่ได้จาก ANSYS-AUTODYN พบว่าที่ตำแหน่งต่างๆบนหมวกกันกระสุนสามารถป้องกันการเจาะทะลุของกระสุน 9 มม. ได้ที่ทุกตำแหน่งทดสอบ และมีรอยยุบตัวที่ทุกตำแหน่งไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ใน NIJ-0106.01 ว่าบริเวณกลางศีรษะและด้านหน้าต้องมีรอยยุบตัวไม่เกิน 16 มิลลิเมตร ส่วนด้านหลังและด้านข้างต้องมีรอยยุบตัวไม่เกิน 25.4 มิลลิเมตร ในงานวิจัยนี้พบว่ารอยยุบตัวที่เกิดขึ้นบริเวณกลางศีรษะมีค่ามากที่สุด เท่ากับ 8.19 มิลลิเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งอื่น โดยที่ด้านหน้าหมวกกันกระสุนมีรอยยุบตัวรองลงมา คือ 7.99 มิลลิเมตร ตามมาด้วยบริเวณด้านหลังและด้านข้างของหมวกกันกระสุนที่มีรอยยุบตัว เท่ากับ 7.21 มิลลิเมตร และ 6.94

มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งทดสอบที่เป็นความเสี่ยงที่ทำให้ผู้สวมใส่มีโอกาสเสียชีวิตมากที่สุดหากโดนแรงปะทะทางซีปนะที่บริเวณกลางศีรษะ



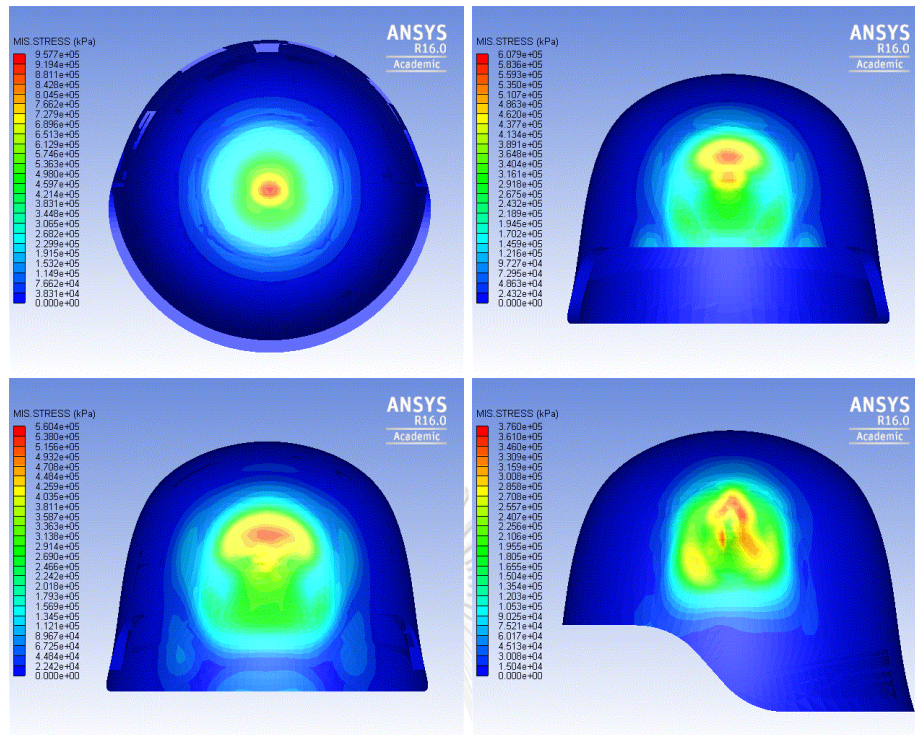
รูปที่ 4.11 รอยยุบตัวที่เกิดขึ้นด้านในหมวกกันกระสุนเมื่อได้รับแรงปะทะทางซีปนะจากกระสุน 9 มม.

เมื่อแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ของรอยยุบตัวที่เกิดขึ้นเมื่อกระสุนเคลื่อนที่เข้าสู่หมวกที่เวลาต่างๆดังแสดงในรูปที่ 4.12 พบว่าความชันของกราฟมีค่าสูงอย่างรวดเร็วที่บริเวณกลางศีรษะและด้านหน้า และสูงกว่าบริเวณด้านหลังและด้านข้างของหมวกด้วย ความชันที่เกิดขึ้นนี้แสดงให้เห็นว่าเวลาที่กระสุนเข้าปะทะกับหมวก บริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงรอยยุบตัวอย่างรวดเร็วเมื่อรับแรงปะทะจากกระสุนคือ บริเวณกลางศีรษะและด้านหน้าตามลำดับ ส่วนด้านหลังและด้านข้างเกิดการเปลี่ยนแปลงรอยยุบตัวใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ของรอยยุบตัวที่เกิดขึ้นในตำแหน่งที่ได้รับแรงปะทะทางซีปนบนหมวกกันกระสุนที่เวลาต่างๆ

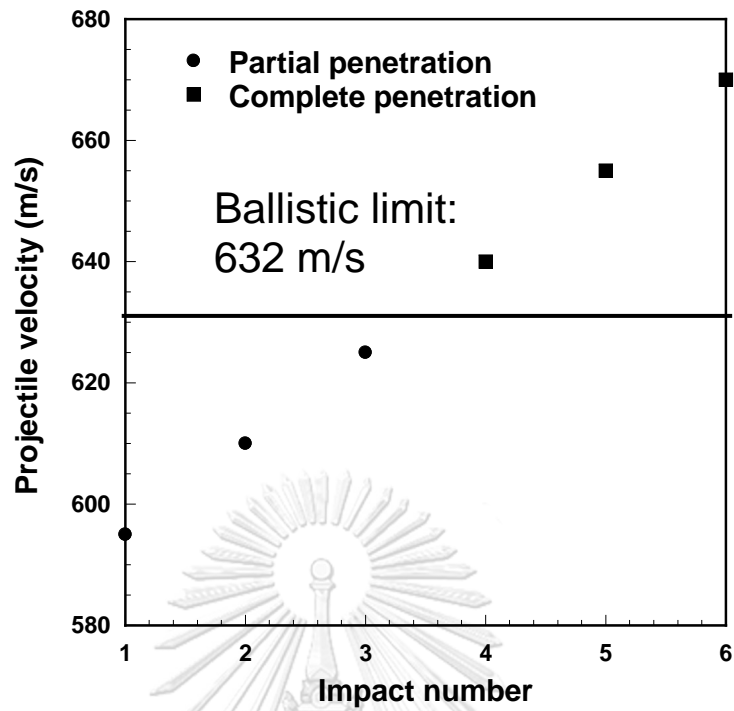
เมื่อพิจารณาความเค้นที่เกิดขึ้นภายในหมวกกันกระสุนเมื่อได้รับแรงปะทะทางซีปนด้วยกระสุน 9 มม. พบว่าความเค้นที่ตำแหน่งต่างๆให้ผลสอดคล้องกับค่ารอยยุบตัวที่เกิดขึ้น ตำแหน่งที่มีรอยยุบตัวสูงความเค้นก็จะมีค่าสูงตามไปด้วย โดยบริเวณที่มีความเค้นสูงที่สุด คือบริเวณกลางศีรษะ รองลงมาเป็นด้านหน้า ด้านหลัง และด้านข้าง โดยมีค่าความเค้นเท่ากับ 9.577×10^5 kPa, 6.079×10^5 kPa, 5.604×10^5 kPa และ 3.760×10^5 kPa ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.13



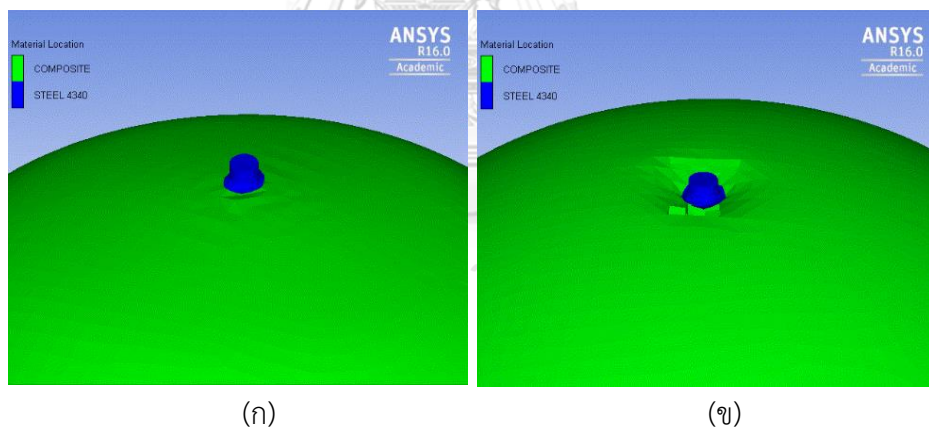
รูปที่ 4.13 ความเค้นสูงสุดที่เกิดบนหมวกกันกระสุนเมื่อได้รับแรงปะทะทางซิปนะด้วยกระสุน 9 มม.

4.7 การหาค่าขีดจำกัดทางซิปนะ (Ballistic limit, V_{50}) ด้วยกระสุนจำลองสะเก็ดระเบิด ตามมาตรฐาน MIL-STD-622F

จากมาตรฐาน MIL-STD-622F นิยามค่าขีดจำกัดทางซิปนะไว้ว่า การทดสอบยิงทั้งหมด 6 นัด ที่ประกอบไปด้วยช่วงความเร็วต่ำสุดทั้งหมด 3 นัด ที่จะทำให้เกิดการเจาะทะลุอย่างสมบูรณ์ และช่วงความเร็วสูงสุด 3 นัด ที่จะทำให้เกิดการเจาะทะลุเพียงบางส่วนของชิ้นงานทดสอบ [36] โดยค่า V_{50} จะเป็นค่าเฉลี่ยของความเร็วทดสอบ ที่ประกอบด้วยความเร็วนัดที่เกิดการทะลุอย่างสมบูรณ์ และนัดที่เกิดการเจาะทะลุเพียงบางส่วนในจำนวนนัดที่เท่ากัน ทดสอบด้วยกระสุนจำลองสะเก็ดระเบิด (Fragment simulating projectile, FSP) โดยค่าขีดจำกัดทางซิปนะของงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 4.14 เริ่มใช้ความเร็วทดสอบที่ 610 เมตรต่อวินาที ตามมาตรฐาน MIL-STD-622F กำหนด หากนัดแรกเกิดการเจาะทะลุเพียงบางส่วน ให้เพิ่มความเร็วอีก 15 เมตรต่อวินาที ภาพแสดงการเจาะทะลุเพียงบางส่วนที่ความเร็วกระสุน FSP ที่ 610 เมตรต่อวินาที และการเจาะทะลุอย่างสมบูรณ์ที่ความเร็วกระสุน FSP ที่ 670 เมตรต่อวินาที แสดงดังรูปที่ 4.15 เพื่อให้เกิดการเจาะทะลุอย่างสมบูรณ์ ขีดจำกัดทางซิปนะของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตจากเมทริกซ์พอลิเบนซอซาซีน-ยูรีเทน ที่ปริมาณการเติม MWCNT ที่ 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ได้จากการคาดคะเนด้วย ANSYS-AUTODYN บนแบบจำลองหมวกกันกระสุน ในงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 632 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.14 การทดสอบแรงปะทะทางซีปนอะ ด้วยกระสุนจำลองสะเก็ดระเบิด



รูปที่ 4.15 การทดสอบขีดจำกัดทางซีปนอะที่ความเร็วกระสุน (ก) 610 เมตรต่อวินาที (ข) 670 เมตรต่อวินาที ที่ทำให้เกิดการเจาะทะลุเพียงบางส่วน และเจาะทะลุอย่างสมบูรณ์ ตามลำดับ

รายการอ้างอิง

- [1] N.R. Council, Testing of Body Armor Materials: Phase III, The National Academies Press, Washington, DC, 2012.
- [2] L. Cannon, Behind armour blunt trauma--an emerging problem, *Journal of the Royal Army Medical Corps* 147 (2001) 87-96.
- [3] I. Marzi, A. Leppaniemi, P.M. Rommens, J.M. Rueger, European Journal of Trauma and Emergency Surgery Receives an Impact Factor, *European journal of trauma and emergency surgery : official publication of the European Trauma Society* 36 (2010) 299.
- [4] F. Larsson, L. Svensson, Carbon, polyethylene and PBO hybrid fibre composites for structural lightweight armour, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 33 (2002) 221-231.
- [5] N.N. Ghosh, B. Kiskan, Y. Yagci, Polybenzoxazines—New high performance thermosetting resins: Synthesis and properties, *Progress in Polymer Science* 32 (2007) 1344-1391.
- [6] M. Grujcic, G. Arakere, T. He, W.C. Bell, B.A. Cheeseman, C.F. Yen, B. Scott, A ballistic material model for cross-plyed unidirectional ultra-high molecular-weight polyethylene fiber-reinforced armor-grade composites, *Materials Science and Engineering: A* 498 (2008) 231-241.
- [7] M. Grujcic, W.C. Bell, L.L. Thompson, K.L. Koudela, B.A. Cheeseman, Ballistic-protection performance of carbon-nanotube-doped poly-vinyl-ester-epoxy matrix composite armor reinforced with E-glass fiber mats, *Materials Science and Engineering: A* 479 (2008) 10-22.
- [8] N.K. Naik, A.V. Doshi, Ballistic impact behaviour of thick composites: Parametric studies, *Composite Structures* 82 (2008) 447-464.
- [9] E.D. Pilpel, R.H. Holland, S.R.S. Johnson, Composite ballistic panels and method of use, Google Patents, 2009.
- [10] K.S. Pandya, J.R. Pothnis, G. Ravikumar, N.K. Naik, Ballistic impact behavior of hybrid composites, *Materials & Design* 44 (2013) 128-135.

- [11] S. Rimdusit, C. Jubsilp, S. Tiptipakorn, Polybenzoxazine Alloys, 2013.
- [12] A.K. Bandaru, L. Vetiyatil, S. Ahmad, The effect of hybridization on the ballistic impact behavior of hybrid composite armors, *Composites Part B: Engineering* 76 (2015) 300-319.
- [13] S.N. Monteiro, T.L. Milanezi, L.H.L. Louro, É.P. Lima, F.O. Braga, A.V. Gomes, J.W. Drelich, Novel ballistic ramie fabric composite competing with Kevlar™ fabric in multilayered armor, *Materials & Design* 96 (2016) 263-269.
- [14] L.H. Nguyen, T.R. Lässig, S. Ryan, W. Riedel, A.P. Mouritz, A.C. Orifici, A methodology for hydrocode analysis of ultra-high molecular weight polyethylene composite under ballistic impact, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 84 (2016) 224-235.
- [15] B.Z. Jang, L.C. Chen, L.R. Hwang, J.E. Hawkes, R.H. Zee, The response of fibrous composites to impact loading, *Polymer Composites* 11 (1990) 144-157.
- [16] H. Ishida, T. Agag, *Handbook of Benzoxazine Resins*, 2011.
- [17] M. Okhawilai, S. Rimdusit, Chapter 35 - Hard Armor Composites From Ballistic Fiber-Reinforced Polybenzoxazine Alloys A2 - Ishida, Hatsuo, in: P. Froimowicz (Ed.), *Advanced and Emerging Polybenzoxazine Science and Technology*, Elsevier, Amsterdam, 2017, pp. 699-723.
- [18] S. Rimdusit, C. Jubsilp, S. Tiptipakorn, Newly High-Performance Wood-Substituted Composites Based on Polybenzoxazines, in: S. Rimdusit, C. Jubsilp, S. Tiptipakorn (Eds.), *Alloys and Composites of Polybenzoxazines: Properties and Applications*, Springer Singapore, Singapore, 2013, pp. 83-115.
- [19] C. Jubsilp, T. Takeichi, S. Rimdusit, Property enhancement of polybenzoxazine modified with dianhydride, *Polymer Degradation and Stability* 96 (2011) 1047-1053.
- [20] S. Rimdusit, W. Bangsen, P. Kasemsiri, Chemorheology and thermomechanical characteristics of benzoxazine-urethane copolymers, *Journal of Applied Polymer Science* 121 (2011) 3669-3678.
- [21] S. Rimdusit, T. Mongkhonsi, P. Kamonchaivanich, K. Sujirrote, S. Thiptipakorn, Effects of polyol molecular weight on properties of benzoxazine-urethane polymer alloys, *Polymer Engineering & Science* 48 (2008) 2238-2246.

- [22] S. Rimdusit, S. Pirstpindvong, W. Tanthapanichakoon, S. Damrongsakkul, Toughening of polybenzoxazine by alloying with urethane prepolymer and flexible epoxy: A comparative study, *Polymer Engineering & Science* 45 (2005) 288-296.
- [23] T.J. Singh, S. Samanta, Characterization of Kevlar Fiber and Its Composites: A Review, *Materials Today: Proceedings* 2 (2015) 1381-1387.
- [24] J.L.S. M.B. Mukasey, D.W. Hagy, Ballistic Resistance of Body Armor NIJ Standard-0101.06, U.S. Department of Justice, National Institute of Justice (2008).
- [25] S. Laurenzi, R. Pastore, G. Giannini, M. Marchetti, Experimental study of impact resistance in multi-walled carbon nanotube reinforced epoxy, *Composite Structures* 99 (2013) 62-68.
- [26] Q. Chen, R. Xu, D. Yu, Multiwalled carbon nanotube/polybenzoxazine nanocomposites: Preparation, characterization and properties, *Polymer* 47 (2006) 7711-7719.
- [27] J. Xiong, Z. Zheng, X. Qin, M. Li, H. Li, X. Wang, The thermal and mechanical properties of a polyurethane/multi-walled carbon nanotube composite, *Carbon* 44 (2006) 2701-2707.
- [28] H. Ning, S. Pillay, K.B. Thattai parthasarathy, U.K. Vaidya, Design and manufacturing of long fiber thermoplastic composite helmet insert, *Composite Structures* 168 (2017) 792-797.
- [29] M.S. Rajput, M.K. Bhuarya, A. Gupta, Finite Element Simulation of Impact on PASGT Army Helmet, *Procedia Engineering* 173 (2017) 251-258.
- [30] M. Rodríguez-Millán, T. Ito, J.A. Loya, A. Olmedo, M.H. Miguélez, Development of numerical model for ballistic resistance evaluation of combat helmet and experimental validation, *Materials & Design* 110 (2016) 391-403.
- [31] C.Y. Tham, V.B.C. Tan, H.P. Lee, Ballistic impact of a KEVLAR® helmet: Experiment and simulations, *International Journal of Impact Engineering* 35 (2008) 304-318.
- [32] NIJ 0106.01 Ballistic Helmets U.S. Department of Justice: National Institute of Justice, (1981).

- [33] F. Folgar, Thermoplastic matrix combat helmet with carbon-epoxy skin for ballistic performance, (2016) 437-456.
- [34] MIL-STD-662F: V50 Ballistic Test for Armor. Department of Defense Test Method Standard, (1987).
- [35] MIL-H-44099A MILITARY SPECIFICATION HELMET, GROUND TROOPS AND PARACHUTISTS (1986).
- [36] A.M.S. Hamouda, R.M. Sohaimi, A.M.A. Zaidi, S. Abdullah, Materials and design issues for military helmets, (2012) 103-138.
- [37] J. Breeze, J.C. Clasper, Determining the velocity required for skin perforation by fragment simulating projectiles: a systematic review, Journal of the Royal Army Medical Corps 159 (2013) 265.
- [38] CO-PD-05-04. Helmet Advanced Combat Helmet (ACH), (2007).
- [39] B.A. Cheeseman, T.A. Bogetti, Ballistic impact into fabric and compliant composite laminates, Composite Structures 61 (2003) 161-173.
- [40] F.W. Holly, A.C. Cope, Condensation Products of Aldehydes and Ketones with o-Aminobenzyl Alcohol and o-Hydroxybenzylamine, Journal of the American Chemical Society 66 (1944) 1875-1879.
- [41] H. Ishida, Process for preparation of benzoxazine compounds in solventless systems, Google Patents, 1996.
- [42] L.I. Cavaco, J.A. Melo, Polyurethane: Properties, structure and applications, 2012.
- [43] M. Pegoraro, A. Galbiati, G. Ricca, ¹H nuclear magnetic resonance study of polyurethane prepolymers from toluene diisocyanate and polypropylene glycol, 2003.
- [44] J.M. Deitzel, P. McDaniel, J.W. Gillespie, High performance polyethylene fibers, (2017) 167-185.
- [45] Z.F. Maria Antoine Pushparaj, Composite integrated Material of Al layers with Kevlar material and the specification test result, Chemistry and Materials Research Vol 2, (2012).
- [46] D.R. Hartman, R.B. Jutte, T.W. Ramey, Ballistic materials, Google Patents, 1993.

- [47] V. Ramachandran, G. Balaganesan, Energy absorption characteristics of glass/epoxy nano composite laminates by impact loading, 2013.
- [48] P.N.B. Reis, J.A.M. Ferreira, Z.Y. Zhang, T. Benameur, M.O.W. Richardson, Impact response of Kevlar composites with nanoclay enhanced epoxy matrix, *Composites Part B: Engineering* 46 (2013) 7-14.
- [49] T. Kang, C. Youn Kim, K. Hong, Rheological behavior of concentrated silica suspension and its application to soft armor, 2012.
- [50] A. Majumdar, B.S. Butola, A. Srivastava, An analysis of deformation and energy absorption modes of shear thickening fluid treated Kevlar fabrics as soft body armour materials, *Materials & Design* 51 (2013) 148-153.
- [51] Y. Park, A.H. Baluch, Y. Kim, C.-G. Kim, High Velocity Impact Characteristics of Shear Thickening Fluid Impregnated Kevlar Fabric, 2013.
- [52] H. Çallıoğlu, M. Sayer, E. Demir, Impact behavior of particles filled-glass/polyester composite plates, *Polymer Composites* 32 (2011) 1125-1133.
- [53] D. Carolan, A. Kinloch, A. Ivankovic, S. Sprenger, A. Taylor, Toughening of epoxy-based hybrid nanocomposites, 2016.
- [54] M. Rahman, M. Hosur, S. Zainuddin, U. Vaidya, A. Tauhid, A. Kumar, J. Trovillion, S. Jeelani, Effects of amino-functionalized MWCNTs on ballistic impact performance of E-glass/epoxy composites using a spherical projectile, *International Journal of Impact Engineering* 57 (2013) 108-118.
- [55] M.G. Mohamed, R.C. Lin, S.W. Kuo, Chapter 36 - Polybenzoxazine/Carbon Nanotube Composites A2 - Ishida, Hatsuo, in: P. Froimowicz (Ed.), *Advanced and Emerging Polybenzoxazine Science and Technology*, Elsevier, Amsterdam, 2017, pp. 725-738.
- [56] C.L. Rao, V. Narayanamurthy, K.R.Y. Simha, Modeling Deformation and Failure Under Impact, *Applied Impact Mechanics*, John Wiley & Sons, Ltd 2016, pp. 133-169.
- [57] O.D. Padraic, C. Anderson, G. J. Friesenhahn, C. H. Parr, *A Constitutive Formulation for Anisotropic Materials Suitable for Wave Propagation Computer Programs*, 1992.

- [58] M. Bhattacharya, Polymer Nanocomposites-A Comparison between Carbon Nanotubes, Graphene, and Clay as Nanofillers, *Materials (Basel)* 9 (2016).
- [59] A. Jumahat, C. Soutis, S.A. Abdullah, S. Kasolang, Tensile Properties of Nanosilica/Epoxy Nanocomposites, *Procedia Engineering* 41 (2012) 1634-1640.
- [60] M. Naeimirad, A. Zadhoush, R.E. Neisiany, Fabrication and characterization of silicon carbide/epoxy nanocomposite using silicon carbide nanowhisker and nanoparticle reinforcements, *Journal of Composite Materials* 50 (2015) 435-446.
- [61] I. Bassyouni Mohamed, M.S. Abdel-Hamid Shereen, H. Abdel-Aziz Mohamed, S. Zoromba Mohamed, Mechanical and viscoelastic study of functionalized MWCNTs/epoxy/Kevlar composites, *Polymer Composites* 0 (2017).
- [62] C.P. Rejisha, S. Soundararajan, N. Sivapatham, K. Palanivelu, Effect of MWCNT on Thermal, Mechanical, and Morphological Properties of Polybutylene Terephthalate/Polycarbonate Blends, *Journal of Polymers* 2014 (2014) 1-7.
- [63] I. Taraghi, A. Fereidoon, A. Mohyeddin, The effect of MWCNTs on the mechanical properties of woven Kevlar/epoxy composites, *Steel and Composite Structures* 17 (2014) 825-834.
- [64] B. Shirkavand Hadavand, K. Mahdavi Javid, M. Gharagozlou, Mechanical properties of multi-walled carbon nanotube/epoxy polysulfide nanocomposite, *Materials & Design* 50 (2013) 62-67.
- [65] L. Dumas, L. Bonnaud, P. Dubois, Chapter 38 - Polybenzoxazine Nanocomposites: Case Study of Carbon Nanotubes A2 - Ishida, Hatsuo, in: P. Froimowicz (Ed.), *Advanced and Emerging Polybenzoxazine Science and Technology*, Elsevier, Amsterdam, 2017, pp. 767-800.
- [66] J. Gibson, J. McKee, G. Freihofer, S. Raghavan, J. Gou, Enhancement in ballistic performance of composite hard armor through carbon nanotubes, *International Journal of Smart and Nano Materials* 4 (2013) 212-228.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวจัสมิน ดวงคำสวัสดิ์ เกิดเมื่อวันที่ 25 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 เข้าศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนศรีสุริโยทัย สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ในปี 2558 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2559

การเผยแพร่ผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

J. Daungkumsawat, M. Okhawilai, T. Parnklang, and S. Rimdusit, Tensile behaviors of multi-walled carbon nanotube filled polybenzoxazine/urethane alloys reinforced with aramid fiber, Oral Presentation, Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON2018), The Throne International Convention Centre, Songkla, Thailand, February 7-9, 2018



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY