การวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการต้านทานของการเจาะทะลุของกระสุนบนแผ่นเกราะเซรามิกส์ร่วมกับแผ่นเกราะโลหะด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Analysis of Parameters Affecting Bullet Penetration Resistance on Ceramics Armor Plates in Combination with Metal Armor Plates Using Finite Element Methodology

ธนากร บุญหรั่ง

Thanakgon Boonhrong

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2565

การวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการต้านทานของการเจาะทะลุของกระสุนบนแผ่นเกราะเซรามิกส์ร่วมกับแผ่นเกราะโลหะด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Analysis of Parameters Affecting Bullet Penetration Resistance on Ceramics Armor Plates in Combination with Metal Armor Plates Using Finite Element Methodology

ธนากร บุญหรั่ง

Thanakgon Boonhrong

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ชื่อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการต้านทานของการเจาะทะลุของกระสุนบนแผ่นเกราะเซรามิกส์ร่วมกับแผ่นเกราะโลหะด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ชื่อ นามสกุล ธนากร บุญหรั่ง

ชื่อปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

สาขาวิชา และคณะ วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ประกอบ ชาติภุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่เรือตรี ดร.ทรงวุฒิ มงคลเลิศมณี

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้ให้ความเห็นชอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แล้ว

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำนรรค)

..... กรรมการ
(ดร.กฤษณ์ อภิญญาวิศิษฐ์)

..... กรรมการ
(ดร.ประกอบ ชาติภุกต์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่เรือตรี ดร.ทรงวุฒิ มงคลเลิศมณี)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ พันธุนะ)

วันที่ เดือน พ.ศ.

ชื่อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการต้านทานของการเจาะทะลุของกระสุนบนแผ่นเกราะเซรามิกส์ร่วมกับแผ่นเกราะโลหะด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
ชื่อ นามสกุล ธนากร บุญหรั่ง
ชื่อปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
สาขาวิชา และคณะ วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนลงบนแผ่นเกราะกันกระสุน และวิเคราะห์รูปแบบความเสียหายของแผ่นเกราะเซรามิกส์ร่วมกับแผ่นเกราะโลหะตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แผ่นเกราะสองแผ่นทำด้วยวัสดุสองชนิดได้รับการออกแบบและวิเคราะห์ กำหนดให้แผ่นแรกหรือแผ่นด้านหน้าที่กระสุนวิ่งเข้าปะทะทำด้วยวัสดุอลูมินาที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 95 และแผ่นที่สองคือวัสดุอลูมิเนียม 7075 T6 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ANSYS Explicit/Dynamic โดยมีตัวแปรที่สำคัญคือความหนาของแผ่นเกราะ 6, 8 และ 10 มิลลิเมตร เนื่องจากวัสดุอลูมินาร้อยละ 95 ถูกจัดประเภทเป็นวัสดุแข็งและเปราะ ดังนั้นในกระบวนการวิเคราะห์จึงเลือกใช้ทฤษฎีความเสียหายของ Johnson-Holmquist (JH-2) สำหรับกระสุนทำมาจากทังสเตนคาร์ไบด์ที่มีขนาด 7.62x51 มิลลิเมตร ถูกนำมาใช้ในการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ภายใต้รูปแบบความเสียหายของ Johnson-Holmquist Failure Model สำหรับวัสดุอลูมิเนียม 7075 T6 ถูกกำหนดให้ใช้แบบจำลองความเสียหาย Steinberg-Guinan Strength Model และการวิเคราะห์ภายใต้สภาวะของการเปลี่ยนรูปขนาดใหญ่ (Large deformation) อัตราความเครียดสูง (High Strain rate) และภายใต้อุณหภูมิสูง (High Temperature) จึงใช้แบบจำลองความเค้น Johnson-Cook เพื่อทำนายผลวิเคราะห์ที่ความเร็วในการยิงกระสุน 850 เมตรต่อวินาทีตามมาตรฐาน NIJ 3 จากการวิเคราะห์พบว่าเกราะไม่สามารถต้านทานการเจาะเกราะของกระสุนได้แต่อาจทำให้ความเร็วของกระสุนลดลงอย่างมาก และเมื่อนำแผ่นเกราะอลูมินาและแผ่นเกราะอลูมิเนียมมาซ้อนทับกันที่ความหนาแผ่นละ 6 มิลลิเมตร พบว่าแผ่นเกราะอลูมินาสามารถทำลายหัวกระสุนได้และแผ่นอลูมิเนียมจะทำหน้าที่ในการดูดซับพลังงานและหยุดการเคลื่อนที่ของกระสุนไม่ให้ผ่านแผ่นเกราะไปได้ อีกทั้งรูปแบบความเสียหายด้วยวิธีการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความสอดคล้องกัน จึงได้โมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อใช้ในการพัฒนาแผ่นเกราะเซรามิกส์ร่วมกับแผ่นเกราะโลหะต่อไป

คำสำคัญ: เกราะกันกระสุน, วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, การเจาะเกราะ

Thesis Title Analysis of Parameters Affecting Bullet Penetration Resistance on Ceramic Armor Plates in Combination with Metal Armor Plates Using Finite Element Methodology
Author Thanakgon Boonhrong
Degree Master of Engineering (Mechanical Engineering)
Major Program Mechanical Engineering Faculty of Engineering
Academic Year 2022

ABSTRACT

The purpose of this research was to analyze the parameters affecting the penetration resistance of bullets onto bulletproof armor plates. The finite element method was used to analyze the damage patterns of ceramic and metal armor plates according to the NIJ Level 3 standard. The design and analysis of two armor plates consisted of two distinct materials: the first plate, also known as the front plate which the bullet hit and which was made of 95% pure alumina material; and the second plate composed of 7075 T6 aluminum material. The ANSYS Explicit/Dynamic program adopted the finite element method as an analysis tool. The 6, 8, and 10 mm armor plate thicknesses were the main parameters. The Johnson-Holmquist (JH-2) damage theory was employed in the analysis process since 95% of the alumina material is considered to be hard and brittle. The 7.62x51mm tungsten carbide bullet was used in the finite element method simulation under the damage model of the Johnson-Holmquist Failure Model. For the 7075 T6 aluminum material, a damage model called the Steinberg-Guinan Strength Model was designated for application in the analysis. Under conditions of large deformation, high strain rate, and high temperature, the Johnson-Cook stress model was used to anticipate the analytical results from a bullet firing at a speed of 850 meters per second according to the NIJ 3 standard. Based on the analysis, the armor could not withstand the armor penetration of the bullet, but it might significantly reduce the speed of the shot. Additionally, when the alumina and aluminum armor plates were stacked at a thickness of 6 millimeters each, the alumina plate could destroy the bullet heads; and the aluminum plate served its function of absorbing energy and preventing bullet movement through the armor plate. There was consistency between the damage patterns discovered using the experimental and finite element methods. Therefore, a finite element model was obtained for further development of ceramic armor plates in combination with metal armor plates.
Keywords: Bulletproof Armor, Finite Element Methodology, Armor Penetration

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความเมตตากรุณา ช่วยเหลือและอนุเคราะห์จากอาจารย์ ดร.ประกอบ ชาติภุกต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และกรรมการคุมสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งกรุณามอบความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ ความช่วยเหลือในทุกด้านทั้งการแก้ปัญหาต่างๆ ตลอดจนตรวจสอบวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงยิ่งไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่เรือตรี ดร.ทรงวุฒิ มงคลเลิศมณี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ซึ่งกรุณามอบความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ ความช่วยเหลือในทุกด้านทั้งการแก้ปัญหาต่างๆ ตลอดจนตรวจสอบวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงยิ่งไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำนรรค ประธานกรรมการคุมสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ชี้แนะแนวทาง ให้ความรู้ ตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.กฤษณ์ อภิญญาวิศิษฐ์ ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ให้ความรู้ ชี้แนะแนวทาง ตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ประสิทธิ์ แพงเพชร และอาจารย์แจ๊ค ชุ่มอินทร์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิตเครื่องมือและแม่พิมพ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือในการเตรียมชิ้นงานขึ้นรูปแผ่นเกราะโลหะ

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา สมาชิกในครอบครัว และครูอาจารย์ทุกท่าน ผู้ที่ให้ความรู้ อนุเคราะห์ ส่งเสริม สนับสนุนด้านทุนทรัพย์และกำลังใจ ค่อยอบรมสั่งสอนจนประสบความสำเร็จในด้านการศึกษา

ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร รวมถึงเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัยครั้งนี้ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ดี ท้ายที่สุดนี้ ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะมีประโยชน์สำหรับผู้อ่านไม่มากก็น้อยต่อไป

ธนากร บุญหรั่ง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ ก

Abstract ข

กิตติกรรมประกาศ ค

สารบัญ ง

สารบัญตาราง ฉ

สารบัญรูป ช

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2

1.3 ขอบเขตของการศึกษา 2

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ 3

1.5 สถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล 3

บทที่ 2 ทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรม

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 4

2.2 มาตรฐานแผ่นเกราะกันกระสุน 15

2.3 การทบทวนวรรณกรรม 20

บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย

3.1 ระเบียบวิธีวิจัย 37

3.2 การออกแบบโมเดลแผ่นเกราะและกระสุน 40

3.3 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 41

3.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Solve-processing) 46

3.5 การเตรียมแผ่นเกราะสำหรับการทดลอง 51

บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน

4.1 ผลการดำเนินงานและผลการยิงกระสุนลงบนแผ่นเกราะ 52

4.2 ผลการสร้างไฟไนต์เอลิเมนต์โมเดลและผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 55

4.3 การเปรียบเทียบความเสียหายด้วยวิธีการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 58

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ
5.1 สรุปผล 61
5.2 ข้อเสนอแนะ 62

เอกสารอ้างอิง 64
ภาคผนวก ก บทความตีพิมพ์เผยแพร่และใบรับรองการนำเสนอ 68
ประวัติการศึกษาและการทำงาน 87

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 สมบัติของอะลูมินา 11

2.2 ระดับภัยคุกคามและการยิงทดสอบความสามารถกันกระสุนของเกราะ 15

2.3 สรุปการวินิจฉัยการปฏิบัติต่อผลการยิงทดสอบเกราะ 20

3.1 Properties and parameter JH of tungsten carbide 44

3.2 Properties and parameter JH-2 of alumina 95% 45

3.3 Properties and parameter of AL-7075 T6 45

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ลักษณะความเค้นใน 3 มิติ	5
2.2	เอลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า	7
2.3	โครงสร้างของอลูมินา	11
2.4	Ballistic test setup	19
2.5	แผนภาพการแบ่งเอลิเมนต์ที่กระสุนและแผ่นเกราะ	21
2.6	แผนภาพการเสียรูปของแผ่นเกราะสำหรับกระสุนขนาด 20 มม. ในช่วงเวลาต่างๆ	21
2.7	การเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ความหนา 20 มม.	22
2.8	แผนภาพการเสียรูปของแผ่นเกราะสำหรับกระสุนขนาด 9 มม. ในช่วงเวลาต่างๆ	22
2.9	การเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ความหนา 9 มม.	23
2.10	ภาพของกระสุนเกราะที่แตกต่างกันใช้สำหรับการศึกษา	23
2.11	มุมมองด้านบนของรูเจาะภายหลังการชนกับกระสุน 7.62 AP รอยแตกขนาดเล็กชี้ให้เห็น โดยเครื่องหมายลูกศรในการทำ Tempering time 24 และ 48 ชั่วโมง (a) Tempering time 2 ชั่วโมง (b) Tempering time 24 ชั่วโมง และ (c) Tempering time 48 ชั่วโมง	23
2.12	ภาคตัดแผ่นเกราะ Tempering time 48 ชม. (a) AP 7.62 มม. และ (b) AP 12.7 มม.	24
2.13	ไฟไนต์เอลิเมนต์โมเดลสำหรับกระสุนและแผ่นเกราะ	24
2.14	ผลการจำลองการเจาะของกระสุนที่ความเร็ว 630 m/s a) t=0, b) t=50 μs, c) t=90 μs, d) t=130 μs, และ e) t=630 μs	24
2.15	ภาพการเจาะทะลุของกระสุนบนแผ่นเกราะจากการทดลองที่ความเร็วกระสุน 738 m/s	25
2.16	การเจาะทะลุของกระสุนผ่านแผ่นเกราะฐานในช่วงเวลาต่างๆ	25
2.18	เปรียบเทียบผลการเจาะทะลุเกราะด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลอง	26
2.19	ความเสียหายของกระสุนหลังจากการทดสอบยิง	27
2.20	ความเสียหายเป้าเซรามิกส์อลูมินา/เกาะเหล็กผสม 603	28
2.21	สี่ขั้นตอนของการวิเคราะห์การเปลี่ยนรูปของรูเดี่ยว	29

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.22	การเจาะชิ้นงานหนา 1 มิลลิเมตร โดย (a) แข็งและ ข) กระสุนปืนที่เปลี่ยนรูปได้ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร (ความเร็วตกกระทบ = 47.8 เมตร/วินาที)	30
2.23	ภาพบางส่วนจากการจำลองเชิงตัวเลขแสดงกระสุนขนาด 7.62 มิลลิเมตร APM2ระหว่างการชนของแผ่นอลูมิเนียมที่มุมเฉียง β =60° ทั้งองค์ประกอบที่ผิดรูปมากเกินไปและการสึกกร่อนบางส่วนในแกนแข็งของกระสุน	31
2.24	ความเสียหายต่อแผ่นด้านหลังของเกราะ 2 ชนิด (a) เกราะเสริมไส้ Nextel/Kevlar (ความหนา = 5.5 มิลลิเมตร, V = 4.96 กิโลเมตรต่อวินาที) และ (ข) เกราะเสริมไส้ด้วยไม้ (ความหนา = 5.5 มิลลิเมตร, V = 4.86 กิโลเมตรต่อวินาที)	31
2.25	การเปรียบเทียบเทคนิคการวัดความลึก ในเป้า SiC Fþ-Steel 4304 เทียบกับ LRP ที่ทำจากโลหะผสมทังสเตนที่ความเร็วกระแทก (a) 1212 m/s, และ (b) 1264 m/s	32
2.26	แบบจำลองสามมิติ (3D) ครึ่งแบบจำลองสำหรับการกระแทกเป้าแบบเฉียงบนเหล็กสามชั้น 4340-SiC-steel 4340 : (a) ตำแหน่งวัสดุ (b) รายละเอียดแบบตาข่าย	33
2.27	การจำลองในรูปแบบสามมิติโครงสร้างตาข่าย : (a) แผ่นอลูมิเนียม; (b) ลูกเซรามิก	33
2.28	การเปรียบเทียบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของความเสียหายในระดับมหภาค ระหว่างการทดลองและการจำลองเชิงตัวเลข ตัวอย่างเป้าหมายของกลุ่ม M และ B ที่ความเร็วกระแทก 522 เมตรต่อวินาที และ 735.131 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ	34
2.28	ภาพแผ่นหลังการทดสอบ (a) หน้าเป้าหนา 20 มม., (ข) หน้าตัดเป้าหนา 20 มม., (ค) หน้าเป้าหนา 9 มม. และ (ง) ผิวเป้าด้านหลัง หนา 9 มม.	34
2.29	แผนผังของชุดเกราะคอมโพสิต (a) โครงสร้างของชุดเกราะคอมโพสิต (b) การจัดเรียงของเซรามิกส์และกาวที่ใช้ในด้านข้างของกระเบื้องเซรามิกส์ที่อยู่ติดกัน	35
2.30	ภาพตัดขวางของแผ่นเหล็กบางที่ถูกเจาะภายใต้ความเร็วกระแทกที่แตกต่างกัน	35

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.1	ขั้นตอนกระบวนการวิจัย	38
3.2	กรอบการวิจัย	39
3.3	แบบจำลอง 3 มิติของแผ่นเกราะกันกระสุนในมุมมองไอโซเมตริกและมุมมองด้านขวา และ C) แบบจำลองหัวกระสุน	41
3.4	ภาคตัดกระสุน A) กระสุน AP 7.62 mm และชิ้นส่วน: 1. ปลอกทองเหลือง 2. หัวจุด 3. แกนเหล็กชุบแข็ง 4. ฟิลเลอร์ฐานตะกั่ว 5. แก็ป และ B) ขนาดกระสุนมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร	41
3.5	ผลการประมวลผลของ Solver Output ที่ปกติ	47
3.6	สถานะกราฟปกติ	48
3.7	สถานะที่กราฟมีความผิดปกติ	48
3.8	เส้นกราฟ Energy Conservation ที่มีสถานะปกติ	48
3.9	ผลที่เป็นปกติของ Impulse ในแกน Z	49
3.10	Hourglass Energy ปกติ	50
3.11	ขั้นตอนการเตรียมแผ่นเกราะเซรามิกส์กับแผ่นโลหะ ก) อีพ็อกซี่ ข) การทาอีพ็อกซี่ลงบนแผ่นเซรามิกส์ ค) เซรามิกส์ชั้นเดียวและเซรามิกส์สองชั้น และ จ) คาดด้วยเทปกาวเพื่อใช้ตรวจสอบร่องรอยการเสียหายหลังการทดสอบยิง	51
4.1	ตำแหน่งอุปกรณ์ต่างๆ และระยะการยิงตามมาตรฐาน NIJ	53
4.2	แท่นยิงกระสุนและเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับบันทึกผลและควบคุมตามมาตรฐาน NIJ 3, 4	54
4.3	การจัดเตรียมแท่นยิงพร้อมตรวจสอบติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ สำหรับการทดสอบตามาตรฐาน NIJ IIIA (รองรับระดับ I, IIA, II, IIIA)	54
4.4	ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับแผ่นเกราะ ก) แผ่นเกราะเซรามิกส์ชั้นเดียวและยิงกระสุนตามมาตรฐาน NIJ 3A ข) แผ่นเกราะเซรามิกส์สองชั้นและยิงกระสุนตามมาตรฐาน NIJ 3	55
4.5	ผลการกำหนดขนาดและแบ่งเอลิเมนต์	56
4.6	ผลการวิเคราะห์ ก) การเจาะทะลุของแผ่น AL-7075 T6 หนา 10 มม. ข) ลักษณะการเสียหายของกระสุน 7.62x51 มม. ค) การเจาะทะลุของแผ่นอลูมินา 95% ที่ความหนา 10 มม. และ ง) ลักษณะการเสียหายของกระสุน 7.62x51 มม.	57

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.7	ลักษณะรอยแตกของแผ่นที่ 1 วัสดุอลูมินา 95% (Time step = 50 ms)	57
4.8	ลักษณะความเสียหายของแผ่นเกราะและกระสุน 7.62x51 mm, Time step = 37 ms	58
4.9	ความเสียหายของแผ่นเกราะเซรามิกส์และอลูมิเนียม ก) และ ข) ผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์จากงานวิจัย ค) และ ง) ผลการทดสอบการยิงจริง จ) ผลทดสอบการยิงด้วยชิ้นกาวที่บางของ J. Lo pez-Puente et al. [37] และ ง) ความเสียหายของแผ่นเซรามิกส์จากงานวิจัยของ J. Lo pez-Puente et al. [37]	59

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในด้านหนึ่งของการวิจัยทางวิศวกรรมเครื่องกลกับความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีวัสดุชั้นสูงมีความเกี่ยวข้องกันอย่างลึกซึ้ง มีการนำมาประยุกต์ใช้กับงานทางด้านการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ต้องมีการศึกษาเทคโนโลยีวัสดุขั้นสูง (Advanced Materials) มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน โดยการศึกษาวิจัยพัฒนาองค์ความรู้เทคโนโลยีและเทคนิคด้านการวิเคราะห์ทดสอบให้เป็นไปตามมาตรฐาน เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ และเพื่อนำมาแก้ปัญหาทางด้านวิศวกรรมเครื่องกล ตัวอย่างการวิจัยทางด้านวัสดุ เช่น เส้นใยและวัสดุคอมโพสิต ไบโอพอลิเมอร์ นาโนคอมโพสิต และ วัสดุขนาดนาโนของคาร์บอน เป็นต้น ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษได้ถูกนำมาพัฒนาใช้งานเฉพาะด้านมากขึ้น ในการออกปฏิบัติหน้าที่ของเจ้าหน้าทั้งทหาร ตำรวจ หรือเจ้าหน้าที่อาสาต่างๆ ในการระงับเหตุความไม่สงบหรือแม้กระทั่งการออกตรวจดูแลความเรียบร้อย เสื้อเกราะกันกระสุนถือว่ามีความสำคัญต่อเจ้าหน้าที่ในการลดความรุนแรงในการเจาะทะลุร่างกายไม่ให้เกิดอันตรายและความสูญเสีย ดังนั้นเกราะกันกระสุนควรจะสามารถทำลายหัวกระสุนอีกทั้งควรจะดูดซับแรงกระแทกจากลำกระสุนและป้องกันไม่ให้ทะลุผ่านเกราะไปได้ เพื่อผู้ที่ได้สวมใส่จะไม่ได้รับการบาดเจ็บหรือเกิดบาดแผลภายใต้จุกระแทก โดยเฉพาะในด้านความมั่นคงเพื่อใช้ในการปฏิบัติหน้าที่ในพื้นที่ที่ถูกโจมตีด้วยอาวุธต่างๆ โดยเฉพาะเจ้าหน้าที่ในพื้นที่ที่เสี่ยงภัยและมีการต่อสู้ที่มีความจำเป็นเพื่อป้องกันชีวิตของกำลังพล ดังนั้นจึงมีการดำเนินการวิจัยและพัฒนาเกราะกันกระสุนให้มีศักยภาพ

การป้องกันการเจาะทะลุของกระสุนปืนชนิดต่างๆ เพื่อสร้างนวัตกรรมที่สามารถมาใช้งานได้จริง มีน้ำหนักเบาเหมาะกับการใช้งาน สามารถนำมาผลิตเพื่อลดการนำเข้าจากต่างประเทศ โดยใช้องค์ความรู้ทางวิศวกรรม ในด้านการออกแบบเกราะกันกระสุน วัสดุที่นำประยุกต์ใช้ในการผลิต กระบวนการผลิต เทคนิคในการประกอบ และการกำหนดพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์ และได้มาซึ่งแผ่นเกราะกันกระสุนที่สามารถป้องกันกระสุนได้อย่างมีประสิทธิภาพ แผ่นเกราะกันกระสุนมีหลายแบบขึ้นกับวัตถุประสงค์กับการนำไปใช้ อาจแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ 1 แผ่นเกราะกันกระสุนที่ใช้กับมนุษย์ ที่มีน้ำหนักไม่มากนักเหมาะสมกับการสวมใส่เพื่อป้องกันกระสุน 2.แผ่นเกราะกันกระสุนที่ใช้กับยานพาหนะ ซึ่งมีน้ำหนักมากกว่า

ในการออกแบบเกราะกันกระสุนเพื่อป้องกันอันตรายจากการถูกทำร้ายนั้น มีความจำเป็นจะต้องมีการออกแบบรูปทรงของเกราะกันกระสุน สร้างเกราะกันกระสุนโดยการเลือกวัสดุที่เหมาะสมมาใช้ผลิตเพื่อป้องกันการเจาะทะลุดังกล่าว ต่อจากนั้นต้องมีแนวทางในการวิเคราะห์ที่เหมาะสมเพื่อ

เป็นการจำลองและคาดการณ์ความเสียหายที่เกิดขึ้น โดยระเบียบวิธีวิจัยที่นิยมใช้ในการวิจัยคือการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ในการออกแบบการป้องกันกระสุนตามมาตรฐาน National Institute of Justice ซึ่งต่อไปจะเรียกว่า มาตรฐาน NIJ ซึ่งประเทศไทยและอีกหลายประเทศใช้มาตรฐานนี้สำหรับการทดสอบเกราะป้องกันกระสุนและวัสดุกันกระสุน ตามมาตรฐาน NIJ มี 6 ระดับ สำหรับงานวิจัยนี้จะอยู่ภายใต้ขอบเขตมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 เพื่อหาคำตอบของผลลัพธ์ที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการต้านทางการเจาะทะลุของกระสุนบนแผ่นเกราะเซรามิกส์ร่วมกับแผ่นเกราะโลหะ โดยในการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน NIJ 3 จะใช้ด้วยกระสุนขนาด 7.62x51 มิลลิเมตร ความเร็วกระสุน 847± 9.1 เมตรต่อวินาที ผลที่ได้รับจากการจำลอง วิเคราะห์ คือทำให้สามารถลดระยะเวลาในการทดสอบจริง ลดงบประมาณในการวิจัยและสามารถนำผลจากการจำลองมาเปรียบเทียบการทดสอบจริงบางกรณี เพื่อวิเคราะห์ผลการแตกต่างระหว่างการทดสอบจริงกับการจำลองทางไฟในอิลิเมนต์ (FEM) โดยเงื่อนไขในการออกแบบและวิเคราะห์ของงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย 1. วัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์เบื้องต้นคือแผ่นเกราะเซรามิกส์ร่วมกับแผ่นเกราะโลหะ 2. วิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนเอลิเมนต์ (FEA) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Ansys Explicit/Dynamic 3. การจัดวางแผ่นเป็นแบบซ้อนแผ่นอย่างน้อย 1 แผ่น 4. พารามิเตอร์ที่สำคัญคือ ความหนาของแผ่นเกราะเซรามิกส์ร่วมกับแผ่นเกราะโลหะที่ต้องปรับเปลี่ยน จำนวนชั้นของแผ่นเกราะ และ 5. โมเดลสำหรับกระสุนปืนทำจาก Tungsten Carbide ขนาด 7.62x51 มิลลิเมตร โดยเลือกใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์และจำลองผลลัพธ์ ทั้งนี้การพิสูจน์ความถูกต้องจะใช้รูปแบบการ Pre-processing และ Solve- Processing เพื่อต่อยอดผลการออกแบบและวิเคราะห์ของงานวิจัยที่ผ่านมา โดยคาดหวังผลลัพธ์ที่ได้รับคือ องค์ความรู้ที่จะสามารถนำไปใช้ในการออกแบบและสร้างแผ่นเกราะกันกระสุนที่สามารถใช้งานได้ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อแผ่นเกราะกันกระสุน NIJ ระดับ 3

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์รูปแบบความเสียหายและความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุของแผ่นเกราะเซรามิกส์ร่วมกับแผ่นเกราะโลหะตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์เบื้องต้นคือแผ่นเกราะเซรามิกส์ร่วมกับแผ่นเกราะโลหะ

1.3.2 วิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนเอลิเมนต์ (FEA) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Ansys Explicit/Dynamic

1.3.3 การจัดวางแผ่นเป็นแบบซ้อนแผ่นอย่างน้อย 1 แผ่น

1.3.4 โมเดลสำหรับกระสุนปืนทำจาก Tungsten Carbide ขนาด 7.62x51 มิลลิเมตร

1.3.5 พารามิเตอร์ที่สำคัญคือ ความหนาของแผ่นเกราะเซรามิกส์ร่วมกับแผ่นเกราะโลหะที่ต้องปรับเปลี่ยน จำนวนชั้นของแผ่นเกราะ

1.3.6 การกำหนด constrains จะดำเนินการยึดขอบทั้ง 4 ด้านของแผ่นเกราะเป็นแบบ Fixed เท่านั้น

1.3.7 คอมพิวเตอร์ประสิทธิภาพสูงที่ใช้ในการวิเคราะห์ กำหนดข้อมูลจำเพาะ

1.3.7.1 หน่วยประมวลผล (CPU) AMD Ryzen Threadripper 2990WX

1.3.7.2 ระบบปฏิบัติการ (Manboard) MEG X399 creation (MS-7B92)

1.3.7.3 หน่วยความจำ (Memory) Type DDR4 size 96 Gbytes Channel # Quad NB Frequency Memory slot DDR-2132 (1066 MHz) corsair

1.3.7.4 กราฟิก (Graphics) NVDIA Quadro RTX 4000

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.4.1 ได้ผลการทดลองของผลกระทบแผ่นเกราะเซรามิกส์ร่วมกับแผ่นเกราะโลหะ

1.4.2 ได้ผลความต้านทานของการเจาะทะลุของแผ่นเกราะเซรามิกส์ร่วมกับแผ่นเกราะโลหะ

1.4.3 ได้ต้นแบบโมเดลแผ่นเกราะโลหะกันกระสุนสำหรับผลิตแผ่นเกราะเซรามิกส์ร่วมกับแผ่นเกราะโลหะที่ผ่านมาตรฐานสากล NIJ ระดับ 3

1.4.4 ได้บทความตีพิมพ์ในวารสารและมีบทความเผยแพร่ในงานสัมมนาทางวิชาการ

1.5 สถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

1.5.1 สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถนนประชาราษฎร์1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทรศัพท์/โทรสาร: 0 2836 3000 ต่อ 4138 โทรศัพท์มือถือ: -

1.5.2 โรงงานวัตถุระเบิดทหาร กรมการอุตสาหกรรมทหาร ศูนย์การอุตสาหกรรมป้องกันประเทศและพลังงานทหาร
ตำบลย่านมัทรี อำเภอพยุหะคีรี จังหวัดนครสวรรค์

บทที่ 2
ทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรม

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [1], [2]

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) เป็นวิธีทางตัวเลข เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรม ไม่ว่าจะเป็นการวิเคราะห์ทางโครงสร้าง (Structural) หรืออื่น ๆ โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะสามารถประมาณค่าผลเฉลยโดยการแก้สมการเชิงพีชคณิตแทนการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ ในการแก้ปัญหาดังกล่าวโครงสร้างหรือชิ้นงานจะถูกแบ่งออกเป็นชิ้นส่วนเล็ก ๆ (Element) ในจำนวนที่จำกัด (Finite) และผลเฉลยที่ได้จะเป็นคำตอบที่จุดต่อระหว่างเอลิเมนต์ (โหนด: Node) โดยที่แต่เอลิเมนต์จะมีผลเฉลยที่สามารถหาได้ง่าย และเมื่อนำมารวมกันจึงสามารถหาค่าผลเฉลยของทั้งโครงสร้างได้โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะสามารถให้ผลเฉลยของค่าการเสียรูปและแรงที่กระทำ ณ จุดหรือโหนด ๆ และค่าความเค้นและความเครียดที่แต่ละเอลิเมนต์ได้ ความเครียดกับการเสียรูปและความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นสิ่งจำเป็นในการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ตัวอย่างปัญหาใน 1 มิติ ความสัมพันธ์ระหว่างการเสียรูปกับความเครียดเป็นดังนี้

$$\varepsilon_x = \frac{du}{dx} \tag{2.1}$$

ซึ่งเป็นสมการสำหรับปัญหาที่มีการเสียรูปน้อย (Small Displacement) และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดมีค่าเท่ากับ

$$\sigma_x = E\varepsilon_x \tag{2.2}$$

โดยที่ σ_x คือค่าความเค้นในแนวแกน x และ E คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ

$$[D] = \frac{E}{(1+v)(1-2v)} \begin{bmatrix} 1-v & v & v & 0 & 0 & 0 \\ & 1-v & v & 0 & 0 & 0 \\ & & 1-v & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1-2v}{2} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1-2v}{2} & 0 \\ & & & & & \frac{1-2v}{2} \end{bmatrix} \tag{2.3}$$

เมื่อ $[D]$ คือ เมทริกซ์คุณสมบัติของวัสดุ

การหาสทิฟเนสเมทริกซ์สำหรับเอลิเมนต์แบบสปริง เมื่อสปริงที่มีค่านิจของสปริง (Stiffness) เท่ากับ k รับแรงดึงเท่ากับ F สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำต่อชิ้นงานกับระยะสปริงยืดตัวได้ตามสมการที่ (2.4)

$$F=kx \tag{2.4}$$

เมื่อนำเอาหลักการของสปริงตามสมการที่ (2.4) มาประยุกต์ใช้กับหลักการไฟไนต์เอลิเมนต์ จะสามารถเขียนสมการที่ (2.5) ใหม่ในลักษณะของเมทริกซ์ได้เป็น

$$f'=k'd' \tag{2.5}$$

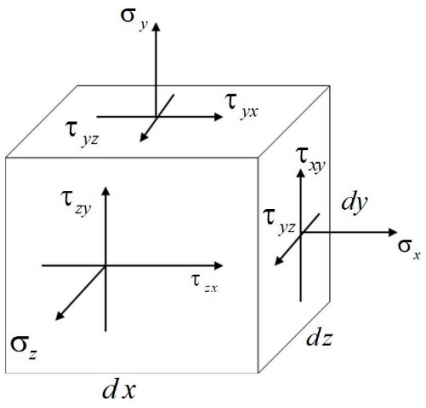
โดยที่ f' คือ เมทริกซ์ของแรงที่กระทำกับสปริง

k' คือ สทิฟเนสเมทริกซ์ของสปริง

d' คือ เมทริกซ์ของระยะยืด/หดตัวของสปริง

ในการวิเคราะห์เอลิเมนต์ในระบบ 3 มิตินั้น เอลิเมนต์ประเภทนี้จะให้คำตอบมากกว่า เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ หรือแบบแกนสมมาตร เอลิเมนต์แบบทรงสี่หน้า (Tetrahedral) เป็นเอลิเมนต์เบื้องต้นสำหรับ 3 มิติ ในส่วนของนี้จะยกตัวอย่างจากหนังสือไฟไนต์เอลิเมนต์เบื้องต้น ผู้แต่ง รศ.ดร. ธงชัย ฟองสมุทร หน้า 175-180

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดใน 3 มิติ ตามรูปที่ 2.1 คือลักษณะของความเค้นที่เกิดขึ้นในเอลิเมนต์แบบ 3 มิติ และเมื่อพิจารณาตามหลักการสมดุล (Equilibrium) จะได้ว่า



รูปที่ 2.1 ลักษณะความเค้นใน 3 มิติ [1]-[3]

$$\tau_{xy}=\tau_{yx} \qquad \tau_{yz}=\tau_{zy} \qquad \tau_{zx}=\tau_{xz} \tag{2.6}$$

ดังนั้นจะมีความเค้นเฉือนแค่ 3 ตัวเท่ากันที่ต้องพิจารณารวมกับความเค้นตั้งฉากจะได้เป็น

$$\{\sigma\}=\begin{Bmatrix}\sigma_x\\ \sigma_y\\ \sigma_z\\ \tau_{xy}\\ \tau_{yz}\\ \tau_{zx}\end{Bmatrix} \tag{2.7}$$

และความเค้นที่เกิดขึ้นในเอลิเมนต์จะมีดังนี้

$$\{\varepsilon\}=\begin{Bmatrix}\varepsilon_x\\ \varepsilon_y\\ \varepsilon_z\\ \gamma_{xy}\\ \gamma_{yz}\\ \gamma_{zx}\end{Bmatrix} \tag{2.8}$$

โดยที่

$$\varepsilon_x=\frac{\partial u}{\partial x},\ \varepsilon_y=\frac{\partial v}{\partial y},\ \varepsilon_z=\frac{\partial w}{\partial z}$$

$$\gamma_{xy}=\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}=\gamma_{yx},\qquad \gamma_{yz}=\frac{\partial v}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial y}=\gamma_{zy},\qquad \gamma_{zx}=\frac{\partial w}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial z}=\gamma_{xz} \tag{2.9}$$

และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเท่ากับ

$$\{\sigma\}=[\mathrm{D}]\{\varepsilon\} \tag{2.10}$$

โดยที่

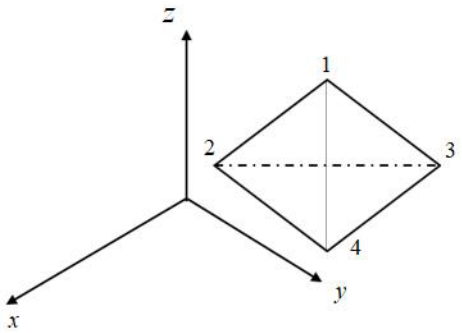
$$[D]=\frac{E}{(1+v)(1-2v)}\begin{bmatrix}1-v & v & v & 0 & 0 & 0\\ & 1-v & v & 0 & 0 & 0\\ & & 1-v & 0 & 0 & 0\\ & & & \frac{1-2v}{2} & 0 & 0\\ & & & & \frac{1-2v}{2} & 0\\ & & & & & \frac{1-2v}{2}\end{bmatrix} \tag{2.11}$$

การหาสทิฟเนสเมทริกซ์สำหรับเอลิเมนต์แบบทรงสี่หน้า

ขั้นตอนที่ 1 เลือกประเภทของเอลิเมนต์

พิจารณาเอลิเมนต์ 3 มิติแบบสี่หน้า (Tetrahedral) ดังรูปที่ 2.2 โดยที่ 1 เอลิเมนต์ประกอบด้วย 4 โหนด แต่ละโหนดมีระดับความเสรี (Degree of Freedom) เท่ากับ 3 และเมทริกซ์สำหรับการเสียรูปเท่ากับ

$$d = \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ \vdots \\ u_4 \\ v_4 \\ w_4 \end{Bmatrix} \tag{2.12}$$



รูปที่ 2.2 เอลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า [1]-[2]

ขั้นตอนที่ 2 เลือกฟังก์ชั่นของการเสียรูป

กำหนดให้การเสียรูปทั้งหมดยังอยู่ในช่วงของการยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic) อยู่ดังนั้นจะสามาถเขียนฟังก์ชั่นของการเสียรูป (u, v และ w) ในแต่ละแนวได้ดังนี้

$$\begin{aligned} u\,(x,y,z) &= a_1 + a_2 + a_3 y + a_4 z \\ v\,(x,y,z) &= a_5 + a_6 x + a_7 y + a_8 z \\ w\,(x,y,z) &= a_9 + a_{10} x + a_{11} y + a_{12} z \end{aligned} \tag{2.13}$$

เป็นฟังก์ชั่นของการเสียรูปของ u, v และ w โดยที่ในการวิเคราะห์นั้นสามารถทำได้เหมือนกันกับกรณีของเอลิเมนต์สามเหลี่ยมจะได้ว่า

$$u(x,y,z) = \frac{1}{6v}\begin{Bmatrix} (\alpha_1 + \beta_1 x + \gamma_1 y + \delta_1 z)u_1 + (\alpha_2 + \beta_2 x + \gamma_2 y + \delta_2 z)u_2 \\ +(\alpha_3 + \beta_3 x + \gamma_3 y + \delta_3 z)u_3 + (\alpha_4 + \beta_4 x + \gamma_4 y + \delta_4 z)u_4 \end{Bmatrix} \tag{2.14}$$

โดยที่

$$6v = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \tag{2.15}$$

$$\alpha_1 = \begin{vmatrix} x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad \beta_1 = \begin{vmatrix} 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_3 & z_3 \\ 1 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad \gamma_1 = \begin{vmatrix} 1 & x_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad \delta_1 = \begin{vmatrix} 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \\ 1 & x_4 & y_4 \end{vmatrix} \tag{2.16}$$

$$\alpha_2 = -\begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_3 & y_3 & z_3 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad \beta_2 = \begin{vmatrix} 1 & y_1 & z_1 \\ 1 & y_3 & z_3 \\ 1 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad \gamma_2 = -\begin{vmatrix} 1 & x_1 & z_1 \\ 1 & x_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad \delta_2 = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_3 & y_3 \\ 1 & x_4 & y_4 \end{vmatrix} \tag{2.17}$$

$$\alpha_3 = \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad \beta_3 = -\begin{vmatrix} 1 & y_1 & z_1 \\ 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad \gamma_3 = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & z_2 \\ 1 & x_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad \delta_3 = -\begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_4 & y_4 \end{vmatrix} \tag{2.18}$$

$$\alpha_4 = -\begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{vmatrix} \quad \beta_4 = \begin{vmatrix} 1 & y_1 & z_1 \\ 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_3 & z_3 \end{vmatrix} \quad \gamma_4 = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & z_3 \end{vmatrix} \quad \delta_4 = -\begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix} \tag{2.19}$$

สามารถที่จะเขียนรูปของเมทริกซ์สำหรับฟังก์ชั่นการเสียรูปเท่ากับ

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ w_2 \\ u_3 \\ v_3 \\ w_3 \\ u_4 \\ v_4 \\ w_4 \end{Bmatrix} \tag{2.20}$$

โดยที่

$$N_1 = \frac{(\alpha_1 + \beta_1 x + \gamma_1 y + \delta_1 z)}{6V} \qquad N_2 = \frac{(\alpha_2 + \beta_2 x + \gamma_2 y + \delta_2 z)}{6V}$$
$$N_3 = \frac{(\alpha_3 + \beta_3 x + \gamma_3 y + \delta_3 z)}{6V} \qquad N_4 = \frac{(\alpha_4 + \beta_4 x + \gamma_4 y + \delta_4 z)}{6V} \tag{2.21}$$

ขั้นตอนที่ 3 ระบุความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการเสียรูป และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดกับการเสียรูป ได้ว่า

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{Bmatrix} \tag{2.22}$$

หรือ

$$\{\varepsilon\} = [B]\{d\} \tag{2.23}$$

โดยที่

$$[\mathrm{B}] = \begin{bmatrix} \underline{\mathrm{B}_1} & \underline{\mathrm{B}_2} & \underline{\mathrm{B}_3} & \underline{\mathrm{B}_4} \end{bmatrix} \tag{2.24}$$

และ

$$\mathrm{B}_1 = \begin{bmatrix} \mathrm{N}_{1.x} & 0 & 0 \\ 0 & \mathrm{N}_{1.y} & 0 \\ 0 & 0 & \mathrm{N}_{1.z} \\ \mathrm{N}_{1.y} & \mathrm{N}_{1.x} & 0 \\ 0 & \mathrm{N}_{1.z} & \mathrm{N}_{1.y} \\ \mathrm{N}_{1.z} & 0 & \mathrm{N}_{1.x} \end{bmatrix} = \frac{1}{6\mathrm{V}} \begin{bmatrix} \beta_1 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_1 & 0 \\ 0 & 0 & \delta_1 \\ \gamma_1 & \beta_1 & 0 \\ 0 & \delta_1 & \gamma_1 \\ \delta_1 & 0 & \beta_1 \end{bmatrix} \tag{2.25}$$

และสำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

$$\{\sigma\}=[\mathrm{D}]\{\varepsilon\} \tag{2.26}$$

และ

$$\{\sigma\}=[\mathrm{D}][\mathrm{B}]\{\mathrm{d}\} \tag{2.27}$$

ขั้นตอนที่ 4 หาสทิฟเนสเมทริกซ์และสมการสทิฟเนส
เมื่อพิจารณาในรูปของสมการ $\underline{\mathrm{F}}=\underline{\mathrm{K}}\underline{\mathrm{d}}$ จะได้ว่า

$$[K]=\int\int\int_{v}[B]^{T}[D][B]dV \tag{2.28}$$

ในกรณีที่เป็นเอลิเมนต์แบบทรงสี่หน้า (Tetrahedron) จะมีค่าคงที่ ดังนั้น

$$[K]=V[B]^{T}[D][B] \tag{2.29}$$

ผลจากน้ำหนัก (Body Force)

$$\{f_b\}=\int\int\int[N]^{T}\{X\}dV \tag{2.30}$$

โดยที่

$$\{\mathrm{X}\}=\begin{Bmatrix}\mathrm{X_b}\\ \mathrm{Y_b}\\ \mathrm{Z_b}\end{Bmatrix} \tag{2.31}$$

ผลจากแรงที่ผิว (Surface Force) จาก

$$\{f_s\}=\int\int_{s}[N]^{T}\{T\}dS \tag{2.32}$$

โดยที่

$$\{\mathrm{T}\}=\begin{Bmatrix}\mathrm{p_x}\\ \mathrm{p_y}\\ \mathrm{p_z}\end{Bmatrix} \tag{2.33}$$

2.1.2 วัสดุแผ่นเกราะโลหะ

2.1.2.1 อลูมินา [4]

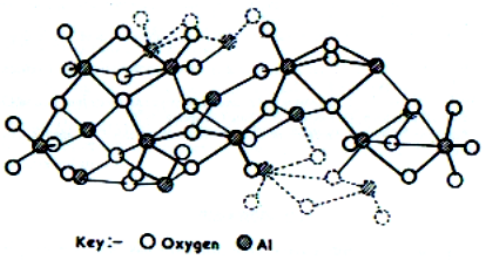
อลูมินาจัดว่าเป็นวัสดุที่มีมูลค่าสูงเนื่องจากมีสมบัติที่โดดเด่นหลายด้าน เช่น มีจุดหลอมเหลวที่สูง มีความแข็งสูง และมีเสถียรรูปทางเคมีที่สูง ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติของอลูมินา [4]

Properties	α-Al_2O_3
Density, g/cm^3	3.96
Melting temperature, °C	2054
Elastic modulus, GPa	520
Coefficient of thermal expansion (25-1000oC), 10^{-6}/°C	8.5
Indentation hardness, GPa	20

ไพลิน (Sapphire) คือ อลูมินาซึ่งอยู่ในรูปผลึกเดี่ยว (Single crystal) ซึ่งเป็นอลูมินาที่มีมูลค่าสูงมาก เนื่องจากถูกนำไปใช้เป็นเครื่องประดับ ส่วนอลูมินาที่อยู่ในรูปโครงสร้างผลึกที่ซับซ้อน (Polycrystalline) นั้นจะมีราคาที่ถูกกว่า แต่เป็นที่มีบทบาทอย่างมากในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยเฉพาะอุตสาหกรรมที่ต้องการใช้งานที่อุณหภูมิสูง อลูมินาถูกนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ อย่างหลากหลายเช่น ผลิตภัณฑ์อลูมินาที่ใช้ทำรูปบดและผนังกรุหม้อบด เครื่องมือตัดแต่ง วัสดุยานยนต์ ชิ้นส่วนลดอันตรายจากกระสุน ตลอดจนชิ้นส่วนของอวัยวะทดแทนในทางการแพทย์ เช่น ข้อต่อกระดูกเทียม เป็นต้น

อลูมินาที่มีความเสถียรมากที่สุดอยู่ในรูป อัลฟาอลูมินา (α-Al2O3) ซึ่งมีโครงสร้างเป็นเฮกซาโกนอล (Hexagonal) โดยมีออกซิเจนเรียงตัวกันแบบเฮกซาโกนอล และ มีอลูมิเนียมที่มีขนาดเล็กกว่าแทรกอยู่ในช่องออกตะฮีดรอล 2 ใน 3 ส่วนของช่องทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 2.3 อลูมินาซึ่งอยู่ในวัฏภาคที่อยู่ในสภาวะอุปเสถียร (Metastable) จะเกิดเมื่ออลูมินาถูกเตรียมโดยกระบวนการซึ่งต้องทำให้อลูมินาอยู่ในรูปของสารละลาย หรือ อยู่ในรูปไฮเดรตอลูมินา (Hydrated alumina)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของอลูมินา [4]

สมบัติโดยทั่วไปของอลูมินาจะขึ้นอยู่กับสิ่งเจือปน (Impurity) ที่มากับอลูมินาโดยส่วนใหญ่ แล้วสิ่งเจือปนที่มากับอลูมินาได้แก่ ซิลิก้า (SiO_2) แคลเซียม (Calcium) แมกนีเซียม (Magnesium) และ โพแทสเซียม (Potassium) ออกไซด์เหล่านี้ จะหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำกว่าอลูมินา และจะมีสถานะเป็นของเหลว ระหว่างกระบวนการเผาผนึก ของเหลวเหล่านี้จะส่งผลให้วัสดุมีความหนาแน่นที่สูงขึ้น แต่จะส่งผลให้ความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงนะความทนต่อการคืบ (Creep resistance) ของวัสดุลดลง

การคืบคือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างช้าๆของวัสดุภายใต้อุณหภูมิสูง โดยทั่วไปแล้วสิ่งเจือปนที่เป็น ซิลิก้า และออกไซด์ตัวอื่นๆ จะเปลี่ยนสภาพเป็นแก้วในระหว่างการทำให้วัสดุเย็นตัว แก้วเหล่านี้จะแยกตัวไปอยู่บริเวณขอบเกรน (Grain boundary) และสามารถไหลตัว (Flow) ได้ เมื่อวัดสูตรได้รับความร้อนสูงซึ่งเป็นการส่งเสริมการเกิดการคืบ ดังนั้นปริมาณสิ่งเจือปนที่ติดมากับอลูมินาจะแสดงถึงความสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือการคืบ ที่อุณหภูมิสูงของอลูมินา

2.1.2.2 โลหะผสมอลูมิเนียม 7075-T651 [5]

โลหะผสมอลูมิเนียม 7075-T651 มีอัตราส่วนความแข็งแรงของน้ำหนักที่ดี กล่าวคือ น้ำหนักเบาและมีความแข็งแรงดี จึงเป็นที่นิยมมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสถานที่ที่น้ำหนักอ่อนไหว เช่น แท่นเคลื่อนที่ความเร็วสูง โครงสร้างเครื่องบิน เฟรมจักรยาน ฯลฯ

การจำแนกประเภทของอลูมิเนียมอัลลอยด์ โลหะผสมอลูมิเนียมเป็นโลหะผสมที่มีคุณสมบัติเป็นโลหะตามอลูมิเนียม และเพิ่มองค์ประกอบโลหะผสมหลักหนึ่งหรือสององค์ประกอบในโลหะผสมอลูมิเนียมส่วนใหญ่ ปริมาณอลูมิเนียมอยู่ที่ 90–96% และส่วนประกอบของโลหะผสมประกอบด้วย ทองแดง สังกะสี แมงกานีส แมกนีเซียม ซิลิกอน เป็นต้น ตามประเภทของกระบวนการผลิตอลูมิเนียมอัลลอยด์สามารถแบ่งออกเป็นโลหะผสมอลูมิเนียมหลอมและโลหะผสมอลูมิเนียมหล่อโลหะผสมอลูมิเนียมหลอมผลิตขึ้นในรูปของแท่งโลหะหรือเหล็กแท่ง แล้วผลิตผ่านกระบวนการที่หลากหลาย เช่น การรีด การอัดขึ้นรูป การทำให้เสียรูป การวาด และอื่นๆ ผู้ใช้สามารถแปรรูปเป็นชิ้นส่วนโลหะผสมได้ โลหะผสมอลูมิเนียมหล่อเป็นโลหะผสมที่ทำโดยวิธีการหล่อ ส่วนประกอบโลหะผสมของโลหะผสมอลูมิเนียมหล่อมากกว่า 10% ในขณะที่ส่วนประกอบโลหะผสมของโลหะผสมอลูมิเนียมหล่อไม่เกิน 4% เนื่องจากองค์ประกอบที่มีการผสมมากขึ้น ความเหนียวก็จะยิ่งลดลง ดังนั้นในโครงการที่ใช้งานจริง ส่วนใหญ่จะใช้โลหะผสมอลูมิเนียมหลอม เช่น 6061, 7075, 5083, 1100 และแม้แต่ AL-li8090-t8771 ซึ่งเป็นโลหะผสมอลูมิเนียมหลอม

อลูมิเนียมอัลลอยสามารถแบ่งออกได้เป็นอลูมิเนียมอัลลอยที่ผ่านการอบด้วยความร้อนและอลูมิเนียมอัลลอยที่ไม่ผ่านความร้อน โลหะผสมอลูมิเนียมที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อนเป็นโลหะผสมที่มีส่วนประกอบของโลหะผสมหลัก (และส่วนประกอบของโลหะผสมทุติยภูมิบางส่วน) สามารถให้สารละลายที่เป็นของแข็งอย่างมีนัยสำคัญและการตกตะกอนให้แข็งตัวในระหว่างการอบชุบด้วย

ความร้อนและอายุของสารละลาย เพื่อปรับปรุงความแข็งแรงและความแข็ง สำหรับการเสริมความแข็งแกร่งของโลหะผสม แนวคิดบางอย่างจะเกี่ยวข้องในอนาคต เช่น การทำงานเย็น การชุบแข็งด้วยความเครียด และอื่นๆ การทำงานเย็น: การเสียรูปพลาสติกของโลหะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิและอัตราที่กำหนดเพื่อให้เกิดการแข็งตัวของความเครียด ตัวอย่างเช่น โดยการกลิ้ง การวาด และการเสียรูปพลาสติกอื่นๆ เพื่อปรับปรุงความแข็งแรง หลักการคือ การทำงานแบบเย็นสามารถก่อให้เกิดการเคลื่อนตัวและช่องว่างในโครงสร้างจุลภาค ยับยั้งการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างอะตอม และเพิ่มความแข็งแรงของโลหะผสม การชุบแข็งด้วยความเครียด: ปรับเปลี่ยนโครงสร้างโลหะผ่านการทำงานเย็นเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งและลดความเหนียว การบำบัดสารละลาย: วิธีการบำบัดด้วยความร้อน ซึ่งรวมถึงการให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์จนถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมและคงไว้ที่อุณหภูมินั้นเป็นเวลานานพอที่จะทำให้ตัวถูกละลายเข้าสู่สารละลายที่เป็นของแข็ง แล้วทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็วเพื่อรักษาตัวถูกละลายในสารละลายที่เป็นของแข็ง สำหรับโลหะผสมอลูมิเนียม การรักษาความร้อนด้วยสารละลายคือการให้ความร้อนแก่โลหะผสมที่อุณหภูมิสูงถึง 440–530 °C (อุณหภูมิเฉพาะที่เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบของโลหะผสม) เพื่อให้องค์ประกอบของโลหะผสมละลายในอลูมิเนียม และวัสดุจะอ่อนลง . โดยปกติจะถูกทำให้เย็น (ดับ) ในน้ำด้วยความเร็วสูงเพื่อรักษาการกระจายตัวขององค์ประกอบที่ถูกละลายในโลหะผสม

อลูมิเนียมอัลลอยด์ 7xxx องค์ประกอบการผสมหลักของโลหะผสมอลูมิเนียมคลาส 7 คือ สังกะสี โดยปกติจะมีทองแดงและแมกนีเซียมจำนวนหนึ่ง เนื่องจากการใช้สังกะสี โลหะผสมนี้จึงเป็นโลหะผสมที่แข็งแกร่งที่สุด และความแข็งแรงของมันอาจสูงกว่าเหล็กบางชนิด ด้วยเหตุนี้ โลหะผสมคลาส 7 จึงเป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอากาศยาน แม้ว่าการเติมสังกะสีจะลดความสามารถในการแปรรูปด้วย แต่ความแข็งแรงที่ดีก็ช่วยชดเชยข้อบกพร่องเหล่านี้ได้ ตัวอย่างเช่น อลูมิเนียมอัลลอย 7075 เป็นตัวเลือกที่เหมาะสำหรับชิ้นส่วนที่มีแรงเค้นสูง เนื่องจากมีอัตราส่วนความแข็งแรงของน้ำหนักที่ดีและสามารถดำเนินการขึ้นรูปการรักษาความร้อน และการดำเนินการอื่น ๆ

2.1.3 Ansys Software [2], [3]

โปรแกรม Ansys เป็นโปรแกรมสากลที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องตลอด 30 ปีที่ผ่านมา สามารถใช้วิเคราะห์พฤติกรรมทางฟิสิกส์ที่หลากหลาย เรียกโปรแกรมกลุ่มนี้ว่า โปรแกรมมัลติฟิสิกส์ (Multiphysics Program) และค่อนข้างนิยมในหมู่ผู้เชี่ยวชาญในสาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ (CAE, Computer – Aided Engineering) อาศัยทั้งหลักการคำนวณวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) และ ไฟไนต์โวลุ่ม (Finite Volume Method, FVM) โปรแกรม ANSYS สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น การแก้ปัญหาในระบบสามมิติของกลศาสตร์ของแข็งสามารถประยุกต์ใช้กับโครงสร้างที่มีลักษณะพื้นฐาน (Stationary Geometrically) และระบบที่มีโครงสร้างซับซ้อน (Non-stationary Geometrically) ได้ ปรากฏการณ์ของก๊าซและของ

ไหล กลศาสตร์ของไหล การแผ่รังสีความร้อนและการถ่ายเทความร้อน ปรากฏการณ์ด้านไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ปรากฏการณ์ของคลื่นเสียงเป็นปรากฏการณ์ที่สามารถจำลองได้บนโปรแกรมเพื่อใช้ในการจำลองและการวิเคราะห์กระบวนการในอุตสาหกรรมเพื่อหลีกเลี่ยงค่าใช้จ่ายที่สูงและลดระยะเวลาในการออกแบบ

2.1.4 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทาง FEM มีพื้นฐาน 3 ขั้นตอน

ขั้นตอนที่ 1 (Pre-processing)

เตรียมข้อมูลเบื้องต้นของแบบจำลองก่อนการวิเคราะห์ เป็นการกำหนดและการสร้างแบบจำลองที่จะทำการวิเคราะห์ โดยแบบจำลองที่กำหนดจะประกอบด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และกำหนดสภาวะขอบเขต จากนั้นจึงเริ่มดำเนินการสร้างแบบจำลองบนโปรแกรม CAD ชนิดต่าง ๆ ซึ่งอาจแบ่งขั้นตอนย่อยๆ ได้เป็นดังนี้ การป้อนข้อมูลตัวแปรของรูปทรงเรขาคณิตแบบจำลอง เช่น ตำแหน่งพิกัดของโหนด เส้น พื้นผิว และปริมาตรของแข็ง กำหนดชนิดของเอลิเมนต์ ความถี่หรือการกำหนดข้อมูลที่เกี่ยวกับสมบัติของวัสดุ เช่น ค่าโมดูลัสของยัง ความหนาแน่นวัสดุสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเป็นต้น สภาวะที่กระทำต่อวัสดุ เช่น ตำแหน่ง ขนาดและทิศทางของสิ่งที่มากระทำต่อวัสดุ ซึ่งอาจจะเป็นแรงหรือความดัน

ขั้นตอนที่ 2 (Solve-processing)

การวิเคราะห์แบบจำลองโดยการคำนวณบนคอมพิวเตอร์เพื่อทำการวิเคราะห์หรือจำลองพฤติกรรมตามธรรมชาติของระบบที่ต้องการ ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยความรู้และการเลือกใช้กฎทางฟิสิกส์ที่สอดคล้องกัน เช่น จำลองการไหลแบบ Newtonian หรือ Non-newtonian ของไหลเป็นของไหลที่อัดตัวได้หรืออัดตัวไม่ได้ (Compressible or Uncompressible Fluid) การไหลเป็นแบบ Lamina หรือ Turbulent ปัญหาที่มีลักษณะเป็นแบบยืดหยุ่นก็ควรเลือกเป็นแบบ Elasticity หรือปัญหาที่มีลักษณะเปลี่ยนรูปถาวรก็ควรเลือกแบบ Plasticity เป็นต้น หลังจากวิเคราะห์แบบจำลองแล้วขั้นตอนการพิจารณาผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น

ขั้นตอนที่ 3 (Post-processing)

หลังจากการวิเคราะห์ผลการจำลองจะมีลักษณะเป็นค่าตัวเลขของแต่ละจุดหรือโหนด (Node) ค่าสมบัติของแต่ละเอลิเมนต์ (Element) ซึ่งจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ผลลัพธ์และการจัดแสดงในลักษณะที่เข้าใจง่ายเพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อไป โดยทั่วไปแล้วสำหรับโปรแกรมคอมพิวเตอร์เชิงพาณิชย์จะมีความสามารถแสดงผลลัพธ์แบบกราฟิกสามมิติผ่านหน้าจอ เช่น แสดงกราฟิกและค่าของโหนดที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมแสดงภาพกราฟิกและค่าของความเค้นในแต่ละเอลิเมนต์และโหนด แสดงภาพกราฟของโครงข่ายที่บิดไปหลังจากถูกแรงมากระทำหรือแสดงภาพการเคลื่อนไหวของเอลิเมนต์หลังจากถูกแรงมากระทำ

2.2 มาตรฐานแผ่นเกราะกันกระสุน [6]

อ้างอิงจากมาตรฐานยุทโธปกรณ์กระทรวงกลาโหมว่าด้วยแผ่นเกราะกันกระสุน จัดทำโดยคณะอนุกรรมการกำหนดมาตรฐานยุทโธปกรณ์กระทรวงกลาโหม ว่าด้วยเกราะกันกระสุน ซึ่งได้แปลวิเคราะห์ สังเคราะห์ ประยุกต์ และเรียบเรียงให้เหมาะสมกับประเทศไทยโดยอิงมาตรฐาน US.NIJ Standard 0108.01 ประยุกต์กับ Threat Level ของ NIJ 0101.04 ตามความจำเป็นและเหมาะสมเพื่อมุ่งส่งเสริมและสนับสนุนกิจการอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของไทยเป็นหลัก ดังนี้

2.2.1 ขอบข่าย มาตรฐานยุทโธปกรณ์นี้กำหนด การจำแนกระดับของแผ่นเกราะ นิยาม คุณลักษณะที่ต้องการ เครื่องหมายและฉลาก การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน และการทดสอบ ซึ่งครอบคลุมถึงแผ่นเกราะที่ใช้ในการป้องกันหรือลดอันตรายจากการยิงด้วยกระสุน เช่น โล่กันกระสุน ป้อมยามหุ้มเกราะ ยานหุ้มเกราะ และห้องนิรภัยเป็นต้นแต่ไม่รวมถึงเสื้อเกราะและหมวกเกราะ

ตารางที่ 2.2 ระดับภัยคุกคามและการยิงทดสอบความสามารถกันกระสุนของเกราะ [6]

ระดับภัยคุกคาม	ขนาด/ชนิดกระสุนทดสอบ	น้ำหนักของลูกกระสุนเกรน (กรัม)	ความเร็วกระสุน ±30ฟุต/วินาที (±9.1เมตร/วินาที)	จำนวนนัดที่ยิงผ่านเกณฑ์	ปืนทดสอบ
1	.22caliber LRLRN	40 เกรน (2.6 กรัม)	1,080 ฟุต/วินาที (329เมตร/วินาที)	5	ปืนพก หรือ ลำกล้องทดสอบ
	.380 ACP FMJ RN	95 เกรน (6.2 กรัม)	1,055ฟุต/วินาที (322เมตร/วินาที)	5	ปืนพก หรือ ลำกล้องทดสอบ
	หรือ				
	.38 Special LRN	158 เกรน (10.2 กรัม)	880 ฟุต/วินาที (268 เมตร/วินาที)		
2A	9 mm.FMJ RN	124 เกรน (8.0 กรัม)	1120 ฟุต/วินาที (341 เมตร/วินาที)	5	ปืนพก หรือ ลำกล้องทดสอบ
	.40 S&W FMJ	180 เกรน (11.7 กรัม)	1055 ฟุต/วินาที (322 เมตร/วินาที)	5	ปืนพก หรือ ลำกล้องทดสอบ
	หรือ				
	.45 FMJ RN	230 เกรน (15.0 กรัม)	840 ฟุต/วินาที (256 เมตร/วินาที)		
2	9 mm.FMJ RN	124 เกรน (8.0 กรัม)	1205 ฟุต/วินาที (367 เมตร/วินาที)	5	ปืนพก หรือ ลำกล้องทดสอบ
	.357 Mag JSP	158 เกรน (10.2 กรัม)	1430 ฟุต/วินาที (436 เมตร/วินาที)	5	ปืนพก หรือ ลำกล้องทดสอบ
3A	9 mm.FMJ RN	124 เกรน (8.0 กรัม)	1430 ฟุต/วินาที (436 เมตร/วินาที)	5	ปืนพก หรือ ลำกล้องทดสอบ
	.44 Mag SJHP	240 เกรน	1430 ฟุต/วินาที	5	

ระดับภัยคุกคาม	ขนาด/ชนิดกระสุนทดสอบ	น้ำหนักของลูกกระสุนเกรน (กรัม)	ความเร็วกระสุน ±30ฟุต/วินาที (±9.1เมตร/วินาที)	จำนวนนัดที่ยิงผ่านเกณฑ์	ปืนทดสอบ
		(15.6 กรัม)	(436 เมตร/วินาที)		ปืนกลมือ หรือ ลำกล้องทดสอบ
3	7.62 mm NATO FMJ	148 เกรน (9.6 กรัม)	2780 ฟุต/วินาที (847 เมตร/วินาที)	5	ปืนเล็กยาว หรือ ลำกล้องทดสอบ
4	.30 caliber M2 AP	166 เกรน (10.8 กรัม)	2880 ฟุต/วินาที (878 เมตร/วินาที)	1	ปืนเล็กยาว หรือ ลำกล้องทดสอบ

2.2.2 การจำแนกระดับของแผ่นเกราะ จำแนกตามระดับความสามารถในการกันกระสุนปืนได้ถึง 6 ระดับ (ตามลำดับของระดับภัยคุกคามของกระสุนตามตารางที่ 2.2 จากต่ำไปสูง) ดังนี้

2.2.2.1 แผ่นเกราะระดับ 1 เป็นระดับที่สามารถกันกระสุนที่เป็นภัยคุกคามในระดับ 1 (Type I :22LR; 380ACP) ได้

2.2.2.2 แผ่นเกราะระดับ 2A เป็นระดับที่สามารถกันกระสุนที่เป็นภัยคุกคามในระดับ 2A (TypeIIA:9mm.; .40 S&W) และระดับ 1 ได้

2.2.2.3 แผ่นเกราะระดับ 2 เป็นระดับที่สามารถกันกระสุนที่เป็นภัยคุกคามในระดับ 2 (Type II:9mm.; 357Magnum) และระดับ 1 กับ 2A ได้

2.2.2.4 แผ่นเกราะระดับ 3A เป็นระดับที่สามารถกันกระสุนปืนพกโดยทั่วไปได้ ซึ่งเป็นระดับที่สามารถกันกระสุนที่เป็นภัยคุกคามในระดับ3A (Type IIIA: High Velocity 9 mm.;.44Magnum) และ ระดับ 1, 2A กับ 2 ได้

2.2.2.5 แผ่นเกราะระดับ 3 เป็นระดับที่สามารถกันกระสุนปืนเล็กยาวได้ ซึ่งเป็นระดับที่สามารถกันกระสุนที่เป็นภัยคุกคามในระดับ 3 (Type III; Rifle) และระดับ 1, 2A, 2 กับ 3A ได้

2.2.3 บทนิยาม [7]

2.2.3.1 แผ่นเกราะกันกระสุนหรือแผ่นป้องกันกระสุนหรือ"แผ่นเกราะหมายถึงแผ่นวัสดุทุกชนิดที่มีความสามารถในการป้องกันหรือลดอันตรายจากการยิงด้วยกระสุนปืนที่ผู้ผลิตเจตนาจัดทำขึ้นเพื่อการนี้"ไม่ว่าจะเป็นเกราะ (หรือวัสดุป้องกันกระสุน) ที่ทำด้วยเหล็ก โลหะใดๆ เซรามิกส์ กระจก วัสดุสังเคราะห์ ฯลฯ ซึ่งต่อไปได้มาตรฐานฉบับนี้จะเรียกย่อว่า “เกราะ”

2.2.3.2 แผ่นพยาน (Witness Plate) หมายถึง แผ่นโลหะที่ใช้เป็นวัตถุพยานในการพิสูจน์ทราบผลการยิงทะลุแผ่นเกราะ แผ่นพยานนี้ควรทำด้วยโลหะอลูมิเนียมอัลลอยชนิด 2024-T3 หรือ 2024-T4 ที่มีความหนา 0.5 mm (0.020 นิ้ว) ยึดตรึงไว้ด้านหลังของเกราะที่จะทดสอบ อยู่ห่างออกไป 15 เซนติเมตร (6นิ้ว) ในแนวตั้งฉากกับวิถีกระสุน ทั้งนี้แผ่นพยานต้องมีขนาดอย่างน้อย 12×12 นิ้ว (305 × 305 มิลลิเมตร)

2.2.3.3 การทะลุผ่าน หมายถึง การที่กระสุนเจาะทะลุผ่านเกราะ แล้วปรากฏว่ามีเศษชิ้นส่วนของกระสุนหรือเศษชิ้นส่วนของเกราะเจาะทะลุผ่านแผ่นพยานด้วย ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้โดยการมองเห็นแสงที่รอดผ่านรอยทะลุบนแผ่นพยานนั้น เมื่อนำหลอดไฟฟ้าขนาด 60 วัตต์ไปส่อง

2.2.3.4 ระยะห่างของรอยยิง หมายถึง ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของจุดที่ยิงบนแผ่นเกราะ ไปถึงจุดศูนย์กลางของจุดยิงจุดอื่นๆบนเกราะนั้น หรือไปถึงริมขอบของเกราะนั้น กำหนดระยะห่างของรอยยิงปกติควรมีระยะห่างจากกันเองและห่างจากขอบเกราะไม่น้อยกว่า 2 นิ้ว (5 cm)

2.2.3.5 ปัจจัยคุกคาม หมายถึง ตัวแปรหลักที่มีผลบั่นทอนต่อความสามารถในการกันกระสุนของเกราะในการยิงทดสอบ ซึ่งเมื่อยิงกระสุนในแต่ละนัดแล้วยังปรากฏหลักฐานให้สามารถตรวจสอบ/วัดค่าตัวแปรหลักนี้ได้ คือ ความเร็วกระสุน (ความเร็วที่สูงกว่าปกติ ย่อมเป็นปัจจัยคุกคามที่สูงกว่าปกติ ความเร็วที่ต่ำกว่าปกติ ย่อมเป็นปัจจัยคุกคามที่ต่ำกว่าปกติ) กับระยะห่างของรอยยิง (ระยะห่างที่น้อยกว่าปกติ ย่อมเป็นปัจจัยคุกคามที่สูงกว่าปกติ)

2.2.3.6 นัดที่ยิงผ่านเกณฑ์ หมายถึง ผลการยิงในกระสุนนัดที่ถือว่าผ่านเกณฑ์การยอมรับสำหรับการยิงทดสอบตามตารางที่ 2.2 ซึ่งจักต้องเกิดขึ้นจากการยิงด้วยความเร็วกระสุนตามที่กำหนดหรือสูงกว่าที่กำหนด แล้วไม่เกิดการทะลุผ่าน โดยที่ไม่ต้องคำนึงถึงระยะห่างของรอยยิง ซึ่งเป็นไปตามตรรกะที่ว่า “ในสถานการณ์ปัจจัยคุกคามตามปกติหรือปัจจัยคุกคามที่สูงกว่าปกติ เกราะนี้สามารถเผชิญได้”

2.2.3.7 นัดที่ยิงไม่ผ่านเกณฑ์ หมายถึง ผลการยิงในกระสุนนัดที่ถือว่าไม่ผ่านเกณฑ์การยอมรับสำหรับการยิงทดสอบตามตารางที่ 2.2 ซึ่งจักต้องเกิดขึ้นจากกรณีที่ยิงด้วยความเร็วกระสุนตามที่กำหนดหรือต่ำกว่าที่กำหนดและมีระยะห่างของรอยยิง (ทิ้งห่างจากกันและห่างจากขอบเกราะ) ได้ระยะตามที่กำหนดแล้วเกิดการทะลุผ่าน ซึ่งเป็นไปตามตรรกะที่ว่า ในสถานการณ์ปัจจัยคุกคามตามปกติหรือปัจจัยคุกคามที่ต่ำกว่าปกติเกราะนี้เผชิญไม่ได้ ทั้งนี้หากปรากฏว่ามีนัดที่ยิงไม่ผ่านเกณฑ์ตั้งแต่ 1 นัดขึ้นไปก็ให้ยุติการยิงทดสอบในขั้นต่อไปได้และสรุปได้ว่าเกราะนี้ไม่ผ่านการรับรองมาตรฐาน

2.2.3.8 นัดที่ยิงพลาด หมายถึง ผลการยิงในกระสุนนัดที่ถือว่าเป็นการยิงพลาด มิสามารถวินิจฉัยการผ่านหรือไม่ผ่านเกณฑ์การยอมรับสำหรับการยิงทดสอบตามตารางที่ 2.2 ได้ ซึ่งเป็นไปตามตรรกะที่ว่า “ในสถานการณ์ปัจจัยคุกคามที่สูงกว่าปกติ เกราะนี้เผชิญไม่ได้ หรือในสถานการณ์ปัจจัยคุกคามที่ต่ำกว่าปกติ เกาะนี้สามารถเผชิญได้” จำต้องให้ยิงทดสอบแก้มือในนัดนั้นใหม่ ในการยิงแก้มือใหม่นั้นให้ยิงใกล้บริเวณเดิมที่มีระยะห่างของรอยยิงได้ หรืออาจไปเริ่มต้นกระบวนการยิงทดสอบเกราะอันใหม่ก็ได้

2.2.4 คุณลักษณะที่ต้องการ

2.2.4.1 ลักษณะทั่วไป ต้องเป็นแผ่นเกราะสำเร็จรูปพร้อมใช้งาน หรือเป็นผลิตภัณฑ์ที่ทำด้วยเกราะหรือที่หุ้มด้วยเกราะ สำหรับใช้ในการป้องกันหรือลดอันตรายจากการยิงด้วยกระสุนปืน

2.2.4.2 ความเรียบร้อยทั่วไป เกราะจะต้องไม่มีรอยย่น พอง รอยแตกร้าว ริมขอบต้องไม่บิ่นหรือแหลมคม หรือขาดความประณีตในการผลิต

2.2.4.3 ความสามารถในการกันกระสุน เมื่อทำการทดสอบเกราะด้วยวิธีการยิงทดสอบตามตารางที่ 2.2 และข้อ 7 เกราะจะต้องสามารถกันกระสุนได้ตามระดับที่ระบุไว้ที่ฉลาก โดยมีจำนวนนัดที่ยิงผ่านเกณฑ์ได้ครบจำนวนตามกำหนดไว้ในตารางที่ 2.2

2.2.5 เครื่องหมายและฉลาก

2.2.5.1 แผ่นเกราะทุกหน่วยอย่างน้อยต้องมีเลขอักษรหรือเครื่องหมายแจ้งรายละเอียดต่อไปนี้ให้เห็นได้ง่ายชัดเจนและไม่ลบเลือนง่าย

(1) คำว่า “เกราะ” หรือ “เกราะกันกระสุน"หรือ"เกราะป้องกันกระสุน”

(2) ระดับของการกันกระสุน

(3) เดือนปีที่ทำหรือรหัสรุ่น

(4) ชื่อผู้ทำหรือโรงงานที่ทำหรือเครื่องหมายการค้าที่จดทะเบียน

2.2.5.2 กรณีที่เป็นกระจกกันกระสุนที่มุมใดมุมหนึ่งของกระจกทุกแผ่นอย่างน้อยต้องมีเลขอักษรหรือเครื่องหมายแจ้งรายละเอียดต่อไปนี้ให้เห็นได้ง่ายชัดเจนและไม่ลบเลือนง่าย

(1) คำว่า “กระจกกันกระสุน”

(2) ระดับของการกันกระสุน

(3) ชื่อผู้ทำหรือโรงงานที่ทำหรือเครื่องหมายการค้าที่จดทะเบียน

2.2.5.3 ในกรณีที่ใช้ภาษาต่างประเทศต้องมีความหมายตรงกับภาษาไทยที่กำหนดไว้ข้างต้น

2.2.6 การชักตัวอย่างหรือเกณฑ์ตัดสิน

2.2.6.1 รุ่นในที่นี้ หมายถึง เกราะแบบและระดับเดียวกัน ทำจากวัสดุและกรรมวิธีผลิตเดียวกัน ที่ทำหรือส่งมอบหรือซื้อขายในระยะเวลาเดียวกันหรือใกล้เคียงกัน

2.2.6.2 การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสินให้เป็นไปตามแผนการชักตัวอย่างที่กำหนดต่อไปนี้

1. ให้ผู้ยื่นคำขอการรับรองเกราะส่งมอบเกราะรุ่นเดียวกันจำนวนอย่างน้อย 1 หน่วย (อาจเป็นผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง หรือเป็นชิ้นทดสอบที่ทำขึ้นต่างหากก็ได้ หรือในกรณีที่จำเป็นก็อาจต้องทำการยิงทดสอบ ณ สถานที่ที่ผลิตภัณฑ์เกราะตั้งอยู่ก็ได้) โดยเกราะต้องมีขนาดอย่างน้อย 12×12 นิ้ว (305×305 มิลลิเมตร)

2. ให้ตรวจสอบตัวอย่างเกราะตามข้อ 6.2.1 โดยการตรวจพินิจเมื่อตรวจสอบแล้วทุกตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้อ 4.1,4.2 และ 5 จึงจะถือว่าเกราะรุ่นนี้เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

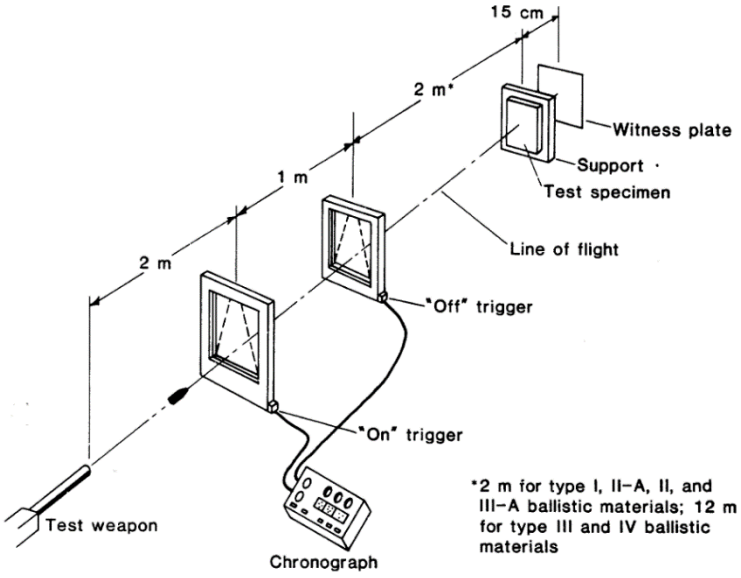
3. ให้นำตัวอย่างเกราะตามข้อ 6.2.2 ไปทำการยิงทดสอบตามตารางที่ 2.2 และข้อ 7 เมื่อทดสอบแล้วทุกตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้อ 4.3 จึงจะถือว่าเกราะรุ่นนี้เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

2.2.6.3 เกณฑ์ตัดสินตัวอย่างเกราะต้องเป็นไปตามข้อ 6.2.2 และ 6.2.3 ทุกข้อจึงจะถือว่าเกราะรุ่นนี้เป็นไปตามมาตรฐานยุทโธปกรณ์กระทรวงกลาโหมนี้

2.2.7 การทดสอบ [6]

2.2.7.1 การเตรียมการทดสอบ

ให้เตรียมอาวุธ,กระสุน,เครื่องจับเวลาที่มีความเที่ยงตรง (Precision) 1 ไมโครวินาทีและความแม่นยำ (Accuracy) 2 ไมโครวินาที ฉากจับเวลา (Trigger) ที่เป็นแบบ Photoelectric หรือแบบ Conductive screen ก็ได้ ทำการยิงเป้ากระดาษ (หรือเป้าอื่น) อย่างน้อย 3 นัด โดยให้ปฏิบัติในครั้งเดียวแล้ว ได้ประโยชน์ 3 อย่าง อย่างแรกได้ความมั่นใจในค่าความเร็วกระสุน อย่างที่ 2 ได้เป็นการอุดลำกล้องไปในตัวและอย่างที่สามได้ปรับความแม่นยำในการยิงด้วยแล้วเตรียมสิ่งยึดตรึงเกราะ (Support Fixture) ที่สามารถปรับตำแหน่งในแนวราบและแนวดิ่งได้โดยที่สิ่งยึดตรึงนี้ต้องไม่กีดขวางวิถีกระสุนด้วยจัดให้เกราะอยู่ในแนวตั้งฉากกับวิถีกระสุนเพื่อให้เป็นการยิงที่มุมยิง 0° ± 5° เตรียมแผ่นพยานและกำหนดจุดยิง (Marking) ให้ครอบคลุมพื้นที่ยิง 12×12 นิ้ว (305×305 มม.) ของเกราะที่จะทดสอบครั้งนี้ให้จัดวางอุปกรณ์ต่างๆได้แก่ฉากจับเวลา เกราะทดสอบ และแผ่นพยานให้อยู่ในแนวตั้งฉากกับวิถีกระสุนตามรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 Ballistic test setup [6], [7]

2.2.7.2 หลักการทั่วไปในการยิงทดสอบเกราะ

1. ในการยิงทดสอบแต่ละนัด ต้องทำการวินิจฉัยว่าเป็นนัดที่ยิงผ่านเกณฑ์,ยิงไม่ผ่านเกณฑ์หรือเป็นนัดที่ยิงพลาดเสมอ โดยตรวจความเร็วกระสุน ตรวจการทะลุผ่าน วัดระยะห่างของรอยยิงและบันทึกไว้ แล้วพิจารณาปฏิบัติให้สอดคล้องกับผลการยิงนั้นต่อไป (ตามตารางที่ 2.3)

2. สำหรับเกราะกันกระสุนที่ต่ำกว่าระดับ 3 ซึ่งต้องทำการยิงทดสอบด้วยกระสุน 2 ชนิดๆ ละ5 นัด เมื่อได้ยิงทดสอบด้วยกระสุนชนิดที่ 1 ครบ 5 นัดเรียบร้อยแล้ว ก่อนที่จะยิงทดสอบด้วยกระสุนชนิดที่ 2 นั้นสมควรที่จะเปลี่ยนเกราะที่จะทดสอบอันใหม่แต่ก็อาจให้ใช้เกราะอันเดิมก็ได้

หากเกราะนั้นมีขนาดใหญ่มากพอที่จะยิงทดสอบให้ครอบคลุมพื้นที่ยิงและได้ระยะห่างของรอยยิงได้ตามที่กำหนด

ตารางที่ 2.3 สรุปการวินิจฉัยการปฏิบัติต่อผลการยิงทดสอบเกราะ [6]

คำนิยาม	กรณีที่	ความเร็วกระสุน	ระยะห่างของรอยยิง	ทะลุผ่าน	ผลการวินิจฉัย
นัดที่ยิงผ่านเกณฑ์	-	ปกติ/สูง	ไม่คำนึง	ไม่ทะลุ	ดำเนินต่อไปได้ปกติ
นัดที่ยิงไม่ผ่านเกณฑ์	-	ปกติ/ต่ำ	ได้	ทะลุ	ให้ยุติการยิงทดสอบ
	1	สูง	ไม่คำนึง	ทะลุ	ให้ยิงทดสอบแก้มือ
	2	ปกติ	ไม่ได้	ทะลุ	
	3	ต่ำ	ไม่ได้	ทะลุ	
	4	ต่ำ	ไม่คำนึง	ไม่ทะลุ	

2.2.7.3 การยิงทดสอบเกาะที่เป็นผลิตภัณฑ์ขนาดใหญ่เช่นตู้ยามหุ้มเกราะยานหุ้มเกราะและห้องนิรภัยเป็นต้นให้พิจารณาประยุกต์เกี่ยวกับลักษณะของการเตรียมการทดสอบอุปกรณ์ต่างๆ และวิธีการในการยิงทดสอบให้เหมาะสมกับสถานการณ์ได้ตามความจำเป็นและเหมาะสม

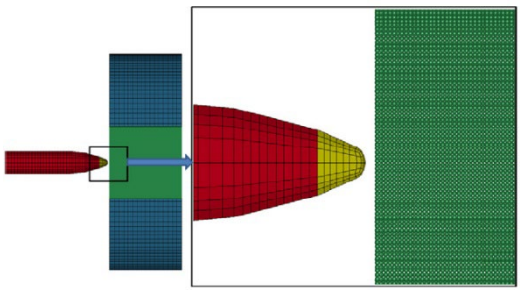
2.2.7.4 การแก้ไขรายละเอียดทางเทคนิคในการทดสอบ ให้คณะอนุกรรมการกำหนดมาตรฐานยุทโธปกรณ์กระทรวงกลาโหมว่าด้วยเกราะกันกระสุน สามารถแก้ไขเปลี่ยนแปลงรายละเอียดทางเทคนิคในการทดสอบในส่วนที่มิใช่สาระสำคัญได้ โดยใช้ดุลพินิจพิจารณาให้เหมาะสมกับความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีและสถานการณ์ที่เปลี่ยนแปลงไป แล้วรีบรายงานให้คณะกรรมการกำหนดมาตรฐานยุทโธปกรณ์กระทรวงกลาโหมทราบ

2.3 การทบทวนวรรณกรรม

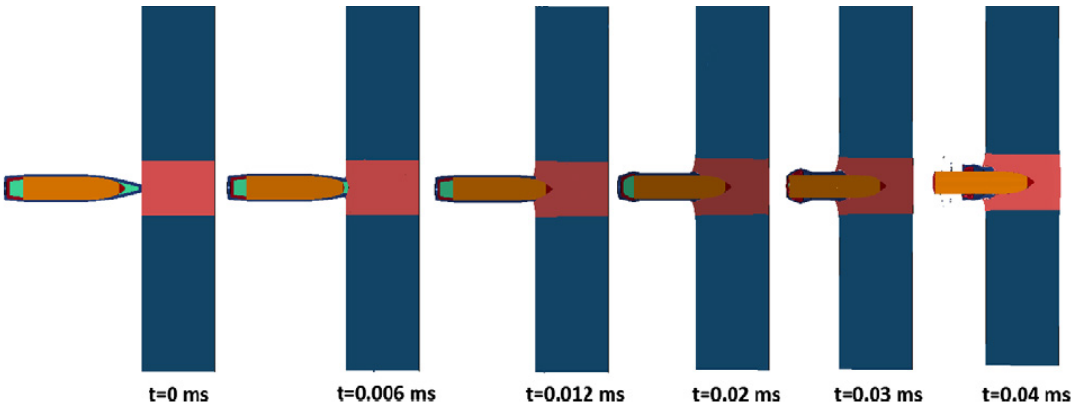
บุญรักษ์ กาญจนวรวณิชย์ [8] ได้ทำการทดลองกระสุนปืนหลายชนิดมีประสิทธิภาพการทำลายสูง ดังนั้นเสื้อเกราะกันกระสุนจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงเพื่อป้องกันการทะลุทะลวงของกระสุนปืน ซึ่งวิธีปรับปรุงเสื้อเกราะวิธีหนึ่งคือ การเสริมด้วยแผ่นวัสดุแข็งต่างๆ เช่น แผ่นไทเทเนียม แผ่นเหล็กกล้า แผ่นเซรามิกส์แข็ง แม้วัสดุที่ใช้จะมีหลายชนิด แต่ที่นิยมนำมาทำแผ่นเกราะแข็งเสริมให้เสื้อเกราะคือ แผ่นเซรามิกส์ เนื่องจากมีน้ำหนักน้อยกว่าโลหะ (ส่วนการเสริมด้วยแผ่นโลหะนิยมประยุกต์ใช้กับยานพาหนะหุ้มเกราะมากกว่า)

D. Shanmugam และคณะ [9] ได้ทำการศึกษาการพัฒนาชุดเกราะที่เหมาะสมเพื่อต่อสู้และเป็นพื้นที่ที่มีความเชี่ยวชาญสูงสำหรับนักโลหะวิทยาในการใช้ทักษะทางเทคนิคและการตัดสิน (Crouch, 1988) นับตั้งแต่ยุคเริ่มแรกของ "ลิตเติ้ลวิลลี่" ซึ่งเป็นรถถังขนาด 18 ตัน ที่ได้รับการยกย่อง

ว่าเป็นรถถังแรกของโลก การออกแบบและสร้างเกราะของยานพาหนะมีบทบาทสำคัญในการแข่งขัน ซึ่งเป็นที่ต้องการของทั้งผู้ใช้และผู้ผลิตยานเกราะหุ้มเกราะ ดังรูปที่ 2.5-2.6



รูปที่ 2.5 แผนภาพการแบ่งเอลิเมนต์ที่กระสุนและแผ่นเกราะ [9]



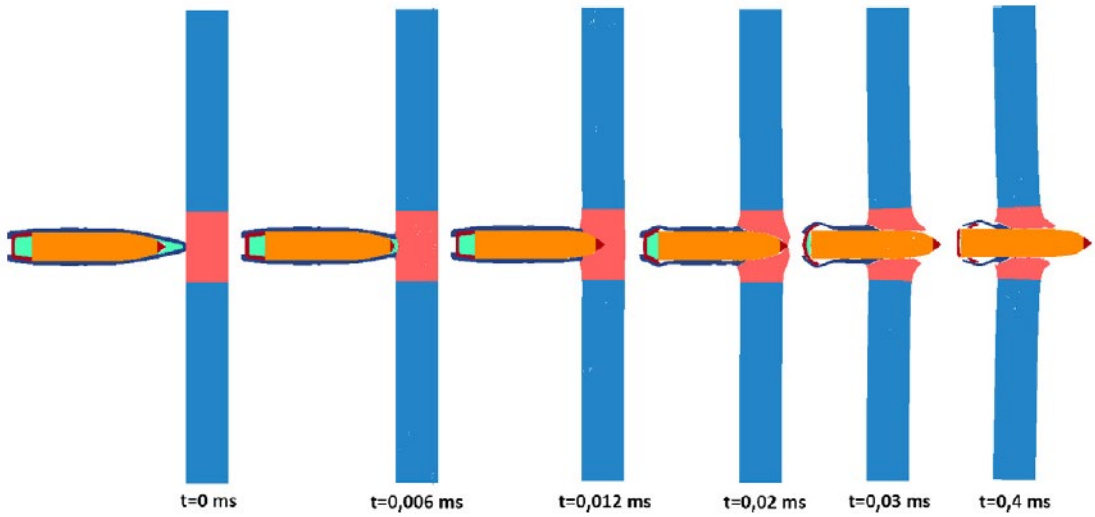
รูปที่ 2.6 แผนภาพการเสียรูปของแผ่นเกราะสำหรับกระสุนขนาด 20 มม. ในช่วงเวลาต่างๆ [9]

P.K. Ray และคณะ [10] ได้ทำการออกแบบเหล็กกล้า HSLA-100 มาเพื่อให้ได้ผลผลิตที่มีความแข็งแรง≥100 ksi (700 MPa) และความแรงกระแทก≥81 J ที่ -84 °C โลหะผสมเคมีของเหล็กนี้ทำให้ตอบสนองต่อการรักษาความร้อนและการประมวลผลด้วยความร้อน เนื่องจากเหล็กกล้ามีปริมาณคาร์บอนต่ำมาก (≤06% wt) เพื่อปรับปรุงการเชื่อมโลหะผสมจึงมีการเพิ่มส่วนประกอบอัลลอยอื่น ๆ เพื่อเพิ่มสมบัติด้านแรงและแรงกระแทก

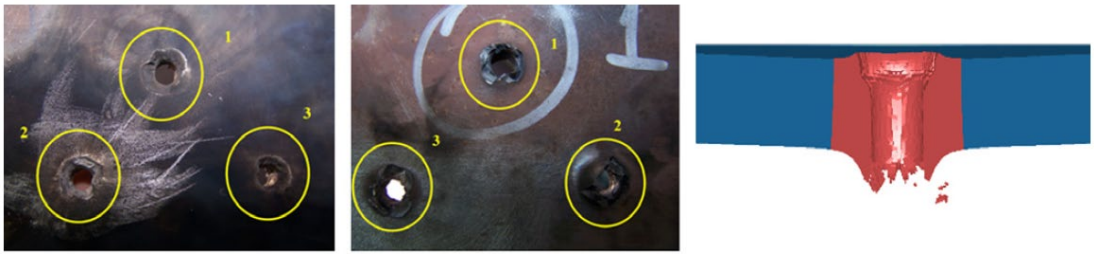
R.Q. Chi และคณะ [11] ได้ทำการศึกษาและออกแบบการใช้ระบบเกราะสองชั้นซึ่งประกอบด้วยพื้นผิวแข็งแบบด้านหน้าและชั้นรองพื้นการดูดซับพลังงานทำให้ได้การออกแบบที่เบาเมื่อเทียบกับเกราะโลหะเสาเดียวที่ให้ระดับการป้องกันขีปนาวุธเดียวกันกับขีปนาวุธเกราะ นักวิจัยหลายคนได้พัฒนารูปแบบการวิเคราะห์เชิงประจักษ์และเชิงตัวเลขเพื่อทำนายความเร็วที่เหลืออยู่ของกระสุนและความเร็วขีดจำกัดของขีปนาวุธ (BLV) ของระบบเกราะเป็นตัว

Namik Kilic and Bülent Ekici [12] ได้ศึกษาผลกระทบความเร็วสูงและปัญหาการแทรกซึมรวมถึงการเปลี่ยนรูปขนาดใหญ่การกัดกร่อนพฤติกรรมของวัสดุที่ไม่ต่อเนื่องขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงและการกระจายตัว ดังนั้นจึงเป็นเรื่องสำคัญที่จะต้องใช้รูปแบบการทำงานเชิงกลของการเจาะที่มีผลกระทบข้างต้น เนื่องจากวิธีการเชิงประจักษ์และการวิเคราะห์ไม่สามารถจับภาพปรากฏการณ์ทางกายภาพหลายอย่างรวมถึงการแตกหักความเค้นตกค้างและความร้อนของแรงเสียดทาน การจำลองเชิงตัวเลขได้กลายเป็นเครื่องมือที่จำเป็นสำหรับการศึกษาการเจาะขีปนาวุธ วิธีการเชิงตัวเลขและเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ที่เกี่ยวข้องได้และมีการคาดเดารูปแบบการเปลี่ยนรูปและการเจาะที่ซับซ้อนในช่วงที่มีการกระแทกขีปนาวุธได้อย่างถูกต้อง ดังรูปที่ 2.7-2.9

รูปที่ 2.7 การเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ความหนา 20 มม. [12]

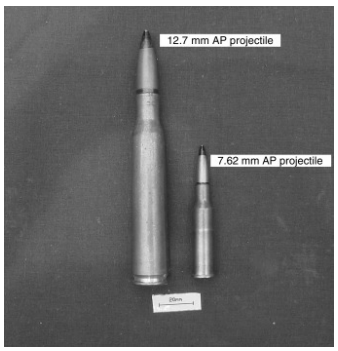


รูปที่ 2.8 แผนภาพการเสียรูปของแผ่นเกราะสำหรับกระสุนขนาด 9 มม. ในช่วงเวลาต่างๆ [12]

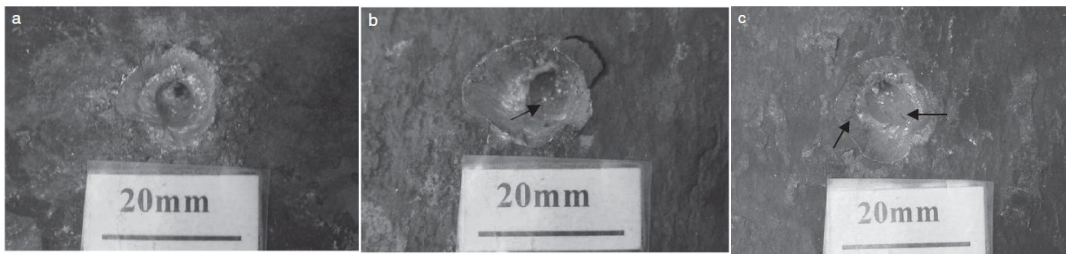


รูปที่ 2.9 การเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ความหนา 9 มิลลิเมตร [12]

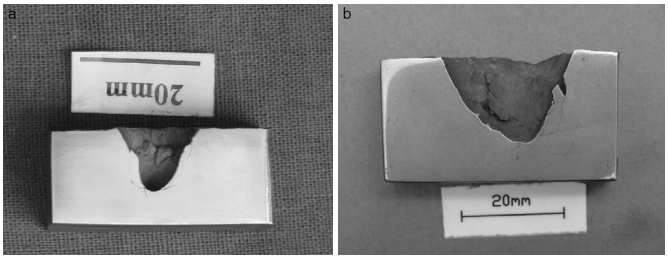
Pradipta KumarJena และคณะ [13] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเลือกวัสดุที่เหมาะสมซึ่งมีความสำคัญต่อการลดน้ำหนักของเกราะและจะต้องกำหนดวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำสุดที่เป็นไปได้ เหล็กกล้าที่มีความแข็งแรงสูงโลหะผสมอลูมิเนียมและโลหะผสมไททาเนียมมีการใช้เป็นเกราะ แผ่นเหล็กต้องผ่านการอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2, 24 และ 48 ชั่วโมง และมีการสังเกตความแปรผันเล็กน้อยของความแข็งแรงและความแข็งด้วยเวลาที่เพิ่มขึ้นในขณะที่พบว่าค่าความเหนียวและแรงกระแทกของชาร์ปีลดลง ประสิทธิภาพในการกันกระสุนได้รับการทดสอบโดยการกระแทกกระสุนเจาะเกราะ 7.62 มิลลิเมตร และ 12.7 มิลลิเมตร ที่มุมการกระแทก 0 องศา ผลลัพธ์แสดงความแตกต่างเล็กน้อยในประสิทธิภาพของกระสุน ดังรูปที่ 2.10-2.12



รูปที่ 2.10 ภาพของกระสุนเกราะที่แตกต่างกันใช้สำหรับการศึกษา [13]

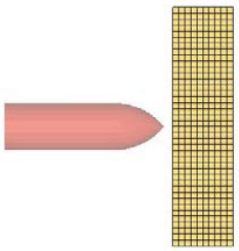


รูปที่ 2.11 มุมมองด้านบนของรูเจาะภายหลังการชนกับกระสุน 7.62 AP รอยแตกขนาดเล็กชี้ให้เห็นโดยเครื่องหมายลูกศรในการทำ Tempering time 24 และ 48 ชั่วโมง (a) Tempering time 2 ชั่วโมง (b) Tempering time 24 ชั่วโมง และ (c) Tempering time 48 ชั่วโมง [13]

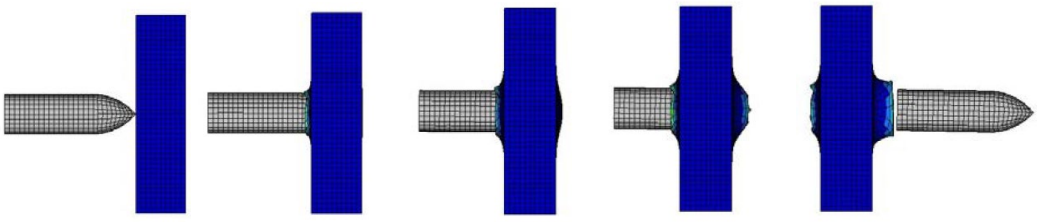


รูปที่ 2.12 ภาคตัดแผ่นเกราะ Tempering time 48 ชั่วโมง (a) AP 7.62 มิลลิเมตร และ (b) AP 12.7 มิลลิเมตร [13]

A. Banerjeea และคณะ [14] ได้มีศึกษาโดยการตรวจสอบเชิงตัวเลขของการชนกันของกระสุนกับแผ่นเหล็กเกราะทั่วไปที่มีความหนาปานกลางโดยกระสุนมีปลายแหลมที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว ได้กำหนดวัสดุและแบบจำลองความเสียหายของ Johnson-Cook ถูกใช้เพื่อจำลองพฤติกรรมและความเสียหายของวัสดุภายใต้สภาวะการกระแทก ค่าคงที่ของรูปแบบได้มาจากงานทดลองที่ทำโดยผู้เขียนที่เผยแพร่ก่อนหน้านี้ การจำลองได้ดำเนินการดังรูปที่ 2.13 เป็นโมเดลไฟไนต์ที่แผ่นเกราะมีขนาด 200x200x50 มม. และมีทิศทางและระยะของกระสุนตามรูปที่ 2.13 และรูปที่ 2.14 แสดงให้เห็นถึงการเจาะทะลุอย่างสมบูรณ์บนแผ่นเกราะโดยกระสุนไม่ได้ถูกทำลาย และจากรูปที่ 2.15 เป็นภาพจากการใช้กล้องจับภาพความเร็วสูงเห็นการเจาะทะลุผ่านของแผ่นเกราะและกระสุนไม่ได้ถูกทำลายเช่นกัน นอกจากนี้ยังมีการวัดค่าความเร็วที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเปรียบเทียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลองจะพบว่าให้ค่าที่มีความสอดคล้องกัน



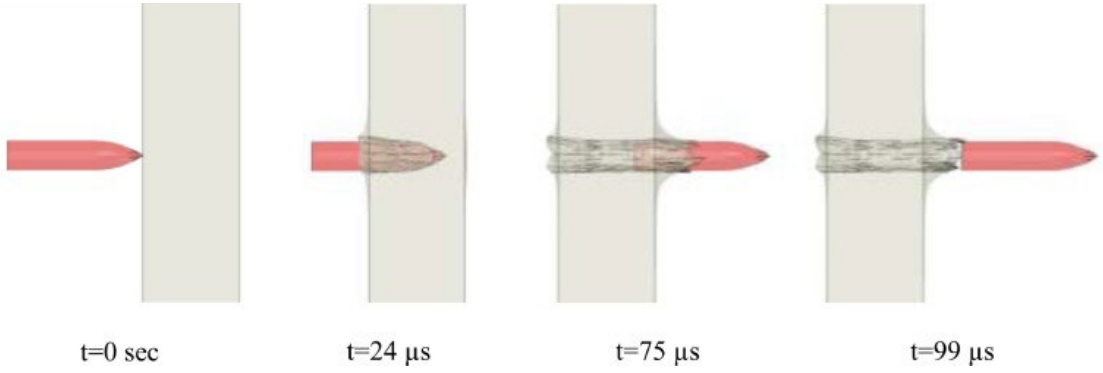
รูปที่ 2.13 ไฟไนต์เอลิเมนต์โมเดลสำหรับกระสุนและแผ่นเกราะ [14]



รูปที่ 2.14 ผลการจำลองการเจาะของกระสุนที่ความเร็ว 630 m/s a) t=0, b) t=50 μs, c) t=90 μs, d) t=130 μs, และ e) t=630 μs [14]

รูปที่ 2.15 การเจาะทะลุของกระสุนบนแผ่นเกราะจากการทดลองที่ความเร็วกระสุน 738 m/s [14]

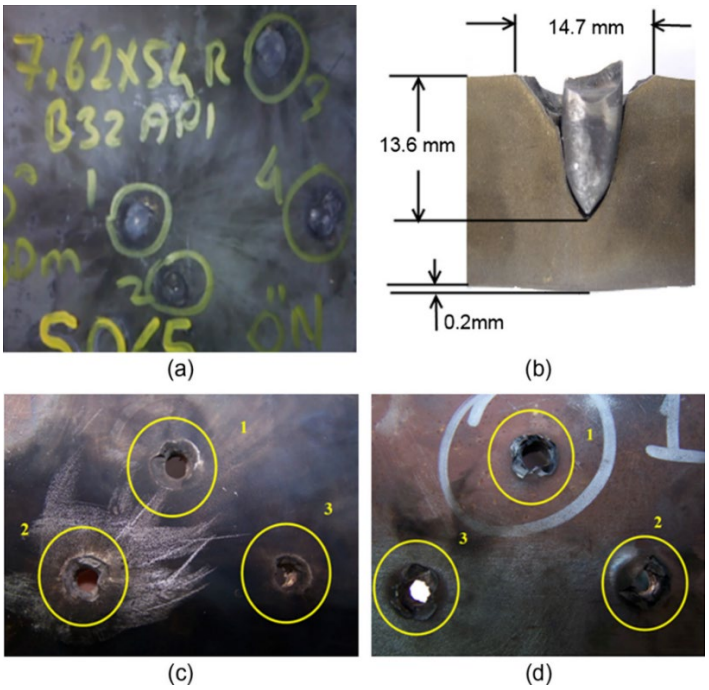
M. WasifAlia และคณะ [15] ได้ทำการศึกษาและมีการคำนวณเชิงตัวเลขของการป้องกันขีปนาวุธโดยการรวมกันของแผ่นเกราะ โดยใช้กระสุนเจาะเกราะขนาด 7.62 มิลลิเมตร ในระหว่างการทดลองเพื่อหาค่าการตอบสนองของขีปนาวุธของแผ่นเกราะฐานอลูมิเนียมและการรวมกันของแผ่นเกราะแผ่นเหล็กและแผ่นอลูมิเนียม พบว่ากระสุนเจาะเกราะสามารถทะลุแผ่นเกราะฐานได้ในขณะที่การรวมแผ่นเกราะแผ่นเจาะและฐานสามารถหยุดการเจาะทะลุเกราะเจาะกระสุนได้ และมีการพัฒนาแบบจำลององค์ประกอบแบบจำกัด แบบจำลองเชิงตัวเลขสามารถทำนายการโตของรูและการเจาะทะลุของกระสุนปืนได้เมื่อแผ่นเกราะฐานได้รับผลกระทบจากกระสุน ดังรูปที่ 2.16



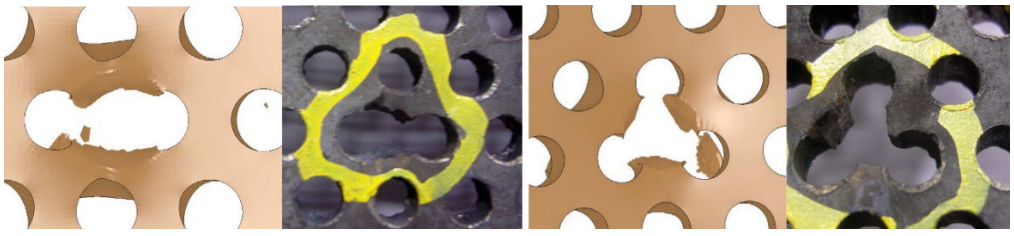
รูปที่ 2.16 การเจาะทะลุของกระสุนผ่านแผ่นเกราะฐานในช่วงเวลาต่างๆ [15]

Woei-ShyanLee และคณะ [16] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลและโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กกล้าอัลลอยด์ความแข็งแรงสูง AISI 4340 ภายใต้สภาวะการให้ความร้อนที่แตกต่างกัน โดยชิ้นงานทดสอบมีการชุบแข็งและสามารถแตกหักด้วยอัตราเร็วคงที่ 3.3 × 10-4 s-1 โดยใช้เครื่องทดสอบวัสดุแบบไดนามิกส์ (MTS 810) สมบัติทางกลและค่าความแข็งตัวของความเครียดจะพิจารณาจากสภาวะการให้ความร้อน ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ Martensite ที่ผ่านการชุบแข็ง นอกจากนี้ยังทำ Fractograph ของชิ้นงานเพื่อวิเคราะห์การแตกหักและกลไกการยุบตัว ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสมบัติเชิงกลและสมบัติทางจุลภาคมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญโดยอุณหภูมิและเวลาการกักเก็บ ความแข็งแรงและความแข็งของกากสเตนนิ่งที่อุณหภูมิลดลงเมื่ออุณหภูมิในการทำอุณหภูมิและเวลาในการยึดเกาะเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามความเหนียวจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นและเวลาการจับยึดยกเว้นเมื่อเกิดการแตกตัวด้วยอลูมิเนียมนิ่ม

Namık Kılıç และคณะ [17] บทความนี้แสดงถึงกลไกความเสียหายของในการต้านการเจาะของกระสุนของแผ่นเกราะที่มีรูพรุนและมีความแข็งสูงที่มีขนาด 7.62x54 มิลลิเมตร โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลองร่วมกัน ซึ่งเป็นแรงเบี่ยงเบนที่ไม่สมมาตรของกระสุนทำให้เกิดการแตกหัก และการสึกกร่อนแกนของกระสุน โดยมีการการทดสอบกับแผ่นเกราะที่หนา 9 และ 20 มิลลิเมตร และมีการตรวจสอบความเที่ยงตรงของการจำลองและพารามิเตอร์ของแบบจำลองวัสดุ และทำการทดสอบกระสุนปืนบนแผ่นเกราะที่มีรูพรุนโดยวิธีการสุ่มแล้วทำการวิเคราะห์พื้นที่ที่กระสุนปืนเจาะกระทบแล้วเกิดรู ความผันแปรของสถานการณ์ขึ้นอยู่กับรูปแบบความเสียหายของของกระสุน ความสอดคล้องระหว่างผลการวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์และการทดลองเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญซึ่งขึ้นอยู่กับเกณฑ์ความเสียหายของกระสุนและเกณฑ์การสึกกร่อนของหัวกระสุนในการจำลอง ดังที่แสดงในผลลัพธ์ระหว่างการจำลองด้วย Ls-Dyna และข้อมูลการทดลอง ดังรูปที่ 2.17-2.18

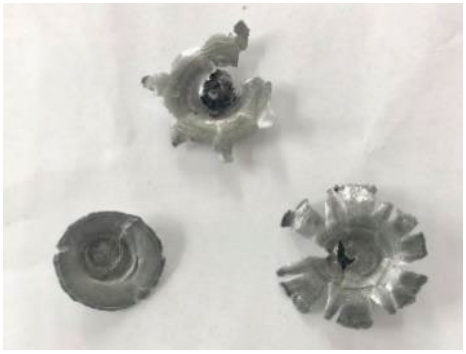


รูปที่ 2.17 ภาพแผ่นหลังการทดสอบ (a) หน้าเป้าหนา 20 มม., (ข) หน้าตัดเป้าหนา 20 มม., (ค) หน้าเป้าหนา 9 มม. และ (ง) ผิวเป้าด้านหลัง หนา 9 มม. [17]



รูปที่ 2.18 เปรียบเทียบผลการเจาะทะลุเกราะด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลอง [17]

อัฐวุฒิ ผลาสินธุ์ และคณะ [18] งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและผลิตแผ่นเกราะกันกระสุนสำหรับเสื้อเกราะกันกระสุนที่ผลิตจากวัสดุผสมโดยทำมาจากแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) แผ่นเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber) และแผ่นฟิล์มเอ็กซเรย์ที่ใช้แล้ว (X-ray Film) โดยวัสดุทั้ง 3 ชนิดยึดประสานกันด้วยกาวอีพอกซีเรซิน (Epoxy Resin) ทำการทดสอบยิงตามมาตรฐาน NIJ0101.04 ระดับ 2A โดยเปรียบเทียบจากการทดสอบด้วยกระสุนจริงและวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ซึ่งจากผลการทดสอบแผ่นเกราะสามารถป้องกันกระสุนปืนขนาด 9 มิลลิเมตร FMJ RN ที่ความเร็ว 341 เมตรต่อวินาที สามารถหยุดกระสุนที่ปะทะเข้ามาด้วยความเร็วสูงและทำลายหัวกระสุนให้แตกสลายได้ที่แผ่นแรกโดยไม่เกิดความเสียหายไปยังที่วัสดุแผ่นหลัง ชิ้นงานของแผ่นเกราะที่ดีที่สุดคือชิ้นงานที่ใช้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมจำนวน 1 แผ่น แผ่นเส้นใยคาร์บอนจำนวน 10 แผ่น และแผ่นฟิล์มเอ็กซเรย์จำนวน 20 แผ่น และเมื่อทำการวัดขนาดความเสียหายที่เกิดขึ้นโดยทำการวัดขนาดความกว้างหลุมปะทะ ในการทดสอบจริงและในการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งถือว่ามีความใกล้เคียงกันมากในเชิงปริมาณ ดังรูปที่ 2.19

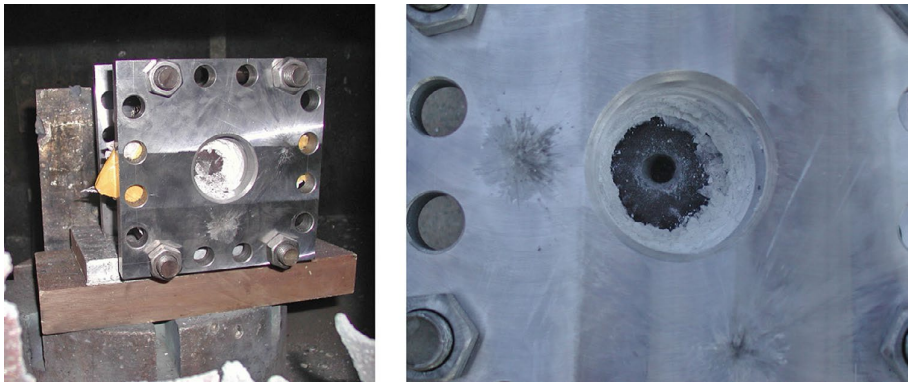


รูปที่ 2.19 ความเสียหายของกระสุนหลังจากการทดสอบยิง [18]

จำนงค์ อมตาริยกุล และคณะ [19] ได้กล่าวถึงการสร้างแผ่นเกราะกันกระสุนให้มีประสิทธิภาพสูงกว่าระดับ II เพื่อเป็นแผ่นเกราะกันกระสุนที่สามารถป้องกันการถูกยิงในระยะใกล้ ชุดแผ่นเกราะประกอบ ด้วยแผ่นโลหะจำนวน 2 แผ่น มาวางเรียงติดกัน โดยแผ่นที่ 1 จะทำหน้าที่ทำลายหัวกระสุนปืนและ ดูดซับพลังงาน แผ่นที่ 2 ทำหน้าที่ป้องกันการยุบตัวจากแรงอัดของกระสุนปืน แผ่นโลหะที่นำมาประกอบกันมีขนาดเท่ากับ 300x270 มิลลิเมตร การวิจัยแผ่นเกราะกันกระสุนคอมโพสิตนี้ สามารถป้องกันกระสุนที่มีความรุนแรงสูงกว่าขนาด 9 มิลลิเมตร น้ำหนัก 8 กรัม มีความเร็ว 398 ± 9.1 เมตร/วินาที (1305 ± 30 ฟุต/วินาที) และกระสุน .357 Magnum น้ำหนัก 10.2 กรัม มีความเร็ว 436 ± 9.1 เมตร/วินาที (1430 ± 30 ฟุต/วินาที) และยังสามารถป้องกันกระสุนขนาด .44 Magnum หนัก 15.6 กรัม มีความเร็ว 436 ± 9.1 เมตร/วินาที (1430 ± 30 ฟุต/วินาที) ได้ในระยะการทดสอบประมาณ 5 เมตร

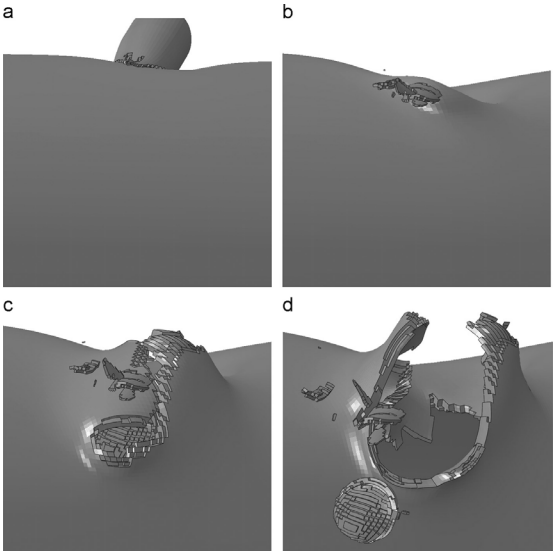
ว่าที่ร้อยโท ไมตรี ถาวรสิน [20] เป็นการศึกษาการต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนบนแผ่นเกราะอลูมิเนียมและสแตนเลส ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมีการเปรียบเทียบผลระหว่างการทดสอบยิงเกราะกันกระสุนจริงกับการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ตามมาตรฐาน NIJ 3 ในการจำลองรูปแบบการยิงเกราะใช้โปรแกรม Ansys/Explicit Dynamics วัสดุเกราะกันกระสุนที่ใช้ในการจำลองนี้มี 3 ชนิดคือ 1) สแตนเลส SUS304 ขนาดความหนา 5, 6, 8, 10, 14, 20, 30, 40, 45 และ 55 มิลลิเมตร 2) อลูมิเนียม AL7075 ขนาดความหนา 6 8 10 และ 20 มิลลิเมตร และ 3) ทังสเตนคาร์ไบด์ ขนาดความหนา 6, 8 และ 10 มิลลิเมตร โดยกำหนดให้ขนาดความกว้างxความยาวเท่ากับ 300x300 มิลลิเมตร มุมองศาของการยิงเกราะกันกระสุน คือ มุม 0, 30 และ 45 องศา พบว่า มุมที่เพิ่มขึ้นสามารถป้องกันการเจาะทะลุของเกราะได้เพิ่มขึ้น การจำลองการยิงทีละแผ่นของสแตนเลสที่มีความหนา 30 มิลลิเมตร ขึ้นไปมีความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุของกระสุน ส่วนรูปแบบจำลองการยิงแบบซ้อนแผ่นกัน 2 ชั้น โดยไม่มีช่องว่างระหว่างแผ่น ของวัสดุหน้าสแตนเลส มีความหนา 20 มิลลิเมตร และวัสดุเกราะแผ่นหลัง คือ อลูมิเนียมที่มีควาหนา 8 มิลลิเมตร หรือวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์และสแตนเลสซึ่งวัสดุทั้งแผ่น หน้าและแผ่นหลังมีความหนาเท่ากัน 16 มิลลิเมตร ก็สามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนได้

Li Jinzhu และคณะ [21] ได้ทำการทดลองและการจำลองเชิงตัวเลขของแท่งโลหะผสมทังสเตนที่เจาะเข้าไปยังเกราะเซรามิกส์อลูมินา/เกราะเหล็กผสม 603 หลังจากนั้นมีการวัดความลึกของการเจาะลุของแผ่นเหล็กแผ่นหลังสุดทั้งแบบการทดลองและการจำลองเชิงตัวเลข การจำลองเชิงตัวเลขแสดงการกระจายความเสียหายระหว่างกระบวนการเจาะ การศึกษานี้สรุปได้ความลึกของการเจาะทะลุลดลงจะลดลงอย่างเป็นเส้นตรง เมื่อความหนาของของแผ่นเซรามิกส์เพิ่มขึ้น ดังนั้นทั้งปัจจัยประสิทธิภาพของมวลและปัจจัยด้านประสิทธิภาพส่วนต่างจะเพิ่มขึ้นตามความหนาของเซรามิกส์ที่เพิ่มขึ้น เซรามิกส์จะแตกละเอียดที่บริเวณกระแทกและแตกออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ ซึ่งมีขนาดขึ้นอยู่กับระยะทางถึงจุดกระทบ ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ความเสียหายเป้าเซรามิกส์อลูมินา/เกาะเหล็กผสม 603 [21]

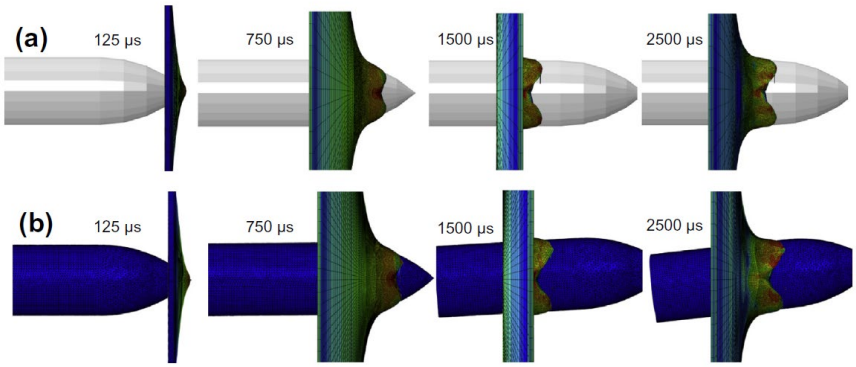
Andrea Manes และคณะ [22] ได้ทำการตรวจสอบเชิงตัวเลขเชิงทดลองของผลกระทบของกระสุนปืนขนาด 7.62x51 มิลลิเมตร กระสุนปืนแกนอ่อน ขนาด 9.5 กรัม ที่ยิงออกไปบนท่ออลูมิเนียมแสดงอยู่ในรูปที่ 2.21 ท่อทำจาก Al-6061-T6 และจำลองส่วนประกอบจริงของเพลาขับโรเตอร์หางเฮลิคอปเตอร์ มีการทดสอบหลายครั้ง มีการใช้ปืนจริงเพื่อสร้างความเร็วของอาวุธยุทโธปกรณ์และโครงรองรับเฉพาะถูกสร้างขึ้นเพื่อทำการทดสอบแรงกระแทกด้วยมุมเอียง (เพื่อขยายความเสียหายให้ได้มากที่สุดต่อส่วนประกอบที่ต้องรับภาระแรงบิด) ความเร็วเริ่มต้นและส่วนที่เหลือของกระสุน รูปร่างและขนาดของความเสียหาย และความเค้นตกค้างถูกนำไปเป็นส่วนประกอบในการวัด แบบจำลองเชิงตัวเลขของผลกระทบได้รับ นำมาวิเคราะห์ ด้วย Finite Element code ABAQUS/Explicit โครงสร้างแบบจำลองของ Johnson–Cook (JC) และแบบยืดหยุ่น Bao–Wierzbicki (BW) เกณฑ์การแตกหักได้รับการสอบเทียบสำหรับ Al-6061-T6 และใช้สำหรับการวิเคราะห์มีการตรวจสอบผลกระทบของประเภทกระสุนต่อความเสียหาย ดังนั้นลูกกระสุน (แกนและปลอกหุ้ม) จึงถูกนำมาทำแบบจำลองทั้งหมด เพื่อเน้นผลกระทบและอันตรายของแกนอ่อนประเภทนี้ กรณีที่กระสุนกระทบกับโครงสร้างอลูมิเนียมบาง โมเดลเชิงตัวเลขให้ผลที่ดีของผลการทดลอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งแสดงความสามารถในการทำลาย และความเร็วคงเหลือของกระสุนและความเสียหาย ตลอดจนสนามความเค้นตกค้างบนท่อที่อยู่ใกล้บริเวณที่ถูกทำลาย



รูปที่ 2.21 สี่ขั้นตอนของการวิเคราะห์การเปลี่ยนรูปของรูเดี่ยว [22]

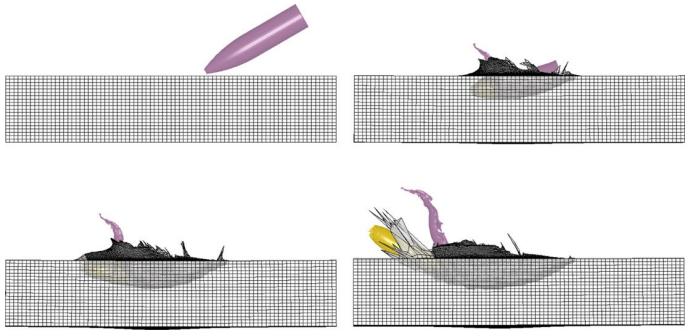
K. Senthil และคณะ [23] ได้ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาผลกระทบของเส้นผ่านศูนย์กลางของโปรเจกไทล์ ความต้านทานกระสุนปืนของแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร และหนา 0.5 มิลลิเมตร จำนวน 2 ชั้นในแผ่นสัมผัสของโลหะผสมอลูมิเนียม 1100-H12 ขนาดของกระสุนปืนจะแปรผันตามเส้นผ่านศูนย์กลางที่แตกต่างกันเป็น 15, 19 และ 24 มิลลิเมตร โดยค่าคงที่

ของความยาวคงที่ ดังนั้นอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางจึงแปรผันเป็น 2, 2.6 และ 3.3 ดำเนินการทางไฟไนต์เอลิเมนต์โดย ABAQUS/Explicit ผลดังรูปที่ 2.22 ร่วมกับแบบจำลองวัสดุ Elasto-viscoplastic ของ Johnson–Cook ถูกนำมาใช้เพื่อทำการศึกษาแบบจำลอง ผลลัพธ์เชิงตัวเลขถูกนำมาเปรียบเทียบกับการทดลองที่มีอยู่ พบว่าความต้านทานของขีปนาวุธจะเพิ่มขึ้นเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของกระสุนเพิ่มขึ้นสำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางที่กำหนด พบว่าเป้าแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร มีความต้านทานที่ดีกว่า อย่างไรก็ตามควรศึกษาอิทธิพลกระสุนปืนที่แข็งและเปลี่ยนรูปได้ที่มีต่อกลไกการทำลายและขีดจำกัดของกระสุนปืน



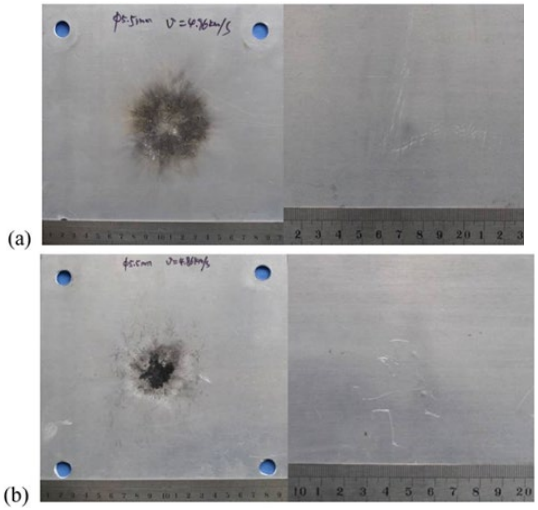
รูปที่ 2.22 การเจาะชิ้นงานหนา 1 มิลลิเมตร โดย (a) แข็งและ ข) กระสุนปืนที่เปลี่ยนรูปได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร (ความเร็วตกกระทบ = 47.8 เมตร/วินาที) [23]

Tore Børvik และคณะ [24] ศึกษาผลกระทบแบบปกติและแบบเฉียงบนแผ่นอลูมิเนียม AA6082-T4 หนา 20 มิลลิเมตร ทั้งในเชิงทดลองและในเชิงตัวเลข ดังรูปที่ 2.23 โดยมีการใช้กระสุนปืนขนาดเล็กสองประเภทในการทดสอบขีปนาวุธ ได้แก่ กระสุนนาโต้ขนาด 7.62x63 มิลลิเมตร (พร้อมแกนตะกั่วอ่อน) และ APM2 ขนาด 7.62x63 มิลลิเมตร (พร้อมแกนเหล็กแข็ง) ซึ่งยิงจากรูเรียบยาว ปืนเมาเซอร์เป้าหมายถูกโจมตีที่มุมเอียง 0, 15, 30, 45 และ 60 องศา และความเร็วกระแทกอยู่ที่ประมาณ 830 เมตรต่อวินาที ในการทดสอบทั้งหมด ในระหว่างการทดสอบ ความเร็วกระสุนเริ่มต้นและความเร็วที่เหลือถูกวัดโดยอุปกรณ์ออปติกที่ใช้เลเซอร์ต่างๆ และใช้กล้องวิดีโอความเร็วสูงเพื่อถ่ายภาพกระบวนการเจาะเกราะสิ่งที่น่าสนใจเป็นพิเศษคือมุมเฉียงวิกฤตซึ่งกระบวนการเจาะเปลี่ยนจากการเจาะเป็นการฝังหรือแฉลบ ผลลัพธ์แสดงว่ามุมเอียงวิกฤตน้อยกว่า 60 องศา สำหรับกระสุนทั้งสองประเภท โปรแกรมการทดสอบวัสดุยังดำเนินการสำหรับเพลต AA6082-T4 เพื่อสอบเทียบความสัมพันธ์ที่เป็นส่วนประกอบของ Johnson-Cook ที่แก้ไขแล้วและเกณฑ์ความล้มเหลว ในขณะที่ข้อมูลวัสดุสำหรับกระสุนส่วนใหญ่นำมาจากเอกสาร การจำลอง FE แบบไม่เชิงเส้น 3 มิติพร้อมแบบจำลองรายละเอียดกระสุนได้ดำเนินการในตอนท้ายที่สุดโดยทั่วไปแล้วข้อตกลงที่ดีระหว่างการจำลอง FE และผลการทดลองสำหรับกระสุน APM2 นั้นสอดคล้องกัน



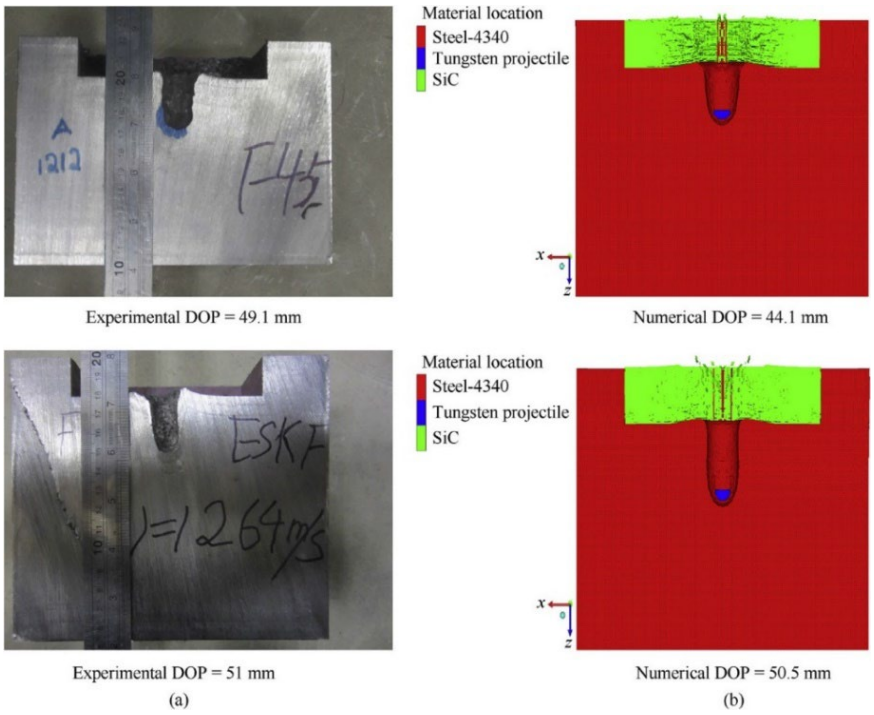
รูปที่ 2.23 ภาพบางส่วนจากการจำลองเชิงตัวเลขแสดงกระสุนขนาด 7.62 มิลลิเมตร APM2 ระหว่างการชนของแผ่นอลูมิเนียมที่มุมเฉียง β =60° ทั้งองค์ประกอบที่ผิดรูปมากเกินไปและการสึกกร่อนบางส่วนในแกนแข็งของกระสุน [24]

สำหรับงานวิจัยของ W. Xue-zhong และคณะ [25] เป็นการศึกษาเกราะที่เบาสำหรับป้องเศษซากจากแรงกระแทก เมื่อพิจารณาคุณสมบัติของไม้พบว่า มีน้ำหนักเบา ต้นทุนต่ำ มีความแข็งสูงเมื่อมีอัตราความเครียดสูง โดยการทดสอบแรงกระแทกความเร็วสูง กำหนดความหนา 5.00 ถึง 8.00 มิลลิเมตร ความเร็ว 4.79 กิโลเมตรต่อวินาที ถึง 7.24 กิโลเมตรต่อวินาที และทดสอบเปรียบเทียบความสามารถในการป้องกันโดยค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่มีค่าเท่ากัน ผลปรากฏว่าเกราะที่มีไม้ยัดไส้มีความสามารถในการป้องกันได้ดีว่าเกราะที่เสริมด้วยอลูมิเนียมที่มีผนังสามชั้น และมีค่าใกล้เคียงกับการสอดไส้ด้วยผ้า Nextel/Kevlar ดังรูปที่ 2.24 ซึ่งมีการใช้กันอย่างแพร่หลาย และมีการจำลอง SPH เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพในการป้องกันระหว่างเกราะที่มีไม้เสริมกับเกราะที่เสริมด้วยอลูมิเนียมที่มีผนังสามชั้น



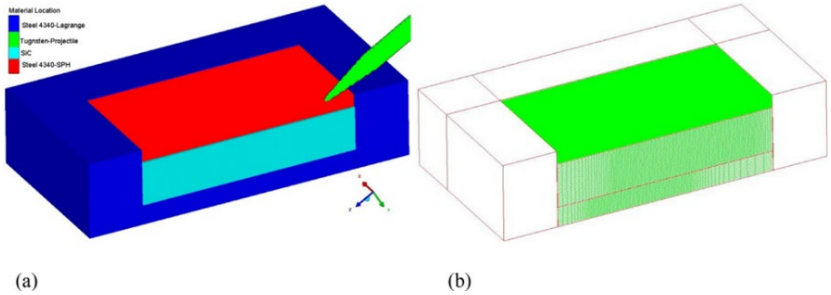
รูปที่ 2.24 ความเสียหายต่อแผ่นด้านหลังของเกราะ 2 ชนิด (a) เกราะเสริมไส้ Nextel/Kevlar (ความหนา = 5.5 มิลลิเมตร, V = 4.96 กิโลเมตรต่อวินาที) และ (ข) เกราะเสริมไส้ด้วยไม้ (ความหนา = 5.5 มิลลิเมตร, V = 4.86 กิโลเมตรต่อวินาที) [25]

Govind Gour และคณะ [26] ได้ทำการศึกษาการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ตรวจสอบประสิทธิภาพของเซรามิกส์ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีวัสดุรองรับเหล็กกล้า 4340 และโลหะผสมไททาเนียมและใช้กราไฟต์เป็นชั้นบัฟเฟอร์ ดังรูปที่ 2.25 โดยใช้กระสุนปืนโลหะผสมทังสเตน (LRP) ทั้งยิงกระแทกแบบปกติและแบบเฉียง ทำการวัดการเจาะทะลุจากการทดลองและ ถูกเปรียบเทียบกับการจำลองเพื่อยืนยันความถูกต้องของค่าคงที่ของแบบจำลอง เพื่อดูรูปแบบความเสียหาย แผ่นโลหะผสมไททาเนียมและส่วนต่อประสานกราไฟท์ นอกจากนี้ยังมีการจำลองเชิงตัวเลขของ AUTODYN เพื่อระบุตำแหน่งเกราะที่มีความหนาแน่นต่ำสำหรับให้ความเร็วที่จำกัดกระสุนปืน



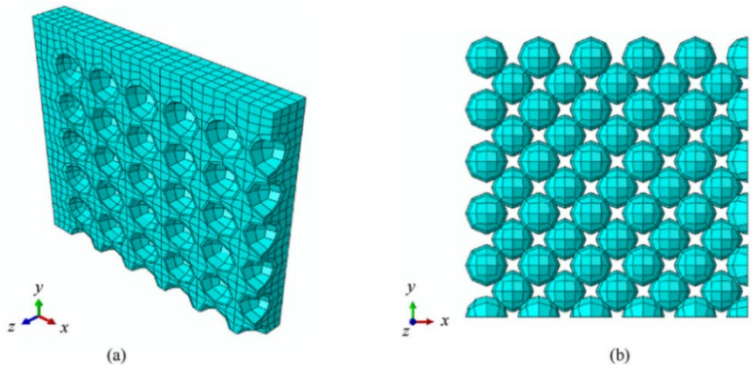
รูปที่ 2.25 การเปรียบเทียบเทคนิคการวัดความลึก ในเป้า SiC Fþ-Steel 4304 เทียบกับ LRP ที่ทำจากโลหะผสมทังสเตนที่ความเร็วกระแทก (a) 1212 m/s, และ (b) 1264 m/s [26]

ผลงานวิจัยของ A. Serjouei และคณะ [27] ได้ทำการศึกษาการตั้งค่าการทดลองเพื่อกำหนดความเค้นก่อนให้กับเกราะโลหะเซรามิกส์สองชั้น และศึกษาความลึกของการเจาะของกระสุนเพื่อวัดประสิทธิภาพ ดังรูปที่ 2.26 เพื่อยืนยันการศึกษาเชิงตัวเลขเกี่ยวกับผลกระทบของความเครียดล่วงหน้าบนขีดจำกัดขีปนาวุธของชุดเกราะเซรามิกส์ และประการที่ 2 ที่ศึกษาคือ ส่วนจำเพาะที่ถูกออกแบบและถูกทดสอบของชุดเกราะเซลามิกที่มีหลายชั้นประสานกัน และศึกษาอิทธิพลของความหนาของแผ่นปิดเหล็กกล้า (CP) ต่อประสิทธิภาพของขีปนาวุธของ SiC เซรามิกส์ ได้รับการศึกษาผ่านการจำลององค์ประกอบไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยตัวแก้ปัญหา AUTODYN สำหรับแบบปกติและแบบเฉียง (NATO 60°) เทียบกับกระสุนโปรเจกไทล์ก้านยาว (LRP)



รูปที่ 2.26 แบบจำลองสามมิติ (3D) ครึ่งแบบจำลองสำหรับการกระแทกเป้าแบบเฉียงบนเหล็กสามชั้น 4340-SiC-steel 4340 : (a) ตำแหน่งวัสดุ (b) รายละเอียดแบบตาข่าย [27]

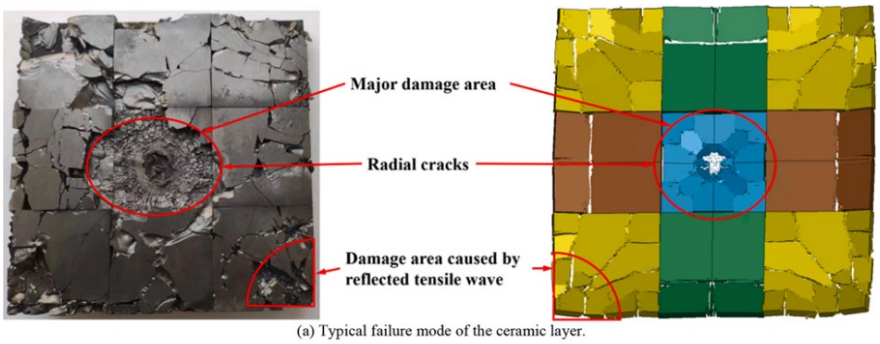
Ali Ansari และคณะ [28] ได้ทำการตรวจสอบพฤติกรรมของแผ่นคอมโพสิตเมทริกซ์อลูมิเนียมเสริมเซรามิกส์ เพื่อให้การออกแบบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการป้องกันกระสุน 7.62 มิลลิเมตร ที่ความเร็ว 800 เมตรต่อวินาที ทั้งการทดลองและเชิงตัวเลข วัสดุเป้าหมายคือโลหะผสม Al5083 ซึ่งเป็นเมทริกซ์โลหะและลูกเซรามิกส์อลูมินาเป็นตัวเสริมแรง ในแบบจำลอง 3 มิติ ดังรูปที่ 2.27 มีการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ ABAQUS และตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยการทดลองของลูกบอลเซรามิกส์ ที่มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนัก 15, 30 และ 45% และความหนาของเป้าชิ้นงาน 20, 25 และ 30 มิลลิเมตร และพิจารณผล คือ พลังงานจลน์ ความเร็วที่เหลือ และความลึกของการเจาะสุดท้ายพบว่าชิ้นงานที่มีความหนา 25 มิลลิเมตร และอลูมินา 30% มีความเหมาะสมที่สุดตามเกณฑ์การป้องกันกระสุน



รูปที่ 2.27 การจำลองในรูปแบบสามมิติโครงสร้างตาข่าย : (a) แผ่นอลูมิเนียม; (b) ลูกเซรามิกส์ [28]

Peng Si และคณะ [29] ได้ทำการศึกษานำโพลียูเรียมาเป็นวัสดุเสริมแรงเนื่องจากโพลียูเรียมีคุณสมบัติในการปกป้องวัสดุ ดังรูปที่ 2.28 และทำการออกแบบชุดเกราะเซรามิกส์เสริมโลหะโพลียูเรีย 5 กลุ่ม และ อีก 2 กลุ่มสำหรับชุดเกราะเซรามิกส์/โลหะสองชั้น ในการทดลองได้ทดสอบการยิงกระสุนปืนต่อเกราะเซรามิกส์/โลหะ ประสิทธิภาพเพื่อหาอิทธิพลของตำแหน่งและความหนาของชั้น

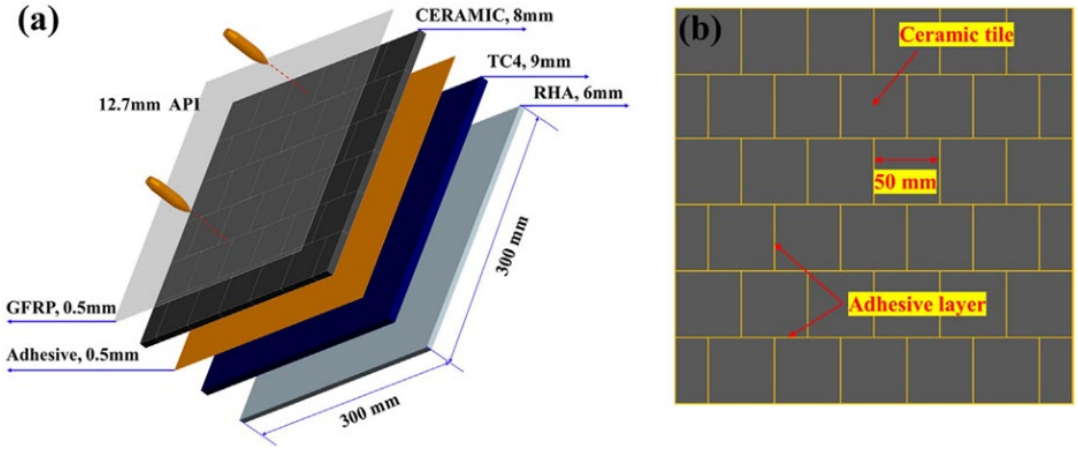
โพลียูเรียและในระหว่างการทดลองได้ใช้กล้องกล้องความเร็วสูงบันทึกเพื่อดูกระบวนการเจาะทะลุเกราะเซรามิกส์/โลหะ และมีการศึกษาพารามิเตอร์ของแบบจำลอง Recht-Ipson (RI) เพื่อทำการวิเคราะห์เศษที่เหลือของกระสุนต่อเป้าหมาย จากการศึกษาพบว่าส่วนผิวด้านหน้าของชั้นโพลียูเรียความหนา 1.1 มม. มีประสิทธิภาพเมื่อทดสอบกระสุนปืนความเร็ว 27.99 เมตร/วินาที และดูดซับพลังงานจำเพาะได้ถึง 8.83 % นอกจากนี้ ยังมีการใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติยังแสดงถึงกลไกการป้องกันของชั้นโพลียูเรีย กลไกการเพิ่มประสิทธิภาพของชั้นโพลียูเรียประกอบด้วย 3 ประการ: (1) ชั้นโพลียูเรียเพิ่มมุมของกรวยเซรามิกส์ (2) ชั้นโพลิยูเรียเพิ่มแรงดันจำกัดของเซรามิกส์ (3) โพลียูเรียมีผลทำให้แข็งแรงขึ้นที่อัตราความเครียดสูง



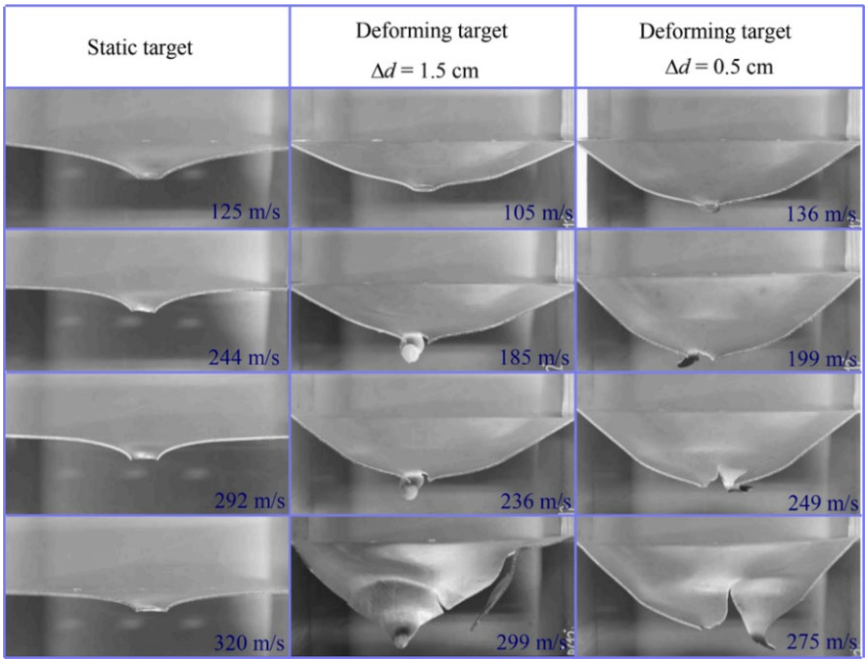
รูปที่ 2.28 การเปรียบเทียบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของความเสียหายในระดับมหภาคระหว่างการทดลองและการจำลองเชิงตัวเลข ตัวอย่างเป้าหมายของกลุ่ม M และ B ที่ความเร็วกระแทก 522 เมตรต่อวินาที และ 735.131 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ [29]

Yonghua Shen และคณะ [30] ทำการศึกษาประสิทธิภาพของชั้นกาวประเภท (อีพ็อกซี่และโพลียูรีเทน) ดังรูปที่ 2.29 โดยการยิงแบบหลายนัดต่อชุดเกราะผสมเซรามิกส์/โลหะ โดยศึกษาวิธีการเชิงทดลองและเชิงตัวเลข ประสิทธิภาพการยึดติด (ความแข็งแรงในการยึดเกาะและการหลุดลอก) และความหนาตั้งแต่ 0.2 ถึง 3.0 มิลลิเมตร ของชั้นกาว และดูผลจากยิงที่เซรามิกส์ และแผ่นรองด้านหลัง ผลปรากฏว่า การยิงด้วยกระสุนแบบครั้งเดียว อีพ็อกซี่มีประสิทธิภาพดีกว่าโพลียูรีเทนเล็กน้อย และเป้าที่มีโพลียูรีเทนมีประสิทธิภาพป้องกันกระสุนแบบหลายนัดได้ดีกว่าแต่ความลึกจาก

การเจาะทะลุครั้งที่สองมีความเสียหายเป็นวงกว้างต่อแผ่นกระเบื้องเซรามิกส์ เมื่อทำการเปรียบเทียบของแรงยึดเหนี่ยวและความเสียหายพบว่ามีความไวต่อการหลุดร่อนของเซรามิกส์เพิ่มขึ้น ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าเมื่อความหนาของชั้นกาวเพิ่มขึ้น เวลาของเซรามิกส์ที่แผ่นรองหลังไม่ได้รองรับจะนานขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพของเซรามิกส์ในการกันกระสุนต่ำลง ความหนาของชั้นกาวมีผลตรงกันข้ามกับความต้านทานของขีปนาวุธและพื้นที่ความเสียหายของเซรามิกส์ ความหนาของชั้นกาวที่เหมาะสมที่สุดที่มีประสิทธิภาพต่อการยิงกระสุนแบบหลายลูกคือขนาด 2.0 มิลลิเมตร



รูปที่ 2.29 แผนผังของชุดเกราะคอมโพสิต (a) โครงสร้างของชุดเกราะคอมโพสิต (b) การจัดเรียงของเซรามิกส์และกาวที่ใช้ในด้านข้างของกระเบื้องเซรามิกส์ที่อยู่ติดกัน [30]



รูปที่ 2.30 ภาพตัดขวางของแผ่นเหล็กบางที่ถูกเจาะภายใต้ความเร็วกระแทกที่แตกต่างกัน [31]

Lang Li และคณะ [31] ได้ทำการศึกษาแผ่นโลหะที่เปลี่ยนรูปอย่างต่อเนื่องภายใต้การเงื่อนไขการรับภาระโหลดแบบฉับพลัน เช่นจากาการระเบิดของทีเอ็นที ก่อนที่จะถูกกระทบด้วยกระสุนปืน ตามการทดลอง และมีการจำลองแบบสามมิติที่เพื่อเทียบกับการวัดเชิงทดลอง เพื่อดูกลไกทางกายภาพของการเปลี่ยนรูป ผลกระทบของแรงกระตุ้นล่วงหน้า ความต้านทานแรงกระแทกของแผ่นเป้าหมาย และรูปทรงปลายกระสุนโปรเจกไทล์ต่อประสิทธิภาพของกระสุนปืน ซึ่งผลจากการศึกษาจะนำไปใช้ในการออกแบบเพื่อป้องการเจาะทะลุสำหรับเหล็กแผ่นที่เปลี่ยนรูปได้ แสดงให้เห็นว่าส่วนประกอบสามด้านคือว่า การให้พลังงานจลน์เริ่มต้นไปยังเป้าหมาย การเปลี่ยนรูปร่างพลาสติกในบริเวณจาน และการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนระหว่างการเจาะเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพของกระสุนปืนที่จะทำให้แผ่นเป้าหมายที่เสียรูป ดังรูปที่ 2.30

บทที่ 3
การดำเนินงานวิจัย

ในกระบวนขั้นตอนการวิจัยและการดำเนินงานวิจัยนั้นประกอบด้วย วิธีการดำเนินงานวิจัย การออกแบบแผ่นเกราะที่ใช้วัสดุที่มีแตกต่างกัน การวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ การสร้างแบบจำลองการยิงชุดเกราะกันกระสุน การกำหนดค่าของสมบัติของวัสดุตามสมการความเสียหาย การสร้างรูปแบบเมช การวิเคราะห์แผ่นเกราะ โดยจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 ระเบียบวิธีวิจัย

3.1.1 กระบวนการดำเนินงานวิจัย

3.1.1.1 ศึกษาและทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ข้อมูลเกี่ยวกับการทดสอบตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 รูปแบบในการวิเคราะห์ความเสียหายของวัสดุ สมบัติของวัสดุแต่ละชนิด

3.1.1.2 ศึกษาข้อมูลการทดสอบและการจำลองยิงเกราะกันกระสุนตามมาตรฐาน NIJ

3.1.1.3 ศึกษาข้อมูลโดยการใช้โปรแกรม ANSYS/Explicit Dynamic ในการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และการตั้งค่าสมบัติของวัสดุตามสมการความเสียหายและชุดคำสั่งในโปรแกรม

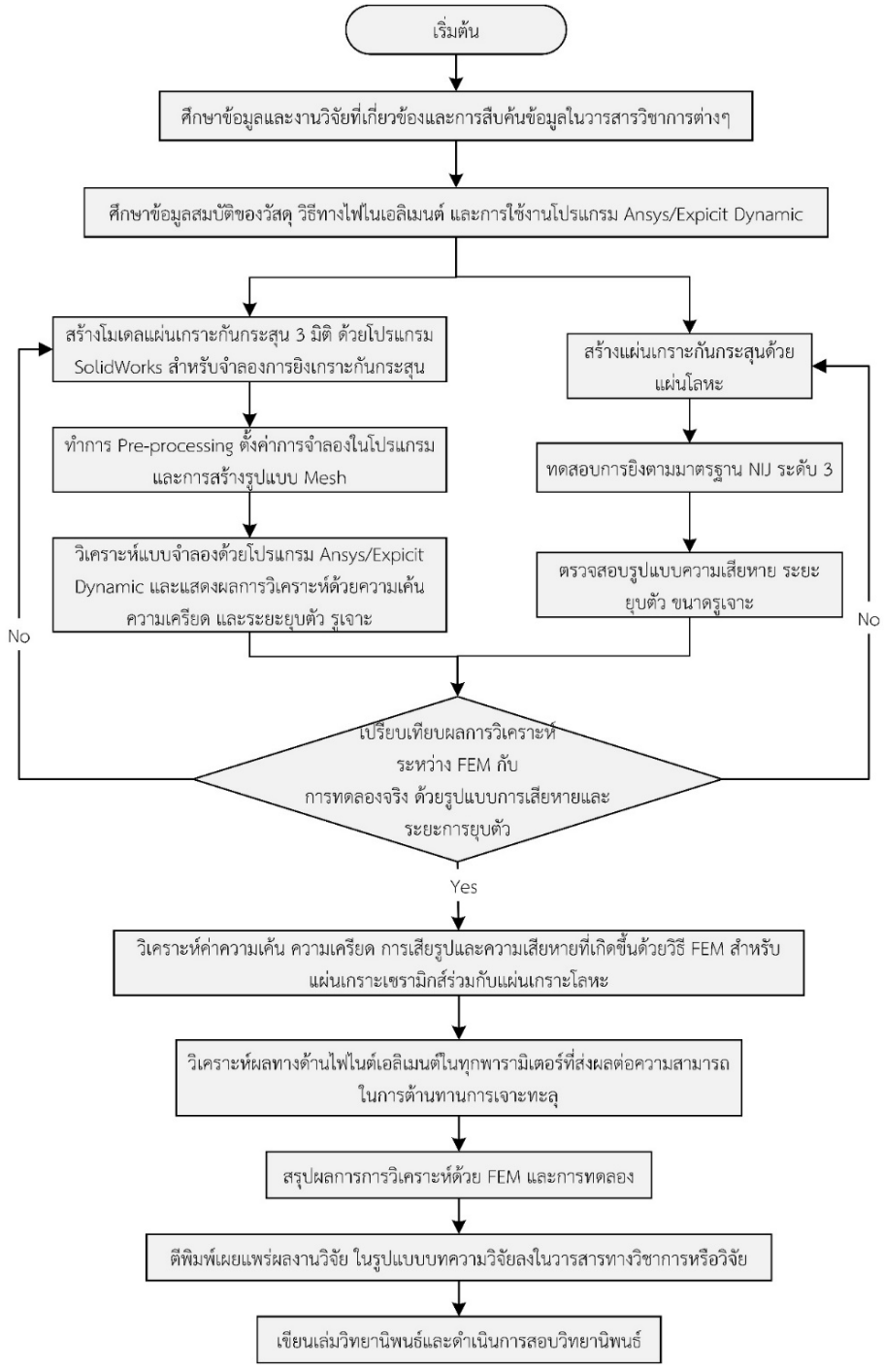
3.1.1.4 ใช้โปรแกรม SolidWorks ทำการออกแบบและทำการสร้างแบบจำลองเกราะกันกระสุนแบบ 3 มิติ ทั้ง 2 แบบ ซึ่งแบบที่หนึ่งเป็นแผ่นเกราะกันกระสุน 1 ชั้น และ 2 ชั้น โดยมีขนาดความกว้างxความยาว 300 x 300 มิลลิเมตร วัสดุที่ใช้ทำแผ่นเกราะกันกระสุนมี 3 ชนิด ประกอบด้วย แผ่นเกราะอลูมินา (Alumina) 95% ความหนา 6, 8 และ 10 มิลลิเมตร วัสดุอลูมิเนียม 7075 T6 ความหนา 6 8 และ 10 มิลลิเมตร

3.1.1.5 ตั้งค่าคุณสมบัติของวัสดุตามรูปแบบความเสียหายของวัสดุในโปรแกรม Ansys/Engineering Data ดังนี้ แผ่นเกราะอลูมินา (Alumina) 95% มีรูปแบบความเสียหายของ Johnson-Cook Strength และรูปแบบความเสียหายของ Johnson-Holmquist (JH-2) แผ่นเกราะอลูมิเนียม 7075 T6 มีรูปแบบความเสียหายของ Steinburg-Guinan-Strength ซึ่งทำการสร้างเมชที่ใช้ในการจำลองเป็นแบบ Hexahedral โดยกำหนดกระสุนที่มีขนาด 7.62 มิลลิเมตร ค่าความเร็วกระสุนตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 [2], [6], [8]

3.1.1.6 ใช้คอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะสูงทำการวิเคราะห์แผ่นเกราะกันกระสุน เพื่อวิเคราะห์หาการคลาดเคลื่อน (Error) ของโปรแกรมจำลองด้วยกราฟ Energy Conservation Energy Summary และ Time Increment ผลลัพธ์การจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์โดยวิเคราะห์แบบ Equivalent (Von Misses) Stress

3.1.1.7 ทำการสรุปผลการทดสอบและทำการวิเคราะห์การจำลองแผ่นเกราะกันกระสุนทั้ง 2 รูปแบบแล้วนำมาพิจารณาเพื่อเปรียบเทียบผลความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์และเขียนเล่มวิทยานิพนธ์

3.1.1.8 ทำการเผยแพร่ผลงานวิจัยด้วยการตีพิมพ์ เผยแพร่ลงในวารสารทางวิชาการ



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนกระบวนการวิจัย

3.1.2 กรอบการวิจัย

กรอบการวิจัยเป็นการวางแผนการดำเนินงานของงานวิจัยที่มีลักษณะเป็นลำดับขั้นตอนที่สามารถสะท้อนกิจกรรมต่าง ๆ ที่อยู่ภายใต้ขอบเขตการวิจัย ที่มีการนำประเด็นที่เป็นหัวข้อสำคัญมาระบุเพื่อใช้ในการกำหนดทิศทาง เช่น วิธีการออกแบบ การกำหนดตัวแปรต่าง ๆ สำหรับการออกแบบ แนวทางการสร้างภายหลังการออกแบบ ตลอดจนการทดสอบเพื่อหาผลลัพธ์ของตัวแปรที่กำหนดขึ้น สำหรับกรอบในงานวิจัยจะต้องมีความสัมพันธ์กันและสอดคล้องกับระเบียบวิธีวิจัยบนพื้นฐานตามทฤษฎีต่าง ๆ ของระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความแม่นยำเที่ยงตรง สามารถตรวจสอบความถูกต้องของกระบวนการทำวิจัยได้ ดังรูปที่ 3.2

รูปที่ 3.2 กรอบการวิจัย

3.1.3 เครื่องมือ อุปกรณ์ สำหรับการดำเนินงานวิจัย

3.1.3.1 แผ่นเกราะเซรามิกส์ 40x40 มิลลิเมตร ที่มีความหนา 5, 6, 8, 10 มิลลิเมตร ที่เป็นผลผลิตต่อยอดมาจากโครงการวิจัย “แผ่นเกราะเซรามิกส์และเกราะโลหะกันกระสุนระดับ 4 สำหรับรถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะ” ของ ดร.ประกอบ ชาติภุกต์ ในปี 2560 นำมาติดตั้งลงบนแผ่นโลหะ ในที่นี้เลือกเป็นแผ่นอลูมิเนียม 7075 T6

3.1.3.2 แผ่นอลูมิเนียม 7075 T6 ที่มีขนาด 300x300 มิลลิเมตร ที่ความหนา 6 มิลลิเมตร

3.1.3.3 อีพ็อกซี่ สำหรับใช้ยึดติดเชื่อมประสานเหล็ก เซรามิกส์และคอนกรีต

3.1.3.4 กระสุนปืน 7.62x51 มิลลิเมตร หัวกระสุนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.62 มิลลิเมตร ปลอกกระสุนยาว 51 มิลลิเมตร และกระสุน 9 มิลลิเมตร

3.1.3.5 เครื่องทดสอบการยิง ณ โรงงานวัตถุระเบิดทหาร จ.นครสวรรค์

3.1.3.6 เซนเซอร์หรือฉากวัดความเร็วกระสุน

3.1.3.7 เครื่องชั่งน้ำหนักหัวกระสุน และเครื่องชั่งดินส่งกระสุน

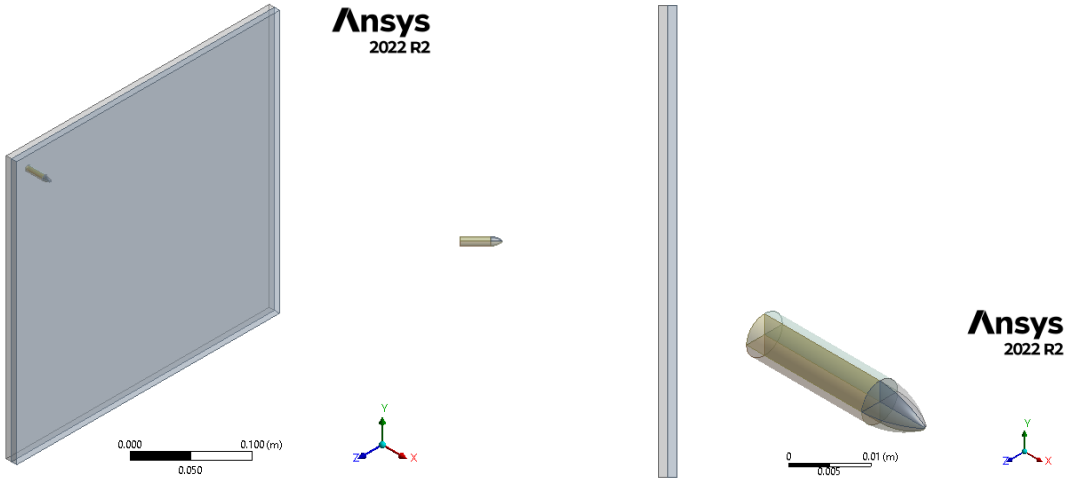
3.1.3.8 ชุดเครื่องมือสำหรับถอดและประกอบหัวกระสุน

3.1.3.9 เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ ใช้สำหรับวัดความหนาแผ่นเกราะ รูเจาะทะลุ ความลึกการเจาะทะลุ เป็นต้น

3.1.3.10 แท่นยึดกระบะวัสดุหนุน ใช้ติดตั้งแผ่นเกราะและสามารถปรับมุมเอียงได้ด้วย

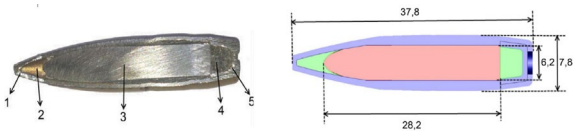
3.2 การออกแบบโมเดลแผ่นเกราะและกระสุน

โปรแกรม ANSYS DesignModeler ได้รับเลือกให้นำมาใช้ในการออกแบบโมเดลสามมิติ ซึ่งเป็นโปรแกรมการออกแบบภายในของโปรแกรม ANSYS เป็นการสร้างโมเดลสามมิติและวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ภายในด้วยตัวของโปรแกรมเอง ส่งผลทำให้ได้โมเดลที่มีความถูกต้อง ลดความผิดพลาดจากการนำเข้าหากต้องสร้างด้วยโปรแกรมอื่น จากการนำเข้าแผ่นเกราะกันกระสุนเป็นโมเดลที่มีขนาด 300×300 มิลลิเมตร ด้วยความหนาที่แตกต่างกัน ในกรณีที่เป็นแผ่นซ้อนจะทำการสร้างขึ้นโดยให้เนื้อผิวแยกจากกันถึงแม้ว่าพื้นผิวจะสัมผัสกันก็ตามทำให้ได้โมเดลที่เป็นแบบมัลติบอดี้ (Multibody) สำหรับกระสุนได้ถูกสร้างขึ้นให้มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกและมีหัวโค้งมนคล้ายรูปกรวย ซึ่งเป็นโมเดลกันกระสุนซึ่งใช้ในการจำลองที่แพร่หลายทั่วไป ในการขึ้นรูปหัวกระสุนจะต้องทำการแบ่งกระสุนออกเป็นสองส่วนประกอบด้วยส่วนที่เป็นลำตัวกระสุนทรงกระบอกและส่วนที่เป็นหัวกระสุนทรงกรวย นั่นคือจะมีสองชิ้นส่วนหลักตามที่กล่าวมา จากนั้นจะต้องทำการแบ่งส่วนในแนวตั้งและแนวแนวนอนทำให้สองชิ้นส่วนนี้กลายเป็นแปดชิ้นส่วนย่อย แสดงโมเดลสามมิติดังรูปที่ 3.3 จุดมุ่งหมายของการแบ่งหัวกระสุนให้ออกเป็นแปดชิ้นส่วนย่อยเพียงเพื่อต้องการให้โปรแกรม ANSYS สามารถกำหนดเอลิเมนต์ที่เป็นแบบเฮกซะฮีดรอลที่ใช้กับลำตัวกระสุนและเตตระฮีดรอลใช้กับส่วนหัวกระสุนเพื่อให้ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ที่ถูกต้องที่สุด ทั้งนี้สำหรับกระสุนที่ได้รับการออกแบบนั้นเพื่อใช้ในการจำลองและวิเคราะห์ตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 มีขนาดดังรูปที่ 3.4 ด้วยกระสุน AP 7.62 mm ซึ่งอ้างอิงขนาดจาก Namık Kılıç et al. [17] และทำจากวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) สำหรับแผ่นเกราะเซรามิกส์จะประกอบด้วยแผ่นเกราะแผ่นแรกหรือแผ่นด้านหน้าเป็นแผ่นเซรามิกส์ที่มีความแข็งสูง ทำหน้าที่ทำลายหัวกระสุนและแผ่นที่สองจะเป็นอลูมิเนียม 7075 T6 ทำหน้าที่ในการดูดซับพลังงานจากแรงกระแทกและยังยั้งการเคลื่อนที่ของเศษกระสุนและเศษเซรามิกส์ที่แตกออก ตัวแปรที่สำคัญคือค่าความหนา



A) Isometric view B) Right view C) หัวกระสุน

รูปที่ 3.3 แบบจำลอง 3 มิติของแผ่นเกราะกันกระสุนในมุมมองไอโซเมตริกและมุมมองด้านขวา และ C) แบบจำลองหัวกระสุน



A) B)

รูปที่ 3.4 ภาคตัดกระสุน A) กระสุน AP 7.62 mm และชิ้นส่วน: 1. ปลอกทองเหลือง 2. หัวจุด 3. แกนเหล็กชุบแข็ง 4. ฟิลเลอร์ฐานตะกั่ว 5. แก็ป และ B) ขนาดกระสุน มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร [17]

3.3 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

โปรแกรม ANSYS Explicit/Dynamics เป็นเครื่องมือขั้นสูงที่ถูกเลือกใช้ในการวิเคราะห์เพื่อช่วยให้เข้าใจเหตุการณ์ที่สามารถจำลองได้อย่างเหมาะสม สำหรับการจำลองทางกายภาพที่มีการรับภาระกระทำรุนแรงในช่วงเวลาสั้น ๆ ตัวอย่างเช่น การกระแทกและการเจาะทะลุของกระสุนที่กระทำลงบนแผ่นเกราะกันกระสุน (Ballistic Impact Test) สามารถวิเคราะห์แรงกระแทกและความเสียหาย หรือแม้กระทั่งการตกกระแทกของวัสดุ (Drop Test) เป็นต้น

3.3.1 ขั้นตอนในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ประกอบด้วย 3 ส่วน ดังนี้

1. Pre-processing ประกอบด้วย การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ ซึ่งโครงการวิจัยนี้เลือกใช้โปรแกรม ANSYS DesignModeler ในการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ทั้งหมด ซึ่งโปรแกรมจะทราบพื้นที่ผิว ปริมาตร และสมบัติอื่นของรูปทรงแบบจำลอง 3 มิตินั้นโดยอัตโนมัติ จากนั้นนำแบบจำลองเข้าสู่โปรแกรม ANSYS Explicit/Dynamics ทำการกำหนดสภาวะขอบเขตหรือเงื่อนไข

ขอบเขต (Support type) เช่น การจับยึดแผ่นเกราะกันกระสุนไปที่พื้นผิวของขอบทั้ง 4 ด้านเป็นแบบยึดแน่น กำหนดสมบัติของวัสดุ (Material properties) เช่น ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น ความเค้นคราก (Tensile Yield Strength) ความหนาแน่นของวัสดุ สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน การกำหนดวัสดุเป็น Isotropic Elasticity, Johnson-Holmquist Strength Continuous, Johnson-Cook Failure, Steinberg-Guinan Strength, กำหนด EOS เป็นต้น การกำหนดชนิดของเอลิเมนต์และการควบคุมความละเอียดของเอลิเมนต์ (Element Controlled) สภาวะและตำแหน่งของกระสุนกับแผ่นเกราะ เช่น ตำแหน่ง ขนาดและทิศทางของกระสุนที่จะวิ่งมาปะทะด้วยความเร็วค่าหนึ่งตามมาตรฐานต่อแผ่นเกราะ การกำหนดหน้าสัมผัส (Contact)

2. Solve-processing เป็นขั้นตอนการวิเคราะห์แบบ Explicit/Dynamics สำหรับการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นสูง การเปลี่ยนรูปขนาดใหญ่ ปัญหาที่เกิดจากการสัมผัส ซึ่งเกี่ยวข้องกับผลกระทบการสัมผัสหลายส่วนของรูปร่าง และพฤติกรรมของวัสดุที่ไม่เป็นเชิงเส้นสูง การวิเคราะห์แบบจำลองโดยการคำนวณบนคอมพิวเตอร์เพื่อทำการวิเคราะห์หรือจำลองพฤติกรรมตามธรรมชาติของระบบที่ต้องการ ปัญหาที่มีลักษณะเปลี่ยนรูปถาวรก็ควรเลือกแบบพลาสติก (Plasticity) เป็นต้น

3. Post-processing เป็นขั้นตอนการแสดงผลลัพธ์หลังจากการวิเคราะห์ โดยค่าที่แสดงจะมีลักษณะเป็นค่าตัวเลขที่โหนด (Node) ค่าสมบัติของแต่ละเอลิเมนต์ (Element) ผลลัพธ์ที่จะต้องใช้ในการแสดงผลเพื่อพิจารณา ประกอบด้วย การเสียรูป ทิศทางการเสียรูป ความเร็วของวัตถุ ทิศทางของความเร็ว ความเค้นและความเครียดต่างๆ รวมทั้งการตัดภาคส่วน (Section Planes)

3.3.2 สมมติฐานในการวิเคราะห์

ในการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้กำหนดสมมติฐานของวัสดุที่ใช้สำหรับกระสุน แผ่นเกราะอลูมิน่า 95% และแผ่นเกราะอลูมิเนียม 7075 T6 ให้เป็นวัสดุที่มีเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) และมีสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทุกทาง (Isotropic Materials) ความเสียหายที่เกิดขึ้นพิจารณาตั้งแต่ช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นไปจนถึงช่วงพลาสติก

3.3.3 โมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์

แผ่นเกราะกันกระสุนและหัวกระสุนถูกสร้างโดยโปรแกรม ANSYS DesignModeler ในรูปแบบไฟล์ชิ้นส่วนสามมิติที่มีหลายชิ้นส่วนแยกกันอยู่ในไฟล์ชิ้นส่วนเดียวกัน (Multibody) แผ่นเกราะมีขนาดความกว้างและความยาวเท่ากับ 30x30 เซนติเมตร โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นเกราะเป็นกรณีต่างๆ สำหรับกระสุนที่ใช้ในการจำลองเป็นกระสุน 7.62x51 มิลลิเมตร ที่มีความเร็วในการจำลองของกระสุนตามมาตรฐาน NIJ 3 [2], [6], [8]

กระสุนทังสเตนคาร์ไบด์ (Tungsten carbide bullet) เป็นกระสุนเจาะเกราะ ที่มีส่วนของหัวกระสุนอยู่ภายในปลอกทองเหลืองซึ่งทำจากทังสเตนคาร์ไบด์ โดยมีชื่อเรียกตามขนาดคือ “7.62 mm” ในการจำลองทางระเบียบวิธีไฟไนเอลิเมนต์ได้ใช้รูปแบบความเสียหายของ Johnson-

Holmquist Failure Model (JH-1, JH-2) ที่มีความเสียหายเมื่อแบบจำลองวัสดุที่เปราะ เช่น เซรามิกส์ภายใต้แรงดันขนาดใหญ่และอัตราความเครียดสูงรูปแบบจะพยายามที่จะรวมปรากฏการณ์ที่พบเมื่อวัสดุที่เปราะบางถูกแรงกระทำและเกิดความเสียหายซึ่งเป็นหนึ่งในแบบจำลองที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดเมื่อต้องรับมือกับผลกระทบแบบ Ballistic กำหนดให้ σ คือความเค้นคราก (Yield stress) เป็นไปตามสมการดังนี้ [32]

$$\sigma = \left(A\left(P^* + T^*\right)^N (1+D) + B.\left(P^*\right)^M D \right)\left(1 + C\ln\dot{\varepsilon}^*\right) \tag{3.1}$$

โดยที่ $T^* = \dfrac{T}{T_{HEL}}$ และ $P^* = \dfrac{P}{P_{HEL}}$

โดยที่ *A, B, C, M, N* เป็นค่าคงที่ของวัสดุ ความดันปกติ คือ $P^* = P/P_{HEL}$ โดยที่ *P* คือความดันไฮโดรสแตติกที่แท้จริง และ P_{HEL} คือความดันไฮโดรสแตติกที่ *HEL* (Hugoniot Elastic Limit) ความดันไฮโดรสแตติก แรงดึงสูงสุดที่ปรับให้เป็นมาตรฐานคือ $T^* = T/T_{HEL}$ โดยที่ *T* คือแรงดันไฟฟ้าสถิตสูงสุดที่วัสดุทนได้ อัตราความเครียดแบบไร้มิติ คือ $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ โดยที่ $\dot{\varepsilon}$ คือ อัตราความเครียดที่เทียบเท่าจริง และ $\dot{\varepsilon}_0 = 1\ s^{-1}$ [32]

จากสมการที่ (3.1) กรณีความแข็งแรงตามปกติไม่เสียหาย (The normalized intact strength) จะได้

$$\sigma_i^* = A\left(P^* + T^*\right)^N .\left(1 + C\ln\dot{\varepsilon}^*\right) \tag{3.2}$$

จากสมการที่ (3.1) กรณีความแข็งแรงตามปกติเสียหาย (The normalized fracture strength) จะได้

$$\sigma_f^* = B(P^*)^M .\left(1 + C\ln\dot{\varepsilon}^*\right) \le SFMAX \tag{3.3}$$

Johnson-Cook Model คือความสัมพันธ์ของวัสดุโลหะระหว่างความเค้นและความเครียดสามารถอธิบายได้ ในสภาวะของการเสียรูปขนาดใหญ่ (Large deformation) อัตราความเครียดสูง (High strain rate) และอุณหภูมิที่สูงขึ้น (High temperature) โมเดลนี้ได้ถูกนำมาใช้ในการทำนายพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุ แบบจำลองความเค้น Johnson-Cook แสดงดังสมการต่อไปนี้ [33]

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)\left[1 + C\ln\dot{\varepsilon}^*\right]\left[1 - T^{*m}\right] \tag{3.4}$$

โดยที่

σ คือ ความเค้นเทียบเท่า (Equivalent stress)

ε คือ ความเครียดพลาสติกที่เท่ากัน (Equivalent plastic strain)

A, B, C, m และ *n* คือ ค่าคงที่ของวัสดุ โดยที่ *A* คือ ค่าคงที่ภายใต้เงื่อนไขอ้างอิงความเค้นของวัสดุ *B* คือ ค่าคงที่การแข็งตัวของความเครียด *n* คือ สัมประสิทธิ์การแข็งตัวของความเครียด *C* คือ ค่าสัมประสิทธิ์การเสริมความแข็งแกร่งของอัตราความเครียด (A strain-rate-hardening factor) และ *m* คือ ค่าสัมประสิทธิ์การอ่อนตัวด้วยความร้อน (Thermal-softening factor) $\dot{\varepsilon}^*$ คือ อัตราความเครียดไร้มิติ (Strain rate nondimensionalized) ที่อ้างอิงจากอัตราความเครียดที่ 1/s, T^* คือ อุณหภูมิไร้มิติ (Nondimensional temperature) สำหรับ T^* กำหนดได้ด้วยสมการดังนี้ [33]

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \tag{5}$$

โดยที่ T_r คือ อุณหภูมิห้อง (298 K) และ T_m คือ อุณหภูมิหลอมละลายของวัสดุ

โดยค่าคุณสมบัติของวัสดุและพารามิเตอร์ของกระสุน 7.62x51 มิลลิเมตร เป็นวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ (Tungsten carbide) ที่ใช้ในการจำลองแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 Properties and parameter JH of tungsten carbide [34]

Properties	Tungsten carbide
Density (ρ, g/cm^3)	14.56
Young's modulus (E, GPa)	539
Poisson ratio (υ)	0.23
Bulk modulus (GPa)	332
Shear modulus (GPa)	219
Tensile yield strength (GPa)	3.85
Compressive yield strength (GPa)	4.53
Johnson-Holmquist Strength (Continuous JH-2)	
Damage type	Gradual (JH2)
Hugoniot elastic limit (HEL, GPa)	656
Intact strength constant (A)	0.9899
Intact strength exponent (n)	0.0322

Johnson-Holmquist Strength (Continuous JH-2)	
Strain rate constant (C)	0
Fracture strength constant (B)	0.67
Fracture strength exponent (m)	0.0322
Maximum fracture strength ratio	1000
Damage constant (D1)	1
Damage constant (D2)	0
Hydrodynamic tensile limit (GPa)	-4

.

ตารางที่ 3.2 Properties and parameter JH-2 of alumina 95% [35]

Properties	Alumina
Density (ρ, g/cm^3)	3741
Bulk modulus (GPa)	184.56
Shear modulus (GPa)	120.34
Hugoniot elastic limit (HEL, GPa)	6
Intact strength constant (A)	0.889
Intact strength exponent (n)	0.764
Strain rate constant (C)	0.0045
Fracture strength constant (B)	0.29
Fracture strength exponent (m)	0.53
Maximum fracture strength ratio	1
Damage constant (D1)	0.005
Damage constant (D2)	1
Hydrodynamic tensile limit (GPa)	-0.3

ตารางที่ 3.3 Properties and parameter of AL-7075 T6

Properties	AL-7075 T6
Density (ρ, g/cm^3)	2804
Specific heat (J/kg ^{o}C)	848
Steinberg-Guinan Strength	
Initial yield stress (Y, MPa)	420
Max. yield stress (Ymax, MPa)	810
Shear modulus (GPa)	80

Steinberg-Guinan Strength	
Hardening constant (B)	965
Hardening exponent (n)	0.1
Derivative (dG/dP, G'P)	1.74
Derivative (dG/dT, G'T), MPa/°C	-16.4
Derivative (dY/dP, Y'P)	0.02738
Melting temperature (T_{melt}, °C)	946.85
Shear modulus (GPa)	26.7
EOS	
Gruneisen coefficient	2.2
Parameter (C1, m/s)	5200
Parameter (S1)	1.36
Parameter quadratic (S2)	0

แผ่นเกราะอลูมินา (Alumina) 95% เป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบาและมีความแข็งเปราะ จึงเลือกใช้โมเดลทฤษฎีความเสียหายของ JH-2 มีพารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.2

ในส่วนของแผ่นเกราะที่ 2 คือวัสดุอลูมิเนียม 7075 T6 ซึ่งเลือกใช้แบบจำลองความเสียหาย Steinberg-Guinan Strength Model เป็นแบบกึ่งทดลองที่พัฒนาขึ้นสำหรับสถานการณ์ที่ทางมีอัตราความเครียดสูงและขยายไปยังอัตราความเครียดต่ำ ค่าคุณสมบัติและพารามิเตอร์ของวัสดุซึ่งมีในโปรแกรมจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของโปรแกรม ANSYS แสดงดังตารางที่ 3.3

ในส่วนการจำลองได้ใช้โปรแกรม ANSYS Explicit/ Dynamics ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของแผ่นเกราะกันกระสุน ด้วยความเร็ว 880 เมตรต่อวินาที ตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 ด้วยความเร็วกระสุน 850 เมตรต่อวินาที ดังนั้นจึงสร้างรูปแบบการจำลองยิงกระสุนโดยให้ขนาดของ เอลิเมนต์ที่กระสุนเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร และแผ่นเกราะขนาด 5 มิลลิเมตร โดยบีบให้ตรงกลางมีขนาดเล็กลดลงจากขอบของแผ่นเกราะเป็น 10 เท่า ชนิดของเอลิเมนต์สำหรับกระสุนเป็นแบบเฮกซะฮีดรอล (Hexahedral) และเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) และเฉพาะแผ่นเกราะกันกระสุนได้เลือกชนิดของเอลิเมนต์เป็นเฮกซะฮีดรอล (Hexahedral)

3.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Solve-processing)

ในส่วนของการวิเคราะห์ค่าในขั้นตอนการเตรียมค่าที่กำหนดโดยใช้โปรแกรมในการประมวลผลจากการปฏิบัติการนั้น จำเป็นต้องมีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน คือ 1. ผลของการคลาดเคลื่อน (Error) ได้จากโปรแกรม 2. สมรรถนะเครื่องคอมพิวเตอร์ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งส่วนประกอบทั้ง 2 นี้

จะเป็นตัวช่วยในการวิเคราะห์ผลจากการคำนวน การคลาดเคลื่อน (Error) ซึ่งค่าที่ยอมรับได้จากโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์จะต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ 5-10 หลังจากที่ “Solve” ในโปรแกรม

3.4.1 ขั้นตอนการตรวจสอบผลของการคลาดเคลื่อน (Error)

โดยการตรวจสอบผลของการคลาดเคลื่อนให้ไปที่คำสั่ง “Solution Information” ขั้นตอนต่อไปให้เข้าไปที่คำสั่ง “Solution Output” โดยจะมีตัวเลือกอยู่ทั้งหมด 5 รายการ คือ 1. Solver Output 2. Time Increment 3. Energy Conservation 4. Momentum Summary 5. Energy Summary ที่สามารถใช้ในการตรวจสอบผลการคลาดเคลื่อนในระหว่างการประมวลผลได้

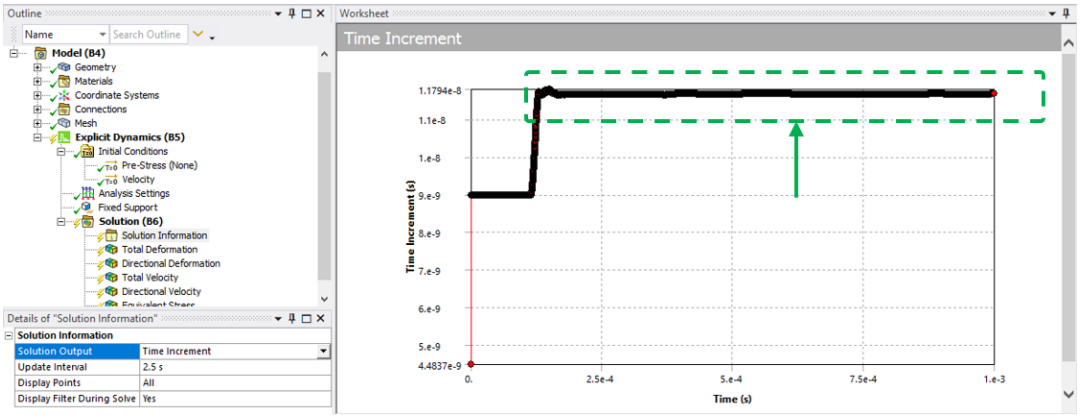
3.4.1.1. Solver Output จะบอกถึงจำนวนรอบของการทำงาน เวลาของการปฏิบัติงานในแต่ละขั้นตอน (Time Step) จำนวนร้อยละของการคำนวณและเวลาในการประมวลผลหลังจากเสร็จสิ้นแล้ว หากเกิดข้อผิดพลาดจากการวิเคราะห์ โปรแกรมจะหยุดการประมวลผลทันทีพร้อมกับแสดงสถานะของจุดที่เกิดความผิดพลาด ตามรูปที่ 3.5

Worksheet

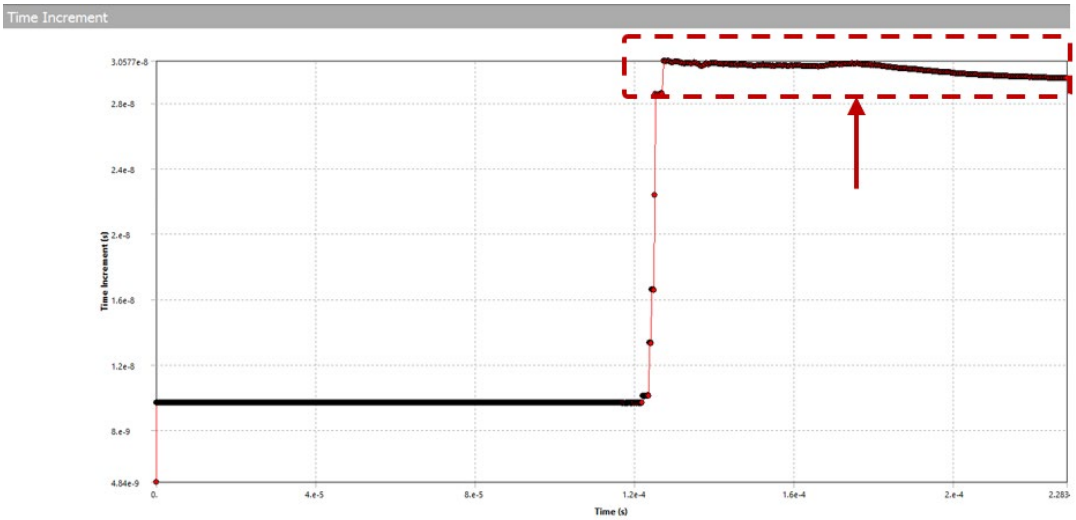
```
Cycle:    88893  Time:  9.999E-04s  Time Inc.: 1.167E-08s  Progress:  99.99%  Est. Clock Time Remaining: 0s
Cycle:    88894  Time:  9.999E-04s  Time Inc.: 1.167E-08s  Progress:  99.99%  Est. Clock Time Remaining: 0s
Cycle:    88895  Time:  9.999E-04s  Time Inc.: 1.167E-08s  Progress:  99.99%  Est. Clock Time Remaining: 0s
Cycle:    88896  Time:  1.000E-03s  Time Inc.: 1.167E-08s  Progress: 100.00%  Est. Clock Time Remaining: 0s
Cycle:    88897  Time:  1.000E-03s  Time Inc.: 1.167E-08s  Progress: 100.00%  Est. Clock Time Remaining: 0s
Cycle:    88898  Time:  1.000E-03s  Time Inc.: 1.167E-08s  Progress: 100.00%  Est. Clock Time Remaining: 0s
Cycle:    88899  Time:  1.000E-03s  Time Inc.: 1.167E-08s  Progress: 100.00%  Est. Clock Time Remaining: 0s
Cycle:    88900  Time:  1.000E-03s  Time Inc.: 1.167E-08s  Progress: 100.00%  Est. Clock Time Remaining: -

SIMULATION ELAPSED TIME SUMMARY

EXECUTION FROM CYCLE        1 TO    88900
ELAPSED RUN TIME IN SOLVER =      2.07470E+02 Minutes
TOTAL ELAPSED RUN TIME     =      2.09506E+02 Minutes
JOB RAN OVER    16 SLAVES
JOB RAN USING Intel MPI
JOB RAN USING DECOMPOSITION AUTO

Problem terminated .... wrapup time reached

 ******************************************
```

รูปที่ 3.5 ผลการประมวลผลของ Solver Output ที่ปกติ

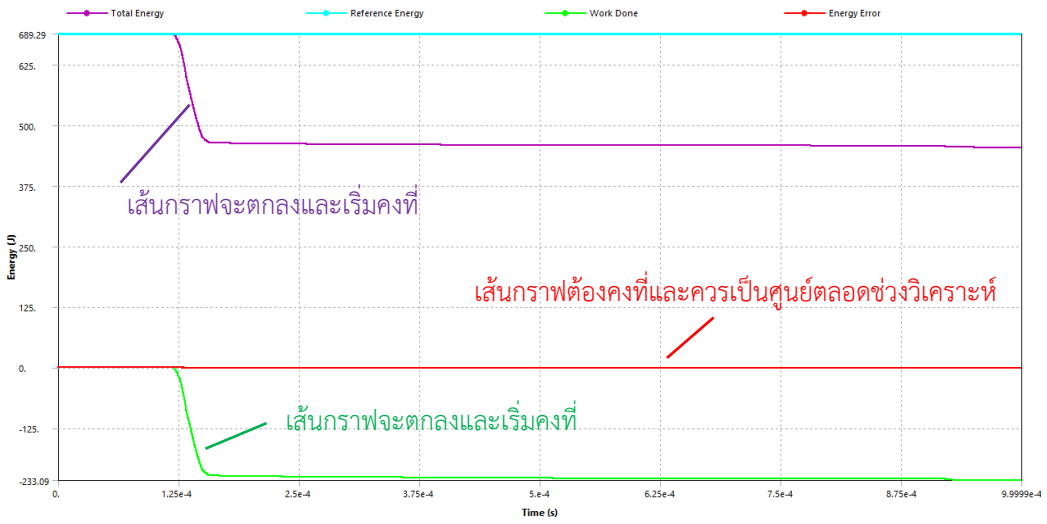
3.4.1.2. Time Increment คือกราฟแสดงเวลาของ Time Step สำหรับการประมวลผลการทำงาน เมื่อเกิดการกระแทกของการจำลองกราฟจะเปลี่ยนแปลงในช่วงของ Time Increment ที่สูง หลังจากเกิดการกระแทกเป็นที่เรียบร้อยแล้วกราฟจะลดลงคงที่จนครบ Time Step ของการทำงาน พร้อมกับบอกสถานะของการประมวลที่ปกติไม่มีการคลาดเคลื่อน ที่มากกว่าร้อยละ 5-10 ถ้าการประมวลผลนั้นมีความผิดปกติโปรแกรมจะยังทำการประมวลผลต่อไปแต่หลังจากที่วัตถุกระแทกแล้วกราฟจะมีลักษณะลดลงตาม Time Step ของการประมวลผลซึ่งจะไม่คงที่เพื่อเป็นการบอกถึงความผิดปกติ ตามรูปที่ 3.6 และ 3.7



รูปที่ 3.6 สถานะกราฟปกติ



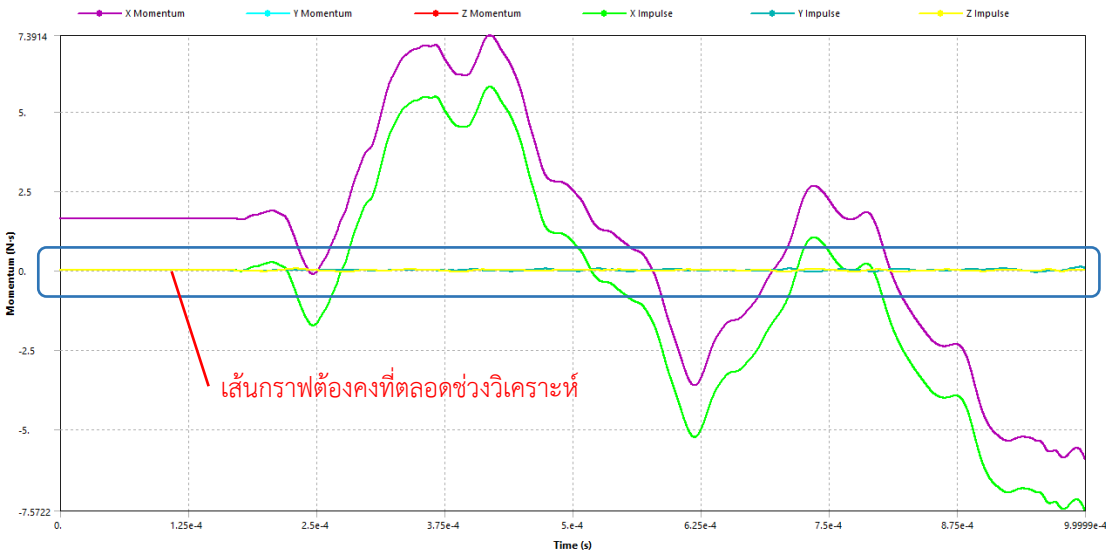
รูปที่ 3.7 สถานะที่กราฟมีความผิดปกติ



รูปที่ 3.8 เส้นกราฟ Energy Conservation ที่มีสถานะปกติ

3.4.1.3. Energy Conservation ลักษณะของกราฟที่แสดงค่าหน่วยของพลังงาน (Energy) ซึ่งพลังงานที่เกิดขึ้นจากการประมวลผลของวัตถุเคลื่อนที่เข้ากระแทกนั้น จะแสดงให้เห็นถึงพลังงานที่เกิดขึ้นเทียบกับ Time Step การประมวลจะแสดงค่าของพลังงาน Total Energy, Reference Energy, Work Done และ Energy Error ในส่วนของการจำลองนี้ให้สังเกตที่เส้นกราฟของ Energy Error ที่เป็นเส้นสีแดง จะแสดงลักษณะหลังเกิดการกระแทกของกระสุน จากการจำลองเส้นกราฟจะมีลักษณะคงที่เป็นการบอกถึงความปกติของการประมวลผลในทางตรงกันข้ามถ้ากราฟมีลักษณะที่เพิ่มขึ้นก็จะเป็นการบอกถึงความผิดปกติในการประมวลผล ตามรูปที่ 3.8

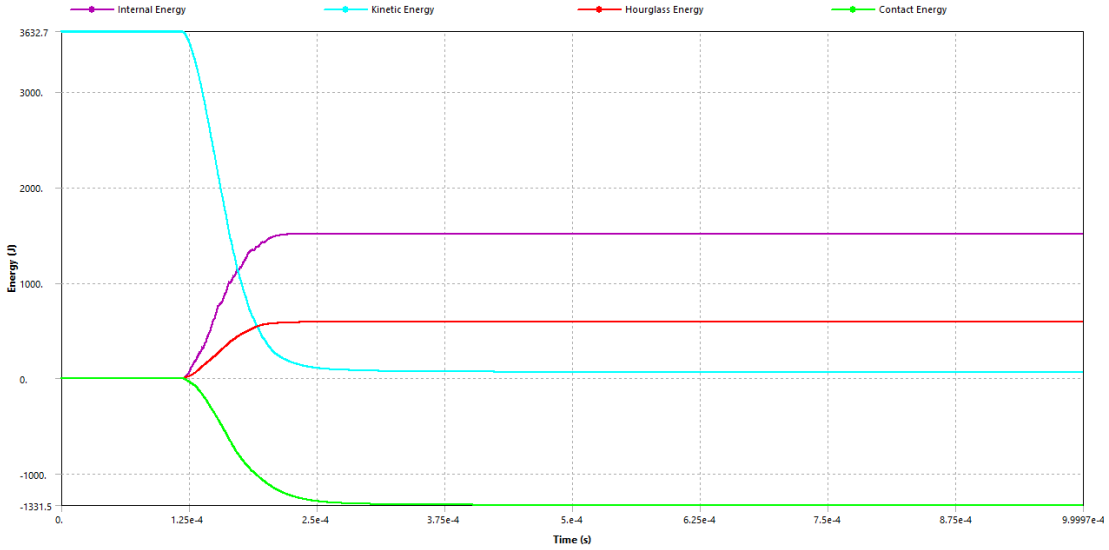
3.4.1.4. Momentum Summary เป็นกราฟที่จะแสดงผลของ Momentum ที่เกิดความเสียหายเทียบกับ Time Step ในแต่ละแกน ในการทำงานจะแสดงค่าของ Impulse ในแต่ละแนวแกนโดยสามารถตรวจสอบผลการคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากแนวแกนหลังวัตถุเกิดการกระแทกของการจำลองแล้ว เมื่อผลของ Momentum และ Impulse มีความสอดคล้องกับการจำลองที่กระแทกถือว่าปกติ การจำลองจากด้านข้างของชิ้นงานซึ่งอยู่ในแนวแกน Z เส้นสีเหลืองจะเป็นค่าของ Impulse ในแนวแกน Z เส้นกราฟจะมีลักษณะคงที่และเส้นสีแดงจะบอกถึงค่าของ Momentum ในแนวแกน Z ซึ่งจะไม่แสดงผลในกราฟ ดังนั้นเมื่อวัตถุกระแทกแล้วและไม่สอดคล้องกันถือว่ามีความผิดปกติของการจำลองนี้ ตามรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ผลที่เป็นปกติของ Impulse ในแกน Z

3.4.1.5. Energy Summary เป็นการแสดงผลของพลังงานที่เกิดขึ้นจากการที่วัตถุเกิดการกระแทกโดยมีพลังงานที่เกี่ยวข้องดังนี้ Internal Energy, Kinetic Energy, Hourglass Energy, Contact Energy สามารถตรวจสอบของการคลาดเคลื่อนจากเส้นกราฟของ

Hourglass Energy ซึ่งเป็นผลที่เกิดจากการสร้างเมช (Mesh) แบบ Hexahedral โดยเฉพาะค่าของ Element ทั้ง 4 จุด จะมีขนาดเท่ากัน ซึ่งจะทำให้ค่าความเครียด (Strain) เป็นศูนย์หรือที่เรียกว่า “Hourglass Effect” ค่าที่แสดงผลของกราฟ Hourglass Energy จะแสดงผลเป็นเส้นสีแดงโดยจะต้องมีค่าที่น้อยกว่าเส้นสีม่วงที่เป็นค่าของ Internal Energy จึงจะถือว่าปกติ ในทางตรงกันข้ามถ้าเส้นสีแดง Hourglass Energy มีค่ามากกว่าเส้นสีม่วง Internal Energy ก็จะเกิดความผิดปกติขึ้นจากการประมวลผล ที่มีสาเหตุอันเนื่องมาจากการกำหนดการตั้งค่าจากการสร้างรูปแบบเมช (Mesh) ตามรูปที่ 3.10



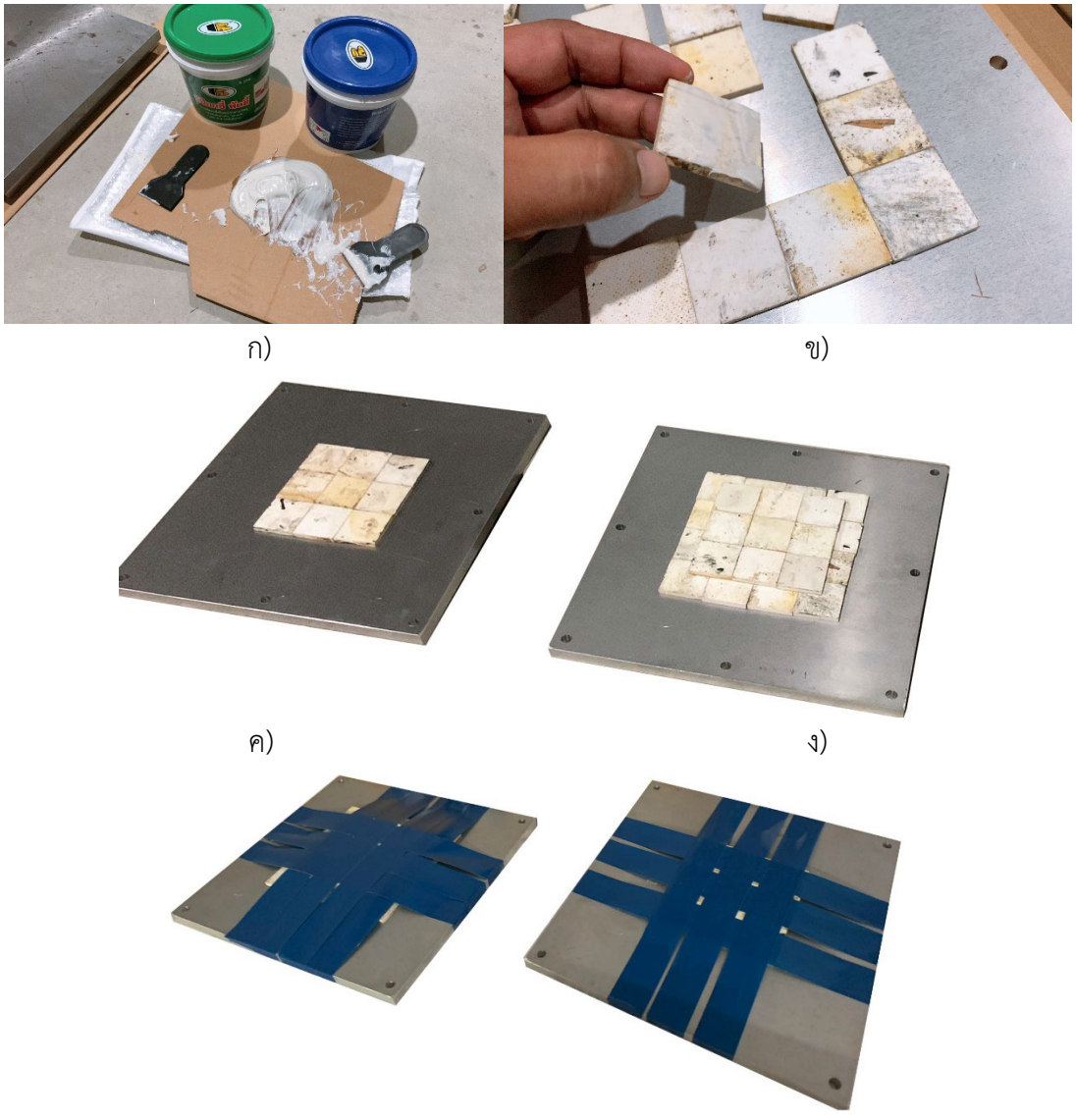
รูปที่ 3.10 Hourglass Energy ปกติ

3.4.2 สมรรถณะเครื่องคอมพิวเตอร์ในการประมวลผล

ในการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม ANSYS Explicit/Dynamic เพื่อให้ได้ผลการคำนวณที่เที่ยงตรงและมีความคลาดเคลื่อนที่น้อยเพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์การจำลองการยิงที่มีความใกล้เคียงความเป็นจริงเพื่อที่จะใช้ในการคาดการณ์และการเปรียบเทียบเพื่อเป็นการยืนยันผลดังนั้นเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถณะสูงจะเป็นปัจจัยสำคัญในการประมวลผลการตรวจสอบค่าคลาดเคลื่อน (Error) เนื่องจากในการสร้างขนาดของเมช (Mesh) ที่แบบจำลองขนาดเล็กซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการวิเคราะห์ ปัจจัยด้านเวลาเป็นตัวแปรที่มาเกี่ยวข้องซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ของวัตถุ (Dynamics) และเกี่ยวข้องกับความเที่ยงตรงของการจำลองที่เหมือนจริงทั้งทางด้านของความเสียหาย ดังนั้นจึงต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงในการประมวลผล โดยรายละเอียดของอุปกรณ์ของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ประกอบด้วย 1. หน่วยประมวลผล (CPU) AMD Ryzen Threadripper 2990WX 32 Cores, 2. Mainboard MEG X399 creation (MS- 7B92), 3. หน่วยความจำ Type DDR4 size 96 Gbytes Channel # Quad NB Frequency Memory slot DD4-2132 (1066 MHz) corsair, 4. VGA: NVIDIA Quadro RTX 400

3.5 การเตรียมแผ่นเกราะสำหรับการทดลอง

จากการเตรียมแผ่นอลูมิเนียมด้วยขนาด 300x300 มิลลิเมตร ที่ความหนาต่างๆ และแผ่นเซรามิกส์ที่มีขนาด 40x40 มิลลิเมตร นำมาติดตั้งเข้าด้วยกันสำหรับทำเป็นแผ่นเกราะโลหะและเซรามิกส์กันกระสุนสำหรับรถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะ นำแผ่นเกราะมาประกอบเข้าด้วยกันโดยใช้วิธีการติดด้วยอีพ็อกซี่ (Epoxy) ที่มีความหนาชั้นอีพ็อกซี่ 0.1 มิลลิเมตร อ้างอิงจาก J. Lo pez-Puente et al. [37] พื้นผิวด้านข้างของแผ่นเซรามิกส์แต่ละแผ่นจะแนบสนิทเข้าหากันและจะไม่มีการเติมอีพ็อกซี่ลงไป มีขั้นตอนดังรูปที่ 3.11



ก) ข) ค) ง) จ)

รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นเกราะเซรามิกส์กับแผ่นโลหะ ก) อีพ็อกซี่ ข) การทาอีพ็อกซี่ลงบนแผ่นเซรามิกส์ ค) เซรามิกส์ชั้นเดียวและเซรามิกส์สองชั้น และ จ) คาดด้วยเทปกาวเพื่อใช้ตรวจสอบร่องรอยการเสียหายหลังการทดสอบยิง

บทที่ 4
ผลการดำเนินงาน

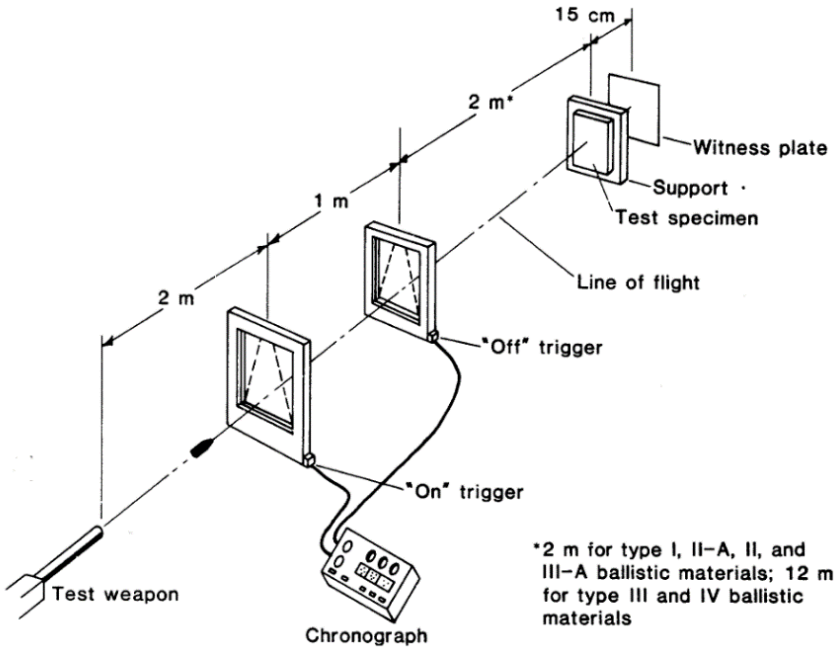
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการดำเนินการวิจัยทั้งหมดที่ได้ทำการดำเนินการด้วยกระบวนการที่อธิบายไว้ในบทที่ 3 ประกอบด้วย ผลการดำเนินงานและผลการยิงกระสุนลงบนแผ่นเกราะ ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลการเปรียบเทียบและกรณีศึกษาต่างๆ ซึ่งผลที่ได้จะนำไปสู่การต่อยอดงานวิจัยอื่นได้ต่อไป โดยรายละเอียดผลการดำเนินการได้มีการแยกอธิบายตามกลุ่มการทดลองที่จะกล่าวถึงดังต่อไปนี้

4.1 ผลการดำเนินงานและผลการยิงกระสุนลงบนแผ่นเกราะ

จากการที่ได้เตรียมแผ่นเกราะกันกระสุนดังบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.5 รูปที่ 3.11 จึงได้นำไปสู่การทดสอบการยิงกระสุนบนแผ่นเกราะ เจ้าหน้าที่ทหารประจำโรงงานวัตถุระเบิดทหาร กรมการอุตสาหกรรมป้องกันประเทศและพลังงาน (Military Explosives Factory, Defence Industry Department, Defence Industry and Energy Centre) ตำบลย่านมัทรี อำเภอพยุหะคีรี จังหวัดนครสวรรค์ จะเป็นทีมงานดำเนินการทำการทดสอบ ซึ่งต้องเตรียมเครื่องทดสอบและชุดควบคุมดังรูปที่ 4.1-4.3 สำหรับแผ่นเกราะเซรามิกส์ชั้นเดียวจะยิงกระสุนตามมาตรฐาน NIJ 3A ด้วยกระสุนขนาด 9 มิลลิเมตร FMJ 124 Gr. ที่มุม 0 องศา ความเร็วกระสุนตามมาตรฐานเท่ากับ 436 ± 9.1 เมตรต่อวินาที ความเร็วที่วัดได้จริงเท่ากับ 438.5 เมตรต่อวินาที สำหรับแผ่นเกราะเซรามิกส์สองชั้น ด้วยกระสุน 7.62 x 51 มิลลิเมตร NATO FMJ 148 Gr. ที่มุม 0 องศา ความเร็วกระสุนตามมาตรฐาน NIJ 3 เท่ากับ 847 ± 9.1 เมตรต่อวินาที ที่มุม 0 องศา ความเร็วกระสุนที่วัดได้จริงเท่ากับ 839.1 เมตรต่อวินาที และเป็นความเร็วที่ใช้กำหนดในในโปรแกรม ANSYS จะทำการป้อนค่าความเร็วกระสุนที่ 436 และ 850 m/s สำหรับแผ่นเกราะเซรามิกส์ชั้นเดียวและแผ่นเกราะเซรามิกส์สองชั้น ตามลำดับ โดยมีผลการทดสอบการยิงจริงระดับ NIJ 3A และ 3

โดยกระบวนการทดสอบการยิงนี้ต้องทำการบรรจุดินปืนลงในปลอกกระสุนใหม่ทุกครั้งด้วยน้ำหนักของดินปืนที่เหมาะสมจะทำให้ได้ความเร็วที่เป็นไปตามมาตรฐาน NIJ และต้องมีการทดสอบความเร็วในการยิงควบคู่ไปด้วย ในห้องทดสอบการยิงจะไม่อนุญาตให้บุคคลทั่วไปเข้าไปได้ เนื่องด้วยต้องรักษาไว้ซึ่งความปลอดภัย โดยตามมาตรฐานต้องมีการกำหนดอุณหภูมิห้องและความชื้นในการทดสอบด้วยที่อุณหภูมิ 21 °C ± 2.9 °C และ (2) ความชื้นสัมพัทธ์ 50% ± 20% เท่านั้น และเก็บกระสุนที่เตรียมไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ เจ้าหน้าที่จะทำการตรวจสอบอุปกรณ์การยิงและเครื่องยิงกระสุนให้พร้อมใช้งาน อีกทั้งยังต้องตรวจสอบระยะห่างจากปากลำกล้องปืนทดสอบไปยังแผ่นเกราะที่จะยิงเท่ากับ 15.0 เมตร ± 1.0 เมตร (กรณียิงตามมาตรฐาน NIJ 3 หรือ 4) และระยะห่างจากปากลำ

กล้องปืนทดสอบไปยังแผ่นเกราะที่จะยิงเท่ากับ 5.0 เมตร ± 1.0 เมตร (กรณียิงตามมาตรฐาน NIJ 3A) ตามรูปที่ 4.1 ชุดอุปกรณ์การยึดแผ่นเกราะหรือเรียกว่า “กระบะวัสดุหนุน” จะถูกออกแบบให้สามารถใส่แผ่นเกราะที่มีขนาด 300x300 มิลลิเมตร กระบะวัสดุหนุนจะต้องยึดอย่างแน่นหนากับแท่นยึด ให้สามารถติดตั้งเสื้อเกราะได้ทั้งแนวตั้งและแนวนอน รวมทั้งด้านหน้าของวัสดุหนุนสามารถรองรับแผ่นเกราะได้ทั้งหมด ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน NIJ ทุกประการ ในการทดสอบจะต้องมีการทดลองเพื่อหาตำแหน่งการกระทบของกระสุนบนแผ่นเกราะ เพราะการเคลื่อนที่ของกระสุนจะเป็นวิถีโค้งแม้ว่าจะมีระยะทางสั้นเพียง 15 เมตร ดังนั้นการหักเหของกระสุนจะต้องไม่เกิน 5 องศา จากแนวทิศที่กำหนด โดยรูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ตำแหน่งอุปกรณ์ต่างๆ และระยะการยิงตามมาตรฐาน NIJ [6], [7]

เครื่องวัดความเร็วกระสุนในรูปที่ 4.1 ที่ใช้ทดสอบจะมีอย่างน้อย 2 ชุด และสามารถตรวจจับความเร็วกระสุนได้ในระยะตั้งแต่ 3 เมตรขึ้นไป เครื่องคำนวณจะต้องบันทึกค่าเฉลี่ยความเร็วกระสุน ที่มีค่าผิดพลาดได้น้อยกว่า 1.0 เมตรต่อวินาที สำหรับมาตรฐาน NIJ ระดับ 3A จะใช้กระสุน 9 มิลลิเมตร FMJ 124 Gr. ความเร็ว 436 ± 9.1 เมตรต่อวินาที (1400 ฟุตต่อวินาที) และสำหรับมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 จะใช้กระสุนขนาด 7.62x51 มิลลิเมตร NATO M80 ball หนัก 9.6 กรัม มีความเร็ว 847 ± 9.1 เมตรต่อวินาที (2780 ± 30 ฟุตต่อวินาที) รูปที่ 4.2 แสดงเครื่องยิงกระสุนและเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับบันทึกผลและควบคุมสำหรับการทดสอบตามมาตรฐาน NIJ 3 และ 4 เท่านั้น สำหรับเครื่องยิงกระสุนในระดับ I, IIA, II, และ IIIA จะใช้เครื่องทดสอบการยิงดังรูปที่ 4.3 และกำหนดระยะห่างจากกล้องตรวจจับความเร็วตัวสุดท้ายไปยังเป้าหมายด้วยระยะ 2 เมตร ส่งผลให้มีระยะยิงจากปากลำกล้องถึงเป้าหมาย 5 เมตร

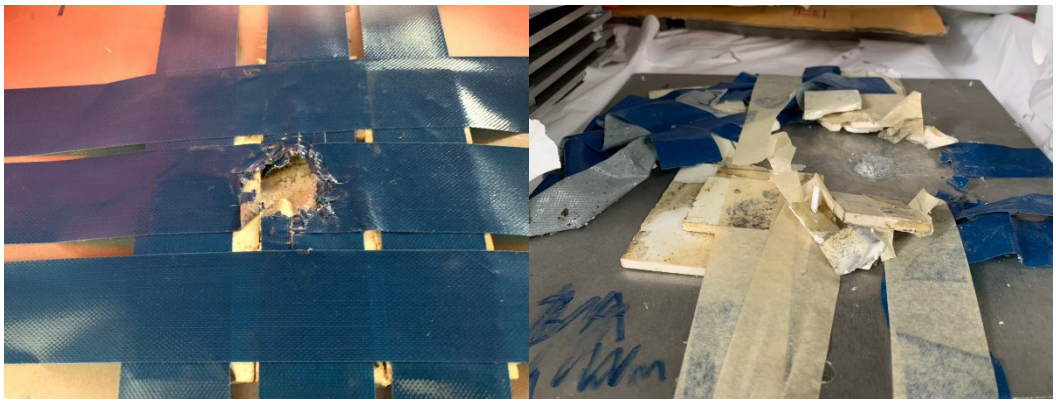
รูปที่ 4.2 แท่นยิงกระสุนและเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับบันทึกผลและควบคุมตามมาตรฐาน NIJ 3, 4

(a) เป้าเล็งศูนย์ (b) ติดตั้งกล้องวัดความเร็วกระสุนตามมาตรฐาน

รูปที่ 4.3 การจัดเตรียมแท่นยิงพร้อมตรวจสอบติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ สำหรับการทดสอบตามมาตรฐาน NIJ IIIA (รองรับระดับ I, IIA, II, IIIA)

ในข้อกำหนดมาตรฐาน American National Standard Institute/Sporting Arms and Ammunition Manufacturer's Institute (ANSI /SAAMI) ได้กำหนดลักษณะสำหรับลำกล้องทดสอบและการติดตั้งลำกล้องทดสอบไว้ และต้องดำเนินการบรรจุดินปืนใหม่ทุกครั้งให้ได้น้ำหนักที่ถูกต้องอันจะส่งผลต่อความเร็วกระสุน และไม่สามารถใช้อาวุธปืนทั่วไปมาทำการยิงได้ สำหรับกล้องทดสอบจะมี

ความยาวของลำกล้องปืนจะต้องไม่น้อยกว่าที่กำหนดใน ANSI /SAAMI อย่างไรก็ตามลำกล้องที่ยาวกว่าอาจนำมาใช้ยิงได้หากจำเป็นจะต้องใช้กระสุนเฉพาะชนิดนั้น และลำกล้องปืนที่มีรังเพลิงไม่ได้ตามมาตรฐาน สามารถนำมายิงประเมินขีดจำกัดทางขีปนวิธีได้ รูปที่ 4.3 เป็นการติดตั้งกับแท่นปืนทดสอบสำหรับกระสุนปืน 9 มิลลิเมตร การยึดต้องแน่นหนาและทนทานต่อการยิงหลายนัดติดต่อกัน ติดตั้งแผ่นพิสูจน์ที่เป็นแผ่นอลูมิเนียมบางด้านอยู่หลังแผ่นเกราะ การให้ผลการทดสอบผ่านหรือไม่จะต้องตรวจสอบที่แผ่นพิสูจน์ ต้องไม่มีรอยทะลุจากสะเก็ดกระสุนหรือจากแผ่นเกราะ ในช่วงของการทดสอบทุกคนจะต้องออกนอกพื้นที่การทดสอบทั้งหมด และต้องไปประจำที่ห้องควบคุมเท่านั้น อีกทั้งยังต้องติดตั้งหูฟังเพื่อป้องกันเสียงดังจากการยิงด้วย จากรูปที่ 4.4 เป็นผลการทดสอบการยิง ซึ่งผ่านการทดสอบทั้งหมด หมายความว่ากระสุนเจาะทะลุชั้นแรกที่เป็นแผ่นเซรามิกส์ทั้งหมด หัวกระสุนถูกทำลาย และกระสุนพุ่งต่อไปยังแผ่นเกราะชั้นที่สองและไม่สามารถเจาะทะลุผ่านไปได้



ก) ข)

รูปที่ 4.4 ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับแผ่นเกราะ ก) แผ่นเกราะเซรามิกส์ชั้นเดียวและยิงกระสุนตามมาตรฐาน NIJ 3A ข) แผ่นเกราะเซรามิกส์สองชั้นและยิงกระสุนตามมาตรฐาน NIJ 3

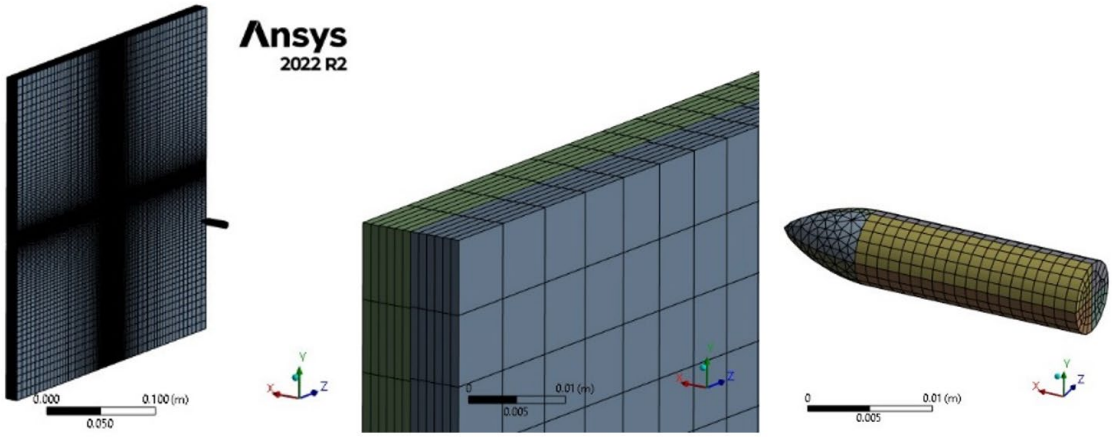
4.2 ผลการสร้างไฟไนต์เอลิเมนต์โมเดลและผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในส่วนของแผ่นเกราะที่ 2 คือวัสดุอลูมิเนียม 7075 T6 ซึ่งเลือกใช้แบบจำลองความเสียหาย Steinberg-Guinan Strength Model เป็นแบบกึ่งทดลองที่พัฒนาขึ้นสำหรับสถานการณ์ที่มีอัตราความเครียดสูงและขยายไปยังอัตราความเครียดต่ำ ค่าคุณสมบัติและพารามิเตอร์ของวัสดุซึ่งมีในโปรแกรมจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ในส่วนการจำลองได้ใช้โปรแกรม ANSYS Explicit/ Dynamics ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของแผ่นเกราะกันกระสุนตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 ด้วยความเร็วกระสุน 850 เมตรต่อวินาที ดังนั้นจึงสร้างรูปแบบการจำลองยิงกระสุนโดยให้ขนาดของเอลิเมนต์ที่กระสุนเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร และแผ่นเกราะขนาด 5 มิลลิเมตร โดยบีบให้ตรงกลางมีขนาดเล็กลดลงจากขอบของแผ่นเกราะเป็น 10 เท่า ชนิดของเอลิเมนต์สำหรับกระสุนเป็นแบบเฮกซะฮีดรอล (Hexahedral) และเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) และเฉพาะแผ่นเกราะกันกระสุนได้เลือกชนิดของ

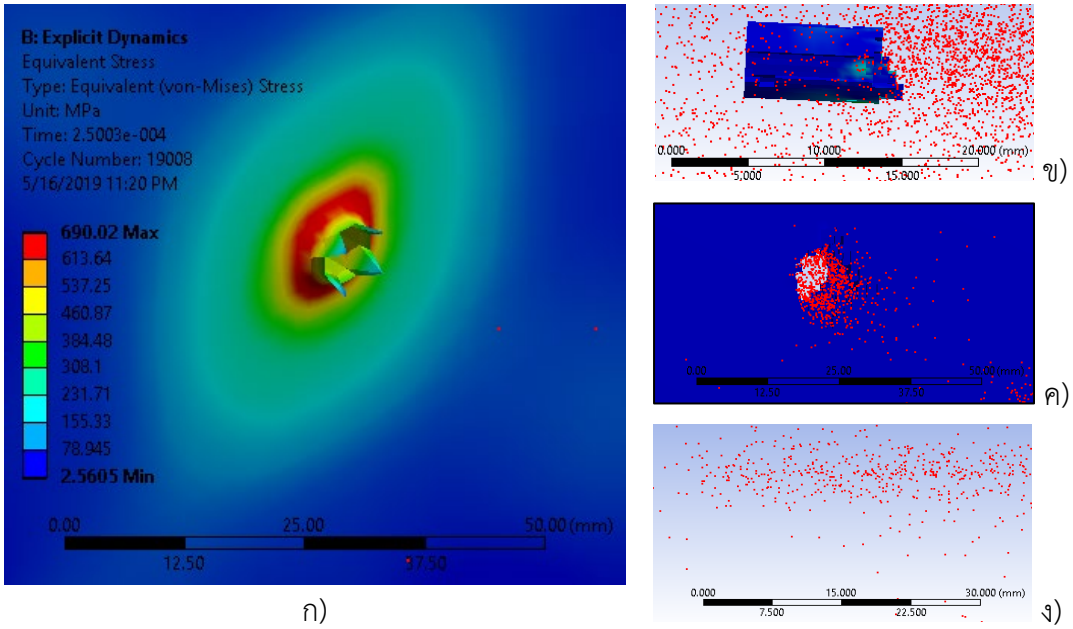
เอลิเมนต์เป็นเฮกซะฮีดรอล (Hexahedral) การดำเนินการในส่วนกระบวนการ Pre-Processing โดยเฉพาะในส่วนของการแบ่งเอลิเมนต์และการเลือกใช้เอลิเมนต์ ส่งผลต่อความแม่นยำอย่างมากในการวิเคราะห์ หากทำการแบ่งเอลิเมนต์โดยไม่มีการควบคุมอย่างเหมาะสมจะส่งผลให้ค่าความเค้นและการเสียหายไม่เป็นสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา

ดังนั้นในการจำลองการเสียหายด้วยโปรแกรม ANSYS Explicit/Dynamic ด้วยชุดคำนวณแบบ AUTODYN นั้นจะต้องทำการกำหนดขนาดเอลิเมนต์เท่ากับ 3 มิลลิเมตร ให้เกิดการแบ่งขนาดแบบลู่เข้าทั้งในแนวนอนและแนวตั้งของแผ่นเกราะดังรูปที่ 4.5 เพื่อให้เกิดการลดขนาดเอลิเมนต์มาอยู่ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางแผ่นเกราะและหัวกระสุนมีขนาดเอลิเมนต์เท่ากับ 1 มิลลิเมตร กำหนดให้มีชั้นของเอลิเมนต์ในแผ่นเกราะเท่ากับ 6 ชั้น ส่งผลให้มีจำนวนโหนดเท่ากับ 147,509 โหนด และมีจำนวนเอลิเมนต์รวมเท่ากับ 125,269 เอลิเมนต์

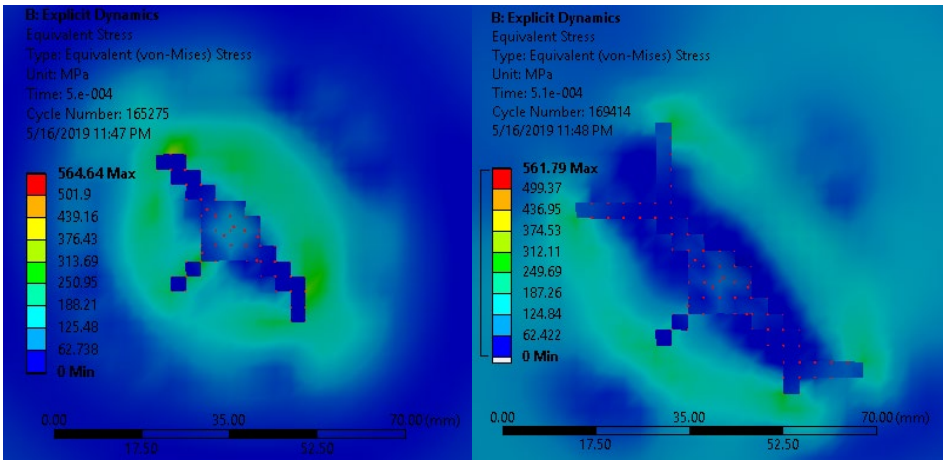
จากการจำลองแผ่นเกราะเดี่ยวแผ่นที่ 1 ด้วยวัสดุอลูมินา 95% ที่ความหนา 6, 8 และ 10 มิลลิเมตร ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าแผ่นเกราะเซรามิกส์เดี่ยวไม่สามารถต้านการเจาะทะลุได้และเกิดความเสียหายให้กับกระสุนได้เฉพาะที่หัวกระสุนแต่ลำตัวกระสุนยังไม่แตกเสียหายแล้วทะลุออกไป ในส่วนแผ่นเกราะแผ่นที่ 2 ด้วยวัสดุอลูมิเนียม 7075 T6 ที่ความหนา 6, 8 และ 10 มิลลิเมตร สามารถสร้างความเสียหายให้กับหัวกระสุนได้ แต่เศษโลหะของกระสุนที่ทะลุไปยังคงเป็นโลหะที่เป็นลักษณะลำตัวของกระสุน ดังรูปที่ 4.6 ก) และ 4.6 ข) นั่นแสดงให้เห็นว่า ทั้งแผ่นเกราะเซรามิกส์เดี่ยวหรือแผ่นอลูมิเนียมเดี่ยว ที่ไม่ได้ประกอบเข้าด้วยกันจะไม่สามารถต้านทานการยิงกระสุนได้ ดังนั้นจึงได้นำทั้ง 2 วัสดุ มาซ้อนกันเป็น 2 ชั้น ซึ่งแผ่นด้านหน้าเป็นวัสดุอลูมินา 95% แผ่นด้านหลังเป็นอลูมิเนียม 7075 T6 ทำการจำลองที่ความหนาต่างๆ จนกระทั่งได้ความหนาและรูปแบบแผ่นเกราะซ้อนที่สามารถทนทานการเจาะทะลุได้ ซึ่งที่ความหนาของแผ่นด้านหน้าเท่ากับ 6 มิลลิเมตร และแผ่นด้านหลังมีความหนา 6 มิลลิเมตร แผ่นเกราะสามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุน 7.62 มิลลิเมตร ได้



รูปที่ 4.5 ผลการกำหนดขนาดและแบ่งเอลิเมนต์



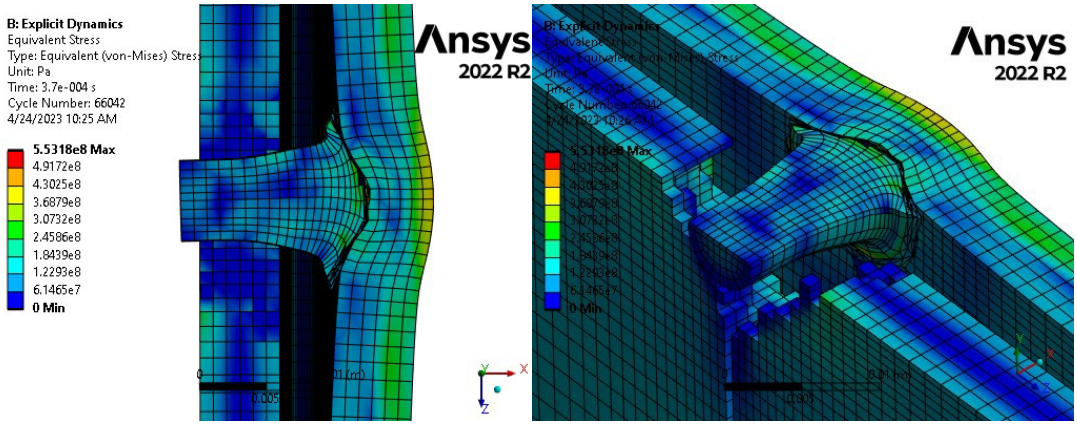
รูปที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ ก) การเจาะทะลุของแผ่น AL-7075 T6 หนา 10 มม. ข) ลักษณะการเสียหายของกระสุน 7.62x51 มม. ค) การเจาะทะลุของแผ่นอลูมินา 95% ที่ความหนา 10 มม. และ ง) ลักษณะการเสียหายของกระสุน 7.62x51 มม.



รูปที่ 4.7 ลักษณะรอยแตกของแผ่นที่ 1 วัสดุอลูมินา 95% (Time step = 50 ms)

เมื่อกระสุนเกิดการชนที่แผ่นที่ 1 ทำให้กระสุนเกิดการเสียหายและทะลุไปยังแผ่นที่ 2 กระสุนจึงหยุดเคลื่อนที่และฝังอยู่กับแผ่นที่ 2 ที่เป็นวัสดุอลูมิเนียม 7075 T6 ดังรูปที่ 4.6 ค) และ 4.6 ง) หลังจากที่กระสุนเกิดการหยุดและฝังตัวที่แผ่นเกราะชั้น 2 แล้วทำให้เกิดความเค้นสะสมที่แผ่นเกราะเป็นจำนวนมาก ซึ่งทำให้แผ่นเกราะแผ่นที่ 1 วัสดุอลูมินา 95% เกิดมีรอยแตกเพิ่มขึ้น และสอดคล้องกับ A. Rajput and M. A. Iqbal [36] ตามรูปที่ 4.7

ดังนั้นแผ่นที่ 1 ซึ่งเป็นวัสดุอลูมินา 95% มีความแข็งมาก ส่งผลให้มีการอ่อนตัวหรือการยุบตัวของแผ่นน้อยจึงเกิดความเค้นสะสมภายในแผ่นเกราะ เกิดการแตกกระจายที่บริเวณรอบๆ รูเจาะทะลุซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีความเสียหายเกิดขึ้นอยู่แล้ว เมื่อกระสุนผ่านแผ่นที่ 1 ไปยังแผ่นที่ 2 ที่ทำหน้าที่ดูดซับพลังงานเพื่อหยุดการเคลื่อนที่ของกระสุนโดยใช้วัสดุอลูมิเนียม 7075 T6 มีความหนา 6 มิลลิเมตร ผลที่ได้คือสามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนและสามารถลดความเร็วของกระสุนได้



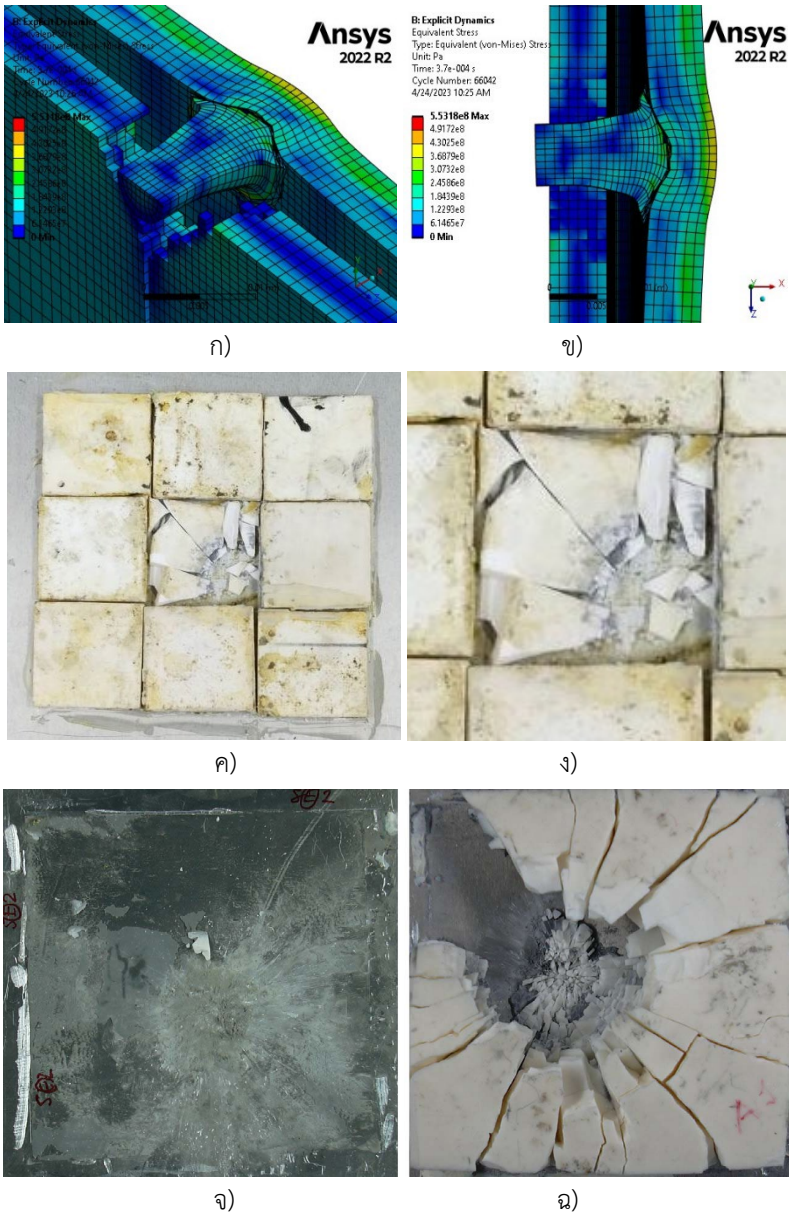
รูปที่ 4.8 ลักษณะความเสียหายของแผ่นเกราะและกระสุน 7.62x51 mm, Time step = 37 ms

4.3 การเปรียบเทียบความเสียหายด้วยวิธีการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

สำหรับการทดสอบตามมาตรฐาน NIJ 3 แผ่นเกราะซ้อนกัน 2 ชั้น โดยแผ่นด้านหน้าทำจากวัสดุอลูมินา (Alumina) 95% มีความหนา 10 มิลลิเมตร ประกอบขึ้นจากแผ่นอลูมินา (Alumina) 95% ขนาด 40x40 มิลลิเมตร จำนวน 9 แผ่น สำหรับแผ่นที่สองซึ่งเป็นแผ่นด้านหลังทำจากวัสดุวัสดุอลูมิเนียม 7075 T6 มีความหนา 10 มิลลิเมตร ขนาด 300x300 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.6 นำไปยิงเพียงนัดเดียวตามมาตรฐาน NIJ 3 ผลการทดสอบยิงพบว่ากระสุนได้เจาะทะลุแผ่นเกราะด้านหน้าอย่างสมบูรณ์แต่ไม่สามารถทะลุผ่านแผ่นเกราะด้านหลังได้ เกิดรอยเป็นผิวยุบตัวที่บริเวณด้านหน้าแผ่นเกราะตามรูปที่ 4.7

วิธีการจำลองความเสียหายของแผ่นเกราะกันกระสุนทางไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการทดสอบยิงจริง พบว่า ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับแผ่นเกราะนั้นมีความสอดคล้องกัน ซึ่งสามารถเชื่อถือได้โดยพิจารณาจากรูปแบบความเสียหาย ระยะยุบตัวมีรอยโก่งงอที่เกิดขึ้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ เป็นต้น ดังนั้นจึงได้ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ในจำลองความเสียหายของแผ่นเกราะที่สามารถต้านทานการเจาะทะลุของมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 ได้ จากกระบวนการเตรียมโมเดลเพื่อจำลองและการตั้งค่าเริ่มต้น (Pre-processing) จนถึงขั้นตอนการคำนวณด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Solve-processing) ซึ่งได้จำลองยิงวัสดุและมุมของหัวกระสุนเมื่อกระแทกเข้ากับแผ่นเกราะโดยมีมุมกระแทกที่ 0 องศา จากที่กำหนดไว้ในบทที่ผ่านมา โมเดลแบบจำลองแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ

คือ 1. รูปแบบแผ่นเกราะแบบชั้นเดียว 2. รูปแบบแผ่นเกราะแบบสองชั้นโดยนำวัสดุแต่ละชนิดมาเรียงซ้อนกัน สำหรับรูปแบบจำลองที่ 2 ทำการแบ่งออกเป็น 2 แผ่น คือ แผ่นที่ 1 คือแผ่นด้านหน้าทำจากวัสดุอลูมินา 95% แผ่นด้านหลังเป็นวัสดุอลูมิเนียม 7075 T6 แผ่นที่ 2 ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองนั้นเป็นขั้นตอนของการแสดงผลหรือ “Post-processing”



รูปที่ 4.9 ความเสียหายของแผ่นเกราะเซรามิกส์และอลูมิเนียม ก) และ ข) ผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์จากงานวิจัย ค) และ ง) ผลการทดสอบการยิงจริง จ) ผลทดสอบการยิงด้วยชิ้นกาวที่บางของ J. Lo pez-Puente et al. [37] และ ง) ความเสียหายของแผ่นเซรามิกส์จากงานวิจัยของ J. Lo pez-Puente et al. [37]

ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ J. Lo pez-Puente et al. [37] ที่ได้ทำการทดลองเกราะเซรามิกส์ที่ติดตั้งลงบนแผ่นเกราะอลูมิเนียม โดยศึกษาผลของความหนาของชั้นกาวต่อประสิทธิภาพของเกราะเซรามิกส์/อลูมิเนียม ทำการทดสอบเต็มรูปแบบด้วยการยิงกระสุนเจาะเกราะกับแผงเกราะที่หนาพอที่ด้วยชั้นกาวที่แตกต่างกัน รูปที่ 4.23 พบว่ามีกระเบื้องเซรามิกส์ที่เหลืออยู่หลังการกระแทกที่ใช้ชั้นกาวอีพ็อกซี่ความหนา 0.1 มิลลิเมตร เนื่องด้วยชั้นกาวที่บางที่สุด กระเบื้องเซรามิกจึงถูกลอกออกจนหมดหลังจากกระแทก ในขณะที่บางชิ้นยังคงติดอยู่กับแผ่นรองหลังเมื่อใช้ชั้นอีพ็อกซี่ที่หนากว่า และนี่อาจจะเป็นประเด็นสำคัญในการปะทะในภายหลัง ส่งผลต่อความสามารถในการป้องกันการโจมตีหลายครั้งของชุดเกราะ

บทสรุปในการจำลองการยิงด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ความเร็วของกระสุน 850 เมตรต่อวินาที ขนาดกระสุน 7.62x51 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน NIJ 3 ได้ใช้วัสดุ 2 ชนิดคือ 1. แผ่นวัสดุอลูมินา 95% และ 2. แผ่นวัสดุอลูมิเนียม 7075 T6 ด้วยความหนาแต่ละแผ่น 6, 8 และ 10 มิลลิเมตร ได้จำลองการยิงแบบแผ่นเดี่ยว ซึ่งทุกความหนาของแผ่นเดี่ยวอลูมินาและแผ่นเดี่ยวอลูมิเนียมดังกล่าวไม่สามารถต้านทานการเจาะทะลุได้และทำให้กระสุนทะลุผ่านไปเป็นเศษโลหะขนาดใหญ่ออกไปเป็นลักษณะของลำตัวกระสุน เมื่อความหนาเพิ่มขึ้นด้วยการนำแผ่นอลูมินาและแผ่นอลูมิเนียมมาซ้อนกันเป็น 2 ชั้นที่ความหนาแผ่นหน้า 6 มิลลิเมตร และแผ่นหลัง 6 มิลลิเมตร ผลที่ได้นั้นสามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนขนาด 7.62 มิลลิเมตร ที่ความเร็ว 850 เมตรต่อวินาที (NIJ 3) และแผ่นเกราะอลูมินา 95% เกิดการแตกเสียหายและช่วยลดความเร็วของกระสุนทะลุไปยังแผ่นที่ 2 เป็นวัสดุอลูมิเนียม 7075 T6 ซึ่งกระสุนเกิดการหยุดเคลื่อนที่และฝังตัวที่แผ่นที่ 2 เมื่อกระสุนทะลุผ่านไปทำให้เกิดความเค้นสะสมภายในตัวแผ่นเกราะ ส่งผลให้หลังจากที่กระสุนฝังตัวที่แผ่นที่ 2 แล้วแผ่นที่ 1 เกิดรอยแตกเสียหายเพิ่มขึ้นเป็นลักษณะรอยร้าวที่ตัวแผ่น ดังนั้นที่ความหนาแผ่นของวัสดุตั้งแต่ 6 มิลลิเมตรขึ้นไปจะสามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนขนาด 7.62x51 มิลลิเมตร ที่ความเร็วกระสุน 850 เมตรต่อวินาที ได้ ทั้งนี้ผลการวิจัยเป็นผลจากกระบวนการตามระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยชั้นควาหนาของอีพ็อกซี่ค่าเดียว 0.1 มิลลิเมตร และควรพิจารณาเป็นการต่อยอดต่อไปในชั้นความหนาที่แตกต่างและปรับเปลี่ยนความหนาและวัสดุชนิดอื่น

บทที่ 5
สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

จากการศึกษาแผ่นเกราะโลหะกันกระสุนด้วยการจำลองการเสียหายแผ่นเกราะกันกระสุนทางไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการทดสอบยิงจริงร่วมกัน เพื่อให้ได้รูปแบบวัสดุและความหนาที่เหมาะสม เพื่อที่จะนำไปใช้เป็นโมเดลการสร้างแผ่นเกราะโลหะ โดยผลการศึกษาสอดคล้องกับงานวิจัยของ J. Lo pez-Puente et al. [37] ในกระบวนการวิจัยได้กำหนดขอบเขตของการศึกษาเป็นการจำลองการทดสอบและวิเคราะห์แผ่นเกราะโลหะกันกระสุนเป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบ NIJ 3A และ 3 สำหรับแผ่นเกราะเซลามิกส์ชั้นเดียวและแผ่นเกราะเซลามิกส์สองชั้น ตามลำดับ ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ Ansys และมีการทดสอบการยิงจริงระดับ NIJ 3A และ 3 ร่วมกัน วัสดุที่ใช้ในสร้างแผ่นเกราะกันกระสุนเป็นวัสดุอลูมินา 95% และวัสดุอลูมิเนียม 7075 T6 โดยมีการทดสอบแผ่นเกราะเดี่ยวโดยกำหนดความหนาของวัสดุที่ความหนา 6, 8 และ 10 มิลลิเมตรและทำการทดสอบโดยเพิ่มความหนาโดยนำแผ่นอลูมินา 95% และแผ่นอลูมิเนียมมาซ้อนกันเป็น 2 ชั้นที่ความหนาแผ่นหน้า 6 มิลลิเมตร และแผ่นหลัง 6 มิลลิเมตร วิธีการประกอบแผ่นเกราะกันกระสุนอลูมินา 95% และแผ่นอลูมิเนียม จะใช้กระบวนการยึดติดแผ่นเกราะกันกระสุน ที่ใช้ชั้นกาวอีพ็อกซี่ความหนา 0.1 มิลลิเมตร วิธีการที่ใช้ในการทำวิจัย ประกอบด้วย การวิเคราะห์ด้วยไฟไนเอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม Ansys Explicit/Dynamic ร่วมกับการทดสอบตามมาตรฐาน NIJ โดยมีมุมกระแทกที่ 0 องศา ระหว่างหัวกระสุนเมื่อกระแทกเข้ากับแผ่นเกราะ เป็นการทำการจำลองและทดสอบในบางกรณีเพื่อยืนยันขีดความสามารถในการวิเคราะห์ของโปรแกรมไฟไนเอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Ansys/Explicit ซึ่งวิธีการดำเนินงานเริ่มจากการสร้างแบบจำลองเกราะกันกระสุนแบบ 3 มิติ ด้วยโปรแกรม SolidWorks ในรูปแบบของ Part ที่เป็น Multibody หลังจากนั้นจะได้แผ่นเซลามิกส์ขนาดความกว้างxความยาวเท่ากับ 300 x 300 มิลลิเมตร ที่มีความหนาต่างๆตามที่กำหนด และในขั้นตอนการวิเคราะห์แผ่นเกราะกันกระสุนด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วย Ansys Explicit/Dynamic จะต้องมีการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุตามรูปแบบความเสียหายของวัสดุในโปรแกรม Ansys / Engineering Data โดย วัสดุอลูมินา 95% มีรูปแบบความเสียหายตามทฤษฎีของ Johnson-Holmquist Failure Model (JH-2), กระสุนที่ทำจากทังสเตนคาร์ไบด์ มีรูปแบบความเสียหายตามทฤษฎี Johnson-Holmquist (JH-2) วัสดุอลูมิเนียม 7075 มีรูปแบบความเสียหายตามทฤษฎีของ Steinburg-Guinan-Strength ในรูปแบบของการวิเคราะห์ถูกกำหนดตัวแปรสำคัญคือ ค่าความหนาของแผ่นเกราะ การซ้อนกันของแผ่นเกราะสองชนิด ชนิดของวัสดุที่ทำเกราะ หลังจากนั้นจะทำการเปรียบเทียบผลจากวิธีการทดลองและวิธีการไฟไนเอลิเมนต์ด้วยลักษณะการเสียหายของแผ่นเกราะ ระยะการยุบตัวมีรอยโก่งงอของ

แผ่นเกราะที่ผ่านการยิง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ เป็นต้น ซึ่งจากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่ามีความสอดคล้องกัน

ผลลัพธ์จากการวิจัยสามารถตอบวัตถุประสงค์ของงานวิจัยได้ดังนี้

1. พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการวิเคราะห์แผ่นเกราะกันกระสุน NIJ 3 ในการวิเคราะห์นี้มี 4 องค์ประกอบหลัก ดังนี้ 1) ชนิดของวัสดุที่นำมาใช้ทำเป็นแผ่นเกราะกันกระสุน คือ แผ่นวัสดุอลูมินา 95% และ 2. แผ่นวัสดุอลูมิเนียม 7075 T6 และชนิดของวัสดุที่นำมาใช้ทำเป็นกระสุนคือกระสุนทังสเตนคาร์ไบด์ (Tungsten carbide bullet) เป็นกระสุนเจาะเกราะขนาดกระสุน 7.62x51 มิลลิเมตร 2) ความเร็วของกระสุน 850 เมตรต่อวินาที ที่ใช้ในการจำลองซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 3) ความหนาของแผ่นเกราะกันกระสุน โดยมีความหนาแต่ละแผ่นมีขนาด 6, 8 และ 10 มิลลิเมตร 4) ขนาดของเอลิเมนต์ที่ใช้การในการจำลองความเสียหาย โดยขนาดของเอลิเมนต์ที่กระสุนเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร และแผ่นเกราะขนาด 5 มิลลิเมตร โดยบีบให้ตรงกลางมีขนาดเล็กลดลงจากขอบของแผ่นเกราะเป็น 10 เท่า ชนิดของเอลิเมนต์สำหรับกระสุนเป็นแบบเฮกซะฮีดรอล (Hexahedral) และเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) และเฉพาะแผ่นเกราะกันกระสุนได้เลือกชนิดของเอลิเมนต์เป็นเฮกซะฮีดรอล (Hexahedral) ซึ่งมีผลต่อความแม่นยำในการวิเคราะห์

2. จากการจำลองการยิงแบบแผ่นเดี่ยว ซึ่งทุกความหนาของแผ่นเดี่ยวอลูมินาและแผ่นเดี่ยวอลูมิเนียมดังกล่าวไม่สามารถต้านทานการเจาะทะลุได้และทำให้กระสุนทะลุผ่านไปเป็นเศษโลหะขนาดใหญ่ออกไปเป็นลักษณะของลำตัวกระสุน แต่เมื่อความหนาเพิ่มขึ้นด้วยการนำแผ่นอลูมินาและแผ่นอลูมิเนียมมาซ้อนกันเป็น 2 ชั้นที่ความหนาแผ่นหน้า 6 มิลลิเมตร และแผ่นหลัง 6 มิลลิเมตร ผลที่ได้นั้นสามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนขนาด 7.62 มิลลิเมตร ที่ความเร็ว 850 เมตรต่อวินาที (NIJ 3) โดยแผ่นเกราะด้านหน้าคือ วัสดุอลูมินา 95% มีความแข็งมากทำให้การอ่อนตัวหรือการยุบตัวของแผ่นน้อยจึงเกิดความเค้นสะสมภายในแผ่นเกราะ เกิดการแตกกระจายที่บริเวณรอบๆ รูเจาะทะลุ เกิดรอยแตกเสียหายเพิ่มขึ้นเป็นลักษณะรอยร้าวที่ตัวแผ่นแต่ช่วยลดความเร็วของกระสุนทะลุไปยังแผ่นที่ 2 เมื่อกระสุนผ่านแผ่นที่ 1 ไปยังแผ่นที่ 2 ที่ทำหน้าที่ดูดซับพลังงานเพื่อหยุดการเคลื่อนที่ของกระสุน โดยใช้เป็นวัสดุอลูมิเนียม 7075 T6 ซึ่งกระสุนหยุดการเคลื่อนที่และฝังตัวที่แผ่นที่ 2 จากการวิเคราะห์ที่ความหนาของแผ่นของวัสดุตั้งแต่ 6 มิลลิเมตรขึ้นไปจะมีความสามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนขนาด 7.62x51 มิลลิเมตร ที่ความเร็วกระสุน 850 เมตรต่อวินาที

5.2 ข้อเสนอแนะ

การใช้โปรแกรมทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีขีดความสามารถในการวิเคราะห์โจทย์ปัญหาจะช่วยลดต้นทุนในการออกแบบและวิเคราะห์ผลลัพธ์ได้เป็นอย่างดี จากการวิเคราะห์แผ่นเกราะโลหะกันกระสุนที่ได้รับการทดสอบและวิเคราะห์ความเสียหายภายใต้มาตรฐาน NIJ ระดับ 3 นี้ ผลการวิจัย

เป็นผลจากกระบวนการตามระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยชั้นความหนาของอีพ็อกซี่ค่าเดียว คือ 0.1 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถพัฒนาต่อยอดต่อไปในชั้นความหนาที่แตกต่างกัน และปรับเปลี่ยนเปลี่ยนความหนาของวัสดุชนิดอื่น นอกจากนี้ใช้การวิจัยมีการวิเคราะห์หามุมที่กระสุนตกกระทบแผ่นเกราะที่มุม 0 องศาเท่านั้นยังมีมุมตกกระทบแผ่นเกราะอีกหลายมุมที่อาจมีผลต่อการต้านการเจาะทะลุของแผ่นเกราะได้

การใช้คอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะสูงและมีประสิทธิภาพสูงในการประมวลผลเป็นปัจจัยสำคัญในการประมวลผลการตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ปัจจัยด้านเวลาเป็นตัวแปรที่มาเกี่ยวข้องซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ของวัตถุและเกี่ยวข้องกับความเที่ยงตรงของการจำลองที่เหมือนจริงในด้านความเสียหาย ดังนั้นการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามาทำการจำลองปัญหา จะต้องระมัดระวังในทุกขั้นตอนของกระบวนการ Pre-Processing เช่น การเลือกใช้ทฤษฎี Johnson-Cook Strength หรือ Johnson-Holmquist (JH-2) ต้องเลือกให้เหมาะสม การแบ่งเอลิเมนต์และการควบคุมขนาดเอลิเมนต์จะมีผลอย่างมากกับการคำนวณ

การผลการทดสอบการยิงตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 มากกว่านี้จะส่งผลต่อผลการเปรียบเทียบและเห็นผลที่ชัดเจนขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากกระสุนสำหรับการยิงตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 ค่อนข้างมีราคาสูง และทางหน่วยงานไม่ได้มีสำรองไว้ จึงต้องวางแผนงานและประสานล่วงหน้าในการทดสอบการยิงกระสุน ในงานวิจัยนี้เลือกทดสอบที่โรงงานวัตถุระเบิดทหาร กรมการอุตสาหกรรมทหาร ศูนย์การอุตสาหกรรมป้องกันประเทศและพลังงานทหาร ตำบลย่านมัทรี อำเภอพยุหะคีรี จังหวัดนครสวรรค์ ซึ่งจะมีทีมงานในการดำเนินการทดสอบ ซึ่งก่อนการเดินทางนำแผ่นโลหะที่เตรียมไว้ไปทดสอบจะต้องประสานและติดต่อไปก่อนล่วงหน้าและจะต้องปฏิบัติตนอย่างเคร่งครัดขณะทำการทดสอบเพื่อความปลอดภัย

เอกสารอ้างอิง

[1] ธงชัย ฟองสมุทร, วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เบื้องต้น, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่: ห้างหุ้นส่วนจำกัด ดาราวรรณการพิมพ์ เชียงใหม่. 2549.

[2] นวพล กลางทัพ, “การวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนบนโลหะด้วยระเบียบวิธีไฟไนเอลิเมนต์,” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, 2562.

[3] ชัยวัฒน์ ไชยมหาพฤกษ์, “แผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนด้วยวัสดุเชิงประกอบ,” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, 2561.

[4] อนุรัตน์ ภูวานคำ, “การพัฒนาวัสดุเชิงประกอบ อะลูมิกา-มูลไลท์-เซอร์โคเนีย สำหรับงานวิศวกรรม,” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเซรามิก, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2548.

[5] อะไรคือความแตกต่างระหว่างอลูมิเนียมอัลลอยด์ 6061-T6 และ 7075-T651. Networks [Online]. Available: https://www.epowermetals.com/th/what-is-the-difference-between-aluminum-alloy-6061-t6-and-7075-t651.html

[6] มาตรฐานยุทโธปกรณ์กระทรวงกลาโหมว่าด้วยแผ่นเกราะกันกระสุน, คณะอนุกรรมการกำหนดมาตรฐานยุทโธปกรณ์กระทรวงกลาโหม

[7] Ballistic resistance of police body armor. NIJ Standard-0108.01. National Institute of Justice, U.S. Department of Justice, Washington, DC 20531.1985.

[8] บุญรักษ์ กาญจนวรวณิชย์, “การพัฒนาเสื้อเกราะกันกระสุนแบบเกราะแข็ง” ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC).

[9] I.G. Crouch, S.J. Cimpoeru, H. Li and D. Shanmugam, “Armour steels,” *The Science of Armour Materials,* A volume in Woodhead Publishing in Materials, pp. 55–115, 2017.

[10] P.K. Ray, R.I. Ganguly and A.K. Panda, “Optimization of mechanical properties of an HSLA-100 steel through control of heat treatment variables,” *Mater Sci Eng A*; vol. 346, pp. 122–131, 2003.

[11] R.Q. Chi, A. Serjouei, I.I. Sridhar and E.B. Tan Geoffrey, “Ballistic impact on bi-layer alumina/ aluminium armor: A semi-analytical approach,” *Int J Impact Eng*, vol. 52, pp. 37–46, 2013.

[12] Namik Kilic and Bülent Ekici, “Ballistic resistance of high hardness armor steels against 7.62 mm armor piercing ammunition,” *Materials & Design*, vol. 44, pp. 35-48, 2013.

[13] Pradipta KumarJena, PonguruSenthil P. and Siva KumarK, “Effect of tempering time on the ballistic performance of a high strength armour steel,” *Journal of Applied Research and Technology*, pp. 47-53, 2016.

[14] A. Banerjee, S. Dhar, S. Acharyya, D. Datta and N. Nayak, “Numerical Simulation of Ballistic Impact of Armour Steel Plate by Typical Armour Piercing Projectile,” *Procedia Engineering*, pp. 347-354, 2017.

[15] M. WasifAlia, A. Mubashara, EmadUddin, S. Waheed UlHaq and M. Khan, “An experimental and numerical investigation of the ballistic response of multi-level armour against armour piercing projectiles,” *International Journal of Impact Engineering*, In Press, Corrected Proof, 2017.

[16] Woei-ShyanLee and Tzay-TianSu, “Mechanical properties and microstructural features of AISI 4340 high-strength alloy steel under quenched and tempered conditions,” *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 198-206, 1999.

[17] N. Kılıç, S. Bedir, A. Erdik, B. Ekici, A. Taşdemirci and M. Güden, “Ballistic behavior of high hardness perforated armor plates against 7.62 mm armor piercing projectile,” *Materials & Design*., vol. 63, pp. 427-438, Nov. 2014.

[18] อัฐวุฒิ ผลาสินธุ์, “การออกแบบและพัฒนาเกราะป้องกันกระสุนสำหรับเสื้อเกราะกันกระสุนโดยใช้แผ่นโลหะ วัสดุผสม เส้นใยคาร์บอน และฟิล์มเอ็กซเรย์ที่ใช้แล้ว,” มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมและเทคโนโลยีการป้องกันประเทศ, 2561.

[19] จำนงค์ อมตาริยกุล, วันทนา อมตาริยกุล และเจษฎา คำภูมี, “แผ่นเกราะกันกระสุนคอมโพสิต,” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ, 2561.

[20] ไมตรี ถาวรสิน, “การวิเคราะห์มุมเอียงและความหนาของแผ่นเกราะที่มีผลกระทบต่อการต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนบนแผ่นเกราะอลูมิเนียมและสแตนเลสด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์,” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, 2564.

[21] L. Jinzhu, Z. Liansheng, and H. Fenglei, “Experiments and simulations of tungsten alloy rods penetrating into alumina ceramic/603 armor steel composite targets,” *International Journal of Impact Engineering*., vol. 101, pp. 1-8, Mar. 2020.

[22] A. Manes, D. Lumassi, L. Giudici and M. Giglio, “An experimental–numerical investigation on aluminium tubes subjected to ballistic impact with soft core 7.62 ball projectiles,” *Thin-Walled Structures*., vol. 73, pp. 68-80, Dec. 2013.

[23] K. Senthil and M.A. Iqbal, “Effect of projectile diameter on ballistic resistance and failure mechanism of single and layered aluminum plates,” *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*., vol. 67-68, pp. 53-64, Oct.–Dec. 2013.

[24] T. Børvik, L. Olovsson, S. Dey and M. Langseth, “Normal and oblique impact of small arms bullets on AA6082-T4 aluminium protective plates,” *International Journal of Impact Engineering*., vol. 38, pp. 577-589, Jul. 2011.

[25] X. Wen, J. Huang, Y. Li, P. Chen, L. Jiang, Y. Long and S. Liu, “Preliminary study on shielding performance of wood stuffed shield,” *International Journal of Impact Engineering*., vol. 91, pp. 94-101, May 2016.

[26] G. Gour and S. Idapalapati, “Equivalent protection factor of bi-layer ceramic metal structures,” *Defence Technology*., vol. 18, pp. 384-400, Mar. 2022.

[27] A. Serjouei, G. Gour, A. Erdik, X. Zhang and S. Idapalapati, “On improving ballistic limit of bi-layer ceramic–metal armor,” *International Journal of Impact Engineering*., vol. 105, pp. 54-67, Jul. 2017.

[28] A. Ansari, T. Akbari and M. Rahimi Pishbijari, “Investigation on the ballistic performance of the aluminum matrix composite armor with ceramic balls reinforcement under high velocity impact,” Defence Technology.,

[29] P. Si, Y. Liu, A. Erdik, J. Yan, F. Bai, Z. Shi and F. Huang, “Effect of polyurea layer on ballistic behavior of ceramic/metal armor,” *Structures*., vol. 48, pp. 1856-1867, Feb. 2023.

[30] Y. Shen, Y. Wang, S. Du, Z. Yang, H. Cheng and F. Wang, “Effects of the adhesive layer on the multi-hit ballistic performance of ceramic/metal composite armors,” *Journal of Materials Research and Technology*., vol. 13, pp. 1496-1508, Jul.-Aug. 2021.

[31] L. Li, Qi. Zhang, T. Lu, “Ballistic penetration of deforming metallic plates: Experimental and numerical investigation,” *International Journal of Impact Engineering*., vol. 170, pp. 104359, Dec. 2022.

[32] J. Wang, Y. Yin and C. Luo, “ Johnson– Holmquist- II (JH- 2) Constitutive Model for Rock Materials: Parameter Determination and Application in Tunnel Smooth Blasting,” *Appl. Sci*., vol. 8, pp.1675, 2018.

[33] Hubert W. Meyer, Jr. and David S. Kleponis, “An Analysis of Parameters for the Johnson-Cook Strength Model for 2-in-Thick Rolled Homogeneous Armor,” *Army Research Laboratory*, Jun. 2001.

[34] F. M. John, T. Jan Arild, S. Stian, B. Svien Morten, S.-E. Lasse, and F. Haakon, “Development of material models for semi-brittle materials like tungsten carbide,” *Norwegian Defence Research Establishment (EFI)*, pp. 1–51, 09-Nov-2010.

[35] A. Serjouei, R. Chi, Z. Zhang, and I. Sridhar, “Experimental validation of BLV model on bi-layer ceramic-metal armor,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 77, pp. 30–41, Mar. 2015.

[36] A. Rajput and M. A. Iqbal, “Impact behavior of plain, reinforced and prestressed concrete targets,” *Mater. Des.*, vol. 114, pp. 459–474, Jan. 2017.

[37] J. Lo pez-Puente, A. Arias, R. Zaera, and C. Navarro, “The effect of the thickness of the adhesive layer on the ballistic limit of ceramic/metal armours. An experimental and numerical study,” *International Journal of Impact Engineering*, pp. 321–336, 2010.

ภาคผนวก ก

บทความตีพิมพ์เผยแพร่และใบรับรองการนำเสนอ

Proceedings
Conference2023
24 - 26 พฤษภาคม 2566
ณ โรงแรมอมารี พัทยา / โอโซ่นอร์ธ พัทยา
จังหวัดชลบุรี
The 8th Rajamangala Manufacturing & Management Technology Conference 2023
การประชุมวิชาการราชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ
MTC 2023
ครั้งที่ 8
"ขับเคลื่อนงานวิจัยด้วย BCG
เพื่อตอบโจทย์เป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน SDGs"
Conference Topics
• Production and Operations Management
• Manufacturing Engineering
• Material Science and Application
• Supply Chain and Logistics
• Industrial Education
• Technology and Innovation
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ดำเนินการจัดงาน (Organizer)

โดย

อำนวยการจัดงาน (Hosts)

โดย

ร่วมจัดงาน (Co-Hosts)

โดย

ประวัติ
การประชุมวิชาการราชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ

ครั้งที่ 1	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	28 - 29 กรกฎาคม 2559 จังหวัดพระนครศรีอยุธยา
ครั้งที่ 2	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ณ โรงแรมเคปราชา	4 - 8 ธันวาคม 2560 จังหวัดชลบุรี
ครั้งที่ 3	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ณ โรงแรมดีวาน่า พลาซ่า	30 - 31 พฤษภาคม 2561 จังหวัดกระบี่
ครั้งที่ 4	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ณ โรงแรมดิเอ็มเพรสเชียงใหม่	30 - 31 พฤษภาคม 2562 จังหวัดเชียงใหม่
ครั้งที่ 5	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ณ โรงแรม เค พี แกรนด์	3 - 4 กันยายน 2563 จังหวัดจันทบุรี
ครั้งที่ 6	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์	1 - 3 กันยายน 2564 จังหวัดนครปฐม
ครั้งที่ 7	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ณ โรงแรมแคนทารี	6 - 8 กรกฎาคม 2565 จังหวัดนครราชสีมา
ครั้งที่ 8	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ณ โรงแรมอมารี พัทยา / โอโซ่นอร์ธ พัทยา	24 - 26 พฤษภาคม 2566 จังหวัดชลบุรี
ครั้งที่ 9	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2567

ประวัติ
การประชุมวิชาการราชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ

ครั้งที่ 1	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	28 - 29 กรกฎาคม 2559 จังหวัดพระนครศรีอยุธยา
ครั้งที่ 2	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ณ โรงแรมเคปราชา	4 - 8 ธันวาคม 2560 จังหวัดชลบุรี
ครั้งที่ 3	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ณ โรงแรมดีวาน่า พลาซ่า	30 - 31 พฤษภาคม 2561 จังหวัดกระบี่
ครั้งที่ 4	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ณ โรงแรมดิเอ็มเพรสเชียงใหม่	30 - 31 พฤษภาคม 2562 จังหวัดเชียงใหม่
ครั้งที่ 5	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ณ โรงแรม เค พี แกรนด์	3 - 4 กันยายน 2563 จังหวัดจันทบุรี
ครั้งที่ 6	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์	1 - 3 กันยายน 2564 จังหวัดนครปฐม
ครั้งที่ 7	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ณ โรงแรมแคนทารี	6 - 8 กรกฎาคม 2565 จังหวัดนครราชสีมา
ครั้งที่ 8	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ณ โรงแรมอมารี พัทยา / โอโซ่นอร์ธ พัทยา	24 - 26 พฤษภาคม 2566 จังหวัดชลบุรี
ครั้งที่ 9	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2567

คำนำ

การประชุมวิชาการราชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 8 ประจำปี 2566 (Rajamangala Manufacturing & Management of Technology Conference ; RMTC # 8) ถูกจัดขึ้น วันที่ 24 - 26 พฤษภาคม 2566 ณ โรงแรมอมารี พัทยา / โอโซ่นอร์ธ พัทยา จังหวัดชลบุรี โดยสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ได้รับเกียรติให้เป็นเจ้าภาพหลักในการดำเนินงานร่วมกับสมาคมเครือข่ายราชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและจัดการ (Association of Rajamangala Network of Manufacturing and Management Technology ; RNMT) และนอกจากนี้ยังได้รับการสนับสนุนจากเครือข่ายราชมงคลทั่วประเทศอีก 8 แห่ง สำหรับการประชุมวิชาการครั้งที่ 8 หรือ RMTC 2023

ในปีนี้ งาน RMTC 2023 ได้รับความอนุเคราะห์จากหน่วยงานที่มีชื่อเสียงและมีบทบาทในสายงานด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการประกอบไปด้วย สมาคมเครือข่ายราชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและจัดการ (RNMT) สมาคมอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ไทย (TDIA) สถาบันไทย-เยอรมัน (TGI) สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (มว.) สมาคมผู้ผลิตเครื่องมือตัดไทย (TCTM) และเครือข่ายวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล 9 แห่ง ร่วมดำเนินการจัดงานประชุม ภายใต้ธีมงาน **“ขับเคลื่อนงานวิจัยด้วย BCG เพื่อตอบโจทย์เป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน SDGs : BCG to SDGs”** สำหรับหัวข้อการประชุมวิชาการ ประกอบไปด้วย 6 สาขา ได้แก่ Production and Operations Management (POM), Manufacturing Engineering (MFE), Material Science and Application (MSA), Supply Chain and Logistics (SCL), Industrial Education (IED) และ Technology and Innovation (TIN)

การประชุมวิชาการราชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 8 ประจำปี 2566 มีผู้ให้ความสนใจส่งบทความเข้าร่วมเป็นจำนวน 215 บทความ จาก 35 หน่วยงาน มีผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความทั้งสิ้นจำนวน 125 ท่าน จากสถาบันที่หลากหลาย ซึ่งบทความทุกฉบับที่เข้าร่วมการประชุมวิชาการได้รับการอ่านและพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer Review) อย่างน้อย 3 ท่าน เพื่อคุณภาพของงานวิจัย

หากการดำเนินงานในครั้งนี้บกพร่องหรือผิดพลาดประการใด ทางคณะกรรมการดำเนินงาน RMTC 2023 ต้องขออภัยมา ณ โอกาส นี้

คณะกรรมการดำเนินงานการประชุมวิชาการ
ราชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 8 (RMTC 2023)
24 – 26 พฤษภาคม 2566

สารบัญ

เรื่อง		หน้า
MSA-342	การวิเคราะห์ความเสียหายของแผ่นเกราะกันกระสุนจากแผ่นวัสดุอลูมินา 95% และอลูมิเนียม 7075 T6 ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	919
MSA-343	การทำนายพฤติกรรมการเสียหายของแผ่นเกราะอลูมิเนียมกันกระสุนเกรด 5083-H116 และ 7075 T6 ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	929
MSA-345	การวิเคราะห์ผลกระทบของลมจากเคลื่อนที่ของยานพาหนะที่กระทำต่อป้ายบอกทางจราจรและโครงสร้างเสาบอกทางแบบคร่อมผิวจราจรโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	942
MSA-346	การตรวจสอบพฤติกรรมของแผ่นเกราะพรุนต่อกระสุนเจาะเกราะ 7.62x51 มม. โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	952
Supply Chain and Logistic (SCL) จำนวน 13 บทความวิจัย		
SCL-401	ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดำเนินงานด้านการส่งออกเห็ดนางฟ้าภูฐานอบแห้งไปยังประเทศมาเลเซีย : กรณีศึกษา ยี่ห้อ MUNCH ROOM	964
SCL-402	ปัจจัยเสี่ยงที่ส่งผลต่อกระบวนการพิธีการศุลกากรขาเข้า	971
SCL-403	การแก้ปัญหาการเดินทางของพนักงานขายด้วยขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบวาฬ	979
SCL-405	แนวทางการยกระดับห่วงโซ่คุณค่าธุรกิจมะขามเพื่อเสริมสร้างเศรษฐกิจฐานรากในจังหวัดอุตรดิตถ์ และพื้นที่เชื่อมโยง	986
SCL-409	Studying the Impact of Customer Service Intentions on A Bus Air Conditioning Service Center using Confirmatory Factor Analysis	995
SCL-411	การพยากรณ์ปริมาณใยมะพร้าวในประเทศไทยด้วยวิธีแยกส่วนประกอบ	1011
SCL-412	พยากรณ์ปริมาณผักตบชวาในลุ่มแม่น้ำท่าจีนโดยข้อมูลดาวเทียม	1017
SCL-414	การลดต้นทุนโลจิสติกส์ทุเรียนจังหวัดตราด	1025
SCL-417	แนวทางการพัฒนาเส้นทางการท่องเที่ยวเชิงสุขภาพพื้นที่จังหวัดระนอง	1033
SCL-419	การลดต้นทุนด้านบรรจุภัณฑ์ด้วยการใช้บรรจุภัณฑ์แบบที่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้: กรณีศึกษา ศูนย์กระจายสินค้าชิ้นส่วนอะไหล่รถยนต์	1040
SCL-420	การคัดเลือกผู้จัดหาสำหรับปัญหาสินค้าคงคลังแบบสั่งเป็นรุ่นกรณีสินค้าหนึ่งชนิดโดยใช้วิธีฮิวริสติก	1050
SCL-421	การศึกษาตัวแบบการพยากรณ์ปริมาณการผลิตอุปกรณ์ประปา โดยใช้เทคนิคอนุกรมเวลา	1057
SCL-422	การศึกษาระบบการจัดการโซ่อุปทานในการปลูกต้นหอม: กรณีศึกษา เกษตรกรผู้ปลูกต้นหอม จังหวัดนครพนม	1064

การประชุมวิชาการราชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 8
24 – 26 พฤษภาคม 2566 ณ โรงแรม อมารี พัทยา จังหวัดชลบุรี
รหัสบทความ MSA-342

การวิเคราะห์ความเสียหายของแผ่นเกราะกันกระสุนจากแผ่นวัสดุอลูมินา 95% และอลูมิเนียม 7075 T6 ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Analysis of the Damage of Bulletproof Armor Plates from Alumina 95% and AL-7075 T6 Plates by Finite Element Method

ธนากร บุญหรั่ง[1] ทรงวุฒิ มงคลเลิศมณี[1] ประสิทธิ์ แพงเพชร[2] แจ๊ค ชุ่มอินทร์[2] และประกอบ ชาติภุกต์[1*]
[1] สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
[2] สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องมือและแม่พิมพ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
E-mail: prakorb.c@rmutp.ac.th*

Thanakgon Boonhrong[1] Songwut Monhkonlerdmanee[1] Prasit Phangphet[2] Jack Chumin[2] and Prakorb Chartpuk[1*]
[1] Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering
[2] Department of Tools and Die Engineering, Faculty of Engineering
Rajamangala University of Technology Phra Nakhon
E-mail: prakorb.c@rmutp.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการวิจัยและออกแบบเพื่อพัฒนาแผ่นกันกระสุนให้มีศักยภาพในการป้องกันการทำลายจากกระสุน แผ่นเกราะสองแผ่นด้วยวัสดุสองชนิดได้รับการออกแบบและวิเคราะห์โดยใช้วัสดุอลูมินา 95% และอลูมิเนียม 7075 T6 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ANSYS Explicit/Dynamic โดยมีตัวแปรที่สำคัญคือความหนาของแผ่นเกราะที่ 6, 8 และ 10 มิลลิเมตร เนื่องจากอลูมินา 95% ถูกจัดประเภทเป็นวัสดุแข็งและเปราะ ดังนั้นในกระบวนการวิเคราะห์จึงเลือกใช้ทฤษฎีความเสียหาย Johnson-Holmquist (JH-2) กระสุนทังสเตนคาร์ไบด์ขนาด 7.62x51 มิลลิเมตร ถูกนำมาใช้ในการจำลองทางระเบียบวิธีไฟไนเอลิเมนต์ ภายใต้รูปแบบความเสียหาย Johnson-Holmquist Failure Model สำหรับวัสดุอลูมิเนียม 7075 T6 ถูกกำหนดให้ใช้แบบจำลองความเสียหาย Steinberg-Guinan Strength Model และการวิเคราะห์ภายใต้สภาวะของการเปลี่ยนรูปขนาดใหญ่ (Large deformation) อัตราความเครียดสูง (High Strain rate) และอุณหภูมิที่สูง (High Temperature) จึงใช้แบบจำลองความเค้น Johnson-Cook เพื่อทำนายผลวิเคราะห์ที่ความเร็วในการยิงกระสุน 850 เมตรต่อวินาที ตามมาตรฐาน NIJ 3 กระบวนการเริ่มต้นโดยการวิเคราะห์การทะลุทะลวงของกระสุนด้วยแผ่นวัสดุเดี่ยวแต่ละชนิดและไม่มีการซ้อนทับ จากการวิเคราะห์พบว่าเกราะไม่สามารถต้านทานการเจาะเกราะของกระสุนได้ แต่อาจทำให้ความเร็วของกระสุนลดลงอย่างมาก และเมื่อนำแผ่นเกราะอลูมินาและแผ่นเกราะอลูมิเนียมมาซ้อนทับกันที่ความหนาแผ่นละ 6 มิลลิเมตร พบว่าแผ่นเกราะอลูมินาสามารถทำลายหัวกระสุนได้และแผ่นอลูมิเนียมจะทำหน้าที่ในการดูดซับพลังงานและหยุดการเคลื่อนที่ของกระสุนไม่ให้ผ่านแผ่นเกราะไปได้

คำหลัก: เกราะกันกระสุน วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การเจาะเกราะ

Abstract

This research focuses on developing bulletproof plates with the potential to prevent damage from bullets. Alumina 95% and aluminum 7075 T6 materials were used in the design and analysis of the double-layer shield. The ANSYS Explicit/Dynamic programs were utilized as an analysis tool with the finite element approach. The crucial variables are the shield plate's thickness at 6, 8, and 10 mm. The Johnson-Holmquist (JH-2) damage theory was used since alumina 95% is regarded as a strong and delicate material. The Johnson-Holmquist Failure Model was utilized to simulate the Finite Element Method using the 7.62x51 mm tungsten carbide bullet. The research was carried out using the Steinberg-Guinan Strength Model failure model for the material 7075 T6 aluminum. By predicting the output results from the bullet shooting at a speed of 850 meters per second, the stress model of Johnson-Cook was used to determine their enormous deformation conditions, high stress rate, and high temperature. In accordance with the NIJ 3 standard, the procedure started with an analysis of a bullet's penetration through a single material sheet without overlapping in line. The analyzed results showed that the armor could not withstand the penetration of the bullet, but it significantly reduced the velocity of the bullet. It was also discovered that when the alumina and aluminum shield plates were layered together and each had a thickness of 6 mm, the alumina shields could damage the bullet's head while the aluminum plate could act to absorb energy, stopping the bullet's movement and preventing it from passing through the shield.

Keywords: Bulletproof, Finite Element Method, Armor Penetration

1. บทนำ

การออกแบบพัฒนาแผ่นเกราะกันกระสุนหรืออุปกรณ์ให้มีศักยภาพสามารถป้องกันการทำลายหรือใช้ปกป้องชีวิตนั้น สามารถออกแบบและวิเคราะห์ได้หลายวิธี โดยวิธีที่ให้ผลที่ถูกต้องและแม่นยำคือการทดลอง และอีกวิธีหนึ่งคือการประมาณค่าเชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่จะทำให้เห็นความเสียหายที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน และรวดเร็ว

อลูมิเนียมเป็นวัสดุหนึ่งที่มีความน่าสนใจ เนื่องจากมีความหนาแน่นต่ำ มีน้ำหนักเบา จนถูกนำเสนอการใช้งานเป็นเกราะน้ำหนักเบา มีการอ้างอิงที่มีอยู่ในวารสารการวิจัยระดับนานาชาติจำนวนมากเกี่ยวกับพฤติกรรมของโลหะผสมอลูมิเนียมที่มีความแข็งแรงสูง [1]-[7] K. S. Kumar et al. [8] ได้ศึกษาพฤติกรรมของวัสดุเกราะ Al-7017 หนา 15 มิลลิเมตร ยิงด้วยกระสุนเจาะเกราะ 7.62 มิลลิเมตร และการเสียรูปมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในพฤติกรรมของกระสุนที่กระทำต่อวัสดุดังกล่าว

ที่ผ่านมามีการศึกษาเชิงการทดลองและการจำลอง W.L. Goh et al. [9] ได้นำเสนอการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของเหล็กกับสมรรถนะของกระสุนที่กระทำลงบนแผ่นเกราะซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) ที่หุ้มด้วยเหล็ก การออกแบบรูปแบบแผ่นเกราะประกอบด้วยการเลือกใช้ซิลิคอนคาร์ไบด์ ในการเชื่อมต่อภายในกับแผ่นเกราะที่มีความหนา 10 มิลลิเมตร และแผ่นครอบด้านหน้า (Cover Plate) หนา 5 มิลลิเมตร ซึ่งทำจากเหล็กกล้า AISI 4340 และมีค่าความแข็งต่างกันระหว่าง 30 ถึง 50 HRC กระสุนทำจากโลหะผสมทังสเตนรูปทรงกรวย ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.3 มิลลิเมตร และยาว 115 มิลลิเมตร ภายใต้ความเร็วของกระสุนที่ 1.25 กิโลเมตรต่อวินาที การวิเคราะห์ความเสียหายของแผ่นเกราะและการวัดการเจาะทะลุซึมผ่านที่เหลือในแผ่นเกราะถูกนำมาใช้เพื่อระบุลักษณะการทำงานของกระสุนและรูปแบบของชุดเกราะเซรามิก การจำลองด้วยโปรแกรม LS-DYNA ได้ถูกดำเนินการเพื่อจำลองกระบวนการ

เจาะและเลือกใช้ความเสียหายที่เกิดขึ้นในชุดแผ่นเกราะด้วยแบบจำลอง Johnson-Cook (JC) และผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นของแผ่นรองหลัง (Backing Plate) ช่วยเพิ่มสมรรถนะของแผ่นเกราะ ขณะที่แผ่นครอบ (Cover Plate) ซึ่งติดตั้งอยู่ด้านหน้าและเป็นแผ่นแรกที่กระสุนเข้าปะทะนั้นไม่มีผลต่อการทดสอบความแข็ง

D. Bürger et al. [10] ได้ทดสอบการจำลองผลกระทบของกระสุนปืนที่กระทำลงบนแผ่นเกราะเซรามิก-ไฟเบอร์เป็นการผสมกันระหว่างแผ่นอลูมินาและพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูง ทำการสร้างแบบจำลอง 3 รูปแบบ และวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ABAQUS/Explicit มีการใช้แบบจำลองวัสดุที่แตกต่างกัน 4 รูปแบบ คือ 1. แบบจำลองของ Johnson-Cook เพื่อทำนายพฤติกรรมของวัสดุที่มีอัตราความเครียดสูง 2. แบบจำลอง JH-2 เพื่อทำนายพฤติกรรมของวัสดุเซรามิก 3. แบบจำลองความเสียหายแบบโปรเกรสซีฟ 3 มิติแบบใหม่เพื่อทำนายการตอบสนองทางโครงสร้างของฐานประกอบ 4. Contact-logic เพื่อทำนายการหลุดร่อนระหว่างแผ่นเซรามิกและฐานประกอบ ชนิดของเอลิเมนต์เป็นแบบเฮกซะฮีดรอล (Hexahedral) กระสุนปืนที่ใช้ในการจำลองมีขนาด 7.62x51 มิลลิเมตร แผ่นอลูมินาผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,600 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง ที่มีความหนา 5 มิลลิเมตร จากการทดลองจริงในครั้งที่ 1 ติดตั้งด้วยแผ่นเซรามิกหนา 5 มิลลิเมตร ครั้งที่ 2 ใช้แผ่นเซรามิกซ้อนจำนวน 2 แผ่น มีความหนา 10 มิลลิเมตร การทดสอบที่ความเร็วกระสุน 525 เมตรต่อวินาที โดยแผ่นมีความหนา 5 มิลลิเมตร ทนทานได้ต่ำกว่าที่ความเร็วกระสุน 525 เมตรต่อวินาที ส่วนแผ่นหนา 10 มิลลิเมตร จะอยู่ที่ 665-765 เมตรต่อวินาที ในการจำลองด้วยโปรแกรมที่ความเร็วเริ่มต้น 700 เมตรต่อวินาที แสดงให้เห็นว่าแผ่นที่มีความหนา 5 มิลลิเมตรสามารถเจาะทะลุได้อย่างสมบูรณ์

A. Serjouei et al. [11] ได้ทำการการเปรียบเทียบระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองการวิเคราะห์และการจำลองผลกระทบตามปกติ เป้าหมายสองชุดคือแผ่นหน้า 40 มิลลิเมตร และ 9 มิลลิเมตร อลูมินาที่มีความบริสุทธิ์ 95% และแผ่นเหล็กหนา 6 มิลลิเมตร ความหนาแผ่นหลัง 2024-T3 ด้วยกระสุนขนาด 7.56 มิลลิเมตร และมีความยาว 30.54 มิลลิเมตร การจำลองแบบสามมิติ (3D) ของการทดลองได้ใช้โปรแกรม AUTODYN ความเร็วในการกระแทกสูงสุด 1,000 เมตรต่อวินาที ลงบนเกราะเซรามิกสองชั้น ใช้โมเดลวัสดุสำหรับอลูมินาเป็น Johnson-Holmquist-2 (JH-2) ค่าคงที่ของโมเดลวัสดุสำหรับอลูมิเนียม 2024-T3 เป็นไปตามโมเดล Johnson-Cook [12], [13] และโมเดลวัสดุสำหรับ Steel 4340 เป็นไปตามโมเดล Johnson-Cook [14], [15] ผลลัพธ์แสดงให้เห็นรูปแบบความเสียหายจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม AUTODYN และการทดลองมีความสอดคล้องกัน

จากการทบทวนวรรณกรรม แบบจำลองของแผ่นเกราะกันกระสุนและกระสุนขนาด 7.62x51 มิลลิเมตร ได้รับการพิสูจน์ความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเปรียบเทียบผลกับการทดลองด้วยรูปแบบความเสียหายประกอบด้วย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูทะลุ ระยะยุบตัวของแผ่นเกราะ และจำนวนชั้นที่สามารถต้านทานการเจาะทะลุได้ (ในกรณีที่เป็นแผ่นซ้อน) [16]-[20] บทความนี้จึงได้นำโมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์และรูปแบบการดำเนินงานมาใช้ในการวิเคราะห์ครั้งนี้ ในการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จึงเป็นการคาดการณ์ความเสียหายของแผ่นเกราะกันกระสุนที่สามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนโดยในบทความนี้กำหนดชนิดของกระสุนเป็นกระสุน 7.62x51 มิลลิเมตร ค่าความหนาของแผ่นวัสดุคอมโพสิตเป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการเปรียบเทียบผลการจำลองในแต่ละกรณี ทำการเปลี่ยนค่าความหนาจนสามารถป้องกันการเจาะทะลุของกระสุนได้ โดยแผ่นเกราะกันกระสุนเป็นแบบซ้อนกัน 2 แผ่น แผ่นที่ 1 ทำจากวัสดุอลูมินา (Alumina) 95% และแผ่นที่ 2 ทำจากอลูมิเนียม 7075 T6

2. ระเบียบวิธีวิจัย

โปรแกรม ANSYS Explicit/Dynamics เป็นเครื่องมือขั้นสูงที่ถูกเลือกใช้ในการวิเคราะห์เพื่อช่วยให้เข้าใจเหตุการณ์ที่สามารถจำลองได้อย่างเหมาะสม สำหรับการจำลองทางกายภาพที่มีการรับภาระกระทำรุนแรงในช่วงเวลาสั้น ๆ ตัวอย่างเช่น การกระแทกและการเจาะทะลุของกระสุนที่กระทำลงบนแผ่นเกราะกันกระสุน (Ballistic Impact Test) สามารถวิเคราะห์แรงกระแทกและความเสียหาย หรือแม้กระทั่งการตกกระแทกของวัสดุ (Drop Test) เป็นต้น

2.1 ขั้นตอนในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ

1. Pre-processing ประกอบด้วย การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ ซึ่งโครงการวิจัยนี้เลือกใช้โปรแกรม ANSYS DesignModeler ในการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ทั้งหมด ซึ่งโปรแกรมจะทราบพื้นที่ผิว ปริมาตร และสมบัติอื่นของรูปทรงแบบจำลอง 3 มิตินั้นโดยอัตโนมัติ จากนั้นนำแบบจำลองเข้าสู่โปรแกรม ANSYS Explicit/ Dynamics ทำการกำหนดสภาวะขอบเขตหรือเงื่อนไขขอบเขต (Support type) เช่น การจับยึดแผ่นเกราะกันกระสุนไปที่พื้นผิวของขอบทั้ง 4 ด้านเป็นแบบยึดแน่น กำหนดสมบัติของวัสดุ (Material properties) เช่น ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น ความเค้นคราก (Tensile Yield Strength) ความหนาแน่นของวัสดุ สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน การกำหนดวัสดุเป็น Isotropic Elasticity, Johnson-Holmquist Strength Continuous, Johnson- Cook Failure, Steinberg-Guinan Strength, กำหนด EOS เป็นต้น การกำหนดชนิดของเอลิเมนต์และการควบคุมความละเอียดของเอลิเมนต์ (Element Controlled) สภาวะและตำแหน่งของกระสุนกับแผ่นเกราะ เช่น ตำแหน่ง ขนาดและทิศทางของกระสุนที่จะวิ่งมาปะทะด้วยความเร็วค่าหนึ่งตามมาตรฐานต่อแผ่นเกราะ การกำหนดหน้าสัมผัส (Contact)

2. Solve-processing เป็นขั้นตอนการวิเคราะห์ ซึ่งใช้หลักการวิเคราะห์แบบ Explicit/Dynamics สำหรับการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นสูง การเปลี่ยนรูปขนาดใหญ่ ปัญหาที่เกิดจากการสัมผัส ซึ่งเกี่ยวข้องกับผลกระทบการสัมผัสหลายส่วนของรูปร่าง และพฤติกรรมของวัสดุที่ไม่เป็นเชิงเส้นสูง การวิเคราะห์แบบจำลองโดยการคำนวณบนคอมพิวเตอร์เพื่อทำการวิเคราะห์หรือจำลองพฤติกรรมตามธรรมชาติของระบบที่ต้องการ ปัญหาที่มีลักษณะเปลี่ยนรูปถาวรก็ควรเลือกแบบพลาสติก (Plasticity) เป็นต้น

3. Post-processing เป็นขั้นตอนการแสดงผลลัพธ์หลังจากการวิเคราะห์ โดยค่าที่แสดงจะมีลักษณะเป็นค่าตัวเลขที่โหนด (Node) ค่าสมบัติของแต่ละเอลิเมนต์ (Element) ผลลัพธ์ที่จะต้องใช้ในการแสดงผลเพื่อพิจารณา ประกอบด้วย การเสียรูป ทิศทางการเสียรูป ความเร็วของวัตถุ ทิศทางของความเร็ว ความเค้นและความเครียดต่างๆ รวมทั้งการตัดภาคส่วน (Section Planes)

2.2 สมมติฐานในการวิเคราะห์

ในการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้กำหนดสมมติฐานของวัสดุที่ใช้สำหรับกระสุน แผ่นเกราะอลูมิน่า 95% และแผ่นเกราะอลูมิเนียม 7075 T6 ให้เป็นวัสดุที่มีเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) และมีสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทุกทาง (Isotropic Materials) ความเสียหายที่เกิดขึ้นพิจารณาตั้งแต่ช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นไปจนถึงช่วงพลาสติก

2.3 โมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์

แผ่นเกราะกันกระสุนและหัวกระสุนถูกสร้างโดยโปรแกรม ANSYS DesignModeler ในรูปแบบไฟล์ชิ้นส่วนสามมิติที่มีหลายชิ้นส่วนแยกกันอยู่ในไฟล์ชิ้นส่วนเดียวกัน (Multibody) แผ่นเกราะมีขนาดความกว้างและความยาวเท่ากับ 30x30 เซนติเมตร โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นเกราะเป็นกรณีต่างๆ สำหรับกระสุนที่ใช้ในการจำลองเป็นกระสุน 7.62x51 มิลลิเมตร ที่มีความเร็วในการจำลองของกระสุนตามมาตรฐาน NIJ 3

กระสุนทังสเตนคาร์ไบด์ (Tungsten carbide bullet) เป็นกระสุนเจาะเกราะ ที่มีส่วนของหัวกระสุนอยู่ภายในปลอกทองเหลืองซึ่งทำจากทังสเตนคาร์ไบด์ โดยมีชื่อเรียกตามขนาดคือ “7.62 mm” ในการจำลองทางระเบียบวิธีไฟไนเอลิเมนต์ได้ใช้รูปแบบความเสียหายของ Johnson-Holmquist Failure Model (JH-1, JH-2) ที่มีความเสียหายเมื่อแบบจำลองวัสดุที่เปราะ เช่น เซรามิกภายใต้แรงดันขนาดใหญ่และอัตราความเครียดสูงรูปแบบจะพยายามที่จะรวมปรากฏการณ์ที่พบเมื่อวัสดุที่เปราะบางถูกแรงกระทำและเกิดความเสียหายซึ่งเป็นหนึ่งในแบบจำลองที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดเมื่อต้องรับมือกับผลกระทบแบบ Ballistic กำหนดให้ σ คือความเค้นคราก (Yield stress) เป็นไปตามสมการดังนี้ [21]

$$\sigma = \left(A\left(P^{*}+T^{*}\right)^{N}(1+D)+B.\left(P^{*}\right)^{M}D\right)\left(1+C\ln\dot{\varepsilon}^{*}\right) \quad (1)$$

โดยที่ $T^{*} = \frac{T}{T_{HEL}}$ และ $P^{*} = \frac{P}{P_{HEL}}$

โดยที่ A, B, C, M, N เป็นค่าคงที่ของวัสดุ ความดันปกติ คือ $P^* = P/P_{HEL}$ โดยที่ P คือความดันไฮโดรสแตติกที่แท้จริง และ P_{HEL} คือความดันไฮโดรสแตติกที่ HEL (Hugoniot Elastic Limit) ความดันไฮโดรสแตติก แรงดึงสูงสุดที่ปรับให้เป็นมาตรฐานคือ $T^* = T/T_{HEL}$ โดยที่ T คือแรงดันไฟฟ้าสถิตสูงสุดที่วัสดุทนได้ อัตราความเครียดแบบไร้มิติ คือ $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ โดยที่ $\dot{\varepsilon}$ คือ อัตราความเครียดที่เทียบเท่าจริง และ $\dot{\varepsilon}_0 = 1\ s^{-1}$ [21]

จากสมการที่ (1) กรณีความแข็งแรงตามปกติไม่เสียหาย (The normalized intact strength) จะได้

$$\sigma_i^* = A\left(P^* + T^*\right)^N \cdot \left(1 + C\ln\dot{\varepsilon}^*\right) \quad (2)$$

จากสมการที่ (1) กรณีความแข็งแรงตามปกติเสียหาย (The normalized fracture strength) จะได้

$$\sigma_f^* = B(P^*)^M \cdot \left(1 + C\ln\dot{\varepsilon}^*\right) \le SFMAX \quad (3)$$

Johnson-Cook Model คือความสัมพันธ์ของวัสดุโลหะระหว่างความเค้นและความเครียดสามารถอธิบายได้ในสภาวะของการเสียรูปขนาดใหญ่ (Large deformation) อัตราความเครียดสูง (High strain rate) และอุณหภูมิที่สูงขึ้น (High temperature) โมเดลนี้ได้ถูกนำมาใช้ในการทำนายพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุ แบบจำลองความเค้น Johnson-Cook แสดงดังสมการต่อไปนี้ [22]

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)\left[1 + C\ln\dot{\varepsilon}^*\right]\left[1 - T^{*m}\right] \quad (4)$$

โดยที่

σ คือ ความเค้นเทียบเท่า (Equivalent stress)

ε คือ ความเครียดพลาสติกที่เท่ากัน (Equivalent plastic strain)

A, B, C, m และ n คือ ค่าคงที่ของวัสดุ โดยที่ A คือค่าคงที่ภายใต้เงื่อนไขอ้างอิงความเค้นของวัสดุ B คือ ค่าคงที่การแข็งตัวของความเครียด n คือ สัมประสิทธิ์การแข็งตัวของความเครียด C คือ ค่าสัมประสิทธิ์การเสริมความแข็งแกร่งของอัตราความเครียด (A strain-rate-hardening factor) และ m คือ ค่าสัมประสิทธิ์การอ่อนตัวด้วยความร้อน (Thermal-softening factor) $\dot{\varepsilon}^*$ คือ อัตราความเครียดไร้มิติ (Strain rate nondimensionalized) ที่อ้างอิงจากอัตราความเครียดที่ 1/s, T^* คือ อุณหภูมิไร้มิติ (Nondimensional temperature) สำหรับ T^* กำหนดได้ด้วยสมการดังนี้ [22]

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (5)$$

โดยที่ T_r คือ อุณหภูมิห้อง (298 K) และ T_m คือ อุณหภูมิหลอมละลายของวัสดุ

โดยค่าคุณสมบัติของวัสดุและพารามิเตอร์ของกระสุน 7.62x51 มิลลิเมตร เป็นวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ (Tungsten carbide) ที่ใช้ในการจำลองแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 Properties and parameter JH of tungsten carbide [23]

Properties	Tungsten carbide
Density (ρ, g/cm^3)	14.56
Young's modulus (E, GPa)	539
Poisson ratio (υ)	0.23
Bulk modulus (GPa)	332
Shear modulus (GPa)	219
Tensile yield strength (GPa)	3.85
Compressive yield strength (GPa)	4.53
Johnson-Holmquist Strength (Continuous JH-2)	
Damage type	Gradual (JH2)
Hugoniot elastic limit (HEL, GPa)	656
Intact strength constant (A)	0.9899
Intact strength exponent (n)	0.0322
Strain rate constant (C)	0
Fracture strength constant (B)	0.67
Fracture strength exponent (m)	0.0322
Maximum fracture strength ratio	1000
Damage constant (D1)	1
Damage constant (D2)	0
Hydrodynamic tensile limit (GPa)	-4

ตารางที่ 2 Properties and parameter JH-2 of alumina 95% [11]

Properties	Alumina
Density (ρ, g/cm^3)	3741
Bulk modulus (GPa)	184.56
Shear modulus (GPa)	120.34
Hugoniot elastic limit (HEL, GPa)	6
Intact strength constant (A)	0.889
Intact strength exponent (n)	0.764
Strain rate constant (C)	0.0045
Fracture strength constant (B)	0.29
Fracture strength exponent (m)	0.53
Maximum fracture strength ratio	1
Damage constant (D1)	0.005
Damage constant (D2)	1
Hydrodynamic tensile limit (GPa)	-0.3

ตารางที่ 3 Properties and parameter of AL-7075 T6

Properties	AL-7075 T6
Density (ρ, g/cm^3)	2804
Specific heat (J/kg °C)	848
Steinberg-Guinan Strength	
Initial yield stress (Y, MPa)	420
Max. yield stress (Ymax, MPa)	810
Shear modulus (GPa)	80
Hardening constant (B)	965
Hardening exponent (n)	0.1
Derivative (dG/dP, G'P)	1.74
Derivative (dG/dT, G'T), MPa/°C	-16.4
Derivative (dY/dP, Y'P)	0.02738
Melting temperature (T_{melt}, °C)	946.85
Shear modulus (GPa)	26.7
EOS	
Gruneisen coefficient	2.2
Parameter (C1, m/s)	5200
Parameter (S1)	1.36
Parameter quadratic (S2)	0

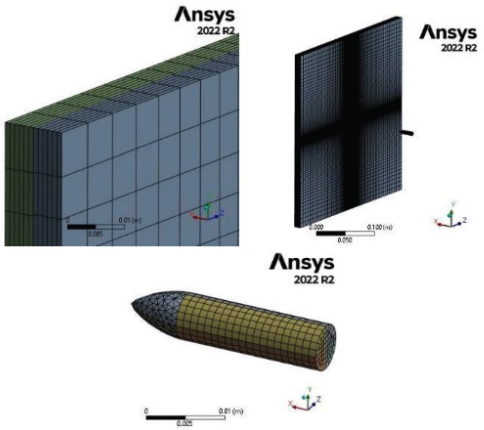
แผ่นเกราะอลูมินา (Alumina) 95% เป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบาและมีความแข็งเปราะ จึงเลือกใช้โมเดลทฤษฎีความเสียหายของ JH-2 มีพารามิเตอร์ดังตารางที่ 2

ในส่วนของแผ่นเกราะที่ 2 คือวัสดุอลูมิเนียม 7075 T6 ซึ่งเลือกใช้แบบจำลองความเสียหาย Steinberg-Guinan Strength Model เป็นแบบกึ่งทดลองที่พัฒนาขึ้นสำหรับสถานการณ์ที่มีอัตราความเครียดสูงและขยายไปยังอัตราความเครียดต่ำ ค่าคุณสมบัติและพารามิเตอร์ของวัสดุซึ่งมีในโปรแกรมจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงดังตารางที่ 3

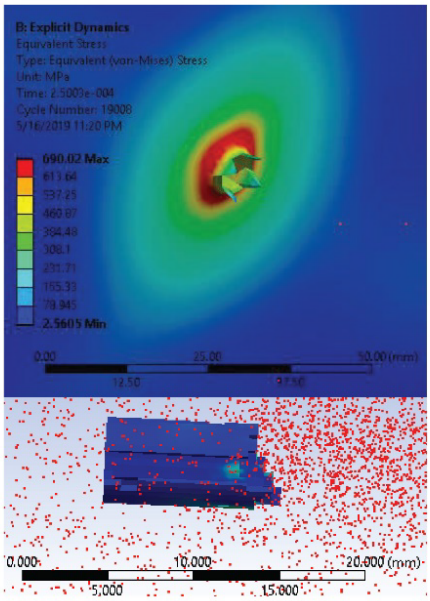
ในส่วนการจำลองได้ใช้โปรแกรม ANSYS Explicit/ Dynamics ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของแผ่นเกราะกันกระสุน ด้วยความเร็ว 880 เมตรต่อวินาที ตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 ด้วยความเร็วกระสุน 850 เมตรต่อวินาที ดังนั้นจึงสร้างรูปแบบการจำลองยิงกระสุนโดยให้ขนาดของ เอลิเมนต์ที่กระสุนเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร และแผ่นเกราะขนาด 5 มิลลิเมตร โดยบีบให้ตรงกลางมีขนาดเล็กลดลงจากขอบของแผ่นเกราะเป็น 10 เท่า ชนิดของเอลิเมนต์สำหรับกระสุนเป็นแบบเฮกซะฮีดรอล (Hexahedral) และเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) และเฉพาะแผ่นเกราะกันกระสุนได้เลือกชนิดของเอลิเมนต์เป็นเฮกซะฮีดรอล (Hexahedral)

3. ผลการวิเคราะห์และอภิปรายผล

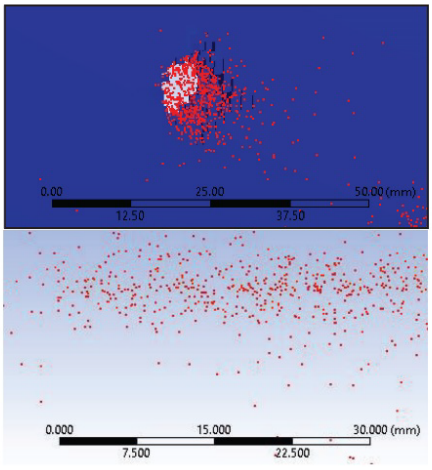
การดำเนินการในส่วนกระบวนการ Pre-Processing โดยเฉพาะในส่วนของการแบ่งเอลิเมนต์และการเลือกใช้เอลิเมนต์ ส่งผลต่อความแม่นยำอย่างมากในการวิเคราะห์ หากทำการแบ่งเอลิเมนต์โดยไม่มีการควบคุมอย่างเหมาะสมจะส่งผลให้ค่าความเค้นและการเสียหายไม่เป็นสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา



รูปที่ 1 ผลการกำหนดขนาดและแบ่งเอลิเมนต์



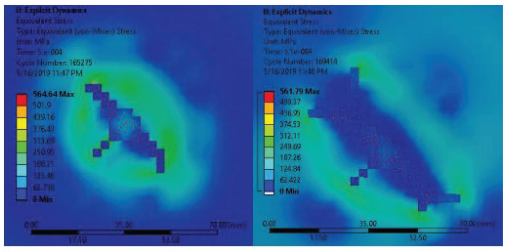
รูปที่ 2 ผลการวิเคราะห์: บน-การเจาะทะลุของแผ่น AL-7075 T6 หนา 10 มิลลิเมตร ล่าง-ลักษณะการเสียหายของกระสุน 7.62x51 มิลลิเมตร



รูปที่ 3 ผลการวิเคราะห์: บน-การเจาะทะลุของแผ่นอลูมินา 95% หนา 10 มิลลิเมตร ล่าง-ลักษณะการเสียหายของกระสุน 7.62x51 มิลลิเมตร

ดังนั้นในการจำลองการเสียหายด้วยโปรแกรม ANSYS Explicit/Dynamic ด้วยชุดคำนวณแบบ AUTODYN นั้น จะต้องทำการกำหนดขนาดเอลิเมนต์เท่ากับ 3 มิลลิเมตร ให้เกิดการแบ่งขนาดแบบลู่เข้าทั้งในแนวนอนและแนวตั้งของแผ่นเกราะดังรูปที่ 1 เพื่อให้เกิดการลดขนาดเอลเมนต์มาอยู่ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางแผ่นเกราะและหัวกระสุนมีขนาดเอลิเมนต์เท่ากับ 1 มิลลิเมตร กำหนดให้มีชั้นของเอลิเมนต์ในแผ่นเกราะเท่ากับ 6 ชั้น ส่งผลให้มีจำนวนโหนดเท่ากับ 147,509 โหนด และมีจำนวนเอลิเมนต์รวมเท่ากับ 125,269 เอลิเมนต์

จากการจำลองแผ่นเกราะเดี่ยวแผ่นที่ 1 ด้วยวัสดุอลูมินา 95% ที่ความหนา 6, 8 และ 10 มิลลิเมตร ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าแผ่นเกราะไม่สามารถต้านการเจาะทะลุได้ และเกิดความเสียหายให้กับกระสุนได้เฉพาะที่หัวกระสุนแต่ลำตัวกระสุนยังไม่แตกเสียหายแล้วทะลุออกไป ในส่วนแผ่นเกราะแผ่นที่ 2 ด้วยวัสดุอลูมิเนียม 7075 T6 ที่ความหนา 6, 8 และ 10 มิลลิเมตร สามารถสร้างความเสียหายให้กับหัวกระสุนได้ แต่เศษโลหะของกระสุนที่ทะลุไปยังคงเป็นโลหะที่เป็นลักษณะลำตัวของกระสุน ดังรูปที่ 2 และ 3 ดังนั้นจึงได้นำทั้ง 2 วัสดุ มาซ้อนกันเป็น 2 ชั้น ซึ่งแผ่นด้านหน้าเป็นวัสดุอลูมินา 95% แผ่นด้านหลังเป็นอลูมิเนียม 7075 T6 ทำการจำลองที่ความหนาต่างๆ จนกระทั่งได้ความหนาและรูปแบบแผ่นเกราะซ้อนที่สามารถทนทานการเจาะทะลุได้ ซึ่งที่ความหนาของแผ่นด้านหน้าเท่ากับ 6 มิลลิเมตร และแผ่นด้านหลังมีความหนา 6 มิลลิเมตร แผ่นเกราะสามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุน 7.62 มิลลิเมตร ได้

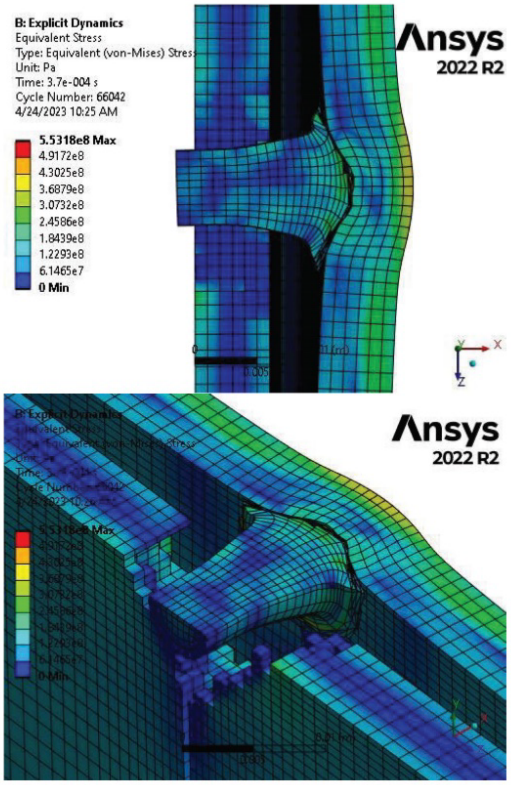


รูปที่ 4 ลักษณะรอยแตกของแผ่นที่ 1 วัสดุอลูมินา 95% (Time step = 50 ms)

เมื่อกระสุนเกิดการชนที่แผ่นที่ 1 ทำให้กระสุนเกิดการเสียหายและทะลุไปยังแผ่นที่ 2 กระสุนจึงหยุดเคลื่อนที่และ

ฝังอยู่กับแผ่นที่ 2 ที่เป็นวัสดุอลูมิเนียม 7075 T6 ดังรูปที่ 3 หลังจากที่กระสุนเกิดการหยุดและฝังตัวที่แผ่นเกราะชั้น 2 แล้วทำให้เกิดความเค้นสะสมที่แผ่นเกราะเป็นจำนวนมาก ซึ่งทำให้แผ่นเกราะแผ่นที่ 1 วัสดุอลูมินา 95% เกิดมีรอยแตกเพิ่มขึ้น และสอดคล้องกับ A. Rajput and M. A. Iqbal [24] ตามรูปที่ 4

ดังนั้นแผ่นที่ 1 ซึ่งเป็นวัสดุอลูมินา 95% มีความแข็งมากทำให้การอ่อนตัวหรือการยุบตัวของแผ่นน้อยจึงเกิดความเค้นสะสมภายในแผ่นเกราะ เกิดการแตกกระจายที่บริเวณรอบๆ รูเจาะทะลุ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีความเสียหายเกิดขึ้นอยู่แล้ว เมื่อกระสุนผ่านแผ่นที่ 1 ไปยังแผ่นที่ 2 ที่ทำหน้าที่ดูดซับพลังงานเพื่อหยุดการเคลื่อนที่ของกระสุนโดยใช้วัสดุอลูมิเนียม 7075 T6 มีความหนา 6 มิลลิเมตร ผลที่ได้คือสามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนและสามารถลดความเร็วของกระสุนได้



รูปที่ 5 ลักษณะของความเสียหายของแผ่นเกราะและกระสุน 7.62x51 mm ที่ Time step = 37 ms

5. สรุป

ในการจำลองการยิงด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ความเร็วของกระสุน 850 เมตรต่อวินาที ขนาดกระสุน 7.62x51 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน NIJ 3 ได้ใช้วัสดุ 2 ชนิดคือ 1. แผ่นวัสดุอลูมินา 95% และ 2. แผ่นวัสดุอลูมิเนียม 7075 T6 ด้วยความหนาแต่ละแผ่น 6, 8 และ 10 มิลลิเมตร ได้จำลองการยิงแบบแผ่นเดี่ยว ซึ่งทุกความหนาของแผ่นเดี่ยวอลูมินาและแผ่นเดี่ยวอลูมิเนียมดังกล่าวไม่สามารถต้านทานการเจาะทะลุได้และทำให้กระสุนทะลุผ่านไปเป็นเศษโลหะขนาดใหญ่ออกไปเป็นลักษณะของลำตัวกระสุน เมื่อความหนาเพิ่มขึ้นด้วยการนำแผ่นอลูมินาและแผ่นอลูมิเนียมมาซ้อนกันเป็น 2 ชั้นที่ความหนาแผ่นหน้า 6 มิลลิเมตร และแผ่นหลัง 6 มิลลิเมตร ผลที่ได้นั้นสามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนขนาด 7.62 มิลลิเมตร ที่ความเร็ว 850 เมตรต่อวินาที (NIJ 3) และแผ่นเกราะอลูมินา 95% เกิดการแตกเสียหายและช่วยลดความเร็วของกระสุนทะลุไปยังแผ่นที่ 2 เป็นวัสดุอลูมิเนียม 7075 T6 ซึ่งกระสุนเกิดการหยุดเคลื่อนที่และฝังตัวที่แผ่นที่ 2 เมื่อกระสุนทะลุผ่านไปทำให้เกิดความเค้นสะสมภายในตัวแผ่นเกราะ ส่งผลให้หลังจากที่กระสุนฝังตัวที่แผ่นที่ 2 แล้วแผ่นที่ 1 เกิดรอยแตกเสียหายเพิ่มขึ้นเป็นลักษณะรอยร้าวที่ตัวแผ่น ดังนั้นที่ความหนาแผ่นของวัสดุตั้งแต่ 6 มิลลิเมตรขึ้นไปจะสามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนขนาด 7.62x51 มิลลิเมตร ที่ความเร็วกระสุน 850 เมตรต่อวินาที ได้ ทั้งนี้ผลการวิจัยเป็นผลจากกระบวนการตามระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งยังต้องดำเนินการในส่วนของกระบวนการทดลองเพื่อให้เกิดความน่าเชื่อถือและเหมาะสมต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนขอขอบคุณสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยตามสัญญาเลขที่ 47/2561 และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร (มทร.พระนคร) ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือ อุปกรณ์และสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

[1] N.K. Gupta and V. Madhu, “An experimental study of normal and oblique impact of hard-

core projectile on single and layered plates," *Int J Impact Eng*, vol. 19, no. 5–6, pp. 395–414, 1997.

[2] N. K. Gupta, M. A. Iqbal and G. S. Sekhon, " Experimental and numerical studies on the behavior of thin aluminum plates subjected to impact by blunt – and hemispherical-nosed projectiles," *Int J Impact Eng*, vol. 32, pp. 1921–1944, 2006.

[3] J. C. F. Millet, N. K. Bourne and M. R. Edwards, " The effect of heat treatment on the shock induced mechanical properties of aluminium alloy-7017," *Scripta Mater*, vol. 51, pp. 967–971, 2004.

[4] Y. B. Lee, D. H. Shin, K. T. Park and W. J. Nam, " Effect of annealing temperature on microstructures and mechanical properties of a 5083 Al alloy deformed at cryogenic temperature," *Scripta Mater*, vol. 51, pp. 355–359, 2004.

[5] L.D. Oosterkamp, A. Ivankovic and G. Venizelos, " High strain rate properties of selected aluminium alloys," *Mater Sci Eng A*, vol. 278, pp. 225–235, 2000.

[6] T. Borvik, A.H. Clausen, O.S. Hopperstad and M. Langseth, " Perforation of AA5083-H116 aluminium plates with conical- nose steel projectiles experimental study," *Int J Impact Eng*, vol. 30, pp. 367–384, 2004.

[7] P. K. Jena, N. Jagtap, K. Sivakumar, T. B. Bhat, "Some experimental studies on angle effect on penetration," *Int J Impact Eng*, vol. 37, pp. 489–501, 2010.

[8] K. S. Kumar, S. Dinesh and T. B. Bhat, " Studies on aluminium armour plates impacted by deformable and non-deformable projectile," *Mater Sci Forum*, vol. 465–466, pp. 79–84, 2004.

[9] W. L. Goh, Y. Zheng, J. Yuan, and K. W. Ng, "Effects of hardness of steel on ceramic armour module against long rod impact," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 109, pp. 419–426, Nov. 2017.

[10] D. Bürger, A. Rocha de Faria, S. F. M. de Almeida, F. C. L. de Melo, and M. V. Donadon, "Ballistic impact simulation of an armour-piercing projectile on hybrid ceramic/fiber reinforced composite armours," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 43, pp. 63–77, May 2012.

[11] A. Serjouei, R. Chi, Z. Zhang, and I. Sridhar, "Experimental validation of BLV model on bi-layer ceramic-metal armor," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 77, pp. 30–41, Mar. 2015.

[12] Kay G. Failure modeling of titanium-6Al-4V and 2024-T3 aluminum with the Johnson-Cook material model. Internal Technical Report, (UCRL-ID-149880). California, U.S.A: Lawrence Livermore National Laboratory (U.S. Department of Energy); 2002.

[13] Marsh SP. LASL sock Hugoniot data. California: University of California Press; 1980.

[14] E.-G. Ng, T. I. El-Wardany, M. Dumitrescu, and M. A. Elbestawi, "PHYSICS-BASED SIMULATION OF HIGH SPEED MACHINING," *Mach. Sci. Technol.*, vol. 6, no. 3, pp. 301–329, Dec. 2002.

[15] Lee JK. Analysis of multi-layered materials under high velocity impact using CTH. Master of Science Master's Thesis, Department of Aeronautics and Astronautics Engineering. Ohio: Air University; 2008. p. 198.

[16] K. Navapon, and C. Prakorb, " Parameter analysis of SKD11 and SUS304 bulletproof

plate that resistance penetration of bullet 7.62 mm according to standard NIJ 4 by finite element method," *International Journal of Mechanical Engineer and Technology*, vol. 10, pp. 207 –221, Sep. 2019

[17] A. Saicharoen P. Tinprabath and P. Chartpuk, "Parameter Analysis that Affects the Ability to Resistance Penetration of Ammunition on the Aluminum Armor Surface Using Finite Element Method," *RMUTP Research Journal*, vol. 16, no. 1, pp. 177-191. Jan.-Jun. 2022.

[18] V. Khramum and P. Chartpuk, "Finite Element Analysis of Armor Piercing Bullet Penetrating Hard Steel Armor Plate," *RMUTP Research Journal*, vol. 16, no. 2, pp. 171-186. Jul.-Dec. 2022.

[19] N. Meesanu, P. Wirotcheewan, D. Nicomrat and P. Chartpuk, "Analysis of a Concave Bulletproof Plate for Refracting the Bullet Impact Direction with Finite Element Method," in *Proceeding of the 11th Rajamangala University of Technology International Conference "RMUT Driving toward Innovation, Economy and Green Technology for Sustainable Development"*, pp. 161-168.

[20] M. Thawornsin, S. Mongkonlerdmanee, D. Nicomrat and P. Chartpuk, "The Parameter Analysis of the Tungsten Carbide and SUS304 Armor Plate with a Finite Element Method," in *Proceeding of the 11th Rajamangala University of Technology International Conference "RMUT Driving toward Innovation, Economy and Green Technology for Sustainable Development"*, pp. 169-179.

[21] Jianxiu Wang, Yao Yin and Chuanwen Luo, " Johnson– Holmquist- II (JH- 2) Constitutive Model for Rock Materials: Parameter Determination and Application in Tunnel Smooth Blasting," *Appl. Sci.*, vol. 8, pp. 1675, 2018.

[22] Hubert W. Meyer, Jr. and David S. Kleponis, "An Analysis of Parameters for the Johnson-Cook Strength Model for 2- in- Thick Rolled Homogeneous Armor," *Army Research Laboratory*, Jun. 2001.

[23] F. M. John, T. Jan Arild, S. Stian, B. Svien Morten, S.-E. Lasse, and F. Haakon, "Development of material models for semi-brittle materials like tungsten carbide," *Norwegian Defence Research Establishment (EFI)*, pp. 1–51, 09-Nov-2010.

[24] A. Rajput and M. A. Iqbal, "Impact behavior of plain, reinforced and prestressed concrete targets," *Mater. Des.*, vol. 114, pp. 459–474, Jan. 2017.

การประชุมวิชาการราชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ
RMTC 2023
ครั้งที่ 8
The 8th Rajamangala Manufacturing & Management Technology Conference 2023
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ขอมอบใบประกาศเกียรติคุณ ให้ไว้เพื่อแสดงว่า
ธนากร บุญหรั่ง, ทรงวุฒิ มงคลเลิศมณี, ประสิทธิ์ แพงเพชร, แจ๊ค ชุ่มอินทร์, ประกอบ ชาติภุกต์
ได้เข้านำเสนอบทความเรื่อง
การวิเคราะห์ความเสียหายของแผ่นเกราะกันกระสุนจากแผ่นวัสดุอลูมินา 95% และอลูมิเนียม 7075 T6 ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
การประชุมวิชาการราชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 8
ระหว่างวันที่ 24 - 26 พฤษภาคม 2566 ณ โรงแรมอมารี พัทยา จังหวัดชลบุรี
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิชัย จันทร์มณี)
อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
(รองศาสตราจารย์ ดร.อนินท์ มีมนต์)
นายกสมาคมเครือข่ายราชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ

การประชุมวิชาการราชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 8

RMTC 2023

The 8th Rajamangala Manufacturing & Management Technology Conference 2023

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ขอมอบใบประกาศเกียรติคุณเพื่อรับรองว่าผลงานวิจัย

เรื่อง : การวิเคราะห์ความเสียหายของแผ่นเกราะกันกระสุนจากแผ่นวัสดุอลูมินา 95% และอลูมิเนียม 7075 T6 ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

โดย

ธนากร บุญหรั่ง, ทรงวุฒิ มงคลเลิศมณีล, ประสิทธิ์ แพงเพชร, แจ๊ค ชุ่มอินทร์, ประกอบ ชาติภุกต์

ได้รับรางวัล The Best Paper Award รองอันดับที่ 1 กลุ่มสาขางาน Material Science and Application (MSA)

การประชุมวิชาการราชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 8

ระหว่างวันที่ 24 - 26 พฤษภาคม 2566 ณ โรงแรมอมารี พัทยา จังหวัดชลบุรี

(รองศาสตราจารย์ ดร.พิชัย จันทร์มณี)
อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

(รองศาสตราจารย์ ดร.อนินท์ มีมนต์)
นายกสมาคมเครือข่ายราชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ นามสกุล นายธนากร บุญหรั่ง

วัน เดือน ปีเกิด 17 สิงหาคม 2528

ภูมิลำเนา 41 หมู่3 ต.บางหัวเสือ อ.พระประแดง จ.สมุทรปราการ

ประวัติการศึกษา

วุฒิการศึกษา	**ชื่อสถาบัน**	**ปีที่สำเร็จการศึกษา**
มัธยมศึกษาตอนปลาย	โรงเรียนวัดทรงธรรม	2546
ปริญญาตรี	มหาวิทยาลัยธนบุรี	2558

ตำแหน่งและสถานที่ทำงานปัจจุบัน

-