



การวิเคราะห์ความเค้นและการเสียรูปของแผ่นเกราะโลหะแบบเรียงซ้อนกัน
โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Stress Analysis and Deformation of Stacked Metal Armor Plates
Using the Finite Element Methodology

มัลลิกา เดชสุภา
Mullika Dejsupa

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2565



การวิเคราะห์ความเค้นและการเสีรูปร่างของแผ่นเกราะโลหะแบบเรียงซ้อนกัน
โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
Stress Analysis and Deformation of Stacked Metal Armor Plates
Using the Finite Element Methodology

มัลลิกา เดชสุภา
Mullika Dejsupa

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ชื่อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์ความเค้นและการเสียรูปของแผ่นเกราะโลหะแบบเรียงซ้อนกัน
โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
ชื่อ นามสกุล มัลลิกา เดชสุภา
ชื่อปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
สาขาวิชา และคณะ วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ประกอบ ชาติภักต์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่เรือตรี ดร.ทรงวุฒิ มงคลเลิศมณี


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้ให้ความเห็นชอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แล้ว


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำรรค)

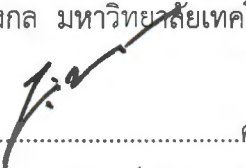

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ วิโรจน์ชิววัน)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฎิภาณ ถิ่นพระบาท)


..... กรรมการ
(ดร.ประกอบ ชาติภักต์)


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

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ พันธุ์นะ)

วันที่ 26 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2566

ชื่อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ความเค้นและการเสียรูปของแผ่นเกราะโลหะแบบเรียงซ้อนกันโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
ชื่อ นามสกุล	มัลลิกา เดชสุภา
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
สาขาวิชา และคณะ	วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา	2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ความเค้นและการเสียรูปของแผ่นเกราะโลหะแบบเรียงซ้อนกันและวิเคราะห์ความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 โดยกระสุนขนาด 7.62x51 มิลลิเมตร ที่ความเร็ว 850 เมตรต่อวินาที โปรแกรม ANSYS Explicit/Dynamic ถูกนำมาใช้ทำนายพฤติกรรมการเสียหายของแผ่นเกราะอลูมิเนียมกันกระสุนเกรด 7075 T6 และ 5083-H116 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ได้รับการพิสูจน์ความถูกต้องกับผลการทดลองยิงด้วยกระสุนจริง ตัวแปรสำคัญคือค่าความหนาของแผ่นอลูมิเนียมและจำนวนชั้นที่มีการวางเรียงซ้อนกัน ซึ่งมีระยะห่างระหว่างแผ่นและไม่มีระยะห่างระหว่างแผ่น กำหนดให้กระสุนทั้งสแตนคาร์ไบด์ขนาด 7.62x51 มิลลิเมตร มีรูปแบบความเสียหายเป็นไปตาม Johnson-Holmquist Failure Model (JH-1, JH-2) แผ่นเกราะมีขนาดความกว้างและความยาวเท่ากับ 30x30 เซนติเมตร โดยวัสดุ AL-7075 T6 มีสมบัติวัสดุเป็นไปตาม Steinberg-Guinan Strength และวัสดุ AL-5083-H116 เป็นไปตามรูปแบบของ Johnson-Cook Strength ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า การเลือกชนิดของเอลิเมนต์และการแบ่งเอลิเมนต์เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการวิเคราะห์ การใช้เทคนิคการแบ่งเอลิเมนต์มีความสำคัญโดยต้องทำการแบ่งเอลิเมนต์ให้มีขนาดเล็กตรงตำแหน่งกระสุนวิ่งเข้าปะทะกับแผ่นเกราะและต้องควบคุมให้เอลิเมนต์มีจำนวนไม่มากเกินไปในพื้นที่อื่นที่ไกลออกไปจากกระสุน จากการออกแบบให้แผ่นเกราะอลูมิเนียม AL-7075 T6 และ AL-5083-H116 มีความหนาและระยะห่างระหว่างแผ่นแตกต่างกันไปจะส่งผลกระทบต่อความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุ ตัวแปรที่มีผลต่อความสามารถต้านทานการเจาะทะลุที่สูงมากคือความหนาแผ่นเกราะและจำนวนชั้นของแผ่นเกราะ โดยระยะห่างระหว่างแผ่นเกราะมีผลต่อความต้านทานเจาะทะลุในระดับต่ำ

คำสำคัญ: เกราะกันกระสุน, อลูมิเนียม 5083-H116, อลูมิเนียม 7075 T6, ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Thesis Title	Stress Analysis and Deformation of Stacked Metal Armor Plates Using the Finite Element Methodology
Author	Mullika Dejsupa
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 stress and deformation of stacked metal armor plates and to analyze their penetration resistance by the finite element method according to the NIJ level 3 standard by a 7.62x51mm bullet at a speed of 850 meters per second. ANSYS Explicit/Dynamic program was adopted to predict the damage behavior of 7075 T6 and 5083-H116 grade bulletproof aluminum armor plates. The finite element model was validated against the results of experimental firing with a genuine bullet. The important variables are the thickness of the aluminum plate and the number of stacked layers with the distance between the plates and without the distance between the plates. The 7.62x51 mm tungsten carbide bullet was determined to have a damage pattern in accordance with the Johnson-Holmquist Failure Model (JH-1, JH-2). The armor plates were 30x30 cm in width and length. The property of AL-7075 T6 material conformed to the Steinberg-Guinan Strength, and that of the AL-5083-H116 material conformed to the Johnson-Cook Strength model. The results showed that selecting types of elements and dividing elements were the important factors affecting the analysis. The use of element division techniques was important as the element must be divided into a small size where the bullet hit the armor plate and there must not be too many elements in the area further away from the bullet. According to the design of AL-7075 and AL-5083-H116 aluminum plates, different thicknesses and distances between plates would affect their penetration resistance. The variables that affected the extremely high penetration resistance were the armor plate thickness and the number of the armor plate layers, but the distance between the plates had a low impact on the penetration resistance.

Keywords: Bulletproof Armor, 5083-H116 Aluminum, 7075 T6 Aluminum, Finite Element Methodology

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความเมตตากรุณา ช่วยเหลือและอนุเคราะห์จากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ประกอบด้วยอาจารย์ ดร.ประกอบ ชาติภักต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่เรือตรี ดร.ทรงวุฒิ มงคลเลิศมณี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม และกรรมการคุมสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งกรุณามอบความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ ความช่วยเหลือในทุกด้าน ทั้งการแก้ปัญหาต่างๆ ตลอดจนตรวจสอบวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงยิ่งไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำนรรค ที่กรุณาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ชี้แนะแนวทาง ให้ความรู้ ตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ วิโรจน์ชิวัน ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ให้ความรู้ ชี้แนะแนวทาง ตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฎิภาณ ถิ่นพระบาท ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ให้ความรู้ ชี้แนะแนวทาง ตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ประสิทธิ์ แพงเพชร และอาจารย์แจ๊ค ชุมอินทร์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิตเครื่องมือและแม่พิมพ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือในการเตรียมชิ้นงานขึ้นรูปแผ่นเกราะโลหะ

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครูอาจารย์ทุกท่าน ผู้ที่ให้ความรู้ อนุเคราะห์ ส่งเสริมสนับสนุนด้านทุนทรัพย์และกำลังใจ คอยอบรมสั่งสอนจนประสบความสำเร็จในทางการศึกษา

ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร รวมถึงเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัยครั้งนี้ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ดี ท้ายที่สุดนี้ ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะมีประโยชน์สำหรับผู้อ่านไม่มากนักน้อยต่อไป

มัลลิกา เดชสุภา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
1.5 สถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรม	
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.2 มาตรฐานแผ่นเกราะกันกระสุน	14
2.3 การทบทวนวรรณกรรม	19
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย	
3.1 ระเบียบวิธีวิจัย	28
3.2 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วย ANSYS: Explicit Dynamics	31
3.3 กระบวนการและเทคนิคการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์	38
3.4 การเตรียมแผ่นเกราะโลหะสำหรับทดสอบการยิงกระสุน	50
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	
4.1 ผลการวิเคราะห์และอภิปรายผล	51
4.2 ผลการดำเนินงานเตรียมการยิงกระสุนลงบนแผ่นเกราะโลหะ	56

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 ผลการทดสอบจริงและการเปรียบเทียบผลการยิงกระสุนกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	59
4.4 ผลการวิเคราะห์ความเค้นสูงสุด (Von-Mises Stress)	61
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผล	65
5.2 ข้อเสนอแนะ	66
เอกสารอ้างอิง	68
ภาคผนวก ก บทความตีพิมพ์เผยแพร่และไปร้บรองการนำเสนอ	71
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	91



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ตารางภัยคุกคามและการยิงทดสอบความสามารถกันกระสุนของเกราะ	14
2.2	ตารางสรุปการวินิจฉัยการปฏิบัติต่อผลการยิงทดสอบเกราะ	19
3.1	Properties and parameter JH of tungsten carbide	34
3.2	Properties and parameter of AL-7075 T6	34
3.3	Properties and parameter of AL-5083-H116	36
4.1	องค์ประกอบทางเคมีของ AL-5083 H116 และ AL-7075 T6	54



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 รถยนต์บรรทุกทุกปกติขนาดเล็กสำหรับการวิจัยเกราะโลหะกันกระสุน	1
1.2 กระสุนขนาด 9 mm และ AP 7.62x51 มิลลิเมตร	2
2.1 ลักษณะความเค้นใน 3 มิติ	5
2.2 เอลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า	7
2.3 Ballistic test setup	18
2.4 ตัวอย่างการวิเคราะห์การเจาะทะลุโดยใช้โปรแกรม Abaqus	20
2.5 การยึดเกาะระหว่างแผ่นใช้องค์ประกอบเหนียวที่มีความหนาเป็นศูนย์กลางใน LS-DYNA	21
2.6 ภาพประกอบการแพร่กระจายความเสียหายในเซรามิก	21
2.7 การเปรียบเทียบการเจาะทะลุวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม ANSYS	22
2.8 แสดงความเสียหายของเซรามิก (ก.) แผ่นเกราะหน้า (ข.) แผ่นเกราะหลัง	23
2.9 มุมมองของรูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นกับผนังด้านหลัง	24
2.10 ภาพประกอบแผนผังและภาพความเร็วสูงที่เกิดขึ้นจริง	25
2.11 ตำแหน่งวัสดุและความเสียหายในการจำลองการทดสอบ	25
2.12 โล่ที่ใส่ด้วยแผ่นไม้สนใต้ (a) โล่ทำจากไม้ (b) แผ่นไม้สนใต้	26
2.13 โมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์ของเป้าหมายกระสุนปืนและชุดเกราะในแบบ 3 มิติ	27
3.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย	29
3.2 กรอบการวิจัย	30
3.3 Relationship between yield stress and plastic strain of Steinberg-Guinan Strength for AL-7075 T6	35
3.4 Relationship between yield stress and plastic strain of Johnson-Cook for AL-5083-H116	35
3.5 การกำหนดขนาดและการแบ่งเอลิเมนต์	36
3.6 โครงสร้างกระสุน A) มิติของกระสุน AP 7.62 mm และชิ้นส่วน: 1. ปลอกทองเหลือง 2. หัวจุด 3. แกนเหล็กชุบแข็ง 4. ฐานตะกั่ว 5. แก๊ป และ B) ขนาดกระสุน มีหน่วยเป็น มม.	36
3.7 User interface ของ ANSYS 2020R2	38

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8 ตัวอย่างการกำหนดวัสดุใหม่สำหรับ AL-7075 T6 ด้วย Steinberg-Guinan Strength และ AL-5083-H116 ด้วย Johnson-Cook Strength	39
3.9 นำเข้าโมเดล 3 มิติ แผ่นเกราะและลูกกระสุนในกรณีนี้ที่สร้างโดยโปรแกรมอื่นเข้าสู่ ANSYS	39
3.10 ผลลัพธ์จากการใช้คำสั่ง Generate	40
3.11 นำเข้าโมเดล 14 Parts 14 Bodies สู่อุปกรณ์ ANSYS DesignModeler และใช้คำสั่ง From New Part	40
3.12 เข้าสู่หน้าต่าง Ansys Mechanical Enterprise ด้วยคำสั่ง Model	41
3.13 เลือกชนิดของวัสดุที่ต้องการและกำหนดค่า Stiffness Behavior เป็น Flexible	41
3.14 การกำหนด Body Interaction ของแผ่นเกราะที่ประกบกันเป็นแบบ Frictionless	42
3.15 ผลการกำหนด Element Size	44
3.16 การตั้งค่าขนาดของ Element Size ที่แผ่นเกราะ	44
3.17 การกำหนดค่าความเร็วเริ่มต้นและการใส่ค่าความเร็วและทิศทางการเคลื่อนที่	44
3.18 ค่าของ End Time และ Result Number of Points ที่ต้องกำหนด	45
3.19 การกำหนด Fixed Support	45
3.20 ผลของ Solver Output ภายหลังจากวิเคราะห์เสร็จสมบูรณ์	46
3.21 กราฟมีลักษณะคงที่ในแนวนอนแสดงถึงสถานะปกติ	47
3.22 เส้นกราฟ Energy Error อยู่ในสถานะปกติ	47
3.23 เส้นกราฟ Momentum Summary อยู่ในสถานะปกติวิ่งในแนวนอน	47
3.24 เส้นกราฟ Hourglass Energy แสดงผลที่เป็นปกติ	48
3.25 ผลการวิเคราะห์ความเค้น Equivalent Stress ในบางกรณี	49
3.26 ตัวอย่างชิ้นส่วนแผ่นโลหะที่นำมาประกอบเป็นแผ่นเกราะโลหะ	50
3.27 แผ่นเกราะโลหะกันกระสุนที่ประกอบเสร็จแล้วรอการทดสอบ	50
4.1 วัสดุ AL-7075 T6 ก) ที่ความหนา 6 มิลลิเมตร และ ข) ความหนา 10 มิลลิเมตร	51
4.2 ความสามารถในการเจาะทะลุแผ่นเกราะที่ทำจากวัสดุ AL-7075 T6 ที่ความหนาต่าง ๆ ก) ความหนา 6 มิลลิเมตร ข) ความหนา 10 มิลลิเมตร และ ค) ความหนา 60 มิลลิเมตร	52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 แผ่นเกราะวัสดุ AL-7075 T6 จำนวน 6 แผ่น โดยมีความหนาแผ่นละ 10 มิลลิเมตร	53
4.4 ผลการจำลองด้วยวัสดุ AL-7075 T6 ก) แผ่นซ้อน 6 ชั้น ไม่มีช่องว่าง ใช้ Frictionless	53
4.5 ผลการจำลองด้วยแผ่นเกราะที่มีความหนา 60 มิลลิเมตร ก) แผ่นเกราะ AL-7075 ข) แผ่นเกราะ AL-5083 H116	54
4.6 แผ่นเกราะวัสดุ AL-7075 T6 จำนวน 6 แผ่นๆ ละ 10 มิลลิเมตร ด้วยระยะห่างระหว่างแผ่น 10 มิลลิเมตร	55
4.7 ผลการจำลองแผ่นเกราะเรียงซ้อน 6 แผ่น ระยะห่างแต่ละแผ่น 10 มิลลิเมตร ด้วยวัสดุอลูมิเนียม 7075 T6, ความเร็วกระสุน = 850 เมตรต่อวินาที	55
4.8 แผ่นเกราะวัสดุ AL-7075 T6 จำนวน 6 แผ่นๆ ละ 10mm ด้วยระยะห่างระหว่างแผ่น 30mm	56
4.9 ผลการจำลองแผ่นเกราะเรียงซ้อน 6 แผ่น ระยะห่างแต่ละแผ่น 30 มิลลิเมตร ด้วยวัสดุอลูมิเนียม 7075 T6, ความเร็วกระสุน = 850 เมตรต่อวินาที	56
4.10 ตำแหน่งอุปกรณ์ต่างๆ และระยะการยิงตามมาตรฐาน NIJ	57
4.11 เครื่องยิงกระสุนและเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับบันทึกผลและควบคุม	58
4.12 การจัดเตรียมกระเบาะวัสดุหนุ่นเพื่อรองรับแผ่นเกราะที่จะยิงและการติดตั้งแผ่นพิสูจน์	58
4.13 กล้องวัดความเร็วกระสุนตามมาตรฐาน NIJ	58
4.14 แผ่นเกราะกันกระสุนสำหรับการทดสอบ	58
4.15 การเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ และลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้น	59
4.16 ผลการทดสอบยิงจริงตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3	60
4.17 ผลการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วย ANSYS รอยเจาะของกระสุนทะลุผ่านแผ่นเกราะ 2 แผ่น และไปหยุดที่แผ่นเกราะแผ่นที่ 3	60
4.18 ความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นเทียบกับเวลาสำหรับวัสดุ AL-7075 T6	61
4.19 ความเค้นสูงสุดและการเสียรูปของแผ่นเกราะสำหรับวัสดุ AL-7075 T6 เรียงซ้อนกันแบบมีระยะห่างระหว่างแผ่น 10 mm	62

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.20	ความเค้นสูงสุดและการเสียรูปของแผ่นเกราะสำหรับวัสดุ AL-7075 T6 เรียงซ้อนกันแบบมีระยะห่างระหว่างแผ่น 30 mm	63
4.21	ผลการวิเคราะห์การเสียรูปและความเค้นสูงสุดกรณีแบบจำลองที่มีแผ่นเกราะหนา 60 มิลลิเมตร ไม่มีระยะห่างระหว่างแผ่น ก) AL-7075 T6 ข) AL-5083-H116 และ ค) ความเค้นสูงสุด	64

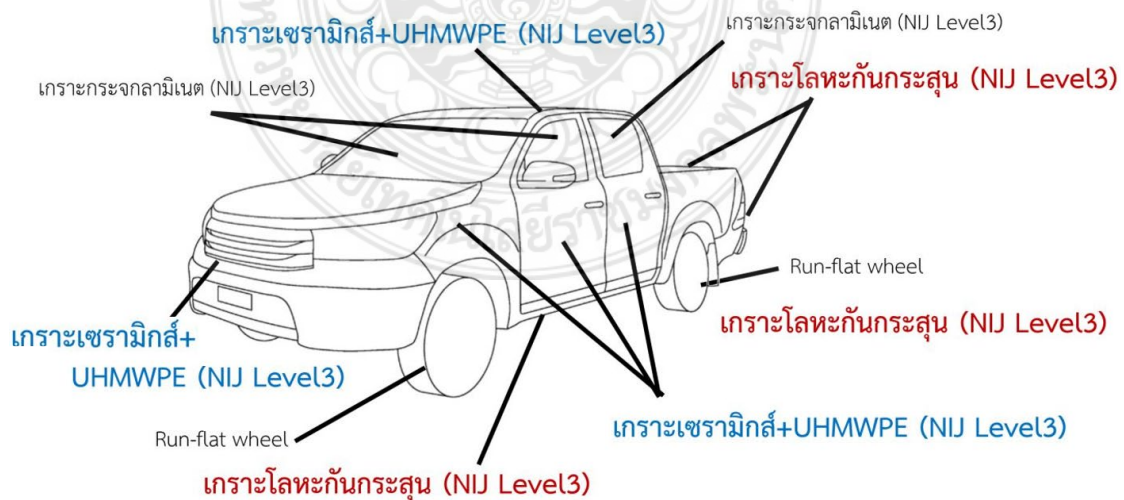


บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องด้วยสถานการณ์ปัญหาความไม่สงบในพื้นที่เสี่ยงของประเทศไทย 3 จังหวัดชายแดนใต้ ที่มีการปะทะระหว่างเจ้าหน้าที่ทหาร ตำรวจ กับผู้ก่อการร้าย การวางระเบิด การลอบทำร้าย ประชาชนและเจ้าหน้าที่ที่เข้าไปดูแลรักษาความสงบ ทั้งนี้ในการก่อเหตุความไม่สงบนั้นได้รวมถึงการ ลอบยิงเจ้าหน้าที่ในขณะขับรถออกปฏิบัติงาน ลาดตะเวนตามเส้นทางล่อแหลมหรือสุ่มเสี่ยงจนทำให้มี เจ้าหน้าที่เกิดอันตรายได้รับบาดเจ็บและเสียชีวิตจากเหตุการณ์ดังกล่าวเป็นจำนวนมาก ซึ่งรถที่ใช้ในการปฏิบัติหน้าที่นั้นอาจป้องกันการโดนลอบยิงได้ จึงจำเป็นต้องใช้รถที่มีสมรรถนะการป้องกันที่สูง และดีเยี่ยม ดังนั้นการพัฒนาอาวุธและยุทธโธปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในกองทัพให้มีความทันสมัยและมี ศักยภาพ ในการป้องกันการโจมตี การสร้างนวัตกรรมเพื่อการเสริมสร้างขีดความสามารถในการ ป้องกันและการรบจึงเป็นสิ่งสำคัญมาก การจัดซื้อรถเกราะกันกระสุนขนาดใหญ่นั้นมีราคาสูง ทั้งนี้เพื่อ สร้างเทคโนโลยีของตนเองและลดการนำเข้าจากต่างประเทศ ที่ผ่านมารถเกราะกันกระสุนระหว่าง กองทัพพบได้มีข้อตกลงร่วมกับภาคเอกชนว่าด้วยความร่วมมือและการให้การสนับสนุนงบประมาณใน การดำเนินการโครงการวิจัยและพัฒนาารถยนต์บรรทุกพิกัดขนาดเล็กติดเกราะ ใช้เป็นรถรุ่น Toyota Revo ในการวิจัยดังรูปที่ 1.1 เพื่อการวิจัยและการพัฒนาอย่างต่อเนื่องให้มีประโยชน์ต่อการทางทหาร และมีประสิทธิภาพต่อการใช้งานในสามจังหวัดชายแดนภาคใต้ จำเป็นต้องเพิ่มคุณภาพของเกราะ ป้องกันกระสุน เช่น การลดน้ำหนักของเกราะกันกระสุนหรือเพิ่มขีดความสามารถในการป้องกัน กระสุนเพิ่มมากขึ้น

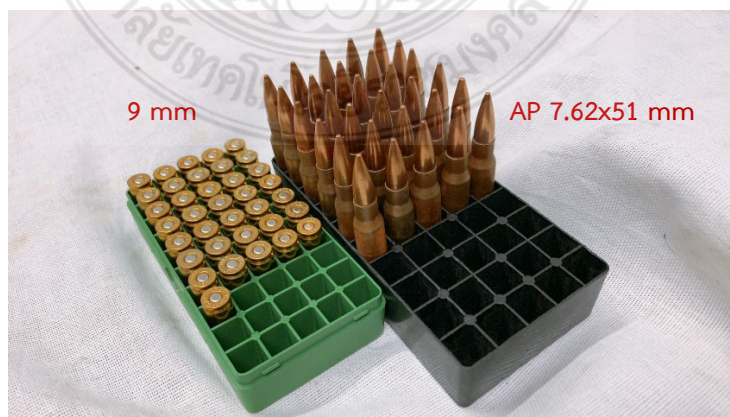


รูปที่ 1.1 รถยนต์บรรทุกพิกัดขนาดเล็กสำหรับการวิจัยเกราะโลหะกันกระสุน

จากปัญหาข้างต้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาแผ่นเกราะโลหะกันกระสุนสำหรับรถยนต์บรรทุกทุกชนิดขนาดเล็กโดยศึกษาวัสดุและออกแบบแผ่นเกราะโลหะกันกระสุนตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 ซึ่งมาตรฐาน NIJ เป็นมาตรฐานการทดสอบความสามารถหรือประสิทธิภาพการป้องกันกระสุนของเกราะที่กำหนดโดยสถาบันความเที่ยงธรรมแห่งชาติ (National Institute of Justice, NIJ) ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งประเทศไทยและอีกหลายประเทศทั่วโลกใช้มาตรฐานสำหรับการทดสอบเกราะป้องกันกระสุนด้วยเช่นกัน

ในการพัฒนาแผ่นเกราะกันกระสุน โดยวัสดุที่นำมาประยุกต์ใช้ในการประกอบมีหลายชนิด และแผ่นเกราะกันกระสุนมีหลากหลายรูปแบบ ในกรณีแบ่งตามชนิดของวัสดุข้างต้น แบ่งออกได้ดังนี้ 1. แผ่นเกราะเซรามิก 2. แผ่นเกราะใยคอมโพสิต 3. แผ่นเกราะอ่อน 4. แผ่นเกราะแข็ง 5. แผ่นเกราะโลหะกันกระสุน เป็นต้น

จากเหตุผลที่กล่าวข้างต้น ผู้วิจัยมีความสนใจเลือกทำการวิเคราะห์ความหนาของแผ่นเกราะโลหะกันกระสุนและวิธีการวางแผ่นเกราะกันกระสุนแบบเรียงซ้อนกันแบบเว้นช่องว่างและไม่เว้นช่องว่าง ที่มีผลกระทบต่อทางด้านทานการเจาะทะลุของกระสุนบนแผ่นเกราะอลูมิเนียม และถังสแตนคาร์ไบด์ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อออกแบบและพัฒนาแผ่นเกราะกันกระสุนให้มีศักยภาพป้องกันที่ดี เป็นการจำลองและทำนายพฤติกรรมความเสียหาย ด้วยการจำลองอิงตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 จะใช้กระสุนขนาด 7.62x51 มิลลิเมตร ความเร็วกระสุน 847 ± 9.1 เมตรต่อวินาที ดังรูปที่ 1.2 ผลที่ได้รับจากการจำลองและวิเคราะห์ คือทำให้สามารถลดระยะเวลาในการทดสอบจริง ลดงบประมาณในการวิจัยและสามารถนำผลจากการจำลองมาเปรียบเทียบการทดสอบจริงบางกรณี เพื่อวิเคราะห์ผลแตกต่างระหว่างการทดสอบจริงกับการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ทั้งนี้การพิสูจน์ความถูกต้องจะใช้รูปแบบการ Pre-Processing และ Solve- Processing เพื่อต่อยอดผลการออกแบบและวิเคราะห์ของงานวิจัยที่ผ่านมา โดยคาดหวังผลลัพธ์ที่ได้รับคือ องค์ความรู้ที่จะสามารถนำไปใช้ในการออกแบบและสร้างแผ่นเกราะกันกระสุนที่สามารถใช้งานได้ต่อไป



รูปที่ 1.2 กระสุนขนาด 9 มิลลิเมตร และ AP 7.62x51 มิลลิเมตร

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อวิเคราะห์ความเค้นและการเสียรูปของแผ่นเกราะโลหะแบบเรียงซ้อนกันโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
- 1.2.2 เพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุของแผ่นเกราะโลหะแบบเรียงซ้อนกันด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

- 1.3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์เบื้องต้นคือแผ่นเกราะโลหะ
- 1.3.2 วิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Ansys Explicit/Dynamic
- 1.3.3 การจัดวางแผ่นเป็นแบบซ้อนแผ่นอย่างน้อย 2 แผ่น
- 1.3.4 พารามิเตอร์ที่สำคัญคือ ความหนาแผ่นโลหะ ระยะห่างแผ่นโลหะแต่ละแผ่น จำนวนแผ่นโลหะที่วางซ้อนกัน ชนิดของแผ่นโลหะที่เลือกใช้
- 1.3.5 โมเดลสำหรับกระสุนปืนทำจาก Tungsten Carbide ขนาด 7.62x51 มิลลิเมตร
- 1.3.6 การทดสอบและจำลองเป็นไปตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.4.1 ได้องค์ความรู้จากการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลองยิงตามมาตรฐาน NIJ
- 1.4.2 ได้ต้นแบบไฟไนต์เอลิเมนต์โมเดลแผ่นเกราะโลหะกันกระสุนสำหรับผลิตและการนำไปใช้ต่อยอดเพื่อการวิเคราะห์ในกรณีอื่นๆ ต่อไป
- 1.4.3 ได้ผลงานตีพิมพ์ในวารสารลงในวารสาร หรืองานสัมมนาทางวิชาการ

1.5 สถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

- 1.5.1 สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทรศัพท์/โทรสาร: 0 2836 3000 ต่อ 4138 โทรศัพท์มือถือ: -
- 1.5.2 โรงงานวัตถุระเบิดทหาร กรมการอุตสาหกรรมทหาร ศูนย์การอุตสาหกรรมป้องกันประเทศและพลังงานทหาร
ตำบลยานมัทรี อำเภอยุหะคีรี 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 ในการแก้ปัญหาดังกล่าว โครงสร้างหรือชิ้นงานจะถูกแบ่งออกเป็นชิ้นส่วนเล็ก ๆ (Element) ในจำนวนที่จำกัด (Finite) และผลเฉลยที่ได้จะเป็นคำตอบที่จุดต่อระหว่างเอลิเมนต์ (โหนด: Node) โดยที่แต่ละเอลิเมนต์จะมีผลเฉลยที่สามารถหาได้ง่าย และเมื่อนำมารวมกันจึงสามารถหาค่าผลเฉลยของทั้งโครงสร้างได้โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะสามารถให้ผลเฉลยของค่าการเสียรูปและแรงที่กระทำ ณ จุดหรือโหนด และค่าความเค้นและความเครียดที่แต่ละเอลิเมนต์ได้ ความเครียดกับการเสียรูปและความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด เป็นสิ่งจำเป็นในการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ตัวอย่างปัญหาใน 1 มิติ ความสัมพันธ์ระหว่างการเสียรูปกับความเครียดเป็นดังนี้

$$\varepsilon_x = \frac{du}{dx} \quad (2.1)$$

ซึ่งเป็นสมการสำหรับปัญหาที่มีการเสียรูปน้อย (Small Displacement) และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดมีค่าเท่ากับ

$$\sigma_x = E\varepsilon_x \quad (2.2)$$

โดยที่ σ_x คือค่าความเค้นในแนวแกน x และ E คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ

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

เมื่อ $[D]$ คือ เมทริกซ์คุณสมบัติของวัสดุ

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

$$F=kx \quad (2.4)$$

เมื่อนำเอาหลักการของสปริงตามสมการที่ (2.4) มาประยุกต์ใช้กับหลักการไฟไนต์เอลิเมนต์ จะสามารถเขียนสมการที่ (2.5) ใหม่ในลักษณะของเมทริกซ์ได้เป็น

$$f'=k'd' \quad (2.5)$$

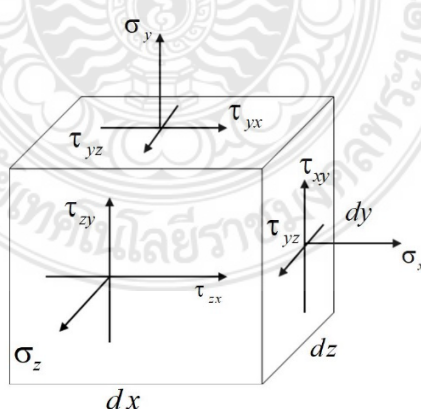
โดยที่ f' คือ เมทริกซ์ของแรงที่กระทำกับสปริง

k' คือ สทิพเนสเมทริกซ์ของสปริง

d' คือ เมทริกซ์ของระยะยืด/หดตัวของสปริง

ในการวิเคราะห์เอลิเมนต์ในระบบ 3 มิติ นั้น เอลิเมนต์ประเภทนี้จะให้คำตอบมากกว่า เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ หรือแบบแกนสมมาตร เอลิเมนต์แบบทรงสี่หน้า (Tetrahedral) เป็นเอลิเมนต์เบื้องต้นสำหรับ 3 มิติ ในส่วนนี้จะยกตัวอย่างจากหนังสือไฟไนต์เอลิเมนต์เบื้องต้น โดยผู้แต่ง 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], [2]

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} \quad \tau_{zx} = \tau_{xz} \quad (2.6)$$

ดังนั้นจะมีความเค้นเฉือนแค่ 3 ตัวเท่ากันที่ต้องพิจารณารวมกับความเค้นตั้งฉากจะได้เป็น

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

และความเค้นที่เกิดขึ้นในเอลิเมนต์จะมีดังนี้

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

โดยที่

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

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

และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเท่ากับ

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (2.10)$$

โดยที่

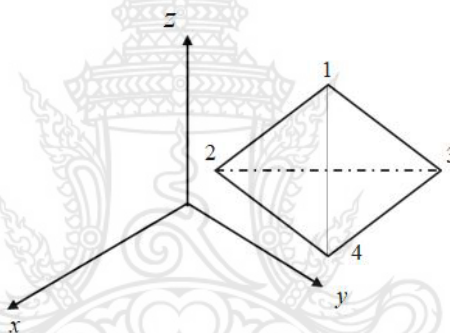
$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ & & & & & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

การหาสทิงเฟนสมเมทริกซ์สำหรับเอลิเมนต์แบบทรงสี่หน้า

ขั้นตอนที่ 1 เลือกประเภทของเอลิเมนต์

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

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



รูปที่ 2.2 เอลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า [1]-[2]

ขั้นตอนที่ 2 เลือกฟังก์ชันของการเสียรูป

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

$$\begin{aligned} u(x,y,z) &= a_1 + a_2x + a_3y + a_4z \\ v(x,y,z) &= a_5 + a_6x + a_7y + a_8z \\ w(x,y,z) &= a_9 + a_{10}x + a_{11}y + a_{12}z \end{aligned} \quad (2.13)$$

เป็นฟังก์ชันของการเสียรูปของ u , v และ w โดยที่ในการวิเคราะห์นั้นสามารถทำได้เหมือนกับกรณีของเอลิเมนต์สามเหลี่ยมจะได้ว่า

$$u(x,y,z) = \frac{1}{6v} \left\{ (\alpha_1 + \beta_1x + \gamma_1y + \delta_1z)u_1 + (\alpha_2 + \beta_2x + \gamma_2y + \delta_2z)u_2 \right. \\ \left. + (\alpha_3 + \beta_3x + \gamma_3y + \delta_3z)u_3 + (\alpha_4 + \beta_4x + \gamma_4y + \delta_4z)u_4 \right\} \quad (2.14)$$

โดยที่

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

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

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

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

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

สามารถที่จะเขียนรูปของเมทริกซ์สำหรับฟังก์ชันการเสียรูปเท่ากับ

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

โดยที่

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

ขั้นตอนที่ 3 ระบุความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการเสียรูป และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดกับการเสียรูป ได้ว่า

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

หรือ

$$\{\varepsilon\} = [B]\{d\} \quad (2.23)$$

โดยที่

$$[B] = [\underline{B}_1 \quad \underline{B}_2 \quad \underline{B}_3 \quad \underline{B}_4] \quad (2.24)$$

และ

$$B_1 = \begin{bmatrix} N_{1,x} & 0 & 0 \\ 0 & N_{1,y} & 0 \\ 0 & 0 & N_{1,z} \\ N_{1,y} & N_{1,x} & 0 \\ 0 & N_{1,z} & N_{1,y} \\ N_{1,z} & 0 & N_{1,x} \end{bmatrix} = \frac{1}{6V} \begin{bmatrix} \beta_1 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_1 & 0 \\ 0 & 0 & \delta_1 \\ \gamma_1 & \beta_1 & 0 \\ 0 & \delta_1 & \gamma_1 \\ \delta_1 & 0 & \beta_1 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

และสำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

$$\{\sigma\} = [D]\{\epsilon\} \quad (2.26)$$

และ

$$\{\sigma\} = [D][B]\{d\} \quad (2.27)$$

ขั้นตอนที่ 4 หาสมการสทริกซ์และสมการสทิฟเนส
เมื่อพิจารณาในรูปของสมการ $F = Kd$ จะได้ว่า

$$[K] = \iiint_V [B]^T [D][B] dV \quad (2.28)$$

ในกรณีที่เป็นเอลิเมนต์แบบทรงสี่หน้า (Tetrahedron) จะมีค่าคงที่ ดังนี้

$$[K] = V [B]^T [D][B] \quad (2.29)$$

ผลจากน้ำหนัก (Body Force)

$$\{f_b\} = \iiint [N]^T \{X\} dV \quad (2.30)$$

โดยที่

$$\{X\} = \begin{Bmatrix} X_b \\ Y_b \\ Z_b \end{Bmatrix} \quad (2.31)$$

ผลจากแรงที่ผิว (Surface Force) จาก

$$\{f_s\} = \iint_s [N]^T \{T\} dS \quad (2.32)$$

โดยที่

$$\{T\} = \begin{Bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{Bmatrix} \quad (2.33)$$

2.1.2 Material Model

ในการวิเคราะห์แผ่นเกราะกันกระสุนซึ่งแผ่นเกราะนั้นอาจจะเป็นแผ่นเดี่ยวหรือแผ่นซ้อนกันก็ได้ งานวิจัยได้เลือกใช้วัสดุที่สามารถทำลายหัวกระสุนเมื่อกระแทกเข้ากับแผ่นเกราะแผ่นที่ 1 แล้ว ทำให้เศษโลหะที่เกิดจากการแตกทะลุผ่านไปยังแผ่นที่ 2 วิเคราะห์ด้วยวัสดุ AL-5083 H116 ที่ความหนา 3 แบบ คือ 6, 10 และ 60 มิลลิเมตร ขนาด 300x300 มิลลิเมตร ยิงที่มุม 0 องศา ได้ใช้แบบจำลองความเสียหายของ Johnson-Cook Model (JC) จึงเป็นรูปแบบสมการที่อธิบายตามสมการที่ (2.34)

$$\sigma = \left[A + B(\epsilon_p)^n \right] \left[1 + c \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left\{ \frac{(T - T_0)}{(T_m - T_0)} \right\}^m \right] \quad (2.34)$$

เมื่อ A คือ Initial Yield Stress, B คือ Hardening Constants, ϵ_p คือ Equivalent Plastic Strain, n คือ Hardening Exponent, $\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0$ เป็น Reference Strain-rate และ $\dot{\epsilon}$ คือ Plastic Strain Rate, C คือ Strain Rate Constant, m คือ Temperature Softening Exponent, $(T - T_0) / (T_m - T_0)$ คือ อุณหภูมิสมบูรณ์ ซึ่ง T, T_0 และ T_m คือ Temperature, Room temperature และ Melting Temperature

กระสุนในการจำลองมีขนาด 7.62 mm ซึ่งได้ถอดปลอกออกให้เหลือแต่แท่งกระสุน Tungsten Carbide (WC) เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดการกระแทกเข้ากับแผ่นเกราะแล้วเกิดการแตกเสียหายซึ่งค่าคุณสมบัติทางกลและพารามิเตอร์ในการจำลองการเสียหายของ Johnson-Holmquist Failure Model (JH-2) โดยสมการความเสียหายดังนี้

$$Y = \left[A(p^* + T^*)^n (1 - D) + B(p^*)^m D \right] \left[1 + c \ln(\epsilon_p^*) \right] \quad (2.35)$$

$$p^* = \frac{p}{p_{HEL}}, \quad T^* = \frac{T}{p_{HEL}} \quad (2.36)$$

เมื่อ Y คือ Yield Stress, p_{HEL} คือความดันที่ Hugoniot Elastic Limit (HEL), T คือ Maximum Hydrodynamic Tensile Strength และ A, B, C, n, m คือพารามิเตอร์ของวัสดุ, ค่า HEL คือ Yield limit ที่ Uniaxial Strain เมื่อวัสดุรับภาระโหดในทิศทางเดียว ดังนั้นจะมี 2 สมการ แยกกันเพื่อค่า Yield Stress เมื่อ D = 1 หรือ D < 1 ใน Johnson-Holmquist ค่า Yield Stress เป็นฟังก์ชันความเสียหายต่อเนื้อของ D ดังนั้นรูปแบบวัสดุที่มีคุณสมบัตินี้เรียกว่าแบบจำลองการแตกหักแบบ “Active” สำหรับกรณีพิเศษ (D = 0) ไม่มีความเสียหาย (D = 1) มีความเสียหาย Yield Stress จะลดลง

$$Y = A(p^* + T^*)^n [1 + c \ln(\dot{\varepsilon}_p^*)] \quad (\text{ไม่มีความเสียหาย Intact, } D=0) \quad (2.37)$$

$$Y = B(p^*)^m [1 + c \ln(\dot{\varepsilon}_p^*)] \quad (\text{มีความเสียหาย Fragmented, } D=1) \quad (2.38)$$

AL-7075 T6 Plate Model ซึ่งใช้ในการรั้งเศษกระสุนที่กระแทกเข้ากับแผ่นที่ 1 แล้วทะลุออกมา แผ่นมีขนาด 300 x 300 มิลลิเมตร ให้ความหนาเริ่มต้นที่ 6 มิลลิเมตร เนื่องจาก AL-7075 T6 และหลังจากนั้นก็จะเป็น 10 และ 60 มิลลิเมตร เป็นต้น ที่มีมุม 0 องศา ในการแตกของกระสุนซึ่งให้ทฤษฎีความเสียหายของ Steinberg-Guinan Strength Model เป็นแบบกึ่งทดลองที่พัฒนาโดยสำหรับสถานการณ์ที่มีอัตราความเครียดสูงและขยายไปยังอัตราความเครียดต่ำ มีสมการดังนี้

$$G = G_0 \left\{ 1 + \left\{ \frac{G'_p}{G_0} \right\} \frac{p}{\eta^{1/3}} + \left(\frac{G'_t}{G_0} \right) (T - 300) \right\} \quad (2.39)$$

$$Y = Y_0 \left\{ 1 + \left(\frac{Y'_p}{Y_0} \right) \frac{p}{\eta^{1/3}} + \left(\frac{Y'_t}{Y_0} \right) (T - 300) \right\} (1 + \beta \varepsilon)^n \quad (2.40)$$

$$\text{ที่ } Y_0 = [1 + \beta \varepsilon]^n \leq Y_{\max}$$

เมื่อ ε = Effective Plastic Strain, T = Temperature (Degree K), η = Compression และพารามิเตอร์ที่พร้อมกับตัวห้อย p และ T เป็นอนุพันธ์ของพารามิเตอร์นั้นเกี่ยวกับความดันและอุณหภูมิที่สถานะอ้างอิง ($T = 300$ K, $p = 0$, $\varepsilon = 0$) ตัวห้อยศูนย์ยังอ้างถึงค่าของ G และ Y ที่สถานะนั้น หากอุณหภูมิของวัสดุสูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวที่ระบุไว้โมดูลัสแรงเฉือนและความแข็งแรงของผลผลิตจะถูกตั้งค่าเป็นศูนย์ ค่าคุณสมบัติและพารามิเตอร์ของ AL-7075 T6 มีในโปรแกรมจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS

2.1.3 ANSYS Software [3], [4]

โปรแกรม ANSYS เป็นโปรแกรมสากลที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องตลอด 30 ปีที่ผ่านมาสามารถใช้วิเคราะห์พฤติกรรมทางฟิสิกส์ที่หลากหลาย เรียกโปรแกรมกลุ่มนี้ว่า โปรแกรมมัลติฟิสิกส์ (Multiphysics Program) และค่อนข้างนิยมในหมู่ผู้เชี่ยวชาญในสาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ (CAE, Computer – Aided Engineering) อาศัยทั้งหลักการคำนวณวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) และ ไฟไนต์โวลุ่ม (Finite Volume Method, FVM) โปรแกรม ANSYS สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น การแก้ปัญหาในระบบสามมิติของกลศาสตร์

ของแข็งสามารถประยุกต์ใช้กับโครงสร้างที่มีลักษณะพื้นฐาน (Stationary Geometrically) และระบบที่มีโครงสร้างซับซ้อน (Non-stationary Geometrically) ได้ ปรากฏการณ์ของก๊าซและของไหล กลศาสตร์ของไหล การแผ่รังสีความร้อนและการถ่ายเทความร้อน ปรากฏการณ์ด้านไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ปรากฏการณ์ของคลื่นเสียงเป็นปรากฏการณ์ที่สามารถจำลองได้บนโปรแกรมเพื่อใช้ในการจำลองและการวิเคราะห์กระบวนการในอุตสาหกรรมเพื่อหลีกเลี่ยงค่าใช้จ่ายที่สูงและลดระยะเวลาในการออกแบบ

2.1.4 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทาง FEM มีพื้นฐาน 3 ขั้นตอน

ขั้นตอนที่ 1 (Pre-Processing)

เตรียมข้อมูลเบื้องต้นของแบบจำลองก่อนการวิเคราะห์ เป็นการกำหนดและการสร้างแบบจำลองที่จะทำการวิเคราะห์ โดยแบบจำลองที่กำหนดจะประกอบด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และกำหนดสถานะขอบเขต จากนั้นจึงเริ่มดำเนินการสร้างแบบจำลองบนโปรแกรม CAD ชนิดต่าง ๆ ซึ่งอาจแบ่งขั้นตอนย่อยๆ ได้เป็นดังนี้ การป้อนข้อมูลตัวแปรของรูปทรงเรขาคณิตแบบจำลอง เช่น ตำแหน่งพิกัดของโหนด เส้น พื้นผิว และปริมาตรของแข็ง กำหนดชนิดของเอลิเมนต์ ความถี่หรือการกำหนดข้อมูลที่เกี่ยวข้องสมบัติของวัสดุ เช่น ค่าโมดูลัสของยัง ความหนาแน่นวัสดุสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเป็นต้น สถานะที่กระทำต่อวัสดุ เช่น ตำแหน่ง ขนาดและทิศทางของสิ่งที่มากระทำต่อวัสดุ ซึ่งอาจจะเป็นแรงหรือความดัน

ขั้นตอนที่ 2 (Solve-Processing)

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

ขั้นตอนที่ 3 (Post-Processing)

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

2.2 มาตรฐานแผ่นเกราะกันกระสุน [5]

อ้างอิงจากมาตรฐานยุทธโศปกรณ์กระทรวงกลาโหมว่าด้วยแผ่นเกราะกันกระสุน จัดทำโดย คณะอนุกรรมการกำหนดมาตรฐานยุทธโศปกรณ์กระทรวงกลาโหม ว่าด้วยเกราะกันกระสุน ซึ่งได้แปล วิเคราะห์ สังเคราะห์ ประยุกต์ และเรียบเรียงให้เหมาะสมกับประเทศไทยโดยอิงมาตรฐาน US.NIJ Standard 0108.01 ประยุกต์กับ Threat Level ของ NIJ 0101.04 ตามความจำเป็นและเหมาะสม เพื่อมุ่งส่งเสริมและสนับสนุนกิจการอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของไทยเป็นหลัก ดังนี้

2.2.1 ขอบข่าย มาตรฐานยุทธโศปกรณ์นี้กำหนด การจำแนกระดับของแผ่นเกราะ นิยาม คุณลักษณะที่ต้องการ เครื่องหมายและฉลาก การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน และการทดสอบ ซึ่ง ครอบคลุมถึงแผ่นเกราะที่ใช้ในการป้องกันหรือลดอันตรายจากการยิงด้วยกระสุน เช่น โล่กันกระสุน ป้อมยามหุ้มเกราะ ยานหุ้มเกราะ และห้องนิรภัย เป็นต้นแต่ไม่รวมถึงเสื้อเกราะและหมวกเกราะ

2.2.2 การจำแนกระดับของแผ่นเกราะ จำแนกตามระดับความสามารถในการกันกระสุนปืน ได้ถึง 6 ระดับ (ตามลำดับของระดับภัยคุกคามของกระสุนตามตารางที่ 2.1 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 ซึ่งเป็น ระดับที่สามารถกันกระสุนที่เป็นภัยคุกคามในระดับ3A (Type IIIA: High Velocity 9 mm.;.44 Magnum) และ ระดับ 1, 2A กับ 2 ได้

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

ตารางที่ 2.1 ตารางภัยคุกคามและการยิงทดสอบความสามารถกันกระสุนของเกราะ [5]

ระดับภัย คุกคาม	ขนาด/ชนิดกระสุน ทดสอบ	น้ำหนักของลูก กระสุนเกรน (กรัม)	ความเร็วกระสุน ± 30 ฟุต/วินาที (± 9.1 เมตร/วินาที)	จำนวนนัด ที่ยิงผ่าน เกณฑ์	ปืนทดสอบ
1	.22caliber LRLRN	40 เกรน	1,080 ฟุต/วินาที	5	ปืนพก หรือ ลำ กล้องทดสอบ
		(2.6 กรัม)	(329เมตร/วินาที)		
	.380 ACP FMJ RN หรือ	95 เกรน	1,055ฟุต/วินาที	5	ปืนพก หรือ ลำ กล้องทดสอบ
		(6.2 กรัม)	(322เมตร/วินาที)		

ระดับภัยคุกคาม	ขนาด/ชนิดกระสุนทดสอบ	น้ำหนักของลูกกระสุนเกรน (กรัม)	ความเร็วกระสุน ± 30 ฟุต/วินาที (± 9.1 เมตร/วินาที)	จำนวนนัดที่ยิงผ่านเกณฑ์	ปืนทดสอบ	
		158 เกรน	880 ฟุต/วินาที			
	.38 Special LRN	(10.2 กรัม)	(268 เมตร/วินาที)			
2A	9 mm.FMJ RN	124 เกรน	1120 ฟุต/วินาที	5	ปืนพก หรือ ลำกล้องทดสอบ	
		(8.0 กรัม)	(341 เมตร/วินาที)			
	หรือ	.40 S&W FMJ	180 เกรน	1055 ฟุต/วินาที	5	ปืนพก หรือ ลำกล้องทดสอบ
		230 เกรน	840 ฟุต/วินาที			
	.45 FMJ RN	(15.0 กรัม)	(256 เมตร/วินาที)			
2	9 mm.FMJ RN	124 เกรน	1205 ฟุต/วินาที	5	ปืนพก หรือ ลำกล้องทดสอบ	
		(8.0 กรัม)	(367 เมตร/วินาที)			
	.357 Mag JSP	158 เกรน	1430 ฟุต/วินาที	5	ปืนพก หรือ ลำกล้องทดสอบ	
		(10.2 กรัม)	(436 เมตร/วินาที)			
3A	9 mm.FMJ RN	124 เกรน	1430 ฟุต/วินาที	5	ปืนพก หรือ ลำกล้องทดสอบ	
		(8.0 กรัม)	(436 เมตร/วินาที)			
	.44 Mag SJHP	240 เกรน	1430 ฟุต/วินาที	5	ปืนกลมือ หรือ ลำกล้องทดสอบ	
		(15.6 กรัม)	(436 เมตร/วินาที)			
3	7.62 mm NATO FMJ	148 เกรน	2780 ฟุต/วินาที	5	ปืนเล็กยาว หรือ ลำกล้องทดสอบ	
		(9.6 กรัม)	(847 เมตร/วินาที)			
4	.30 caliber M2 AP	166 เกรน	2880 ฟุต/วินาที	1	ปืนเล็กยาว หรือ ลำกล้องทดสอบ	
		(10.8 กรัม)	(878 เมตร/วินาที)			

2.2.3 บทนิยาม [6]

2.2.3.1 แผ่นเกราะกันกระสุนหรือแผ่นป้องกันกระสุนหรือ"แผ่นเกราะหมายถึงแผ่นวัสดุทุกชนิดที่มีความสามารถในการป้องกันหรือลดอันตรายจากการยิงด้วยกระสุนปืนที่ผู้ผลิตเจตนาจัดทำขึ้นเพื่อการนี้"ไม่ว่าจะเป็นเกราะ (หรือวัสดุป้องกันกระสุน) ที่ทำด้วยเหล็ก โลหะใดๆ เซรามิก กระฉก วัสดุสังเคราะห์ ฯลฯ ซึ่งมาตรฐานฉบับนี้จะเรียกลำว่า "เกราะ"

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

2.2.3.3 การทะลุผ่าน หมายถึง การที่กระสุนเจาะทะลุผ่านเกราะ แล้วปรากฏว่ามีเศษชิ้นส่วนของกระสุนหรือเศษชิ้นส่วนของเกราะเจาะทะลุผ่านแผ่นพยานด้วย ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้โดยการมองเห็นแสงที่รูดผ่านรอยทะลุบนแผ่นพยานนั้น เมื่อนำหลอดไฟฟ้าขนาด 60 วัตต์ ไปส่อง

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 2.1 ซึ่งจักต้องเกิดขึ้นจากการยิงด้วยความเร็วกระสุนตามที่กำหนดหรือสูงกว่าที่กำหนด แล้วไม่เกิดการทะลุผ่าน โดยที่ไม่ต้องคำนึงถึงระยะห่างของรอยยิง ซึ่งเป็นไปตามตรรกะที่ว่า “ในสถานการณ์ปัจจัยคุกคามตามปกติหรือปัจจัยคุกคามที่สูงกว่าปกติ เกราะนี้สามารถเผชิญได้”

2.2.3.7 นัดที่ยิงไม่ผ่านเกณฑ์ หมายถึง ผลการยิงในกระสุนนัดที่ถือว่าไม่ผ่านเกณฑ์การยอมรับสำหรับการยิงทดสอบตามตารางที่ 2.1 ซึ่งจักต้องเกิดขึ้นจากกรณีที่ยิงด้วยความเร็วกระสุนตามที่กำหนดหรือต่ำกว่าที่กำหนดและมีระยะห่างของรอยยิง (ทั้งห่างจากกันและห่างจากขอบเกราะ) ได้ระยะตามที่กำหนดแล้วเกิดการทะลุผ่าน ซึ่งเป็นไปตามตรรกะที่ว่า ในสถานการณ์ปัจจัยคุกคามตามปกติหรือปัจจัยคุกคามที่ต่ำกว่าปกติเกราะนี้เผชิญไม่ได้ ทั้งนี้หากปรากฏว่ามีนัดที่ยิงไม่ผ่านเกณฑ์ตั้งแต่ 1 นัดขึ้นไปให้ยุติการยิงทดสอบในขั้นต่อไปได้และสรุปได้ว่าเกราะนี้ไม่ผ่านการรับรองมาตรฐาน

2.2.3.8 นัดที่ยิงพลาด หมายถึง ผลการยิงในกระสุนนัดที่ถือว่าเป็นการยิงพลาด มิสามารถวินิจฉัยการผ่านหรือไม่ผ่านเกณฑ์การยอมรับสำหรับการยิงทดสอบตามตารางที่ 2.1 ได้ ซึ่งเป็นไปตามตรรกะที่ว่า “ในสถานการณ์ปัจจัยคุกคามที่สูงกว่าปกติ เกราะนี้เผชิญไม่ได้ หรือในสถานการณ์ปัจจัยคุกคามที่ต่ำกว่าปกติ เกราะนี้สามารถเผชิญได้” จำต้องให้ยิงทดสอบแก้มือในนัดนั้นใหม่ ในการยิงแก้มือใหม่นั้นให้ยิงใกล้บริเวณเดิมที่มีระยะห่างของรอยยิงได้ หรืออาจไปเริ่มต้นกระบวนการยิงทดสอบเกราะอันใหม่ก็ได้

2.2.4 คุณลักษณะที่ต้องการ

2.2.4.1 ลักษณะทั่วไป ต้องเป็นแผ่นเกราะสำเร็จรูปพร้อมใช้งาน หรือเป็นผลิตภัณฑ์ที่ทำด้วยเกราะหรือที่หุ้มด้วยเกราะ สำหรับใช้ในการป้องกันหรือลดอันตรายจากการยิงด้วยกระสุนปืน

2.2.4.2 ความเรียบร้อยทั่วไป เกราะจะต้องไม่มีรอยย่น พอง รอยแตก ร้าว ริมขอบต้องไม่ป็นหรือแหลมคม หรือขาดความประณีตในการผลิต

2.2.4.3 ความสามารถในการกันกระสุน เมื่อทำการทดสอบเกราะด้วยวิธีการยิงทดสอบตามตารางที่ 2.1 และข้อ 7 เกราะจะต้องสามารถกันกระสุนได้ตามระดับที่ระบุไว้ที่ฉลาก โดยมีจำนวนนัดที่ยิงผ่านเกณฑ์ได้ครบจำนวนตามกำหนดไว้ในตารางที่ 2.1

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 กรณีที่เป็นกระจกกันกระสุนที่มุดมุดหนึ่งของกระจกทุกแผ่นอย่างน้อยต้องมีเลขอักษรหรือเครื่องหมายแจ้งรายละเอียดต่อไปนี้ให้เห็นได้ง่ายชัดเจนและไม่ลบเลือนง่าย

- (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. ให้ตรวจสอบตัวอย่างเกราะ โดยการตรวจพินิจเมื่อตรวจสอบแล้วทุกตัวอย่างต้องเป็นไปตามเกณฑ์จึงจะถือว่าเกราะรุ่นนี้เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

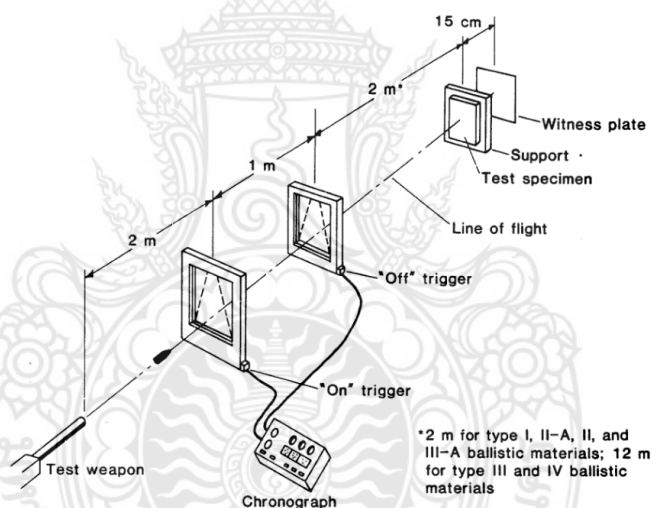
3. ให้นำตัวอย่างเกราะตามข้อกำหนดไปทำการยิงทดสอบตามตารางที่ 2.1 เมื่อทดสอบแล้วทุกตัวอย่างต้องเป็นไปตามเกณฑ์จึงจะถือว่าเกราะรุ่นนี้เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

2.2.6.3 เกณฑ์ตัดสินตัวอย่างเกราะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดทุกข้อจึงจะถือว่าเกราะรุ่นนี้เป็นไปตามมาตรฐานยุทธโศปกรณ์กระทรวงกลาโหมนี้

2.2.7 การทดสอบ [5]

2.2.7.1 การเตรียมการทดสอบ

ให้เตรียมอาวุธ กระสุน เครื่องจับเวลาที่มีความเที่ยงตรง (Precision) 1 ไมโครวินาทีและความแม่นยำ (Accuracy) 2 ไมโครวินาที ฉากจับเวลา (Trigger) ที่เป็นแบบ Photoelectric หรือแบบ Conductive Screen ก็ได้ ทำการยิงเป้ากระตาศ (หรือเป้าอื่น) อย่างน้อย 3 นัด โดยให้ปฏิบัติในครั้งเดียวแล้ว ได้ประโยชน์ 3 อย่าง อย่างแรกได้ความมั่นใจในค่าความเร็วกระสุน อย่างที่ 2 ได้เป็นการอุดล้ากล้องไปในตัวและอย่างที่ได้ปรับความแม่นยำในการยิงด้วยแล้วเตรียมสิ่งยึดตั้งเกราะ (Support Fixture) ที่สามารถปรับตำแหน่งในแนวราบและแนวตั้งได้โดยที่สิ่งยึดตั้งนี้ต้องไม่กีดขวางวิถีกระสุนด้วยจัดให้เกราะอยู่ในแนวตั้งฉากกับวิถีกระสุนเพื่อให้เกิดการยิงที่มุมยิง $0^\circ \pm 5^\circ$ เตรียมแผ่นพยานและกำหนดจุดยิง (Marking) ให้ครอบคลุมพื้นที่ยิง 12×12 นิ้ว (305×305 มม.) ของเกราะที่จะทดสอบครั้งนี้ให้จัดวางอุปกรณ์ต่างๆ ได้แก่ฉากจับเวลา เกราะทดสอบ และแผ่นพยานให้อยู่ในแนวตั้งฉากกับวิถีกระสุนตามรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 Ballistic test setup [5], [6]

2.2.7.2 หลักการทั่วไปในการยิงทดสอบเกราะ

1. ในการยิงทดสอบแต่ละนัด ต้องทำการวินิจฉัยว่าเป็นนัดที่ยิงผ่านเกณฑ์ ยิงไม่ผ่านเกณฑ์หรือเป็นนัดที่ยิงพลาดเสมอ โดยตรวจความเร็วกระสุน ตรวจการทะลุผ่าน วัดระยะห่างของรอยยิงและบันทึกไว้ แล้วพิจารณาปฏิบัติให้สอดคล้องกับผลการยิงนั้นต่อไป (ตามตารางที่ 2.2)

2. สำหรับเกราะกันกระสุนที่ต่ำกว่าระดับ 3 ซึ่งต้องทำการยิงทดสอบด้วยกระสุน 2 ชนิดๆละ 5 นัด เมื่อได้ยิงทดสอบด้วยกระสุนชนิดที่ 1 ครบ 5 นัดเรียบร้อยแล้ว ก่อนที่จะยิงทดสอบด้วยกระสุนชนิดที่ 2 นั้นสมควรที่จะเปลี่ยนเกราะที่จะทดสอบอันใหม่แต่ก็อาจให้ใช้เกราะอันเดิมก็ได้ หากเกราะนั้นมีขนาดใหญ่มากพอที่จะยิงทดสอบให้ครอบคลุมพื้นที่ยิงและได้ระยะห่างของรอยยิงได้ตามที่กำหนด

ตารางที่ 2.2 ตารางสรุปการวินิจฉัยการปฏิบัติต่อผลการยิงทดสอบเกราะ [5]

คำนิยาม	กรณี	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	

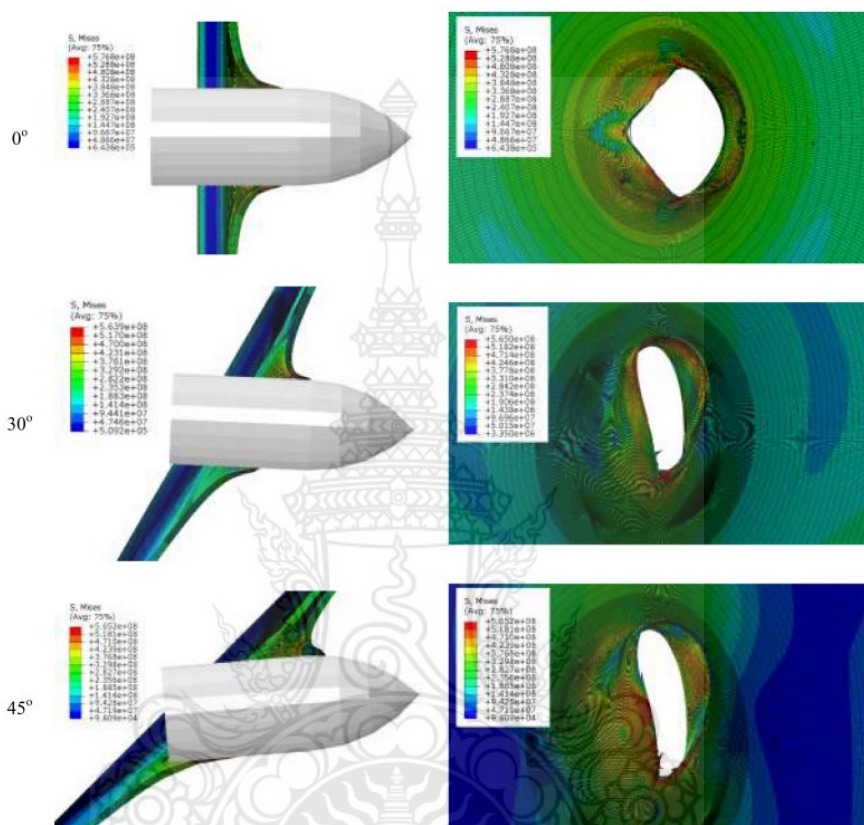
2.2.7.3 การยิงทดสอบเกราะที่เป็นผลิตภัณฑ์ขนาดใหญ่ เช่น ตู้ยามหุ้มเกราะ ยานหุ้มเกราะ และห้องนิรภัย เป็นต้น ให้พิจารณาประยุกต์เกี่ยวกับลักษณะของการเตรียมการทดสอบอุปกรณ์ต่างๆ และวิธีการในการยิงทดสอบให้เหมาะสมกับสถานการณ์ได้ตามความจำเป็นและเหมาะสม

2.2.7.4 การแก้ไขรายละเอียดทางเทคนิคในการทดสอบ ให้คณะกรรมการกำหนดมาตรฐานยุโรปกรณีกระสุนทะลุผ่านกว่าด้วยเกราะกันกระสุน สามารถแก้ไขเปลี่ยนแปลงรายละเอียดทางเทคนิคในการทดสอบในส่วนที่มีสาระสำคัญได้ โดยใช้ดุลพินิจพิจารณาให้เหมาะสมกับความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีและสถานการณ์ที่เปลี่ยนแปลงไป แล้วรีบรายงานให้คณะกรรมการกำหนดมาตรฐานยุโรปกรณีกระสุนทะลุผ่านทราบ

2.3 การทบทวนวรรณกรรม

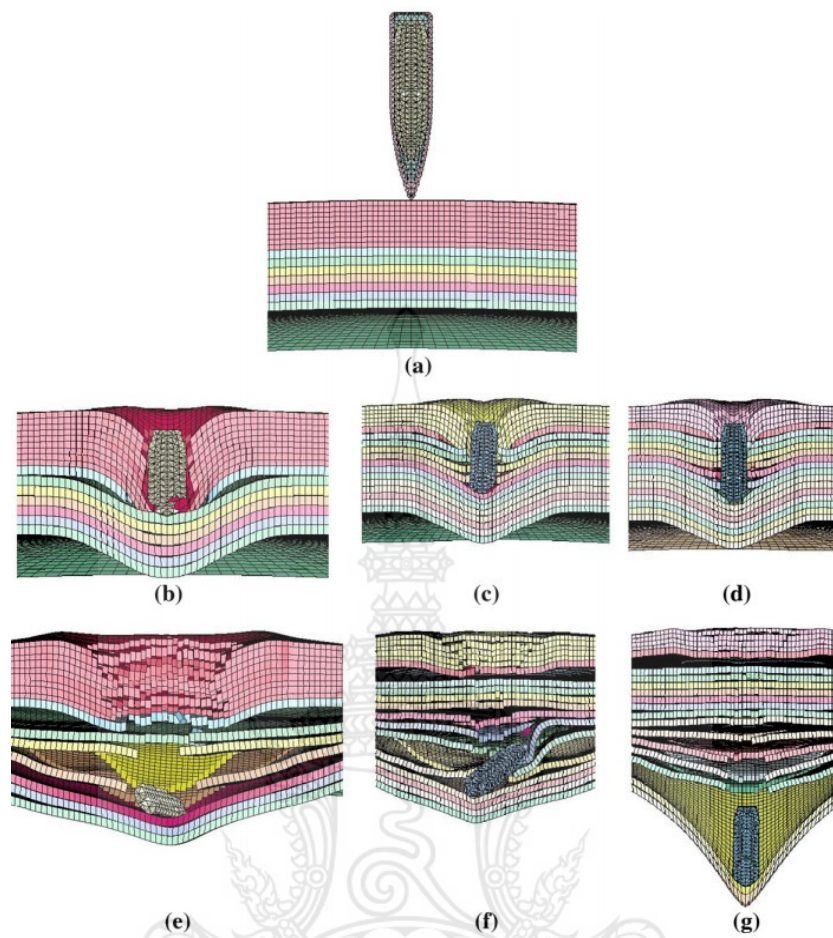
Gupta et al. [7] ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการกระจายพลังงานในการเปลี่ยนรูปพลาสติกของชิ้นงานอลูมิเนียมบางที่อยู่ภายใต้แรงกระแทกแบบโพรเจกไทล์ โดยใช้วิธีการทดสอบและทดลองเชิงตัวเลขผสมผสานกัน เพื่อตรวจสอบกลไกการเปลี่ยนรูปของแผ่นอลูมิเนียมเมื่อกระทบกับกระสุนปืน การทดลองเกี่ยวข้องกับการยิงโพรเจกไทล์เหล็กชุบแข็งที่แผ่นอลูมิเนียมบางที่มีความหนาต่างกัน ความเร็วกระแทกของกระสุนปืนแปรผันตั้งแต่ 100 เมตรต่อวินาที ถึง 500 เมตรต่อวินาที และตรวจสอบการเสียรูปของแผ่นอลูมิเนียมโดยใช้กล้องความเร็วสูง จากนั้นข้อมูลที่รวบรวมจากการทดลองจะถูกนำมาใช้เพื่อตรวจสอบการจำลองเชิงตัวเลขของผลกระทบ ผลการทดลองระดับของการกระจายพบว่าเป็นสัดส่วนกับความหนาของชิ้นงาน โดยชิ้นงานที่หนากว่าจะดูดซับพลังงานมากกว่าชิ้นงานที่บางกว่า การศึกษายังพบว่าอัตราการสลายพลังงานได้รับอิทธิพลจากความเร็วการกระแทกของโพรเจกไทล์ โดยความเร็วที่สูงขึ้นส่งผลให้มีการกระจายพลังงานมากขึ้น และแสดงให้เห็นว่ากระบวนการเปลี่ยนรูปพลาสติกสร้างคลื่นการเสียรูปที่แพร่กระจายผ่านเป้าหมาย คลื่นเหล่านี้ส่งผลให้เกิดรูปแบบการเปลี่ยนรูปประเภทต่างๆ รวมถึงการหัก การตัด และการฉีกขาดเฉพาะที่ การก่อตัวของรูปแบบเหล่านี้ขึ้นอยู่กับความเร็วของแรงกระแทกและคุณสมบัติของวัสดุเป้าหมาย

จากรูปที่ 2.4 เป็นตัวอย่างการวิเคราะห์การเจาะทะลุโดยใช้โปรแกรม Abaqus ยิงกระสุนลงบนแผ่นอลูมิเนียม 1100-H12 ที่มุม 0, 30 และ 45 องศา จะเห็นพฤติกรรมความเสียหายและค่าความเค้นที่รูเจาะแตกต่างกันไป

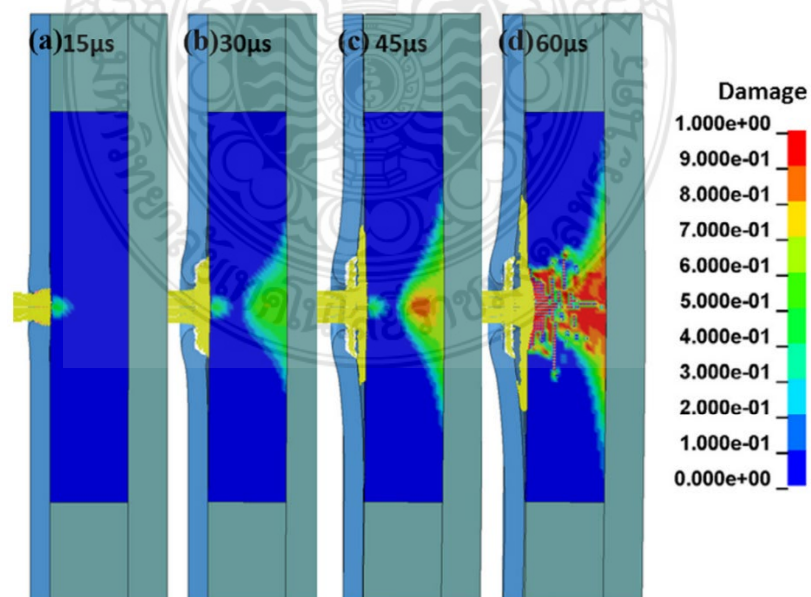


รูปที่ 2.4 ตัวอย่างการวิเคราะห์การเจาะทะลุโดยใช้โปรแกรม ABAQUS [7]

Krishnan et al. [8] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการจำลองเชิงตัวเลขและการวิเคราะห์ทางทฤษฎีเกี่ยวกับประสิทธิภาพของชุดเกราะคอมโพสิตเซรามิกที่ได้รับผลกระทบจากซีปนาวุธ โดยเน้นที่ช่องโหว่ของการเชื่อมต่อแบบกระเบื้องต่อกระเบื้องในโมเสกเซรามิก มีการตรวจสอบการป้องกันแรงกระแทกโดยเป้าหมายเซรามิกคอมโพสิตแบบไฮบริดด้วยผลลัพธ์ การตรวจสอบผ่านการทดสอบเชิงทดลอง และสามารถใช้ในการพัฒนาการออกแบบชุดเกราะที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นเพื่อป้องกันภัยคุกคามจากซีปนาวุธ จากรูปที่ 2.5 เป็นการยึดเกราะระหว่างแผ่นในช่องค้ำประกอบเหนียวที่มีความหนาเป็นศูนย์กลางใน LS-DYNA สถานะของสัญลักษณ์แสดงหัวข้อย่อยในช่วงเวลาต่างๆ (a) โมเดล ณ 0 ms. (b) กำหนดค่า 0 ที่เวลา 0.049 ms. (c) กำหนดค่า 1 ที่เวลา 0.049 ms. (d) กำหนดค่า 2 ที่เวลา 0.049 ms. (e) กำหนดค่า 0 ที่เวลา 0.15 ms. (f) กำหนดค่า 1 ที่เวลา 0.15 ms. (g) กำหนดค่า 2 ที่เวลา 0.15 ms.



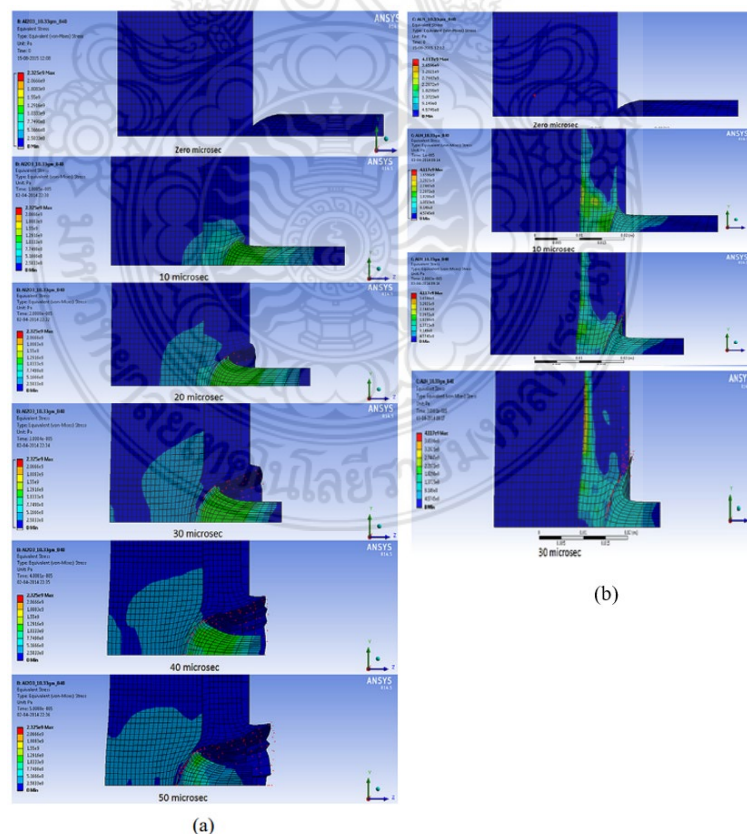
รูปที่ 2.5 การยึดเกาะระหว่างแผ่นใช้องค์ประกอบเหนียวที่มีความหนาเป็นศูนย์ใน LS-DYNA [8]



รูปที่ 2.6 ภาพประกอบการแพร่กระจายความเสียหายในเซรามิก [9]

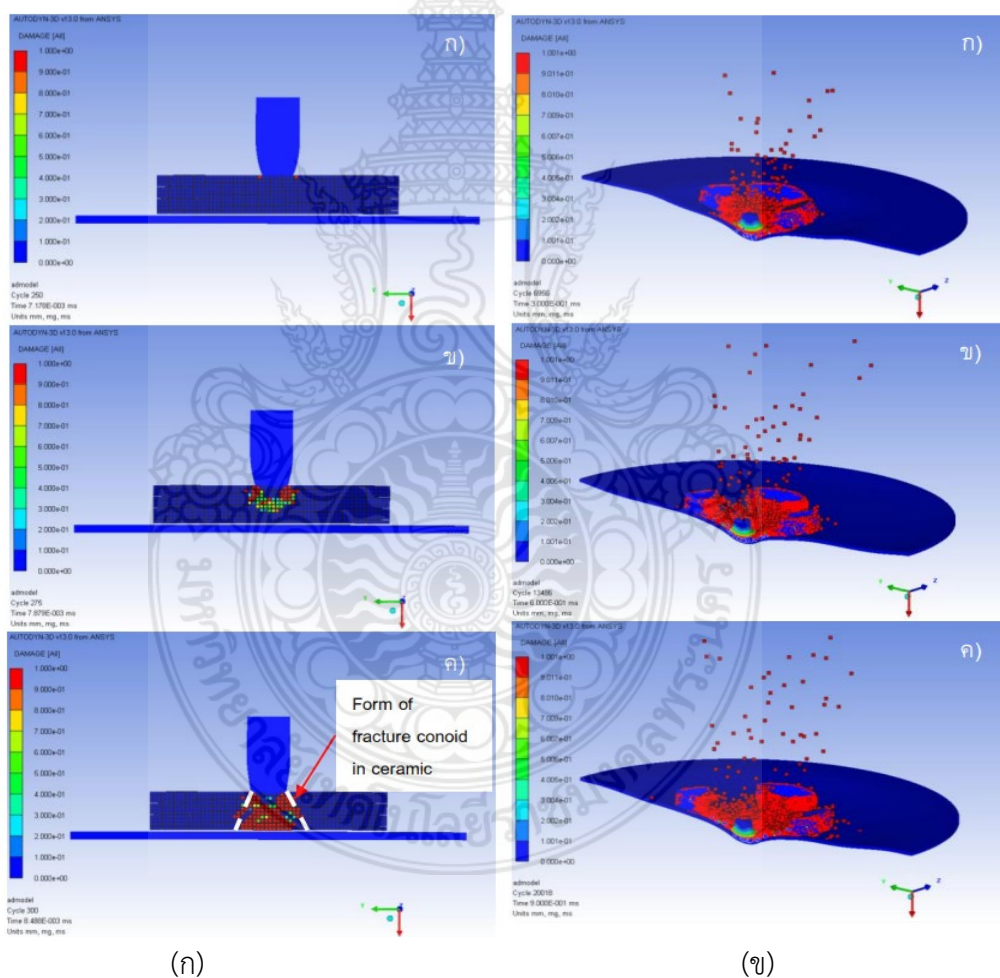
W.L. Goh et al. [9] ได้ศึกษาผลกระทบของความแข็งของเหล็กบนโมดูลเกราะเซรามิกต่อการกระแทกของแท่งเหล็กยาว การศึกษาใช้ทั้งวิธีการทดลองและการจำลองแบบไฮโดรโค้ดเพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของเหล็กและประสิทธิภาพของซีปนาวุธของโมดูลเกราะโดยรวมแล้ว การวิจัยชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มความแข็งของวัสดุรองหลังเหล็กและการปรับความแข็งและความเหนียวของเซรามิกให้เหมาะสมสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของโมดูลเกราะเซรามิกจากการกระแทกของแท่งยาวได้ จากรูปที่ 2.6 ภาพประกอบการแพร่กระจายความเสียหายในเซรามิกโดยแผนภาพระบุรายละเอียดความเสียหายที่ (a) 15 μs , (b) 30 μs , (c) 45 μs และ (d) 60 μs ตามลำดับ

Pawar et al. [10] ได้ศึกษาประสิทธิภาพซีปนาวุธของเซรามิก Al_2O_3 และ AlN ถูกเปรียบเทียบโดยใช้การทดสอบที่หลากหลาย โดยใช้การทดลองแรงกระแทกความเร็วสูงเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซรามิกทั้งสอง และยังทำการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเซรามิกเพื่อกำหนดกลไกที่รับผิดชอบต่อประสิทธิภาพของซีปนาวุธที่สังเกตได้ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเซรามิก AlN มีประสิทธิภาพซีปนาวุธสูงกว่าเซรามิก Al_2O_3 นักวิจัยระบุว่าสิ่งนี้เกิดจากความแข็งแรงและความเหนียวที่สูงขึ้นของเซรามิก AlN ซึ่งทำให้สามารถดูดซับพลังงานได้มากขึ้นก่อนที่จะแตกหัก จากรูปที่ 2.7 การเปรียบเทียบการเจาะทะลุวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม Ansys (a) Al_2O_3 / Al 5083 (b) AlN / Al 5083 กำหนดค่าแผ่นเกราะตามเวลา



รูปที่ 2.7 การเปรียบเทียบการเจาะทะลุวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม ANSYS [10]

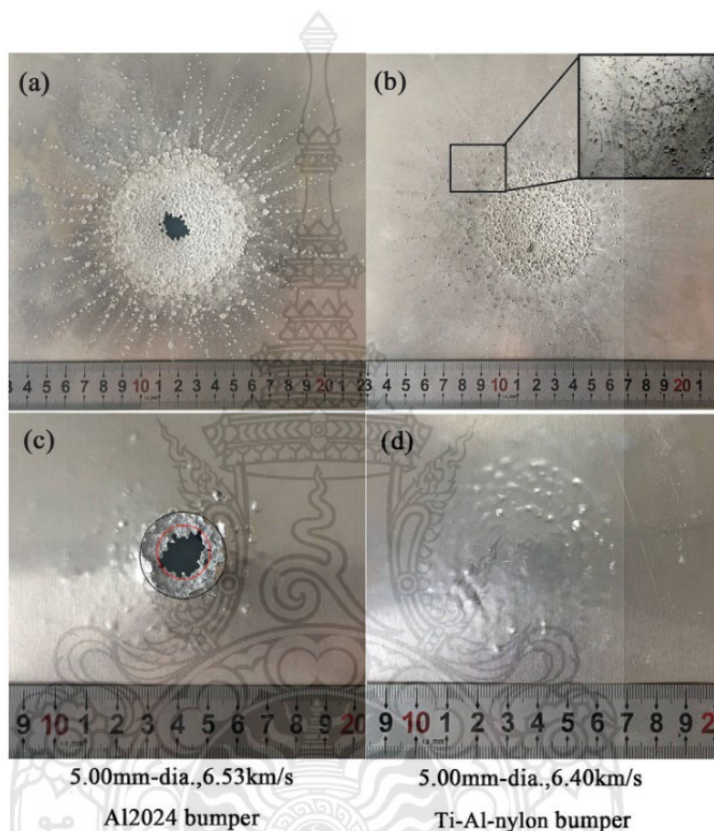
วิชญพงศ์ ตะเคียน และ ชัยณรงค์ ศรีกุลวงศ์ [11] ได้ทำการศึกษากลไกการเจาะทะลุของ กระสุนปืนกับเกราะเซรามิก-แผ่นโลหะโดยใช้เทคนิค จำลองความเสียหายแบบ Smooth Particle Hydrodynamics (SPH) ของการปะทะของกระสุนกับแผ่นเกราะที่ความเร็วสูงทั้งนี้เพื่อศึกษาอิทธิพล ของพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อการออกแบบแผ่นเกราะชนิดนี้ รวมถึงเปรียบเทียบผลการจำลองการปะทะ ที่ได้จากโมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดสอบจริง ผลการยิงทดสอบตามมาตรฐานของกระสุนปืน พกขนาด 0.44 พบว่าเกราะทั้งสองแบบสามารถ ป้องกันกระสุนได้ดี ผลการคำนวณด้วยโปรแกรมไฟ ไนต์เอลิเมนต์ มีความถูกต้องสามารถเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงได้ จากรูปที่ 2.8 เป็นรูปแบบ ความเสียหายของเซรามิกจากการไฟไนต์เอลิเมนต์ (ก) แสดงความเสียหายของเซรามิกที่แผ่นเกราะ หน้า (ข) แสดงความเสียหายของเซรามิกที่แผ่นเกราะหลัง



รูปที่ 2.8 แสดงความเสียหายของเซรามิก ก) แผ่นเกราะหน้า และ ข) แผ่นเกราะหลัง [11]

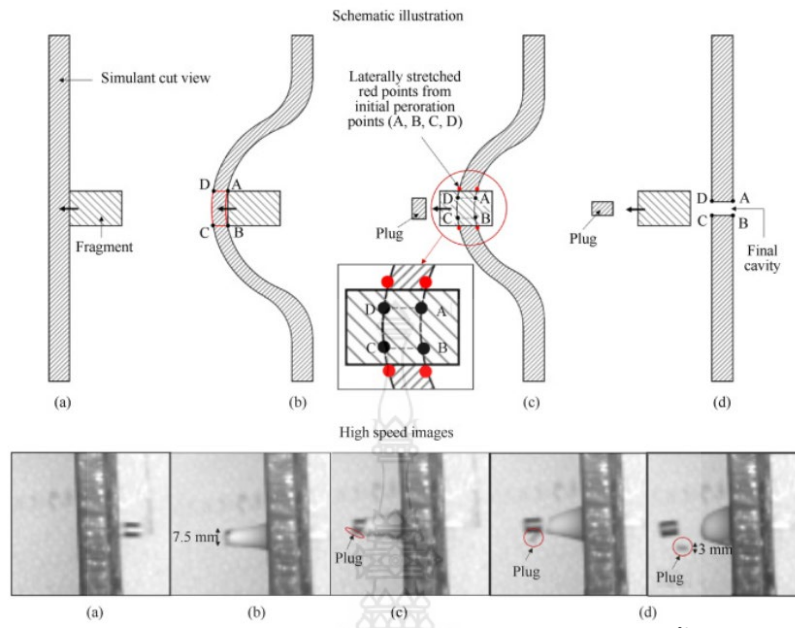
P.L. Zhang et al. [12] ได้ศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพการป้องกันของเกราะป้องกันของ Whipple ที่ได้รับการปรับปรุงโดยวัสดุที่มีระดับอิมพีแดนซ์ Ti-Al-nylon เพื่อหาประสิทธิภาพแรง

กระแทกความเร็วสูงของเกราะป้องกัน และเพื่อตรวจสอบพฤติกรรมของการแพร่กระจายคลื่นยืดหยุ่นในวัสดุโลหะ ผลลัพธ์แสดงว่าวัสดุที่มีระดับอิมพีแดนซ์ Ti-Al-nylon ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการป้องกันของ Whipple Shield การศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการป้องกันดีขึ้นถึง 20.4% เมื่อเทียบกับวัสดุคอมโพสิตอื่นๆ จากรูปที่ 2.9 มุมมองของรูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นกับผนังด้านหลัง (a) พื้นผิวด้านหน้า (b) พื้นผิวด้านหลังสอดคล้องกับ Expt.1 (c) พื้นผิวด้านหน้า (d) พื้นผิวด้านหลังสอดคล้องกับ Expt.2

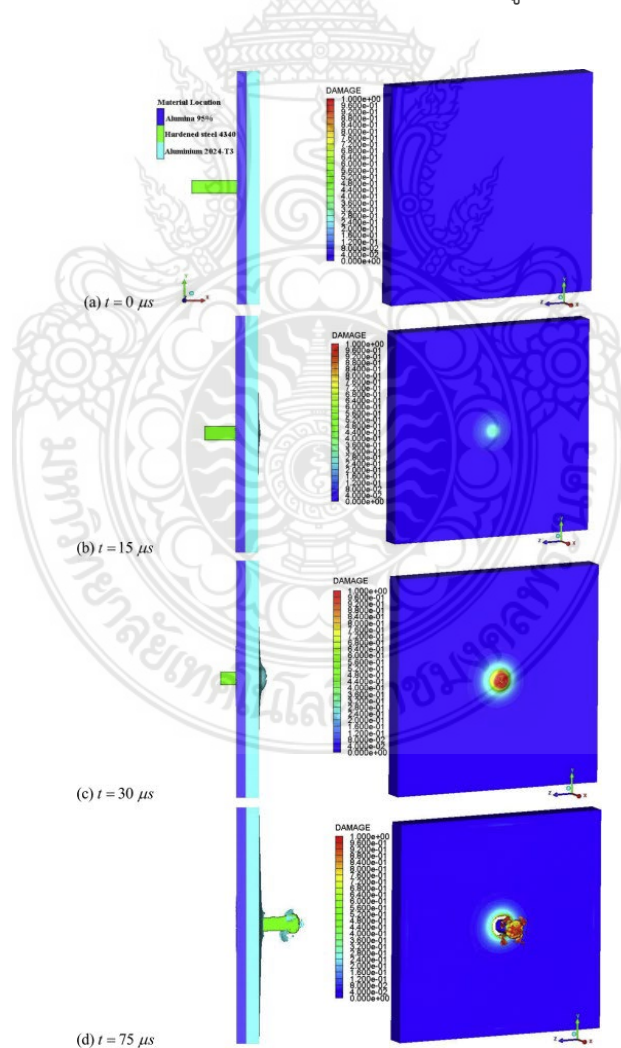


รูปที่ 2.9 มุมมองของรูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นกับผนังด้านหลัง [12]

Punit Kumar Pandey et al. [13] ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการตอบสนองของซีปนาวุธของผิวหนังจำลองต่อชิ้นส่วนจำลองโปรเจกไทล์ โดยใช้กล้องความเร็วสูงและอุปกรณ์ทดสอบซีปนาวุธเพื่อจำลองผลกระทบของชิ้นส่วนจำลองโปรเจกไทล์บนตัวอย่างผิวหนังจำลอง จากนั้นวิเคราะห์ข้อมูลที่รวบรวมเพื่อระบุความเสียหายที่เกิดจากซีปนาวุธ ผลการวิจัยพบว่าการตอบสนองของซีปนาวุธของผิวหนังจำลองนั้นแตกต่างกันไปตามประเภทและความเร็วของชิ้นส่วนจำลองของซีปนาวุธ และยังระบุความเร็ววิกฤตที่ตัวอย่างผิวหนังจำลองเริ่มมีการเสียรูปถาวรและการเจาะทะลุ จากรูป 2.10 ภาพประกอบแผนผังและภาพความเร็วสูงที่เกิดขึ้นจริงแสดงกลไกการทำงานร่วมกันของชิ้นส่วนกับพื้นผิวจำลองระหว่างระยะต่างๆ ของการเจาะ



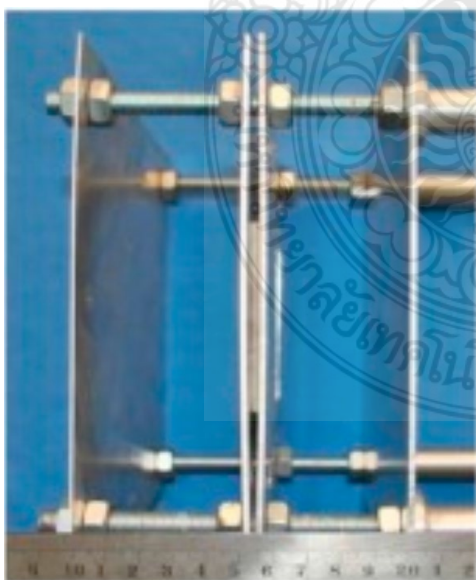
รูปที่ 2.10 ภาพประกอบแผนผังและภาพความเร็วสูงที่เกิดขึ้นจริง [13]



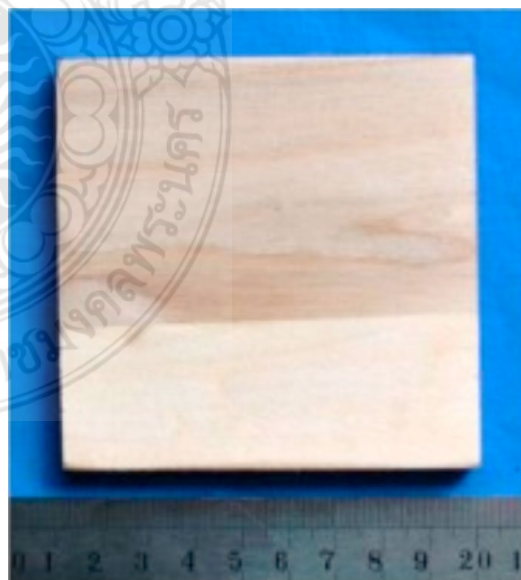
รูปที่ 2.11 ตำแหน่งวัสดุและความเสียหายในการจำลองการทดสอบ [14]

Ahmad Serjoui et al. [14] ได้วิจัยเกี่ยวกับการตรวจสอบเชิงทดลองของแบบจำลอง BLV บนเกราะโลหะเซรามิกสองชั้น เพื่อหาขีดจำกัดความเร็วของซีปนาวุธ (BLV) ของวัสดุเกราะโลหะเซรามิกสองชั้น โดยพิจารณาจากโมเมนตัมและความสมดุลของพลังงานระหว่างการเจาะทะลุแบบจำลองเชิงประจักษ์ได้รับการพัฒนาเพื่อประเมิน BLV และการจำลองเชิงตัวเลขได้ดำเนินการเพื่อกำหนดความเร็วขีดจำกัดซีปนาวุธของชุดเกราะเซรามิก การศึกษาพบว่า BLV ของวัสดุเกราะโลหะเซรามิกสองชั้นสามารถประมาณได้โดยใช้แบบจำลองเชิงประจักษ์ และสามารถใช้งานการจำลองเชิงตัวเลขได้ จากรูปที่ 2.11 ตำแหน่งวัสดุ (มุมมองด้านข้าง) และโปรไฟล์ความเสียหาย (มุมมอง 3 มิติ) ในการจำลองการทดสอบในแต่ละช่วงเวลา

Xue-zhong Wen et al. [15] ได้ทำการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับประสิทธิภาพการป้องกันของโล่ทำจากไม้ เพื่อประเมินประสิทธิภาพของโล่ทำจากไม้เป็นกลไกป้องกันผลกระทบจากวงโคจร ได้ใช้พัลส์การยิงเพื่อจำลองผลกระทบของทรงกลมเหล็กขนาดเล็กบนโล่และวัดความเสียหายที่เกิดกับโล่ นอกจากนี้ ยังได้วิเคราะห์ความหนาและวัสดุของโล่เพื่อดูว่าส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานอย่างไร ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าโล่ไม้มีประสิทธิภาพการป้องกันในระดับสูง และเป็นการป้องกันที่มีประสิทธิภาพต่อการกระแทกของเศษวงโคจร พบว่าความหนาและวัสดุของซิลด์ส่งผลต่อประสิทธิภาพของซิลด์อย่างมาก ด้วยซิลด์ที่หนาและหนาแน่นขึ้นจะช่วยป้องกันได้ดีกว่า และยังตั้งข้อสังเกตว่าโล่ที่ทำจากไม้มีข้อได้เปรียบเหนือวัสดุอื่นๆ เนื่องจากความสามารถในการดูดซับพลังงานที่สูงและต้นทุนที่ต่ำ จากรูปที่ 2.12 โล่ที่ใส่ด้วยแผ่นไม้สนใต้ (a) โล่ทำจากไม้ (b) แผ่นไม้สนใต้



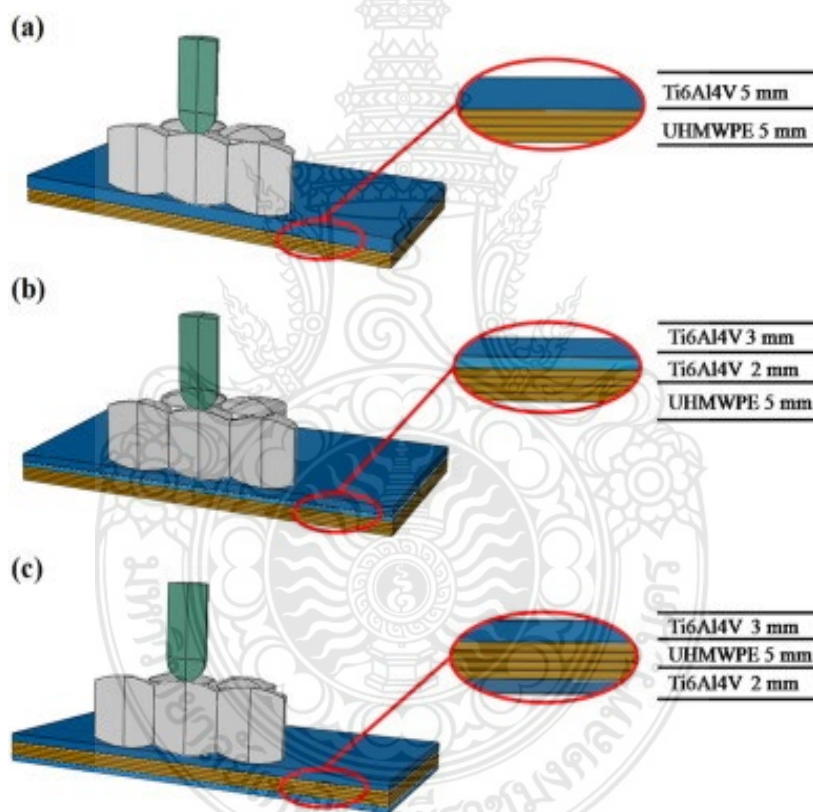
(a)



(b)

รูปที่ 2.12 โล่ที่ใส่ด้วยแผ่นไม้สนใต้ (a) โล่ทำจากไม้ (b) แผ่นไม้สนใต้ [15]

Weilan Liu et al. [16] ได้ศึกษาผลกระทบของการใช้ชั้นคอมโพสิตลามิเนตที่แตกต่างกัน ต่อประสิทธิภาพการกันกระสุนของระบบเกราะ การศึกษาสำรวจผลกระทบของวัสดุ Interlayer ต่างๆ รวมถึง เคพลาร์ แก้ว และอลูมินา และเปรียบเทียบประสิทธิภาพ Ballistic ของวัสดุผสมลามิเนตกับคุณสมบัติโครงสร้างที่แตกต่างกัน การค้นพบนี้ชี้ให้เห็นว่าคอมโพสิตลามิเนตที่มีชั้นเซรามิกหนาขึ้นและชั้นลามิเนตด้านหลังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพขีปนาวุธได้ ระบบเกราะคอมโพสิตน้ำหนักเบา ประกอบด้วยแผงเซรามิก B4C และแผงหลังคอมโพสิตพบว่าประสิทธิภาพการกันกระสุนที่ยอดเยี่ยม มีการใช้การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพขีปนาวุธของตัวอย่างเกราะคอมโพสิต และพบว่าบางตัวอย่างแสดงประสิทธิภาพที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่นๆ จากรูปที่ 2.13 โมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์ของเป้าหมายกระสุนปืนและชุดเกราะในแบบ 3 มิติ



รูปที่ 2.13 โมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์ของเป้าหมายกระสุนปืนและชุดเกราะในแบบ 3 มิติ [16]

บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

รายละเอียดในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการดำเนินการวิจัยที่ประกอบด้วยวิธีการดำเนินงานวิจัยขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบ วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ การเปรียบเทียบผลการทดลองและไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมีรายละเอียดในแต่ละส่วนดังต่อไปนี้

3.1 ระเบียบวิธีวิจัย

3.1.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1.1.1 ดำเนินการทบทวนวรรณกรรมจากวารสารวิชาการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเกราะอลูมิเนียมกันกระสุนแบบชั้นเดียวและแบบหลายชั้น ชนิดของวัสดุ วิธีการทดสอบ และการออกแบบเกราะกันกระสุน ผ่านหนังสือ สิทธิบัตรหรืออนุสิทธิบัตรต่างๆ และอินเทอร์เน็ต

3.1.1.2 ศึกษากระบวนการก่อนการวิเคราะห์จากการทบทวนวรรณกรรมโดยใช้การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ANSYS Explicit/Dynamics

3.1.1.3 การกำหนดตัวแปร ระเบียบวิธีวิจัย แนวทางวิจัย กรอบการวิจัย และการวางแผน การเตรียมการดำเนินงานทดสอบและวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

3.1.1.4 ออกแบบรูปแบบแผ่นเกราะและสร้างแบบจำลองเกราะกันกระสุนแบบ 3 มิติด้วยโปรแกรม SolidWorks หรือ ANSYS DesignModeler

3.1.1.5 กำหนดค่าสมบัติของวัสดุตามรูปแบบความเสียหายของวัสดุในโปรแกรม ANSYS / Engineering Data โดย แผ่นเกราะ AL-7075 T6 มีสมบัติวัสดุเป็นไปตาม Steinberg-Guinan Strength และวัสดุ AL-5083 H116 เป็นไปตามรูปแบบของ Johnson-Cook Strength, กระสุนที่ทำจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ มีรูปแบบความเสียหายตามทฤษฎี Johnson-Holmquist Failure Model (JH-1, JH-2)

3.1.1.6 วิเคราะห์แผ่นเกราะกันกระสุนด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS Explicit/Dynamics

3.1.1.7 ทำการทดสอบยิงแผ่นเกราะกันกระสุนจริงตามมาตรฐาน NIJ ที่โรงงานวัตถุระเบิดทหาร จ.นครสวรรค์

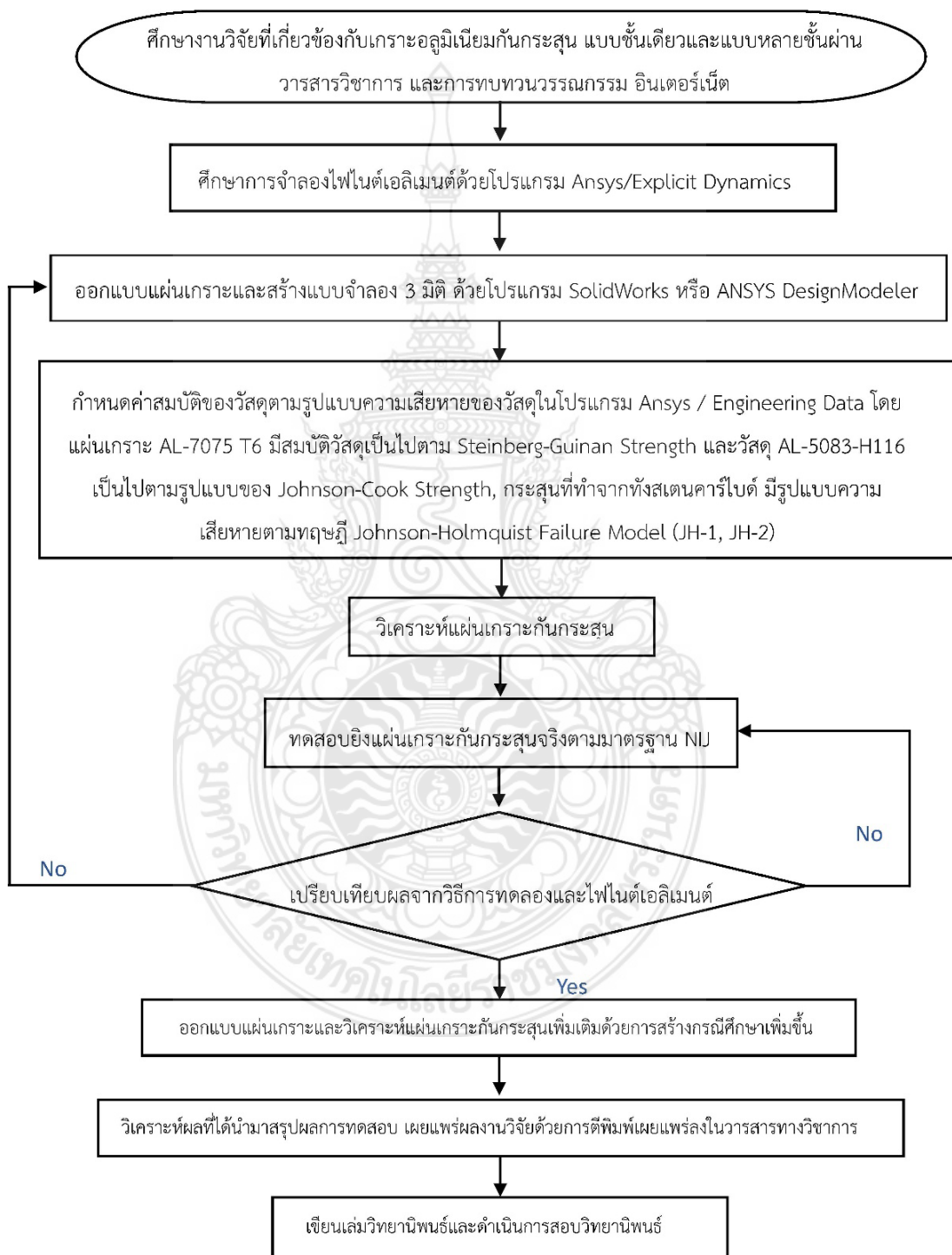
3.1.1.8 เปรียบเทียบผลจากวิธีการทดลองและไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดสอบยิงจริงโดยเปรียบเทียบจากรูปแบบความเสียหาย

3.1.1.9 ออกแบบและวิเคราะห์แผ่นเกราะกันกระสุนเพิ่มเติมด้วยการสร้างกรณีศึกษา

3.1.1.10 วิเคราะห์ผลที่ได้นำมาสรุปผลการทดสอบ และเขียนเล่มวิทยานิพนธ์

3.1.1.11 เผยแพร่ผลงานด้วยการตีพิมพ์เผยแพร่ลงในวารสารทางวิชาการหรืองานสัมมนาทางวิชาการ

3.1.1.12 สอบป้องกันวิทยานิพนธ์



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

3.1.2 เครื่องมือ วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองศึกษาวิจัย

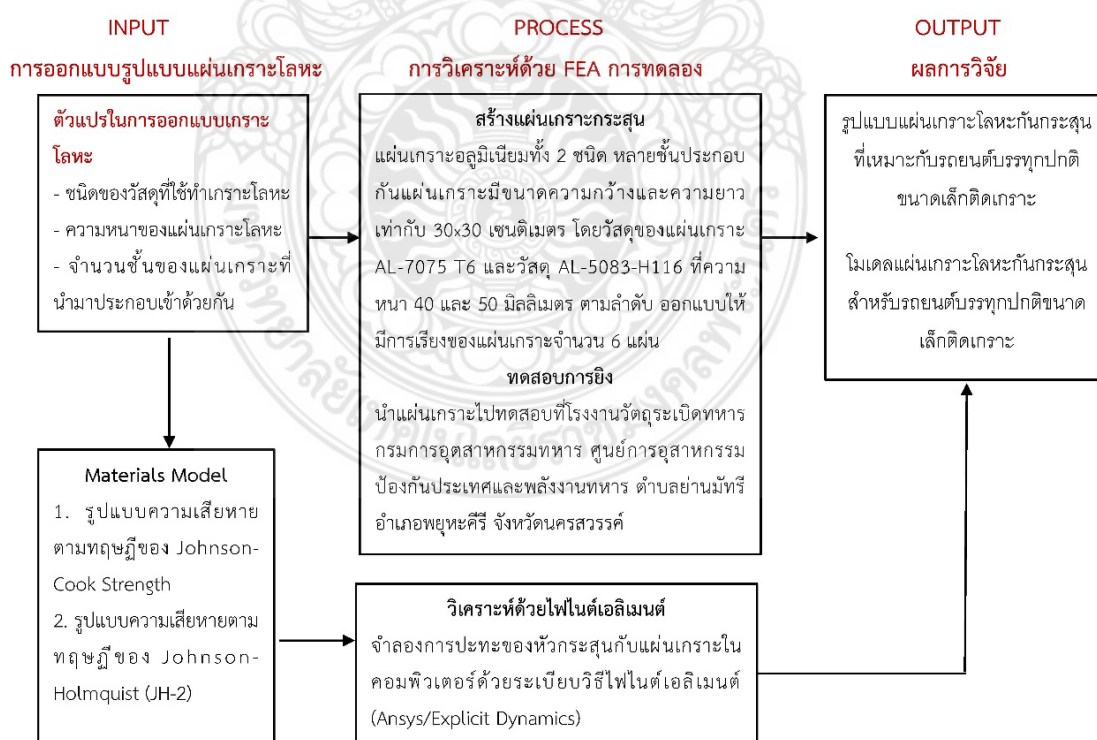
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองวิจัยมีดังนี้

3.1.2.1 แผ่นโลหะขนาดความกว้างxความยาวเท่ากับ 300x300 mm ที่ความหนาต่างๆ

3.1.2.2 โปรแกรม ANSYS Explicit/Dynamics

3.1.2.3 โปรแกรม SolidWorks

3.1.2.4 เครื่องคอมพิวเตอร์ ในการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม ANSYS Explicit/Dynamics มีปัจจัยในการคำนวณที่สำคัญเนื่องจากการคำนวณของโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ จำเป็นจะต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะสูงเนื่องจากการในสร้างขนาดของเมช (Mesh) ที่แบบจำลองมีขนาดเล็กซึ่งเป็นปัจจัยหลักและการคำนวณที่มีเวลาเป็นตัวแปรมาเกี่ยวข้องนั้นซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ของวัตถุ (Dynamics) การเลือกใช้คอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะสูงเพื่อให้ได้ผลการคำนวณที่รวดเร็ว การคาดเคลื่อนที่น้อยและผลการจากการคำนวณที่เที่ยงตรงเพื่อให้ได้มาซึ่งผลการวิเคราะห์ที่สามารถใช้เพื่อในการคาดการณ์หรือเปรียบเทียบกับผลการจำลองยิงซึ่งจะต้องมีความใกล้เคียงจากความเป็นจริงเพื่อเป็นการยืนยันผลจากการคำนวณ มีสเปคประกอบด้วย 1) CPU: AMD Ryzen Threadripper 2990WX 32 Core Processor 2) Mainboard: MSI MEG X399 CREATION (MS-7B92) 3) RAM Corsair 128 GB DDR4/3200 MHz 4) VGA: NVIDIA Quadro RTX 4000 5) Power Supply: Thermaltake 850W 80 Plus Gold



รูปที่ 3.2 กรอบการวิจัย

3.1.3 กรอบการวิจัย

งานวิจัยนี้เลือกใช้เครื่องมือในการทำวิจัย ประกอบด้วย การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม ANSYS Explicit/Dynamics ร่วมกับการทดลอง ทำการจำลองและทดสอบในบางกรณีเพื่อยืนยันขีดความสามารถในการวิเคราะห์ของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ เมื่อได้รูปแบบการดำเนินงานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ถูกต้อง จึงสร้างโมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์กรณีศึกษาที่เป็นแผ่นเกราะโลหะกันกระสุนในกรณีต่างๆ กรอบการวิจัยมีรายละเอียดดังรูปที่ 3.2

3.2 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วย ANSYS: Explicit Dynamics

โปรแกรม ANSYS Explicit/Dynamics ได้ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการออกแบบและวิเคราะห์ความเสียหายของแผ่นเกราะและกระสุนที่เกิดขึ้นในสถานการณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นและมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ซึ่งเป็นวิธีการรวมเวลาที่ใช้ในการจำลองไดนามิกเมื่อความเร็วเป็นสิ่งสำคัญ

3.2.1 กระบวนการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.2.1.1 ขั้นตอนกระบวนการก่อนการประมวลผล (Pre-Processing) คือการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ประกอบด้วย การสร้างโมเดลสองมิติหรือสามมิติ ด้วยโปรแกรมช่วยออกแบบทางวิศวกรรม ซึ่งในบทความนี้ได้เลือกใช้ ANSYS DesignModeler เพื่อสร้างโมเดลสามมิติภายในโปรแกรม ANSYS และไม่จำเป็นต้องนำเข้าโมเดลสามมิติจากภายนอก และจะส่งผลในด้านของความถูกต้องของโมเดลและความเร็วในการวิเคราะห์ จากนั้นกำหนดวัสดุให้กับชิ้นส่วนต่างๆ ซึ่งสามารถเลือกใช้สมบัติของวัสดุหรือกำหนดด้วยตนเองลงในซอฟต์แวร์ก็ได้เช่นกัน การกำหนดคู่สัมผัสเป็นการกำหนดชนิดของหน้าสัมผัสที่สัมผัสกัน การกำหนดความเร็วของกระสุน การกำหนดจุดรองรับหรือจุดจับยึด และการแบ่งเอลิเมนต์ที่ต้องเลือกชนิดเอลิเมนต์ที่เหมาะสมกับแบบจำลอง สำหรับการกำหนดสมบัติของวัสดุนั้นจะต้องกำหนดค่าวัสดุแบบชัดแจ้ง (Explicit Materials) ซึ่งมีทฤษฎีโมเดลต่างๆ ประกอบด้วย Johnson Cook Strength, Steinberg-Guinan Strength, Equation of State, Isotropic Material, Johnson-Holmquist Strength Continuous, Johnson Cook Failure

3.2.1.2 กระบวนการประมวลผล (Solve-Processing) เป็นขั้นตอนการวิเคราะห์แบบ Explicit/Dynamic สำหรับการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นสูง การเสียรูปขนาดใหญ่ ปัญหาที่เกิดจากการสัมผัส ซึ่งเกี่ยวข้องกับผลกระทบการสัมผัสหลายส่วนของรูปร่าง และพฤติกรรมของวัสดุที่ไม่เป็นเชิงเส้นสูง การวิเคราะห์แบบจำลองโดยการคำนวณบนคอมพิวเตอร์เพื่อทำการวิเคราะห์หรือจำลองพฤติกรรมตามธรรมชาติของระบบที่ต้องการ ปัญหาที่มีลักษณะเปลี่ยนรูปถาวรก็ควรเลือกแบบพลาสติก (Plasticity) เป็นต้น

3.2.1.3 กระบวนการแสดงผลลัพธ์ (Post-Processing) เป็นขั้นตอนการแสดงผลหลังจากการวิเคราะห์ โดยค่าที่แสดงจะมีลักษณะเป็นค่าตัวเลขที่โหนด (Node) ค่าสมบัติของแต่ละ

เอลิเมนต์ (Element) ผลลัพธ์ที่จะต้องใช้ในการแสดงผลเพื่อพิจารณา ประกอบด้วย การเสียรูป ทิศทางการเสียรูป ความเร็วของวัตถุ ทิศทางของความเร็ว ความเค้นและความเครียดต่างๆ รวมทั้งการตัดภาคส่วน (Section Planes)

3.2.2 กำหนดสมมติฐานในการวิเคราะห์

สมมติฐานของวัสดุที่ใช้สำหรับกระสุน แผ่นเกราะอลูมิเนียม 7075 T6 และ 5083 H116 กำหนดให้เป็นวัสดุที่มีเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) และมีสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทุกทาง (Isotropic Materials) ความเสียหายที่เกิดขึ้นพิจารณาตั้งแต่ช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นไปจนถึงช่วงพลาสติก ความเสียหายที่เกิดขึ้นอยู่ในระดับที่มีอัตราความเครียดสูง

3.2.3 ทฤษฎีและสมบัติของวัสดุ

แผ่นเกราะกันกระสุนและหัวกระสุนถูกสร้างโดยโปรแกรม ANSYS DesignModeler ที่มีหลายชิ้นส่วนแยกกันแต่อยู่ในไฟล์ชิ้นส่วนเดียวกัน (Multibody) แผ่นเกราะมีขนาดความกว้างและความยาวเท่ากับ 30x30 เซนติเมตร โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นเกราะเป็นกรณีต่างๆ สำหรับกระสุนที่ในการจำลองเป็นกระสุน 7.62x51 มิลลิเมตร ที่มีความเร็วในการจำลองของกระสุน ตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3

กระสุนทั้งสแตนคาร์ไบด์ (Tungsten Carbide Bullet) เป็นกระสุนเจาะเกราะ ที่มีส่วนของหัวกระสุนอยู่ภายในปลอกทองเหลืองซึ่งทำจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ โดยมีชื่อเรียกตามขนาดคือ “7.62 mm” ในการจำลองทางระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ใช้รูปแบบความเสียหายของ Johnson-Holmquist Failure Model (JH-1, JH-2) ที่มีความเสียหายเมื่อแบบจำลองวัสดุที่เปราะ เช่น เซรามิกภายใต้แรงดันขนาดใหญ่และอัตราความเครียดสูง รูปแบบจะพยายามที่จะรวมปรากฏการณ์ที่พบเมื่อวัสดุที่เปราะบางถูกแรงกระทำและเกิดความเสียหายซึ่งเป็นหนึ่งในแบบจำลองที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดเมื่อต้องรองรับกับผลกระทบจากชิปนาวุธ (Ballistic) กำหนดให้ σ คือความเค้นคราก (Yield Stress) เป็นไปตามสมการดังนี้ [17]

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

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

โดยที่ A, B, C, M, N เป็นค่าคงที่ของวัสดุ ความดันปกติ คือ $P^* = P/P_{HEL}$ โดยที่ P คือความดันไฮโดรสแตติกที่แท้จริง และค่า P_{HEL} คือค่าความดันไฮโดรสแตติกที่ HEL (Hugoniot Elastic Limit) ความดันไฮโดรสแตติก แรงดึงสูงสุดที่ปรับให้เป็นมาตรฐานคือ $T^* = T/T_{HEL}$ โดยที่ T คือแรงดันไฟฟ้าสถิตสูงสุดที่วัสดุสามารถทนได้ $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$ คืออัตราความเครียดไร้มิติ โดยที่ $\dot{\epsilon}$ คืออัตราความเครียดที่เทียบเท่าจริง และ $\dot{\epsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$ [17]

จากสมการที่ (3.1) กรณีความแข็งแรงตามปกติไม่เสียหาย (The Normalized Intact Strength) ได้

$$\sigma_i^* = A(P^* + T^*)^N \cdot (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (3.2)$$

จากสมการที่ (3.1) กรณีความแข็งแรงตามปกติเสียหาย (The Normalized Fracture Strength) ได้

$$\sigma_f^* = B(P^*)^M \cdot (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \leq SFMAX \quad (3.3)$$

Johnson-Cook Model คือความสัมพันธ์ของวัสดุโลหะระหว่างความเค้นและความเครียดสามารถอธิบายได้ ภายใต้สภาวะของการเปลี่ยนแปลงรูปขนาดใหญ่ (Large Deformation) อัตราความเครียดสูง (High Strain Rate) และอุณหภูมิที่สูงขึ้น (High Temperature) โมเดลนี้ได้ถูกนำมาใช้ในการทำนายพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุ แสดงดังสมการที่ (3.4) [18]

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

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 ค่าสัมประสิทธิ์การเสริมความแข็งแรงของอัตราความเครียด (A Strain-rate-hardening Factor) และ m คือ ค่าสัมประสิทธิ์การอ่อนตัวด้วยความร้อน (Thermal-softening Factor) $\dot{\epsilon}^*$ คือ อัตราความเครียดไร้มิติ (Strain Rate Nondimensionalized) ที่อ้างอิงจากอัตราความเครียดที่ $1/s$, T^* คือ อุณหภูมิไร้มิติ (Nondimensional Temperature) สำหรับ T^* กำหนดได้ด้วยสมการดังนี้ [18]

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (3.5)$$

โดยที่ T_r คือ อุณหภูมิห้อง (298 K) และ T_m คือ อุณหภูมิหลอมละลายของวัสดุโดยค่าสมบัติของวัสดุและพารามิเตอร์ของกระสุน 7.62×51 มิลลิเมตร เป็นวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ (Tungsten Carbide) ที่ใช้ในการจำลองแสดงในตารางที่ 3.1 สำหรับแผ่นอลูมิเนียม AL-7075 T6 และ AL-5083 H116 แสดงดังตารางที่ 3.2 และตารางที่ 3.3 ตามลำดับ สำหรับความสัมพันธ์ของความเค้นคราก (Yield Stress) และความเครียดแบบคงรูป (Plastic Strain) สำหรับ AL-7075 T6 และ AL-5083-H116 แสดงดังรูปที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ

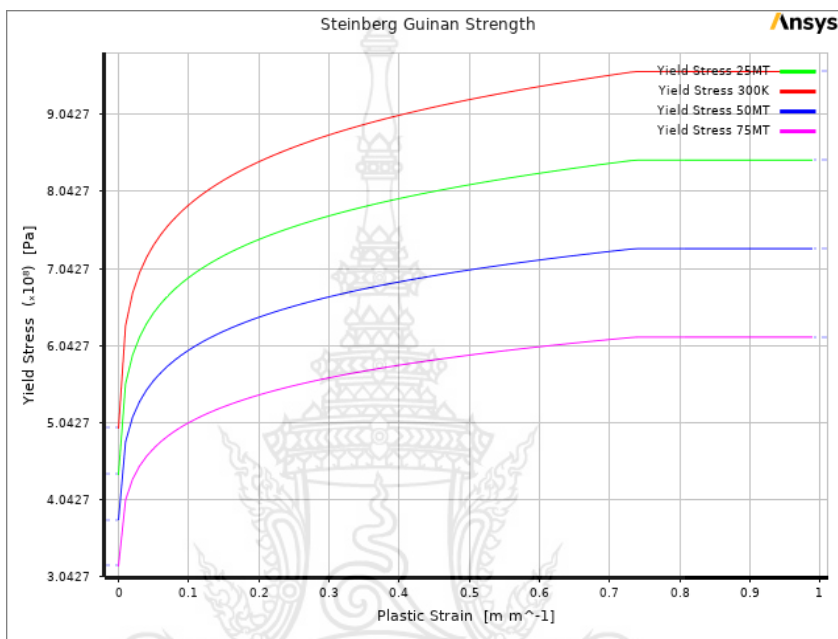
ตารางที่ 3.1 Properties and parameter JH of tungsten carbide [19]

Properties	Tungsten carbide
Density (ρ , g/cm ³)	14.56
Young's modulus (E, GPa)	539
Poisson ratio (ν)	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

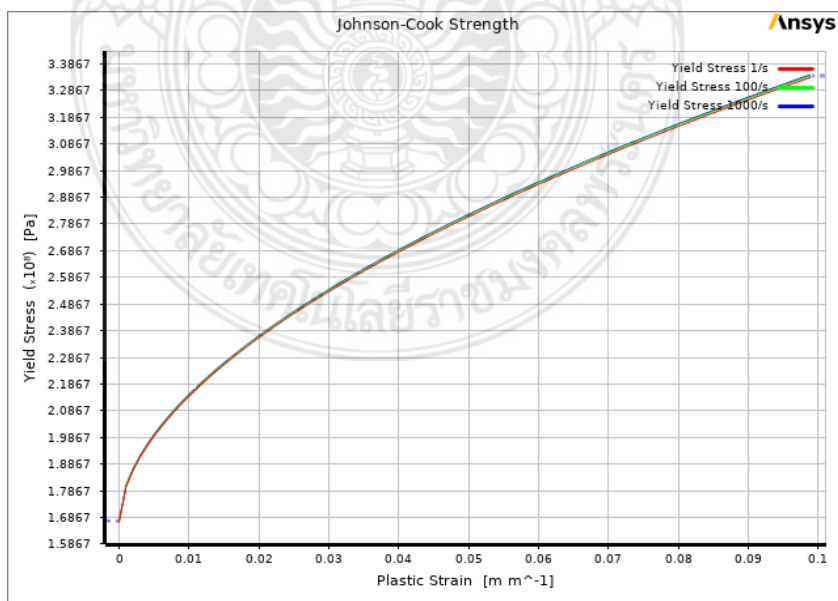
ตารางที่ 3.2 Properties and parameter of AL-7075 T6 [20]

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 (Y _{max} , MPa)	810
Shear modulus (GPa)	80
Hardening constant (B)	965
Steinberg-Guinan Strength	
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



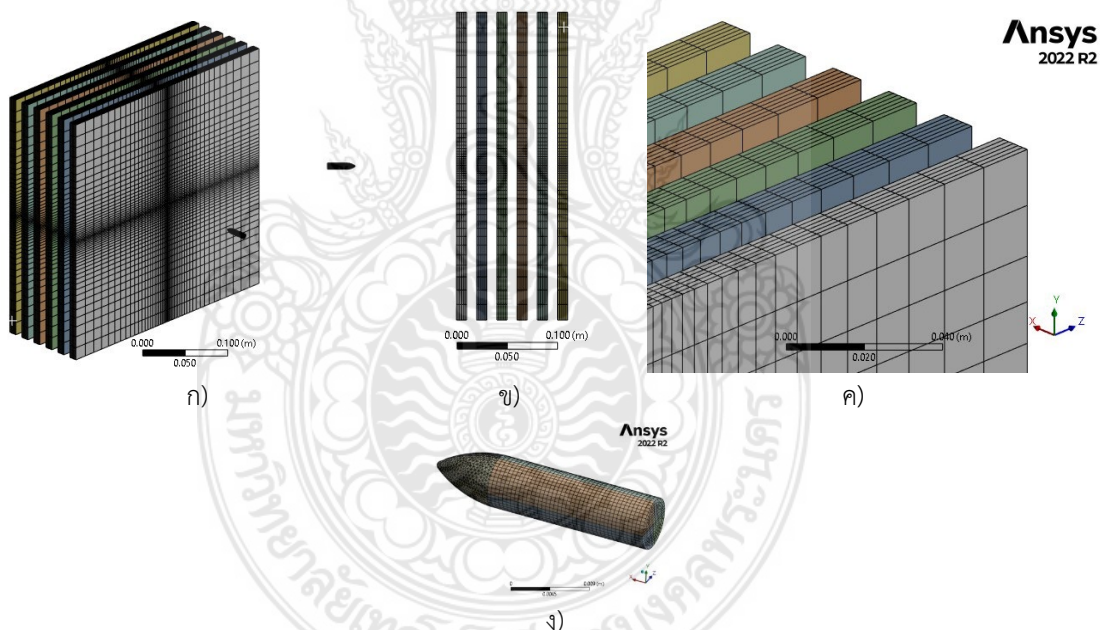
รูปที่ 3.3 Relationship between yield stress and plastic strain of Steinberg-Guinan Strength for AL-7075 T6 [20]



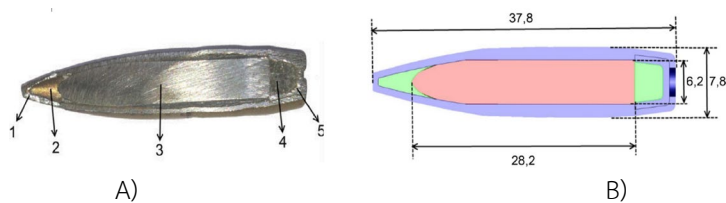
รูปที่ 3.4 Relationship between yield stress and plastic strain of Johnson-Cook for AL-5083 H116 [21]

ตารางที่ 3.3 Properties and parameter of AL-5083 H116 [18]

Properties	AL-5083 H116
Density (ρ , g/cm ³)	2700
Specific heat (J/kg °C)	910
Johnson Cook Strength	
Strain Rate Correction	First Order
Initial Yield Stress	965
Hardening Constant (MPa)	596
Strain Rate Constant	0.551
Thermal Softening Exponent	0.859
Melting temperature (T_{melt} , °C)	619.85
Reference Strain Rate (/sec)	1
Bulk Modulus (GPa)	58.33
Shear modulus (GPa)	26.7



รูปที่ 3.5 การกำหนดขนาดและการแบ่งเอลิเมนต์



รูปที่ 3.6 โครงสร้างกระสุน A) มิติของกระสุน AP 7.62 mm และชิ้นส่วน: 1. ปดอททองเหลือง 2. หัวจุด 3. แกนเหล็กชุบแข็ง 4. ฐานตะกั่ว 5. แก๊ป และ B) ขนาดกระสุน มีหน่วยเป็น มม. [26]

3.2.4 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

แผ่นเกราะอลูมิเนียมเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบากว่าโลหะประเภทอื่น โดยเฉพาะโลหะที่มีส่วนผสมของเหล็กเป็นหลัก รูปแบบของแผ่นเกราะโลหะกันกระสุนจะได้รับการออกแบบให้เป็นแผ่นเรียงซ้อนกัน 6 แผ่น ดังรูปที่ 3.5 โดยวัสดุที่มีเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) มีสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทาง แผ่นเกราะที่กำหนดด้วยวัสดุทั้งสองชนิด คือ AL-7075 T6 และ AL-5083 H116 ที่มีความหนาตั้งแต่ 6, 10 และ 60 มิลลิเมตร สำหรับกระสุนที่ได้รับการออกแบบเพื่อใช้ในการจำลองและวิเคราะห์ตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 มีขนาดดังรูปที่ 3.6 ด้วยกระสุน AP 7.62 มิลลิเมตร ในการออกแบบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จะต้องสร้างโมเดลจำลองสามมิติในลักษณะแยกชิ้นส่วนทุกชิ้นออกจากกัน เพื่อให้สามารถกำหนดวัสดุในแต่ละชิ้นส่วนได้อย่างเหมาะสม และให้สามารถกำหนดชนิดเอลิเมนต์และควบคุมขนาดเอลิเมนต์ได้อย่างถูกต้อง เพื่อให้ได้แบบจำลองที่ถูกต้องและลดความผิดพลาดบางประการที่เกิดจากการถ่ายโอนไฟล์โมเดลจึงเลือกใช้โปรแกรม ANSYS DesignModeler เพื่อสร้างแบบจำลองภายในและไม่จำเป็นต้องนำเข้าไฟล์โมเดลแต่ประการใด รูปแบบจำลองแผ่นเกราะมีขนาด 30x30 เซนติเมตร ที่ความหนาแปรเปลี่ยนต่าง ๆ และหัวกระสุนเป็นกระสุนขนาด 7.62x51 มิลลิเมตร ซึ่งอ้างอิงขนาดจาก Namik Kiliç et al. [22] และทำจากวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) ซึ่งแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนลำตัวและส่วนหัวกระสุน การสร้างแบบจำลองกระสุนนั้นต้องแบ่งกระสุนออกเป็นสองส่วนดังกล่าว และทำการสร้างระนาบสองระนาบที่ตั้งฉากกันเพื่อแบ่งกระสุนออกตามความยาว และจะได้ชิ้นส่วนกระสุนทั้งหมดจำนวน 8 ชิ้นที่เป็นชิ้นงานรูปทรงตัน การแบ่งชิ้นส่วนออกเป็นเอลิเมนต์จะต้องกำหนดชนิดของเอลิเมนต์ให้เหมาะสมกับแบบจำลอง ซึ่งเลือกใช้เอลิเมนต์ชนิดเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) กับส่วนปลายหัวกระสุน

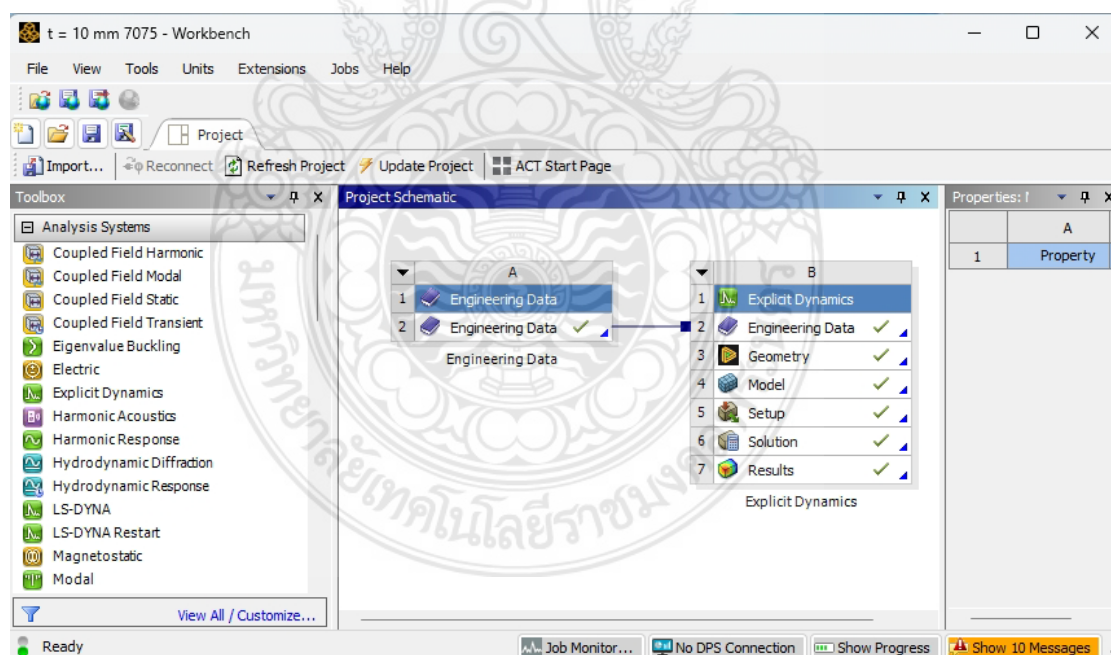
เลือกเอลิเมนต์ชนิดเฮกซะฮีดรอล (Hexahedral) สำหรับส่วนลำตัวกระสุนและแผ่นเกราะที่เหลือทั้งหมด การแบ่งเอลิเมนต์ต้องใช้เทคนิคการกำหนดขนาด เป็นการควบคุมขนาดเอลิเมนต์ในทุกมิติ ยกตัวอย่างดังรูปที่ 3.5 ซึ่งมีแผ่นเกราะจำนวน 6 แผ่น จะต้องกำหนดให้เอลิเมนต์เกิดการลดขนาดจากขอบทุกด้าน (รวมทั้งหมด 48 ขอบ) เข้าไปยังจุดกึ่งกลางแผ่นเกราะด้วยการกำหนด Bias Type และ Bias Factor เท่ากับ 12 แสดงผลการแบ่งเอลิเมนต์ดังรูปที่ 3.5 ก) และกำหนดให้เกิดการเรียงเอลิเมนต์ในแต่ละแผ่นออกเป็น 6 ชั้นด้วยการเลือกมุมขอบ (ขอบด้านความหนา) ทั้งหมดรวมจำนวน 24 มุมขอบ และกำหนดค่า Number of Divisions เท่ากับ 6 แสดงผลดังรูปที่ 3.5 ข) ระยะห่างจากกระสุนไปยังแผ่นเกราะไม่มีข้อจำกัดโดยในบทความนี้กำหนดไว้ที่ 100 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.5 ค) และการแบ่งเอลิเมนต์ของกระสุนจะต้องกำหนดในรูปแบบรูปทรง (Body) ให้เกิดการแบ่งเอลิเมนต์อย่างละเอียดเข้าไปยังด้านในเนื้อกระสุน แสดงผลดังรูปที่ 3.5 ง) ส่งผลให้จำนวนเอลิเมนต์ในภาพรวมอยู่ที่ 119,763 เอลิเมนต์ ที่มี 126,786 โหนด กำหนดการจับยึดไปที่พื้นผิวขอบของแผ่นเกราะทั้ง 6 แผ่น นับรวมพื้นที่ได้ 24 พื้นที่เป็นแบบยึดแน่น (Fixed Support) กำหนดความเร็วของกระสุน ซึ่งได้แบ่งออกเป็นจำนวน 8 ชิ้นส่วนให้มีความเร็วไปตามทิศทางแกน x ด้วยความเร็วตาม

มาตรฐาน NIJ 3 เท่ากับ 850 เมตรต่อวินาที กำหนดคู่สัมผัสที่กระสุนเนื่องจากมีจำนวน 8 ชิ้นส่วนที่ผิวสัมผัสกันด้วย Contacts Bodies เป็นแบบ Bonded ใช้รูปแบบการวิเคราะห์เป็นแบบ Explicit/Dynamics ด้วยชุดคำนวณ AUTODYN ตั้งค่าการวิเคราะห์ End Time เท่ากับ 0.001 การแสดงผลการวิเคราะห์ให้เลือกใช้ Equivalent Stress (Von-Mises)

3.3 กระบวนการและเทคนิคการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

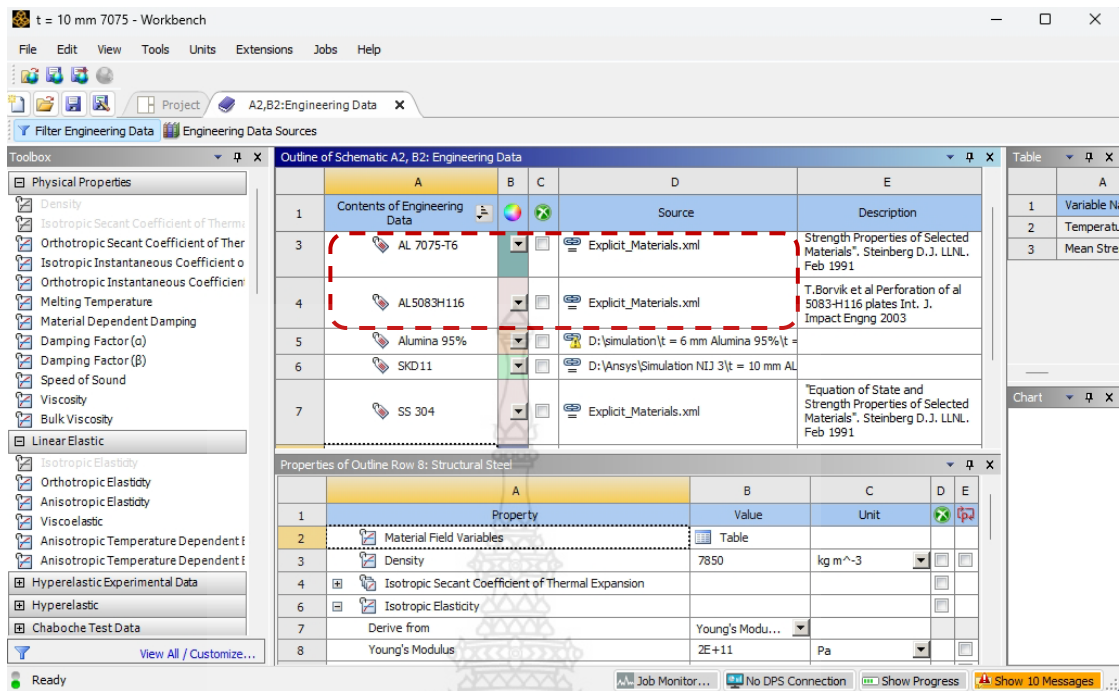
3.3.1 กระบวนการเตรียมและตั้งค่าการจำลอง (Pre-processing)

การวิเคราะห์เลือกใช้โปรแกรม ANSYS 2022R2 ได้ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือสำคัญในการวิเคราะห์และแสดงผลการจำลองร่วมกับการทดสอบการยิงกระสุนจริง โดยในส่วนของโมดูลที่ใช้วิเคราะห์จะเป็น Explicit Dynamics ที่อยู่ในหน้าต่าง Workbench ดังรูปที่ 3.7 เริ่มต้นด้วยการนำโมดูล Explicit Dynamics เข้าสู่พื้นที่ Project Schematic และทำการกำหนดสมบัติของวัสดุ 3 ชนิด ประกอบด้วย ทังสเตนคาร์ไบด์ (WC), AL-7075 T6 และ AL-5083 H116 โดยใช้สมบัติของวัสดุที่มาจากอ้างอิงในบทความต่างๆ ที่ได้มีการนำเสนอไว้มากมายและมีการอ้างอิงต่อกันมา สำหรับวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) จะต้องกำหนดค่าทั้งในส่วนความหนาแน่น สมบัติทางกล สมบัติด้านการแตกหัก และอื่นๆ ดังตารางที่ 3.1-3.3



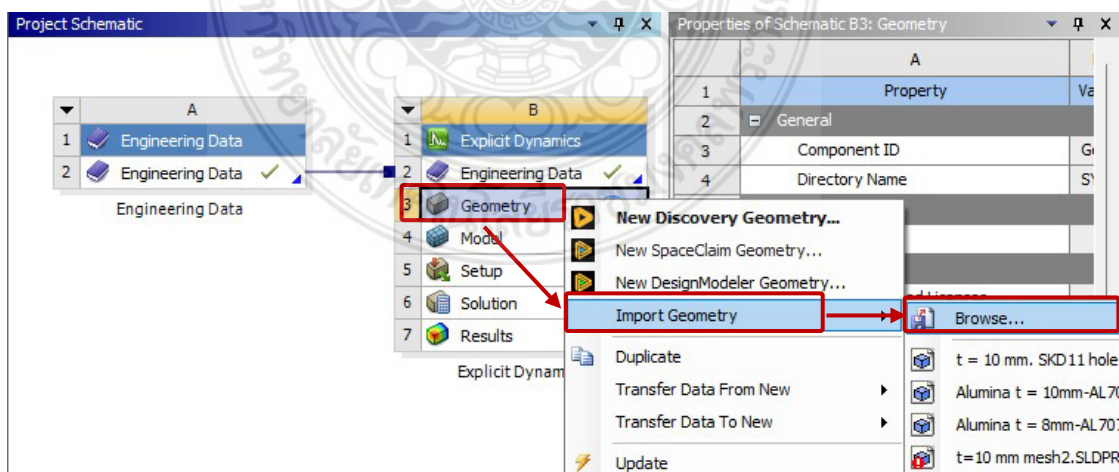
รูปที่ 3.7 User Interface ของ ANSYS 2022R2

จากรูปที่ 3.8 กำหนดรายการสมบัติของวัสดุลงในระบบข้อมูลชุดคำสั่งทำงานของ Explicit Dynamics ซึ่งมีคำสั่ง “Engineering Data” ใช้เป็นส่วนของการกำหนดสมบัติของวัสดุ คือทังสเตนคาร์ไบด์ (WC), AL-7075 T6 และ AL-5083 H116 สมบัติของวัสดุแสดงดังตารางที่ 3.1-3.2



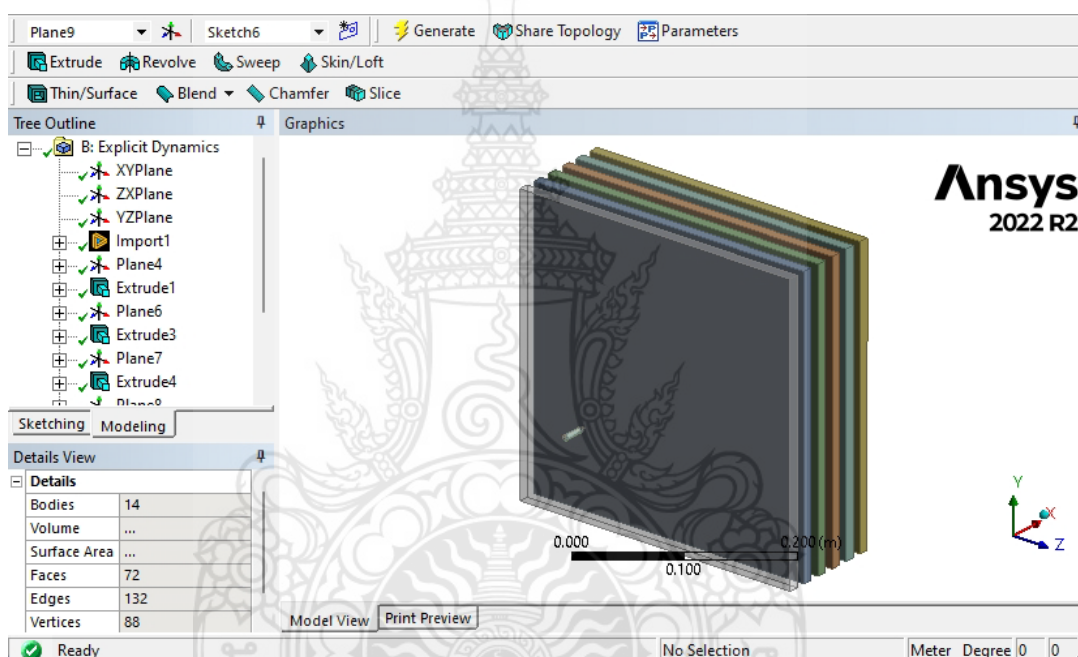
รูปที่ 3.8 ตัวอย่างการกำหนดวัสดุใหม่สำหรับ AL-7075 T6 ด้วย Steinberg-Guinan Strength และ AL-5083 H116 ด้วย Johnson-Cook Strength

เมื่อเข้าไปในส่วนของ Engineering Data ให้เพิ่มวัสดุใหม่โดยตั้งชื่อวัสดุตามที่ต้องการ จากนั้นจะได้รายการในช่องวัสดุใหม่ให้ทำการเพิ่มรายการสมบัติของวัสดุโดยคลิกสมบัติของวัสดุที่อยู่ทางด้านซ้ายมือและจะมาปรากฏทางด้านล่างตามรูป จากนั้นให้กำหนดค่าวัสดุต่างๆ ลงไป ทำอย่างนี้จนครบทุกรายการ ตัวอย่างการกำหนดวัสดุที่สมบูรณ์จะแสดงดังรูปที่ 3.8

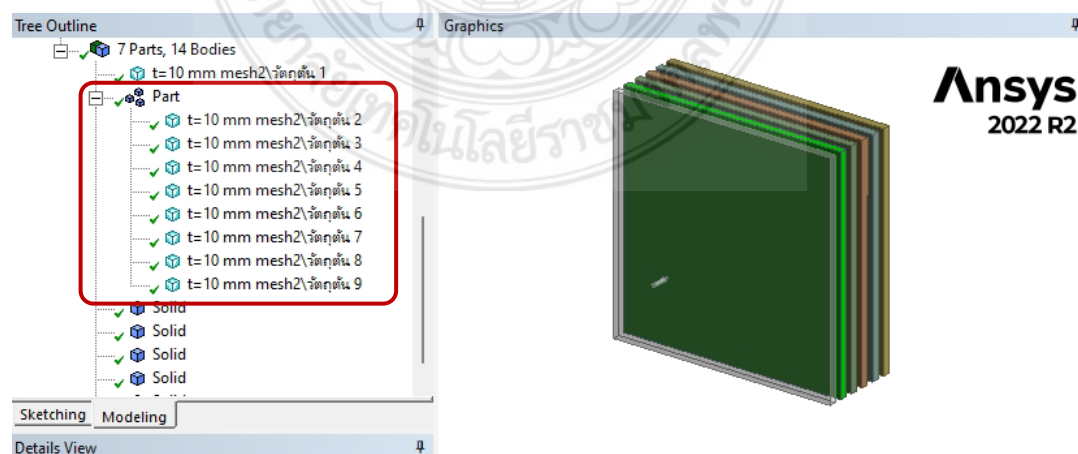


รูปที่ 3.9 นำเข้าโมเดล 3 มิติ แผ่นเกราะและลูกกระสุนในกรณีที่สร้างโดยโปรแกรมอื่นเข้าสู่ ANSYS

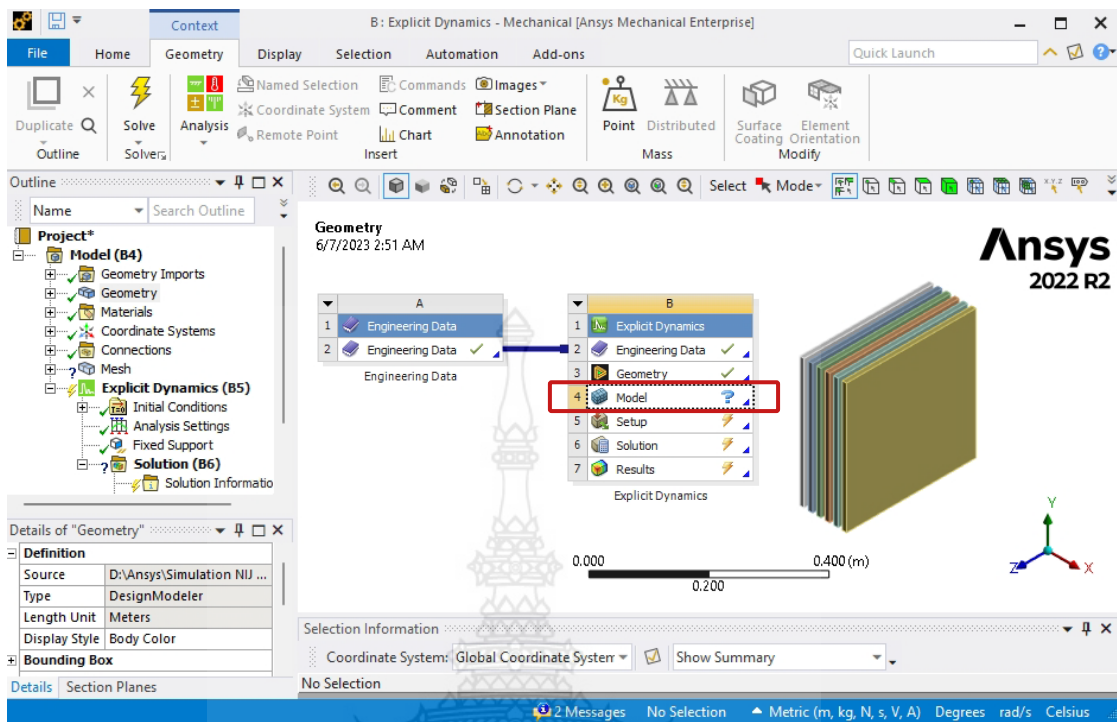
ในกรณีที่สร้างโมเดลจากโปรแกรมอื่น จำเป็นต้องนำเข้าโมเดลแผ่นเกราะกันกระสุนและลูกกระสุน โดยใช้ชุดคำสั่ง “Geometry” โดยเลือกที่ Import Geometry และ Browse ไปยังโมเดลที่สร้างไว้ และคลิกขวาที่ “Geometry” เลือก “Edit Geometry in DesignModeler...” และในโปรแกรม DesignModeler ให้คลิกที่ “Generate” และจะได้ผลดังรูปที่ 3.10 คือมีส่วนประกอบตัวกระสุน 8 Parts และ ส่วนประกอบแผ่นเกราะจำนวนเท่ากับจำนวนแผ่นเกราะ เช่น หากมีแผ่นเกราะ 6 แผ่น จะทำให้มีชิ้นส่วนทั้งหมด 14 Parts และเพื่อให้สามารถแบ่งเอลิเมนต์ได้อย่างเหมาะสมจึงต้องทำให้ชิ้นงานของหัวกระสุนเป็นชิ้นส่วนเดียวกันก่อน ด้วยการใช้คำสั่ง “Form New Part” รวมชิ้นส่วนทั้ง 8 เป็นเนื้อเดียวกัน ชิ้นงานของกระสุนก็จะกลายเป็นเนื้อเดียวกันตามรูปที่ 3.11



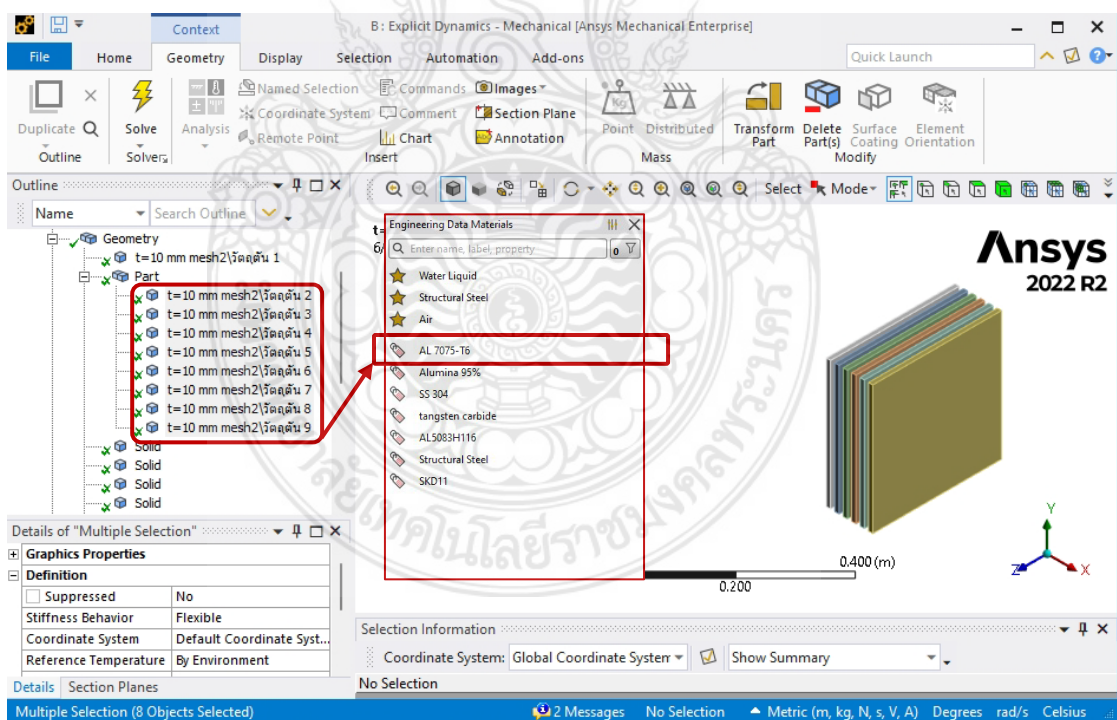
รูปที่ 3.10 ผลลัพธ์จากการใช้คำสั่ง Generate



รูปที่ 3.11 นำเข้าโมเดล 14 Bodies สู่ ANSYS DesignModeler และใช้คำสั่ง From New Part



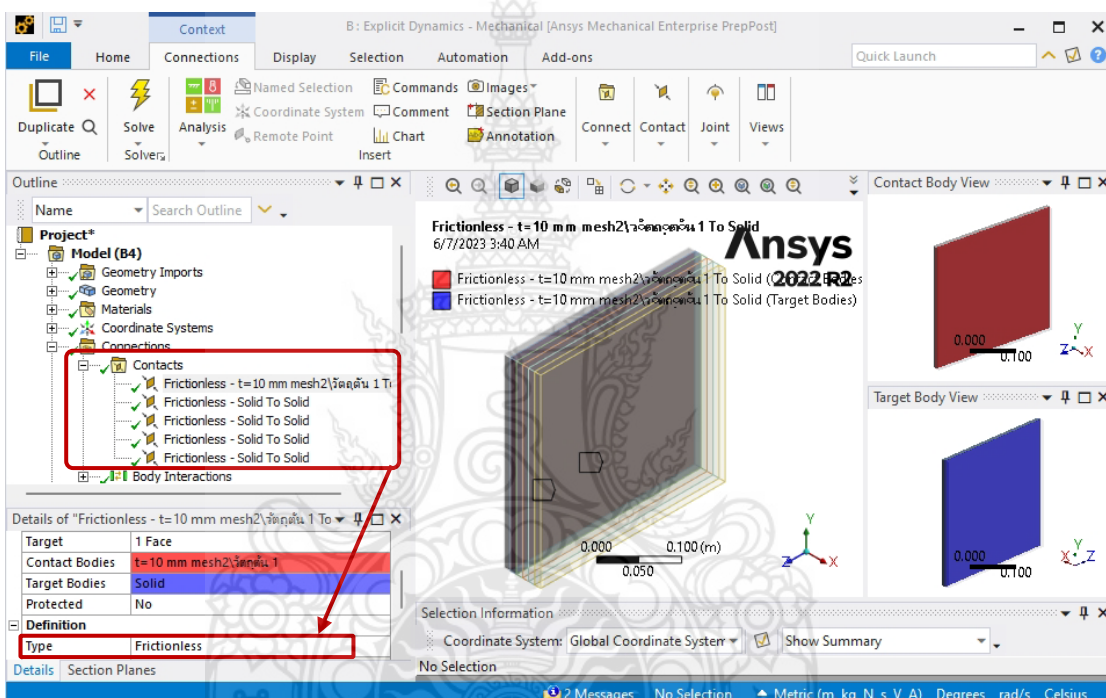
รูปที่ 3.12 เข้าสู่หน้าต่าง Ansys Mechanical Enterprise ด้วยคำสั่ง Model



รูปที่ 3.13 เลือกชนิดของวัสดุที่ต้องการและกำหนดค่า Stiffness Behavior เป็น Flexible

สำหรับการกำหนดชนิดของวัสดุ (Materials Type) และหน้าสัมผัส (Contact) นั้นมีวิธีการกำหนดดังรูปที่ 3.13 โดยให้เข้าสู่หน้าต่างของ Ansys Mechanical Enterprise ด้วยการคลิกเลือกที่

Model เพื่อเข้าไปกำหนดชนิดของวัสดุ ในรูปที่ 3.13 เลือกชิ้นส่วนทั้งหมด กำหนดชนิดวัสดุเป็น AL-7075 T6 และ AL-5083 H116 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรณีศึกษานั้นๆ และกำหนดค่า Stiffness Behavior เป็น Flexible สำหรับกรณีแผ่นเกราะมีมากกว่า 1 ชั้น และเกิดการวางทับกันหรือซ้อนกัน จะต้องกำหนดหน้าสัมผัส (Contact) เป็นแบบไม่คิดค่าแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสที่แถบเครื่องมือ “Connections” ให้กำหนดที่ “Body Interaction” เป็นแบบ “Frictionless” หมายความว่า กำหนดให้ชิ้นงานติดกันแต่ไม่คิดค่าความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของแผ่นเกราะทั้ง 6 แผ่น รูปที่ 3.14

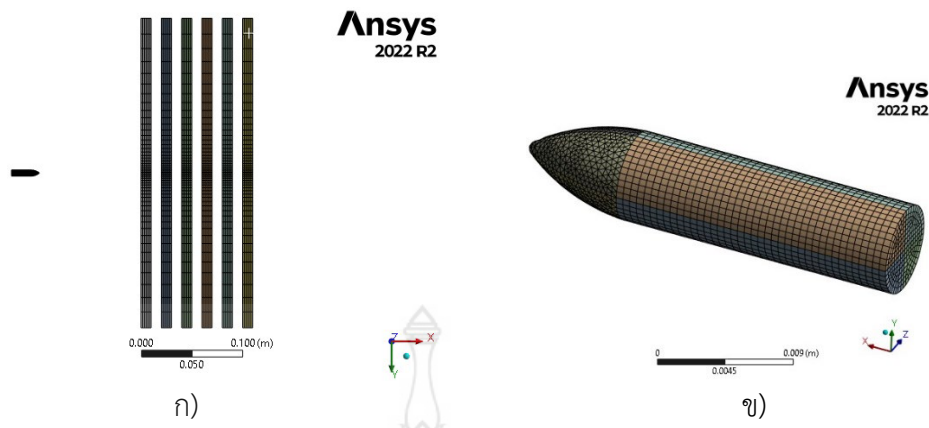


รูปที่ 3.14 การกำหนด Body Interaction ของแผ่นเกราะทั้งสองที่ประกบกันเป็นแบบ Frictionless

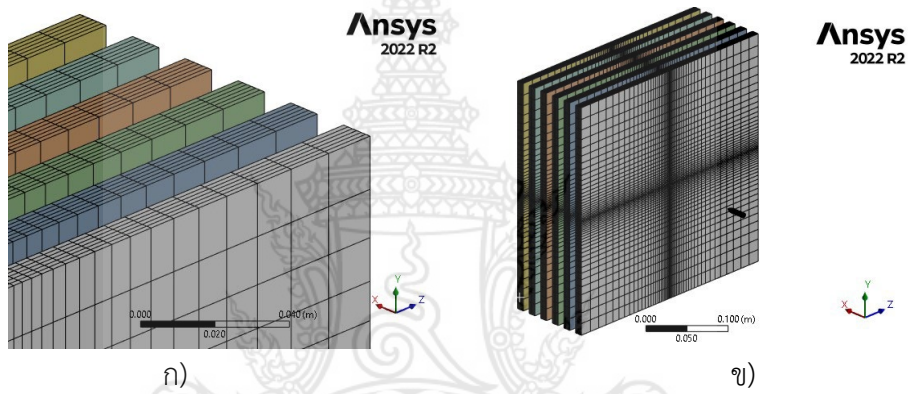
ชนิดของเอลิเมนต์ที่เลือกใช้มี 2 ชนิด คือ เฮกซะฮีดรอล (Hexahedral) และเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) โดยเฮกซะฮีดรอลเป็นรูปทรงหกเหลี่ยมลักษณะลูกบาศก์ที่มี 8 จุดยอด (8 Vertex) จำนวน 12 ขอบ มีจำนวน 20 โหนด หรือเรียกอีกอย่างว่า Brick หรือ Hex ซึ่งมีความแม่นยำสูงในการแก้ปัญหา ดังนั้นเพื่อให้เหมาะสมกับโจทย์ปัญหานี้จึงต้องเลือกใช้เอลิเมนต์ชนิดนี้กับแผ่นเกราะกันกระสุน และส่วนหนึ่งของลำตัวลูกกระสุนสามารถลดจำนวนเซลล์ ลดความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์ และลดระยะเวลาการคำนวณ สำหรับเอลิเมนต์ชนิดเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) คือ รูปทรงสี่หน้าที่มี 4 จุดยอด 6 ขอบ และมี 10 โหนด ซึ่งจะถูกนำมาใช้กับส่วนหัวของกระสุนเท่านั้น เนื่องจากเอลิเมนต์ชนิดนี้มีความเหมาะสมกับหัวกระสุนที่มีความเรียวและแหลม (ไม่รวมส่วนลำตัวกระสุนที่เป็นทรงกระบอก) สำหรับส่วนลำตัวกระสุนจะใช้เอลิเมนต์ชนิดเฮกซะฮีดรอล

การแบ่งชิ้นส่วนออกเป็นเอลิเมนต์จะต้องกำหนดชนิดของเอลิเมนต์ให้เหมาะสมกับแบบจำลอง ซึ่งเลือกใช้เอลิเมนต์ชนิดเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) กับส่วนปลายหัวกระสุน และเลือกเอลิเมนต์ชนิดเฮกซะฮีดรอล (Hexahedral) สำหรับส่วนลำตัวกระสุนและแผ่นเกราะสี่เหลี่ยมทั้งหมด การแบ่งเอลิเมนต์ต้องใช้เทคนิคการกำหนดขนาด เป็นการควบคุมขนาดเอลิเมนต์ในทุกมิติ การสร้างเมชด้วยเอลิเมนต์แบบ Hexahedral ที่บริเวณหัวกระสุนเลือกแถบเครื่องมือ Mesh Method แล้วเลือกเป็นแบบมัลติโซน (Multizone) โดยเลือกเป็น Manual Source และกำหนดให้ Element Size ที่หัวกระสุนมีขนาดในช่วง 0.003-0.005 เมตร ตามรูปที่ 3.15 และที่บริเวณลำตัวใช้แถบเครื่องมือ Sizing กำหนดให้ Element Size ในช่วง 0.003-0.005 เมตร กำหนดรูปแบบ Mesh Method ในแต่ละส่วนของชิ้นงานจำลองและการตั้งค่าขนาดของ Element Size ในแต่ละส่วนเพื่อความเหมาะสมของชิ้นงานจำลองและกำหนดการคำนวณของโปรแกรมให้ได้ผลการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีประสิทธิภาพและถูกต้อง ยกตัวอย่างดังรูปที่ 3.15-3.16 ซึ่งมีแผ่นเกราะจำนวน 6 แผ่น จะต้องกำหนดให้ เอลิเมนต์เกิดการลดขนาดจากขอบทุกด้าน (รวมทั้งหมด 48 ขอบ) เข้าไปยังจุดกึ่งกลางแผ่นเกราะด้วยการกำหนด Bias Type และ Bias Factor เท่ากับ 12 แสดงผลการแบ่งเอลิเมนต์ดังรูปที่ 3.16 ข) และกำหนดให้เกิดการเรียงเอลิเมนต์ในแต่ละแผ่นออกเป็น 6 ชั้นด้วยการเลือกมุมขอบ (ขอบด้านความหนา) ทั้งหมดรวมจำนวน 24 มุมขอบ และกำหนดค่า Number of Divisions เท่ากับ 6 แสดงผลดังรูปที่ 3.16 ก) ระยะห่างจากกระสุนไปยังแผ่นเกราะไม่มีข้อจำกัดโดยในบทความนี้ กำหนดไว้ที่ 100 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.15 ก) และการแบ่งเอลิเมนต์ของกระสุนจะต้องกำหนดในรูปแบบรูปร่าง (Body) ให้เกิดการแบ่งเอลิเมนต์อย่างละเอียดเข้าไปยังด้านในเนื้อกระสุน แสดงผลดังรูปที่ 3.15 ข) ส่งผลให้จำนวนเอลิเมนต์ในภาพรวมอยู่ที่ 119,763 เอลิเมนต์ ที่มี 126,786 โหนด กำหนดการจับยึดไปที่พื้นผิวขอบของแผ่นเกราะทั้ง 6 แผ่น นับรวมพื้นที่ได้ 24 พื้นที่เป็นแบบยึดแน่น (Fixed Support)

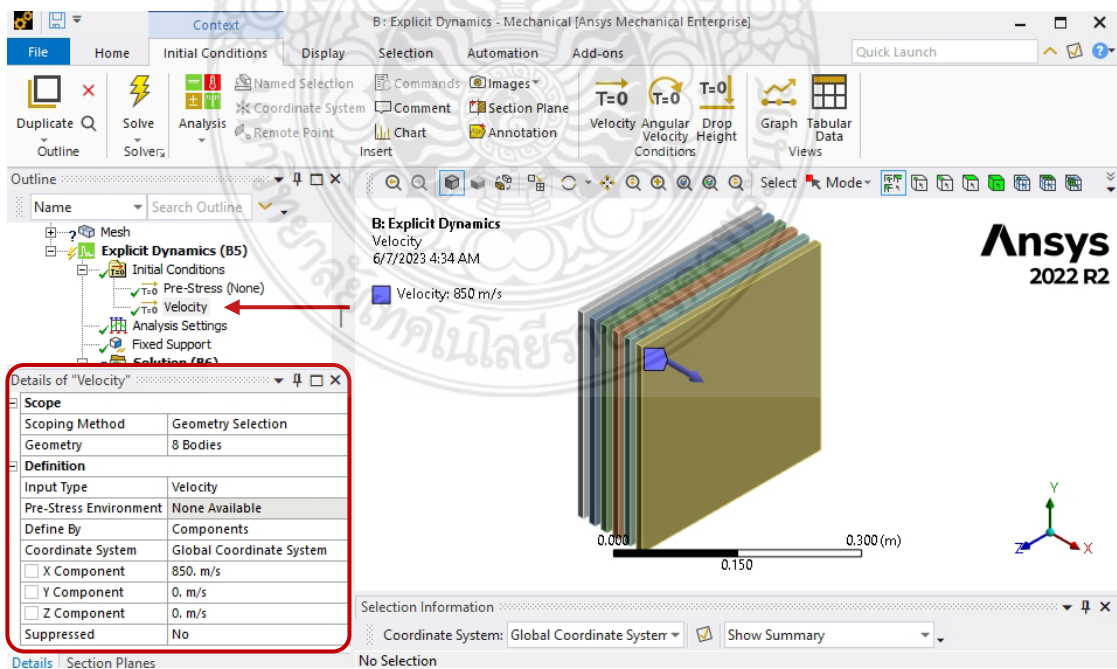
สำหรับการตั้งค่าชุดคำสั่ง Explicit Dynamics เริ่มจากการตั้งค่าความเร็วเริ่มต้นของกระสุน จากรูปที่ 3.17 คลิกขวาที่ Initial Condition เลือก Insert และ Velocity บนแถบเครื่องมือเพื่อใส่ค่าเริ่มต้นโดยการจำลองการยิงจะใส่ค่าเริ่มต้นในช่อง x Component ซึ่งเป็นค่าตามมาตรฐานการทดสอบ NIJ ระดับ 3 เลือกชิ้นงานจำลองที่เคลื่อนด้วยความเร็ว คือ โมเดลกระสุน ใส่ค่าความเร็วเริ่มต้นให้กับกระสุนเป็นความเร็ว 847 ± 9.1 เมตรต่อวินาที และทิศทางการเคลื่อนที่ของกระสุนให้เคลื่อนที่ไปในทิศทางตามแกน +x จากชุดคำสั่ง Explicit Dynamics ในส่วนของ Analysis Settings เป็นการตั้งค่าการทำงานของโปรแกรมสำหรับประมวลผลการวิเคราะห์ ให้เลือกที่คำสั่ง End Time เป็นชุดคำสั่งที่จะกำหนดให้ชิ้นงานเคลื่อนที่ไปในระยะเวลาที่ 0.001 วินาที ตามรูปที่ 3.18 เนื่องจากกระสุนปืนมีความเร็วที่ 847 ± 9.1 เมตรต่อวินาที ซึ่งมีความเร็วสูงมาก จึงต้องกำหนดเวลาของ End Time ที่น้อย เพื่อให้สามารถวิเคราะห์การชนของกระสุนปืนที่กระทบแผ่นเกราะ และที่แถบเครื่องมือ Output Controls ที่ชุดคำสั่ง Result Number of Points ที่เหมาะสมควรใส่ที่ 50-100 จุด [2]



รูปที่ 3.15 ผลการกำหนด Element Size



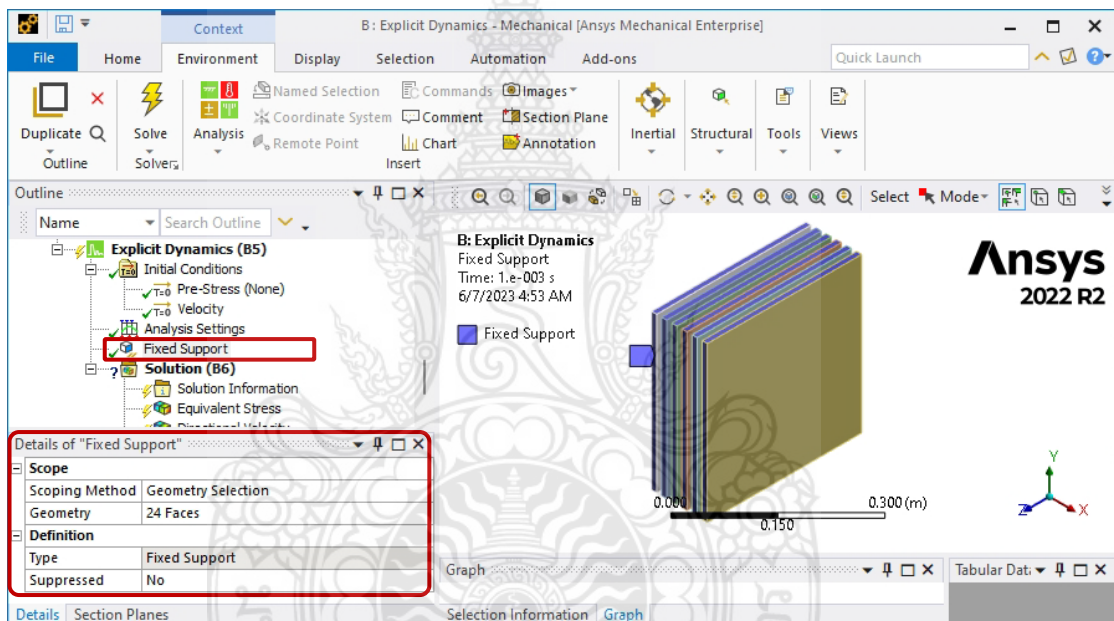
รูปที่ 3.16 การตั้งค่าขนาดของ Element Size ที่แผ่นเกราะ



รูปที่ 3.17 การกำหนดค่าความเร็วเริ่มต้นและการใส่ค่าความเร็วและทิศทางเคลื่อนที่

Details of "Analysis Settings"	
Analysis Settings Preference	
Type	Custom
Step Controls	
Number Of Steps	1
Current Step Number	1
Load Step Type	Explicit Time Integration
End Time	1.e-003
Resume From Cycle	0
Maximum Number of Cycles	1e+07
Maximum Energy Error	0.1
Reference Energy Cycle	0
Initial Time Step	Program Controlled
Minimum Time Step	Program Controlled
Maximum Time Step	Program Controlled
Time Step Safety Factor	0.9
Characteristic Dimension	Diagonals
Automatic Mass Scaling	No
Output Controls	
Step-aware Output Controls	No
Save Results on	Equally Spaced Points
Result Number Of Points	100
Save Restart Files on	Equally Spaced Points
Restart Number Of Points	5
Save Result Tracker Data on	Cycles
Tracker Cycles	1
Output Contact Forces	Off
Analysis Data Management	
Solver Files Directory	D:\Ansys\Simulation NU 3\t =...
Scratch Solver Files Directory	

รูปที่ 3.18 ค่าของ End Time และ Result Number of Points ที่ต้องกำหนด

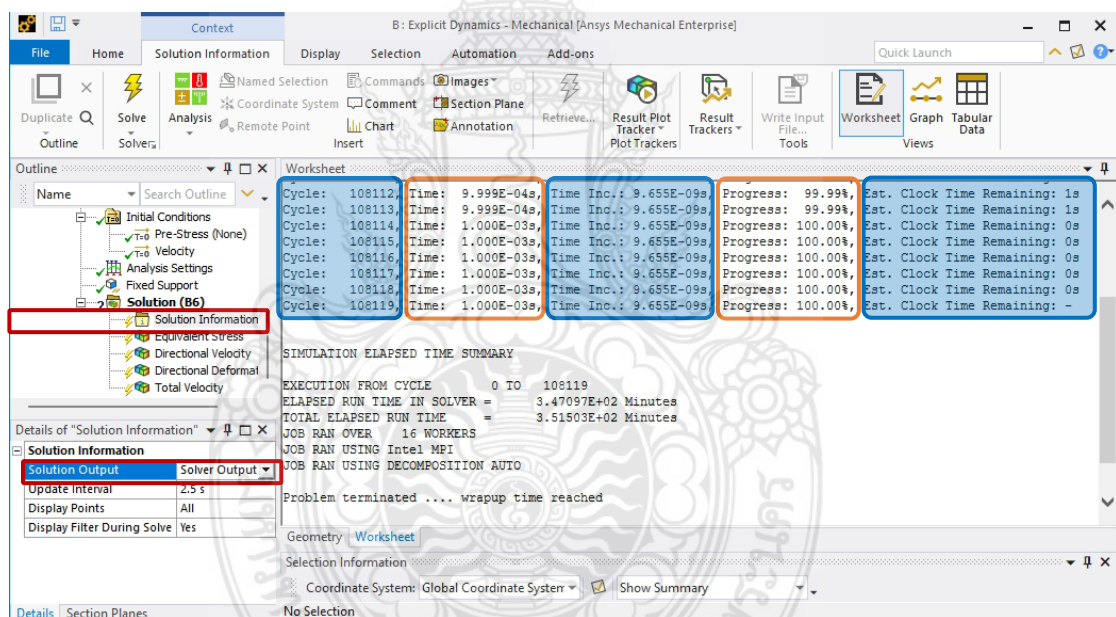


รูปที่ 3.19 การกำหนด Fixed Support

กำหนด Constrains ด้วยการกำหนดในชุดคำสั่ง Analysis Settings ใช้แถบชนิดเครื่องมือเป็นแบบ “Fixed Support” เพื่อเป็นการจับยึดผิวชิ้นงานที่บริเวณผิวด้านข้างของแผ่นเกราะทั้ง 6 แผ่นๆ ละ 4 หน้า รวมเป็น 24 หน้า ดังรูปที่ 3.19 สังเกตว่าพื้นผิวทั้งหมดที่เลือกจะแสดงสีน้ำเงินออกมา และต้องมีครบทั้ง 24 หน้า จากนั้นทำการกำหนดค่าผลลัพธ์ที่ต้องการให้วิเคราะห์ด้วยแถบชุดคำสั่ง Solution ซึ่งเป็นแถบเครื่องมือสุดท้าย ให้คลิกขวาและเลือกผลการวิเคราะห์ต่างๆ ประกอบด้วย ค่าความเค้นเทียบเท่า ความเครียด ความเร็ว การเสียรูป เป็นต้น ดังนั้นได้เลือกแถบเครื่องมือ Equivalent Stress, Total Velocity และ Total และเลือกแถบเครื่องมือแสดงผลวิเคราะห์จากนั้นเลือกคำสั่ง Solve เพื่อให้โปรแกรมได้เริ่มการคำนวณ

3.3.2 กระบวนการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Solve-Processing) [2]

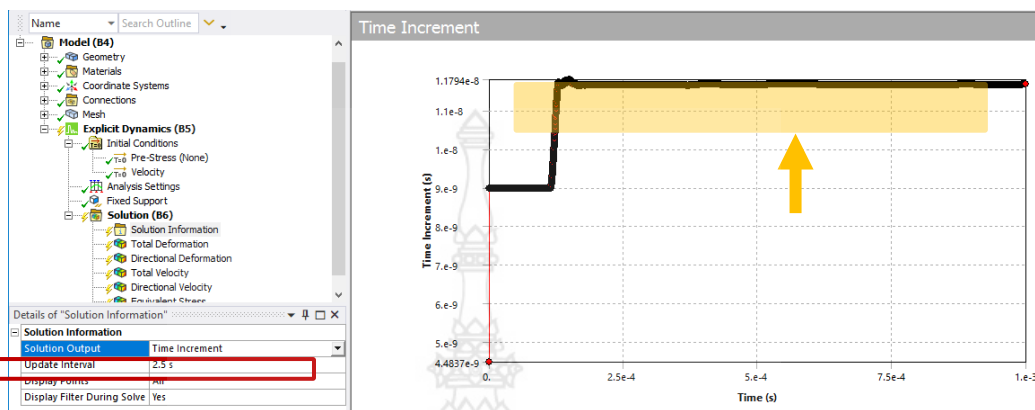
เป็นขั้นตอนการคำนวณ (Solve-Processing) วิเคราะห์ค่าต่าง ๆ โดยในขั้นตอนการเตรียมซึ่งจะมีส่วนประกอบหลักในการคำนวณอยู่ 2 ส่วน ประกอบด้วย 1) ผลการคลาดเคลื่อน (Error) และ 2) สมรรถนะของคอมพิวเตอร์ ซึ่งส่วนประกอบหลักทั้ง 2 อย่างนี้จะเป็นตัวช่วยในการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการคลาดเคลื่อน (Error) ค่าที่ยอมรับได้จากโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าไม่เกินร้อยละ 5-10 สามารถสังเกตได้จากกราฟในโปรแกรม การตรวจสอบผลการคลาดเคลื่อนจะต้องใช้ชุดคำสั่ง Solution Information ในส่วนของ Solution Output มีตัวเลือกของแถบเครื่องมืออยู่ 5 แบบด้วยกันดังรูปที่ 3.20 ประกอบด้วย 1. Solver Output ที่จะบ่งบอกเป็นจำนวนรอบวิเคราะห์ 2. Time Increment เป็นเวลาการวิเคราะห์ที่เพิ่มขึ้น 3. Energy Conservation 4. Momentum Summary 5. Energy Summary ซึ่งสามารถใช้ในการตรวจสอบการคลาดเคลื่อนในระหว่างการคำนวณของโปรแกรมได้ [2]



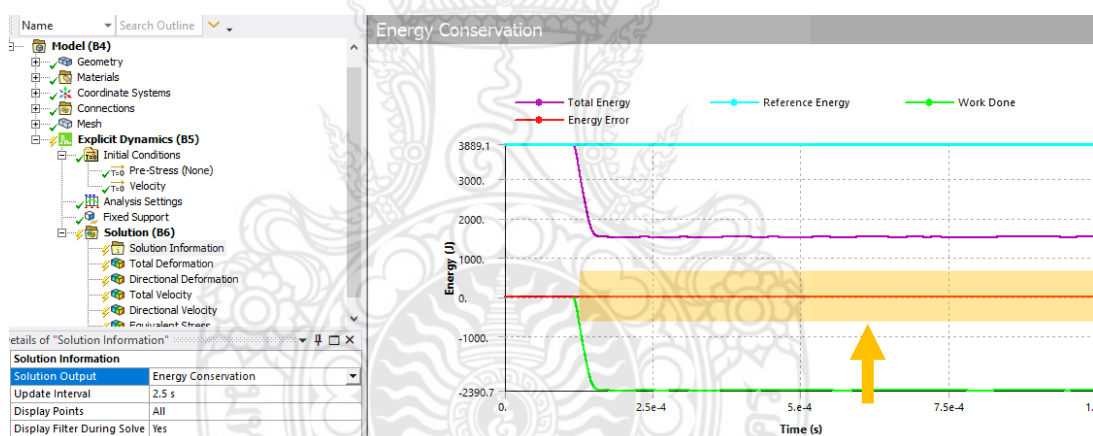
รูปที่ 3.20 ผลของ Solver Output ภายหลังจากวิเคราะห์เสร็จสมบูรณ์

ผลการวิเคราะห์จากรูปที่ 3.20 เป็น Solver Output แสดงผล เช่น จำนวนรอบในการคำนวณ (Cycle) เวลาในการคำนวณแต่ละวงรอบ (Time Step) ร้อยละของการคำนวณที่ได้ออกมา (Progress) และเวลาที่คาดว่าจะเสร็จสิ้นการคำนวณ (Clock Time Remaining) ซึ่งหากมีการผิดพลาด โปรแกรมจะหยุดการทำงานและแสดงผลสาเหตุของความผิดพลาดนั้น สำหรับ Time Increment เป็นกราฟแสดงเวลาของ Time Step ในการคำนวณของการทำงานเมื่อวัตถุเกิดการกระแทกกราฟจะเกิดการเปลี่ยนแปลงในช่วงของ Time Increment ที่สูงและหลังจากที่วัตถุเกิดการกระแทกเรียบร้อยกราฟจะลดลงและคงที่จนครบ Time Step ของการทำงานซึ่งบ่งบอกสถานะการ

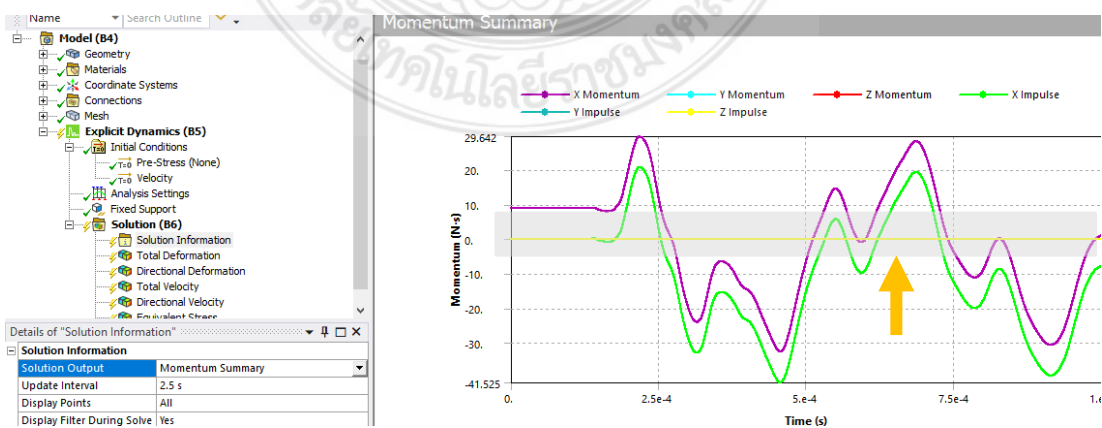
จำนวนที่ปกติไม่เกิดการคลาดเคลื่อนที่มากกว่าร้อยละ 5-10 ตามรูปที่ 3.21 ถ้าการคำนวณมีความผิดพลาดโปรแกรมจะยังทำการคำนวณต่อไปแต่หลังจากหลังวัตถุกระทบแกว่งกราฟจะมีลักษณะลดลงตาม Time Step ของการคำนวณซึ่งจะไม่คงที่บ่งบอกถึงความผิดพลาด [2]



รูปที่ 3.21 กราฟมีลักษณะคงที่ในแนวนอนแสดงถึงสถานะปกติ

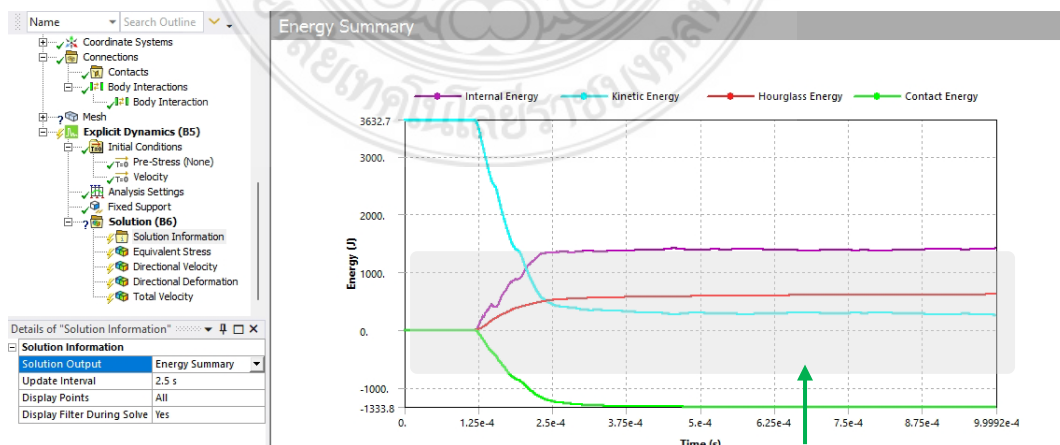


รูปที่ 3.22 เส้นกราฟ Energy Error อยู่ในสถานะปกติ



รูปที่ 3.23 เส้นกราฟ Momentum Summary อยู่ในสถานะปกติ

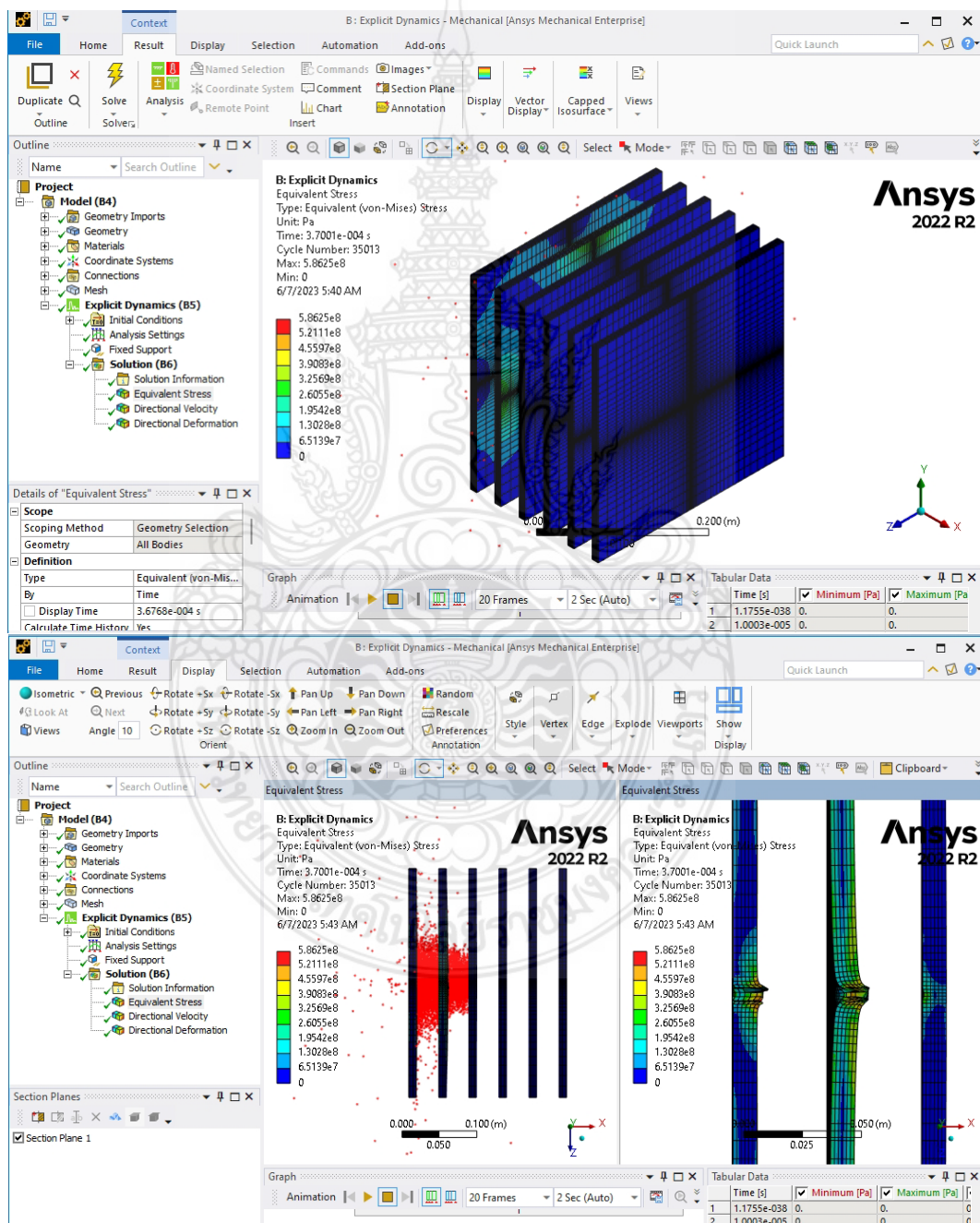
ในส่วนของการสำหรับกราฟที่แสดงค่าที่เป็นหน่วยของพลังงาน (Energy) จะเป็น Energy Conservation คือ พลังงานที่เกิดขึ้นจากการคำนวณเมื่อวัตถุเคลื่อนที่กระทบหรือชนจะแสดงพลังงานที่เกิดขึ้นเทียบกับ Time Step ของการคำนวณโดยจะแสดงค่าของพลังงานดังนี้ Total Energy, Reference Energy, Work Done และ Energy Error ในส่วนนี้เราจะสังเกตเห็นที่เส้นกราฟของ Energy Error เป็นเส้นสีแดงตามรูปที่ 3.22 ซึ่งจะแสดงลักษณะหลังจากเกิดการกระทบหรือชน เส้นกราฟจะมีลักษณะคงที่ซึ่งบ่งบอกถึงความปกติของการคำนวณ แต่ถ้ากราฟมีลักษณะวิ่งออกหรือลู่ลง ไม่อยู่ในแนวขนาน แสดงว่ามีความผิดปกติ [2] Momentum Summary คือกราฟแสดงผลค่าของ Momentum ในแต่ละแกนที่เกิดความเสียหายเทียบกับ Time Step ของการทำงานและแสดงค่าของ Impulse ในแต่ละแกนเหมือนกันซึ่งจะสามารถตรวจสอบการคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากแกนได้ หลังจากวัตถุเกิดการกระทบหรือชนแล้วมี Momentum และ Impulse แสดงผลแล้วมีความสอดคล้องกับวัตถุที่กระทบหรือชนถือว่าปกติตามรูปที่ 3.23 ในการจำลองนี้มุมมองจากด้านข้าง ขึ้นงานอยู่ในแนวแกน Z ซึ่งในเส้นสีเหลืองจะเป็นค่าของ Impulse ในแนวแกน Z เส้นกราฟจะมีลักษณะคงที่และเส้นสีแดงจะแสดงค่าของ Momentum ในแนวแกน Z ซึ่งจะไม่แสดงผลในกราฟ ดังนั้นถ้าวัตถุกระทบหรือชนแล้วไม่สอดคล้องกันถือว่ามีความผิดปกติ [2] ในส่วนของ Energy Summary จะแสดงผลของพลังงานที่เกิดขึ้นเมื่อวัตถุเกิดการชนหรือกระทบ ประกอบด้วย Internal Energy, Kinetic Energy, Hourglass Energy, Contact Energy ในการตรวจสอบการคลาดเคลื่อน จะสังเกตเห็นเส้นกราฟของ Hourglass Energy เนื่องจากจะมีผลที่เกิดจากการสร้างเมช (Mesh) แบบ Hexahedral ซึ่งค่าของ Element ทั้ง 4 จุด มีขนาดที่เท่ากันดังนั้นจะทำให้ค่าของความเครียด (Strain) เป็นศูนย์หรือเรียกว่า “Hourglass Effect” [2], [28] ดังนั้นค่าที่แสดงในกราฟของ Hourglass Energy จะแสดงเป็นเส้นสีแดงซึ่งจะต้องมีค่าน้อยกว่าเส้นสีม่วงซึ่งแสดงค่าเป็น Internal Energy ซึ่งถือว่าปกติตามรูปที่ 3.24 แต่ถ้าเส้นสีแดง Hourglass Energy มีค่ามากกว่าเส้นสีม่วง Internal Energy ซึ่งมีความผิดปกติเกิดขึ้นในการคำนวณที่มีสาเหตุมาจากการสร้างเมช (Mesh) [2]



รูปที่ 3.24 เส้นกราฟ Hourglass Energy แสดงผลที่เป็นปกติ

3.3.3 การแสดงผลการวิเคราะห์ (Post-Processing)

การแสดงผล Post-Processing ประกอบด้วย การแสดงค่าต่างๆ ที่มีให้เลือกใช้ในส่วนของ Solution ยกตัวอย่างเช่น ความเค้นที่เกิดขึ้น (Equivalent Stress) ทิศทางของความเร็ว (Directional Velocity) การเสียรูปทั้งหมด (Total Deformation) ทิศทางของการเสียรูป (Directional Deformation) ความเร็วรวมทั้งหมด (Total Velocity) และอื่นๆ อีกทั้งยังมีส่วนของ Section Plane ที่จะช่วยให้การมองผลการวิเคราะห์ได้ชัดเจนมากขึ้น ดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 3.25 ผลการวิเคราะห์ความเค้น Equivalent Stress ในบางกรณี

3.4 การเตรียมแผ่นเกราะโลหะสำหรับทดสอบการยิงกระสุน

แผ่นเกราะโลหะกันกระสุนสำหรับรถยนต์บรรทุกทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะ แผ่นเกราะโลหะได้ถูกออกแบบให้มีขนาด 300x300 มิลลิเมตร และใช้เครื่อง CNC ในการกัดชิ้นงานและเจาะของสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องมือและแม่พิมพ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.พระนคร จากรูปที่ 3.26 ด้วยความหนาที่แตกต่างกันที่ 6, 10 และ 60 มิลลิเมตร โดยใช้วัสดุ AL-7075 T6 และ AL-5083 H116 การสร้างแผ่นเกราะประกอบด้วย 1. แผ่นเรียบที่เป็นแผ่นเดี่ยว 2. แผ่นเรียบที่เป็นแผ่นซ้อนกันโดยไม่มีช่องว่างระหว่างแผ่น และ 3. แผ่นเรียบที่นำมาซ้อนกัน และมีระยะห่างระหว่างแผ่น 10 มิลลิเมตร และ 30 มิลลิเมตร มาใช้ในการทดสอบ ทำการเจาะรูจำนวน 8 รู ที่ด้านข้างของแผ่นเกราะดังรูปที่ 3.27 เพื่อใช้ในการยึดแผ่นเกราะเข้าด้วยกันและปรับระยะห่างระหว่างแผ่นให้เท่ากันด้วยการใช้สลักเกลียวยาวและนัท



รูปที่ 3.26 ตัวอย่างชิ้นส่วนแผ่นโลหะที่นำมาประกอบเป็นแผ่นเกราะโลหะ



รูปที่ 3.27 แผ่นเกราะโลหะกันกระสุนที่ประกอบเสร็จแล้วรอการทดสอบ

บทที่ 4

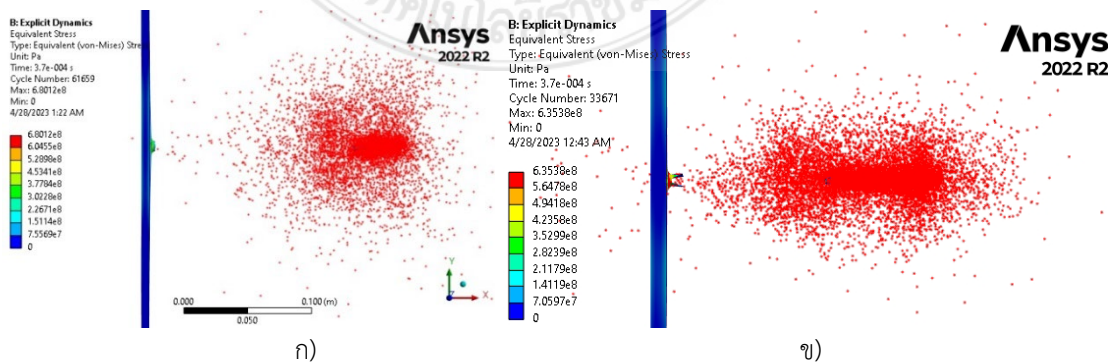
ผลการดำเนินงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการดำเนินการวิจัยทั้งหมดที่ได้ทำการดำเนินการด้วยกระบวนการที่อธิบายไว้ในบทที่ 3 ประกอบด้วย ผลการทดสอบการยิงกระสุนลงบนแผ่นเกราะอลูมิเนียม ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลการเปรียบเทียบและกรณีศึกษาต่างๆ ซึ่งผลที่ได้จะนำไปสู่การต่อยอดงานวิจัยอื่นๆ ได้ต่อไป โดยรายละเอียดผลการดำเนินการได้มีการแยกอธิบายตามกลุ่มการทดลองที่จะกล่าวถึงดังต่อไปนี้

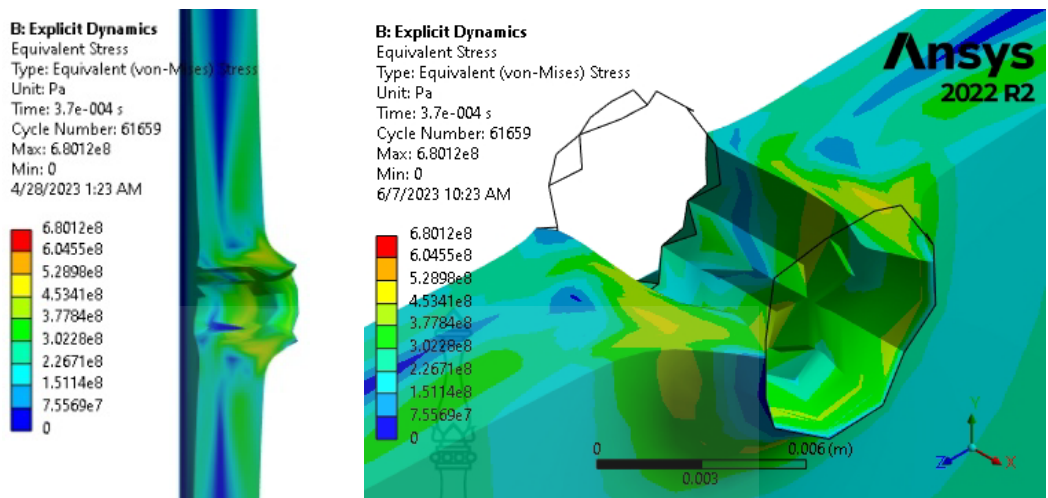
4.1 ผลการวิเคราะห์และอภิปรายผล

รูปแบบการวิเคราะห์แบ่งออกเป็นกรณีศึกษาดังนี้

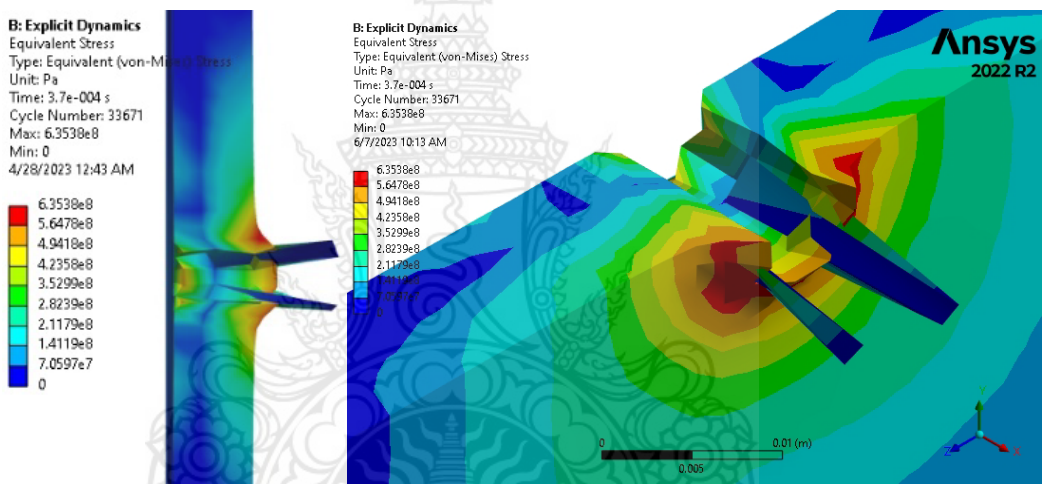
4.1.1 กรณีแผ่นเกราะอลูมิเนียม 7075 T6 แผ่นเดียวที่มีความหนา 6, 10 และ 60 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.1-4.3 และจากรูปที่ 4.1 เป็นการศึกษาการเจาะทะลุของกระสุนโดยจำลองการกระแทกของกระสุนลงบนแผ่นอลูมิเนียมที่มีความหนาตั้งแต่ 6 มิลลิเมตร และ 10 มิลลิเมตร เพื่อศึกษาแนวโน้มของการเจาะทะลุเทียบกับความหนาของแผ่นอลูมิเนียม ซึ่งพบว่าไม่สามารถต้านทานการเจาะทะลุได้ ดังนั้นจึงได้ทำการสร้างโมเดลแผ่นอลูมิเนียมที่มีความหนา 60 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งคาดการณ์ว่าเป็นความหนาที่มากพอที่จะสามารถต้านทานการเจาะทะลุได้ โดยมุ่งหวังให้เห็นภาพหรือร่องรอยของการเจาะทะลุของกระสุน และนำไปสู่การวิเคราะห์ในกรณีอื่นๆ ต่อไป ได้ผลดังรูปที่ 4.2 (ค) สำหรับแบบจำลองที่มีความหนาเพิ่มขึ้นเท่ากับ 60 มิลลิเมตร จะเห็นการเจาะทะลุลึกเข้าไปเป็นระยะทาง 40 มิลลิเมตร อย่างชัดเจน ในทุกกรณีพบว่าความเค้นสูงสุด (Von-Mises Stress) จะเกิดขึ้นที่พื้นผิวด้านหลังของแผ่นเกราะ ความเค้นจะกระจายตัวออกเป็นวงกว้าง เมื่อมองในภาคตัดดังรูปที่ 4.2 (ค) จะเห็นความเค้นกระจายตัวออกเป็นรูปโดม ซึ่งความหนาเป็นพารามิเตอร์สำคัญตัวหนึ่ง ดังนั้นจึงต้องวิเคราะห์ต่อไปในกรณีอื่นเพื่อศึกษาพารามิเตอร์อื่นที่เกี่ยวข้อง



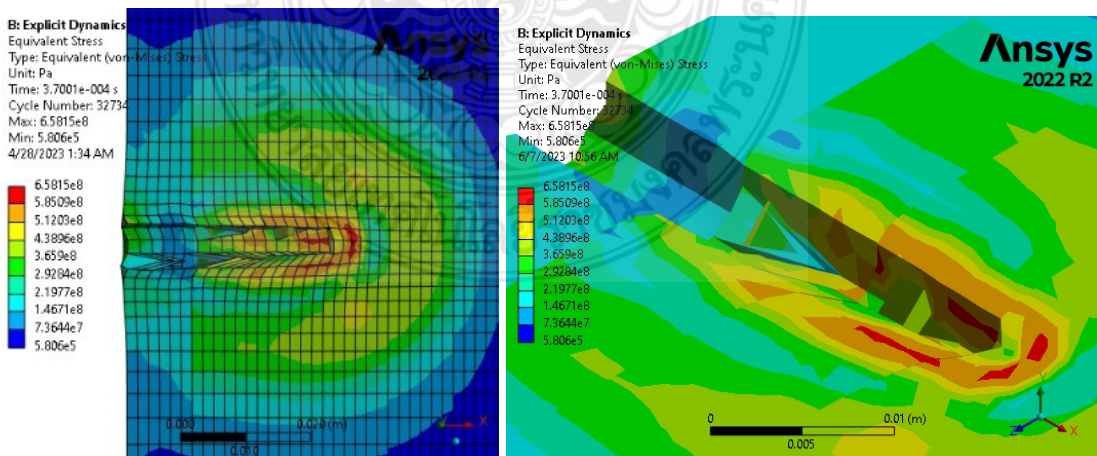
รูปที่ 4.1 วัสดุ AL-7075 T6 ก) ที่ความหนา 6 มิลลิเมตร และ ข) ความหนา 10 มิลลิเมตร



ก)



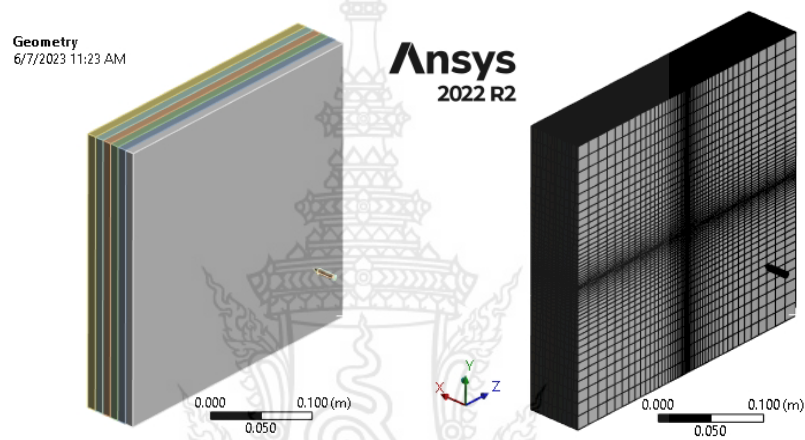
ข)



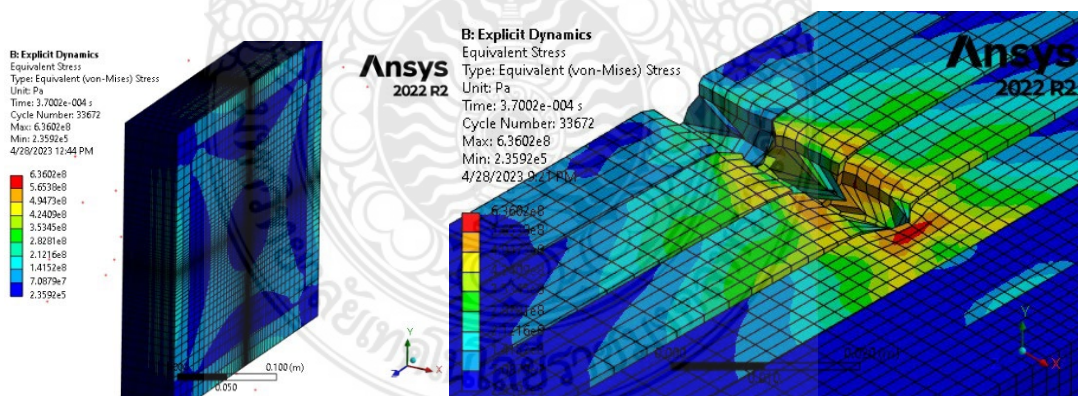
ค)

รูปที่ 4.2 ความสามารถในการเจาะทะลุแผ่นเกราะที่ทำจากวัสดุ AL-7075 T6 ที่ความหนาต่าง ๆ
 ก) ความหนา 6 มิลลิเมตร ข) ความหนา 10 มิลลิเมตร และ ค) ความหนา 60 มิลลิเมตร

4.1.2 กรณีแผ่นเกราะเรียงซ้อน 6 แผ่นๆ ละ 10 มิลลิเมตร กำหนดคู่สัมผัสระหว่างแผ่นเกราะเป็นแบบ Frictionless ดังรูปที่ 4.3-4.4 ดำเนินการแบ่งเอลิเมนต์ด้วยเทคนิคการควบคุมขนาดเอลิเมนต์ให้เหมาะสม ซึ่งมีจำนวนเอลิเมนต์สูงแสดงผลการแบ่งเอลิเมนต์ดังรูปที่ 4.3 อีกทั้งยังมีหน้าสัมผัสที่ต้องใช้เวลาในการวิเคราะห์ที่ยาวนาน โดยหน้าสัมผัสระหว่างแผ่นแต่ละแผ่นเป็นแบบ Frictionless ส่งผลให้เกิดการสั่นของแผ่นซึ่งกันและกัน ผลวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่าแผ่นแรกที่กระสุนเข้าปะทะ แผ่นเกราะจำนวน 3 แผ่นแรกไม่สามารถต้านทานได้อย่างสมบูรณ์ แต่กระสุนจะไปหยุดในแผ่นเกราะที่ 4 นั่นคือเกิดรูเจาะทะลุลึก 32 มิลลิเมตร ซึ่งน้อยกว่ากรณีที่ 4.1.1 ดังรูป 4.2 ค)



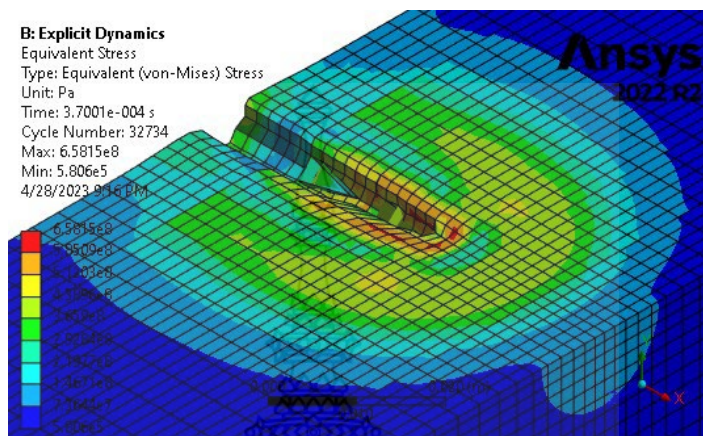
รูปที่ 4.3 แผ่นเกราะวัสดุ AL-7075 T6 จำนวน 6 แผ่น โดยมีความหนาแผ่นละ 10 มิลลิเมตร



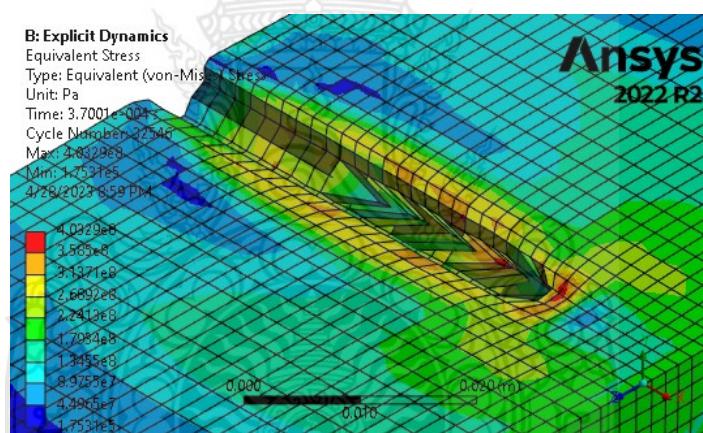
รูปที่ 4.4 ผลการจำลองด้วยวัสดุ AL-7075 T6 แผ่นซ้อน 6 ชั้น ไม่มีช่องว่างและใช้ Frictionless

4.1.3 กรณีแบบจำลองที่มีแผ่นเกราะหนา 60 มิลลิเมตร ด้วยวัสดุ AL-7075 T6 และวัสดุ AL-5083 H116 ดังรูปที่ 4.6 พบว่าแผ่นวัสดุ AL-7075 T6 สามารถต้านทานการเคลื่อนที่เข้าปะทะของกระสุนได้ดีกว่าแผ่นวัสดุ AL-5083 H116 ซึ่งส่งผลให้เกิดรูทะลุที่แผ่นเกราะวัสดุ AL-7075 T6 และแผ่นเกราะด้วยวัสดุ AL-5083 H116 เท่ากับ 38 และ 47 มิลลิเมตร ตามลำดับ และจากตารางที่ 4.1

จะพบว่า AL-7075 T6 มีองค์ประกอบทางเคมีของธาตุบางอย่างที่สำคัญ ได้แก่ ไททาเนียม ทองแดง และโครเมียม เมื่อเปรียบเทียบกับ AL-5083 H116 จึงส่งผลให้ AL-7075 T6 มีความแข็งแรงทนทาน ได้ดีกว่า AL-5083 H116 ซึ่งไปสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ถึงความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุได้ดีกว่า



ก)



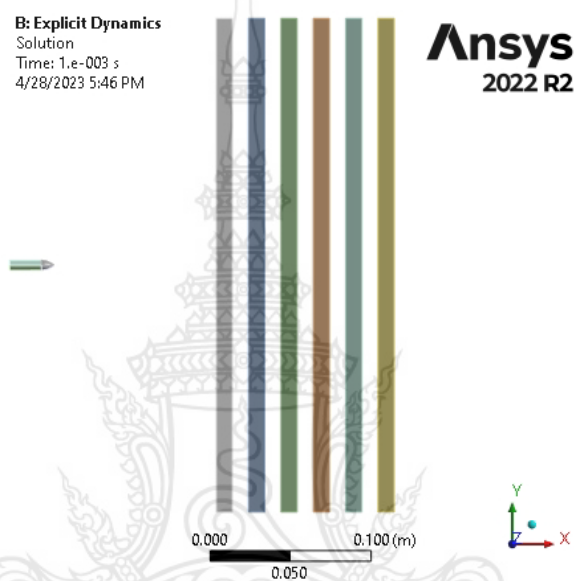
ข)

รูปที่ 4.5 ผลการจำลองด้วยแผ่นเกราะที่มีความหนา 60 มิลลิเมตร ก) แผ่นเกราะ AL-7075 T6
 ข) แผ่นเกราะ AL-5083 H116

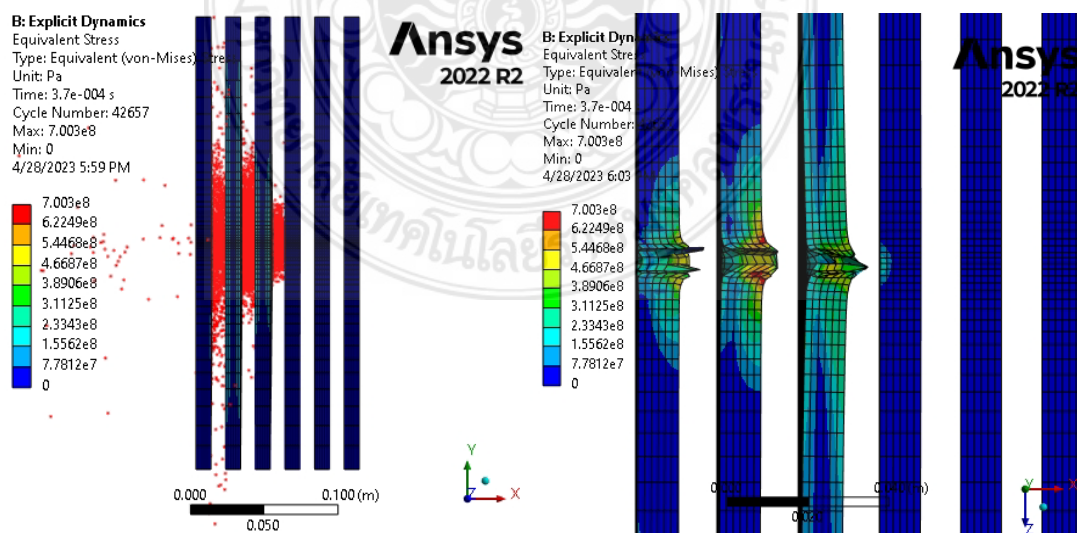
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของ AL-5083 H116 และ AL-7075 T6

Material	ซิลิกอน (Si)	เหล็ก (Fe)	ทองแดง (Cu)	ไททา เนียม (Ti)	แมกนีเซียม (Mg)	สังกะสี (Zn)	แมงกานีส (Mn)	โครเมียม (Cr)	อื่นๆ
AL 5083 H116	0.40	0.40	0.10	0.15	4.00 - 4.90	0.25	0.40 - 1.00	0.05 - 0.25	0.05
AL-7075 T6	0.40	0.05	1.20 - 2.00	0.20	2.10 - 2.90	5.10 - 6.10	0.30	0.18 - 0.28	0.05

4.1.4 กรณีการจำลองแผ่นเกราะเรียงซ้อนจำนวน 6 แผ่น ซึ่งมีความหนาแผ่นละ 10 มิลลิเมตร ด้วยวัสดุ AL-7075 T6 และวัสดุ AL-5083 H116 ดังรูปที่ 4.6 ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.7 พบว่า หากเป็นแผ่นวัสดุ AL-7075 T6 จะเกิดการเจาะทะลุผ่านทั้ง 3 แผ่น และกระสุนไปหยุดอยู่ที่แผ่นที่ 4 แต่สำหรับแผ่นวัสดุ AL-5083 H116 จะเจาะทะลุผ่านทั้ง 4 แผ่นและกระสุนไปหยุดอยู่ที่แผ่นเกราะที่ 5 นั้นยิ่งแสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบทางเคมีหรือทางโครงสร้างมีผลต่อความสามารถในด้านทานการเจาะทะลุอย่างมีนัยสำคัญ สอดคล้องกับกรณีที่ 4.1.3

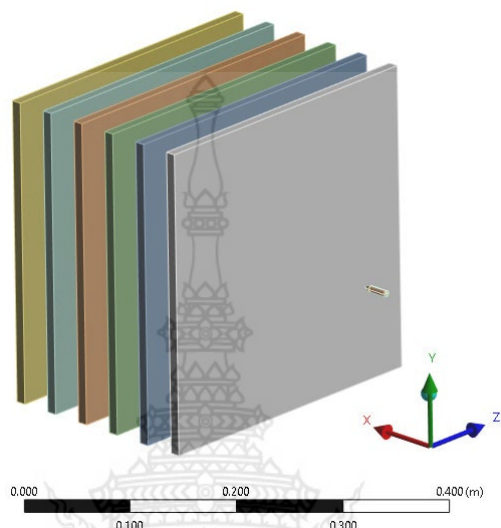


รูปที่ 4.6 แผ่นเกราะวัสดุ AL-7075 T6 จำนวน 6 แผ่น แต่ละแผ่นมีความหนา 10 มิลลิเมตร ด้วยระยะห่างระหว่างแผ่น 10 มิลลิเมตร

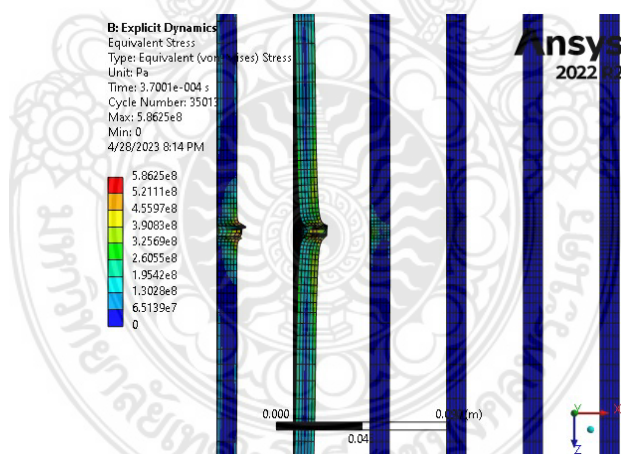


รูปที่ 4.7 ผลการจำลองแผ่นเกราะเรียงซ้อน 6 แผ่น ระยะห่างแต่ละแผ่น 10 มิลลิเมตร ด้วยวัสดุอะลูมิเนียม 7075 T6, ความเร็วกระสุนเท่ากับ 850 เมตรต่อวินาที

4.1.5 กรณีแผ่นเกราะมีช่องว่างระหว่างแผ่นเกราะเพิ่มขึ้นจากเดิม 10 มิลลิเมตร เป็น 30 มิลลิเมตร และเลือกใช้วัสดุ AL-7075 T6 ดังรูปที่ 4.8 พบว่าความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุจะเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.9 โดยเจาะทะลุผ่านเพียง 2 แผ่น และไปหยุดที่แผ่นที่ 3 แสดงให้เห็นว่าระยะห่างระหว่างแผ่นที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการต้านทานการเจาะทะลุ



รูปที่ 4.8 แผ่นเกราะวัสดุ AL-7075 T6 จำนวน 6 แผ่นๆ ละ 10 มิลลิเมตร
ด้วยระยะห่างระหว่างแผ่น 30 มิลลิเมตร

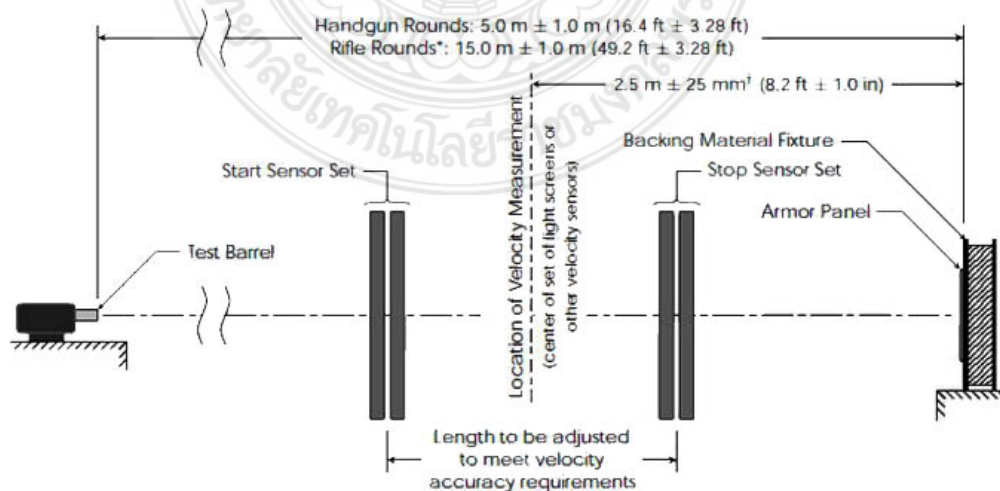


รูปที่ 4.9 ผลการจำลองแผ่นเกราะเรียงซ้อน 6 แผ่น ระยะห่างแต่ละแผ่น 30 มิลลิเมตร
ด้วยวัสดุอลูมิเนียม 7075 T6, ความเร็วกระสุนเท่ากับ 850 เมตรต่อวินาที

4.2 ผลการดำเนินงานเตรียมการยิงกระสุนลงบนแผ่นเกราะโลหะ

การทดสอบการยิงแผ่นเกราะตามมาตรฐาน NIJ จะดำเนินการตามที่กล่าวในบทที่ 3 กระบวนการทดสอบการยิงต้องให้ได้ความเร็วของกระสุนเป็นไปตามมาตรฐาน ณ โรงงานวัตถุระเบิดทหาร กรมการอุตสาหกรรมป้องกันประเทศและพลังงาน (Military Explosives Factory, Defence

Industry Department, Defence Industry and Energy Centre) ตำบลย่านมัทรี อำเภอพุนพิน จังหวัดนครศรีธรรมราช จะมีนายทหารเป็นทีมทำงานการทดสอบ ซึ่งต้องเตรียมเครื่องทดสอบและชุดควบคุมดังรูปที่ 4.10-4.12 เครื่องยิงตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 จะใช้กระสุนขนาด 7.62x51 มิลลิเมตร NATO M80 Ball หนัก 9.6 กรัม มีความเร็ว 847 ± 9.1 เมตรต่อวินาที (2780 ± 30 ฟุตต่อวินาที) ที่มุม 0 องศา และในการป้อนค่าความเร็วกระสุนในโปรแกรม ANSYS จะทำการป้อนค่าความเร็วที่ 850 เมตรต่อวินาที การเตรียมกระสุนจะต้องทำการบรรจุดินปืนลงในปลอกกระสุนใหม่ทุกครั้งเพื่อให้ได้น้ำหนักของดินปืนที่เหมาะสม และต้องมีการทดสอบความเร็วในการยิงควบคุมไปด้วย เนื่องด้วยความปลอดภัยในห้องทดสอบการยิงจะไม่อนุญาตให้บุคคลทั่วไปเข้าไปในห้องทดสอบ ตามมาตรฐานจะต้องกำหนดอุณหภูมิห้องและความชื้นในการทดสอบด้วยที่อุณหภูมิ $21 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ $50\% \pm 20\%$ เท่านั้น อีกทั้งยังต้องตรวจสอบระยะห่างจากปากลำกล้องปืนทดสอบไปยังแผ่นเกราะที่จะยิงเท่ากับ $15.0 \text{ เมตร} \pm 1.0 \text{ เมตร}$ ตามรูปที่ 4.10-4.11 ชุดอุปกรณ์การยึดแผ่นเกราะหรือเรียกว่า “กระเบววัสดุหนุน” ดังรูปที่ 4.12 จะถูกออกแบบให้สามารถใส่แผ่นเกราะที่มีขนาด 300×300 มิลลิเมตร กระเบววัสดุหนุนจะต้องยึดอย่างแน่นหนากับแท่นยึด รวมทั้งด้านหน้าของวัสดุหนุนสามารถรองรับแผ่นเกราะได้ทั้งหมด ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน NIJ ทุกประการ ในการทดสอบจะต้องมีการทดลองเพื่อหาตำแหน่งการกระทบของกระสุนบนแผ่นเกราะ เพราะการเคลื่อนที่ของกระสุนจะเป็นวิถีโค้งแม้ว่าจะมีระยะทางสั้นเพียง 15 เมตร ดังนั้นการหักเหของกระสุนจะต้องไม่เกิน 5 องศาจากแนวทิศที่กำหนด เครื่องวัดความเร็วกระสุนในรูปที่ 4.13 ที่ใช้ทดสอบจะมีอย่างน้อย 2 ชุด และสามารถตรวจจับความเร็วกระสุนได้ในระยะตั้งแต่ 3 เมตรขึ้นไป เครื่องคำนวณจะต้องบันทึกค่าเฉลี่ยความเร็วกระสุน ที่มีค่าผิดพลาดได้น้อยกว่า 1.0 เมตรต่อวินาที สำหรับมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 จะใช้กระสุนขนาด 7.62x51 มิลลิเมตร NATO M80 Ball หนัก 9.6 กรัม มีความเร็ว 847 ± 9.1 เมตรต่อวินาที (2780 ± 30 ฟุตต่อวินาที) [2] และรูปที่ 4.14 เป็นแผ่นเกราะทดสอบ



รูปที่ 4.10 ตำแหน่งอุปกรณ์ต่างๆ และระยะการยิงตามมาตรฐาน NIJ [27]



รูปที่ 4.11 เครื่องยิงกระสุนและเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับบันทึกผลและควบคุม



รูปที่ 4.12 การจัดเตรียมกระเบาะวัสดุหนุ่นเพื่อรองรับแผ่นเกราะที่จะยิงและการติดตั้งแผ่นพิสูจน์



รูปที่ 4.13 กล้องวัดความเร็วกระสุนตามมาตรฐาน NIJ

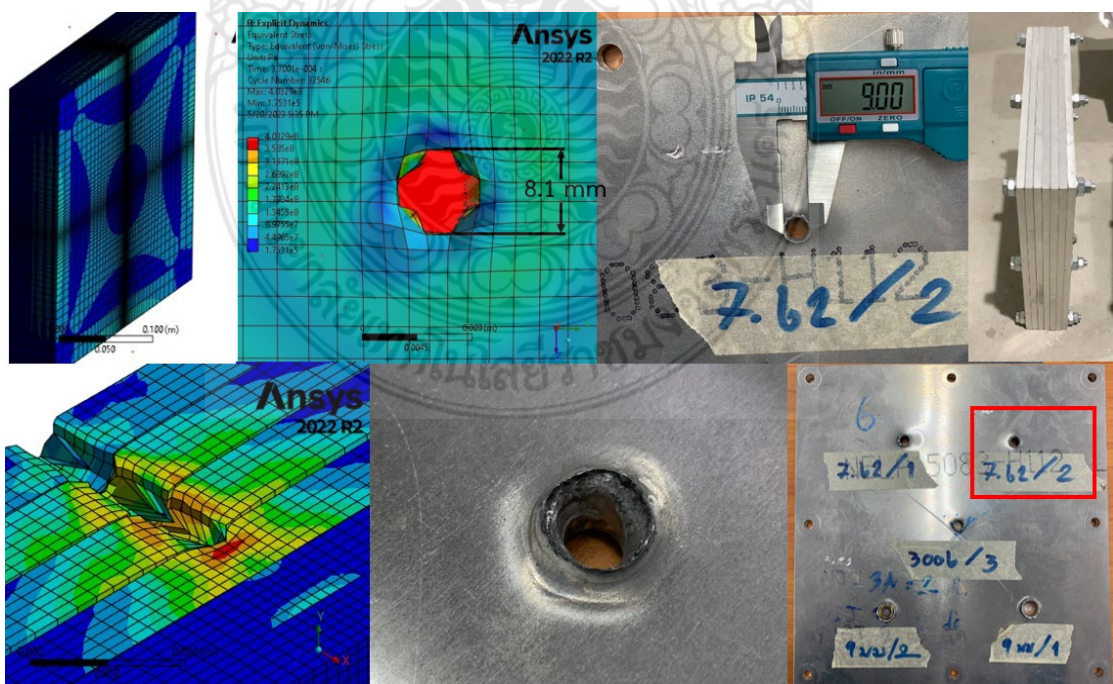


รูปที่ 4.14 แผ่นเกราะกันกระสุนสำหรับการทดสอบ

การทดสอบนั้นเป็นไปตามมาตรฐาน NIJ และภายใต้ข้อกำหนดใน American National Standard Institute/ Sporting Arms and Ammunition Manufacturer's Institute (ANSI /SAAMI) ซึ่งประเทศไทยและอีกหลายประเทศทั่วโลกใช้มาตรฐานสำหรับการทดสอบเกราะป้องกันกระสุนด้วยเช่นกัน ตามมาตรฐานได้กำหนดลักษณะสำหรับลำกล้องทดสอบและการติดตั้งลำกล้องทดสอบไว้ จึงไม่สามารถใช้อาวุธปืนทั่วไปมาทำการยิงแทนได้ สำหรับลำกล้องทดสอบจะมีความยาวของลำกล้องปืนจะต้องไม่น้อยกว่าที่กำหนดใน ANSI /SAAMI อย่างไรก็ตามลำกล้องที่ยาวกว่าอาจนำมาใช้ยิงได้หากจำเป็นจะต้องใช้กระสุนเฉพาะชนิดนั้น และลำกล้องปืนที่มีรังเพลิงไม่ได้ตามมาตรฐานสามารถนำมายิงประเมินขีดจำกัดทางซีปนวิธีได้ การติดตั้งกับแท่นปืนให้สามารถใช้ร่วมกันได้หลายขนาด การยึดต้องแน่นหนาและทนทานต่อการยิงหลายนัดติดต่อกัน รูปที่ 4.13 จะมีแผ่นพิสูจน์อยู่หลังแผ่นเกราะที่จะทดสอบการยิง หากแผ่นเกราะเกิดการทะลุ ย่อมมีเศษวัสดุออกมา หากทำให้แผ่นพิสูจน์มีรอยทะลุ จะแสดงว่าแผ่นเกราะนั้นไม่สามารถต้านทานการเจาะทะลุได้

4.3 ผลการทดสอบจริงและการเปรียบเทียบผลการยิงกระสุนกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

สำหรับการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ ในกรณีที่ 4.1.2 กรณีแผ่นเกราะเรียงซ้อน 6 แผ่นๆ ละ 10 มิลลิเมตร กำหนดคู่สัมผัสระหว่างแผ่นเกราะเป็นแบบ Frictionless ดังรูปที่ 4.3-4.4 ได้ผลการเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะจากการทดลองเท่ากับ 9.0 มิลลิเมตร และจากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เท่ากับ 8.1 มิลลิเมตร มีผลแตกต่าง 10% ซึ่งอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ [2]

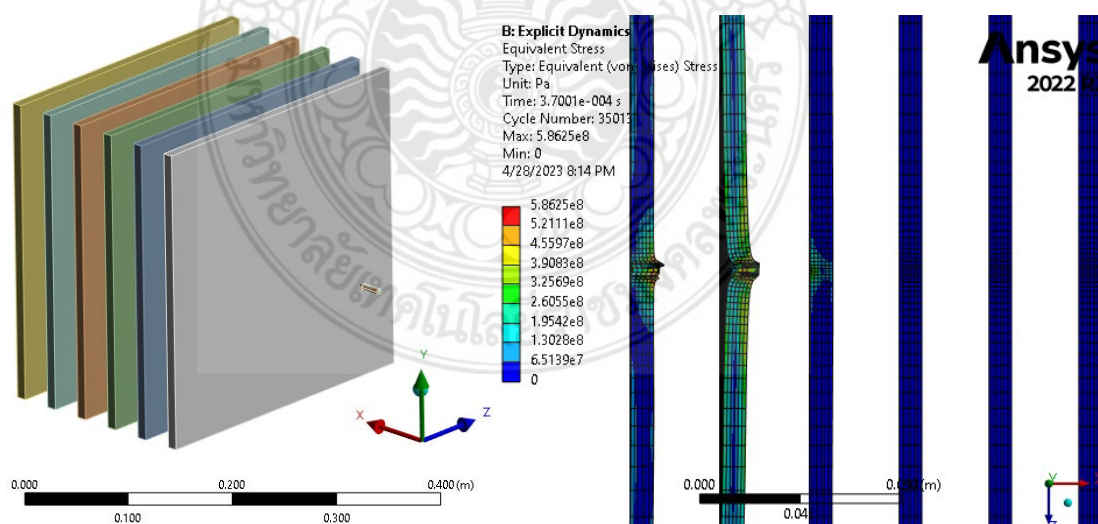


รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ และลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้น

สำหรับการทดสอบตามมาตรฐาน NIJ 3 สำหรับกรณี 4.1.5 แผ่นเกราะมีช่องว่างระหว่างแผ่นเกราะเพิ่มขึ้นจากเดิม 10 มิลลิเมตร เป็น 30 มิลลิเมตร และเลือกใช้วัสดุ AL-7075 T6 ดังรูปที่ 4.8 เป็นแผ่นเกราะ 6 แผ่น เรียงซ้อนกันแบบเว้นระยะห่างระหว่างแผ่น 30 มิลลิเมตร ขนาด 300 x 300 มิลลิเมตร ด้วยกระสุนขนาด 7.62x51 มิลลิเมตร NATO M80 Ball หนัก 9.6 กรัม มีความเร็ว 847 ± 9.1 เมตรต่อวินาที (2780 ± 30 ฟุตต่อวินาที) ในการป้อนค่าความเร็วกระสุนในโปรแกรม ANSYS จะทำการป้อนค่าความเร็วเท่ากับ 847 เมตรต่อวินาที พบว่าผลที่ได้คือแผ่นเกราะทั้ง 2 แผ่นเกิดการเจาะทะลุอย่างสมบูรณ์และแผ่นที่ 3 ไม่เจาะทะลุแต่จะเป็นรอยนูนออกมาเพียงเล็กน้อยตามรูปที่ 4.16 และให้ผลที่สอดคล้องกันกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ดังรูปที่ 4.17



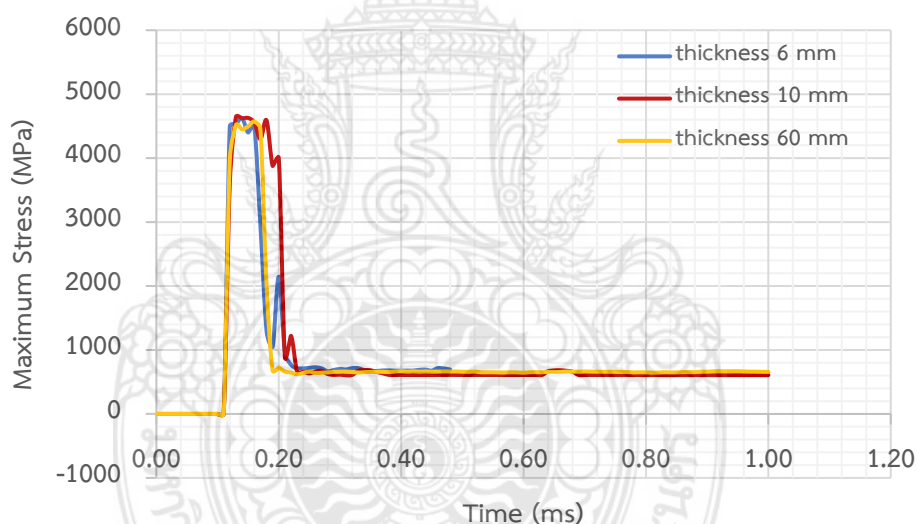
รูปที่ 4.16 ผลการทดสอบยิงจริงตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3



รูปที่ 4.17 ผลการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วย ANSYS รอยเจาะของกระสุนทะลุผ่านแผ่นเกราะ 2 แผ่น และไปหยุดที่แผ่นเกราะแผ่นที่ 3

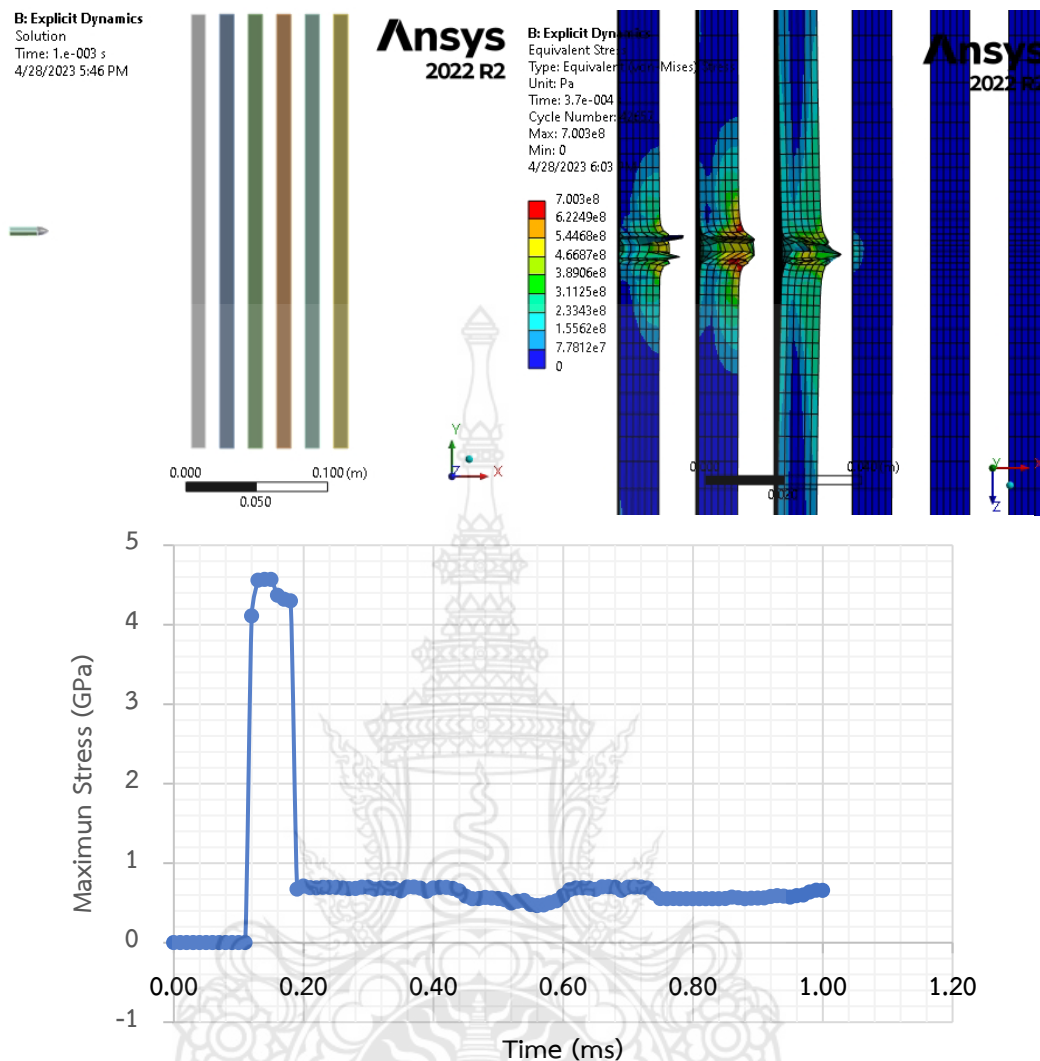
4.4 ผลการวิเคราะห์ความเค้นสูงสุด (Von-Mises Stress)

วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองความเสียหายของแผ่นเกราะกันกระสุนและวิธีการทดสอบยิงจริง พบว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นกับแผ่นเกราะนั้นมีความสอดคล้องกันซึ่งนั้นสามารถเชื่อถือได้โดยพิจารณาจากรูปแบบความเสียหาย รอยร้าวที่เกิดขึ้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ เป็นต้น ดังนั้นจึงได้ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองความเสียหายของแผ่นเกราะที่สามารถต้านทานการเจาะทะลุของมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 ได้ จากกระบวนการเตรียมโมเดลเพื่อจำลองและการตั้งค่าเริ่มต้น (Pre-Processing) จนถึงขั้นตอนการคำนวณด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Solve-Processing) จากที่กำหนดไว้บนทที่ผ่านมา โมเดลแบบจำลองแบ่งออกเป็น 4 รูปแบบ คือ 1) รูปแบบแผ่นเกราะแบบชั้นเดียว 2) รูปแบบแผ่นเกราะแบบ 6 แผ่นเรียงซ้อนกันโดยไม่มีระยะห่างระหว่างแผ่น 3) รูปแบบแผ่นเกราะแบบ 6 แผ่นเรียงซ้อนกันมีระยะห่างระหว่างแผ่น 10 มิลลิเมตร 4) รูปแบบแผ่นเกราะแบบ 6 แผ่นเรียงซ้อนกันมีระยะห่างระหว่างแผ่น 30 มิลลิเมตร และผลที่ได้จากการจำลองนั้นแสดงเป็นขั้นตอนของการแสดงผลหรือ “Post-Processing”



รูปที่ 4.18 ความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นเทียบกับเวลาสำหรับวัสดุ AL-7075 T6

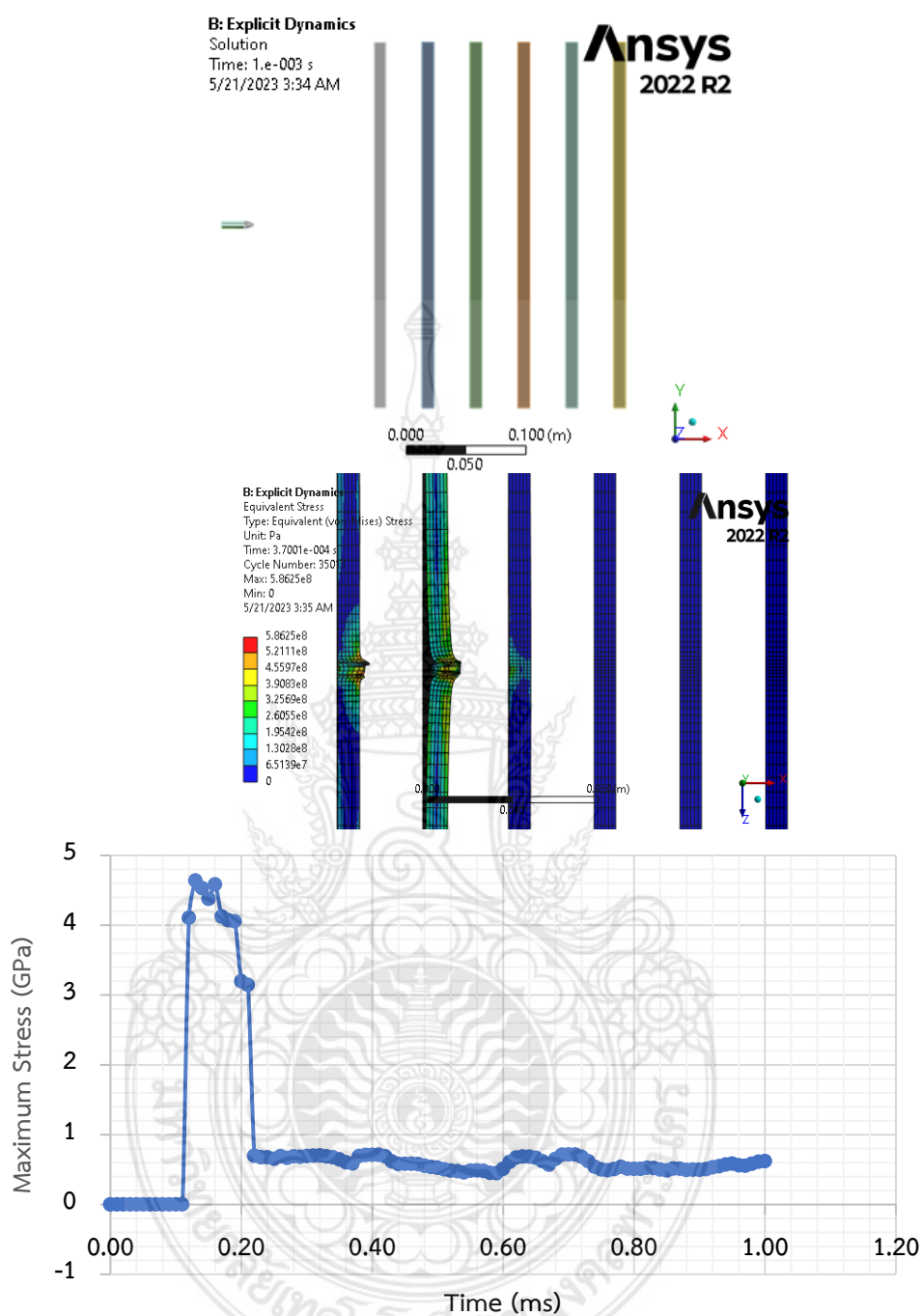
จากกรณีศึกษา 4.1.1 แผ่นเกราะอลูมิเนียม AL-7075 T6 แผ่นเดี่ยวที่มีความหนา 6, 10 และ 60 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.1-4.2 ได้รับการจำลองการปะทะพบว่ามีค่าความเค้นสูงชันมากที่สุดเมื่อกระสุนปะทะแผ่นเกราะ และเมื่อแผ่นเกราะสามารถต้านทานการเจาะทะลุได้จนเมื่อความเร็วของกระสุนลดลงความเค้นและพลังงานจลน์ก็ลดลงตามลำดับ แสดงค่าความเค้นที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 4.18 ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ความหนาทั้ง 3 ขนาดให้ค่าความเค้นสูงสุดอยู่ที่ 4.49 GPa จากรูปที่ 4.19 กรณีการจำลองแผ่นเกราะเรียงซ้อนจำนวน 6 แผ่น ซึ่งมีความหนาแผ่นละ 10 มิลลิเมตร ด้วยวัสดุ AL-7075 แผ่นมีขนาด 300 x 300 มิลลิเมตร แบบเว้นระยะห่างระหว่างแผ่นเท่ากับ 10 มิลลิเมตร ความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นเท่ากับ 4.57 GPa



รูปที่ 4.19 ความเค้นสูงสุดและการเสียรูปของแผ่นเกราะสำหรับวัสดุ AL-7075 T6 เรียงซ้อนกันแบบมีระยะห่างระหว่างแผ่น 10 มิลลิเมตร

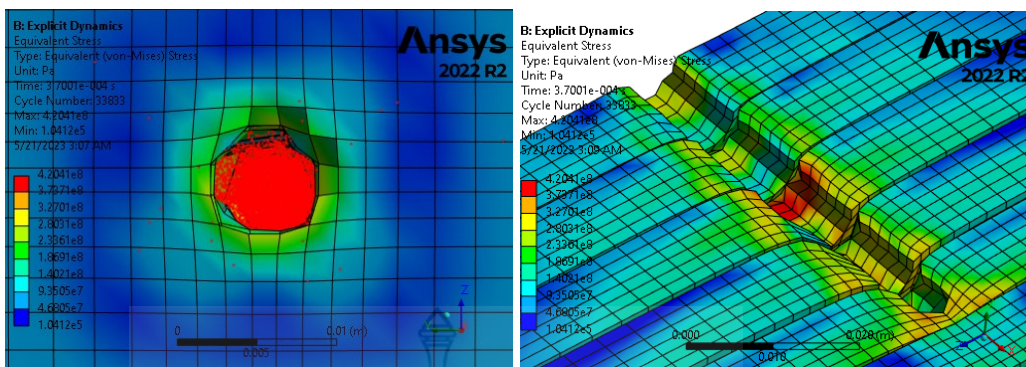
จากรูปที่ 4.19-4.20 เป็นจากวัสดุ AL-7075 T6 และ AL-5083 H116 มีความหนา 10 มิลลิเมตร ขนาด 300 x 300 มิลลิเมตร เป็นแผ่นเกราะ 6 แผ่น เรียงซ้อนกันแบบเว้นระยะห่างระหว่างแผ่น 10 มิลลิเมตร พบว่าผลที่ได้คือแผ่นเกราะทั้ง 3 แผ่นเกิดการเจาะทะลุอย่างสมบูรณ์และแผ่นที่ 4 ไม่เจาะทะลุแต่จะเป็นรอยนูนออกมาเพียงเล็กน้อย

จากรูปที่ 4.20 ด้วยวัสดุ AL-7075 T6 และ AL-5083 H116 มีความหนา 30 มิลลิเมตร ขนาด 300 x 300 มิลลิเมตร เป็นแผ่นเกราะ 6 แผ่น เรียงซ้อนกันแบบเว้นระยะห่างระหว่างแผ่น 10 มิลลิเมตร พบว่าผลที่ได้คือแผ่นเกราะทั้ง 2 แผ่นเกิดการเจาะทะลุอย่างสมบูรณ์และแผ่นที่ 3 ไม่เจาะทะลุแต่จะเป็นรอยนูนออกมาเพียงเล็กน้อย ดังนั้น ถ้าเพิ่มระยะห่างระหว่างแผ่นที่ 30 มิลลิเมตร พบว่าจะเพิ่มขีดความสามารถในการป้องกันการเจาะทะลุของกระสุนได้ดีกว่า

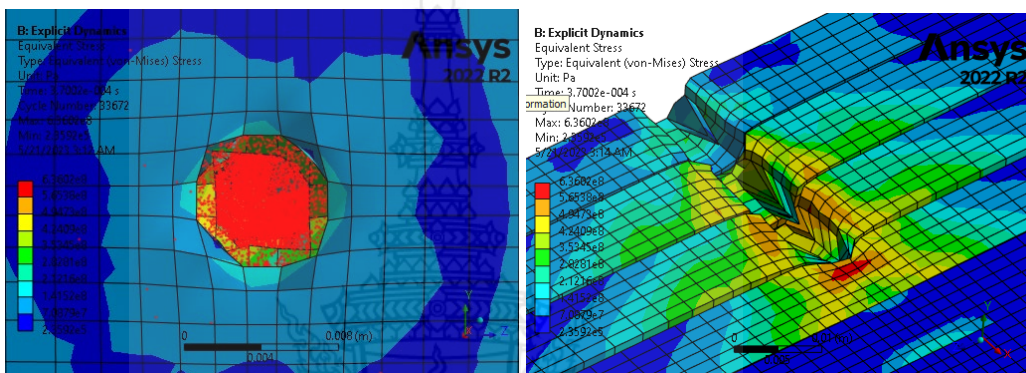


รูปที่ 4.20 ความเค้นสูงสุดและการเสียรูปของแผ่นเกราะสำหรับวัสดุ AL-7075 T6 เรียงซ้อนกันแบบมีระยะห่างระหว่างแผ่น 30 มิลลิเมตร

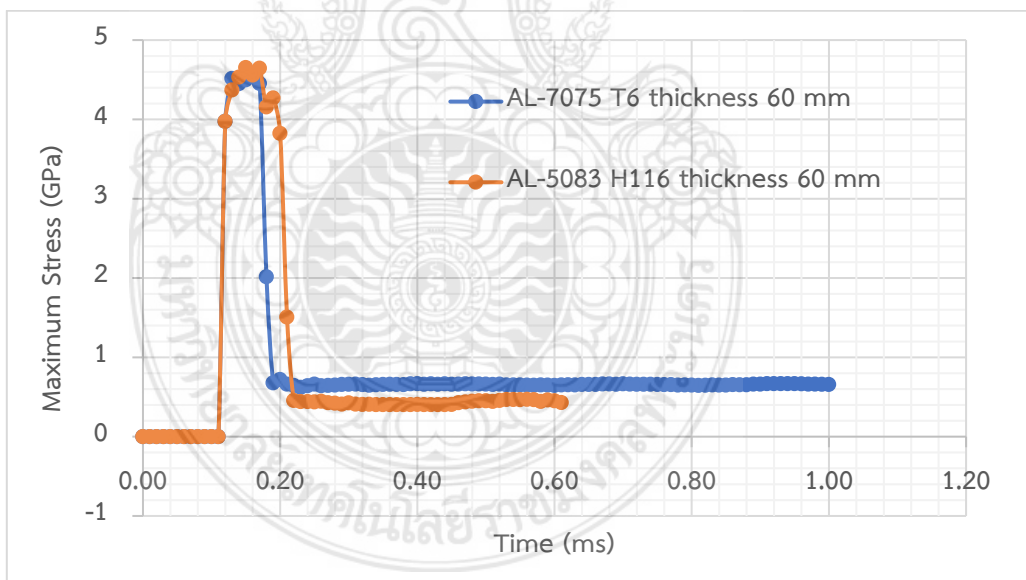
จากรูปที่ 4.21 พบว่าแผ่นวัสดุ AL-7075 T6 สามารถต้านทานการเคลื่อนที่เข้าปะทะของกระสุนได้ดีกว่าแผ่นวัสดุ AL-5083 H116 ซึ่งส่งผลให้เกิดรูทะลุที่แผ่นเกราะวัสดุ AL-7075 T6 และแผ่นเกราะด้วยวัสดุ AL-5083 H116 เท่ากับ 38 และ 47 มิลลิเมตร ตามลำดับ ความเค้นสูงสุดเกิดที่แผ่นเกราะ AL-7075 T6 และ AL-5083 H116 เท่ากับ 4.55 และ 4.65 GPa ตามลำดับ



ก) AL-5083 H116



ข) AL-7075 T6



ค) Maximum Stress (GPa)

รูปที่ 4.21 ผลการวิเคราะห์การเสียรูปและความเค้นสูงสุดกรณีแบบจำลองที่มีแผ่นเกราะหนา 60 มิลลิเมตร ไม่มีระยะห่างระหว่างแผ่น ก) AL-7075 T6 ข) AL-5083 H116 และ ค) ความเค้นสูงสุด

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาแผ่นเกราะโลหะกันกระสุนด้วยการจำลองความเสียหายผ่านการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม ANSYS และการทดสอบจริงร่วมกัน เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมการเสียรูปและวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นกับแผ่นเกราะโลหะแบบเรียงซ้อน และได้โมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์ไปต่อยอดสำหรับการสร้างแผ่นเกราะโลหะให้กับรถยนต์บรรทุกทุกประเภทขนาดเล็กหุ้มเกราะที่ใช้ในชายแดนของประเทศไทยต่อไปได้ ในกระบวนการวิจัยได้กำหนดขอบเขตของการศึกษาเป็นการจำลองการทดสอบและวิเคราะห์แผ่นเกราะโลหะกันกระสุนเป็นไปตามมาตรฐาน NIJ ด้วยการไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรม ANSYS และการทดสอบ วัสดุที่ใช้สร้างแผ่นเกราะโลหะกันกระสุน เป็นวัสดุ AL-7075 T6 และวัสดุ AL-5083 H116 เรียงซ้อนกัน ซึ่งมีระยะห่างระหว่างแผ่นและไม่มีระยะห่างระหว่างแผ่น โดยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ได้รับการพิสูจน์ความถูกต้องของแบบจำลองกับการทดลองที่ผ่านมารวมทั้งการทดลองในครั้งนี้ด้วย แผ่นโลหะอลูมิเนียมได้รับการออกแบบให้เป็นแบบจำลอง 3 มิติ ที่มีความหนา 6, 10 และ 60 มิลลิเมตร มีจำนวนชั้นมากกว่าหนึ่งชั้นกำหนดเงื่อนไขรูปแบบการจำลองที่แตกต่างกัน วิธีการที่ใช้ในการทำวิจัย ประกอบด้วย การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม ANSYS Explicit/Dynamic ร่วมกับการทดสอบตามมาตรฐาน NIJ เป็นการทำการจำลองและทดสอบในบางกรณี เพื่อยืนยันขีดความสามารถในการวิเคราะห์ของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ANSYS Explicit/Dynamic ซึ่งวิธีการดำเนินงานเริ่มจากการสร้างแบบจำลองเกราะกันกระสุนแบบ 3 มิติ ด้วยโปรแกรม SolidWorks ในรูปแบบของ Part ที่เป็น Multibody จะได้แผ่นโลหะขนาดความกว้างและความยาวเท่ากับ 300 x 300 มิลลิเมตร ที่ความหนาต่างๆ ในการวิเคราะห์แผ่นเกราะกันกระสุนด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS Explicit/Dynamic ต้องกำหนดสมบัติของวัสดุตามรูปแบบความเสียหายของวัสดุในโปรแกรม ANSYS/Engineering Data โดยวัสดุ AL-7075 T6 มีสมบัติวัสดุเป็นไปตาม Steinberg-Guinan Strength และวัสดุ AL-5083-H116 เป็นไปตามรูปแบบของ Johnson-Cook Strength กำหนดให้กระสุนทั้งสแตนคาร์ไบด์ขนาด 7.62x51 มิลลิเมตร มีรูปแบบความเสียหายเป็นไปตาม Johnson-Holmquist Failure Model (JH-1, JH-2) รูปแบบการวิเคราะห์ถูกกำหนดบนตัวแปรสำคัญคือ ค่าความหนาของแผ่นเกราะ การซ้อนกันของแผ่นเกราะ มีระยะห่างระหว่างแผ่นและไม่มีระยะห่างระหว่างแผ่น ชนิดของวัสดุที่ทำเกราะ และการยิง จากนั้นเปรียบเทียบผลจากวิธีการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยลักษณะการเสียหายของแผ่นเกราะ ระยะการเจาะทะลุของแผ่นเกราะที่ผ่านการยิง เป็นต้น ซึ่งจากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่ามีความสอดคล้องกัน

ผลลัพธ์จากการวิจัยสามารถตอบวัตถุประสงค์ของงานวิจัยได้ดังนี้

1. เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมการเสีรूपของแผ่นเกราะโลหะแบบเรียงซ้อนกันโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการดำเนินงานได้กำหนดขอบเขต เป็นกรณีศึกษา 3 กรณี และได้ตรวจสอบพฤติกรรมของแผ่นเกราะโลหะ 5 กรณีด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังนี้

1.1 กรณีแผ่นเกราะวัสดุ AL-7075 T6 แผ่นเดี่ยวที่มีความหนา 10 มิลลิเมตร พบว่า แผ่นเกราะไม่สามารถต้านทานการเจาะทะลุได้

1.2 กรณีแผ่นเกราะวัสดุ AL-7075 T6 เรียงซ้อนกัน 6 แผ่น แต่ละแผ่นหนา 10 มิลลิเมตร ไม่มีช่องว่างระหว่างแผ่น กำหนดหน้าสัมผัสระหว่างแผ่นเกราะเป็นแบบ Frictionless พบว่าเกิดการเจาะทะลุผ่านทั้ง 3 แผ่น และกระสุนไปหยุดอยู่ที่แผ่นที่ 4

1.3 กรณีแผ่นเกราะวัสดุ AL-7075 T6 เรียงซ้อนกัน 6 แผ่น โดยเว้นระยะห่างต่อแผ่นเท่ากับ 10 มิลลิเมตร พบว่าเกิดการเจาะทะลุผ่านทั้ง 3 แผ่น และกระสุนไปหยุดอยู่ที่แผ่นที่ 4

1.4 กรณีแผ่นเกราะวัสดุ AL-7075 T6 เรียงซ้อนกัน 6 แผ่น โดยมีช่องว่างระหว่างแผ่นเกราะเพิ่มขึ้นจากเดิม 10 มิลลิเมตร เป็น 30 มิลลิเมตร พบว่ากระสุนทะลุผ่าน 2 แผ่น กระสุนหยุดที่แผ่น 3

1.5 กรณีแบบจำลองที่มีแผ่นเกราะหนา 60 มิลลิเมตร ด้วยวัสดุ AL-7075 T6 และวัสดุ AL-5083-H116 พบว่าแผ่นวัสดุ AL-7075 T6 สามารถต้านทานการเคลื่อนที่เข้าปะทะของกระสุนได้ดีกว่าแผ่นวัสดุ AL-5083 H116 ซึ่งส่งผลให้เกิดรูทะลุที่แผ่นเกราะวัสดุ AL-7075 T6 และแผ่นเกราะด้วยวัสดุ AL-5083 H116 เท่ากับ 38 และ 47 มิลลิเมตร ตามลำดับ

2. เพื่อวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นกับแผ่นเกราะโลหะแบบเรียงซ้อนที่มีความแข็งแรงสูงต่อกระสุนเจาะ โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้กำหนดให้กระสุนทังสเตนคาร์ไบด์ขนาด 7.62x51 มิลลิเมตร มีรูปแบบความเสียหายเป็นไปตาม Johnson-Holmquist Failure Model (JH-1, JH-2) ความเร็ว 850 เมตรต่อวินาที ตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 ความเสียหายที่เกิดขึ้นพิจารณาตั้งแต่ช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นไปจนถึงช่วงพลาสติก ความเสียหายที่เกิดขึ้นอยู่ในระดับที่มีอัตราความเครียดสูง

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการวิเคราะห์รูปแบบวัสดุความหนาและขนาดของแผ่นเกราะโลหะกันกระสุนที่ใช้กับรถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะ ทดสอบและวิเคราะห์ความเสียหายภายใต้มาตรฐาน NIJ ระดับ 3 จะใช้สำหรับยานพาหนะต้านทานกระสุนเท่านั้น ไม่นำมาใช้กับเกราะส่วนบุคคล ในการทดสอบยิ่งจริงนั้นคำนึงถึงค่าใช้จ่าย ดังนั้นการใช้โปรแกรมทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีขีดความสามารถในการวิเคราะห์โจทย์ปัญหาแบบนี้ จะช่วยลดต้นทุนในการออกแบบและวิเคราะห์ผลลัพธ์ได้เป็นอย่างดี จากการทดลองจริงและการไฟไนต์เอลิเมนต์ให้ผลความเสียหายที่เหมือนกัน ซึ่งให้ผลความคลาดเคลื่อนที่แตกต่างกัน 8-10% การไฟไนต์เอลิเมนต์จึงเป็นตัวแทนของการทดลอง จึงเชื่อว่าการทดลองที่ถูกต้อง และการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์มาทำการจำลองปัญหา จะต้องเลือกใช้ทฤษฎีที่เหมาะสม

เช่น ทฤษฎี Johnson-Cook Strength หรือ Johnson-Holmquist (JH-2) การแบ่งเอลิเมนต์และการควบคุมขนาดเอลิเมนต์จะมีผลอย่างมากกับการคำนวณ

การทดสอบการยิงกระสุน ในงานวิจัยนี้เลือกทดสอบที่โรงงานวัตถุระเบิดทหาร กรมการอุตสาหกรรมทหาร ศูนย์การอุตสาหกรรมป้องกันประเทศและพลังงานทหาร ซึ่งก่อนการเดินทางนำแผ่นโลหะที่เตรียมไว้ไปทดสอบจะต้องประสานและติดต่อก่อนล่วงหน้า และจะต้องปฏิบัติตัวอย่างเคร่งครัดขณะทำการทดสอบเพื่อความปลอดภัย




เอกสารอ้างอิง

- [1] ธงชัย ฟองสมุทร, *วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เบื้องต้น*, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่: ห้างหุ้นส่วนจำกัด ดาราวรรณการพิมพ์ เชียงใหม่. 2549.
- [2] นวพล กลางทัพ, “การวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนบนโลหะด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์,” *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต*, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, 2562.
- [3] ชัยวัฒน์ ไชยมหาพฤกษ์, “แผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนด้วยวัสดุเชิงประกอบ,” *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต*, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, 2561.
- [4] What is Explicit Dynamics?. (JULY 27, 2022). [Online]. Available: <https://www.ansys.com/blog/what-is-explicit-dynamics>
- [5] มาตรฐานยุโรปกรณีกระสุนกลาโหมว่าด้วยแผ่นเกราะกันกระสุน, คณะอนุกรรมการกำหนดมาตรฐานยุโรปกรณีกระสุนกลาโหม
- [6] Ballistic resistance of police body armor. NIJ Standard-0108.01. National Institute of Justice, U.S. Department of Justice, Washington, DC 20531.1985.
- [7] P K Gupta, M A Iqbal, Zaid Mohammad, “Energy dissipation in plastic deformation of thin aluminum targets subjected to projectile impact,” *International Journal of Impact Engineering*, vol. 110, pp. 85-96, Dec. 2017.
- [8] K. Krishnan, S. Sockalingam, S. Bansal, S.D. Rajan, “Numerical simulation of ceramic composite armor subjected to ballistic impact,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 41, no. 8, pp. 583-593, Dec. 2010.
- [9] W.L. Goh, Y. Zheng, J. Yuan, K.W. Ng, “Effects of hardness of steel on ceramic armour module against long rod impact,” *International Journal of Impact Engineering*, vol. 109, pp. 419-426, Nov. 2017.
- [10] M.J. Pawar, A. Patnaik, S.K. Biswas, U. Pandel, I.K. Bhat, S. Chatterjee, A.K. Mukhopadhyay, R. Banerjee, B.P. Babu, “Comparison of ballistic performances of Al_2O_3 and AlN ceramics,” *International Journal of Impact Engineering*, vol. 98, pp. 42-51, Dec. 2016.

- [11] วิษณุพงศ์ ตะเคียน และ ชัยณรงค์ ศรีกุลวงศ์. “Numerical Simulation of Ceramic/Metallic Armor Plate Subjected to Ballistic Impact,” ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [12] Zhang P.L., Xu K.B. , Li M., Gong Z.Z., Song G.M., Wu Q., Cao Y., Tian D.B., Yu Z.J, “Study of the shielding performance of a Whipple shield enhanced by Ti-Al-nylon impedance-graded materials,” *International Journal of Impact Engineering*, vol. 124, pp. 23-30, Feb. 2019.
- [13] Punit Kumar Pandey, Atul Harmukh, M.K. Khan, M.A. Iqbal, S.G. Ganpule., (2023, Apr 15). “Ballistic response of skin simulant against fragment simulating projectiles,” *Defence Technology*. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2023.04.009>
- [14] Ahmad Serjouei, Runqiang Chi, Zhiyuan Zhang, Idapalapati Sridhar, “Experimental validation of BLV model on bi-layer ceramic-metal armor,” *International Journal of Impact Engineering*, vol. 77, pp. 30-41, Mar. 2015.
- [15] Xue-zhong Wen, Jie Huang, Yi Li, Ping Chen, Lin Jiang, Yao Long, Sen Liu, “Preliminary study on shielding performance of wood stuffed shield,” *International Journal of Impact Engineering*, vol. 91, pp. 94-101, May. 2016.
- [16] Weilan Liu, Zhaohai Chen, Zhaofeng Chen, Xingwang Cheng, Yangwei Wang, Xianhui Chen, Jingyi Liu, Binbin Li, Shaogang Wang, “Influence of different back laminate layers on ballistic performance of ceramic composite armor,” *Materials & Design*, vol. 87, pp. 421-427, 15-Dec-2015.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Steinberg D.J. LLNL, "Equation of State and Strength Properties of Selected Materials", Feb. 1991.

- [21] T. Børvik, M.J. Forrestal, O.S. Hopperstad, T.L. Warren d, and M. Langseth, “Perforation of AA5083-H116 aluminium plates with conical-nose steel projectiles – Calculations,” *International Journal of Impact Engineering*, vol. 36, no. 3, pp. 426-437, Mar. 2009.
- [22] Namık Kılıç, Said Bedir, Atıl Erdik, Bülent Ekici, Alper Taşdemirci, Mustafa 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.
- [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*, pp. 16-50, 2010.
- [24] บุญรัฐ กัญจนวรรณิชย์, “การพัฒนาเสื้อเกราะกันกระสุนแบบเกราะแข็ง” ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC).
- [25] ANSYS Inc., “Lecture 2: Introduction to Explicit Dynamics.” Document from CAD-IT Consultants (Asia), 2019.
- [26] ANSYS Inc., “Lecture 6: Analysis Settings and Parameter.” Document from CAD-IT Consultants (Asia), 2019.
- [27] กรมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีกลาโหม, “เอกสารการปรับปรุงมาตรฐานยุทธโธปกรณ์กระทรวงกลาโหมว่าด้วยเสื้อเกราะกันกระสุน กรมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีกลาโหม,” 27 พ.ย. 2558.
- [28] Md. M. Ansari and A. Chakrabarti, “Influence of projectile nose shape and incidence angle on the ballistic perforation of laminated glass fiber composite plate,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 142, pp. 107–116, Apr. 2017.



ภาคผนวก ก

บทความตีพิมพ์เผยแพร่และใบรับรองการนำเสนอ



Proceedings Conference 2023

24 - 26 พฤษภาคม 2566

ณ โรงแรมมารี พัทยา / โอโซนอร์ส พัทยา
จังหวัดชลบุรี

The 8th Rajamangala Manufacturing & Management Technology Conference 2023

การประชุมวิชาการราชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ

MTC 2023

ครั้งที่ 

“ขับเคลื่อนงานวิจัยด้วย BCG

เพื่อตบโจทย์เป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน 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



อำนวยความสะดวกจัดงาน (Hosts)

โดย



ร่วมจัดงาน (Co-Hosts)

โดย



ประวัติ

การประชุมวิชาการราชชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ

ครั้งที่ 1	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	28 - 29 กรกฎาคม 2559 จังหวัดพระนครศรีอยุธยา
ครั้งที่ 2	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ณ โรงแรมเคปราชา	4 - 8 ธันวาคม 2560 จังหวัดชลบุรี
ครั้งที่ 3	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ณ โรงแรมตีวน่า 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 / โอโซนอร์ธ พัทยา	24 - 26 พฤษภาคม 2566 จังหวัดชลบุรี
ครั้งที่ 9	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2567



ก

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.กรุงเทพ

คำนำ

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

ในปีนี้ งาน RMTC 2023 ได้รับความอนุเคราะห์จากหน่วยงานที่มีชื่อเสียงและมีบทบาทในสายงานด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการประกอบไปด้วย สมาคมเครือข่ายราชชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ (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)

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

หากการดำเนินงานในครั้งนี้นักพร่องหรือผิดพลาดประการใด ทางคณะกรรมการดำเนินงาน RMTC 2023 ต้องขออภัยมา ณ โอกาสนี้

คณะกรรมการดำเนินงานการประชุมวิชาการ
ราชชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ 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	การวิเคราะห์ผลกระทบของลมจากเคลื่อนที่ของยานพาหนะที่กระทำต่อป้ายบอกทางจราจร และโครงสร้างเสาบอกทางแบบคร่อมผิวจราจรโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	942
MSA-346	การตรวจสอบพฤติกรรมของแผ่นเกราะพรุนต่อกระสุนเจาะเกราะ 7.62x51 มม. โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	952
Supply Chain and Logistic (SCL) จำนวน 13 บทความวิจัย		
SCL-401	ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดำเนินงานด้านการส่งออกให้คนงานฟ้าภูฐานอบแห้งไปยังประเทศ มาเลเซีย : กรณีศึกษา ยี่ห้อ MUNCH ROOM	964
SCL-402	ปัจจัยเสี่ยงที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการพิธีการศุลกากรขาเข้า	971
SCL-403	การแก้ปัญหาการเดินทางของพนักงานขายด้วยขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบวาฟ	979
SCL-405	แนวทางการยกระดับห่วงโซ่คุณค่าธุรกิจมะขามเพื่อเสริมสร้างเศรษฐกิจฐานรากในจังหวัด อุดรดิตถ์ 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	การพยากรณ์ปริมาณไยมะพร้าวในประเทศไทยด้วยวิธีแยกส่วนประกอบ	1011
SCL-412	พยากรณ์ปริมาณผักตบชวาในลุ่มแม่น้ำท่าจีนโดยข้อมูลดาวเทียม	1017
SCL-414	การลดต้นทุนโลจิสติกส์ทุเรียนจังหวัดตราด	1025
SCL-417	แนวทางการพัฒนาเส้นทางการท่องเที่ยวเชิงสุขภาพพื้นที่จังหวัดระนอง	1033
SCL-419	การลดต้นทุนด้านบรรจุภัณฑ์ด้วยการใช้บรรจุภัณฑ์แบบที่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้: กรณีศึกษา ศูนย์กระจายสินค้าชิ้นส่วนอะไหล่รถยนต์	1040
SCL-420	การคัดเลือกผู้จัดหาสำหรับปัญหาสินค้าคงคลังแบบสั่งเป็นรุ่นกรณีสินค้าหนึ่งชนิด โดยใช้วิธีฮิวริสติก	1050
SCL-421	การศึกษาตัวแบบการพยากรณ์ปริมาณการผลิตอุปกรณ์ประปา โดยใช้เทคนิคอนุกรมเวลา	1057
SCL-422	การศึกษาระบบการจัดการโซ่อุปทานในการปลูกต้นหอม: กรณีศึกษา เกษตรกรผู้ปลูกต้นหอม จังหวัดนครพนม	1064



รหัสบทความ MSA-343



การประชุมวิชาการราชวมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 8
24 - 26 พฤษภาคม 2566 ณ โรงแรม อมารี พัทยา จังหวัดชลบุรี

การทำนายพฤติกรรมการเสียหายของแผ่นเกราะอลูมิเนียมกันกระสุนเกรด 5083-H116

และ 7075 T6 ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Prediction of Failure Behavior of 5083-H116 and 7075 T6 Aluminum

Bulletproof Armor Plates by Finite Element Method

มัลลิกา เดชสุภา¹ ทรงวุฒิ มงคลเลิศมณี¹ กฤษณ์ อภิญญาวิศิษฐ์¹ ประสิทธิ์ พงษ์เพชร² แจ็ค ชุมอินทร์² และ
ประกอบ ชาตฤกษ์^{1*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

² สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องมือและแม่พิมพ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

E-mail: prakorb.c@mutp.ac.th*

Mullika Dejsupa¹ Songwut Monhkonlerdmanee¹ Krit Apinyavisit¹ Prasit Phangphet² Jack Chumin² 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@mutp.ac.th*

บทคัดย่อ

การทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุของแผ่นอลูมิเนียมที่มีความหนาต่างๆ ซึ่งได้รับแรงกระแทกจากกระสุนด้วยความเร็ว 850 เมตรต่อวินาที ตามมาตรฐาน NI ระดับ 3 โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งในที่นี้เลือกใช้โปรแกรม ANSYS Explicit/Dynamic เพื่อทำนายพฤติกรรมการเสียหายของแผ่นเกราะอลูมิเนียมกันกระสุนเกรด 7075 T6 และ 5083-H116 โดยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ได้รับการพิสูจน์ความถูกต้องของแบบจำลองกับการทดลองที่ผ่านมา ตัวแปรสำคัญคือค่าความหนาของแผ่นอลูมิเนียมและจำนวนชั้นที่มีการวางเรียงซ้อนกัน ซึ่งมีระยะห่างระหว่างแผ่นและไม่มีระยะห่างระหว่างแผ่น แผ่นโลหะอลูมิเนียมได้รับการออกแบบให้เป็นแบบจำลอง 3 มิติ ที่มีความหนา 10 มิลลิเมตร มีจำนวนชั้นมากกว่าหนึ่งชั้นกำหนดเงื่อนไขรูปแบบการจำลองที่แตกต่างกัน ในการจำลองทางระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้กำหนดให้กระสุนทั้งสแตนคาร์ไบด์ขนาด 7.62x51 มิลลิเมตร มีรูปแบบความเสียหายเป็นไปตาม Johnson-Holmquist Failure Model (JH-1, JH-2) แผ่นเกราะมีขนาดความกว้างและความยาวเท่ากับ 30x30 เซนติเมตร โดยวัสดุ AL-7075 T6 มีสมบัติวัสดุเป็นไปตาม Steinberg-Guinan Strength และวัสดุ AL-5083-H116 เป็นไปตามรูปแบบของ Johnson-Cook Strength การเลือกชนิดของเอลิเมนต์และการแบ่งเอลิเมนต์เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการวิเคราะห์ การใช้เทคนิคการแบ่งเอลิเมนต์มีความสำคัญโดยต้องทำการแบ่งเอลิเมนต์ให้มีขนาดเล็กลงตรงตำแหน่งกระสุนวิ่งเข้าปะทะกับแผ่นเกราะและต้องควบคุมให้เอลิเมนต์มีจำนวนไม่มากเกินไปในพื้นที่อื่นที่ไกลออกไปจากกระสุน แผ่นเกราะอลูมิเนียม AL-7075 และ 5083-H116 ที่หนา 40 และ 50 มิลลิเมตร ตามลำดับสามารถต้านทานการเจาะทะลุได้ ในกรณีนี้ที่แผ่นเกราะมีความหนา 10 มิลลิเมตร และออกแบบให้มีการเรียงของแผ่นเกราะจำนวน 6 แผ่น



การประชุมวิชาการราชชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 8
24 – 26 พฤษภาคม 2566 ณ โรงแรม อมารี พัทยา จังหวัดชลบุรี

ที่มีระยะห่างแต่ละแผ่นเท่ากับ 10 มิลลิเมตร พบว่ากระสุนสามารถทะลุผ่านแผ่นอลูมิเนียม 7075 T6 ได้อย่างสมบูรณ์ใน 3 ชั้นแรก และไปหยุดอยู่ที่แผ่นที่ 4 สำหรับแผ่นอลูมิเนียม 5083-H116 กระสุนทะลุผ่านได้อย่างสมบูรณ์ใน 4 ชั้นแรก และไปหยุดอยู่ที่แผ่นที่ 5 การเพิ่มระยะห่างระหว่างแผ่นจะช่วยเพิ่มความสามารถการต้านทานการเจาะทะลุได้ในระดับหนึ่ง ซึ่งควรมีแผ่นเกราะด้วยวัสดุอื่นจะช่วยเพิ่มขีดความสามารถการต้านทานการเจาะทะลุที่เพิ่มขึ้น

คำหลัก: เกราะกันกระสุน อลูมิเนียม 5083-H116 อลูมิเนียม 7075 T6 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

The aluminum plates of various thicknesses are put through a penetration resistance test under speed bullet impact at 850 meters per second in accordance with level 3 NIJ standard, using the analysis of Finite Element methodology, particularly in the ANSYS Explicit/Dynamic program, to predict the damage behavior of bulletproof plates 7075 T6 and 5083-H116. With the help of earlier tests, the Finite Element Model's validity has been shown. The two most important key factors were the thickness of the aluminum plates and the number of layers stacked, with or without a space between the plates. A 3D model of aluminum metal with a 10-millimeter thickness and multiple distinct layers was created for use in various simulation model scenarios. A 7.62x51 mm tungsten carbide bullet was chosen for a Finite Element simulation to produce damage based on the Johnson-Holmquist Failure Model (JH-1, JH-2). The AL-7075 T6 material's parameters for the armor plate at 30x30 cm in width and length were in line with the Steinberg-Guinan Strength model, whereas those of the AL-5083-H116 material were in accordance with the Johnson-Cook Strength model. The element selected and how the elements are divided have a significant impact on the analysis. Since each element had to be divided into small sizes, especially where the bullet entered the armor plate, and because the number of elements had to be kept under control not too many elements placed too far away from the area where the bullet passed through the armor plate use of the division of elements is critical. The bullet might entirely penetrate the 7075 T6 aluminum sheet in the first three plates of a 10-meter-thick armor plate comprising six plates stacked at a distance of 10 millimeters before stopping at plate 4. The bullet completely pierced the first four plates of aluminum plate 5083-H116 before stopping at plate 5. While increasing the distance between the plates would partially increase the penetration resistance, it would also help if the shield plates were made of various materials.

Keywords: Bullet Proofed Armor, AL-5083-H116, AL-7075 T6, Finite Element Method

1. บทนำ

การทำนายพฤติกรรมความเสียหายของแผ่นเกราะกันกระสุนเป็นงานวิจัยที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและเป็นประเด็นความสนใจของนักวิชาการ นอกเหนือจากความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุแล้วยังต้องคำนึงถึงปัจจัยด้านอื่นๆ ด้วย เช่น น้ำหนักของแผ่นเกราะ

โดยในบทความนี้เลือกใช้วัสดุอลูมิเนียม 5083-H116 ซึ่งมีน้ำหนักเบาเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะชนิดอื่น จากกรทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมาพบว่า P. K. Gupta et al. [1] ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการกระจายพลังงานในการเปลี่ยนรูปพลาสติกของชิ้นงานอลูมิเนียมบางที่อยู่ภายใต้แรงกระแทกแบบโปรเจกไทล์ โดยใช้วิธีการทดสอบและทดลองเชิงตัวเลข



การประชุมวิชาการราชชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 8
24 - 26 พฤษภาคม 2566 ณ โรงแรม อมารี พัทยา จังหวัดชลบุรี

ผสมผสานกันเพื่อตรวจสอบกลไกการเปลี่ยนรูปของแผ่นอลูมิเนียมเมื่อกระทบกับกระสุนปืน การทดลองเกี่ยวข้องกับการยิงโปรเจกไทล์เหล็กชุบแข็งที่แผ่นอลูมิเนียมบางที่มีความหนาต่างกัน ความเร็วกระแทกของกระสุนปืนแปรผันตั้งแต่ 100-500 เมตรต่อวินาที และตรวจสอบการเสียรูปของแผ่นอลูมิเนียมโดยใช้กล้องความเร็วสูง จากนั้นข้อมูลที่รวบรวมจากการทดลองได้ถูกนำมาใช้เพื่อตรวจสอบการจำลองเชิงตัวเลขของผลกระทบ ผลการทดลองระดับของการกระจายพบว่า เป็นสัดส่วนกับความหนาของชิ้นงาน โดยชิ้นงานที่หนากว่าจะดูดซับพลังงานมากกว่าชิ้นงานที่บางกว่า การศึกษายังพบว่า อัตราการสลายพลังงานได้รับอิทธิพลจากความเร็วการกระจายของโปรเจกไทล์ โดยความเร็วที่สูงขึ้นส่งผลให้มีการกระจายพลังงานมากขึ้น และแสดงให้เห็นว่ากระบวนการเปลี่ยนรูปพลาสติกสร้างคลื่นการเสียรูปที่แพร่กระจายผ่านเป้าหมาย คลื่นเหล่านี้ส่งผลให้เกิดรูปแบบการเปลี่ยนรูปประเภทต่างๆ รวมถึงการหัก การตัด การกระจาย และการฉีกขาดเฉพาะที่ การก่อตัวของรูปแบบเหล่านี้ขึ้นอยู่กับความเร็วของแรงกระแทกและคุณสมบัติของวัสดุเป้าหมาย K. Krishnan et al. [2] ยังได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการจำลองเชิงตัวเลขและการวิเคราะห์ทางทฤษฎีเกี่ยวกับประสิทธิภาพของชุดเกราะเซรามิกคอมโพสิตที่ได้รับผลกระทบจากซีปนาวุธ มีการตรวจสอบการป้องกันแรงกระแทกโดยเป้าหมายเซรามิกคอมโพสิตแบบไฮบริด ผลลัพธ์การตรวจสอบผ่านการทดสอบเชิงทดลอง และสามารถใช้ในการพัฒนาการออกแบบชุดเกราะที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นเพื่อป้องกันภัยคุกคามจากซีปนาวุธ W. L. Goh et al. [3] ได้ศึกษาเชิงทดลองและการจำลองด้วยรหัสไฮโดรโค้ด (Hydrocode) เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของเหล็กและประสิทธิภาพของซีปนาวุธของเกราะ SIC ที่หุ้มด้วยเหล็กต่อการกระจายของซีปนาวุธ การออกแบบโมดูลเกราะประกอบด้วย SIC ในพื้นที่จำกัดภายในแผ่นรองหลัง 10 มิลลิเมตร และแผ่นปิดหน้าซึ่งหนา 5 มิลลิเมตร ทำจากเหล็ก AISI 4340 ที่มีความแข็งต่างกันระหว่าง 30-50 HRC ซีปนาวุธเป็นโลหะผสมทั้งสแตนทรกรวยยาว เส้นผ่านศูนย์กลาง 8.3 มิลลิเมตร และความยาว 115 มิลลิเมตร ที่ความเร็วกระแทกเล็กน้อย 1.25 กิโลเมตรต่อวินาที บล็อก

พยานของเหล็ก AISI 4340 ถูกวางไว้ด้านหลังแผ่นเกราะเพื่อตรวจจับกระสุนปืนที่หลงเหลืออยู่ การจำลองด้วยไฮโดรโค้ดของการทดลองโดยใช้ LS-DYNA ดำเนินการเพื่อจำลองกระบวนการเจาะและความล้มเหลวที่เกิดขึ้นในโมดูลเกราะแบบจำลองของ Johnson-Cook (JC) ถูกนำไปใช้ในการจำลองกับเหล็ก โดยคำนึงถึงอิทธิพลของความแข็งที่มีต่อพารามิเตอร์ของแบบจำลอง JC ผลการวิจัยพบว่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นของแผ่นรองหลังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเกราะ ในขณะที่ความแข็งของแผ่นปิดไม่มีอิทธิพลในช่วงของความแข็งที่ทดสอบ

M. J. Pawar et al. [4] ได้นำเสนอการหาประสิทธิภาพของวัสดุเซรามิกสองชนิดที่แตกต่างกัน ซึ่งเกิดจากสมบัติเชิงประกอบของวัสดุเหล่านั้น นอกเหนือจากประสิทธิภาพเชิงมวลเมื่อยึดติดอยู่ด้านหน้าของแผ่นโลหะที่มีองค์ประกอบทางเคมี สภาวะการอบชุบความร้อน และความหนาที่คล้ายคลึงกัน ในการศึกษาได้มีการเน้นย้ำถึงการเปรียบเทียบการเสียรูปของแผ่นรองหลังที่ทำจาก Al-5083-H116 wrought alloy และพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับพลังงานจลน์สูงสุดของกระสุนโดยแรงทดสอบ การจำลองเชิงตัวเลขโดยใช้ไฮโดรโค้ด AUTODYN 3D แล้วจึงตรวจสอบความถูกต้องผ่านการทดลอง โดยใช้กระสุน 7.62 AP และปืนไรเฟิล Dragunov ที่ใช้วัดได้ถูกนำมาใช้ในการยิงกระสุนปืนที่ระยะ 10 เมตรจากเป้าหมาย ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเซรามิก AlN มีประสิทธิภาพต้านทานซีปนาวุธสูงกว่าเซรามิก Al_2O_3 โดยระบุว่าสิ่งนี้เกิดจากความแข็งแรงและความเหนียวที่สูงขึ้นของเซรามิก AlN ซึ่งทำให้สามารถดูดซับพลังงานได้มากขึ้นก่อนที่จะแตกหัก ต่อมา P. L. Zhang et al. [5] ได้ศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพการป้องกันของเกราะป้องกันของ Whipple ที่ได้รับการปรับปรุงโดยวัสดุที่มีระดับอิมพีแดนซ์ Ti-Alnylon เพื่อหาประสิทธิภาพแรงกระแทกความเร็วสูงของเกราะป้องกัน และเพื่อตรวจสอบพฤติกรรมของการแพร่กระจายคลื่นยึดหยุ่นในวัสดุโลหะ ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าวัสดุที่มีค่าระดับของอิมพีแดนซ์ Ti-Alnylon จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการป้องกันของ Whipple Shield การศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการป้องกันดีขึ้นถึง 20.4% เมื่อเทียบกับวัสดุคอมโพสิตอื่นๆ จากนั้น P. K. Pandey et al. [6] ได้



การประชุมวิชาการราชชมภรณ์ด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 8
24 – 26 พฤษภาคม 2566 ณ โรงแรม อมารี พัทยา จังหวัดชลบุรี

ทำการวิจัยเกี่ยวกับการตอบสนองของซีปนาวุธของผิวหนังจำลองต่อชิ้นส่วนจำลองโปรเจกไทล์ โดยใช้กล้องความเร็วสูงและอุปกรณ์ทดสอบซีปนาวุธเพื่อจำลองผลกระทบของชิ้นส่วนจำลองโปรเจกไทล์บนตัวอย่างผิวหนังจำลอง จากนั้นวิเคราะห์ข้อมูลที่รวบรวมเพื่อระบุความเสียหายที่เกิดจากซีปนาวุธ ผลการวิจัยพบว่าการตอบสนองของซีปนาวุธของผิวหนังจำลองนั้นแตกต่างกันไปตามประเภทและความเร็วของชิ้นส่วนจำลองของซีปนาวุธ และยังระบุความเร็ววิกฤตที่ตัวอย่างผิวหนังจำลองเริ่มมีการเสียรูปถาวรและเจาะทะลุ

ในปี 2015 A. Serjouei et al. [7] ได้นำเสนอเกี่ยวกับการตรวจสอบเชิงทดลองของแบบจำลองจำกัดความเร็ว (Ballistic Limit Velocity: BLV) บนเกราะโลหะเซรามิกสองชั้น เพื่อหาขีดจำกัดความเร็วของซีปนาวุธของวัสดุเกราะโลหะเซรามิกสองชั้น โดยพิจารณาจากโมเมนตัมและความสมดุลของพลังงานระหว่างการเจาะทะลุ แบบจำลองเชิงประจักษ์ได้รับการพัฒนาเพื่อประเมิน BLV และการจำลองเชิงตัวเลขได้ดำเนินการเพื่อกำหนดความเร็วขีดจำกัดซีปนาวุธของชุดเกราะเซรามิก การศึกษาพบว่า BLV ของวัสดุเกราะโลหะเซรามิกสองชั้นสามารถประมาณได้โดยใช้แบบจำลองเชิงและสามารถใช้ในการจำลองเชิงตัวเลขได้

W. Liu et al. [8] ได้ศึกษาผลกระทบของการใช้ชั้นคอมโพสิตลามิเนตที่แตกต่างกันต่อประสิทธิภาพการกันกระสุนของระบบเกราะ การศึกษาสำรวจผลกระทบของวัสดุที่มีจำนวนชั้นต่างๆ รวมถึง เคฟลาร์ แก้ว และอลูมินา และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุผสมลามิเนตกับคุณสมบัติโครงสร้างที่แตกต่างกัน การค้นพบนี้ชี้ให้เห็นว่าคอมโพสิตลามิเนตที่มีชั้นเซรามิกหนาขึ้นและชั้นลามิเนตด้านหลังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการป้องกันซีปนาวุธได้ ระบบเกราะคอมโพสิตนำหนักเบาประกอบด้วยแผ่นโบรอนคาร์ไบด์ (B4C) และแผ่นหลังคอมโพสิต พบว่ามีประสิทธิภาพการกันกระสุนที่ดี มีการใช้การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพซีปนาวุธของตัวอย่างเกราะคอมโพสิต และบางตัวอย่างแสดงประสิทธิภาพที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่นๆ

การจำลองและวิเคราะห์ความสามารถในการเจาะแผ่นเกราะของกระสุนชนิดต่างๆ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นที่นิยมและมีความน่าเชื่อถือสูง เช่น การวิเคราะห์แผ่น

เกราะกันกระสุนด้วยวัสดุ SKD11 และ SUS304 ที่ด้านทานการเจาะของกระสุน 7.62 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน NU 4 [9] การวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานการทะลุทะลวงของกระสุนบนพื้นผิวเกราะอลูมิเนียม [10] เกราะโลหะ [11] หรือแม้กระทั่งการวิเคราะห์กรณีที่เกิดทางกระสุนเกิดการหักเหแล้วปะทะเข้ากับแผ่นเกราะ [12] และการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของทั้งสแตนคาร์ไบด์และแผ่นเกราะ SUS304 ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [13] เป็นต้น ซึ่งการทบทวนวรรณกรรมดังกล่าว [9]-[13] ได้สร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์และเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการทดลองในด้านของลักษณะการเสียรูปด้วยกระสุนขนาด 7.62x51 มิลลิเมตร ดังนั้นในบทความนี้จึงเลือกใช้แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ [9]-[13] มาวิเคราะห์ให้เกิดรายละเอียดเพิ่มขึ้น โดยบทความนี้ได้กำหนดตัวแปรที่ใช้วิเคราะห์เป็นวัสดุอลูมิเนียม 7075 T6 และ 5083-H116 ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนา การเปลี่ยนจำนวนชั้นแผ่นเกราะ การเพิ่มระยะห่างระหว่างแผ่นเกราะเพื่อทำนายพฤติกรรมการเสียหายของแผ่นเกราะกันกระสุนอลูมิเนียม

2. ระเบียบวิธีวิจัย

โปรแกรม ANSYS Explicit/dynamics ได้ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการออกแบบและวิเคราะห์ความเสียหายของแผ่นเกราะและกระสุนที่เกิดขึ้นในสถานการณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นและมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ซึ่งเป็นวิธีการรวมเวลาที่ใช้ในการจำลองไดนามิกเมื่อความเร็วเป็นสิ่งสำคัญ

2.1 กระบวนการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

2.1.1 ขั้นตอนกระบวนการก่อนการประมวลผล (Pre-processing) คือการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ประกอบด้วย การสร้างโมเดลสองมิติหรือสามมิติ ด้วยโปรแกรมช่วยออกแบบทางวิศวกรรม ซึ่งในบทความนี้ได้เลือกใช้ ANSYS DesignModeler เพื่อสร้างโมเดลสามมิติภายในโปรแกรม ANSYS และไม่จำเป็นต้องนำเข้าโมเดลสามมิติจากภายนอก และจะส่งผลในด้านของความถูกต้องของโมเดลและความเร็วในการวิเคราะห์ จากนั้นกำหนดวัสดุให้กับชิ้นส่วนต่างๆ ซึ่งสามารถเลือกใช้สมบัติของวัสดุหรือกำหนดด้วยตนเองลงในซอฟต์แวร์ก็ได้เช่นกัน การกำหนดคู่



สัมพันธ์เป็นการกำหนดชนิดของหน้าสัมผัสที่สัมผัสกัน การกำหนดความเร็วของกระสุน การกำหนดจุดรองรับหรือจุดจับยึด และการแบ่งเอลิเมนต์ที่ต้องเลือกชนิดเอลิเมนต์ที่เหมาะสมกับแบบจำลอง สำหรับการกำหนดสมบัติของวัสดุ นั้นจะต้องกำหนดค่าวัสดุแบบชัดแจ้ง (Explicit Materials) ซึ่งมีทฤษฎีโมเดลต่างๆ ประกอบด้วย Johnson Cook Strength, Steinberg Guinan Strength, Equation of State, Isotropic Material, Johnson-Holmquist Strength Continuous, Johnson Cook Failure เป็นต้น

2.1.2 กระบวนการประมวลผล (Solve-processing) เป็นขั้นตอนการวิเคราะห์แบบ Explicit/Dynamics สำหรับการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นสูง การเสียรูปขนาดใหญ่ ปัญหาที่เกิดจากการสัมผัส ซึ่งเกี่ยวข้องกับผลกระทบการสัมผัสหลายส่วนของรูปร่าง และพฤติกรรมของวัสดุที่ไม่เป็นเชิงเส้นสูง การวิเคราะห์แบบจำลองโดยการคำนวณบนคอมพิวเตอร์เพื่อทำการวิเคราะห์หรือจำลองพฤติกรรมตามธรรมชาติของระบบที่ต้องการ ปัญหาที่มีลักษณะเปลี่ยนรูปถาวรก็ควรเลือกแบบพลาสติก (Plasticity) เป็นต้น

2.1.3 กระบวนการแสดงผลลัพธ์ (Post-processing) เป็นขั้นตอนการแสดงผลหลังจากการวิเคราะห์ โดยค่าที่แสดงจะมีลักษณะเป็นค่าตัวเลขที่โหนด (Node) ค่าสมบัติของแต่ละเอลิเมนต์ (Element) ผลลัพธ์ที่จะต้องใช้ในการแสดงผลเพื่อพิจารณา ประกอบด้วย การเสียรูป ทิศทางการเสียรูป ความเร็วของวัตถุ ทิศทางของความเร็ว ความเค้นและความเครียดต่างๆ รวมทั้งการตัดภาคส่วน (Section Planes)

2.2 กำหนดสมมติฐานในการวิเคราะห์

สมมติฐานของวัสดุที่ใช้สำหรับกระสุน แผ่นเกราะอลูมิเนียม 7075 T6 และ 5083-H116 กำหนดให้เป็นวัสดุที่มีเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) และมีสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทาง (Isotropic Materials) ความเสียหายที่เกิดขึ้นพิจารณาตั้งแต่ช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นไปจนถึงช่วงพลาสติก ความเสียหายที่เกิดขึ้นอยู่ในระดับที่มีอัตราความเครียดสูง

2.3 ทฤษฎีและสมบัติของวัสดุ

แผ่นเกราะกันกระสุนและหัวกระสุนถูกสร้างโดยโปรแกรม ANSYS DesignModeler ที่มีหลายชิ้นส่วนแยกกัน

แต่อยู่ในไฟล์ชิ้นส่วนเดียวกัน (Multibody) แผ่นเกราะมีขนาดความกว้างและความยาวเท่ากับ 30x30 เซนติเมตร โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นเกราะเป็นกรณีต่างๆ สำหรับกระสุนที่ในการจำลองเป็นกระสุน 7.62x51 มิลลิเมตร ที่มีความเร็วในการจำลองของกระสุนตามมาตรฐาน NIU ระดับ 3

กระสุนทั้งสแตนคาร์ไบด์ (Tungsten carbide bullet) เป็นกระสุนเจาะเกราะ ที่มีส่วนของหัวกระสุนอยู่ภายในปลอกทองเหลืองซึ่งทำจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ โดยมีชื่อเรียกตามขนาดคือ “7.62 mm” ในการจำลองทางระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ใช้รูปแบบความเสียหายของ Johnson-Holmquist Failure Model (JH-1, JH-2) ที่มีความเสียหายเมื่อแบบจำลองวัสดุที่เปราะ เช่น เซรามิกภายใต้แรงดันขนาดใหญ่และอัตราความเครียดสูง รูปแบบจะพยายามที่จะรวมปรากฏการณ์ที่พบเมื่อวัสดุที่เปราะบางถูกแรงกระทำและเกิดความเสียหายซึ่งเป็นหนึ่งในแบบจำลองที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดเมื่อต้องรองรับกับผลกระทบจากชิปนาวูธ (Ballistic) กำหนดให้ σ คือความเค้นคราก (Yield Stress) เป็นไปตามสมการดังนี้ [14]

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

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

โดยที่ A, B, C, M, N เป็นค่าคงที่ของวัสดุ ความดันปกติ คือ $P^* = P / P_{HEL}$ โดยที่ P คือความดันไฮโดรสแตติกที่แท้จริง และค่า P_{HEL} คือค่าความดันไฮโดรสแตติกที่ HEL (Hugoniot Elastic Limit) ความดันไฮโดรสแตติก แรงดึงสูงสุดที่ปรับให้เป็นมาตรฐานคือ $T^* = T / T_{HEL}$ โดยที่ T คือแรงดันไฟฟ้าสถิตสูงสุดที่วัสดุสามารถทนได้ $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0$ คืออัตราความเครียดไร้มิติ โดยที่ $\dot{\epsilon}$ คืออัตราความเครียดที่เทียบเท่าจริง และ $\dot{\epsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$ [14]

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

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



การประชุมวิชาการราชชมภคด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 8
24 - 26 พฤษภาคม 2566 ณ โรงแรม อมารี พัทยา จังหวัดชลบุรี

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

$$\sigma_f^* = B(P^*)^M \cdot (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \leq SFMAX \quad (3)$$

Johnson-Cook Model คือความสัมพันธ์ของวัสดุโลหะระหว่างความเค้นและความเครียดสามารถอธิบายได้ภายใต้สภาวะของการเปลี่ยนแปลงรูปขนาดใหญ่ (Large deformation) อัตราความเครียดสูง (High strain rate) และอุณหภูมิที่สูงขึ้น (High temperature) โมเดลนี้ได้ถูกนำมาใช้ในการทำนายพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุ แสดงดังสมการที่ (4) [15]

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

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 ค่าสัมประสิทธิ์การเสริมความแข็งแรงของอัตราความเครียด (A strain-rate-hardening factor) และ m คือ ค่าสัมประสิทธิ์การอ่อนตัวด้วยความร้อน (Thermal-softening factor) $\dot{\epsilon}^*$ คือ อัตราความเครียดไร้มิติ (Strain rate nondimensionalized) ที่อ้างอิงจากอัตราความเครียดที่ $1/s$, T^* คือ อุณหภูมิไร้มิติ (Nondimensional temperature) สำหรับ T^* กำหนดได้ด้วยสมการดังนี้ [15]

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

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

โดยค่าสมบัติของวัสดุและพารามิเตอร์ของกระสุน 7.62x51 มิลลิเมตร เป็นวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ (Tungsten carbide) ที่ใช้ในการจำลองแสดงในตารางที่ 1 สำหรับแผ่น

อลูมิเนียม AL-7075 T6 และ AL-5083-H116 แสดงดังตารางที่ 2 และตารางที่ 3 ตามลำดับ สำหรับความสัมพันธ์ของความเค้นคราก (Yield stress) และความเครียดแบบคงรูป (Plastic strain) สำหรับ AL-7075 T6 และ AL-5083-H116 แสดงดังรูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 Properties and parameter JH of tungsten carbide [16]

Properties	Tungsten carbide
Density (ρ , g/cm ³)	14.56
Young's modulus (E, GPa)	539
Poisson ratio (ν)	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

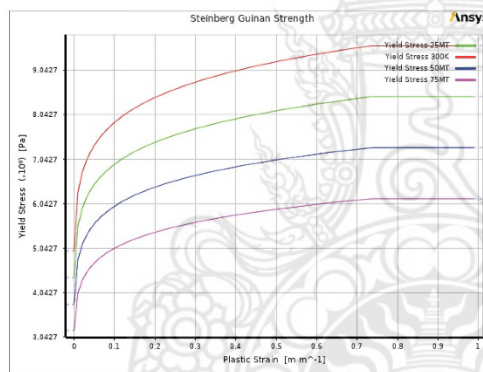
ตารางที่ 2 Properties and parameter of AL-7075 T6 [17]

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



การประชุมวิชาการราชชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 8
24 - 26 พฤษภาคม 2566 ณ โรงแรม อมารี พัทยา จังหวัดชลบุรี

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 ($T_{me,l}$, °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



รูปที่ 1 Relationship between yield stress and plastic strain of Steinberg-Guinan Strength for AL-7075 T6 [17]



รูปที่ 2 Relationship between yield stress and plastic strain of Johnson-Cook for AL-5083-H116 [18]

ตารางที่ 3 Properties and parameter of AL-5083-H116 [18]

Properties	AL-5083-H116
Density (ρ , g/cm ³)	2700
Specific heat (J/kg °C)	910
Johnson Cook Strength	
Strain Rate Correction	First Order
Initial Yield Stress	965
Hardening Constant (MPa)	596
Strain Rate Constant	0.551
Thermal Softening Exponent	0.859
Melting temperature (T_{melt} , °C)	619.85
Reference Strain Rate (/sec)	1
Bulk Modulus (GPa)	58.33
Shear modulus (GPa)	26.7

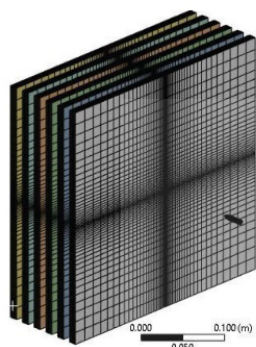
2.4 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

แผ่นเกราะอลูมิเนียมเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบากว่าโลหะประเภทอื่น โดยเฉพาะโลหะที่มีส่วนผสมของเหล็กเป็นหลักในการออกแบบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จะต้องสร้างโมเดลจำลองสามมิติในลักษณะแยกชิ้นส่วนทุกชิ้นออกจากกัน เพื่อให้สามารถกำหนดวัสดุในแต่ละชิ้นส่วนได้อย่างเหมาะสม และให้สามารถกำหนดชนิดเอลิเมนต์และควบคุมขนาดเอลิเมนต์ได้อย่างถูกต้อง เพื่อให้ได้แบบจำลองที่ถูกต้องและลดความผิดพลาดบางประการที่เกิดจากการถ่ายโอนไฟล์โมเดลจึงเลือกใช้โปรแกรม ANSYS DesignModeler เพื่อสร้างแบบจำลองภายในและไม่จำเป็นต้องนำเข้าไฟล์โมเดลแต่ประการใด รูปแบบจำลองแผ่นเกราะมีขนาด 30x30 เซนติเมตร ที่ความหนาแปรเปลี่ยนต่าง ๆ และหัวกระสุนเป็นกระสุนขนาด 7.62x51 มิลลิเมตร ซึ่งแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนลำตัวและส่วนหัวกระสุน การสร้างแบบจำลองกระสุนนั้นต้องแบ่งกระสุนออกเป็นสองส่วนดังกล่าว และทำการสร้างระนาบสองระนาบที่ตั้งฉากกันเพื่อแบ่งกระสุนออกตามความยาว และจะได้ชิ้นส่วนกระสุนทั้งหมดจำนวน 8 ชิ้นที่เป็นชิ้นงานรูปทรงตัน

การแบ่งชิ้นส่วนออกเป็นเอลิเมนต์จะต้องกำหนดชนิดของเอลิเมนต์ให้เหมาะสมกับแบบจำลอง ซึ่งเลือกใช้เอลิเมนต์ชนิดเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) กับส่วนปลายหัว

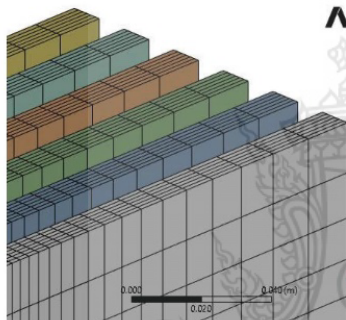


การประชุมวิชาการราชชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 8
24 - 26 พฤษภาคม 2566 ณ โรงแรม อมารี พัทยา จังหวัดชลบุรี



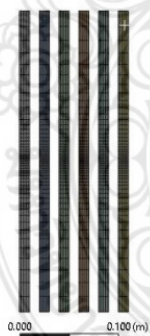
Ansys
2022 R2

ก)



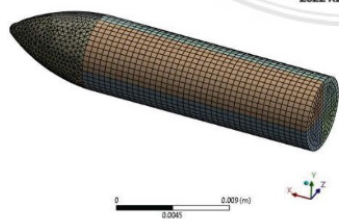
Ansys
2022 R2

ข)



Ansys
2022 R2

ค)



Ansys
2022 R2

ง)

รูปที่ 3 การกำหนดขนาดและการแบ่งเอลิเมนต์

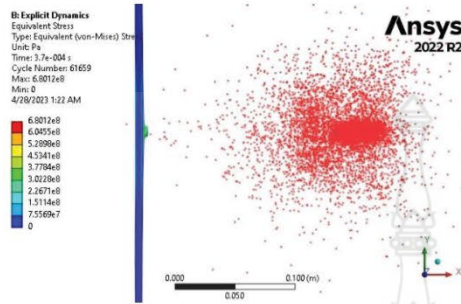
กระสุน และเลือกเอลิเมนต์ชนิดเฮกซะฮีดรอล (Hexahedral) สำหรับส่วนลำตัวกระสุนและแผ่นเกราะสี่เหลี่ยมทั้งหมด การแบ่งเอลิเมนต์ต้องใช้เทคนิคการกำหนดขนาด เป็นการควบคุมขนาดเอลิเมนต์ในทุกมิติ ยกตัวอย่างดังรูปที่ 3 ซึ่งมีแผ่นเกราะจำนวน 6 แผ่น จะต้องกำหนดให้เอลิเมนต์เกิดการลดขนาดจากขอบทุกด้าน (รวมทั้งหมด 48 ขอบ) เข้าไปยังจุดกึ่งกลางแผ่นเกราะด้วยการกำหนด Bias type และ Bias factor เท่ากับ 12 แสดงผลการแบ่งเอลิเมนต์ดังรูปที่ 3 ก) และกำหนดให้เกิดการเรียงเอลิเมนต์ในแต่ละแผ่นออกเป็น 6 ชั้นด้วยการเลือกมุมขอบ (ขอบด้านความหนา) ทั้งหมดรวมจำนวน 24 มุมขอบ และกำหนดค่า Number of divisions เท่ากับ 6 แสดงผลดังรูปที่ 3 ข) ระยะห่างจากกระสุนไปยังแผ่นเกราะไม่มีข้อจำกัดโดยในบทความนี้กำหนดไว้ที่ 100 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3 ค) และการแบ่งเอลิเมนต์ของกระสุน จะต้องกำหนดในรูปแบบรูปทรง (Body) ให้เกิดการแบ่งเอลิเมนต์อย่างละเอียดเข้าไปยังด้านในเนื้อกระสุน แสดงผลดังรูปที่ 3 ง) ส่งผลให้จำนวนเอลิเมนต์ในภาพรวมอยู่ที่ 119,763 เอลิเมนต์ ที่มี 126,786 โหนด กำหนดการจับยึดไปที่พื้นผิวขอบของแผ่นเกราะทั้ง 6 แผ่น นับรวมพื้นที่ได้ 24 พื้นที่เป็นแบบยึดแน่น (Fixed support) กำหนดความเร็วของกระสุน ซึ่งได้แบ่งออกเป็นจำนวน 8 ชั้นส่วนให้มีความเร็วไปตามทิศทางแกน x ด้วยความเร็วตามมาตรฐาน NU 3 เท่ากับ 850 เมตรต่อวินาที กำหนดคู่สัมผัสที่กระสุนเนื่องจากมีจำนวน 8 ชั้นส่วนที่ผิวสัมผัสกันด้วย Contacts Bodies เป็นแบบ Bonded ใช้รูปแบบการวิเคราะห์เป็นแบบ Explicit Dynamics ด้วยชุดคำนวณ AUTODYN ตั้งค่าการวิเคราะห์ด้วย End time เท่ากับ 0.001 การแสดงผลการวิเคราะห์ให้เลือกใช้ Equivalent (Von-Mises) Stress

3. ผลการวิเคราะห์และอภิปรายผล

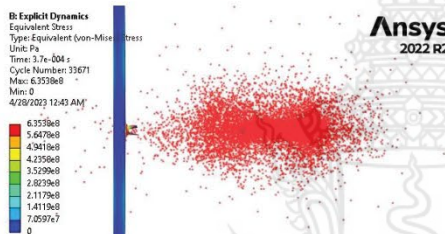
รูปแบบการวิเคราะห์แบ่งออกเป็นกรณีศึกษาดังนี้
3.1 กรณีแผ่นเกราะอลูมิเนียม 7075 T6 แผ่นเดี่ยวที่มีความหนา 6, 10 และ 60 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4-6 พบว่า ที่ความหนา 6 และ 10 มิลลิเมตร แผ่นเกราะไม่สามารถต้านทานการเจาะทะลุได้ แต่เมื่อสร้างแบบจำลองที่มีความหนาเท่ากับ 60 มิลลิเมตร จึงเห็นการเจาะทะลุลึกเข้าไปเป็นระยะทาง 40 มิลลิเมตร



การประชุมวิชาการราชชมรมกลดด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 8
24 - 26 พฤษภาคม 2566 ณ โรงแรม อมารี พัทยา จังหวัดชลบุรี

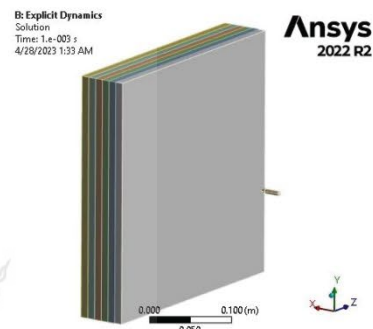


รูปที่ 4 วัสดุ 7075 T6 ที่ความหนา 6 มิลลิเมตร

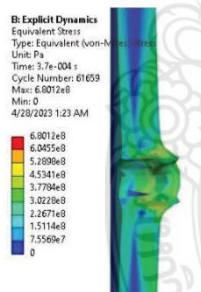


รูปที่ 5 วัสดุ 7075 T6 ที่ความหนา 10 มิลลิเมตร

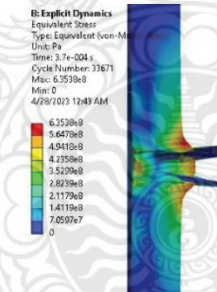
3.2 กรณีแผ่นเกราะเรียงซ้อน 6 แผ่นๆ ละ 10 มิลลิเมตร กำหนดคู่สัมผัสระหว่างแผ่นเกราะเป็นแบบ Frictionless ดังรูปที่ 7 และวิเคราะห์ผลได้ดังรูปที่ 8 พบว่า 3 แผ่นแรกที่กระสุนเข้าปะทะ แผ่นเกราะไม่สามารถต้านทานได้อย่างสมบูรณ์ แต่กระสุนจะไปหยุดในแผ่นเกราะที่ 4



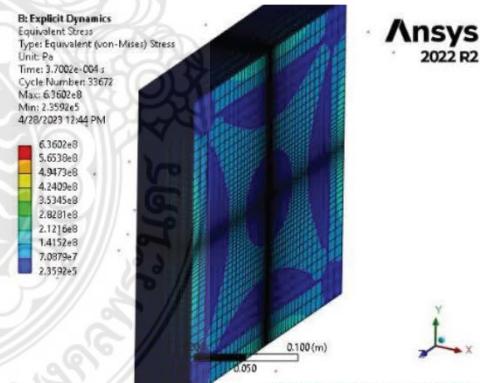
รูปที่ 7 แผ่นเกราะวัสดุ AL-7075 T6 จำนวน 6 แผ่น โดยมีความหนาแผ่นละ 10 มิลลิเมตร



ก) ความหนา 6 มิลลิเมตร

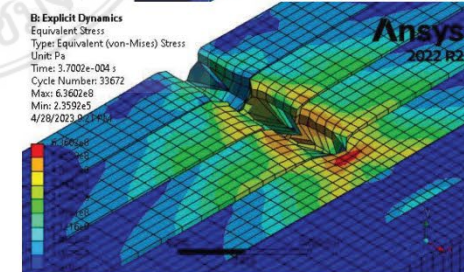


ข) ความหนา 10 มิลลิเมตร



ค) ความหนา 60 มิลลิเมตร

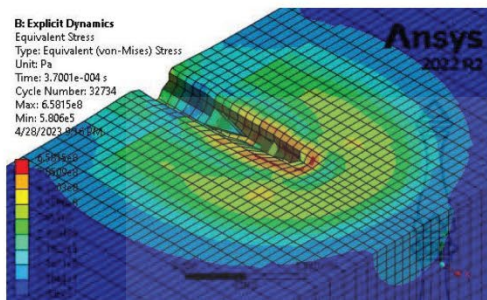
รูปที่ 6 ความสามารถในการเจาะทะลุแผ่นเกราะที่ทำจากวัสดุ AL-7075 T6 ที่ความหนาต่าง ๆ ก) ความหนา 6 mm ข) ความหนา 10 mm และ ค) ความหนา 60 mm



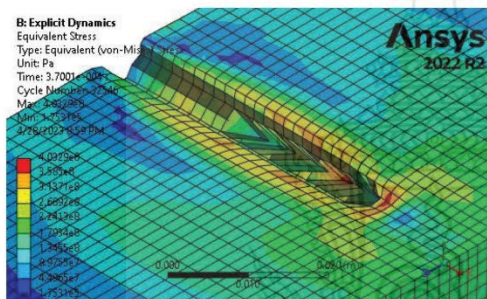
รูปที่ 8 ผลการจำลองด้วยวัสดุ 7075 T6 ก) แผ่นซ้อน 6 ชั้น ไม่มีช่องว่าง ใช้ Frictionless



การประชุมวิชาการราชชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 8
24 – 26 พฤษภาคม 2566 ณ โรงแรม อมารี พัทยา จังหวัดชลบุรี



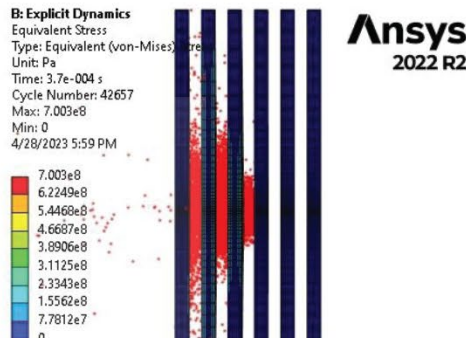
ก) แผ่นเกราะ AL-7075 หนา 60 มิลลิเมตร



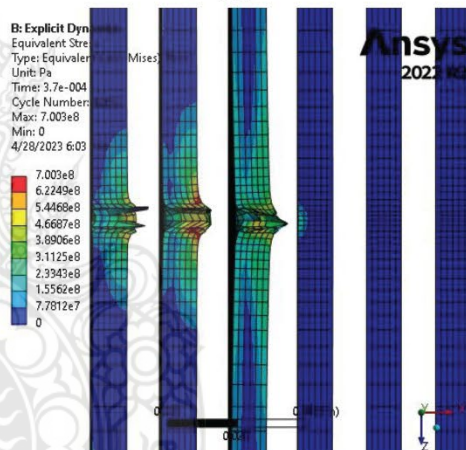
ข) แผ่นเกราะ AL-5083-H116 หนา 60 มิลลิเมตร

รูปที่ 9 ผลการจำลองด้วยแผ่นเกราะหนา 60 มิลลิเมตร

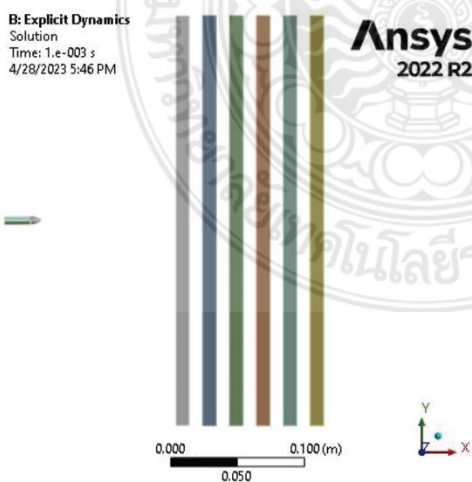
ก) วัสดุ 7075 T6 ข) วัสดุ AL-5083-H116



0.000 0.100 (m)
0.050



0.000 0.100 (m)
0.050



0.000 0.100 (m)
0.050

รูปที่ 11 ผลการจำลองแผ่นเกราะเรียงซ้อน 6 แผ่น

ระยะห่างแต่ละแผ่น 10 มิลลิเมตร ด้วยวัสดุอลูมิเนียม 7075 T6, Velocity = 850 m/s

3.3 กรณีแบบจำลองที่มีแผ่นเกราะหนา 60 มิลลิเมตร ด้วยวัสดุ AL-7075 T6 และวัสดุ AL-5083-H116 ดังรูปที่ 9 พบว่าแผ่นวัสดุ 7075 T6 สามารถต้านทานการเคลื่อนที่เข้าปะทะของกระสุนได้ดีกว่าแผ่นวัสดุ AL-5083-H116 ซึ่งส่งผลให้เกิดรูทะลุที่แผ่นเกราะวัสดุ AL-7075 T6 และแผ่นเกราะด้วยวัสดุ AL-5083-H116 เท่ากับ 38 และ 47 มิลลิเมตรตามลำดับ

รูปที่ 10 แผ่นเกราะวัสดุ AL-7075 T6 จำนวน 6 แผ่นๆ ละ 10 mm ด้วยระยะห่างระหว่างแผ่น 10 mm

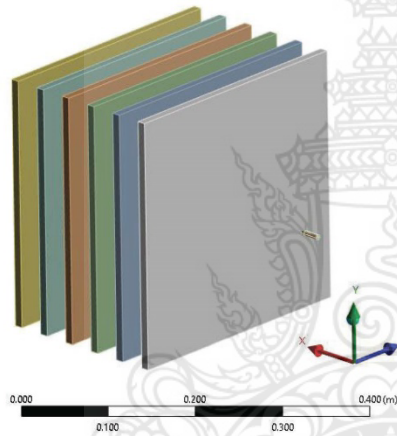
3.4 กรณีการจำลองแผ่นเกราะเรียงซ้อนจำนวน 6 แผ่น ซึ่งมีความหนาแผ่นละ 10 มิลลิเมตร ด้วยวัสดุ AL-7075 T6 และวัสดุ AL-5083-H116 ดังรูปที่ 10 ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 11



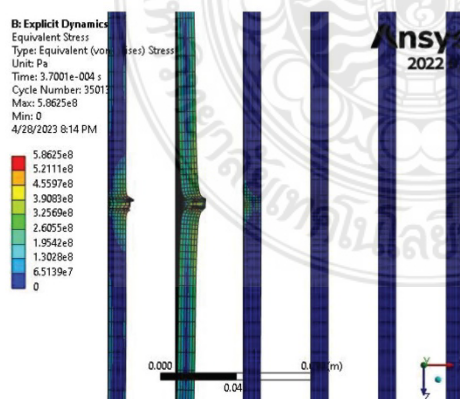
การประชุมวิชาการราชชมภรณ์ด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 8
24 – 26 พฤษภาคม 2566 ณ โรงแรม อมารี พัทธยา จังหวัดชลบุรี

พบว่าหากเป็นแผ่นวัสดุ AL-7075 T6 จะเกิดการเจาะทะลุผ่านทั้ง 3 แผ่น และกระสุนไปหยุดอยู่ที่แผ่นที่ 4 แต่สำหรับแผ่นวัสดุ AL-5083-H116 จะเจาะทะลุผ่านทั้ง 4 แผ่น และกระสุนไปหยุดอยู่ที่แผ่นเกราะที่ 5

3.5 กรณีแผ่นเกราะมีช่องว่างระหว่างแผ่นเกราะเพิ่มขึ้นจากเดิม 10 มิลลิเมตร เป็น 30 มิลลิเมตร และเลือกใช้วัสดุ AL-7075 T6 ดังรูปที่ 12 พบว่าความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุจะเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 13



รูปที่ 12 แผ่นเกราะวัสดุ AL-7075 T6 จำนวน 6 แผ่นๆ ละ 10 mm ด้วยระยะห่างระหว่างแผ่น 30 mm



รูปที่ 13 ผลการจำลองแผ่นเกราะเรียงซ้อน 6 แผ่น ระยะห่างแต่ละแผ่น 30 มิลลิเมตร ด้วยวัสดุอลูมิเนียม 7075 T6, Velocity = 850 m/s

4. สรุปผลการวิเคราะห์

การวิเคราะห์แผ่นเกราะกันกระสุนที่ทำจากแผ่นวัสดุอลูมิเนียม AL-7075 T6 และ AL-5083-H116 ได้ถูกวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอเมนต์ แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์นี้เป็นแบบจำลองที่ผ่านการพิสูจน์จากงานวิจัยที่ผ่านมา [9]-[13] ที่มีการเปรียบเทียบผลกับการทดลอง ดังนั้นในบทความนี้จึงยังไม่มีผลจำเป็นต้องใช้การทดลองในเชิงเปรียบเทียบ แผ่นเกราะที่กำหนดขึ้นมาด้วยวัสดุทั้งสองชนิด คือ AL-7075 T6 และ AL-5083-H116 ถูกนำมาวิเคราะห์โดยตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่าเป็นวัสดุที่มีเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) มีสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทาง (Isotropic Materials) ความเสียหายที่เกิดขึ้นพิจารณาตั้งแต่ช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นไปจนถึงช่วงพลาสติก ความเสียหายที่เกิดขึ้นอยู่ในระดับที่มีอัตราความเครียดสูง จากผลการวิเคราะห์ได้ชี้ให้เห็นว่าภายใต้เงื่อนไขการจำลองเดียวกันและพารามิเตอร์เหมือนกัน โดยแตกต่างในด้านชนิดวัสดุ พบว่าวัสดุ AL-7075 T6 มีขีดความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุของกระสุน 7.62x51 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน NIJ 3 ที่ความเร็วกระสุน 850 เมตรต่อวินาที ได้ดีกว่าวัสดุ AL-5083-H116 และการเพิ่มระยะห่างระหว่างแผ่นเกราะที่ซ้อนกันจะช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการต้านทานที่เพิ่มขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

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

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. K. Gupta, M. A. Iqbal, and Z. Mohammad, "Energy dissipation in plastic deformation of thin aluminum targets subjected to projectile impact," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 110, pp. 85–96, Dec. 2017.
- [2] K. Krishnan, S. Sockalingam, S. Bansal, and S. D. Rajan, "Numerical simulation of ceramic composite armor subjected to ballistic impact,"



การประชุมวิชาการราชชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 8
24 – 26 พฤษภาคม 2566 ณ โรงแรม อมาลี พัทยา จังหวัดชลบุรี

- Compos. Part B Eng.*, vol. 41, no. 8, pp. 583–593, Dec. 2010.
- [3] 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.
- [4] M. J. Pawar et al., “Comparison of ballistic performances of Al₂O₃ and AlN ceramics,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 98, pp. 42–51, Dec. 2016.
- [5] P. L. Zhang et al., “Study of the shielding performance of a Whipple shield enhanced by Ti-Al-nylon impedance-graded materials,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 124, pp. 23–30, Feb. 2019.
- [6] P. K. Pandey, A. Harmukh, M. K. Khan, M. A. Iqbal, and S. G. Ganpule, “Ballistic response of skin simulant against fragment simulating projectiles,” *Def. Technol.*, Apr. 2023.
- [7] A. Serjouei, R. Chi, Z. Zhang, and J. Sridhar, “Experimental validation of BLV model on bi-layer ceramic-metal armor,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 77, pp. 30–41, Mar. 2015.
- [8] W. Liu et al., “Influence of different back laminate layers on ballistic performance of ceramic composite armor,” *Mater. Des.*, vol. 87, pp. 421–427, Dec. 2015.
- [9] 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
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] M. Thawornsinsin, 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.
- [14] 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.
- [15] 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.



การประชุมวิชาการราชชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 8
24 – 26 พฤษภาคม 2566 ณ โรงแรม อมารี พัทยา จังหวัดชลบุรี

- [16] 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.
- [17] Steinberg D.J. LLNL., "Equation of State and Strength Properties of Selected Materials", Feb. 1991.
- [18] T. Børvik, M.J. Forrestal, O.S. Hopperstad, T.L. Warren d, and M. Langseth, "Perforation of AA5083-H116 aluminium plates with conical-nose steel projectiles – Calculations," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 36, no. 3, pp. 426-437, Mar. 2009.





มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ขอมอบใบประกาศเกียรติคุณ ให้ไว้เพื่อแสดงว่า

มัลลิกา เดชสุภา, ทรงวุฒิ มงคลเลิศมณี, กฤษณ์ อภิญาวิศิษฐ์, ประสิทธิ์ แผงเพชร, แจ็ค ชุมอินทร์, ประกอบ ชาติกุณฑ์

ได้เข้านำเสนอบทความเรื่อง

การทำนายพฤติกรรมการเสียหายของแผ่นกระเบื้องเคลือบกันกระสุนเกรด 5083-H116 และ 7075 T6 ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การประชุมวิชาการราชชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 8
ระหว่างวันที่ 24 - 26 พฤษภาคม 2566 ณ โรงแรมอมารี พัทยา จังหวัดชลบุรี

(รองศาสตราจารย์ ดร.พิชัย จันทร์มณี)

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

(รองศาสตราจารย์ ดร.อนินท์ มิมมนต์)

นายกสมาคมเครือข่ายราชชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ

ประวัติการศึกษาและการทำงาน



ชื่อ นามสกุล นางสาวมัลลิกา เดชสุภา
 วัน เดือน ปีเกิด 27 สิงหาคม 2542
 ภูมิลำเนา 61 ถนนหน้าสถานีรถไฟบางซื่อ เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร

ประวัติการศึกษา

วุฒิการศึกษา	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
มัธยมศึกษาตอนปลาย	โรงเรียนราชินีนาถอาจารย์ สามเสนวิทยาลัย2	2559
ปริญญาตรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2564

ตำแหน่งและสถานที่ทำงานปัจจุบัน

-

