แผ่นเกราะโลหะกันกระสุน

Steel Armor Plates

วิสา คร้ามอ่ำ

Visa Khramum

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2564

แผ่นเกราะโลหะกันกระสุน

Steel Armor Plates

วิสา คร้ามอ่ำ

Visa Khramum

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ชื่อวิทยานิพนธ์ แผ่นเกราะโลหะกันกระสุน

ชื่อ นามสกุล วิสา คร้ามอ่ำ

ชื่อปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะ วิศวกรรมศาสตร์

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ประกอบ ชาติภุกต์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้ให้ความเห็นชอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แล้ว

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธงชัย ฟองสมุทร)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ วิโรจน์ชีวัน)

..... กรรมการ

(ดร.ประกอบ ชาติภุกต์)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

.....รักษาราชการแทนคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ พันธุนะ)

วันที่ 20 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2565

ชื่อวิทยานิพนธ์ แผ่นเกราะโลหะกันกระสุน
ชื่อ นามสกุล วิสา คร้ามอ่ำ
ชื่อปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
สาขาวิชา และคณะ วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2564

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อวิเคราะห์และออกแบบรูปแบบแผ่นเกราะโลหะกันกระสุน และสร้างแผ่นเกราะโลหะกันกระสุนสำหรับรถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะ ระเบียบวิธีวิจัยประกอบด้วยการทดสอบตามมาตรฐาน NIJ และการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แผ่นเกราะกันกระสุนที่สร้างขึ้นได้รับการทดสอบด้วยการยิงจริงและเปรียบเทียบผลการยิงตามมาตรฐาน NIJ ด้วยโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งในที่นี้เลือกใช้โปรแกรม Ansys/Explicit Dynamic โปรแกรม SolidWorks ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการออกแบบและสร้างโมเดล วัสดุที่นำมาสร้างและใช้ในการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ SKD11 และ SUS304 โดยมีพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วย วัสดุ ค่าความแข็ง ระยะห่างระหว่างแผ่น และความหนา ในกรณีที่แผ่นเกราะซ้อนกันจำนวน 2 แผ่น ได้กำหนดให้วัสดุ SKD11 เป็นแผ่นเกราะแผ่นแรกที่ถูกปะทะกับกระสุนก่อน ทำหน้าที่ในการทำลายหัวกระสุน และแผ่นเกราะแผ่นที่ 2 ทำมาจากวัสดุ SUS304 ทำหน้าที่ในการดูดซับพลังงานและยับยั้งการเคลื่อนที่ของกระสุน ในการทดสอบได้เลือกกระสุน .30-06 caliber M2 AP 166 Gr ที่มุม 0 องศา วัดความเร็วได้ 901.7 m/s ความเร็วกระสุนในโปรแกรม Ansys/Explicit Dynamic ที่ความเร็ว 880 m/s โดยด้านหน้าทำจากวัสดุ SKD11 ความหนา 10 mm และแผ่นด้านหลังทำจากวัสดุ SUS304 ความหนา 10 mm ยิง 1 นัด พบว่ากระสุนเจาะทะลุแผ่นเกราะด้านหน้าได้ แต่ไม่สามารถเจาะทะลุแผ่นเกราะด้านหลัง การทดสอบตามมาตรฐาน NIJ 3 ยิงด้วยกระสุน 7.62x51 mm NATO FMJ 148 Gr ที่มุม 0 องศา จำนวน 5 ครั้ง ด้วยความเร็วเท่ากับ 846.4, 841.3, 839.1 838.2 และ 845.3 m/s โดยแผ่นเกราะด้านหน้าและด้านหลังทำจากวัสดุ SUS304 ที่มีความหนา 8 mm และความเร็วกระสุนในโปรแกรม Ansys ที่ความเร็ว 847 m/s พบว่าแผ่นเกราะด้านหน้าจะมีรอยเจาะของหัวกระสุนและและด้านหลังจะมีรอยนูนเพียงเล็กน้อย จากผลการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์และผลการทดสอบจริงพบว่ามีความเสียหายที่เกิดขึ้นกับแผ่นเกราะนั้นมีความสอดคล้องกัน ดังนั้นจึงได้ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองความเสียหายของแผ่นเกราะที่สามารถต้านทานการเจาะทะลุของมาตรฐาน NIJ ระดับ4 ได้ ผลของงานวิจัยสรุปได้ว่าการใช้แผ่นเกราะซ้อนกันด้วยวัสดุต่างชนิดที่เหมาะสมและมีจำนวนหลายชั้น ย่อมส่งผลต่อการต้านทานการเจาะทะลุได้ ความหนาที่เพิ่มขึ้นและระยะห่าง

ที่เหมาะสมระหว่างแผ่นเกราะเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการต้านทานการเจาะทะลุสำหรับค่าความแข็งของวัสดุที่เพิ่มขึ้นจะมีผลต่อความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุที่ดี โดยควรนำมาใช้กับแผ่นเกราะแผ่นแรก หรือแผ่นเกราะด้านหน้า

คำสำคัญ : แผ่นเกราะโลหะ, ไฟไนต์เอลิเมนต์, รถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะ

Thesis title Steel Armor Plates
Author Visa Khramum
Degree Master of Engineering (Mechanical Engineering)
Major program Mechanical Engineering Faculty of Engineering
Academic Year 2021

ABSTRACT

This research project aimed to analyze and design the pattern of a bulletproof metal armor plate as well as build a bulletproof metal armor plate for a small armored regular truck. The methodology consisted of the NIJ standard test and the finite element analysis. The bulletproof plates created were tested for a real firing. Their firing results were compared with those of NIJ-standard using a finite element program, in this case applying with the program Ansys/Explicit Dynamic. SolidWorks program is employed as a tool to design and create 3D models of armor plates and bullets. The materials taken in the finite element simulation were SKD11 and SUS304 and the parameters utilized in the research were material types, hardness values, spacing between the plates and thickness. In the case of two armor plates stacked, SKD11 material was designed for the first armor plate to be hit by the bullet. It served to destroy bullets. In addition, the second armor plate made of SUS304 material served to absorb energy and obstruct the movement of bullets. For testing, a 30-06 caliber M2 AP 166 Gr bullet was selected at a 0-degree angle and the velocities measured and set by the Ansys/Explicit Dynamic program were 901.7 m/s and 880 m/s, respectively. The front plate made of SKD11 material with a thickness of 10 mm and the back plate made of SUS304 material with a thickness of 10 mm were fired 1 shot. The results showed that the bullet could penetrate the front armor plate but not penetrate the back-armor plate. In the NIJ 3 standard tests, the shooting with a 7.62x51 mm NATO FMJ 148 Gr shell at a 0-degree angle for 5 times with velocities equal to 846.4, 841.3, 839.1 838.2 and 845.3 m/s was performed on the stacking front and back armor plates, both made of SUS304 material with a thickness of 8 mm. The bullet velocity simulated by the Ansys program was 847 m/s, resulting in the front plate having a bullet penetration and a slight bulge on the back plate. From the finite element simulation results and the actual test results, it was found that the damage to the armor plates detected by both methods was consistent. Therefore, the finite

element program was selected to simulate the damage of armor plates resistant to penetration according to the NIJ standard Level 4. The results of the research could be concluded that the use of armor plates stacked with suitable different materials in multiple layers would affect the penetration resistance. Increased thickness and optimal spacing between the armor plates were important parameters in penetration resistance. Moreover, it revealed that the higher the material hardness, the better its ability to resist penetration. In particular, this suggestion should be applied to the first armor plate or front armor plate.

Keywords : Steel Armor Plates, Finite Element, Small Armored Regular Truck

กิตติกรรมประกาศ

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

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธงชัย ฟองสมุทร ที่กรุณาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ชี้แนะแนวทาง ให้ความรู้ ตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ วิโรจน์ชีวัน ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ให้ความรู้ ชี้แนะแนวทาง ตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา สมาชิกในครอบครัว และครูอาจารย์ทุกท่าน ผู้ที่ให้ความรู้ อนุเคราะห์ ส่งเสริม สนับสนุนด้านทุนทรัพย์และกำลังใจ ค่อยอบรมสั่งสอนจนประสบความสำเร็จในด้านการศึกษา

ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร รวมถึงเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัยครั้งนี้ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ดี ท้ายที่สุดนี้ ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะมีประโยชน์สำหรับผู้อ่านไม่มากก็น้อยต่อไป

วิสา คร้ามอ่ำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ซ
สารบัญรูป	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	4
1.5 สถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรม	
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.2 มาตรฐานแผ่นเกราะกันกระสุน	15
2.3 การทบทวนวรรณกรรม	20
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย	
3.1 ระเบียบวิธีวิจัย	28
3.2 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วย ANSYS: Explicit Dynamics	31
3.3 การเตรียมแผ่นเกราะโลหะสำหรับทดสอบการยิงกระสุน	49
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	
4.1 ผลการดำเนินงานเตรียมการยิงกระสุนลงบนแผ่นเกราะโลหะ	52
4.2 ผลการทดสอบจริงและการเปรียบเทียบผลการยิงกระสุนกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	55
4.3 ผลการจำลองการยิงแผ่นเกราะโลหะด้วยการเปลี่ยนแปลงชนิดของวัสดุและความหนา	59

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล 72

5.2 ข้อเสนอแนะ 73

เอกสารอ้างอิง 74

ประวัติการศึกษาและการทำงาน 79

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ตารางภัยคุกคามและการยิงทดสอบความสามารถกันกระสุนของเกราะ	15
2.2	ตารางสรุปการวินิจฉัยการปฏิบัติต่อผลการยิงทดสอบเกราะ	20
2.3	ผลการเปรียบเทียบจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลอง	25
3.1	สมบัติของวัสดุ Tungsten carbide (WC)	33
3.2	สมบัติของวัสดุ SKD11	34
3.3	สมบัติของวัสดุ SUS304	35
3.4	ตัวอย่างจำนวนโหนดและเอลิเมนต์ของแผ่นเกราะและผลรวมของโหนดและเอลิเมนต์ทั้งหมด	41

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	รถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะที่ผ่านการวิจัยและพัฒนาขึ้น	2
1.2	รายละเอียดชิ้นส่วนเกราะกันกระสุนประเภทต่างๆ ที่ติดตั้งบนรถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะ	2
2.1	ลักษณะความเค้นใน 3 มิติ	6
2.2	เอลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า	8
2.3	Ballistic test setup	19
2.4	แผนภาพการแบ่งเอลิเมนต์ที่กระสุนและแผ่นเกราะ	21
2.5	แผนภาพการเสียรูปของแผ่นเกราะสำหรับกระสุนขนาด 20 มม. ในช่วงเวลาต่างๆ	22
2.6	การเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ความหนา 20 มม.	22
2.7	แผนภาพการเสียรูปของแผ่นเกราะสำหรับกระสุนขนาด 9 มม. ในช่วงเวลาต่างๆ	22
2.8	การเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ความหนา 9 มม.	23
2.9	ภาพของกระสุนเกราะที่แตกต่างกันใช้สำหรับการศึกษา	23
2.10	มุมมองด้านบนของรูเจาะภายหลังการชนกับกระสุน 7.62 AP รอยแตกขนาดเล็กชี้ให้เห็น โดยเครื่องหมายลูกศรในการทำ Tempering time 24 และ 48 ชั่วโมง (a) Tempering time 2 ชั่วโมง (b) Tempering time 24 ชั่วโมง และ (c) Tempering time 48 ชั่วโมง	23
2.11	ภาคตัดแผ่นเกราะ Tempering time 48 ชม. (a) AP 7.62 มม. และ (b) AP 12.7 มม.	24
2.12	ไฟไนต์เอลิเมนต์โมเดลสำหรับกระสุนและแผ่นเกราะ	24
2.13	ผลการจำลองการเจาะของกระสุนที่ความเร็ว 630 m/s (a) t=0, (b) t=50 μs, (c) t=90 μs, (d) t=130 μs, และ (e) t=630 μs	25
2.14	ภาพการเจาะทะลุของกระสุนบนแผ่นเกราะจากการทดลองที่ความเร็วกระสุน 738 m/s	25
2.15	การเจาะทะลุของกระสุนผ่านแผ่นเกราะฐานในช่วงเวลาต่างๆ	26
2.16	เปรียบเทียบผลการเจาะทะลุเกราะด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลอง	26

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.17	ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ความเค้น Von-Mises ในแกนกระสุน และทิศทางการเลี้ยวเบน ของกระสุน	27
3.1	ขั้นตอนการศึกษาวิจัย	29
3.2	กรอบการวิจัย	30
3.3	ตัวอย่างโมเดลแบบจำลอง 3 มิติ A) แผ่นเกราะกันกระสุนในมุมมองไอโซเมตริก และ B) แบบจำลองหัวกระสุน	31
3.4	โครงสร้างกระสุน A) มิติของกระสุน AP 7.62 mm และชิ้นส่วน: 1. ปลอกทองเหลือง 2. หัวจุด 3. แกนเหล็กชุบแข็ง 4. ฐานตะกั่ว 5. แก็ป และ B) ขนาดกระสุน มีหน่วยเป็น มม.	31
3.5	User interface ของ ANSYS 2020R2	32
3.6	ตัวอย่างการกำหนดวัสดุใหม่สำหรับ SKD11 ด้วย Johnson Cook Strength	36
3.7	ตัวอย่างการกำหนดสมบัติวัสดุของ SKD11	37
3.8	นำเข้าโมเดลเกราะกันกระสุนและลูกกระสุนสู่ ANSYS	37
3.9	นำเข้าโมเดล 10 Parts 10 Bodies สู่ Design Modeler และใช้คำสั่ง From New Part	38
3.10	โมเดลเกราะกันกระสุนและลูกกระสุนที่นำเข้าสู่ ANSYS จำนวน 3 Parts 10 Bodies	38
3.11	เข้าสู่หน้าต่าง Mechanical ด้วยคำสั่ง Model	39
3.12	การกำหนดชนิดวัสดุ และกำหนดค่า Stiffness Behavior เป็น Flexible	39
3.13	การกำหนด Body Interaction ของแผ่นเกราะทั้งสองที่ปะกบกันเป็นแบบ Frictionless	40
3.14	การกำหนด Element Size	42
3.15	การตั้งค่าขนาดของ Element Size ที่แผ่นเกราะ	42
3.16	ลักษณะของรูปแบบเมชที่แผ่นเกราะ	42
3.17	การกำหนดค่าความเร็วเริ่มต้น (Initial velocity)	43
3.18	การใส่ค่าความเร็วและทิศทางการเคลื่อนที่	43
3.19	ค่าของ End Time และ Result Number of Points	44

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.20	การกำหนด Fixed Support	44
3.21	การกำหนด Solution	44
3.22	การแสดง Solver Output	45
3.23	สถานะปกติ กราฟมีลักษณะคงที่ในแนวนอน	46
3.24	สถานะไม่ปกติ กราฟไม่อยู่ในแนวนอน	46
3.25	เส้นกราฟ Energy Error แสดงสถานะปกติ	47
3.26	เส้นกราฟ Momentum Summary แสดงผลปกติวิ่งในแนวนอน	47
3.27	เส้นกราฟ Hourglass Energy แสดงผลที่เป็นปกติ	48
3.28	ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ Equivalent Stress	49
3.29	ตัวอย่างชิ้นส่วนแผ่นโลหะที่นำมาประกอบเป็นแผ่นเกราะโลหะ	49
3.30	แผ่นเกราะโลหะกันกระสุนที่ประกอบเสร็จแล้วรอการทดสอบ	50
3.31	แผ่นเกราะโลหะกันกระสุนที่ประกอบเสร็จแล้วรอการทดสอบ	50
3.32	แผ่นเกราะโลหะกันกระสุนที่ประกอบเสร็จแล้วแห้ง	51
3.33	ตัวอย่างแผ่นเกราะโลหะกันกระสุนที่รอการทดสอบ	51
4.1	ตำแหน่งอุปกรณ์ต่างๆ และระยะการยิงตามมาตรฐาน NIJ	53
4.2	เครื่องยิงกระสุนและเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับบันทึกผลและควบคุม	53
4.3	การจัดเตรียม a) กระบะวัสดุหนุนเพื่อรองรับแผ่นเกราะที่จะยิงตามมาตรฐาน NIJ และ b) แผ่นพิสูจน์	53
4.4	กล้องวัดความเร็วกระสุนตามมาตรฐาน NIJ	54
4.5	แผ่นเกราะกันกระสุนสำหรับการทดสอบ	54
4.6	แผ่นเกราะกันกระสุนจริงที่จะนำมาเปรียบเทียบกับโปรแกรม ANSYS	55
4.7	ผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรม ANSYS	55
4.8	ผลการทดสอบยิงจริงตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3	56
4.9	ผลการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วย ANSYS (a) รอยเจาะของกระสุนทะลุผ่านแผ่นด้านหน้าแต่ไม่ผ่านแผ่นด้านหลัง (b) รอยเจาะที่แผ่นเกราะด้านหน้า	57
4.10	ผลการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วย ANSYS แสดงรอยนูนที่แผ่นเกราะด้านหลัง	58

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.11	การวัดทิศทางมุมปะทะของกระสุนกับแผ่นเกราะ	59
4.12	มุมปะทะของกระสุนกับแผ่นเกราะ a) 15° b) 30° c) 45° และ d) 60°	59
4.13	ลักษณะความเสียหายของแผ่นเกราะ SKD11 หนา 6 mm ที่มุมปะทะ 15°	60
4.14	ลักษณะความเสียหายของแผ่นเกราะ SKD11 หนา 6 mm ที่มุมปะทะ 30°	61
4.15	ลักษณะความเสียหายของแผ่นเกราะ SKD11 หนา 6 mm ที่มุมปะทะ 45°	62
4.16	ลักษณะความเสียหายของแผ่นเกราะ SKD11 หนา 6 mm ที่มุมปะทะ 60°	63
41.7	ลักษณะความเสียหายของแผ่นเกราะ SKD11 หนา 8 mm ที่มุมปะทะ 15°	64
4.18	ลักษณะความเสียหายของแผ่นเกราะ SKD11 หนา 8 mm ที่มุมปะทะ 30°	65
4.19	ลักษณะความเสียหายของแผ่นเกราะ SKD11 หนา 8 mm ที่มุมปะทะ 45°	66
4.20	ลักษณะความเสียหายของแผ่นเกราะ SUS304 หนา 6, 8 และ 10 mm ที่มุมปะทะ 60°	67
4.21	ลักษณะความเสียหายของแผ่นเกราะ SUS304 หนา 8 mm ที่มุมปะทะ 15°	68
4.22	ลักษณะความเสียหายของแผ่นเกราะ SUS304 หนา 8 mm ที่มุมปะทะ 30°	69
4.23	ความเค้นสูงสุดและการเสียรูปของแผ่นเกราะสองชั้นสำหรับวัสดุ SKD11 และ SUS304	70

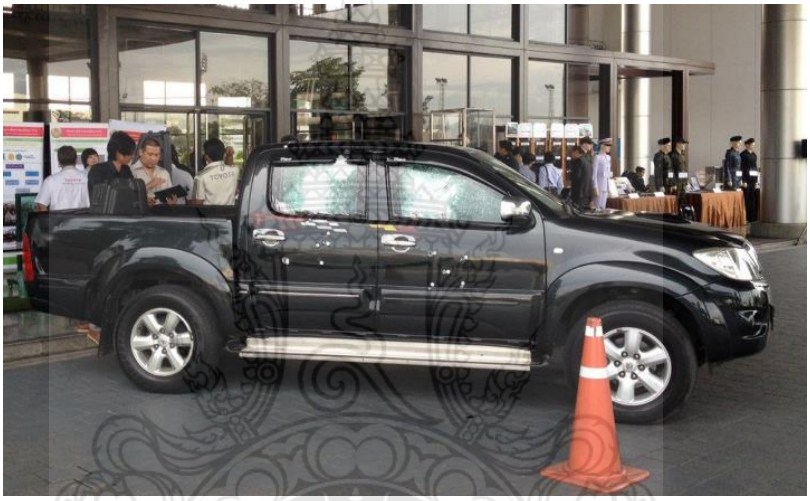
บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

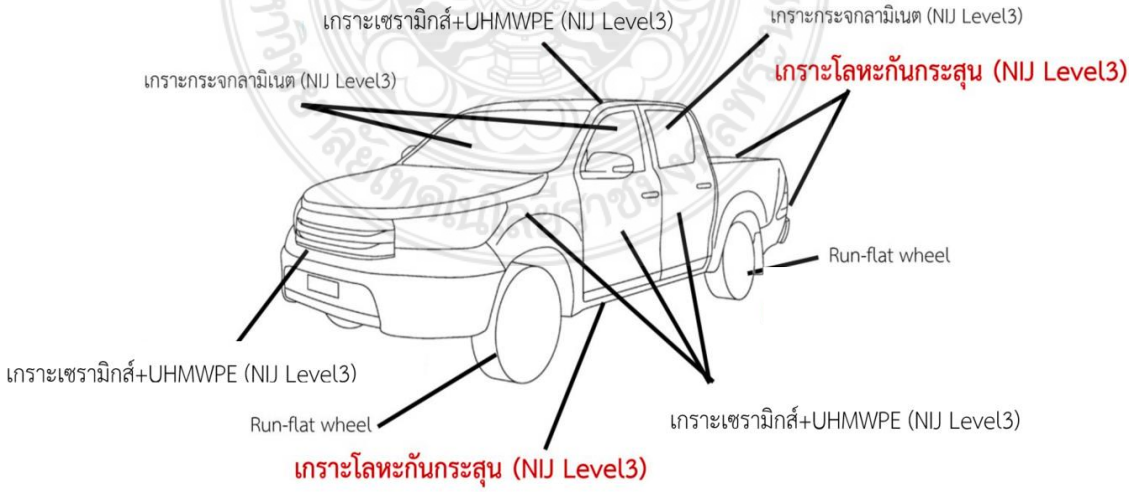
จากยุทธศาสตร์การพัฒนาเพื่อเสริมความมั่นคงของชาติ (พ.ศ. 2561-2564) สำนักงานสภาความมั่นคงแห่งชาติ สำนักนายกรัฐมนตรี ได้กล่าวไว้ในหลักการและเหตุผลว่า “เพื่อเสริมความมั่นคงของชาติ มุ่งเน้นป้องกันแก้ไข และลดเงื่อนไขของปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อความมั่นคงและการพัฒนาคนและชุมชนในพื้นที่เป้าหมายที่มีความเสี่ยงทาง ความมั่นคง โดยให้ความสำคัญกับการดำเนินงานอย่างบูรณาการในกระบวนการด้านเศรษฐกิจ สังคม และการป้องกันประเทศ เข้ามาดำเนินงานร่วมกันอย่างประสานสอดคล้องกันเพื่อพัฒนาความเป็นอยู่ของคนและชุมชนในพื้นที่เป้าหมาย เสริมสร้างความมั่นคงให้ประเทศ เสริมสร้างภูมิคุ้มกันให้คนมีจิตสำนึกด้านความมั่นคงและให้ชุมชนพื้นที่เป้าหมายมีความพร้อมในการรักษาความมั่นคง รวมทั้งให้ความสำคัญในมิติความมั่นคงร่วมกับประเทศเพื่อนบ้านและประชาคมอาเซียน”ดังนั้นการสร้างนวัตกรรมเพื่อการเสริมสร้างขีดความสามารถในการป้องกันและการรบจึงเป็นสิ่งสำคัญมาก และที่ผ่านมาจนปัจจุบันปัญหาความไม่สงบใน 3 จังหวัดชายแดนภาคใต้ ที่เกิดความขัดแย้งมีการก่อความไม่สงบต่างๆ เช่น การวางระเบิด การลอบทำร้ายประชาชนและเจ้าหน้าที่ที่เข้าไปดูแลรักษาความสงบทั้งนี้ในการก่อเหตุความไม่สงบนั้นได้รวมถึงการลอบยิงเจ้าหน้าที่ในขณะขับรถออกปฏิบัติงาน ลาดตะเวนตามเส้นทางล่อแหลมหรือสุ่มเสี่ยงจนทำให้มีเจ้าหน้าที่เกิดอันตรายได้รับบาดเจ็บและเสียชีวิตจากเหตุการณ์ดังกล่าวเป็นจำนวนมาก ซึ่งรถที่ใช้ในการปฏิบัติหน้าที่นั้นอาจป้องกันการโดนลอบยิงนั้นจำเป็นจะต้องใช้รถที่มีสรรถนะการป้องกันที่สูงและดีเยี่ยม การจัดซื้อรถเกราะกันกระสุนขนาดใหญ่นั้นมีราคาสูงเช่นการจัดซื้อ [1] รถหุ้มเกราะล้อยางรุ่น APC 4X4 REVA MK III โดยนำเข้าจากประเทศแอฟริกาใต้ ในราคาคันละประมาณ 11 ล้านบาท โดยในพื้นที่ 3 จังหวัดชายแดนภาคใต้มีความต้องการใช้รถเกราะกันกระสุนเป็นจำนวนมากเพื่อความปลอดภัยต่อเจ้าหน้าที่ แต่จำนวนรถมีไม่เพียงพอต่อความต้องการในพื้นที่เนื่องจากต้องใช้งบในการจัดซื้อสูงมาก ต่อมาได้มีการคิดค้นและทำรถยุทธวิธีกันกระสุนหรือรถปิกอัพหุ้มเกราะขึ้นเป็นปิกอัพ Double Cab (4 ประตู) เครื่องยนต์ดีเซลเทอร์โบเสริมเหล็กขนาดความหนา 1-1.30 เซนติเมตร รอบตัวรถหลังคาและพื้นที่ใต้ท้องรถพร้อมติดกระจกกันกระสุนขนาดความหนาประมาณ 2 เซนติเมตร รอบคัน โดยรถหุ้มเกราะลักษณะนี้นิยมใช้กันในหน่วยรบต่างๆหลายประเทศ เพราะความหลากหลายของพื้นที่เช่นทางแคบเกินกว่ารถหุ้มเกราะขนาดใหญ่จะผ่านเข้าไปได้ หรือแม้แต่ความคล่องตัวในการใช้งานอีกทั้งการบำรุงรักษาที่เรียบง่าย

ที่ผ่านมากรมการขนส่งทหารบกระหว่างกองทัพบกได้มีข้อตกลงร่วมกับภาคเอกชนว่าด้วยความร่วมมือและการให้การสนับสนุนงบประมาณในการดำเนินการโครงการวิจัยและพัฒนารถยนต์

บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะดังรูปที่ 1.1 ซึ่งกองทัพบกโดยกรมการขนส่งทหารบก เป็นหน่วยงานเจ้าของโครงการ รถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะที่พัฒนาโดยกรมการขนส่งทหารบก ได้รับรางวัลนวัตกรรมที่ทรงคุณค่า และเพื่อเป็นการวิจัยและพัฒนาต่อเนื่องเพื่อให้รถบรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะ มีประสิทธิภาพในการใช้งานเป็นประโยชน์ต่อการทางทหารโดยเฉพาะในสามจังหวัดชายแดนภาคใต้ จำเป็นต้องเพิ่มคุณภาพของเกราะป้องกันกระสุน เช่น อาจจะเพิ่มความสามารถในการป้องกันการยิงให้สูงขึ้น หรือการลดน้ำหนักของแผ่นเกราะโลหะกันกระสุน เป็นต้น รูปที่ 1.2 เป็นการนำเสนอภาพการติดตั้งแผ่นเกราะต่างๆ เข้ากับรถบรรทุกหุ้มเกราะ ประกอบด้วย เกราะกระจกลามิเนต เกราะเซรามิกร่วมกับ UHMWPE Plate และเกราะโลหะกันกระสุน ซึ่งรวมถึงล้อนิรภัยรันแฟลต



รูปที่ 1.1 รถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะที่ผ่านการวิจัยและพัฒนาขึ้น



รูปที่ 1.2 รายละเอียดชิ้นส่วนเกราะกันกระสุนประเภทต่างๆ ที่ติดตั้งบนรถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะ

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาแผ่นเกราะโลหะกันกระสุนสำหรับรถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กขึ้นมาโดยจะทำการออกแบบโลหะที่ใช้เป็นเกราะกันกระสุนแล้วทำการทดสอบการกันกระสุนตามมาตรฐานระดับ NIJ 3 เพื่อทำการสร้างแผ่นเกราะโลหะกันกระสุนที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งมาตรฐาน NIJ เป็นมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับเรื่องวิธีทดสอบ [2] เกณฑ์การทดสอบ ความสามารถหรือประสิทธิภาพการป้องกันกระสุนของเสื้อเกราะที่กำหนดโดยสถาบันความเที่ยงธรรมแห่งชาติ (National Institute of Justice, NIJ) ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งประเทศไทยและอีกหลายประเทศทั่วโลกใช้มาตรฐานสำหรับการทดสอบเสื้อเกราะป้องกันกระสุนด้วยเช่นกัน โดยมาตรฐาน NIJ

แผ่นเกราะโลหะสำหรับรถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะเดิม เกิดจากการวางซ้อนกันของแผ่นโลหะหลายชนิดที่ความหนาแตกต่างกัน เมื่อนำไปประกอบเข้ากับโครงสร้างรถบรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะจะส่งผลให้มีน้ำหนักมาก และส่งผลกระทบไปยังระบบช่วงล่างรถยนต์หรือระบบรองรับน้ำหนัก การออกแบบและวิเคราะห์แผ่นเกราะโลหะให้มีความสามารถที่ป้องกันกระสุนได้เท่าเดิมแต่มีน้ำหนักลดลง หรือมีระดับสามารถในการป้องกันกระสุนได้สูงขึ้นจึงเป็นประเด็นสำคัญในการออกแบบและวิจัย งานวิจัยนี้จะเป็นนวัตกรรมที่สามารถต่อยอดไปสู่เชิงพาณิชย์ได้ เสริมสร้างความมั่นคงของประเทศในด้านการพัฒนายุทโธปกรณ์ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของแผ่นเกราะที่สามารถต้านทานการยิงได้ ผู้วิจัยจึงได้แนวความคิดที่จะศึกษารูปแบบนวัตกรรมดังกล่าว ซึ่งอาจจะเพิ่มประสิทธิภาพสิ่งอุปกรณทางทหารให้กับประเทศไทย หรืออาจจะส่งเสริมและแก้ปัญหาให้กับภาคอุตสาหกรรม ส่งเสริมภาคอุตสาหกรรมให้สามารถผลิตและจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ นับเป็นอีกหนึ่งผลิตภัณฑ์เทคโนโลยีที่เป็นของคนไทย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อวิเคราะห์และออกแบบรูปแบบแผ่นเกราะโลหะกันกระสุนที่เหมาะกับรถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะ

1.2.2 เพื่อสร้างแผ่นเกราะโลหะกันกระสุนสำหรับรถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะ

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 การจำลองการทดสอบและวิเคราะห์แผ่นเกราะโลหะกันกระสุนเป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบ NIJ

1.3.2 ทำการทดสอบด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ Ansys

1.3.3 วัสดุที่ใช้สร้างแผ่นเกราะโลหะกันกระสุน เป็น SKD11 และ SUS304 ประกอบซ้อนกันซึ่งอาจจะมีวัสดุอื่นที่ไม่ใช่โลหะร่วมได้

1.3.4 สำหรับวัตถุประสงค์ข้อที่ 1.2.2 เพื่อสร้างแผ่นเกราะโลหะกันกระสุนสำหรับรถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะ คือการสร้างโมเดลทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อการวิเคราะห์และจำลองสถานการณ์การยิงกระสุนเท่านั้น

1.3.5 วิธีการประกอบแผ่นเกราะโลหะกันกระสุนจะใช้กระบวนการเชื่อมติดแผ่นโลหะ

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.4.1 ได้รูปแบบแผ่นเกราะโลหะกันกระสุนที่เหมาะสมกับรถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะ

1.4.2 ผลิตแผ่นเกราะโลหะกันกระสุนที่ผ่านมาตรฐานสากล NIJ ระดับ 3

1.4.3 สร้างและสนับสนุนนักวิจัยรุ่นใหม่

1.4.4 ได้ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ

1.5 สถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

1.5.1 สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถนนประชาราษฎร์1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทรศัพท์/โทรสาร: 0 2836 3000 ต่อ 4138 โทรศัพท์มือถือ: 09 8279 5855

1.5.2 สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
399 ถนนสามเสน แขวงวชิระพยาบาล เขตดุสิต กรุงเทพฯ 10300
โทรศัพท์/โทรสาร: 0 2665 3777 ต่อ 6099

1.5.3 โรงงานวัตถุระเบิดทหาร กรมการอุตสาหกรรมทหาร ศูนย์การอุตสาหกรรมป้องกันประเทศและพลังงานทหาร
ตำบลย่านมัทรี อำเภอพยุหะคีรี จังหวัดนครสวรรค์

บทที่ 2
ทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรม

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [3], [5]

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

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

ซึ่งเป็นสมการสำหรับปัญหาที่มีการเสียรูปน้อย (Small Displacement) และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดมีค่าเท่ากับ

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

โดยที่ σ_x คือค่าความเค้นในแนวแกน x และ E คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ

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

เมื่อ $[D]$ คือ เมทริกซ์คุณสมบัติของวัสดุ

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

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

เมื่อนำเอาหลักการของสปริงตามสมการที่ (2.4) มาประยุกต์ใช้กับหลักการไฟไนต์เอลิเมนต์ จะสามารถเขียนสมการที่ (2.5) ใหม่ในลักษณะของเมทริกซ์ได้เป็น

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

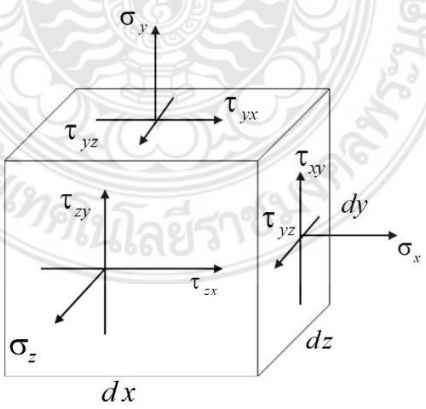
โดยที่ f' คือ เมทริกซ์ของแรงที่กระทำกับสปริง

k' คือ สทิฟเนสเมทริกซ์ของสปริง

d' คือ เมทริกซ์ของระยะยืด/หดตัวของสปริง

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

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



รูปที่ 2.1 ลักษณะความเค้นใน 3 มิติ [3] - [5]

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

ดังนั้นจะมีความเค้นเฉือนแค่ 3 ตัวเท่ากันที่ต้องพิจารณารวมกับความเค้นตั้งฉากจะได้เป็น

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

และความเค้นที่เกิดขึ้นในเอลิเมนต์จะมีดังนี้

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

โดยที่

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

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

และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเท่ากับ

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

โดยที่

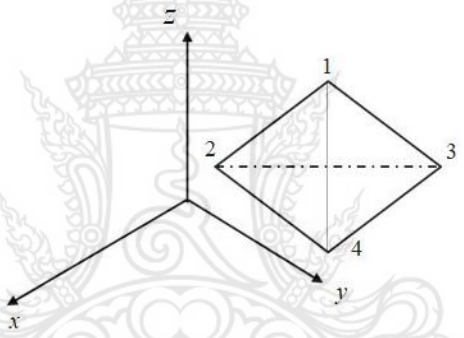
$$[D]=\frac{E}{(1+v)(1-2v)}\begin{bmatrix}1-v & v & v & 0 & 0 & 0\\ & 1-v & v & 0 & 0 & 0\\ & & 1-v & 0 & 0 & 0\\ & & & \frac{1-2v}{2} & 0 & 0\\ & & & & \frac{1-2v}{2} & 0\\ & & & & & \frac{1-2v}{2}\end{bmatrix} \tag{2.11}$$

การหาสทิฟเนสเมทริกซ์สำหรับเอลิเมนต์แบบทรงสี่หน้า

ขั้นตอนที่ 1 เลือกประเภทของเอลิเมนต์

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

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



รูปที่ 2.2 เอลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า [3]-[5]

ขั้นตอนที่ 2 เลือกฟังก์ชั่นของการเสียรูป

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

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

เป็นฟังก์ชั่นของการเสียรูปของ u, v และ w โดยที่ในการวิเคราะห์นั้นสามารถทำได้เหมือนกันกับกรณีของเอลิเมนต์สามเหลี่ยมจะได้ว่า

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

โดยที่

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

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

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

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

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

สามารถที่จะเขียนรูปของเมทริกซ์สำหรับฟังก์ชั่นการเสียรูปเท่ากับ

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

โดยที่

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

ขั้นตอนที่ 3 ระบุความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการเสียรูป และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดกับการเสียรูป ได้ว่า

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

หรือ

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

โดยที่

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

และ

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

และสำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

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

และ

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

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

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

ในกรณีที่เป็นเอลิเมนต์แบบทรงสี่หน้า (Tetrahedron) จะมีค่าคงที่ ดังนั้น

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

ผลจากน้ำหนัก (Body Force)

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

โดยที่

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

ผลจากแรงที่ผิว (Surface Force) จาก

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

โดยที่

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

2.1.2 Material Model

ในการวิเคราะห์แผ่นเกราะกันกระสุนซึ่งแผ่นเกราะนั้นอาจจะเป็นแผ่นเดี่ยวหรือแผ่นซ้อนกันก็ได้ งานวิจัยได้เลือกใช้วัสดุที่สามารถทำลายหัวกระสุนเมื่อกระแทกเข้ากับแผ่นเกราะแผ่นที่ 1 แล้ว ทำให้เศษโลหะที่เกิดจากการแตกทะลุผ่านไปยังแผ่นที่ 2 ซึ่งแผ่นเกราะที่ 1 ได้วิเคราะห์วัสดุ SKD11 ที่มีค่าความแข็งตามมาตรฐานทั่วไปอยู่ที่ 60-62 HRC (Rockwell scale C) ที่ความหนา 3 แบบ คือ 6, 8 และ 10 mm ขนาด 300x300 mm มีมุมเอียง 15, 30, 45 และ 60 องศา ได้ใช้แบบจำลองความเสียของ Johnson-Cook Model (JC) จึงเป็นรูปแบบสมการที่อธิบายตามด้านล่าง

$$\boldsymbol{\sigma} = [\mathrm{A}+\mathrm{B}(\boldsymbol{\varepsilon_p})^{\boldsymbol{n}}][\mathbf{1} + \boldsymbol{C}\ln(\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}/_{\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{\mathbf{0}}})][\mathbf{1} - \{(\boldsymbol{T} - \boldsymbol{T_0})/(\boldsymbol{T_m} - \boldsymbol{T_0})\}^{\boldsymbol{m}}] \quad (2.34)$$

เมื่อ A คือ Initial yield stress, B คือ Hardening costants, $\boldsymbol{\varepsilon_p}$ คือ Equivalent plastic strain, n คือ Hardening exponent, $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}/_{\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{\mathbf{0}}}$ เป็น Reference strain-rate และ $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}$ คือ Plastic strain rate, C คือ Strain rate constant, m คือ Temperature softening exponent, $(\boldsymbol{T} - \boldsymbol{T_0})/(\boldsymbol{T_m} - \boldsymbol{T_0})$ คือ อุณหภูมิสมบูรณ์ ซึ่ง T, $\boldsymbol{T_0}$ และ $\boldsymbol{T_m}$ คือ Temperature, Room temperature และ melting temperature

กระสุนในการจำลองมีขนาด 7.62 mm ตามรูปที่ 3.4 ซึ่งได้ถอดปลอกออกให้เหลือแต่แท่งกระสุน Tungsten carbide (WC) เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดการกระแทกเข้ากับแผ่นเกราะแล้วเกิดการแตกเสียหายซึ่งค่าคุณสมบัติทางกลและพารามิเตอร์ในการจำลองการเสียหายของ Johnson-Holmquist failure model (JH-2) ตารางที่ 3.2 โดยสมการความเสียหายดังนี้

$$\mathrm{Y} = [\mathrm{A}(\boldsymbol{p}^* + \boldsymbol{T}^*)^{\boldsymbol{n}}(\mathbf{1} - \boldsymbol{D}) + \boldsymbol{B}(\boldsymbol{p}^*)^{\boldsymbol{m}}\boldsymbol{D}][\mathbf{1} + \boldsymbol{C}\ln(\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{\boldsymbol{p}}^*)] \quad (2.35)$$

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

เมื่อ Y คือ Yield Stress, $\boldsymbol{p_{HEL}}$ 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 เมื่อวัสดุรับภาระโหลดในทิศทางเดียว ดังนั้นจะมี 2 สมการ แยกกันเพื่อค่า Yield stress เมื่อ D = 1 หรือ D < 1 ใน Johnson-Holmquist ค่า Yield stress เป็นฟังก์ชันความเสียหายต่อเนื่องของ D ดังนั้นรูปแบบวัสดุที่มีคุณสมบัตินี้เรียกว่าแบบจำลองการแตกหักแบบ “active” สำหรับกรณีพิเศษ (D =0) ไม่มีความเสียหาย (D =1) มีความเสียหาย Yield stress จะลดลง

$$Y = A(\boldsymbol{p}^* + \boldsymbol{T}^*)^{\boldsymbol{n}}[\mathbf{1} + \boldsymbol{C}\ln(\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{\boldsymbol{p}}^*)]$$ (ไม่มีความเสียหาย Intact, D=0) (2.37)

$$Y = \boldsymbol{B}(\boldsymbol{p}^*)^{\boldsymbol{m}}[\mathbf{1} + \boldsymbol{C}\ln(\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{\boldsymbol{p}}^*)]$$ (มีความเสียหาย fragmented, D=1) (2.38)

SUS 304 plate model ซึ่งใช้ในการรั้งเศษกระสุนที่กระแทกเข้ากับแผ่นที่ 1 แล้วทะลุออก แผ่นมีขนาด 300 x 300 mm ให้ความหนาเริ่มต้นที่ 5 mm เนื่องจาก SUS304 ทั่วไปมีขนาดความหนาที่ 1–5 mmหลังจากนั้นก็จะเป็น 6, 8 และ 10 mm เป็นต้น ความหนาที่ใช้ในการจำลอง 5, 6, 8 และ 10 mm มีมุมเอียง 15, 30, 45 และ 60 องศา ในการแทกของกระสุนซึ่งให้**ทฤษฎีความเสียหาย**ของ Steinberg- Guinan Strength model เป็นแบบกึ่งทดลองที่พัฒนาโดยสำหรับสถานการณ์ที่มีอัตราความเครียดสูงและขยายไปยังอัตราความเครียดต่ำ มีสมการดังนี้

$$G = \boldsymbol{G_0}\{\mathbf{1} + \left(\frac{\acute{G_p}}{G_0}\right)\frac{p}{\eta^{1/3}} + \left(\frac{\acute{G_t}}{G_0}\right)(\boldsymbol{T} - \mathbf{300})\}$$ (2.39)

$$Y = \boldsymbol{Y_0}\{\mathbf{1} + \left(\frac{\acute{Y_p}}{Y_0}\right)\frac{p}{\eta^{1/3}} + \left(\frac{\acute{G_t}}{G_0}\right)(\boldsymbol{T} - \mathbf{300})\}(1+\boldsymbol{\beta\varepsilon})^{\boldsymbol{n}}$$ (2.40)

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

เมื่อ $\boldsymbol{\varepsilon}$ = Effective plastic strain, T = temperature (degree K), $\boldsymbol{\eta}$ = compression และพารามิเตอร์ที่พร้อมกับตัวห้อย p และ T เป็นอนุพันธ์ของพารามิเตอร์นั้นเกี่ยวกับความดันและอุณหภูมิที่สถานะอ้างอิง (T = 300 K, p = 0, $\boldsymbol{\varepsilon}$ = 0)ตัวห้อยศูนย์ยังอ้างถึงค่าของ G และ Y ที่สถานะนั้น หากอุณหภูมิของวัสดุสูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวที่ระบุไว้โมดูลัสแรงเฉือนและความแข็งแรงของผลผลิตจะถูกตั้งค่าเป็นศูนย์ ค่าคุณสมบัติและพารามิเตอร์ของ SUS304 มีในโปรแกรมจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ตามตารางที่ 3

2.1.3 Ansys Software [4], [5]

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

ระบบที่มีโครงสร้างซับซ้อน (Non-stationary Geometrically) ได้ ปรากฏการณ์ของก๊าซและของไหล กลศาสตร์ของไหล การแผ่รังสีความร้อนและการถ่ายเทความร้อน ปรากฏการณ์ด้านไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ปรากฏการณ์ของคลื่นเสียงเป็นปรากฏการณ์ที่สามารถจำลองได้บนโปรแกรมเพื่อใช้ในการจำลองและการวิเคราะห์กระบวนการในอุตสาหกรรมเพื่อหลีกเลี่ยงค่าใช้จ่ายที่สูงและลดระยะเวลาในการออกแบบ

2.1.4 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทาง FEM มีพื้นฐาน 3 ขั้นตอน

ขั้นตอนที่ 1 (Pre-processing)

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

ขั้นตอนที่ 2 (Solve-processing)

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

ขั้นตอนที่ 3 (Post-processing)

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

2.2 มาตรฐานแผ่นเกราะกันกระสุน [6]

อ้างอิงจากมาตรฐานยุทโธปกรณ์กระทรวงกลาโหมว่าด้วยแผ่นเกราะกันกระสุน จัดทำโดยคณะอนุกรรมการกำหนดมาตรฐานยุทโธปกรณ์กระทรวงกลาโหม ว่าด้วยเกราะกันกระสุน ซึ่งได้แปล วิเคราะห์ สังเคราะห์ ประยุกต์ และเรียบเรียงให้เหมาะสมกับประเทศไทยโดยอิงมาตรฐาน US.NIJ Standard 0108.01 ประยุกต์กับ Threat Level ของ NIJ 0101.04 ตามความจำเป็นและเหมาะสม เพื่อมุ่งส่งเสริมและสนับสนุนกิจการอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของไทยเป็นหลัก ดังนี้

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

2.2.2 การจำแนกระดับของแผ่นเกราะ จำแนกตามระดับความสามารถในการกันกระสุนปืนได้ถึง 6 ระดับ (ตามลำดับของระดับภัยคุกคามของกระสุนตามตารางที่ 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 ซึ่งเป็นระดับที่สามารถกันกระสุนที่เป็นภัยคุกคามในระดับ 3A (Type IIIA: High Velocity 9 mm.;.44Magnum) และ ระดับ 1, 2A กับ 2 ได้

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

ตารางที่ 2.1 ตารางภัยคุกคามและการยิงทดสอบความสามารถกันกระสุนของเกราะ [6]

ระดับภัยคุกคาม	ขนาด/ชนิดกระสุนทดสอบ	น้ำหนักของลูกกระสุนเกรน (กรัม)	ความเร็วกระสุน ±30ฟุต/วินาที (±9.1เมตร/วินาที)	จำนวนนัดที่ยิงผ่านเกณฑ์	ปืนทดสอบ
1	.22caliber LRLRN	40 เกรน	1,080 ฟุต/วินาที	5	ปืนพก หรือ ลำกล้องทดสอบ
		(2.6 กรัม)	(329เมตร/วินาที)		
	.380 ACP FMJ RN	95 เกรน	1,055ฟุต/วินาที	5	ปืนพก หรือ ลำกล้องทดสอบ
	หรือ	(6.2 กรัม)	(322เมตร/วินาที)		

ระดับภัยคุกคาม	ขนาด/ชนิดกระสุนทดสอบ	น้ำหนักของลูกกระสุนเกรน (กรัม)	ความเร็วกระสุน ±30ฟุต/วินาที (±9.1เมตร/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)		
	.40 S&W FMJ	180 เกรน	1055 ฟุต/วินาที	5	ปืนพก หรือ ลำกล้องทดสอบ
	หรือ	(11.7 กรัม)	(322 เมตร/วินาที)		
		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 [7]

2.2.3.1 แผ่นเกราะกันกระสุนหรือแผ่นป้องกันกระสุนหรือ"แผ่นเกราะหมายถึงแผ่นวัสดุทุกชนิดที่มีความสามารถในการป้องกันหรือลดอันตรายจากการยิงด้วยกระสุนปืนที่ผู้ผลิตเจตนาจัดทำขึ้นเพื่อการนี้"ไม่ว่าจะเป็นเกราะ (หรือวัสดุป้องกันกระสุน) ที่ทำด้วยเหล็ก โลหะใดๆ เซรามิก กระจก วัสดุสังเคราะห์ ฯลฯ ซึ่งต่อไปได้มาตรฐานฉบับนี้จะเรียกย่อว่า "เกราะ"

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

2.2.3.3 การทะลุผ่าน หมายถึง การที่กระสุนเจาะทะลุผ่านเกราะ แล้วปรากฏว่ามีเศษชิ้นส่วนของกระสุนหรือเศษชิ้นส่วนของเกราะเจาะทะลุผ่านแผ่นพยานด้วย ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้โดยการมองเห็นแสงที่รอดผ่านรอยทะลุบนแผ่นพยานนั้น เมื่อนำหลอดไฟฟ้าขนาด 60 วัตต์ไปส่อง

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

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

2.2.3.6 นัดที่ยิงผ่านเกณฑ์ หมายถึง ผลการยิงในกระสุนนัดที่ถือว่าผ่านเกณฑ์การยอมรับสำหรับการยิงทดสอบตามตารางที่ 1 ซึ่งจักต้องเกิดขึ้นจากการยิงด้วยความเร็วกระสุนตามที่กำหนดหรือสูงกว่าที่กำหนด แล้วไม่เกิดการทะลุผ่าน โดยที่ไม่ต้องคำนึงถึงระยะห่างของรอยยิง ซึ่งเป็นไปตามตรรกะที่ว่า “ในสถานการณ์ปัจจัยคุกคามตามปกติหรือปัจจัยคุกคามที่สูงกว่าปกติ เกราะนี้สามารถเผชิญได้”

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

2.2.3.8 นัดที่ยิงพลาด หมายถึง ผลการยิงในกระสุนนัดที่ถือว่าเป็นการยิงพลาด มิสามารถวินิจฉัยการผ่านหรือไม่ผ่านเกณฑ์การยอมรับสำหรับการยิงทดสอบตามตารางที่ 1 ได้ ซึ่งเป็นไปตามตรรกะที่ว่า “ในสถานการณ์ปัจจัยคุกคามที่สูงกว่าปกติ เกราะนี้เผชิญไม่ได้ หรือในสถานการณ์ปัจจัยคุกคามที่ต่ำกว่าปกติ เกาะนี้สามารถเผชิญได้” จำต้องให้ยิงทดสอบแก้มือในนัดนั้นใหม่ ในการยิงแก้มือใหม่นั้นให้ยิงใกล้บริเวณเดิมที่มีระยะห่างของรอยยิงได้ หรืออาจไปเริ่มต้นกระบวนการยิงทดสอบเกราะอันใหม่ก็ได้

2.2.4 คุณลักษณะที่ต้องการ

2.2.4.1 ลักษณะทั่วไป ต้องเป็นแผ่นเกราะสำเร็จรูปพร้อมใช้งาน หรือเป็นผลิตภัณฑ์ที่ทำด้วยเกราะหรือที่หุ้มด้วยเกราะ สำหรับใช้ในการป้องกันหรือลดอันตรายจากการยิงด้วยกระสุนปืน

2.2.4.2 ความเรียบร้อยทั่วไป เกราะจะต้องไม่มีรอยย่น พอง รอยแตกร้าว ริมขอบต้องไม่บิ่นหรือแหลมคม หรือขาดความประณีตในการผลิต

2.2.4.3 ความสามารถในการกันกระสุน เมื่อทำการทดสอบเกราะด้วยวิธีการยิงทดสอบตามตารางที่ 1 และข้อ 7 เกราะจะต้องสามารถกันกระสุนได้ตามระดับที่ระบุไว้ที่ฉลาก โดยมีจำนวนนัดที่ยิงผ่านเกณฑ์ได้ครบจำนวนตามกำหนดไว้ในตารางที่ 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 กรณีที่เป็นกระจกกันกระสุนที่มุมใดมุมหนึ่งของกระจกทุกแผ่นอย่างน้อยต้องมีเลขอักษรหรือเครื่องหมายแจ้งรายละเอียดต่อไปนี้ให้เห็นได้ง่ายชัดเจนและไม่ลบเลือนง่าย

(1) คำว่า “กระจกกันกระสุน”

(2) ระดับของการกันกระสุน

(3) ชื่อผู้ทำหรือโรงงานที่ทำหรือเครื่องหมายการค้าที่จดทะเบียน

2.2.5.3 ในกรณีที่ใช้ภาษาต่างประเทศต้องมีความหมายตรงกับภาษาไทยที่กำหนดไว้ข้างต้น

2.2.6 การชักตัวอย่างหรือเกณฑ์ตัดสิน

2.2.6.1 รุ่นในที่นี้ หมายถึง เกราะแบบและระดับเดียวกัน ทำจากวัสดุและกรรมวิธีผลิตเดียวกัน ที่ทำหรือส่งมอบหรือซื้อขายในระยะเวลาเดียวกันหรือใกล้เคียงกัน

2.2.6.2 การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสินให้เป็นไปตามแผนการชักตัวอย่างที่กำหนดต่อไปนี้

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

2. ให้ตรวจสอบตัวอย่างเกราะตามข้อ 6.2.1 โดยการตรวจพินิจเมื่อตรวจสอบแล้วทุกตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้อ 4.1,4.2 และ 5 จึงจะถือว่าเกราะรุ่นนี้เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

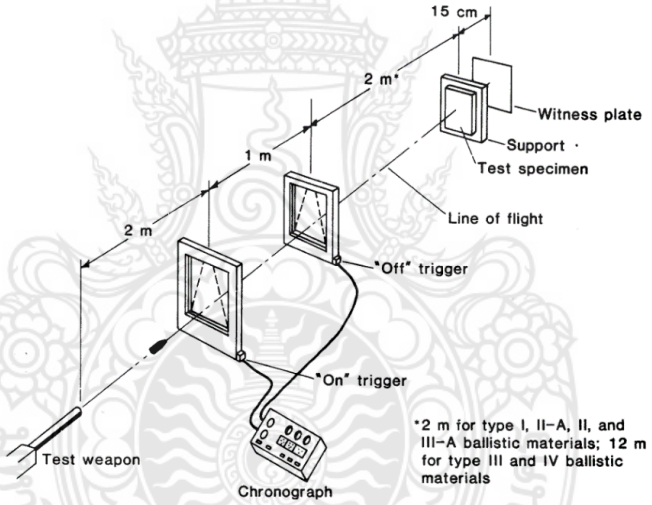
3. ให้นำตัวอย่างเกราะตามข้อ 6.2.2 ไปทำการยิงทดสอบตามตารางที่ 1 และข้อ 7 เมื่อทดสอบแล้วทุกตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้อ 4.3 จึงจะถือว่าเกราะรุ่นนี้เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

2.2.6.3 เกณฑ์ตัดสินตัวอย่างเกราะต้องเป็นไปตามข้อ 6.2.2 และ 6.2.3 ทุกข้อจึงจะถือว่าเกราะรุ่นนี้เป็นไปตามมาตรฐานยุทโธปกรณ์กระทรวงกลาโหมนี้

2.2.7 การทดสอบ [6]

2.2.7.1 การเตรียมการทดสอบ

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



รูปที่ 2.3 Ballistic test setup [6], [7]

2.2.7.2 หลักการทั่วไปในการยิงทดสอบเกราะ

1. ในการยิงทดสอบแต่ละนัด ต้องทำการวินิจฉัยว่าเป็นนัดที่ยิงผ่านเกณฑ์,ยิงไม่ผ่านเกณฑ์หรือเป็นนัดที่ยิงพลาดเสมอ โดยตรวจความเร็วกระสุน ตรวจการทะลุผ่าน วัดระยะห่างของรอยยิงและบันทึกไว้ แล้วพิจารณาปฏิบัติให้สอดคล้องกับผลการยิงนั้นต่อไป (ตามตารางที่ 2)

2. สำหรับเกราะกันกระสุนที่ต่ำกว่าระดับ 3 ซึ่งต้องทำการยิงทดสอบด้วยกระสุน 2 ชนิดๆละ5 นัด เมื่อได้ยิงทดสอบด้วยกระสุนชนิดที่ 1 ครบ 5 นัดเรียบร้อยแล้ว ก่อนที่จะยิงทดสอบด้วยกระสุนชนิดที่ 2 นั้นสมควรที่จะเปลี่ยนเกราะที่จะทดสอบอันใหม่แต่ก็อาจให้ใช้เกราะอันเดิมก็ได้หากเกราะนั้นมีขนาดใหญ่มากพอที่จะยิงทดสอบให้ครอบคลุมพื้นที่ยิงและได้ระยะห่างของรอยยิงได้ตามที่กำหนด

ตารางที่ 2.2 ตารางสรุปการวินิจฉัยการปฏิบัติต่อผลการยิงทดสอบเกราะ [6]

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

2.2.7.3 การยิงทดสอบเกาะที่เป็นผลิตภัณฑ์ขนาดใหญ่เช่นตู้ยามหุ้มเกราะยานหุ้มเกราะและห้องนิรภัยเป็นต้นให้พิจารณาประยุกต์เกี่ยวกับลักษณะของการเตรียมการทดสอบอุปกรณ์ต่างๆ และวิธีการในการยิงทดสอบให้เหมาะสมกับสถานการณ์ได้ตามความจำเป็นและเหมาะสม

2.2.7.4 การแก้ไขรายละเอียดทางเทคนิคในการทดสอบ ให้คณะอนุกรรมการกำหนดมาตรฐานยุทโธปกรณ์กระทรวงกลาโหมว่าด้วยเกราะกันกระสุน สามารถแก้ไขเปลี่ยนแปลงรายละเอียดทางเทคนิคในการทดสอบในส่วนที่มิใช่สาระสำคัญได้ โดยใช้ดุลพินิจพิจารณาให้เหมาะสมกับความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีและสถานการณ์ที่เปลี่ยนแปลงไป แล้วรีบรายงานให้คณะกรรมการกำหนดมาตรฐานยุทโธปกรณ์กระทรวงกลาโหมทราบ

2.3 การทบทวนวรรณกรรม

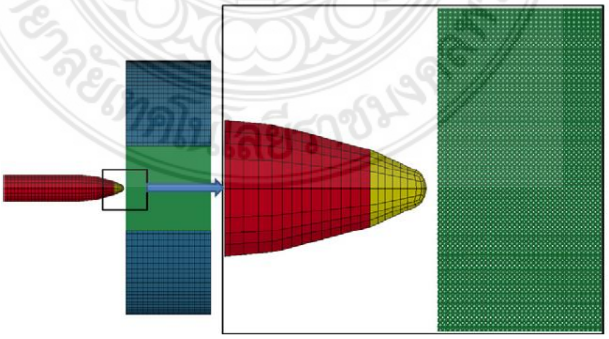
บุญรักษ์ กาญจนวรวณิชย์ [2] ได้ทำการทดลองกระสุนปืนหลายชนิดมีประสิทธิภาพการทำลายสูง ทำให้เสื้อเกราะกันกระสุนจำเป็นต้องได้รับการปรับปรุงเพื่อรับมือกับกระสุนปืนที่มีอำนาจทะลุทะลวงสูงเหล่านั้น ซึ่งวิธีปรับปรุงเสื้อเกราะวิธีหนึ่งคือ การเสริมด้วยแผ่นวัสดุแข็งต่างๆ เช่น แผ่นไทเทเนียม แผ่นเหล็กกล้า แผ่นเซรามิกแข็ง แม้วัสดุที่ใช้จะมีหลายชนิด แต่ที่นิยมนำมาทำแผ่นเกราะแข็งเสริมให้เสื้อเกราะคือ แผ่นเซรามิก เนื่องจากมีน้ำหนักน้อยกว่าโลหะ (ส่วนการเสริมด้วยแผ่นโลหะนิยมประยุกต์ใช้กับยานพาหนะหุ้มเกราะมากกว่า)

D. Shanmugam และคณะ [8] ได้ทำการศึกษาการพัฒนาชุดเกราะที่เหมาะสมเพื่อปกป้องกองทัพการต่อสู้ของโลกเป็นพื้นที่ที่มีความเชี่ยวชาญสูงสำหรับนักโลหะวิทยาในการใช้ทักษะทางเทคนิคและการตัดสิน (Crouch, 1988) นับตั้งแต่ยุคเริ่มแรกของ "ลิตเติ้ลวิลลี่" ซึ่งเป็นรถถังขนาด 18 ตัน ที่ได้รับการยกย่องว่าเป็นรถถังแรกของโลกที่สร้างขึ้นในปีพ. ศ. 2458 การออกแบบและสร้างเกราะของยานพาหนะมีบทบาทสำคัญในการแข่งขันที่น่าพอใจ edge ซึ่งเป็นที่ต้องการของทั้งผู้ใช้และผู้ผลิตยานเกราะหุ้มเกราะ

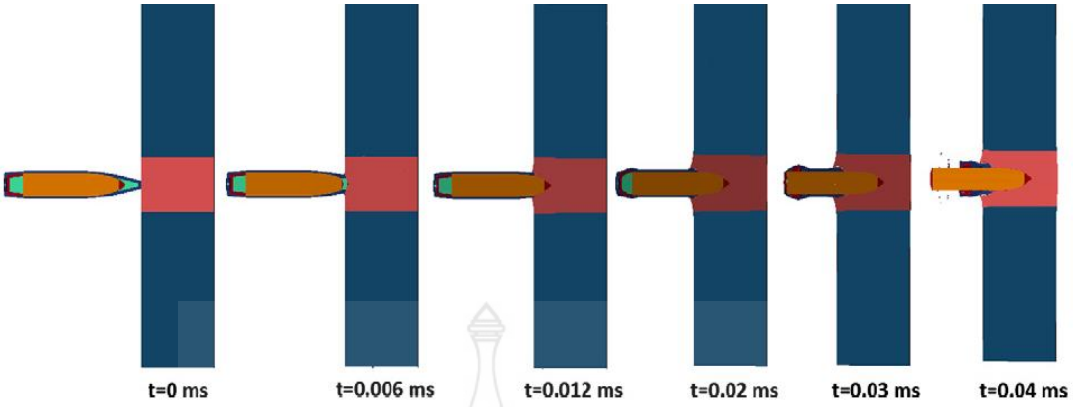
P.K. Ray และคณะ [9] ได้ทำการออกแบบเหล็กกล้า HSLA-100 มาเพื่อให้ได้ผลผลิตที่มีความแข็งแรง≥100 ksi (700 MPa) และความแรงกระแทก≥81 J ที่ -84 °C โลหะผสมเคมีของเหล็กนี้ทำให้ตอบสนองต่อการรักษาความร้อนและการประมวลผลด้วยความร้อน (Thermomechanical processing) [3] เนื่องจากเหล็กกล้ามีปริมาณคาร์บอนต่ำมาก (≤06% wt) เพื่อปรับปรุงการเชื่อม โลหะผสมจึงมีการเพิ่มส่วนประกอบอัลลอยอื่น ๆ เพื่อเพิ่มสมบัติด้านแรงและแรงกระแทก

R.Q. Chi และคณะ [10] ได้ทำการศึกษาและออกแบบการใช้ระบบเกราะสองชั้นซึ่งประกอบด้วยพื้นผิวแข็งแบบด้านหน้าและชั้นรองพื้นการดูดซับพลังงานทำให้ได้รับการออกแบบที่เบาเมื่อเทียบกับเกราะโลหะเสาเดียวที่ให้ระดับการป้องกันขีปนาวุธเดียวกันกับขีปนาวุธเกราะ นักวิจัยหลายคนได้พัฒนารูปแบบการวิเคราะห์เชิงประจักษ์และเชิงตัวเลขเพื่อทำนายความเร็วที่เหลืออยู่ของกระสุนและความเร็วขีดจำกัดของขีปนาวุธ (BLV) ของระบบเกราะเป็นตัว

Namik Kilic and Bülent Ekici [11] ได้ศึกษาผลกระทบความเร็วสูงและปัญหาการแทรกซึมรวมถึงการเปลี่ยนรูปขนาดใหญ่การกัดกร่อนพฤติกรรมของวัสดุที่ไม่ต่อเนื่องขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงและการกระจายตัว ดังนั้นจึงเป็นเรื่องสำคัญที่จะต้องใช้รูปแบบการทำงานเชิงกลของการเจาะที่มีผลกระทบข้างต้น ในความเป็นจริงเนื่องจากวิธีการเชิงประจักษ์และการวิเคราะห์ไม่สามารถจับภาพปรากฏการณ์ทางกายภาพหลายอย่างรวมถึงการแตกหักความล้มเหลวความเค้นตกค้างและความร้อนแรงเสียดทาน การจำลองเชิงตัวเลขได้กลายเป็นเครื่องมือที่จำเป็นสำหรับการศึกษาการเจาะขีปนาวุธ วิธีการเชิงตัวเลขและเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ที่เกี่ยวข้องได้รับการพัฒนาไปสู่ระดับที่มีการคาดเดารูปแบบการเปลี่ยนรูปและการเจาะที่ซับซ้อนในช่วงที่มีการกระแทกขีปนาวุธได้อย่างถูกต้อง การใช้วิธีการเชิงตัวเลขในการพัฒนาทางเลือกในการออกแบบจะไม่เพียง แต่แนะนำให้ใช้ระยะเวลาในการพัฒนาเกราะที่สั้นลงเท่านั้น แต่ยังช่วยลดจำนวนของต้นแบบเพื่อลดจำนวนการทดสอบภาคสนามจริงที่จำเป็นและช่วยให้เราเห็นภาพลักษณะการทำงานของผลกระทบ

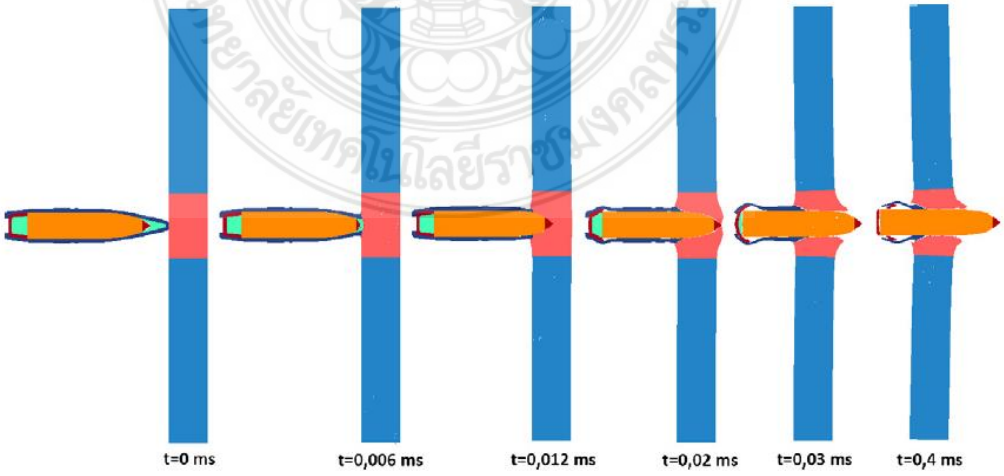


รูปที่ 2.4 แผนภาพการแบ่งเอลิเมนต์ที่กระสุนและแผ่นเกราะ [12]

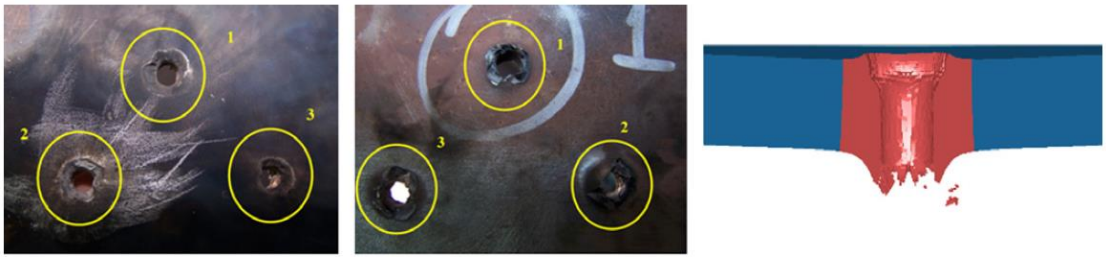


รูปที่ 2.5 แผนภาพการเสียรูปของแผ่นเกราะสำหรับกระสุนขนาด 20 มม. ในช่วงเวลาต่างๆ [12]

รูปที่ 2.6 การเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ความหนา 20 มม. [12]

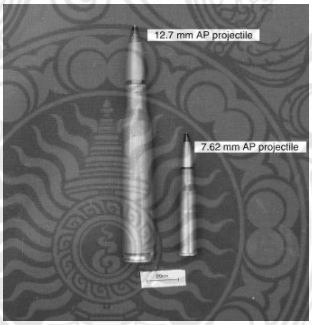


รูปที่ 2.7 แผนภาพการเสียรูปของแผ่นเกราะสำหรับกระสุนขนาด 9 มม. ในช่วงเวลาต่างๆ [12]



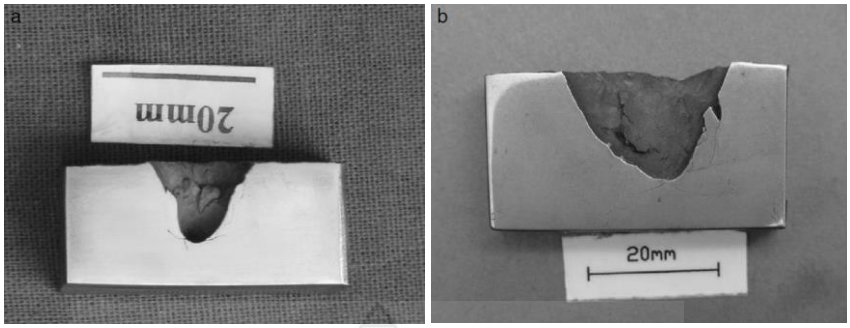
รูปที่ 2.8 การเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ความหนา 9 มม. [12]

Pradipta KumarJena และคณะ [12] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเลือกวัสดุที่เหมาะสมมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการลดน้ำหนักของเกราะและเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องกำหนดวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำสุดที่เป็นไปได้ เหล็กกล้าที่มีความแข็งแรงสูงโลหะผสมอลูมิเนียมและโลหะผสมไททาเนียมมีการใช้เป็นเกราะ แผ่นเหล็กต้องผ่านการอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2, 24 และ 48 ชั่วโมง มีการสังเกตความแปรผันเล็กน้อยของความแข็งแรงและความแข็งด้วยเวลาที่เพิ่มขึ้นในขณะที่พบว่าค่าความเหนียวและแรงกระแทกของชาร์ปีลดลง ประสิทธิภาพกระสุนได้รับการประเมินโดยการกระแทกกระสุนเจาะเกราะ 7.62 มม. และ 12.7 มม. ที่มุมการกระแทก 0 องศา ผลลัพธ์แสดงความแตกต่างเล็กน้อยในประสิทธิภาพของกระสุน เมื่อกระทบกับกระสุนเจาะเกราะขนาด 7.62 มม. และประสิทธิภาพของแผ่นเกราะลดลงเมื่อกระทบกับกระสุนเจาะเกราะ 12.7 มม. ดังรูปที่ 2.9-2.11



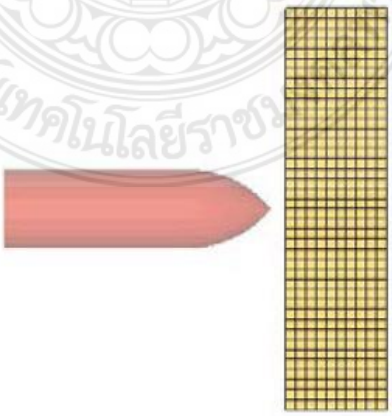
รูปที่ 2.9 ภาพของกระสุนเกราะที่แตกต่างกันใช้สำหรับการศึกษา [12]

รูปที่ 2.10 มุมมองด้านบนของรูเจาะภายหลังการชนกับกระสุน 7.62 AP รอยแตกขนาดเล็กชี้ให้เห็นโดยเครื่องหมายลูกศรในการทำ Tempering time 24 และ 48 ชั่วโมง (a) Tempering time 2 ชั่วโมง (b) Tempering time 24 ชั่วโมง และ (c) Tempering time 48 ชั่วโมง [12]

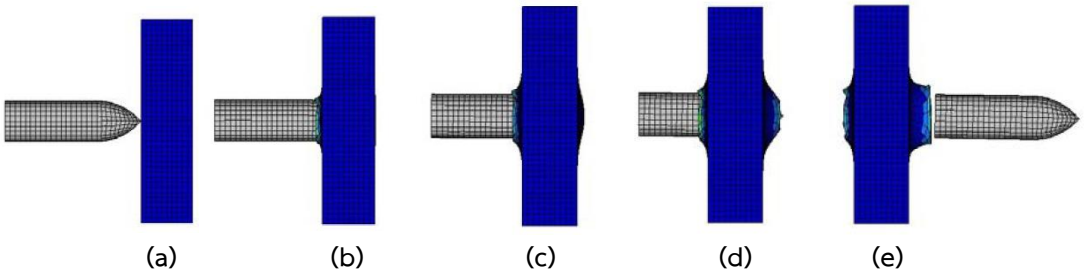


รูปที่ 2.11 ภาคตัดแผ่นเกราะ Tempering time 48 ชม. (a) AP 7.62 มม. และ (b) AP 12.7 มม.[12]

A. Banerjeea และคณะ [13] ได้มีการพยายามตรวจสอบเชิงตัวเลขของการชนกันของกระสุนกับแผ่นเหล็กเกราะทั่วไปที่มีความหนาปานกลางโดยกระสุนมีปลายแหลมที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว ได้กำหนดวัสดุและแบบจำลองความเสียหายของ Johnson-Cook ถูกใช้เพื่อจำลองพฤติกรรมและความเสียหายของวัสดุภายใต้สภาวะการกระแทก ค่าคงที่ของรูปแบบได้มาจากงานทดลองที่ทำโดยผู้เขียนที่เผยแพร่ก่อนหน้านี้ การจำลองได้ดำเนินการในแพคเกจโปรแกรม Altair-HyperWorks ขั้นตอนของการเจาะได้รับการคาดการณ์ ความเร็วที่เหลือความเร็วรอบสูงสุดของ Ballistic และเวลาที่เจาะถูกกำหนดจากผลการจำลองและพบว่าตรงกับข้อมูลการทดลอง รูปที่ 12 เป็นโมเดลไฟไนต์ที่แผ่นเกราะมีขนาด 200x200x50 มม. มีการแบ่งออกเป็น 10 เอลิเมนต์ตามแนวกว้างด้วย 8 nodes hexagonal brick มีทิศทางและระยะของกระสุนตามรูปที่ 2.12 และรูปที่ 2.13 แสดงให้เห็นถึงการเจาะทะลุอย่างสมบูรณ์บนแผ่นเกราะโดยกระสุนไม่ได้ถูกทำลาย และจากรูปที่ 2.14 เป็นภาพจากการใช้กล้องจับภาพความเร็วสูงเห็นการเจาะทะลุของแผ่นเกราะโดยกระสุนไม่ได้ถูกทำลายเช่นกัน มีการวัดค่าความเร็วที่เกิดขึ้นในแจ่ละจังหวะเปรียบเทียบกันทั้งวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลองพบว่าให้ค่าความสอดคล้องกันทั้งสองวิธีดังตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.12 ไฟไนต์เอลิเมนต์โมเดลสำหรับกระสุนและแผ่นเกราะ [13]



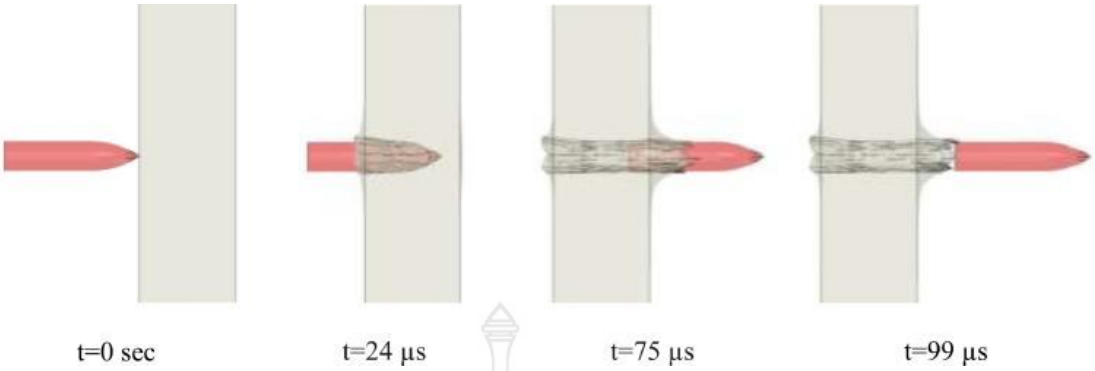
รูปที่ 2.13 ผลการจำลองการเจาะของกระสุนที่ความเร็ว 630 m/s (a) t=0, (b) t=50 μs, (c) t=90 μs, (d) t=130 μs, และ (e) t=630 μs [13]

รูปที่ 2.14 ภาพการเจาะทะลุของกระสุนบนแผ่นเกราะจากการทดลองที่ความเร็วกระสุน 738 m/s

ตารางที่ 2.3 ผลการเปรียบเทียบจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลอง

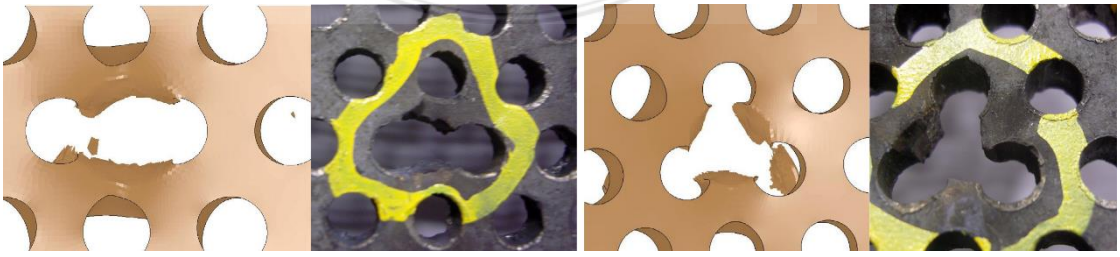
SV (m/s)	Simulated RV (m/s)	Experimental RV (m/s)
580	135	145
600	180	195
632	265	289
653	305	317
738	450	413

M. WasifAlia และคณะ [14] ได้ทำการตรวจสอบและการคำนวณตัวเลขของการป้องกันขีปนาวุธโดยการรวมกันของแผ่นเกราะปรูและฐาน ใช้กระสุนเจาะเกราะ 7.62 มิลลิเมตร ในระหว่างการทดลองเพื่อหาค่าการตอบสนองของขีปนาวุธของแผ่นเกราะฐานอะลูมิเนียมและการรวมกันของแผ่นเกราะแผ่นเหล็กและแผ่นอลูมิเนียม กระสุนเจาะเกราะสามารถทะลุแผ่นเกราะฐานได้ในขณะที่การรวมแผ่นเกราะแผ่นเจาะและฐานสามารถหยุดการเจาะทะลุเกราะเจาะกระสุนได้ ได้มีการพัฒนาวิธีการแบบจำลององค์ประกอบแบบจำกัดเพื่อหารูปแบบการปะทุของชุดแผ่นเกราะและพรุน การแตกหักแบบเปราะที่เกิดจากการดัดของแกนกระสุนอันเนื่องมาจากผลกระทบที่ไม่สมมาตรถูกคาดการณ์ไว้และชิ้นส่วนที่เป็นผลของกระสุนปืนไม่สามารถเจาะแผ่นเกราะฐานได้ หลุมอุกกาบาตถูกสร้างขึ้นบนพื้นผิวของแผ่นเกราะฐานจากผลกระทบของชิ้นส่วนกระสุนปืน แบบจำลองเชิงตัวเลขสามารถทำนายการเติบโตของรูและการเจาะทะลุของกระสุนปืนได้เมื่อแผ่นเกราะฐานได้รับผลกระทบจากกระสุนเท่านั้น ดังรูปที่ 2.15

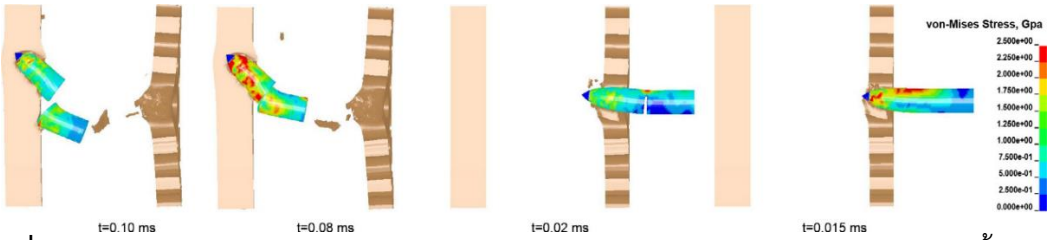


รูปที่ 2.15 การเจาะทะลุของกระสุนผ่านแผ่นเกราะฐานในช่วงเวลาต่างๆ [14]

Woei-ShyanLee และคณะ [15] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าอัลลอยด์ความแข็งแรงสูง AISI 4340 ภายใต้สภาวะการให้ความร้อนที่แตกต่างกัน ชิ้นงานทดสอบได้รับการชุบแข็งและทนต่อโครงสร้างของมาสเตอร์เทนและสามารถแตกหักด้วยอัตราเร็วคงที่ 3.3 × 10-4 s-1 โดยใช้เครื่องทดสอบวัสดุแบบไดนามิกส์ (MTS 810) สมบัติทางกลและค่าความแข็งตัวของความเครียดจะพิจารณาจากสภาวะการให้ความร้อน ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ Martensite ที่ผ่านการชุบแข็งและวิวัฒนาการของพวกมันในระหว่างการเจียระไน นอกจากนี้ยังทำ Fractograph ของชิ้นงานเพื่อวิเคราะห์การแตกหักและกลไกการยุบตัว ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสมบัติเชิงกลและสมบัติทางจุลภาคมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติโดยอุณหภูมิและเวลาการกักเก็บ ความแข็งแรงและความแข็งของกากสเตนนิ่งที่อุณหภูมิลดลงเมื่ออุณหภูมิในการทำอุณหภูมิและเวลาในการยึดเกาะเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามความเหนียวจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นและเวลาการจับยึดยกเว้นเมื่อเกิดการแตกตัวด้วยอลูมิเนียมนิ่ม การสังเกตด้วยระบบจุลภาคแสดงให้เห็นว่าสารตกตะกอนคาร์ไบด์มีโครงสร้างแบบแผ่นคล้าย ๆ กันที่อุณหภูมิต่ำ แต่เป็นทรงกลมที่อุณหภูมิสูง ภายใต้สภาวะที่ผ่านการทดสอบการแตกหักของวัสดุดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าวัสดุดังกล่าวไม่สามารถอบได้ง่ายยกเว้นในกรณีที่มีอุณหภูมิที่ 300 องศาเซลเซียส ที่เกิดการแตกตัวของพอลิเทนนินอลด้วยการสะสมของออสเทนไนท์



รูปที่ 2.16 เปรียบเทียบผลการเจาะทะลุเกราะด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลอง [16]



รูปที่ 2.17 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ความเค้น Von-Mises ในแกนกระสุน และทิศทางการเลี้ยวเบนของกระสุน [16]

Namik Kilic และคณะ [16] ได้ศึกษาความแข็งแรงของแผ่นเกราะรูพรุนที่ต้านทานการเจาะของกระสุน 7.62x54 มิลลิเมตร โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลองร่วมกัน การทดสอบครั้งแรกได้ดำเนินการเกี่ยวกับแผ่นเกราะขนาดใหญ่ หนา 9 และ 20 มิลลิเมตร ในการตรวจสอบความเที่ยงตรงของการจำลองและพารามิเตอร์แบบวัสดุธรรมชาติ ผลการวิเคราะห์ทั้งสองวิธีมีความสัมพันธ์กันอย่างมาก ดังรูปที่ 2.16-2.17 นั่นคือ เมื่อกระสุนกระทบกับเกราะในบริเวณที่ไม่สมมาตร จะทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของหัวกระสุน และเพิ่มขีดความสามารถในการป้องกันได้

อีกหนึ่งโครงสร้างแผ่นเกราะน้ำหนักเบา ความหนาแน่นต่ำ มีความแข็งแรงสูง โดยเฉพาะความสามารถในการดูดซับพลังงาน ทนต่อการกัดกร่อน ที่ดี, มีการนำความร้อนดี ก็คืออลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสมที่ความหลากหลายในการนำไปใช้งาน [17], E.M. Backman และคณะ [18], G.G. Corbett และคณะ [19] เปิดเผยว่าอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม มีความแข็งแรงและความเหนียว จุดหลอมเหลวต่ำและมีอัตราความเครียดสูง เหมาะที่จะนำมาประยุกต์เป็นวัสดุเกราะ เป้าหมายในการนำมาใช้งานคือการสร้างให้มีชั้นหลาย ด้วยการใช้วัสดุหลายชนิดร่วมกัน เป็นวิธีการที่จะเพิ่มประสิทธิภาพต่อการปรับปรุงความต้านทานการเจาะเกราะ และปรับปรุงให้มีค่าความแข็งที่ผิวให้สูงขึ้น และต้องออกแบบให้เกิดการเลี้ยวเบนของกระสุนเมื่อเข้ามาปะทะ เป็นการสลายพลังงานจลน์ นี่คือหลักการที่จำเป็นสำหรับวัสดุเกราะ [20-23] งานวิจัยที่ผ่านมามีการผสมผสานโลหะผสมและโลหะพื้นฐาน (แสตนเลส) เพื่อปรับปรุงวัสดุเกาะ และใช้ในการก่อสร้างยานพาหนะ [24-30] การเคลือบพื้นผิวโลหะที่มีคาร์ไบด์ เป็นหนทางที่มีประสิทธิภาพในการยืดอายุการใช้งานของส่วนประกอบที่เป็นโลหะในสภาพแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อนหรือลดประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักรกล ระดับการเคลือบคาร์ไบด์ขึ้นอยู่กับของการสลายตัวของคาร์ไบด์ในเมทริกซ์และประเภทของชั้นปฏิกิริยา [31] การทำงานที่กว้างขวางได้รับการดำเนินการสำหรับการผลิตเคลือบป้องกันด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) และทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) โดยใช้เทคนิคการปรับเปลี่ยนพื้นผิวเช่น ใช้พลังงานเลเซอร์สูงละลายและรักษาพื้นผิว ในระหว่างกระบวนการนี้เลเซอร์จะละลายพื้นผิวพร้อมกับฝังวัสดุที่เป็นผงคาร์ไบด์ (SiC หรือWC) หรือการรวมกันของผงคาร์ไบด์และวัสดุประสาน (Co, Al หรือ Ni) [32-41] พื้นผิวประกอบอาจสร้างโดยการผสมผสานอลูมิเนียมขนาดนาโนเป็นอลูมิเนียม AA6082 นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการสึกหรอจะลดลงไปหนึ่งในสาม [42]

บทที่ 3
การดำเนินการวิจัย

รายละเอียดในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการดำเนินการวิจัยที่ประกอบด้วยวิธีการดำเนินงานวิจัยขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบ วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ การเปรียบเทียบผลการทดลองและไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมีรายละเอียดในแต่ละส่วนดังต่อไปนี้

3.1 ระเบียบวิธีวิจัย

3.1.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1.1.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเกราะโลหะกันกระสุน ชนิดของวัสดุ วิธีการทดสอบ การออกแบบเกราะกันกระสุน ผ่านการทบทวนวรรณกรรมจากวารสารวิชาการและวิจัย หนังสือ อินเตอร์เน็ต และสิทธิบัตรหรืออนุสิทธิบัตรต่าง ๆ

3.1.1.2 ศึกษาข้อมูลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Ansys/Explicit Dynamics กระบวนการทำ Pre-processing ที่ต้องให้ความสำคัญ เช่น การกำหนด Materials Properties, การทำ Element Mesh control

3.1.1.3 การกำหนดตัวแปร ระเบียบวิธีวิจัย แนวทางวิจัย กรอบการวิจัย และการวางแผน การเตรียมการดำเนินงานทดสอบและวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

3.1.1.4 ออกแบบและสร้างแบบจำลองเกราะกันกระสุนแบบ 3 มิติ ด้วยโปรแกรม SolidWorks ในรูปแบบของ Part ที่เป็น Multibody

3.1.1.5 กำหนดค่าสมบัติของวัสดุตามรูปแบบความเสียหายของวัสดุในโปรแกรม Ansys / Engineering Data โดย SKD11 มีรูปแบบความเสียหายตามทฤษฎีของ Johnson-Cook Strength, กระสุนที่ทำจากทังสเตนคาร์ไบด์ มีรูปแบบความเสียหายตามทฤษฎี Johnson-Holmquist (JH-2)

3.1.1.6 วิเคราะห์แผ่นเกราะกันกระสุนด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ Ansys/Explicit

3.1.1.7 ทดสอบการยิงแผ่นเกราะกันกระสุนจริงตามมาตรฐาน NIJ

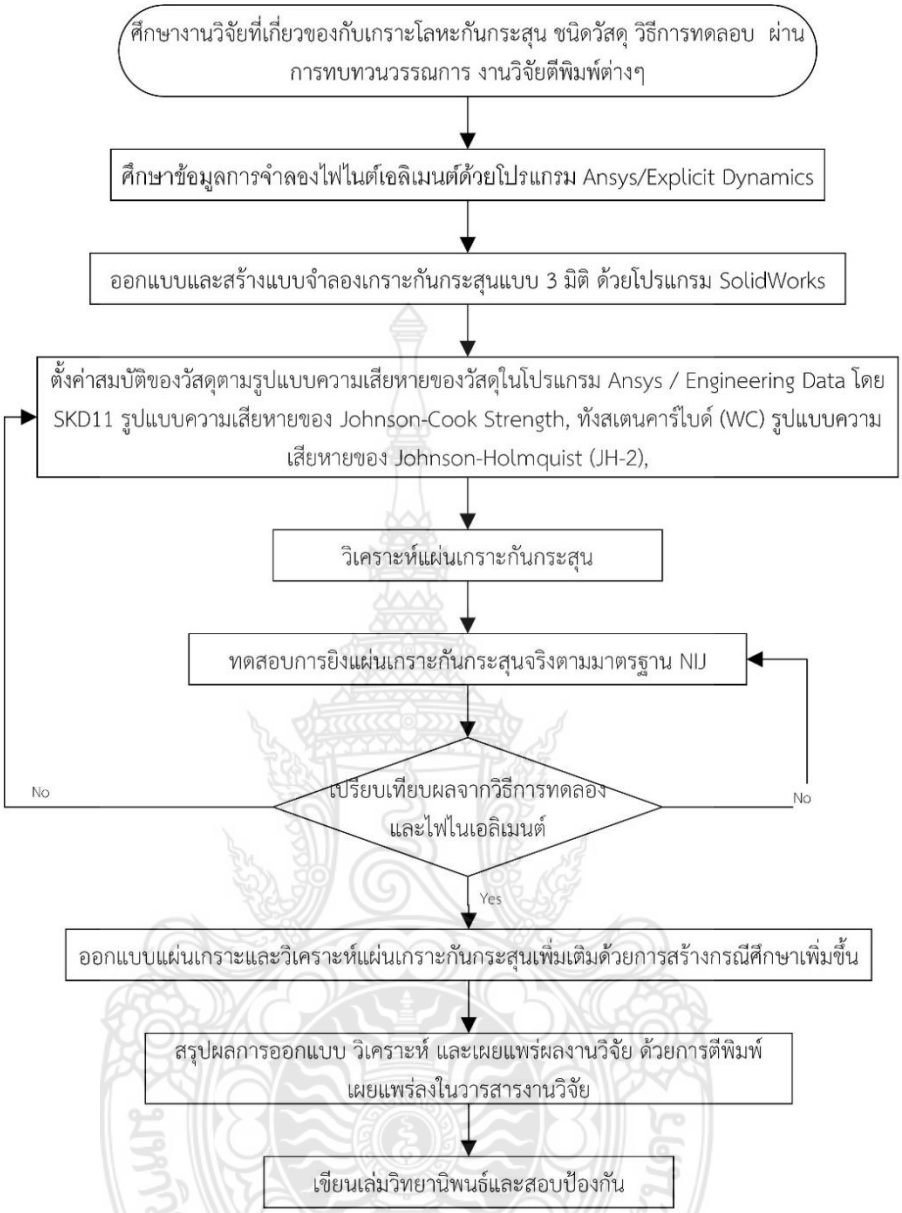
3.1.1.8 เปรียบเทียบผลจากวิธีการทดลองและไฟไนเอลิเมนต์

3.1.1.9 ออกแบบแผ่นเกราะและวิเคราะห์แผ่นเกราะกันกระสุนเพิ่มเติมด้วยการสร้างกรณีศึกษาเพิ่มขึ้น

3.1.1.10 นำผลที่ได้มาวิเคราะห์ สรุปผลการทดสอบ และเขียนเล่มวิทยานิพนธ์

3.1.1.11 เผยแพร่ผลงานวิจัยด้วยการตีพิมพ์เผยแพร่ลงในวารสารทางวิชาการ

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 Dynamic มีปัจจัยในการคำนวณที่สำคัญเนื่องจากการคำนวณของโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์จำเป็นจะต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะสูงเนื่องจากการในสร้างขนาดของเมซ (Mesh) ที่

แบบจำลองมีขนาดเล็กซึ่งเป็นปัจจัยหลักและการคำนวณที่มีเวลาเป็นตัวแปรมาเกี่ยวข้องนั้นซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ของวัตถุ (Dynamics) การเลือกใช้คอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะสูงเพื่อให้ได้ผลการคำนวณที่รวดเร็ว การคาดเคลื่อนที่น้อยและผลการจากการคำนวณที่เที่ยงตรงเพื่อให้ได้มาซึ่งผลการวิเคราะห์ที่สามารถใช้เพื่อในการคาดการณ์หรือเปรียบเทียบกับผลการจำลองยิงซึ่งจะต้องมีความใกล้เคียงจากความเป็นจริงเพื่อเป็นการยืนยันผลจากการคำนวณ มีสเปคดังนี้

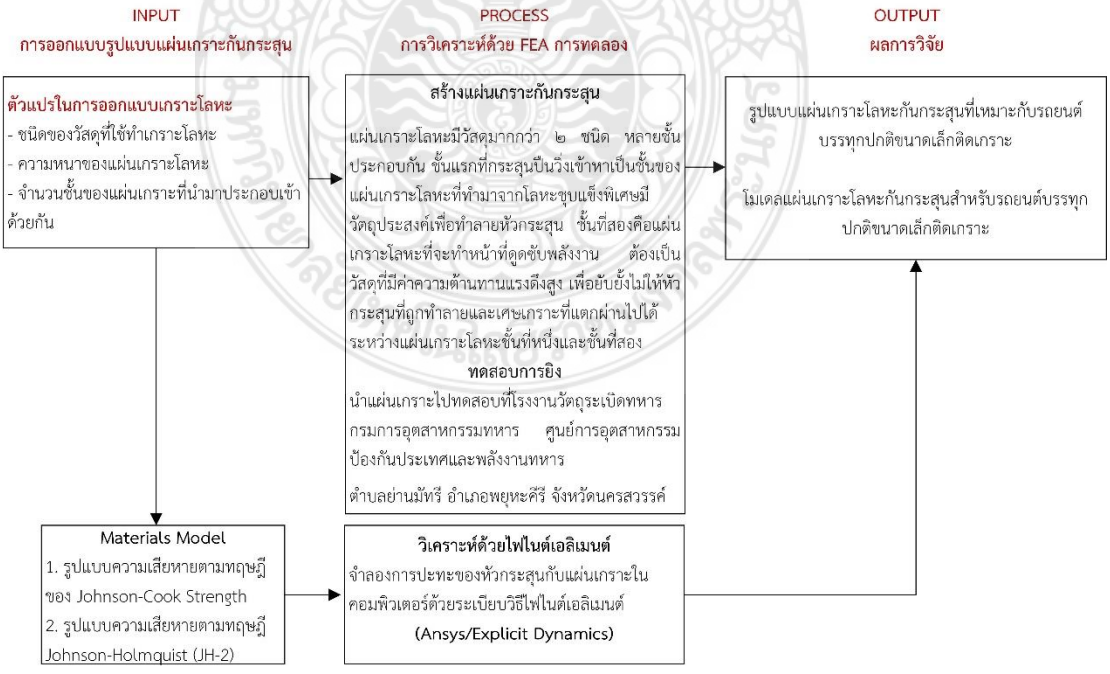
- CPU: AMD Ryzen Threadripper 2990WX 32 Core Processor
- Mainboard: MSI MEG X399 CREATION (MS-7B92)
- RAM Corsair 128 GB DDR4/3200 MHz
- VGA: NVIDIA Quadro RTX 4000
- Power supply: Thermaltake 850W 80 Plus Gold

3.1.2.5 เครื่องเชื่อมอาร์กอน

3.1.2.6 เครื่องตัดแผ่นโลหะ

3.1.3 กรอบการวิจัย

งานวิจัยนี้เลือกใช้เครื่องมือในการทำวิจัย ประกอบด้วย การวิเคราะห์ด้วยไฟไนเอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม Ansys/Explicit ร่วมกับการทดลอง ทำการจำลองและทดสอบในบางกรณีเพื่อยืนยันขีดความสามารถในการวิเคราะห์ของโปรแกรมไฟไนเอลิเมนต์ เมื่อได้รูปแบบการดำเนินงานด้วยวิธีไฟไนเอลิเมนต์ที่ถูกต้อง จึงสร้างโมเดลไฟไนเอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์กรณีศึกษาที่เป็นแผ่นเกราะโลหะกันกระสุนในกรณีต่างๆ กรอบการวิจัยมีรายละเอียดดังรูปที่

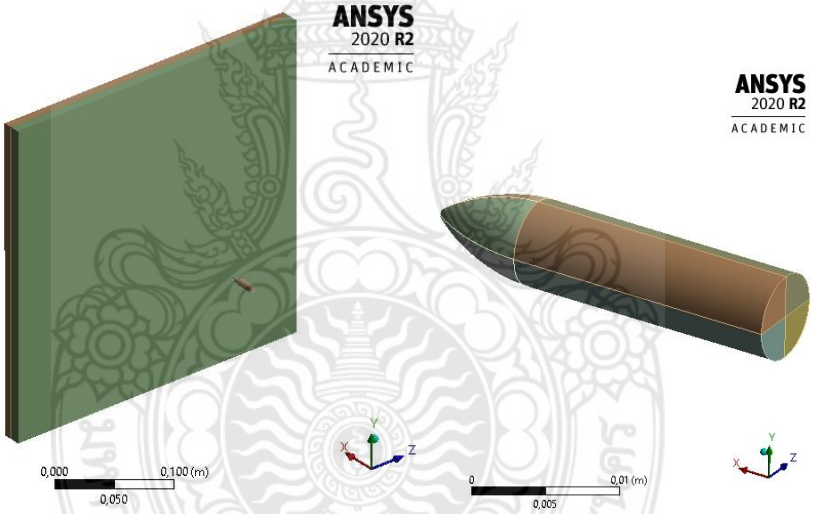


รูปที่ 3.2 กรอบการวิจัย

3.2 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วย ANSYS: Explicit Dynamics

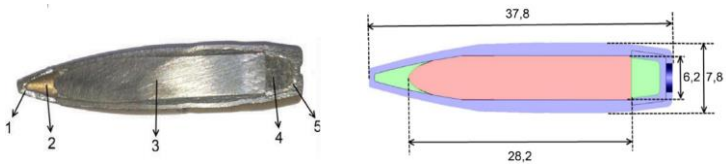
3.2.1 การออกแบบแผ่นเกราะกันกระสุนและหัวกระสุนด้วยโปรแกรม SolidWorks

เริ่มต้นด้วยโปรแกรม SolidWorks ดำเนินการสร้างโมเดลเกราะกันกระสุนด้วยไฟล์ชิ้นส่วน (Part) เพียงไฟล์เดียว โดยสร้างให้เป็นแบบ Multibody ยกตัวอย่าง กรณีที่แผ่นเกราะกันกระสุนถูกออกแบบให้เป็นแผ่นซ้อนจำนวน 2 แผ่น นับได้ 2 bodies และสำหรับหัวกระสุน ต้องออกแบบให้เป็น 8 ชิ้นส่วน ก็จะได้ 8 bodies (ลำตัวกระสุน 4 bodies และปลายกระสุน 4 bodies) นับรวมทั้งหมดได้ 10 Bodies ดังรูปที่ 3.3 ขนาดของแผ่นเกราะกันกระสุนได้รับการออกแบบให้มีขนาดตามมาตรฐาน NIJ ด้วยขนาดความกว้างxความยาว เท่ากับ 300x300 mm และหากนำแผ่นเกราะจริงไปทดสอบการยิง จะมีขนาด 300x300 mm ด้วยเช่นกัน ซึ่งทั้งแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์และแผ่นเกราะกันกระสุนที่สร้างขึ้นจริงจะต้องมีขนาดเท่ากันเพื่อนำไปทดสอบการยิงและเพื่อให้สามารถนำผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบกันได้ สำหรับระยะห่างระหว่างหัวกระสุนกับแผ่นเกราะมีค่าเท่ากับ 100 mm มีทิศทางพุ่งเข้าหาแผ่นเกราะ ณ ตำแหน่งจุดกึ่งกลางของแผ่นเกราะโลหะ



A) Isometric view B) หัวกระสุน

รูปที่ 3.3 ตัวอย่างโมเดลแบบจำลอง 3 มิติ A) แผ่นเกราะกันกระสุนในมุมมองไอโซเมตริก และ B) แบบจำลองหัวกระสุน



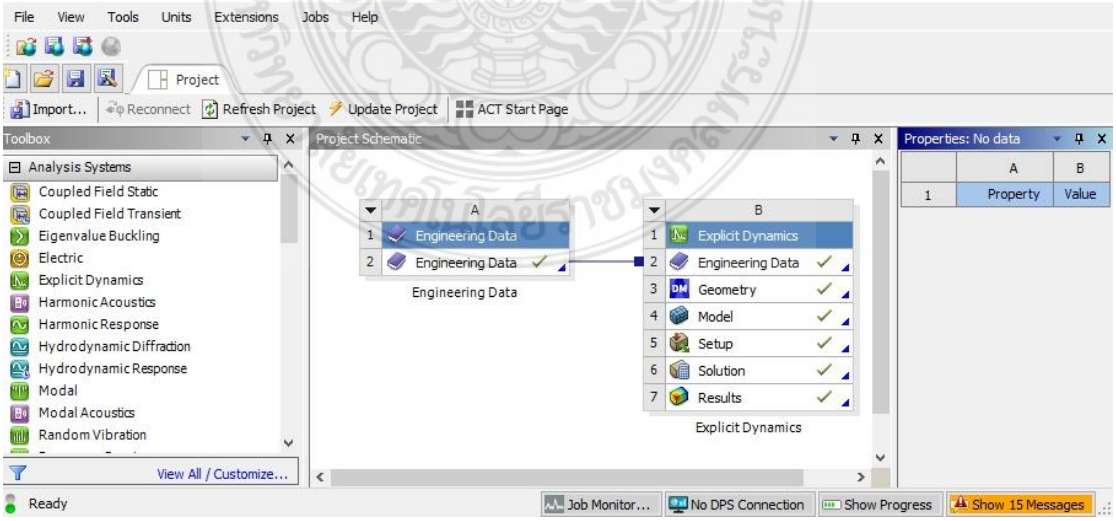
A) B)

รูปที่ 3.4 โครงสร้างกระสุน A) มิติของกระสุน AP 7.62 mm และชิ้นส่วน: 1. ปลอกทองเหลือง 2. หัวจุด 3. แกนเหล็กชุบแข็ง 4. ฐานตะกั่ว 5. แก็ป และ B) ขนาดกระสุน มีหน่วยเป็น มม. [16]

รูปแบบของแผ่นเกราะโลหะกันกระสุนจะได้รับการออกแบบให้เป็นแผ่นซ้อนตั้งแต่ 1-2 แผ่น โดยแผ่นแรกที่กระสุนจะพุ่งเข้าเจาะนั้นจะต้องเป็นแผ่นโลหะที่มีค่าความแข็งสูงที่ผ่านการชุบแข็ง เพื่อทำหน้าที่ในการทำลายหัวกระสุนให้แตกออกจากกัน ยกตัวอย่างวัสดุที่นำมาใช้เป็นแผ่นด้านหน้านี้ คือ ทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) และ SKD11 ที่มีความหนาตั้งแต่ 6, 8, 10, 12 และ 14 mm สำหรับแผ่นเกราะชั้นที่สองจะทำหน้าที่ในการดูดซับพลังงานจากแรงกระแทกของกระสุนและทำหน้าที่หยุดการเคลื่อนที่ของกระสุนและเศษของแผ่นเกราะแผ่นหน้า โดยเลือกใช้วัสดุเป็น Stainless Steel SUS304 ที่มีความหนาเท่ากับ 6, 8, 10 และ 12 mm สำหรับกระสุนที่ได้รับการออกแบบเพื่อใช้ในการจำลองและวิเคราะห์ตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 หรือ 4 มีขนาดดังรูปที่ 3.4 ด้วยกระสุน AP 7.62 mm ซึ่งอ้างอิงขนาดจาก Namık Kılıç et al. [16] และทำจากวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ (WC)

3.2.2 กระบวนการเตรียมและตั้งค่าการจำลอง (Pre-processing)

การวิเคราะห์เลือกใช้โปรแกรม ANSYS 2020R2 Academic ได้ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือสำคัญในการวิเคราะห์และแสดงผลลัพธ์การจำลองร่วมกับการทดสอบการยิงกระสุนจริง โดยในส่วนของโมดูลที่ใช้วิเคราะห์จะเป็น Explicit Dynamics ที่อยู่ในหน้าต่าง Workbench ดังรูปที่ 3.5 เริ่มต้นด้วยการนำโมดูล Explicit Dynamics เข้าสู่พื้นที่ Project schematic และทำการกำหนดสมบัติของวัสดุ 3 ชนิด ประกอบด้วย ทังสเตนคาร์ไบด์ (WC), SKD11 และ Stainless steel (SUS304) โดยสมบัติของวัสดุจะใช้ที่มีอยู่ในโปรแกรมคือวัสดุ Stainless steel (SUS304) ส่วนวัสดุชนิดอื่นจะต้องกำหนดค่าเข้าไปในโปรแกรมด้วยตนเองโดยใช้สมบัติของวัสดุที่มาจากการอ้างอิงในบทความต่างๆ ที่ได้มีการนำเสนอไว้มากมายและมีการอ้างอิงต่อเนื่องกันมา สำหรับวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) จะต้องกำหนดค่าทั้งในส่วนความหนาแน่น สมบัติทางกล สมบัติด้านการแตกหัก และอื่นๆ ดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.5 User interface ของ ANSYS 2020R2

จากรูปที่ 3.5 เป็นการกำหนดรายการสมบัติของวัสดุลงในระบบข้อมูลชุดคำสั่งทำงานของ Explicit Dynamics ซึ่งมีคำสั่ง “Engineering Data” เพื่อใช้เป็นส่วนของการกำหนดสมบัติของวัสดุ 5 ชนิด คือ ทังสเตนคาร์ไบด์ (WC), SKD11 และ Stainless steel (SUS304) โดยในห้องสมุดวัสดุของ ANSYS มีสมบัติวัสดุของ SUS304 แล้ว จึงไม่จำเป็นต้องกำหนดเพิ่มเติม แต่วัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ (WC), SKD11 ไม่มีในฐานข้อมูลของโปรแกรม ANSYS จึงต้องกำหนดเพิ่มเติมโดยใช้ฐานข้อมูลจากการทบทวนวรรณกรรม ซึ่งมีสมบัติของวัสดุเป็นไปตามตารางที่ 3.1-3.3

ตารางที่ 3.1 สมบัติของวัสดุ Tungsten carbide (WC) [43]

Tungsten carbide		
Density	14560	kg/m^3
Structural		
∨ Isotropic Elasticity		
Derive form	Young’s Modulus and Poisson’s Ratio	
Young’s Modulus	5.39e+11	Pa
Poisson’s ratio	0.23	
Bulk Modulus	3.3272e+11	Pa
Shear Modulus	2.1911e+11	Pa
Compressive Yield Strength	4.53e+09	Pa
Tensile Yield Strength	3.85e+09	Pa
Other		
∨ Johonson-Holmquist Strength Continuous		
Failure Type	Gradual	
Hugoniot Elastic Limit HEL	6.566+09	Pa
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	

Tungsten carbide		
Maximum Fracture Strength Ratio SFMAX	1000	
Damage Constant D1	0.005	
Damage Constant D2	1	
Bulking Constant B	0	
Hydrodynamic Tensile Limit T	-4e+ 09	Pa
∨ Johonson Cook Failure		
Damage Constant D1	0	
Damage Constant D2	0.01072	
Damage Constant D3	-1.669	
Damage Constant D4	0	
Damage Constant D5	0	
Melting Temperature	1494.9	°C
Reference Strain Rate(/sec)	1	

ตารางที่ 3.2 สมบัติของวัสดุ SKD11 [85]

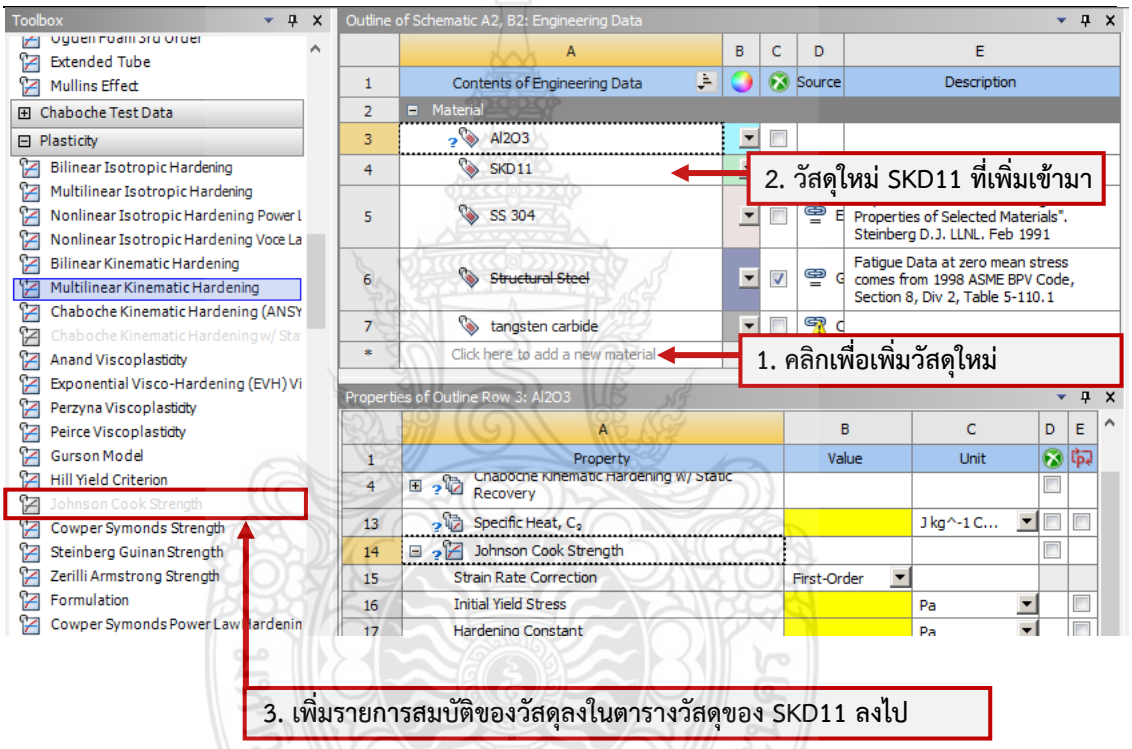
SKD11		
Density	8400	kg/m^3
Structural		∨
∨ Isotropic Elasticity		
Derive form	Young' s Modulus and Poisson's Ratio	
Young's Modulus	2.08e+11	Pa
Poisson's ratio	0.3	
Bulk Modulus	1.7333e+11	Pa
Shear Modulus	8e+10	Pa
Thermal		∨
Isotropic Thermal Conductivity	20.5	W/m °C
Specific Heat Constant Pressure	461	J/kg °C

SKD11		
Other		
∨ Johonson Cook Strength		
Strain Rate Correction	First-Order	
Initial Yield Stress	1.766e+09	Pa
Hardening Constant	9.04e+08	Pa
Hardening Exponent	0.39	
Strain Rate Conatant	0.012	
Thermal Softening Exponent	3.38	
Melting Temperature	1459.9	°C
Reference Strain Rate (/sec)	1	

ตารางที่ 3.3 สมบัติของวัสดุ SUS304 [ANSYS]

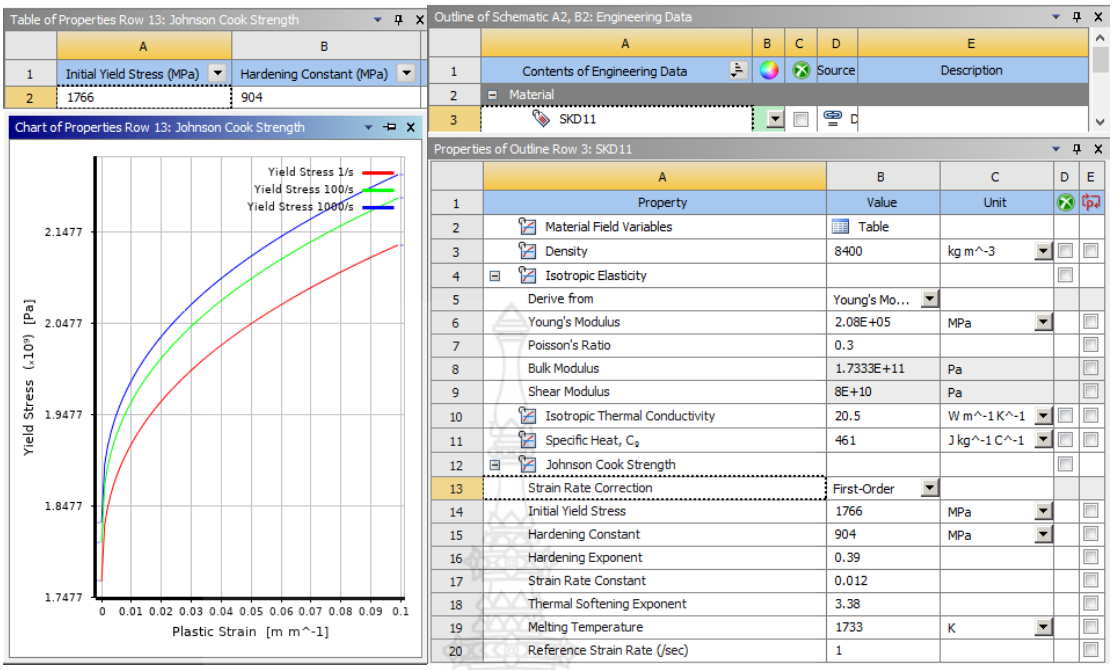
SS304		
"Equation of State and Strength Properties of Selected Materials". Steinberg D.J.LLNL. Feb. 1991		
Density	7900	kg/m^3
Thermal		
Specific Heat Constant Pressure	423	J/kg °C
Other		
∨ Shock EOS Linear		
Gruneisen Coefficient	1.93	
Parameter C1	4570	m/s
Parameter S1	1.49	
Parameter Quadratic S2	0	s/m
Steinberg Guiuan Strength		
Initial Yield Stress Y	3.4e+08	Pa
Maximum Yield Stress Ymax	2.5e+09	Pa
Hardening Constant B	43	

SS304		
Hardening Exponent n	0.35	
Derivative Dg/Dp G'P	1.74	
Derivative DG/DT G'T	-3.504e+07	Pa/°C
Derivative dy-dp Y'P	0.007684	
Melting Temperature Tmelt	2106.9	°C
Shear Modulus	7.7e+10	Pa

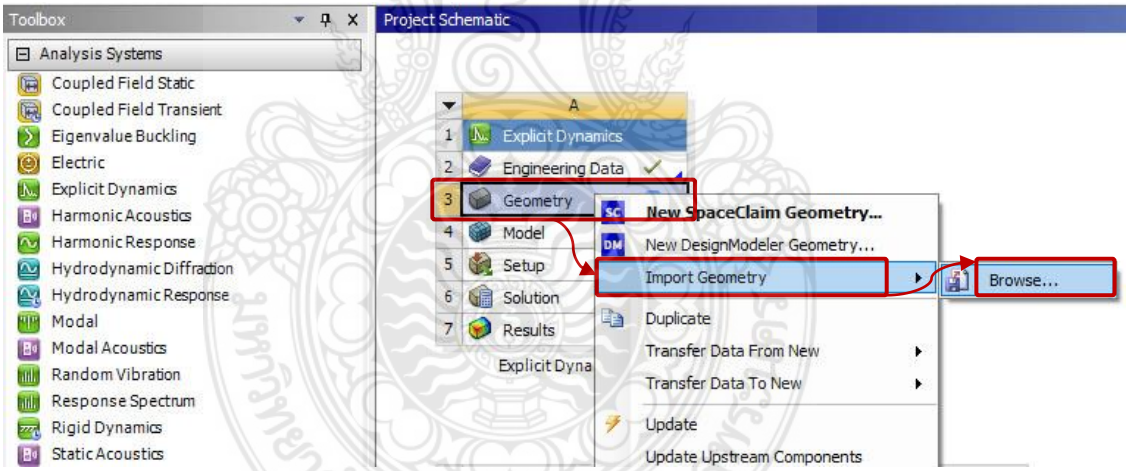


รูปที่ 3.6 ตัวอย่างการกำหนดวัสดุใหม่สำหรับ SKD11 ด้วย Johnson Cook Strength

เมื่อเข้าไปในส่วนของ Engineering Data ให้เพิ่มวัสดุใหม่โดยตั้งชื่อวัสดุตามที่ต้องการ จากนั้นจะได้รายการในช่องวัสดุใหม่ให้ทำการเพิ่มรายการสมบัติของวัสดุโดยคลิกสมบัติของวัสดุที่อยู่ทางด้านซ้ายมือและจะมาปรากฏทางด้านล่างตามรูป จากนั้นให้กำหนดค่าวัสดุต่างๆ ลงไป ทำอย่างนี้จนครบทุกรายการ ตัวอย่างการกำหนดวัสดุที่สมบูรณ์จะแสดงดังรูปที่ 3.6



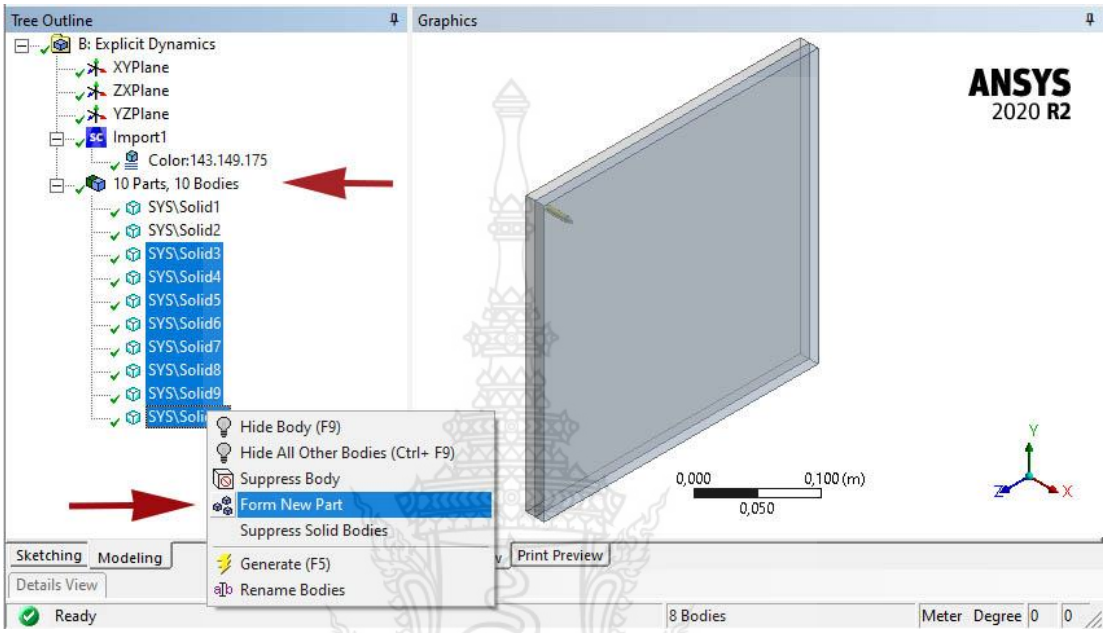
รูปที่ 3.7 ตัวอย่างการกำหนดสมบัติวัสดุของ SKD11



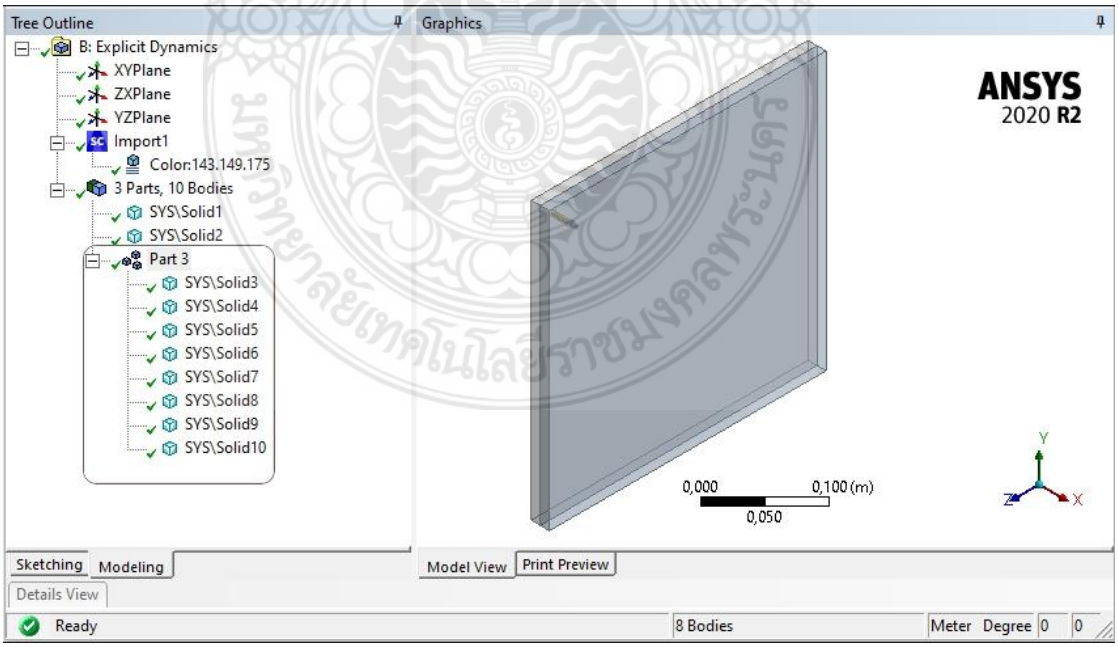
รูปที่ 3.8 นำเข้าโมเดลเกราะกันกระสุนและลูกกระสุนสู่ ANSYS

รูปที่ 3.8 เป็นการนำเข้าโมเดลเกราะกันกระสุนและลูกกระสุนเข้าระบบ หลังจากการกำหนดวัสดุในขั้นตอนที่ผ่านมา จึงนำเข้าโมเดล 3 มิติ ที่สร้างจากโปรแกรม SolidWorks เพื่อจำลองการยิงในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งจะมีชุดคำสั่ง “Geometry” โดยเลือกที่ Import Geometry และ Browse ไปยังโมเดลที่สร้างไว้ จากนั้นจะวิเคราะห์โมเดล และจะเข้าสู่หน้าต่างใหม่ที่เรียกว่า Explicit Dynamics-Design Modeler จากนั้นคลิกเลือก Generate และจะได้ผลดังรูปที่ 3.9 คือมี 10 Parts และ 10 Bodies เนื่องจากหัวกระสุนแยกตัวกันเป็นจำนวน 8 ชิ้นส่วน และเพื่อให้สามารถ

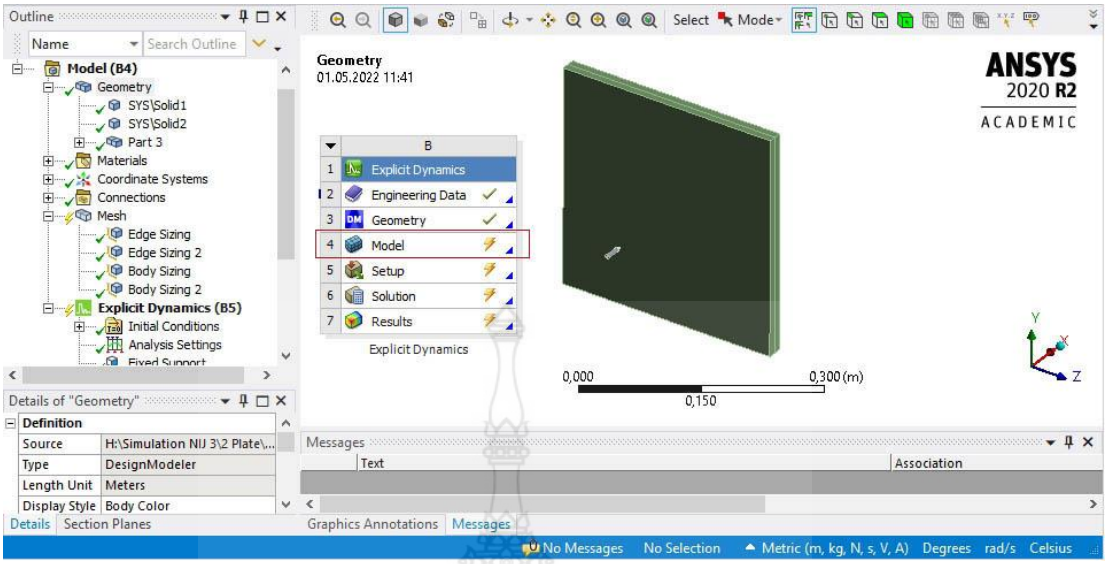
สร้าง Mesh ได้ง่าย จึงต้องทำให้ชิ้นงานของหัวกระสุนเป็นชิ้นส่วนเดียวกันก่อน ด้วยการใช้คำสั่ง “Form New Part” รวมชิ้นส่วนทั้ง 8 เป็นเนื้อเดียวกัน ชิ้นงานของกระสุนก็จะกลายเป็นเนื้อเดียวกัน ตามรูปที่ 3.10



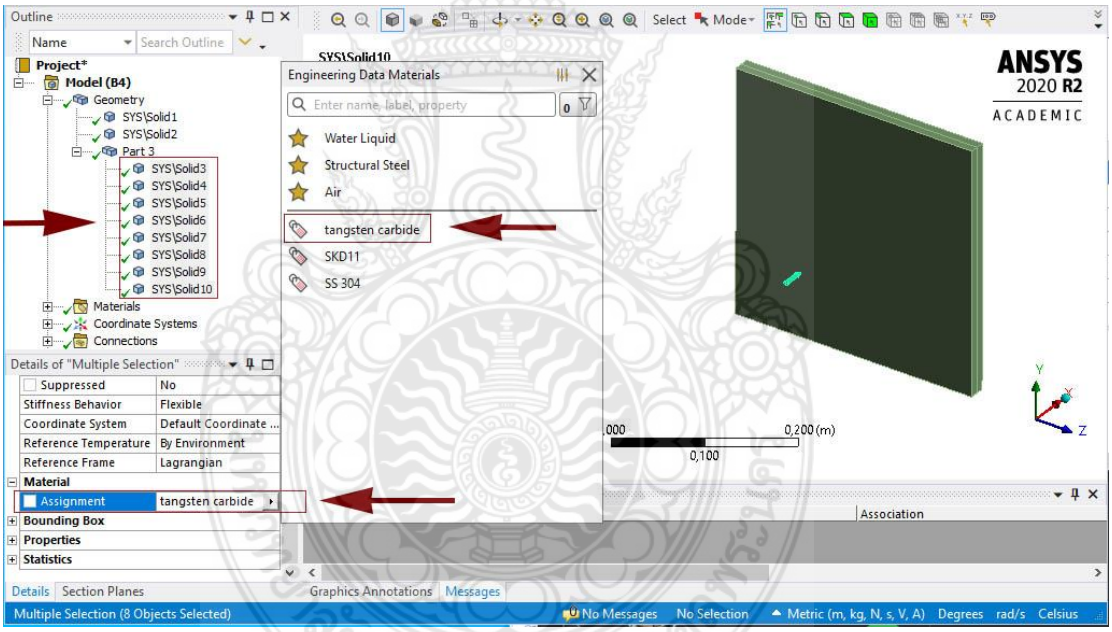
รูปที่ 3.9 นำเข้าโมเดล 10 Parts 10 Bodies สู่ Design Modeler และใช้คำสั่ง From New Part



รูปที่ 3.10 โมเดลเกราะกันกระสุนและลูกกระสุนที่นำเข้าสู่ ANSYS จำนวน 3 Parts 10 Bodies



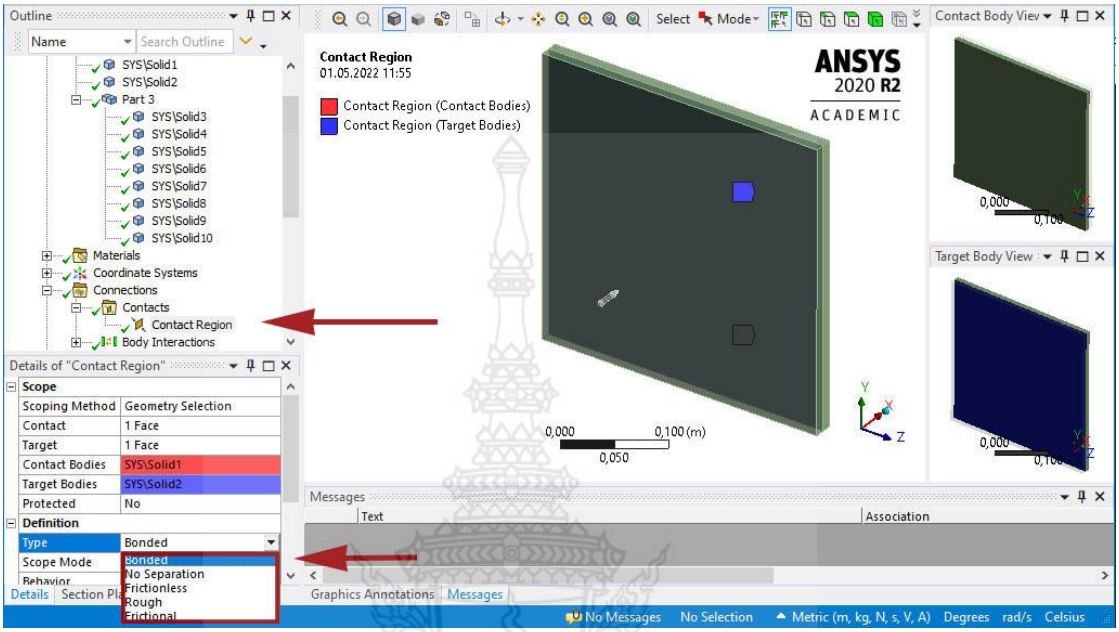
รูปที่ 3.11 เข้าสู่หน้าต่าง Mechanical ด้วยคำสั่ง Model



รูปที่ 3.12 การกำหนดชนิดวัสดุ และกำหนดค่า Stiffness Behavior เป็น Flexible

หน้าสัมผัส และชนิดของวัสดุนั้นมีวิธีการกำหนดดังรูปที่ 3.11 โดยให้เข้าสู่หน้าต่างของ Mechanical ด้วยการคลิกเลือกที่ Model เพื่อเข้าไปกำหนดชนิดของวัสดุ ในรูปที่ 3.12 เลือกชิ้นส่วนทั้งหมด กำหนดชนิดวัสดุเป็น SKD11 หรือ SS304 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรณีศึกษานั้นๆ และกำหนดค่า Stiffness Behavior เป็น Flexible สำหรับกรณีที่แผ่นเกราะมีมากกว่า 1 ชิ้น และเกิดการวางทับกันหรือซ้อนกัน จะต้องกำหนดหน้าสัมผัส (Contact) เป็นแบบไม่คิดค่าแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสที่แถบเครื่องมือ “Connections” ให้กำหนดที่ “Body Interaction” เป็นแบบ “Frictionless”

หมายความว่ากำหนดให้ชิ้นงานติดกันแต่ไม่คิดค่าความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของแผ่นเกราะทั้ง 2 แผ่น รูปที่ 3.13



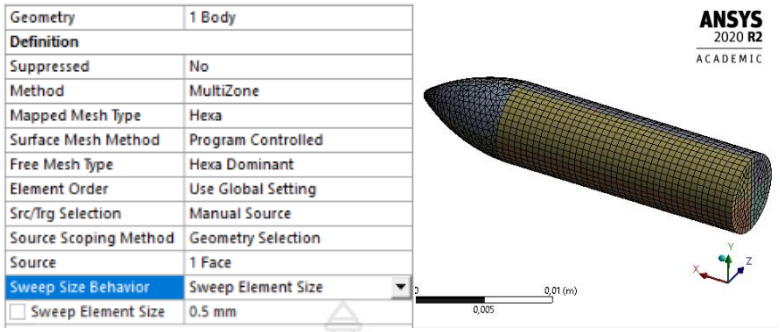
รูปที่ 3.13 การกำหนด Body Interaction ของแผ่นเกราะทั้งสองที่ประกบกันเป็นแบบ Frictionless

การแบ่งเอลิเมนต์จะต้องกำหนดชนิดของเอลิเมนต์ที่เลือกใช้ในการวิเคราะห์มี 2 ชนิด คือ Hexahedral และ Tetrahedral โดย Hexahedral คือ รูปทรงหกเหลี่ยมซึ่งเป็นลูกบาศก์มี 8 จุดยอด 12 ขอบล้อมรอบด้วย 6 รูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน มี 20 โหนด เรียกอีกอย่างว่า hex หรือ brick ความแม่นยำของการแก้ปัญหาโดยใช้เอลิเมนต์ชนิดนี้จะสูงที่สุด ดังนั้นเพื่อให้เหมาะสมกับโจทย์ปัญหานี้จึงต้องเลือกใช้เอลิเมนต์ชนิดนี้กับแผ่นเกราะกันกระสุน และส่วนหนึ่งของลำตัวลูกกระสุน และสามารถลดจำนวนเซลล์ ลดความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์และลดระยะเวลาในการคำนวณ [88] สำหรับเอลิเมนต์ชนิด Tetrahedral คือ รูปทรงสี่หน้า มี 4 จุดยอด 6 ขอบ และมี 10 โหนด ซึ่งจะถูกนำมาใช้กับส่วนหัวของกระสุนเท่านั้น เนื่องจากเอลิเมนต์ชนิดนี้มีความเหมาะสมกับหัวกระสุนที่มีความเรียวแหลม และเล็ก (ไม่รวมส่วนลำตัวกระสุน) สรุปสร้างเมชที่ชิ้นงานให้เป็นแบบ Hexahedral ที่บริเวณหัวกระสุนเลือกแถบเครื่องมือ Mesh Method แล้วเลือกเป็นแบบ Multizone โดยเลือกเป็น Manual Source และกำหนดให้ Element Size ที่หัวกระสุนมีขนาดเท่ากับ 0.5 mm ตามรูปที่ 3.14 และที่บริเวณลำตัวใช้แถบเครื่องมือ Sizing กำหนดให้ Element Size เท่ากับ 0.5 mm กำหนดรูปแบบ Mesh Method ในแต่ส่วนของชิ้นงานจำลองและการตั้งค่าขนาดของ Element Size ในแต่ละส่วนเพื่อความเหมาะสมของชิ้นงานจำลองและกำหนดการคำนวณของโปรแกรมให้ได้ผลการวิเคราะห์ทาง

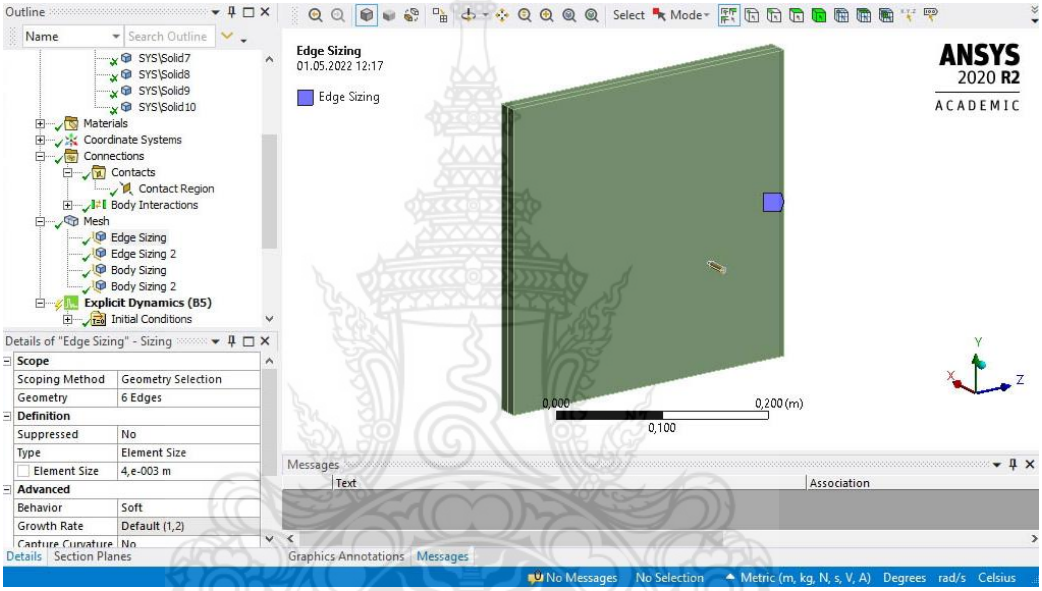
ไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีประสิทธิภาพและถูกต้อง ซึ่งทำให้หัวกระสุนมีจำนวนโหนดรวม 8,229 และเอลิเมนต์รวมเท่ากับ 14,926 ในกรณีแผ่นเกราะ 1 ชั้นไม่มีการซ้อนที่แถบเครื่องมือ Sizing ให้เลือกตัว Cursor เป็นแบบ Edge เลือกที่บริเวณขอบของชิ้นงานตามรูปที่ 3.15 กำหนดให้ Element Size เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และเลือก Bias Type ให้มีความละเอียดตรงกลาง กำหนดอัตราความละเอียดด้วยคำสั่ง Bias Factor เป็น 15 เท่า ของขนาด Element Size และรูปที่ 3.16 ลักษณะรูปแบบที่สร้างขึ้นที่แผ่นเกราะ ซึ่งจำนวนของโหนดและเอลิเมนต์ของแบบจำลองจะมีทั้งในส่วนของแผ่นเกราะและกระสุน ซึ่งจำนวนโหนดและเอลิเมนต์ของกระสุนจะคงที่ ด้วยเพราะว่าในทุกการวิเคราะห์จะใช้ขนาด Element size ที่คงที่สำหรับกระสุน แต่สำหรับแผ่นเกราะจะมีการปรับเปลี่ยนขนาดความหนาส่งผลให้จำนวนโหนดและจำนวนเอลิเมนต์มีการเปลี่ยนแปลง สำหรับตารางที่ 3.4 เป็นการแสดงจำนวนโหนดและเอลิเมนต์ของแผ่นเกราะกันกระสุน และผลรวมของจำนวนโหนดและจำนวนเอลิเมนต์ของแบบจำลองทั้งชุดที่ประกอบด้วยแผ่นเกราะและกระสุน

ตารางที่ 3.4 ตัวอย่างจำนวนโหนดและเอลิเมนต์ของแผ่นเกราะและผลรวมโหนดและเอลิเมนต์ทั้งหมด

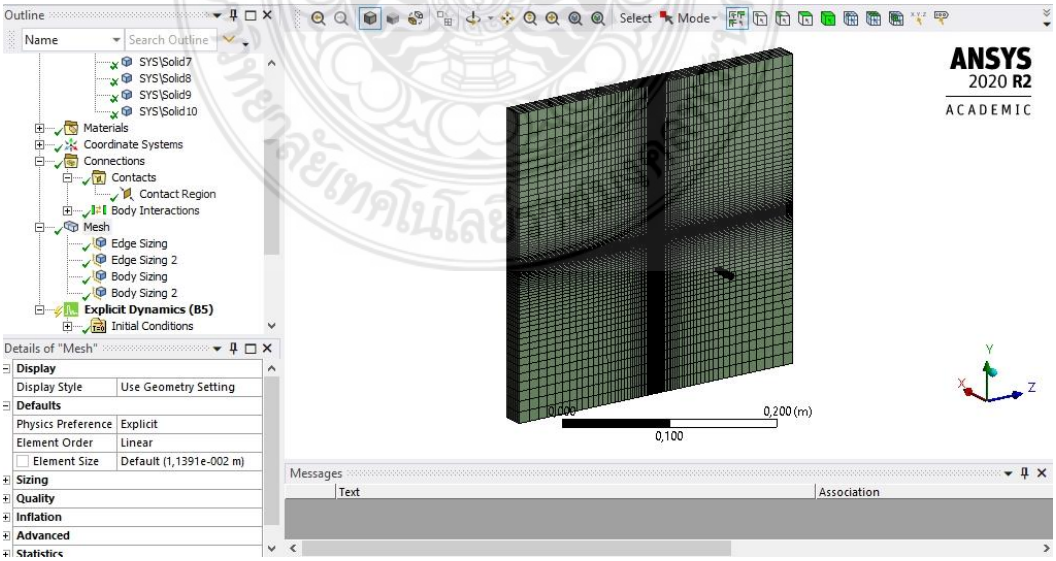
No.	Form	Thickness (mm)		Number of nodes	Number of Elements	All nodes	All Elements
		Front plate	Rear plate				
1	แผ่นเดี่ยว	6	-	12,513	6,474	20,742	21,400
2	แผ่นเดี่ยว	8	-	18,289	12,099	26,518	27,025
3	แผ่นเดี่ยว	10	-	19,213	12,707	27,442	27,633
4	แผ่นเดี่ยว	12	-	20,685	14,939	28,914	29,865
5	แผ่นเดี่ยว	14	-	24,065	17,724	32,294	32,650
6	แผ่นเดี่ยว	16	-	24,065	17,724	32,294	32,650
7	แผ่นเดี่ยว	18	-	28,880	22,500	37,109	37,426
8	แผ่นซ้อน	6	6	23,674	11,378	31,903	26,304
9	แผ่นซ้อน	8	8	23,674	11,378	31,903	26,304
10	แผ่นซ้อน	10	10	49,589	37,486	57,818	52,412
11	แผ่นซ้อน	12	12	49,589	37,486	57,818	52,412
12	แผ่นซ้อน	14	14	48,401	35,511	56,630	50,437
13	แผ่นซ้อน	16	16	48,401	35,511	56,630	50,437
14	แผ่นซ้อน	18	18	59,300	46,216	67,529	61,142



รูปที่ 3.14 การกำหนด Element Size

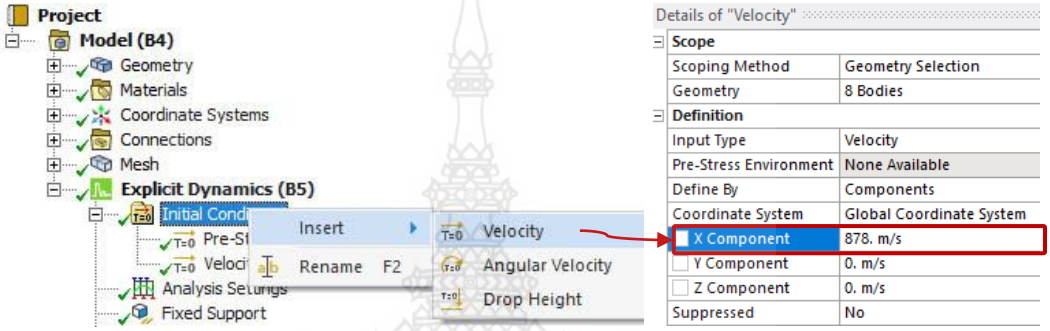


รูปที่ 3.15 การตั้งค่าขนาดของ Element Size ที่แผ่นเกราะ

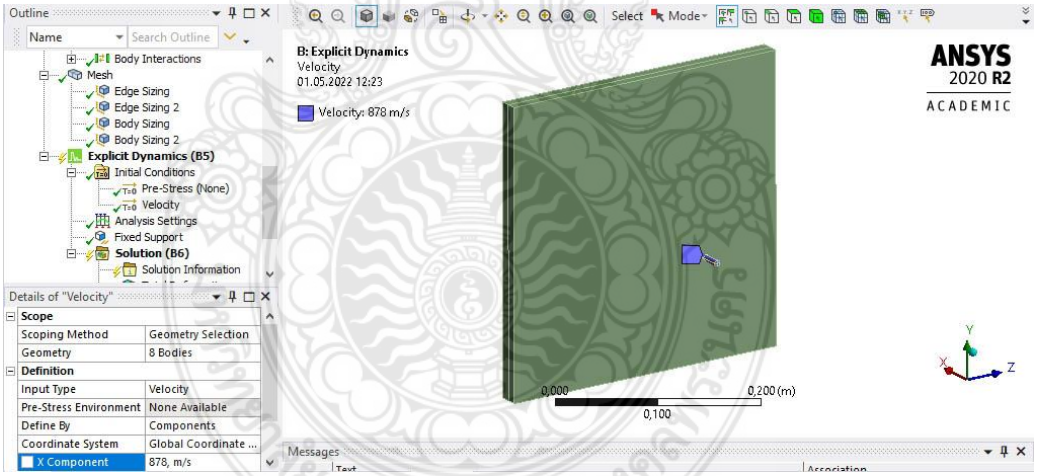


รูปที่ 3.16 ลักษณะของรูปแบบเมชที่แผ่นเกราะ

การตั้งค่าชุดคำสั่ง Explicit Dynamics เริ่มจากการตั้งค่าความเร็วเริ่มต้นของกระสุน จากรูปที่ 3.17 คลิกขวาที่ Initial Condition เลือก Insert และ Velocity บนแถบเครื่องมือเพื่อใส่ค่าเริ่มต้น โดยการจำลองการยิงจะใส่ค่าเริ่มต้นในช่อง x component ซึ่งเป็นค่าตามมาตรฐานการทดสอบ NIJ ระดับ 4 เลือกชิ้นงานจำลองที่เคลื่อนด้วยความเร็ว คือ โมเดลกระสุน ใส่ค่าความเร็วเริ่มต้นให้กับกระสุนเป็นความเร็ว 878±9.1 เมตรต่อวินาที [2] และทิศทางในการเคลื่อนที่ของกระสุนตามรูปที่ 3.18 ทิศทางของกระสุนเคลื่อนที่ไปในทิศทางตามแกน x ค่าความเร็วจึงต้องใส่เครื่องหมาย “+”



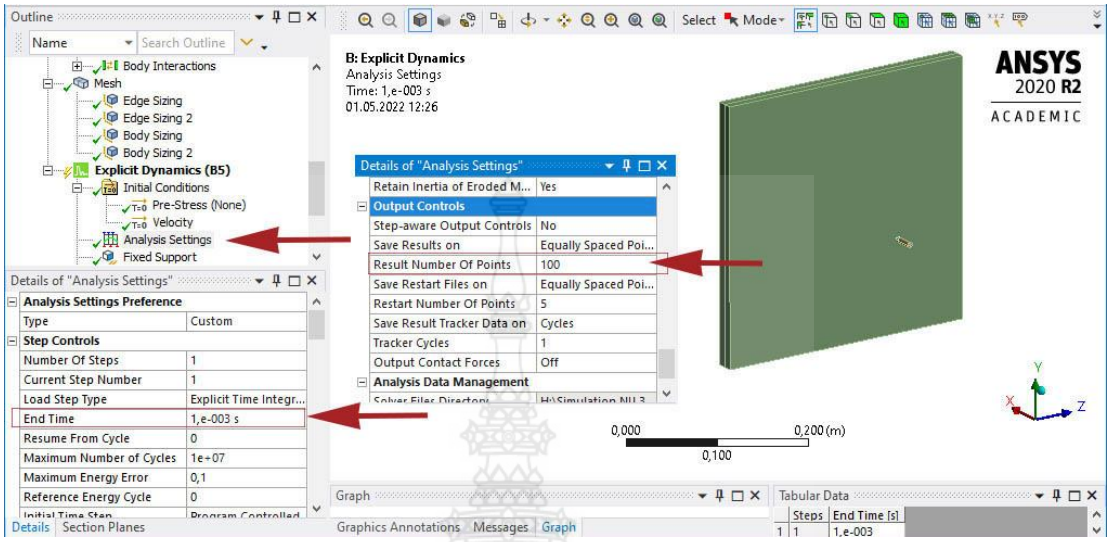
รูปที่ 3.17 การกำหนดค่าความเร็วเริ่มต้น (Initial velocity)



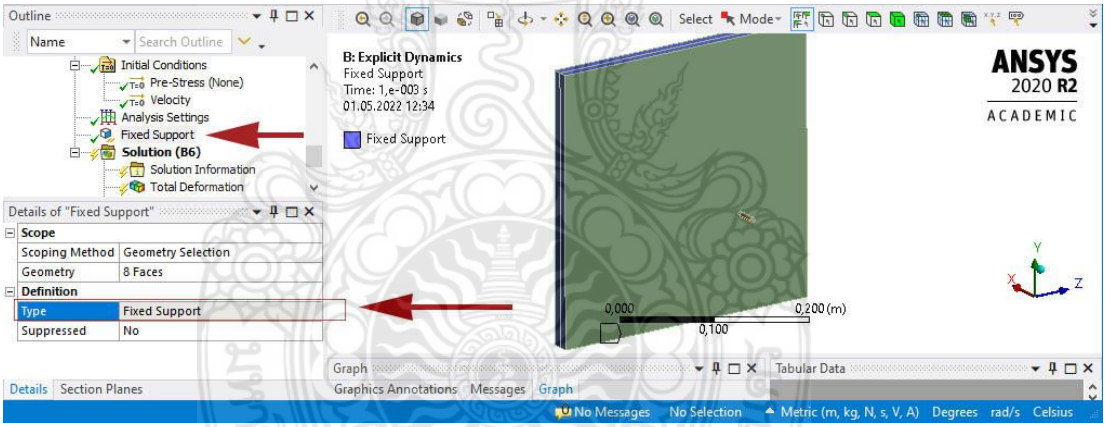
รูปที่ 3.18 การใส่ค่าความเร็วและทิศทางการเคลื่อนที่

จากชุดคำสั่ง Explicit Dynamics ให้มองแถบเครื่องมือของ Analysis Settings เป็นการตั้งค่าการทำงานของโปรแกรมสำหรับประมวลผลการวิเคราะห์ ให้เลือกที่คำสั่ง End Time เป็นชุดคำสั่งที่จะกำหนดให้ชิ้นงานเคลื่อนที่ไปในระยะเวลาที่ 0.001 วินาที ตามรูปที่ 3.19 เนื่องจากกระสุนปืนมีความเร็วที่ 878±9.1 เมตรต่อวินาที [2] ซึ่งมีความเร็วสูงมาก จึงต้องกำหนดเวลาของ End Time ที่น้อย เพื่อให้สามารถวิเคราะห์การชนของกระสุนปืนที่กระทบแผ่นเกราะ และที่แถบเครื่องมือ Output Controls ที่ชุดคำสั่ง Result Number of Points เป็นคำสั่งในการบันทึกข้อมูลการวิเคราะห์เมื่อ

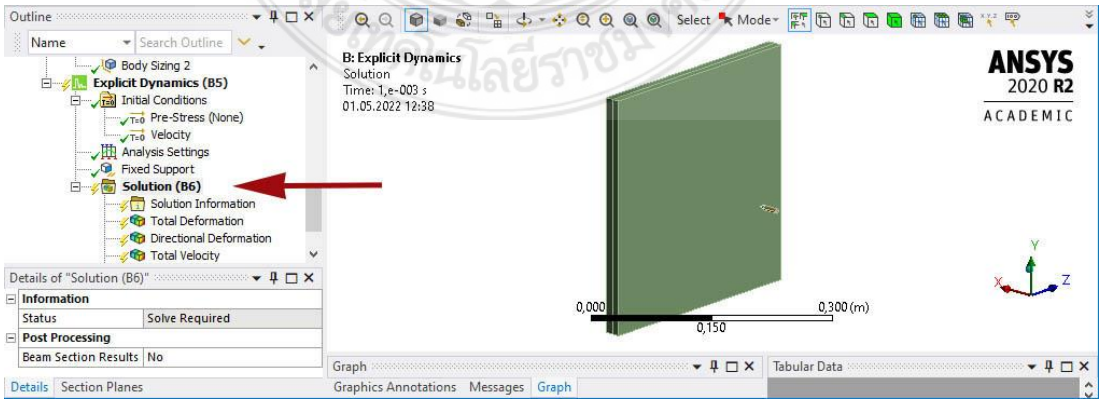
จำนวนค่าที่ใส่เข้าไปเพิ่มขึ้นความเสถียรของผลการวิเคราะห์จะมีการคลาดเคลื่อน (Error) ที่ลดลงค่าที่เหมาะสมควรใส่ที่ 50-100 จุด [44] ขึ้นไป



รูปที่ 3.19 ค่าของ End Time และ Result Number of Points



รูปที่ 3.20 การกำหนด Fixed Support



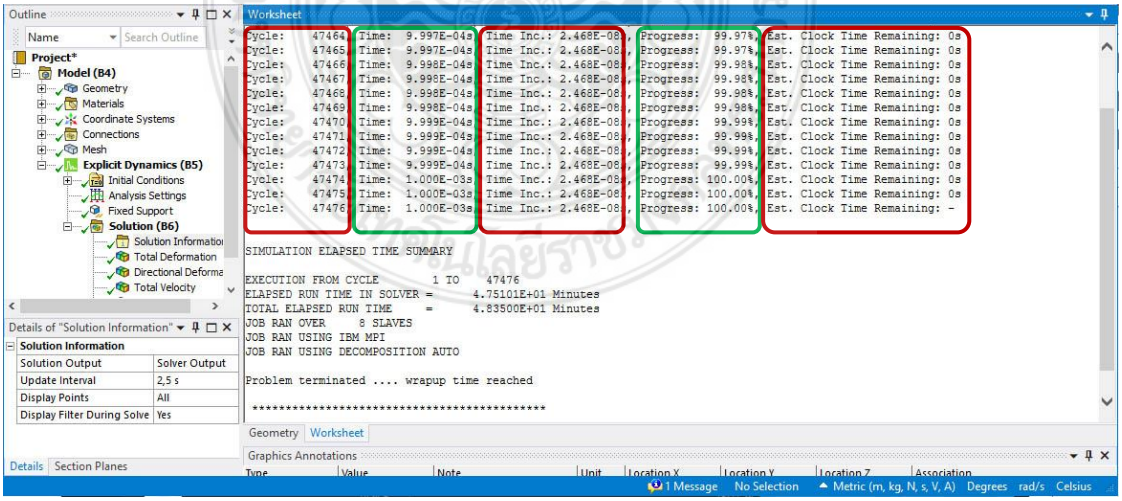
รูปที่ 3.21 การกำหนด Solution

รูปที่ 3.20 การกำหนดในชุดคำสั่ง Analysis Settings จะใช้แถบเครื่องมือ “Fixed Support” เพื่อเป็นการจับยึดงานที่บริเวณผิวด้านข้างของแผ่นเกราะทั้ง 4 หน้า หากเป็นแผ่นซ้อน 2 แผ่น จะต้องทำการกำหนดทั้ง 8 หน้า ตามรูปที่ 3.20 สังเกตว่าจะมีสัญลักษณ์ลูกศรชี้ที่ผิวขอบเพื่อแสดงว่าเป็นพื้นที่ที่ถูกจับยึดแล้ว ตามรูปที่ 3.21 ที่แถบชุดคำสั่ง Solution สามารถเลือกผลการวิเคราะห์ได้ เช่น ความเค้น ความเครียด ความเร็ว การเสียรูป เป็นต้น ดังนั้นได้เลือกแถบเครื่องมือ Equivalent Stress, Total Velocity และ Total Deformation เพื่อให้แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความเค้น ความเร็วที่เกิดขึ้นและการเสียรูปของแบบจำลองที่ได้จากการคำนวณและเลือกแถบเครื่องมือแสดงผลวิเคราะห์จากนั้นเลือกคำสั่ง Solve เพื่อให้โปรแกรมได้เริ่มการคำนวณ

3.2.3 กระบวนการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Solve-processing)

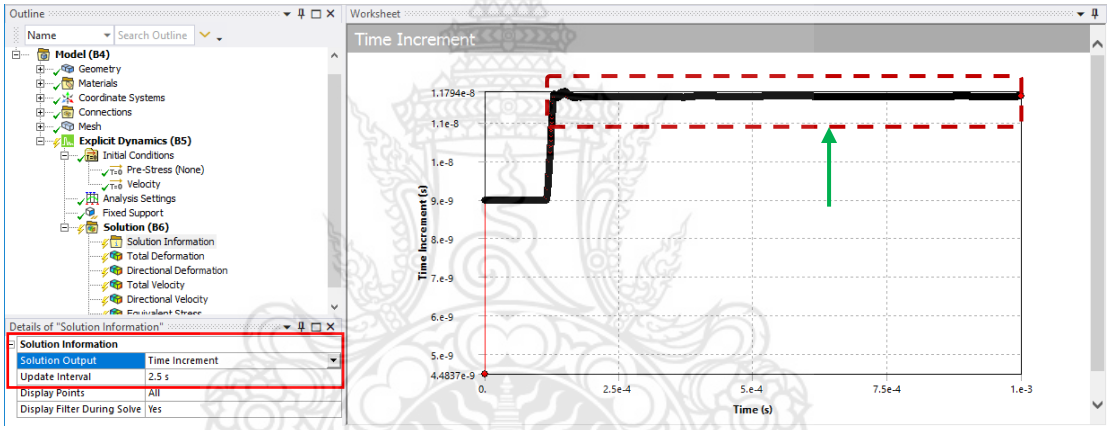
คือขั้นตอนการคำนวณหรือ Solve-processing จะเป็นการวิเคราะห์ค่าต่าง ๆ ในขั้นตอนการเตรียมซึ่งจะมีส่วนประกอบหลักในการคำนวนอยู่ 2 อย่างคือ 1. ผลการคลาดเคลื่อน (Error) 2. สมรรถนะของคอมพิวเตอร์ในการคำนวณ ซึ่งส่วนประกอบหลักทั้ง 2 อย่างนี้จะเป็นตัวช่วยในการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการคำนวน โดยการคลาดเคลื่อน (Error) ค่าที่ยอมรับได้จากโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าไม่เกินร้อยละ 5-10 [45] สามารถสังเกตได้จากกราฟในโปรแกรม

การตรวจสอบผลการคลาดเคลื่อนจะต้องใช้ชุดคำสั่ง Solution Information ในส่วนของ solution Output มีตัวเลือกของแถบเครื่องมืออยู่ 5 แบบด้วยกันดังรูปที่ 3.22 ประกอบด้วย 1. Solver Output ที่จะบ่งบอกเป็นจำนวนรอบวิเคราะห์ 2. Time Increment เป็นเวลาการวิเคราะห์ที่เพิ่มขึ้น 3. Energy Conservation 4. Momentum Summary 5. Energy Summary ซึ่งสามารถใช้ในการตรวจสอบการคลาดเคลื่อนในระหว่างการคำนวณของโปรแกรมได้

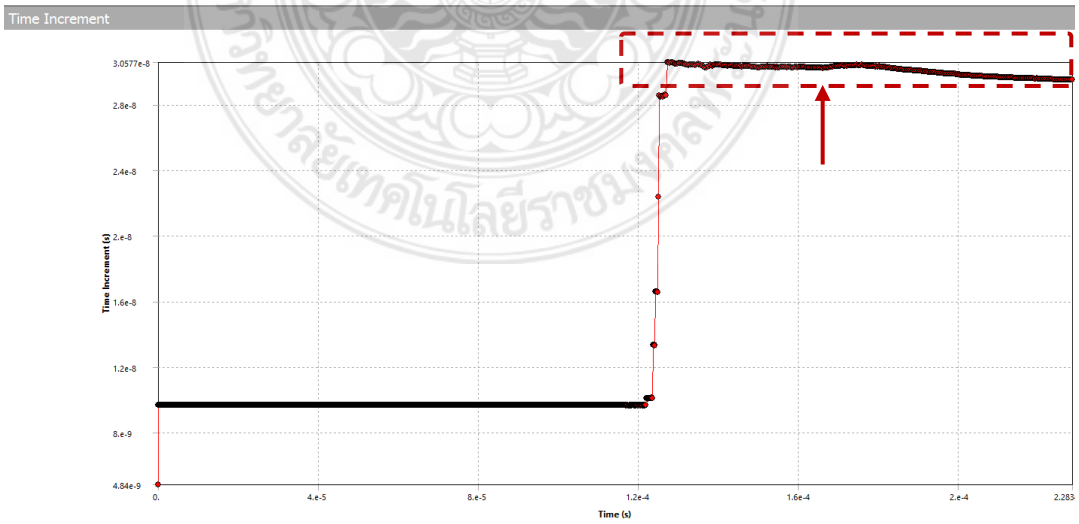


รูปที่ 3.22 การแสดง Solver Output

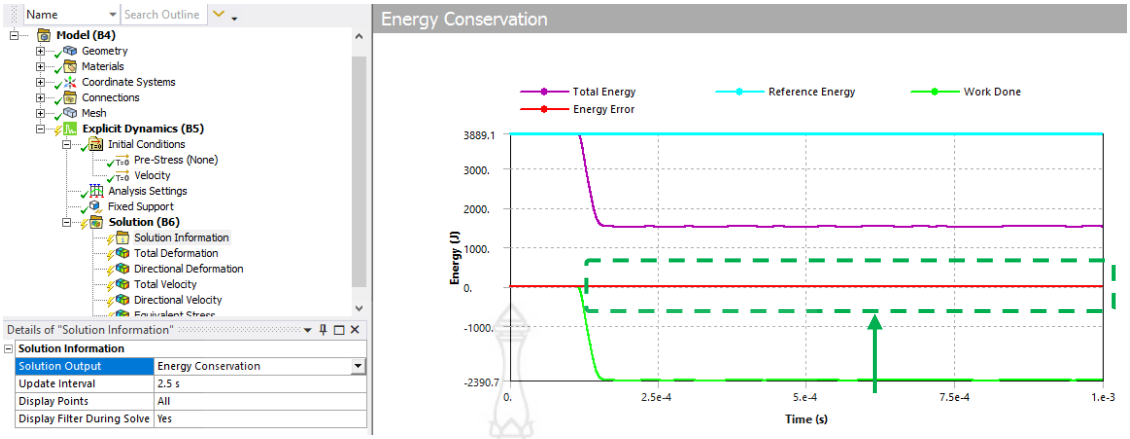
ผลการวิเคราะห์จากรูปที่ 3.22 เป็น Solver Output จะแสดง เช่น จำนวนรอบในการคำนวณ (Cycle) เวลาในการคำนวณแต่ละวงรอบ (Time Step) ร้อยละของการคำนวณที่ได้ออกมา (Progress) และเวลาที่คาดว่าจะเสร็จสิ้นการคำนวณ (Clock time remaining) ซึ่งหากมีการผิดพลาดโปรแกรมจะหยุดการทำงานและแสดงผลสาเหตุของความผิดพลาดนั้น สำหรับ Time Increment เป็นกราฟแสดงเวลาของ Time Step ในการคำนวณของการทำงานเมื่อวัตถุเกิดการกระแทกกราฟจะเกิดการเปลี่ยนแปลงในช่วงของ Time Increment ที่สูงและหลังจากที่วัตถุเกิดการกระแทกเรียบร้อยกราฟจะลดลงและคงที่จนครบ Time Step ของการทำงานซึ่งบ่งบอกสถานะการคำนวณที่ปกติไม่เกิดการคลาดเคลื่อนที่มากกว่าร้อยละ 5-10 ตามรูปที่ 3.23 ถ้าการคำนวณมีความผิดปกติโปรแกรมจะยังทำการคำนวณต่อไปแต่หลังจากหลังวัตถุกระแทกกราฟจะมีลักษณะลดลงตาม Time Step ของการคำนวณซึ่งจะไม่คงที่บ่งบอกถึงความผิดปกติตามรูปที่ 3.24



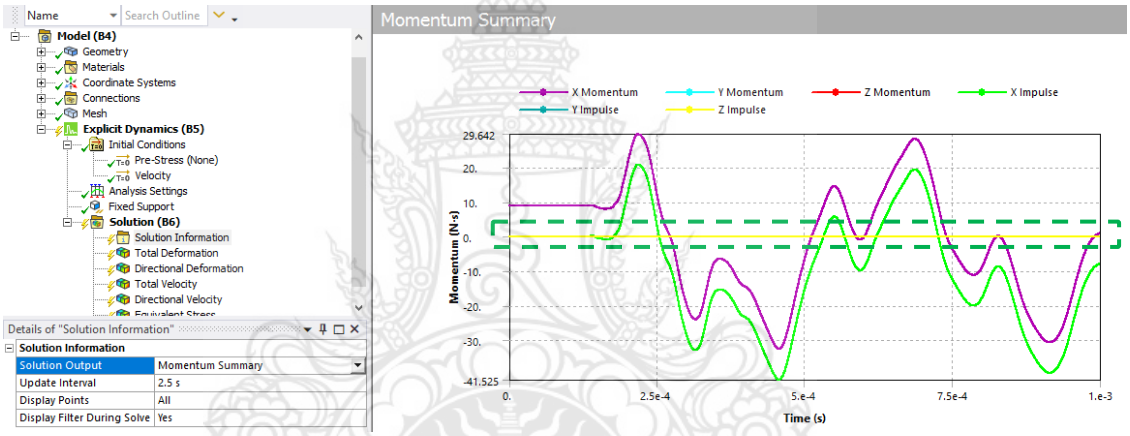
รูปที่ 3.23 สถานะปกติ กราฟมีลักษณะคงที่ในแนวนอน



รูปที่ 3.24 สถานะไม่ปกติ กราฟไม่อยู่ในแนวนอน



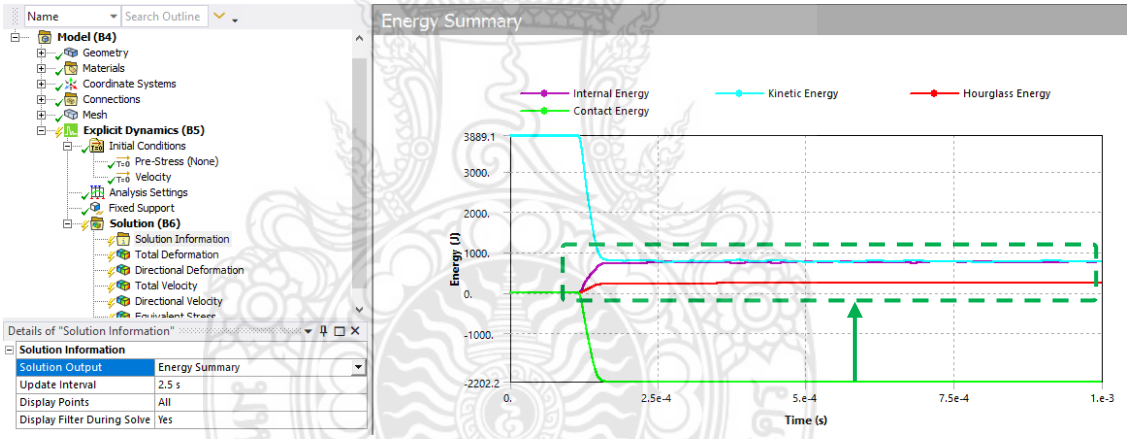
รูปที่ 3.25 เส้นกราฟ Energy Error แสดงสถานะปกติ



รูปที่ 3.26 เส้นกราฟ Momentum Summary แสดงผลปกติวิ่งในแนวนอน

สำหรับกราฟที่แสดงค่าที่เป็นหน่วยของพลังงาน (Energy) จะเป็น Energy Conservation คือ พลังงานที่เกิดขึ้นจากการคำนวณเมื่อวัตถุเคลื่อนที่กระแทกหรือชนจะแสดงพลังงานที่เกิดขึ้นเทียบกับ Time Step ของการคำนวณโดยจะแสดงค่าของพลังงานดังนี้ Total Energy, Reference Energy, Work Done และ Energy Error ในส่วนนี้เราจะสังเกตที่เส้นกราฟของ Energy Error เป็นเส้นสีแดงตามรูปที่ 3.25 ซึ่งจะแสดงลักษณะหลังจากเกิดการกระแทกหรือชนเส้นกราฟจะมีลักษณะคงที่ซึ่งบ่งบอกถึงความปกติของการคำนวณแต่ถ้ากราฟมีลักษณะวิ่งออกหรือลู่ลง ไม่อยู่ในแนวนอนแสดงว่ามีความผิดปกติ Momentum Summary กราฟในส่วนของ Momentum Summary นั้นจะแสดงผลค่าของ Momentum ในแต่ละแกนที่เกิดความเสียหายเทียบกับ Time Step ของการทำงานและแสดงค่าของ Impulse ในแต่ละแกนเหมือนกันซึ่งจะสามารถตรวจสอบการคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากแกนได้หลังจากวัตถุเกิดการกระแทกหรือชนแล้วมี Momentum และ Impulse แสดงผลแล้วมี

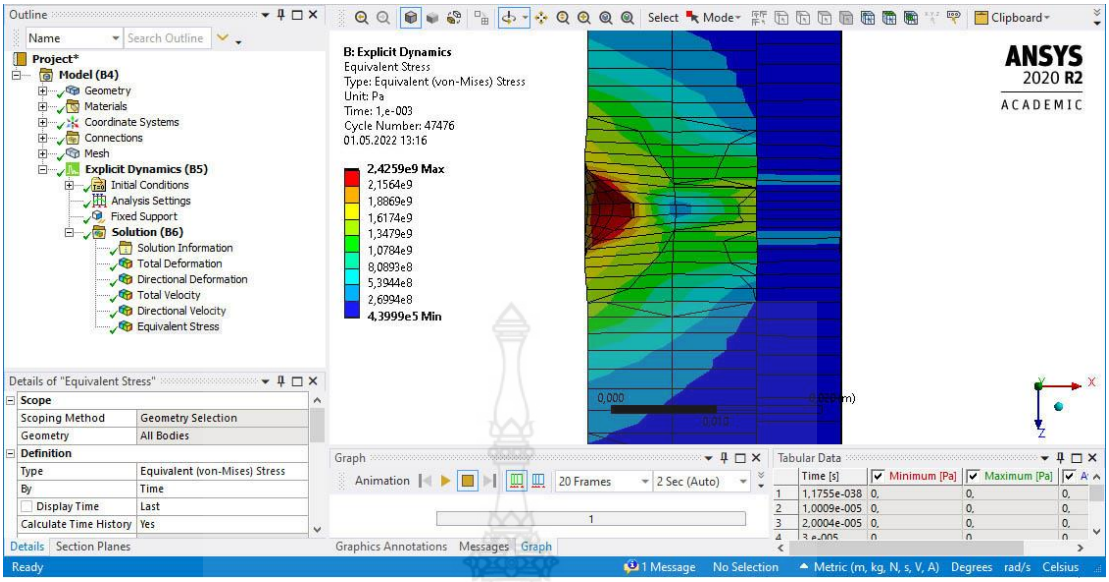
ความสอดคล้องกับวัตถุที่กระแทกหรือชนถือว่าปกติตามรูปที่ 3.26 ในการจำลองนี้มุมมองจากด้านข้างชิ้นงานอยู่ในแนวแกน Z ซึ่งในเส้นสีเหลืองจะเป็นค่าของ Impulse ในแนวแกน Z เส้นกราฟจะมีลักษณะคงที่และเส้นสีแดงจะแสดงค่าของ Momentum ในแนวแกน Z ซึ่งจะไม่แสดงผลในกราฟ ดังนั้นถ้าวัตถุกระแทกหรือชนแล้วไม่สอดคล้องกันถือว่ามีความผิดปกติ Energy Summary ในกราฟนี้จะแสดงผลของพลังงานที่เกิดขึ้นเมื่อวัตถุเกิดการชนหรือกระแทกซึ่งมีพลังงานดังนี้ Internal Energy, Kinetic Energy, Hourglass Energy, Contact Energy ในการตรวจสอบการคลาดเคลื่อนจะสังเกตที่เส้นกราฟของ Hourglass Energy เนื่องจากจะมีผลที่เกิดจากการสร้างเมซ (Mesh) แบบ Hexahedral ซึ่งค่าของ Element ทั้ง 4 จุด มีขนาดที่เท่ากันดังนั้นจะทำให้ค่าของความเครียด (Strain) เป็นศูนย์หรือเรียกว่า “Hourglass Effect” [45] ดังนั้นค่าที่แสดงในกราฟของ Hourglass Energy จะแสดงเป็นเส้นสีแดงซึ่งจะต้องมีค่าที่น้อยกว่าเส้นสีม่วงซึ่งแสดงค่าเป็น Internal Energy ซึ่งถือว่าปกติตามรูปที่ 3.27 แต่ถ้าเส้นสีแดง Hourglass Energy มีค่ามากกว่าเส้นสีม่วง Internal Energy ซึ่งมีความผิดปกติเกิดขึ้นในการคำนวณที่มีสาเหตุมาจากการสร้างเมซ (Mesh)



รูปที่ 3.27 เส้นกราฟ Hourglass Energy แสดงผลที่เป็นปกติ

3.2.4 การแสดงผลการวิเคราะห์ (Post-processing)

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



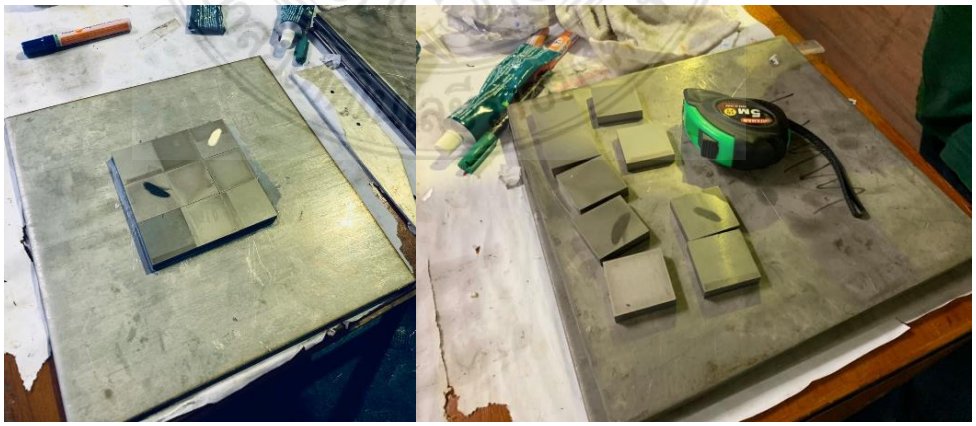
รูปที่ 3.28 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ Equivalent Stress

3.3 การเตรียมแผ่นเกราะโลหะสำหรับทดสอบการยิงกระสุน

ในกรณีของแผ่นเกราะโลหะกันกระสุนสำหรับรถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะ แผ่นเกราะโลหะได้ถูกออกแบบให้มีขนาดเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 40x40 mm ด้วยความหนาที่แตกต่างกันออกไป และมีค่าความแข็งที่แตกต่างกัน รูปที่ 3.29 คือ ส่วนหนึ่งของแผ่นเกราะโลหะที่ผ่านกระบวนการตัดด้วยเครื่องกัด CNC และผ่านกระบวนการชุบแข็งที่ความแข็ง เช่น SKD11 ชุบแข็งที่ 58 HRC การสร้างแผ่นเกราะประกอบด้วย 1. แผ่นเรียบที่เป็นแผ่นเดี่ยว 2. แผ่นเรียบที่เป็นแผ่นซ้อนกันโดยไม่มีช่องว่างระหว่างแผ่น และ 3. แผ่นเรียบที่นำมาซ้อนกัน และมีระยะห่างระหว่างแผ่น 1-3 mm โดยใช้วัสดุสำหรับแผ่นด้านหลังเป็น Stainless Steel 304 (SS304) เมื่อนำแผ่นเกราะชิ้นเล็กๆ ขนาด 40x40 mm มาประกอบเข้าด้วยกันและวางลงบน SS304 (ขนาด 30x30 cm) ใช้วิธีการเชื่อมติดด้วย Epoxy และบางแบบจะใช้เป็นการเชื่อมติดด้วยไฟฟ้า ในบางชุดของการประกอบแผ่นเกราะอาจจะประกอบเต็มแผ่น หรือประกอบแผ่นเล็กเพียง 9 แผ่น ก็สามารถใช้ทดสอบได้เช่นกัน

รูปที่ 3.29 ตัวอย่างชิ้นส่วนแผ่นโลหะที่นำมาประกอบเป็นแผ่นเกราะโลหะ

รูปที่ 3.30 แผ่นเกราะโลหะกันกระสุนที่ประกอบเสร็จแล้วรอการทดสอบ



รูปที่ 3.31 แผ่นเกราะโลหะกันกระสุนที่ประกอบเสร็จแล้วรอการทดสอบ

รูปที่ 3.32 แผ่นเกราะโลหะกันกระสุนที่ประกอบเสร็จแล้วแห้ง

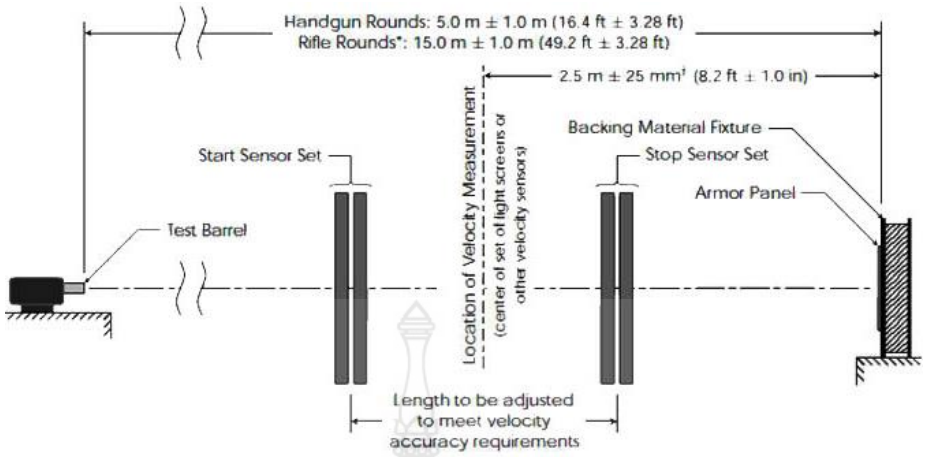
รูปที่ 3.33 ตัวอย่างแผ่นเกราะโลหะกันกระสุนที่รอการทดสอบ

บทที่ 4
ผลการดำเนินงาน

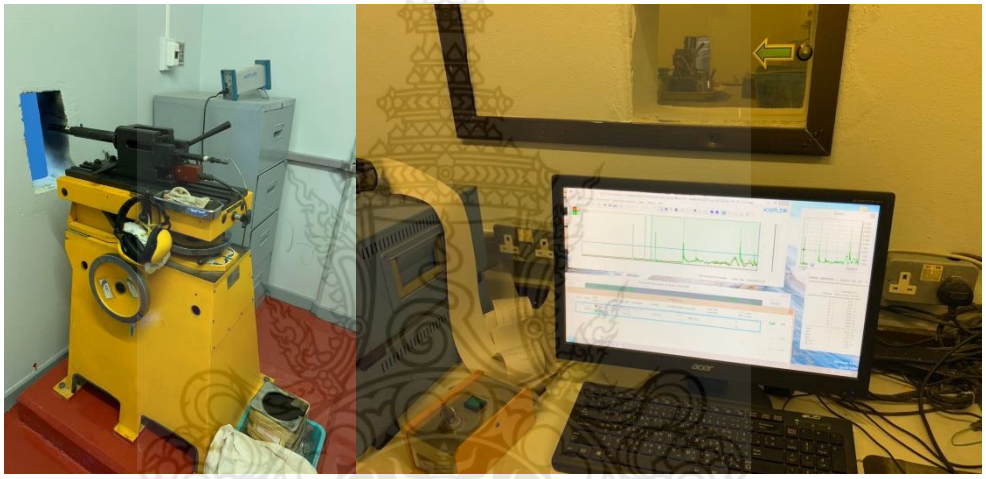
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการดำเนินการวิจัยทั้งหมดที่ได้ทำการดำเนินการด้วยกระบวนการที่อธิบายไว้ในบทที่ 3 ประกอบด้วย ผลการทดสอบการยิงกระสุนลงบนแผ่นเกราะโลหะ ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนเอลิเมนต์ ผลการเปรียบเทียบและกรณีศึกษาต่างๆ ซึ่งผลที่ได้จะนำไปสู่การต่อยอดงานวิจัยอื่นได้ต่อไป โดยรายละเอียดผลการดำเนินการได้มีการแยกอธิบายตามกลุ่มการทดลองที่จะกล่าวถึงดังต่อไปนี้

4.1 ผลการดำเนินงานเตรียมการยิงกระสุนลงบนแผ่นเกราะโลหะ

จากการที่ได้เตรียมแผ่นเกราะกันกระสุนดังบทที่ 3 รูปที่ 3.33 จึงได้นำไปสู่การทดสอบการยิงกระสุนบนแผ่นเกราะ โดยกระบวนการทดสอบการยิงนี้ต้องทำการบรรจุดินปืนลงในปลอกกระสุนใหม่ทุกครั้งด้วยน้ำหนักของดินปืนที่เหมาะสมจะทำให้ได้ความเร็วที่เป็นไปตามมาตรฐาน NIJ และต้องมีการทดสอบความเร็วในการยิงควบคู่ไปด้วย ในห้องทดสอบการยิงจะไม่อนุญาตให้บุคคลทั่วไปเข้าไปได้เนื่องด้วยต้องรักษาไว้ซึ่งความปลอดภัย โดยตามมาตรฐานต้องมีการกำหนดอุณหภูมิห้องและความชื้นในการทดสอบด้วยที่อุณหภูมิ 21 °C ± 2.9 °C และ (2) ความชื้นสัมพัทธ์ 50% ± 20% เท่านั้น เจ้าหน้าที่จะทำการตรวจสอบอุปกรณ์การยิงและเครื่องยิงกระสุนให้พร้อมใช้งาน อีกทั้งยังต้องตรวจสอบระยะห่างจากปากลำกล้องปืนทดสอบไปยังแผ่นเกราะที่จะยิงเท่ากับ 15.0 เมตร ± 1.0 เมตร ตามรูปที่ 4.1 ชุดอุปกรณ์การยึดแผ่นเกราะหรือเรียกว่า “กระบะวัสดุหนุน” จะถูกออกแบบให้สามารถใส่แผ่นเกราะที่มีขนาด 300x300 mm กระบะวัสดุหนุนจะต้องยึดอย่างแน่นหนากับแท่นยึดให้สามารถติดตั้งเสื้อเกราะได้ทั้งแนวตั้งและแนวนอน รวมทั้งด้านหน้าของวัสดุหนุนสามารถรองรับแผ่นเกราะได้ทั้งหมด ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน NIJ ทุกประการ ในการทดสอบจะต้องมีการทดลองเพื่อหาตำแหน่งการกระทบของกระสุนบนแผ่นเกราะ เพราะการเคลื่อนที่ของกระสุนจะเป็นวิถีโค้งแม้ว่าจะมีระยะทางสั้นเพียง 15 เมตร ดังนั้นการหักเหของกระสุนจะต้องไม่เกิน 5 องศาจากแนวทิศที่กำหนด เครื่องวัดความเร็วกระสุนในรูปที่ 4.1 ที่ใช้ทดสอบจะมีอย่างน้อย 2 ชุด และสามารถตรวจจับความเร็วกระสุนได้ในระยะตั้งแต่ 3 เมตรขึ้นไป เครื่องคำนวณจะต้องบันทึกค่าเฉลี่ยความเร็วกระสุน ที่มีค่าผิดพลาดได้น้อยกว่า 1.0 เมตร/วินาที สำหรับมาตรฐาน NIJ ระดับ 4 จะใช้กระสุน 0.30 - 06 Springfield M2 หนัก 10.8 กรัม มีความเร็ว 878 ± 9.1 เมตร/วินาที (2880 ± 30 ฟุต/วินาที) และสำหรับมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 จะใช้กระสุนขนาด 7.62x51 มม. NATO M80 ball หนัก 9.6 กรัม มีความเร็ว 847 ± 9.1 เมตร/วินาที (2780 ± 30 ฟุต/วินาที)



รูปที่ 4.1 ตำแหน่งอุปกรณ์ต่างๆ และระยะการยิงตามมาตรฐาน NIJ [46]

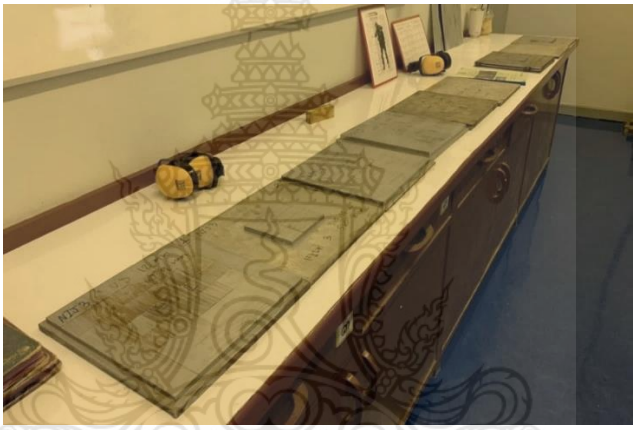


รูปที่ 4.2 เครื่องยิงกระสุนและเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับบันทึกผลและควบคุม

(a) (b)

รูปที่ 4.3 การจัดเตรียม a) กระบะวัสดุหนุนเพื่อรองรับแผ่นเกราะที่จะยิงตามมาตรฐาน NIJ และ b) แผ่นพิสูจน์

รูปที่ 4.4 กล้องวัดความเร็วกระสุนตามมาตรฐาน NIJ



รูปที่ 4.5 แผ่นเกราะกันกระสุนสำหรับการทดสอบ

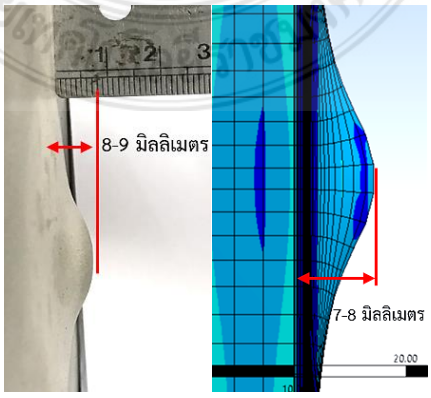
หากการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน NIJ และภายใต้ข้อกำหนดใน American National Standard Institute/ Sporting Arms and Ammunition Manufacturer's Institute (ANSI /SAAMI) ได้กำหนดลักษณะสำหรับลำกล้องทดสอบและการติดตั้งลำกล้องทดสอบไว้ จึงไม่สามารถใช้อาวุธปืนทั่วไปมาทำการยิงแทนได้ สำหรับกล้องทดสอบจะมีความยาวของลำกล้องปืนจะต้องไม่น้อยกว่าที่กำหนดใน ANSI /SAAMI อย่างไรก็ตามลำกล้องที่ยาวกว่าอาจนำมาใช้ยิงได้หากจำเป็นจะต้องใช้กระสุนเฉพาะชนิดนั้น และลำกล้องปืนที่มีรังเพลิงไม่ได้ตามมาตรฐาน สามารถนำมายิงประเมินขีดจำกัดทางขีปนวิธีได้ การติดตั้งกับแท่นปืนให้สามารถใช้ร่วมกันได้หลายขนาด การยึดต้องแน่นหนาและทนทานต่อการยิงหลายนัดติดต่อกัน รูปที่ 4.3 จะมีแผ่นพิสูจน์อยู่หลังแผ่นเกราะที่จะทดสอบการยิง หากแผ่นเกราะเกิดการทะลุ ย่อมมีเศษวัสดุออกมา หากทำให้แผ่นพิสูจน์มีรอยทะลุ จะแสดงว่าแผ่นเกราะนั้นไม่สามารถต้านทานการเจาะทะลุได้ รูปที่ 4.5 เป็นแผ่นเกราะที่จะเข้าสู่การทดสอบการยิงจริง ซึ่งในการทดสอบนั้นเจ้าหน้าที่และทุกคนที่อยู่ในห้องทดสอบจำเป็นต้องใส่เครื่องป้องกันเสียงเพราะเสียงจะดังมากเป็นอันตรายต่อแก้วหูมนุษย์

4.2 ผลการทดสอบจริงและการเปรียบเทียบผลการยิงกระสุนกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เจ้าหน้าที่ทหารของที่โรงงานวัตถุระเบิดทหาร กรมการอุตสาหกรรมป้องกันประเทศและพลังงาน (Military Explosives Factory, Defence Industry Department, Defence Industry and Energy Centre) ตำบลย่านมัทรี อำเภอพยุหะคีรี จังหวัดนครสวรรค์ เป็นทีมงานดำเนินการทำการทดสอบซึ่งต้องเตรียมเครื่องทดสอบและชุดควบคุมดังรูปที่ 4.2 เครื่องยิงตามมาตรฐาน NIJ 4 ด้วยกระสุน 0.3 Caliber M2 AP 166 Gr. ที่มุม 0 องศา ความเร็วที่วัดได้จริงเท่ากับ 901.7 m/s (มาตรฐาน NIJ 4 เท่ากับ 878±9.1 m/s) และในการป้อนค่าความเร็วกระสุนในโปรแกรม ANSYS จะทำการป้อนค่าความเร็วที่ 880 m/s โดยมีผลการทดสอบการยิงจริงทั้งระดับ NIJ 3 และ NIJ 4 ดังนี้

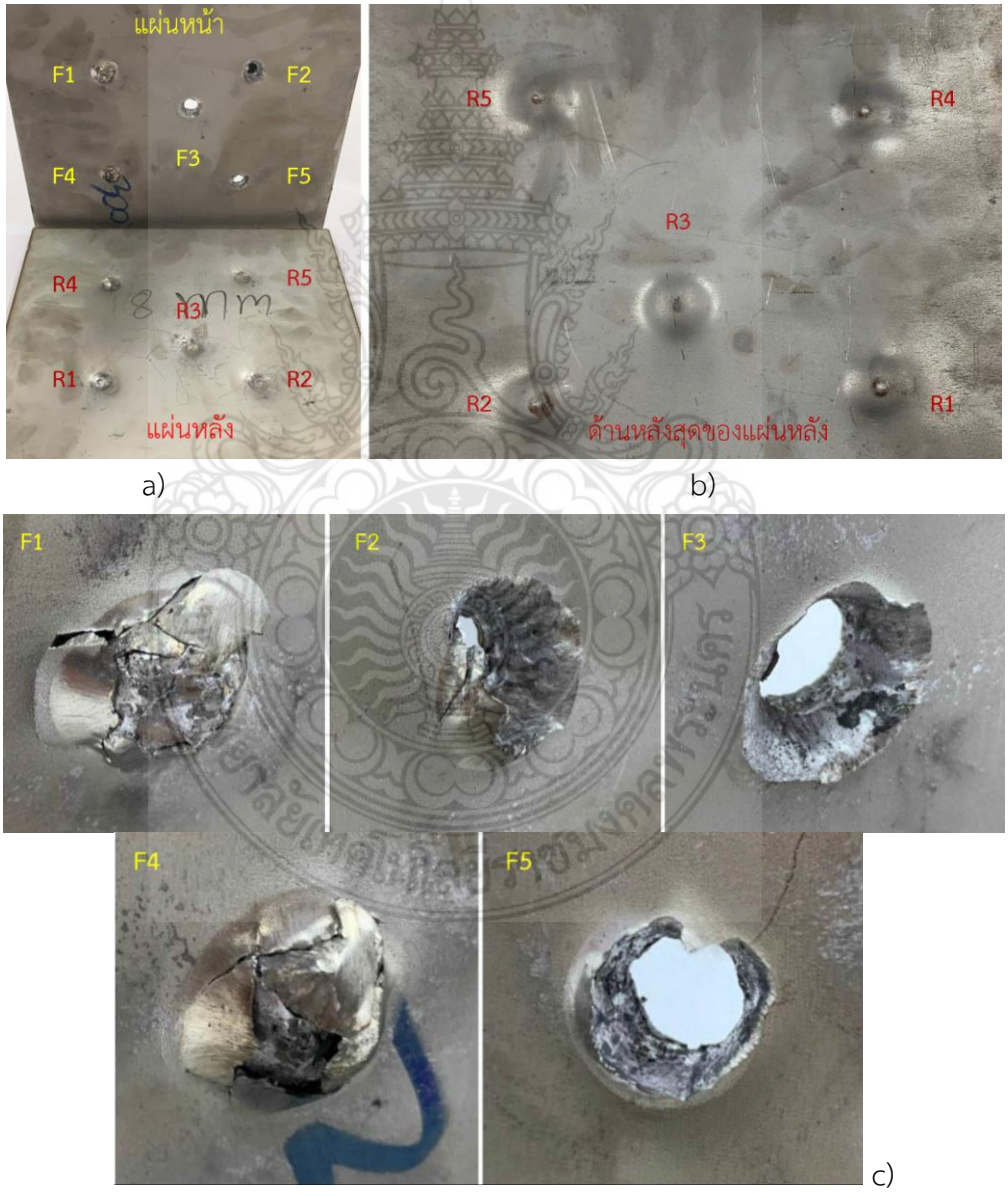
สำหรับการทดสอบตามมาตรฐาน NIJ 4 แผ่นเกราะซ้อนกัน 2 ชั้น โดยแผ่นด้านหน้าทำจากวัสดุ SKD11 ชุบแข็ง 60 HRC มีความหนา 10 mm ประกอบขึ้นจากแผ่น SKD11 ขนาด 40 x 40 มิลลิเมตร จำนวน 9 แผ่น สำหรับแผ่นที่สองซึ่งเป็นแผ่นด้านหลังทำจากวัสดุ SUS304 มีความหนา 10 mm ขนาด 30x30 cm ดังรูปที่ 4.6 นำไปยิงเพียงนัดเดียวตามมาตรฐาน NIJ 4 ผลการทดสอบยิงพบว่ากระสุนได้เจาะทะลุแผ่นเกราะด้านหน้าอย่างสมบูรณ์แต่ไม่สามารถทะลุผ่านแผ่นเกราะด้านหลังได้ เกิดรอยเป็นผิวนูนที่บริเวณด้านหลังแผ่นเกราะตามรูปที่ 4.7 จากรูปที่ 4.7 A) เป็นการแสดงผลการเสียรูปจากการยิงกระสุน และมีส่วนนูนออกมาด้านหลังแผ่นเกราะ อาจมองว่ามีส่วนนูนออกมามากกว่าการทดสอบยิงจริงแต่เนื่องมาจากการกำหนดค่าการแสดงผลให้เกิดการนูนมากกว่าความเป็นจริงเท่านั้น

รูปที่ 4.6 แผ่นเกราะกันกระสุนจริงที่จะนำมาเปรียบเทียบกับโปรแกรม ANSYS

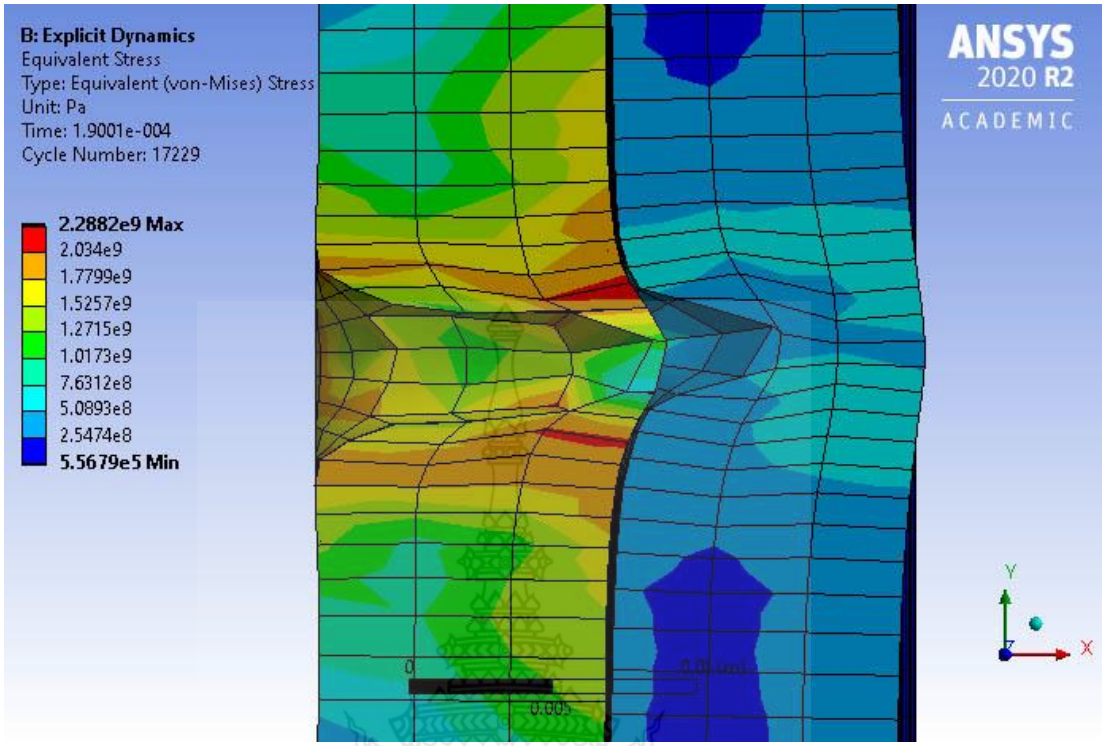


รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรม ANSYS

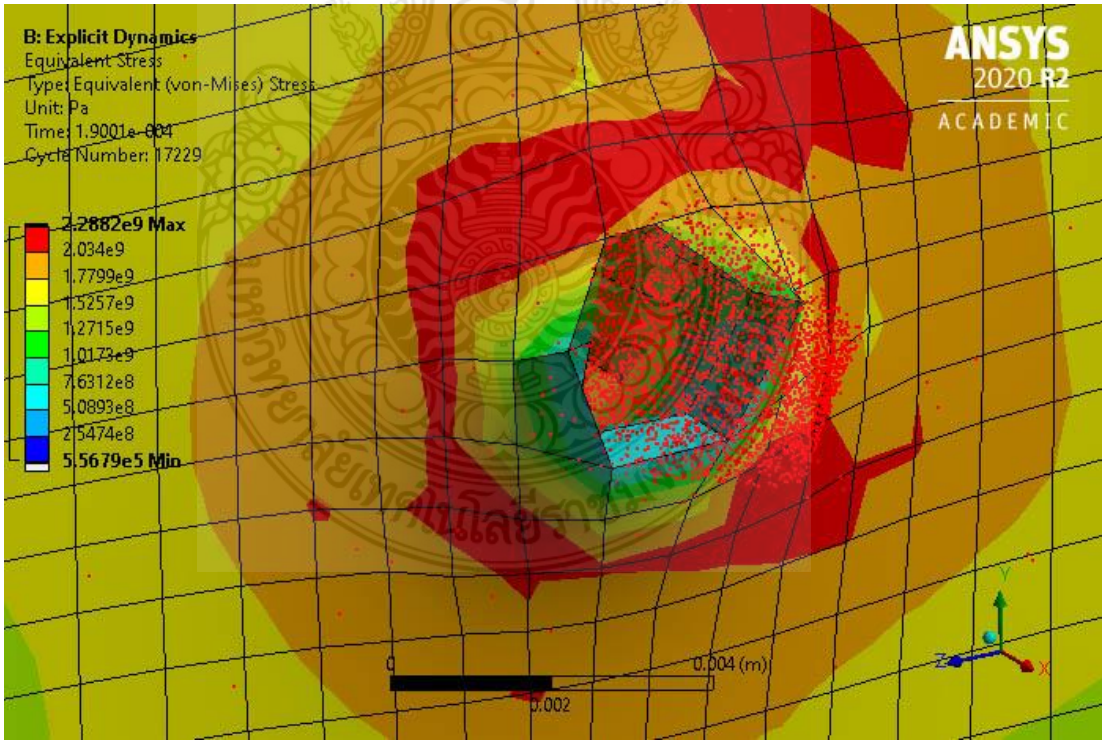
สำหรับการทดสอบตามมาตรฐาน NIJ 3 เป็นแผ่นเกราะซ้อน 2 แผ่น ด้านหน้าและแผ่นหลังทำจากวัสดุ Stainless Steel (SS304) ความหนา 8 mm รูปที่ 4.2 เครื่องยิงตามมาตรฐาน NIJ 3 ด้วยกระสุนขนาด 7.62 x 51 มิลลิเมตร NATO FMJ 148 Gr. ที่มุม 0 องศา ความเร็ว 847 ± 9.1 เมตรต่อวินาที ที่มุม 0 องศา ความเร็วที่วัดได้จริงจำนวน 5 ครั้ง เท่ากับ 846.4, 841.3, 839.1 838.2 และ 845.3 m/s (ตามมาตรฐาน NIJ 3 เท่ากับ 847 ± 9.1 m/s) และในการป้อนค่าความเร็วกระสุนในโปรแกรม ANSYS จะทำการป้อนค่าความเร็ว 847 m/s พบว่าผลที่ได้คือแผ่นเกราะด้านหน้าเกิดการเจาะทะลุอย่างสมบูรณ์ดังรูปที่ และด้านหลังไม่เจาะทะลุ แต่แผ่นเกราะด้านหน้าจะมีรอยเจาะของหัวกระสุนและแผ่นเกราะด้านหลังจะเป็นรอยนูนออกมาเพียงเล็กน้อยตามรูปที่ 4.7 และให้ผลที่สอดคล้องกันกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ดังรูปที่ 4.8-4.9



รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบยิงจริงตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3

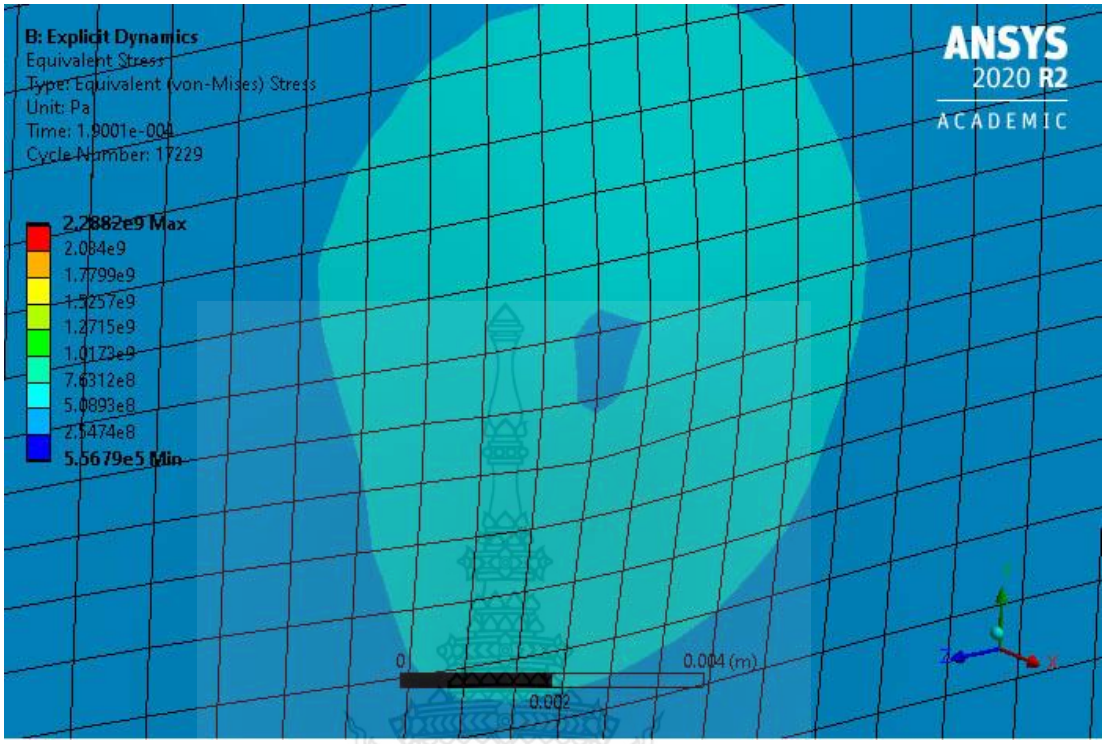


(a)



(b)

รูปที่ 4.9 ผลการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วย ANSYS (a) รอยเจาะของกระสุนทะลุผ่านแผ่นด้านหน้าแต่ไม่ผ่านแผ่นด้านหลัง (b) รอยเจาะที่แผ่นเกราะด้านหน้า

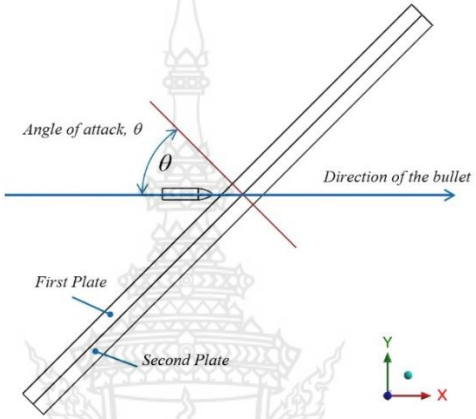


รูปที่ 4.10 ผลการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วย ANSYS แสดงรอยนูนที่แผ่นเกราะด้านหลัง

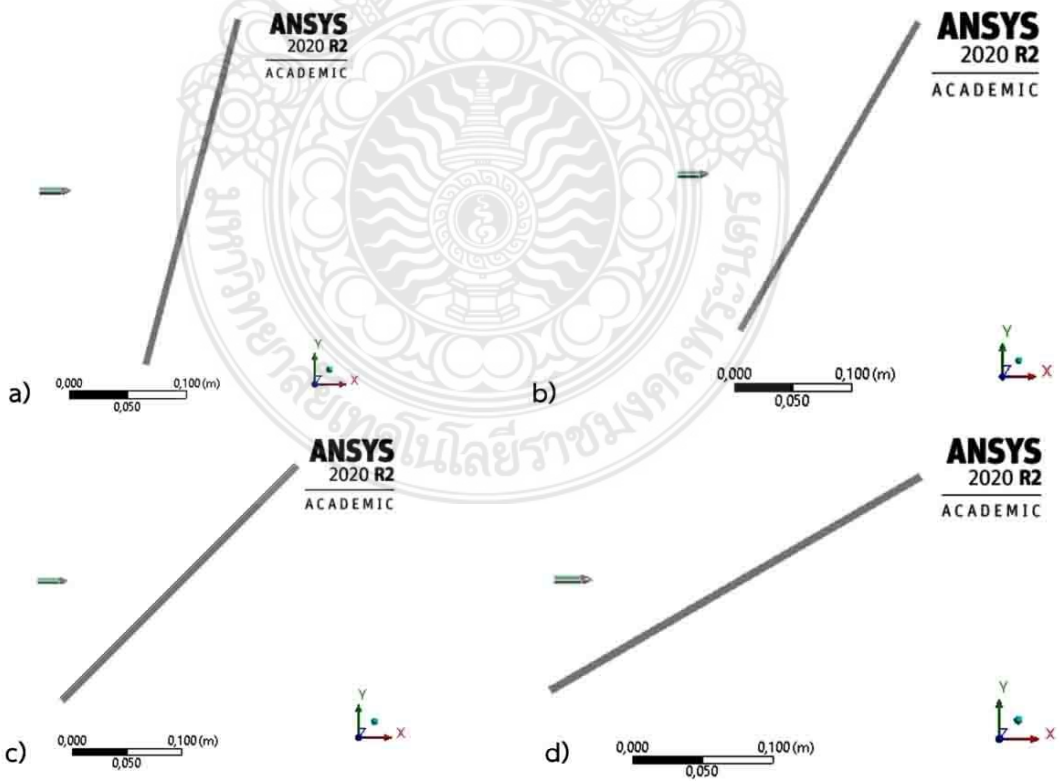
วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองความเสียหายของแผ่นเกราะกันกระสุนและวิธีการทดสอบยิงจริง พบว่า ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับแผ่นเกราะนั้นมีความสอดคล้องกันซึ่งนั้นสามารถเชื่อถือได้โดยพิจารณาจากรูปแบบความเสียหาย รอยนูนที่เกิดขึ้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะเป็นต้น ดังนั้นจึงได้ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ในจำลองความเสียหายของแผ่นเกราะที่สามารถต้านทานการเจาะทะลุของมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 ได้ จากกระบวนการเตรียมโมเดลเพื่อจำลองและการตั้งค่าเริ่มต้น (Pre-processing) จนถึงขั้นตอนการคำนวณด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Solve-processing) จากที่กำหนดไว้ในบทที่ผ่านมา โมเดลแบบจำลองแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ 1. รูปแบบแผ่นเกราะแบบชั้นเดียว 2. รูปแบบแผ่นเกราะแบบสองชั้น สำหรับรูปแบบจำลองที่ 2 ทำการแบ่งออกเป็น 2 แผ่น คือ แผ่นที่ 1 คือแผ่นด้านหน้าทำจากวัสดุ SKD11 ที่ชุบแข็ง 58 - 60 HRC แผ่นด้านหลังเป็น SUS304 แผ่นที่ 2 คือแผ่นด้านหน้าเป็นวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) แผ่นด้านหลังเป็น SUS304 ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองนั้นเป็นขั้นตอนของการแสดงผลหรือ “Post-processing” ซึ่งได้จำลองยิง 3 วัสดุและมุมของหัวกระสุนเมื่อกระแทกเข้ากับแผ่นเกราะโดยมีมุมกระแทกที่ 0, 15, 30, 45, 60 องศา ซึ่งมุมต่าง ๆ ในการจำลองนั้นได้จากการทบทวนวรรณกรรมถึงผลกระทบที่แตกต่างกันของมุมกระแทกของหัวกระสุน [47] ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองนั้นแสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2

4.3 ผลการจำลองการยิงแผ่นเกราะโลหะด้วยการเปลี่ยนแปลงชนิดของวัสดุและความหนา

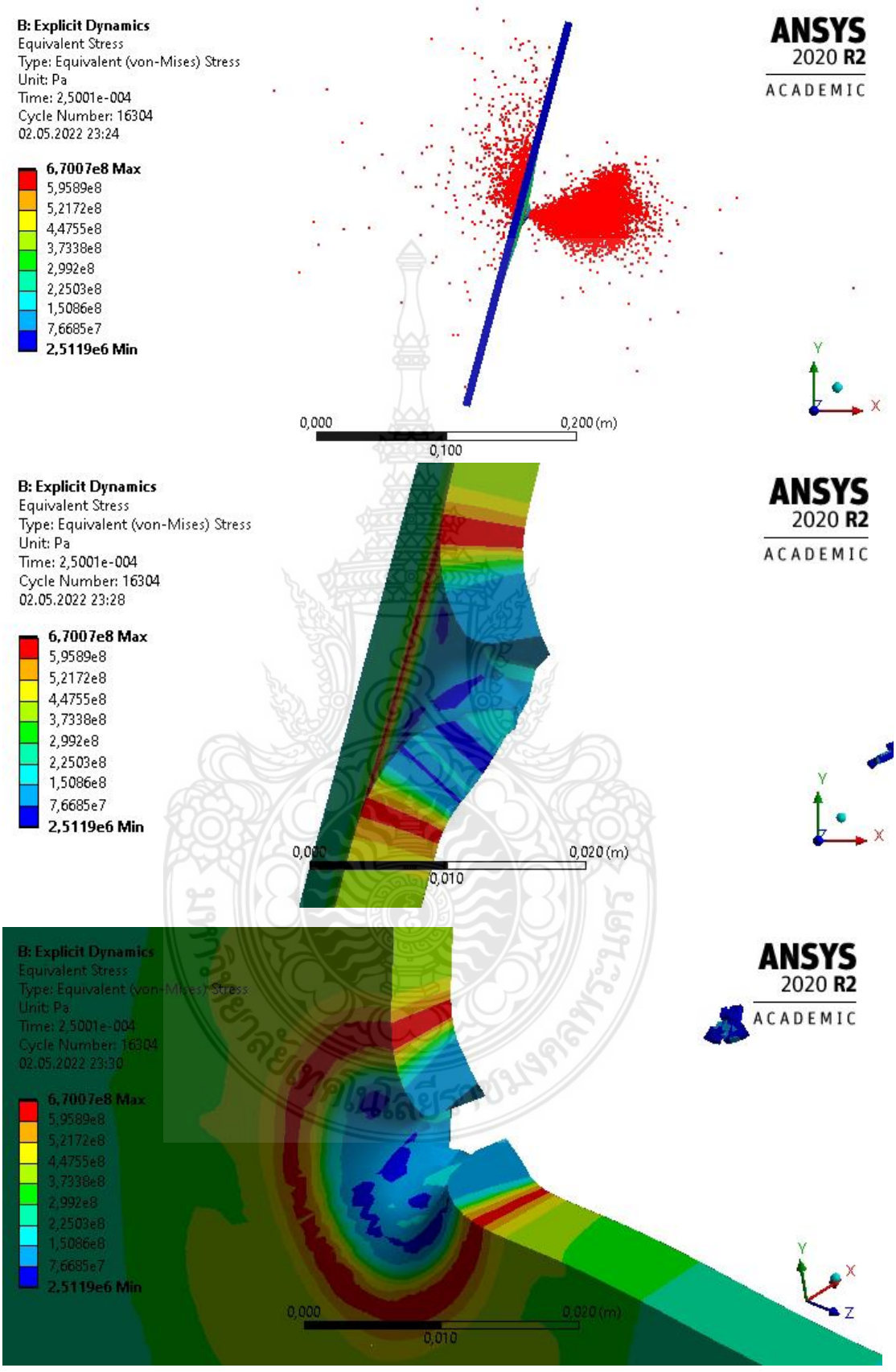
ในการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม Ansys/Explicit dynamics ในการจำลองซึ่งเงื่อนไขในการจำลองการยิงตามตามมาตรฐาน NIJ 3 เท่ากับ 847 ± 9.1 m/s โดยตั้งค่าความเร็วกระสุนในโปรแกรมเท่ากับ 850 m/s ที่ขนาดกระสุน 7.62 mm ซึ่งมีแต่กระสุนทำจาก WC และแผ่นเกราะในการจำลองเป็น 2 แบบ โดยแบบจำลองมีมุมเอียงในการจำลอง 15, 30, 45 และ 60 องศา และแบบที่ 2 นำแผ่นเกราะซ้อนกัน 2 ชั้น มุมเอียง 15, 30, 45 และ 60 องศา ดังรูปที่ 4.11



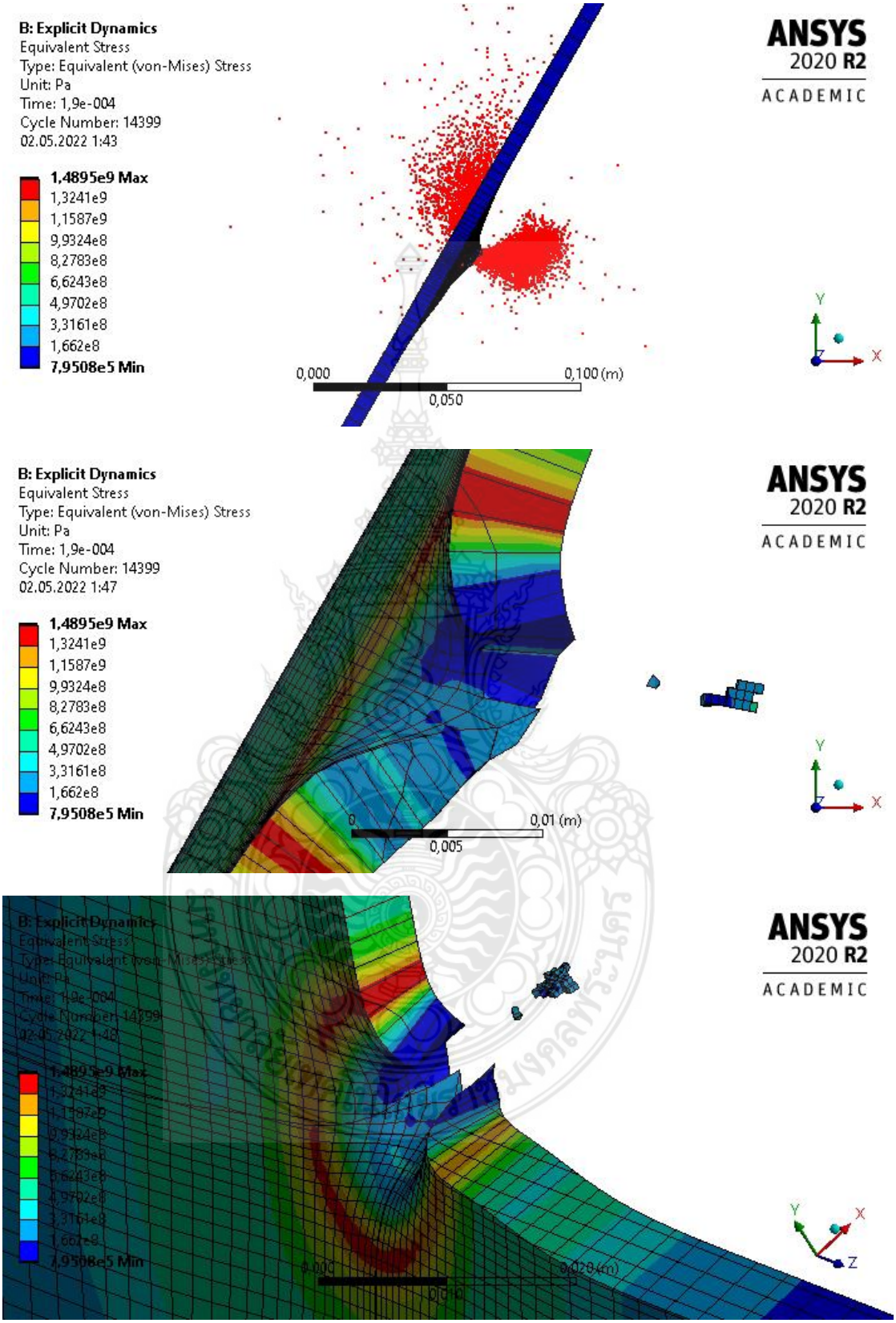
รูปที่ 4.11 การวัดทิศทางมุมปะทะของกระสุนกับแผ่นเกราะ



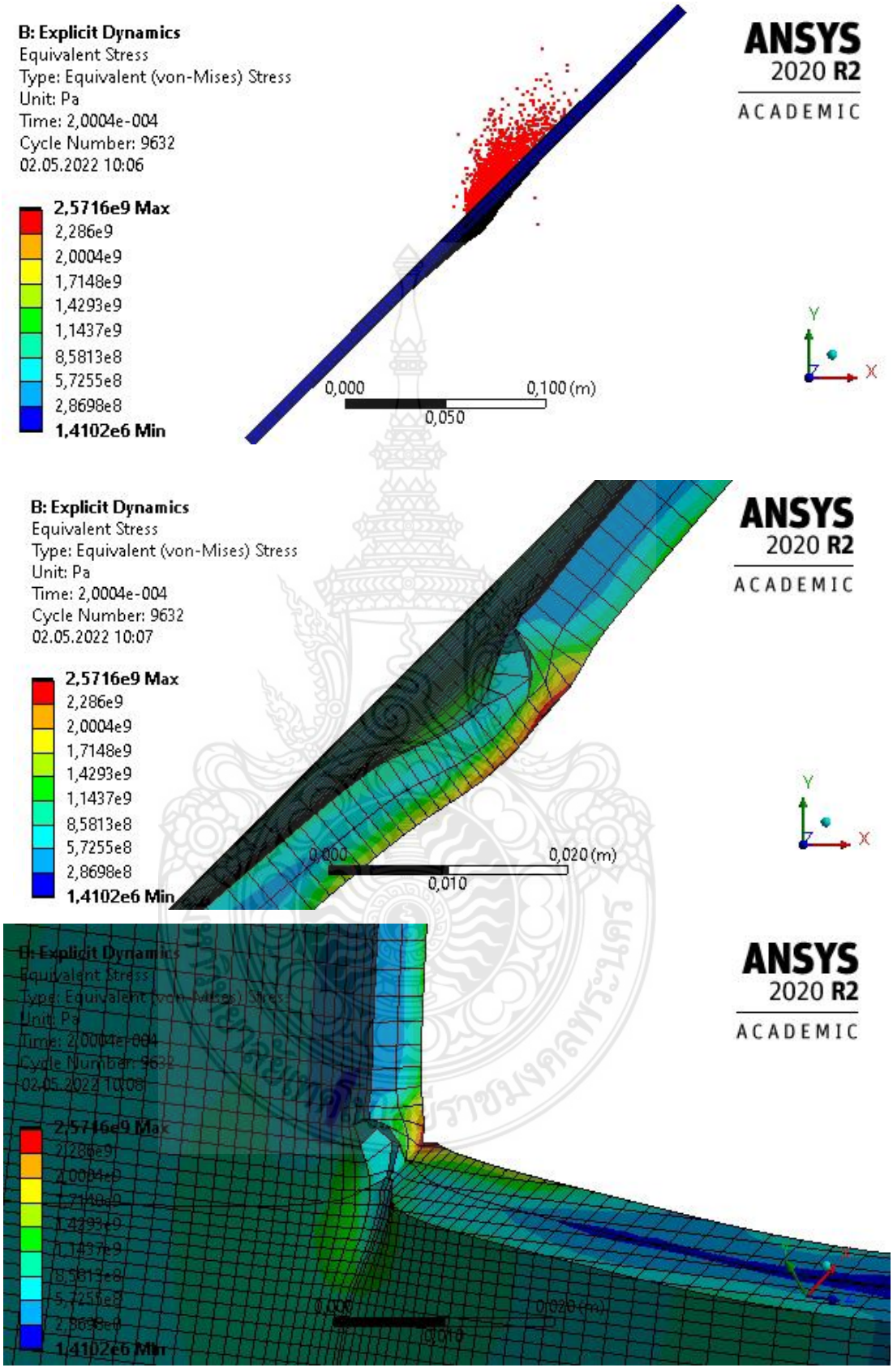
รูปที่ 4.12 มุมปะทะของกระสุนกับแผ่นเกราะ a) 15° b) 30° c) 45° และ d) 60°



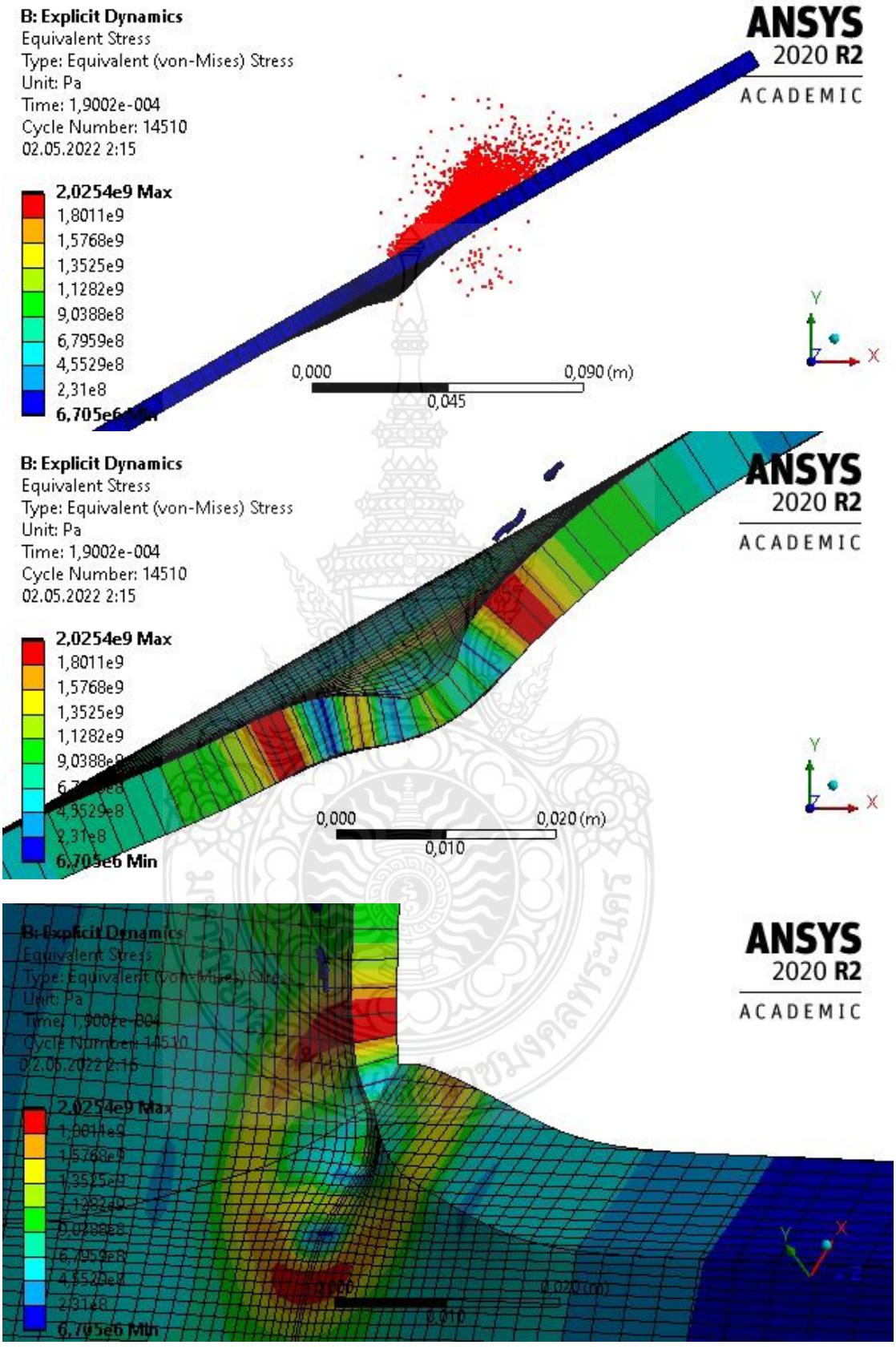
รูปที่ 4.13 ลักษณะความเสียหายของแผ่นเกราะ SKD11 หนา 6 mm ที่มุมปะทะ 15°



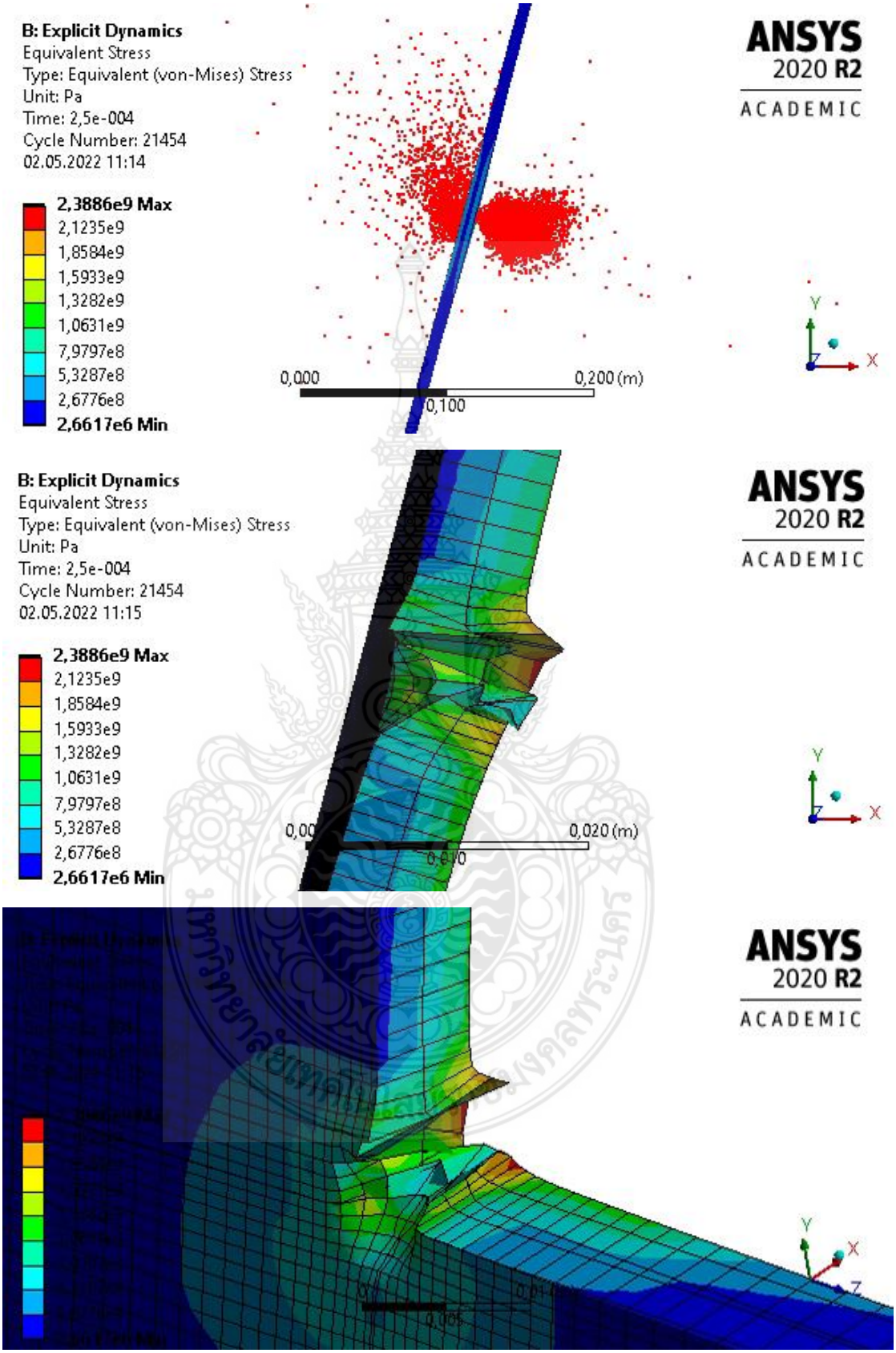
รูปที่ 4.14 ลักษณะความเสียหายของแผ่นเกราะ SKD11 หนา 6 mm ที่มุมปะทะ 30°



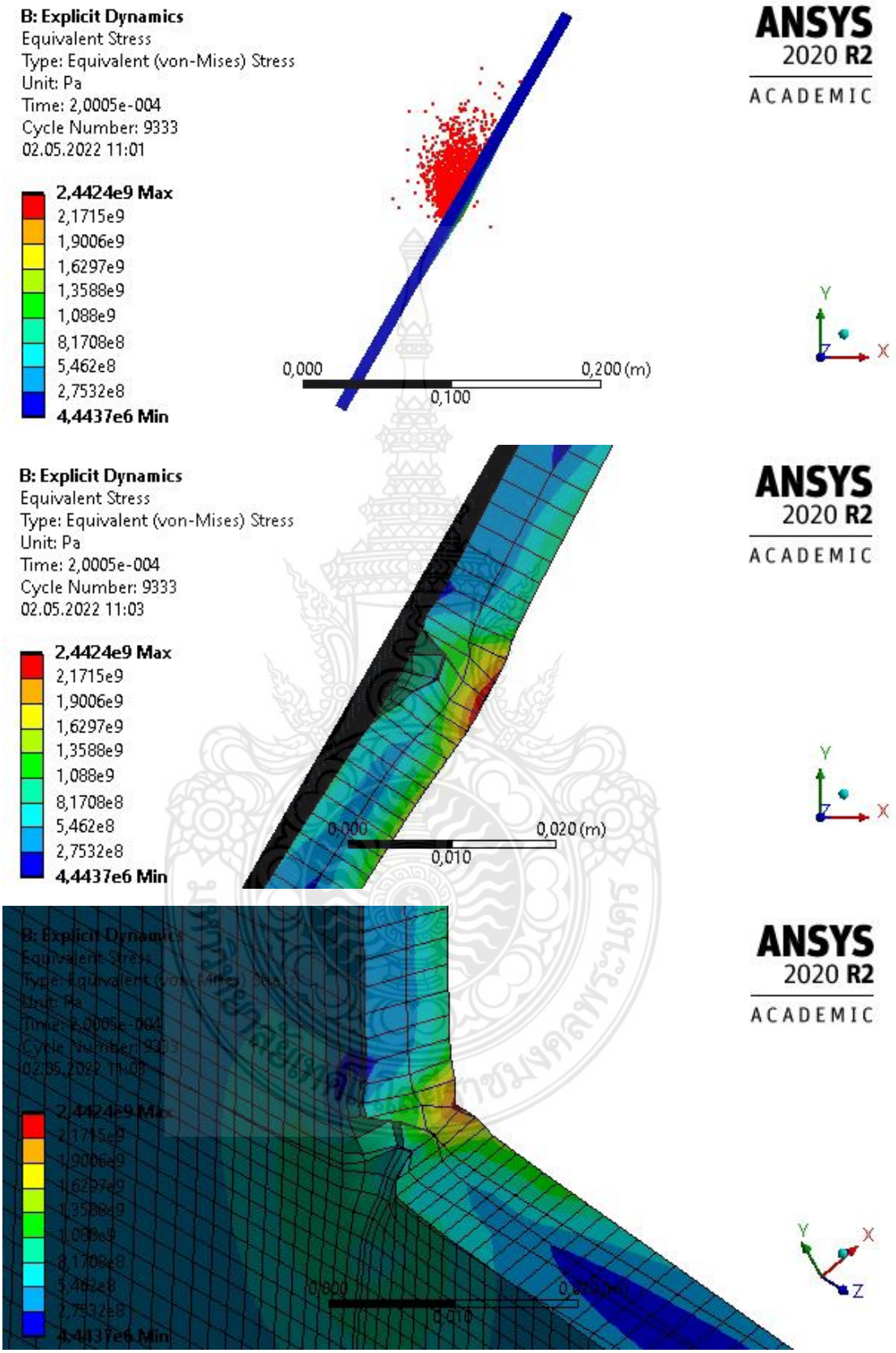
รูปที่ 4.15 ลักษณะความเสียหายของแผ่นเกราะ SKD11 หนา 6 mm ที่มุมปะทะ 45°



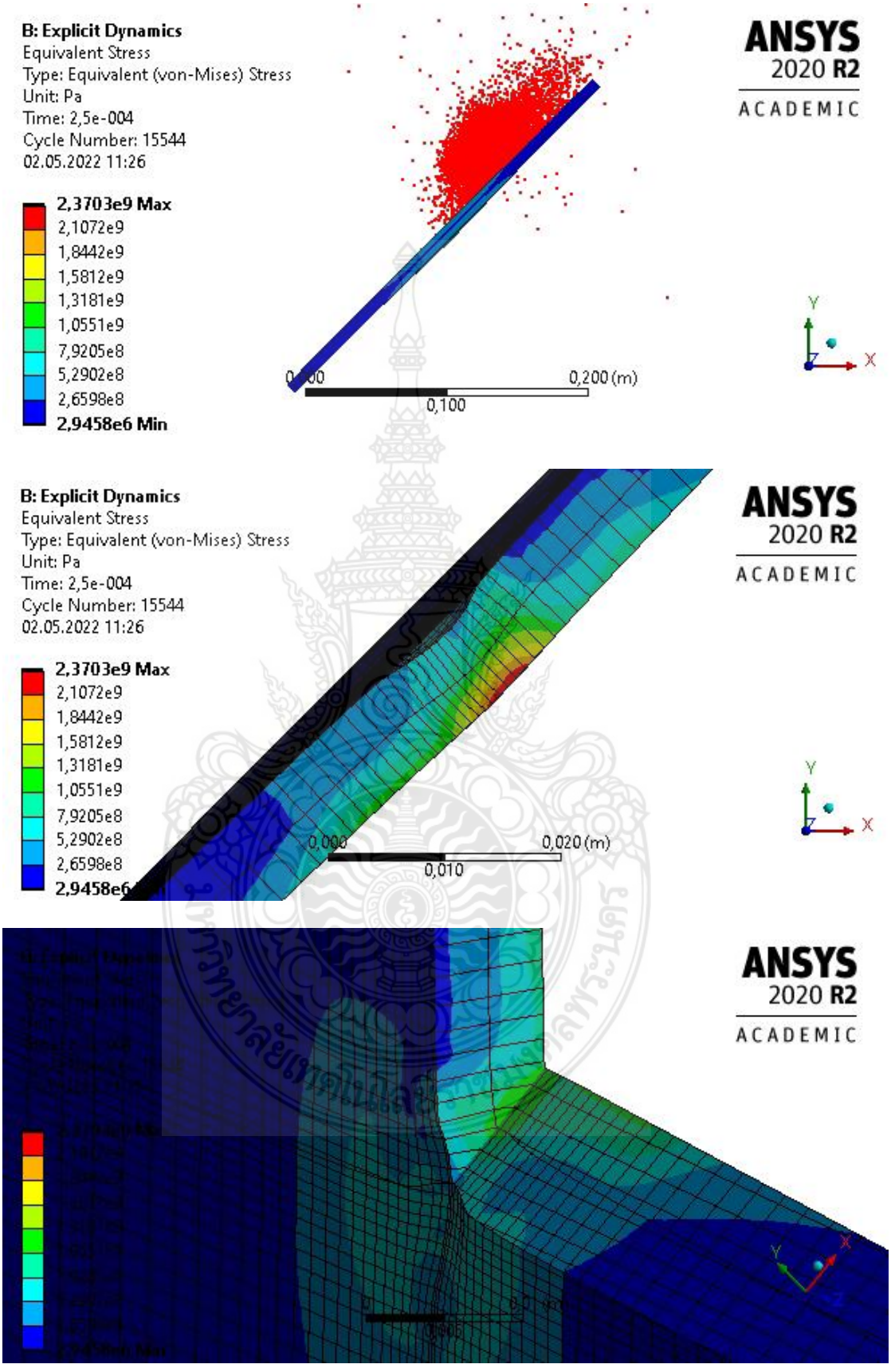
รูปที่ 4.16 ลักษณะความเสียหายของแผ่นเกราะ SKD11 หนา 6 mm ที่มุมปะทะ 60°



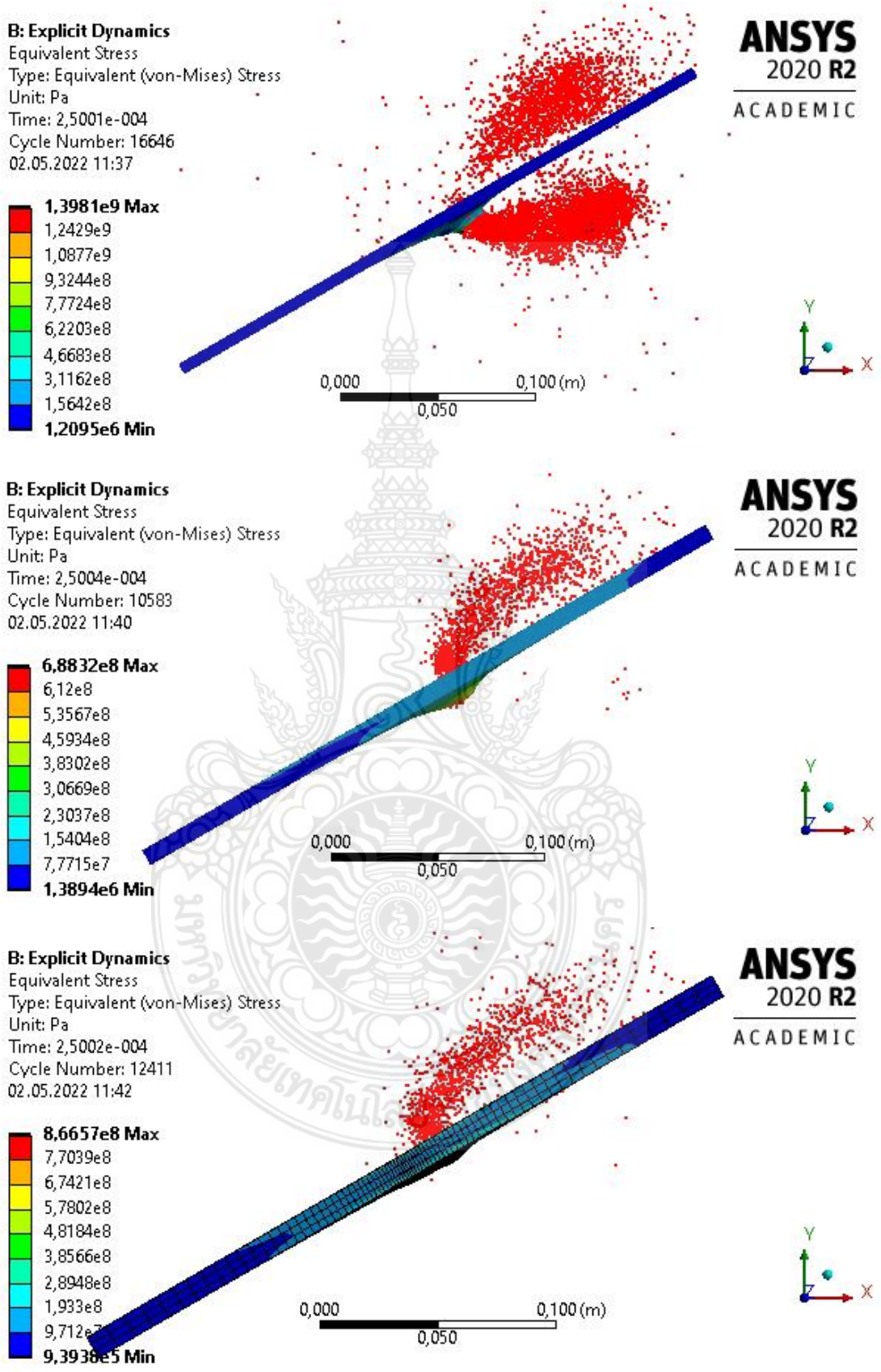
รูปที่ 4.17 ลักษณะความเสียหายของแผ่นเกราะ SKD11 หนา 8 mm ที่มุมปะทะ 15°



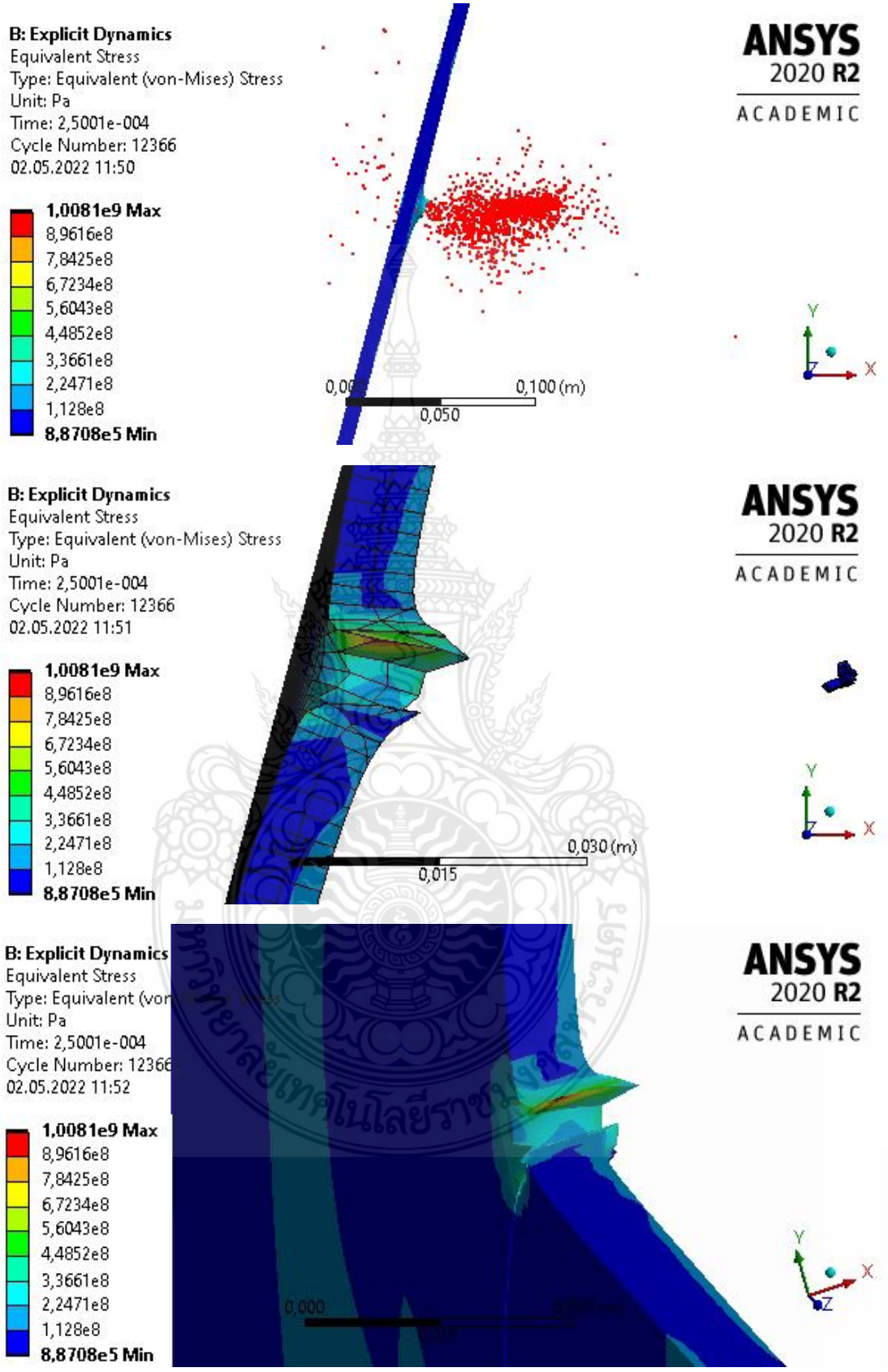
รูปที่ 4.18 ลักษณะความเสียหายของแผ่นเกราะ SKD11 หนา 8 mm ที่มุมปะทะ 30°



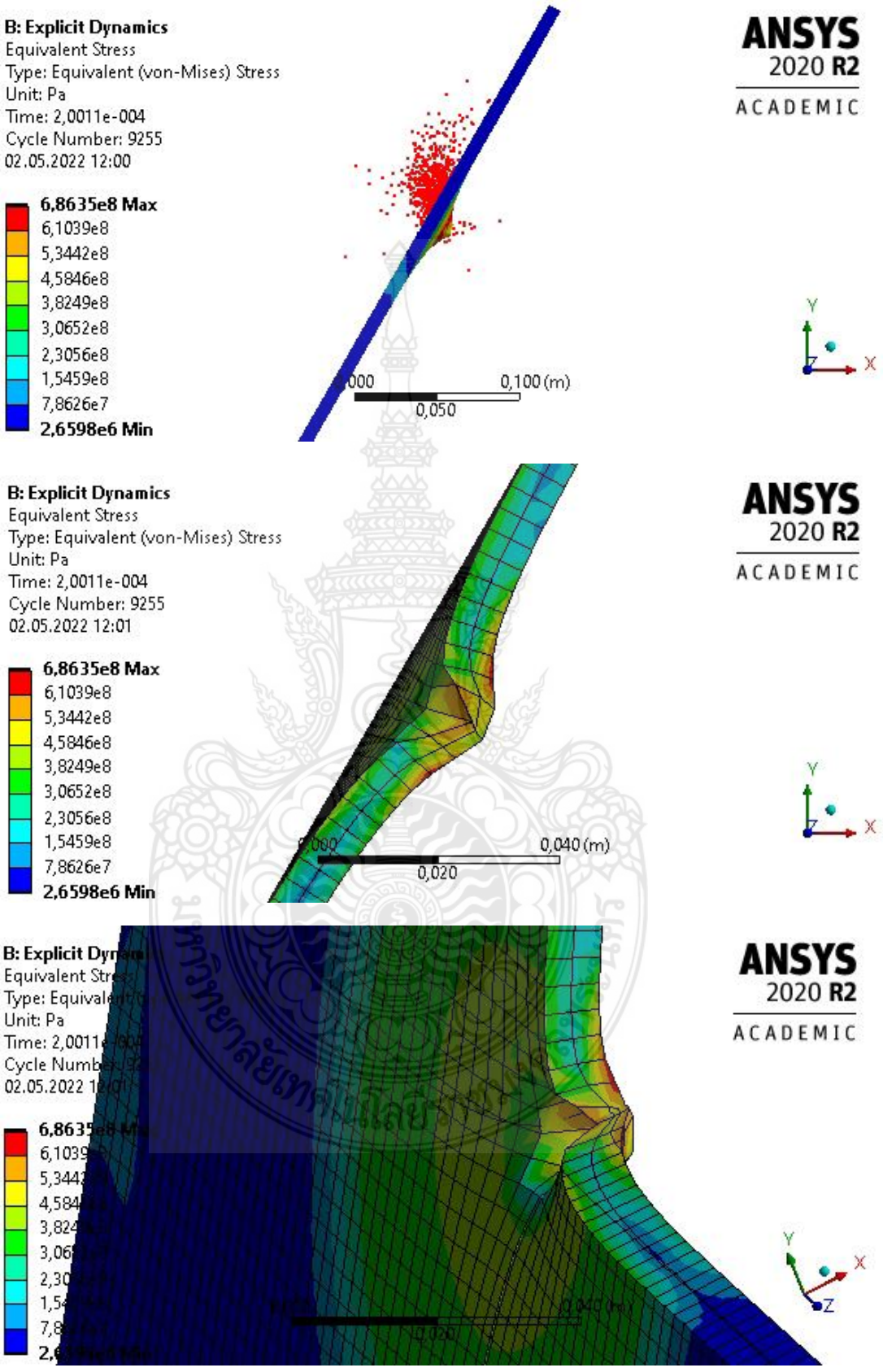
รูปที่ 4.19 ลักษณะความเสียหายของแผ่นเกราะ SKD11 หนา 8 mm ที่มุมปะทะ 45°



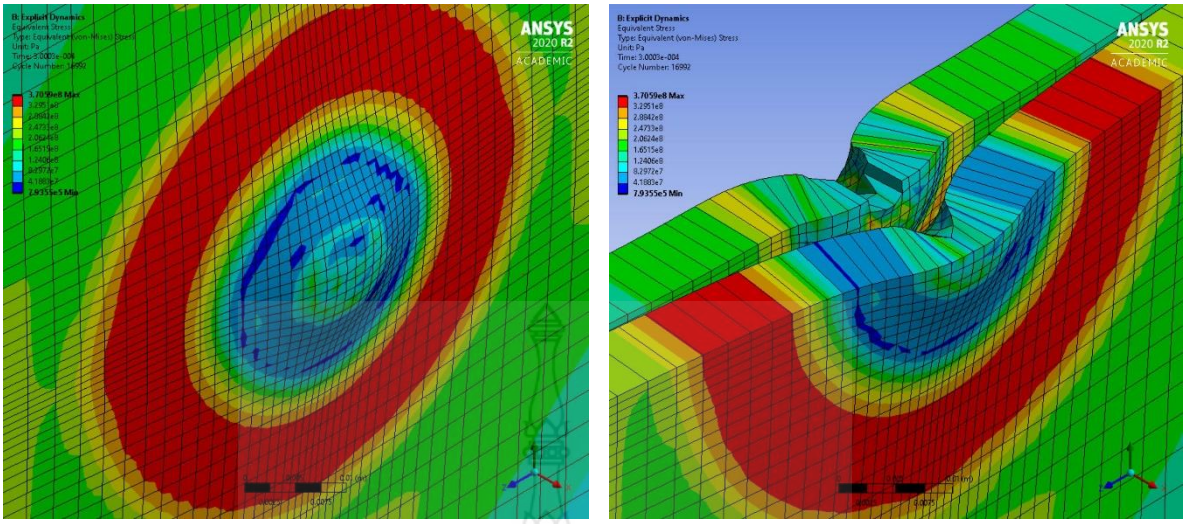
รูปที่ 4.20 ลักษณะความเสียหายของแผ่นเกราะ SUS304 หนา 6, 8 และ 10 mm ที่มุมปะทะ 60°



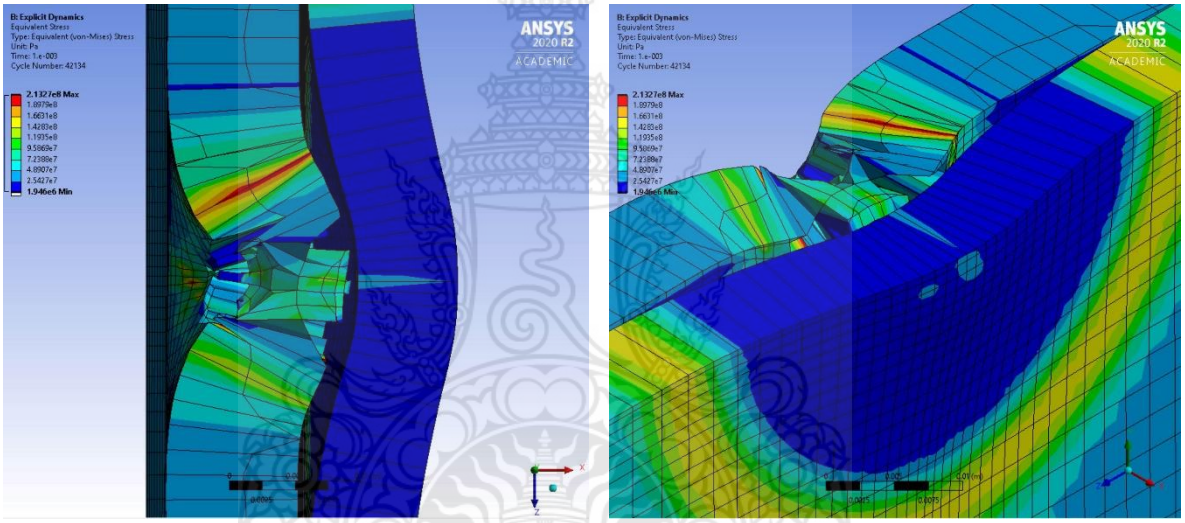
รูปที่ 4.21 ลักษณะความเสียหายของแผ่นเกราะ SUS304 หนา 8 mm ที่มุมปะทะ 15°



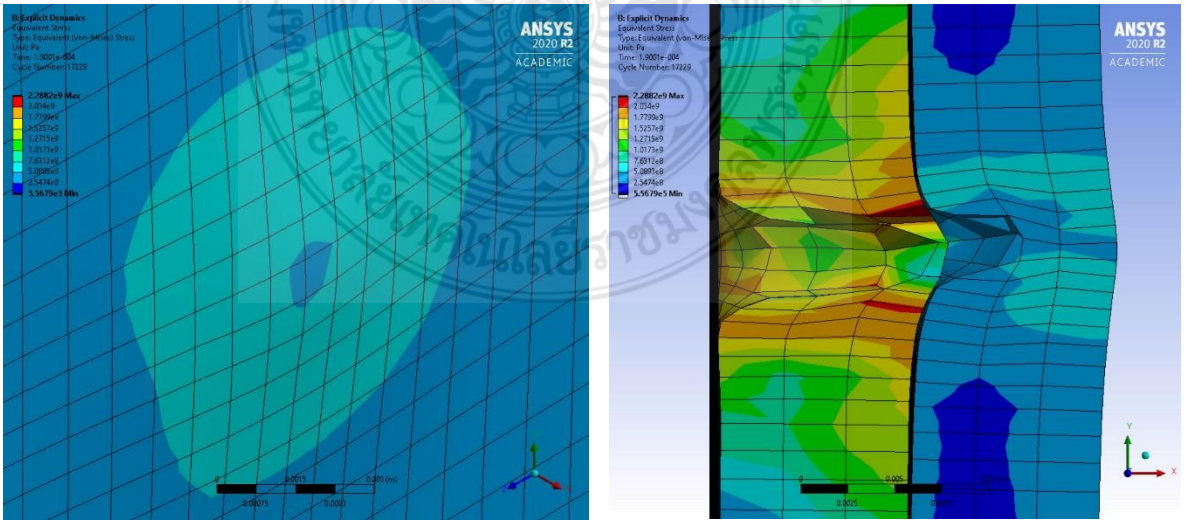
รูปที่ 4.22 ลักษณะความเสียหายของแผ่นเกราะ SUS304 หนา 8 mm ที่มุมปะทะ 30°



2 Armor plate with SKD11 9 mm and SUS304 6 mm, $\theta = 0$



2 Armor plate with SKD11 10 mm and SUS304 8 mm, $\theta = 0$



2 Armor plate with SKD11 10 mm and SUS304 10 mm, $\theta = 0$

รูปที่ 4.23 ความเค้นสูงสุดและการเสียรูปของแผ่นเกราะสองชั้นสำหรับวัสดุ SKD11 และ SUS304

จากรูปที่ 4.13-4.16 เป็นวัสดุ SKD11 ที่มีความหนา 6 mm จำลองการปะทะที่มุม 15, 30, 45 และ 60 องศา พบว่ามีความเค้นสูงขึ้นมากที่สุดตั้งแต่มุม 45 และ 60 องศา แตกต่างจากมุม 15 และ 30 องศา เนื่องจากแผ่นเกราะเริ่มที่จะสามารถต้านทานกระสุนได้เพราะการยุบตัวของแผ่นเกราะน้อยลงและมุมในการกระแทกของแผ่นเกราะเอียงเพิ่มขึ้นตามรูปที่ 4.12 เกิดการหักเหของกลุ่มก้อนโลหะขนาดเล็กมากขึ้นที่บริเวณด้านหน้าแผ่นเกราะ ที่มุมเอียง 60 องศา เวลาเดียวกันนั้นแผ่นเกราะเกิดความเค้นสะสมที่มากขึ้นเนื่องจากสามารถต้านทานการเจาะทะลุและสามารถหักเหกลุ่มก้อนโลหะขนาดเล็กของกระสุนได้

จากรูปที่ 4.17-4.19 เป็นวัสดุ SKD11 ที่มีความหนา 8 mm จำลองการปะทะที่มุม 15, 30 และ 45 องศา แตกต่างจากรูปที่ 4.13-4.16 เพราะมีความหนาเพิ่มขึ้น 2 mm พบว่า เมื่อความหนาเพิ่มขึ้นและมุมปะทะลดลงก็มีผลต่อความสามารถในการเจาะทะลุได้ ดังนั้น ถ้ามุมปะทะลดลงควรเพิ่มความหนาเป็นการเพิ่มขีดความสามารถในการป้องกันการเจาะทะลุ ที่แผ่นความหนา 8 mm ที่มุม 15 องศา ยังไม่สามารถต้านทานการเจาะทะลุได้ ที่มุม 30 และ 45 องศา แผ่นเกราะสามารถต้านการเจาะทะลุและเกิดการหักเหของหัวกระสุนได้ แสดงให้เห็นถึงความเค้นที่แตกต่างจากมุม 15 องศา เพราะเกิดความเค้นน้อยกว่าเนื่องจากกระสุนเกิดการหักเหเมื่อกระแทกเข้ากับแผ่นเกราะและแผ่นเกราะมีการยุบตัวที่น้อยลงด้วยมุมปะทะของหัวกระสุนที่เพิ่มขึ้น ความเค้นที่มุม 15 องศา เมื่อกระสุนเจาะทะลุผ่านออกไปจะมีความเค้นที่เกิดคงที่เนื่องจากแผ่นเกราะเกิดการทะลุและไม่คืนตัวหรือเสียรูปอย่างถาวร

จากรูปที่ 4.20 วัสดุ SUS304 แผ่นมีความหนา 6, 8 และ 10 mm ที่มุมปะทะ 60 องศา เปรียบเทียบกันพบว่า ภายใต้มุม 60 องศา และแผ่นเกราะมีความหนา 8 mm ก็สามารถป้องกันการเจาะทะลุได้แล้ว ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์และแสดงผลดังรูปที่ 4.21 เป็น SUS304 หนา 8 mm ที่มุมปะทะ 15 องศา จะเห็นการเจาะทะลุอย่างสมบูรณ์ แต่เมื่อเพิ่มมุมปะทะเป็น 30 องศา ดังรูปที่ 4.22 พบว่าสามารถป้องกันการเจาะทะลุได้

จากรูปที่ 4.23 เป็นแผ่นเกราะซ้อนกันสองชั้นระหว่าง SKD11 และ SUS304 ที่มุมปะทะ 0 องศา โดยใช้วัสดุ SKD11 เป็นแผ่นด้านหน้าเพื่อทำลายหัวกระสุน และ SUS304 เป็นแผ่นด้านหลังเพื่อดูดซับพลังงาน ที่มุมกระทบจำนวน 5 มุม คือ 0, 15, 30, 45 และ 60 องศา แสดงผลการจำลองพบว่าที่มุมกระทบ 0 องศา ความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุเริ่มขึ้นกับแผ่นเกราะที่มีความหนาของ SKD11 ที่ 9 mm และความหนาของ SUS304 ที่ 8 mm รวมความหนาทั้งหมด 15 mm ก็สามารถต้านทานการเจาะตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 4 ได้ ซึ่งวัสดุ WC จะไม่ถูกนำมาพิจารณา เนื่องด้วยไม่เหมาะสมกับการนำมาทำเป็นแผ่นเกราะทั้งด้านต้นทุนและกระบวนการผลิตที่มีขั้นตอนซับซ้อน

บทที่ 5
สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

จากการศึกษาแผ่นเกราะโลหะกันกระสุนด้วยการจำลองการเสียหายและทดสอบร่วมกัน เพื่อให้ได้รูปแบบวัสดุและความหนาที่เหมาะสมที่จะนำไปเป็นโมเดลการสร้างแผ่นเกราะโลหะให้กับรถหุ้มเกราะที่เป็นรถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะที่ใช้ในชายแดนของประเทศไทย ในกระบวนการวิจัยได้กำหนดขอบเขตของการศึกษาเป็นการจำลองการทดสอบและวิเคราะห์แผ่นเกราะโลหะกันกระสุนเป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบ NIJ ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ Ansys และการทดสอบ วัสดุที่ใช้สร้างแผ่นเกราะโลหะกันกระสุน เป็น SKD11 และ SUS304 ประกอบซ้อนกัน วิธีการประกอบแผ่นเกราะโลหะกันกระสุนจะใช้กระบวนการเชื่อมติดแผ่นโลหะ วิธีการที่ใช้ในการทำวิจัยประกอบด้วย การวิเคราะห์ด้วยไฟไนเอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม Ansys/Explicit ร่วมกับการทดสอบตามมาตรฐาน NIJ เป็นการทำการจำลองและทดสอบในบางกรณีเพื่อยืนยันขีดความสามารถในการวิเคราะห์ของโปรแกรมไฟไนเอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Ansys/Explicit ซึ่งวิธีการดำเนินงานเริ่มจากการสร้างแบบจำลองเกราะกันกระสุนแบบ 3 มิติ ด้วยโปรแกรม SolidWorks ในรูปแบบของ Part ที่เป็น Multibody จะได้แผ่นโลหะขนาดความกว้างxความยาวเท่ากับ 300 x 300 mm ที่ความหนาต่างๆ ในการวิเคราะห์แผ่นเกราะกันกระสุนด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ Ansys/Explicit ต้องกำหนดสมบัติของวัสดุตามรูปแบบความเสียหายของวัสดุในโปรแกรม Ansys / Engineering Data โดย SKD11 มีรูปแบบความเสียหายตามทฤษฎีของ Johnson-Cook Strength, กระสุนที่ทำจากทังสเตนคาร์ไบด์ มีรูปแบบความเสียหายตามทฤษฎี Johnson-Holmquist (JH-2) รูปแบบการวิเคราะห์ถูกกำหนดบนตัวแปรสำคัญคือ ค่าความหนาของแผ่นเกราะ การซ้อนกันของแผ่นเกราะสองชนิด ชนิดของวัสดุที่ทำเกราะ และมุมการยิงเข้าหาแผ่นเกราะ จากนั้นเปรียบเทียบผลจากวิธีการทดลองและไฟไนเอลิเมนต์ด้วยลักษณะการเสียหายของแผ่นเกราะ ระยะการนูนของแผ่นเกราะที่ผ่านการยิง เป็นต้น ซึ่งจากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่ามีความสอดคล้องกัน

ผลลัพธ์จากการวิจัยสามารถตอบวัตถุประสงค์ของงานวิจัยได้ดังนี้

1. ได้ดำเนินการออกแบบรูปแบบแผ่นเกราะโลหะกันกระสุนที่เหมาะกับรถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะวิเคราะห์ หมายถึงทราบชนิดของวัสดุที่นำมาใช้เป็นเกราะกันกระสุนที่สามารถหาซื้อได้ภายในประเทศ ทราบความหนาที่เหมาะสม และการซ้อนกันของแผ่นโลหะที่ความหนาต่างๆ แล้วสามารถกันกระสุนได้

2. ได้สร้างแผ่นเกราะโลหะกันกระสุนสำหรับรถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะ โดยการสร้างโมเดลทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อการวิเคราะห์และจำลองสถานการณ์การยิงกระสุน และสร้างแผ่น

เกราะที่มีโลหะสองชนิดเพื่อทำการทดสอบการยิงด้วยกระสุนจริง ซึ่งแผ่นเกราะโลหะนี้จะใช้สำหรับการเสริมเข้าไปที่แนวขอบประตูรถยนต์ กระบะท้าย เท่านั้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

แผ่นเกราะโลหะกันกระสุนที่ใช้กับรถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะได้รับการทดสอบและวิเคราะห์ความเสียหายภายใต้มาตรฐาน NIJ ระดับ 3 ซึ่งสามารถพัฒนาให้อยู่บนมาตรฐาน NIJ ระดับ 4 ได้ มาตรฐาน NIJ ระดับ 4 นี้จะใช้สำหรับยานพาหนะหรืออาคารก่อสร้างต้านทานกระสุนเท่านั้น ไม่นำมาใช้กับเกราะส่วนบุคคล การทดลองการยิงด้วยกระสุนจริงมีค่าใช้จ่าย ดังนั้นการใช้โปรแกรมทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีขีดความสามารถในการวิเคราะห์โจทย์ปัญหาแบบนี้จะช่วยลดต้นทุนในการออกแบบและวิเคราะห์ผลลัพธ์ได้เป็นอย่างดี

การใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามาทำการจำลองปัญหา จะต้องระมัดระวังในทุกขั้นตอนของกระบวนการ Pre-Processing เช่น การเลือกใช้ทฤษฎี Johnson-Cook Strength หรือ Johnson-Holmquist (JH-2) ต้องเลือกให้เหมาะสม การแบ่งเอลิเมนต์และการควบคุมขนาดเอลิเมนต์จะมีผลอย่างมากกับการคำนวณ

การทดสอบการยิงกระสุน ในงานวิจัยนี้เลือกทดสอบที่โรงงานวัตถุระเบิดทหาร กรมการอุตสาหกรรมทหาร ศูนย์การอุตสาหกรรมป้องกันประเทศและพลังงานทหาร ซึ่งก่อนการเดินทางนำแผ่นโลหะที่เตรียมไว้จะต้องประสานและติดต่อไปก่อนล่วงหน้าและจะต้องปฏิบัติตนอย่างเคร่งครัดขณะทำการทดสอบเพื่อความปลอดภัย การทดสอบการยิงตาม NIJ ระดับ 4 มีความน่าสนใจอย่างมาก เพราะเป็นระดับสูงสุด หากทำการทดสอบมากกว่านี้จะส่งผลต่อผลการเปรียบเทียบและเห็นผลที่ชัดเจนขึ้น ทั้งนี้กระสุนสำหรับการยิงตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 4 ค่อนข้างหายาก และทางหน่วยงานไม่ได้มีสำรองไว้ จึงต้องวางแผนงานและประสานล่วงหน้าอย่างยาวนาน

เอกสารอ้างอิง

[1] ไพศาล รัตนะ, “รถหุ้มเกราะ APC 4x4 REVA MK lll” (ออนไลน์). แหล่งที่มา: https://sites.google.com/site/uflives/tha-ha-nth-har/yan-keraa/rth-hum-keraa-apc-4x4-reva-mk-lll

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

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

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

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

[6] มาตรฐานยุทโธปกรณ์กระทรวงกลาโหมว่าด้วยแผ่นเกราะกันกระสุน, คณะอนุกรรมการกำหนดมาตรฐานยุทโธปกรณ์กระทรวงกลาโหม

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

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

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

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

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

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

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

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

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

[16] K. Namik et al., "Ballistic behavior of high hardness perforated armor plates against 7.62 mm armor piercing projectile," *J. of Materials and Design*, vol. 63, pp. 427-438, 2014.

[17] Borvika Tore, H. Clausena Arild, Hopperstada Odd Sture and Langsetha Magnus, "Perforation of AA5083-H116 aluminium plates with conical-nose steel projectiles d experimental study," *Int J Impact Eng*, vol. 30, pp. 367-384, 2004.

[18] E.M. Backman and W. Goldsmith, " The mechanics of penetration of projectiles into targets," *Int J Eng Sci*, vol. 16, pp. 1-99, 1978.

[19] G.G Corbett., S.R. Reid and W. Johnson, " Impact loading of plates and shells by free-flying projectiles: a review," *Int J Impact Eng*, vol. 18, pp. 141-230, 1996.

[20] Johnson W. *Impact strength of materials*. London: Edward Arnold; 1972.

[21] Ozs_ahin Evren and Tolun Suleyman, "On the comparison of the ballistic response of coated aluminum plates," *Mater Des*, vol. 31, pp. 3188-3193, 2010.

[22] J. Radin and W. Goldsmith, " Normal projectile penetration and perforation of layered targets," *J Impact Eng*, vol. 7, pp. 229-259, 1988.

[23] E. Ozs_ahin and S. Tolun," Influence of layer sequencing on ballistic resistance of polyethylene supported AA 7075 T651 plates," *J Istanb Technol Univ*, vol. 8, no. 2, pp. 72-80, 2009.

[24] M. Balakrishnan, V. Balasubramanian and G. Madhusudhan Reddy, "Effect of PTA hardfaced interlayer thickness on ballistic performance of shielded metal arc welded armor steel welds," *J Mater Eng Perform*, vol. 22, no. 3, pp. 806, Mar. 2013.

[25] M. Balakrishnan, V. Balasubramanian, G. Madhusuhan Reddy and K. Sivakumar, "Effect of buttering and hardfacing on ballistic performance of shielded metal arc welded armour steel joints," *Mater Des*, vol. 32, pp. 469-479, 2011.

[26] M. Balakrishnan, V. Balasubramanian and G. Madhusudhan Reddy, " Effect of hardfaced interlayer thickness on ballistic performance of armour steel weldsm," *Mater Des*, vol. 44, pp. 59-68, 2013.

[27] N. Levy and W. Goldsmith, " Normal impact and perforation of thin plates by hemispherical tipped projectiles," *Int J Impact Eng*, vol. 2, pp. 299-324, 1984.

[28] M. Balakrishnan, V. Balasubramanian and G. Madhusudhan Reddy, "Effect of joint design on ballistic performance of quenched and tempered steel welded joint," *Mater Des*, vol. 54, pp. 616-623, 2014.

[29] S. Babu, V. Balasubramanian, G. Madhusudhan Reddy and TS. Balasubramanian, " Improving the ballistic immunity of armour steel weldments by plasma transferred arc (PTA) hardfacing," *Mater Des*, vol. 31, pp. 2664-2669, 2010.

[30] G. Madhusudhan Reddy, T. Mohandas and K. Papukutty, "Enhancement of ballistic capabilities of soft welds through hardfacing," *Int J Impact Eng*, vol. 22, pp. 775-791, 1999.

[31] J.T.M. De Hosson and B.J. Kooi, Hand book of surfaces and interfaces. NewYork: Academic Press; 2011.

[32] J.A. Vreeling, J. Ocelik, Y.T. Pei, D.T. Van Agterveld and T.M. Hosson, "Lasermelt injection of ceramic particles in metals," *Acta Mater*, vol. 48, pp. 4225-4232, 2000.

[33] J.H. Abboud and D.R.F. West, "Microstructure of titanium injected with SiCparticles by laser processing," *J Mater SciLett*, vol. 10, pp. 1194, 1991.

[34] Y.T. Pei, V. Ocelik, J.T. Hosson In: Jha B.B., Galgai R.K., MisraVibhuti N.,editors, Futuristic materials, Allied Publishers, Indian Institute of MineralsEngineers, Bhubaneswar Chapter, 2004.

[35] T. N. Baker, H. Xin, C. Hu and S. Mridha, " Design of surface in situ metalceramiccomposite formation via laser treatment," *J Mater SciTechnol*, vol. 10, pp. 536-544, 1994.

[36] V. M. Weerasinghe and D. R. F. West, J. Damborenea ," Laser surface nitriding oftitanium and titanium alloy," *J Mater Process Technol*, vol. 58, pp. 79-86, 1996.

[37] H. Xin, S. Mridha and T.N. Baker, "The effect of laser surface nitriding with aspinning laser beam on the wear resistance of commercial purity titanium," *J Mater Sci*, vol. 31, pp. 22-28, 1996.

[38] T. Bell, H. W. Bergmann, J. Lanagan, P. H. Morton and A. M. Staines, " Surfaceengineering of titanium with nitrogen," in *Proceedings 4th internationalcongress of heat treatment of materials*, Shanghai, June 1985, pp. 146-151.

[39] S. Yerramareddy and S. Bahadur, " The effect of laser surface treatments on thetribological behavior ofTi-6Al-4V," *Wear*, vol. 157, pp. 245-253, 1992.

[40] O.V. Akgun and O.T. Inal, "Laser surface modification of Ti-6A1-4V alloy," *J Mater Sci*, vol. 29, pp. 1159-1166, 1994.

[41] R.J. Deuis, J.M. Yellup and C. Subramanian, "Metal-matrix composite coatingsby PTA surfacing," *Compos SciTechnol*, vol. 58, pp. 132-138, 1998.

[42] A. Shafiei-Zarghani, S.F. Kashani-Bozorg and A. Zarei-Hanzaki, "Microstructuresand mechanical properties of Al/ Al_2O_3 surface nano- compositelayer produced by friction stir processing," *Mater SciEng A*, vol. 500, no. 1-2, pp. 84-91, 2009.

[43] 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.

[44] ANSYS Inc., "Lecture 2: Introduction to Explicit Dynamics." Document from CAD-IT Consultants (Asia), 2019.

[45] ANSYS Inc., "Lecture 6: Analysis Settings and Parameter." Document from CAD-IT Consultants (Asia), 2019.

[46] กรมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีกลาโหม, "เอกสารการปรับปรุงมาตรฐานยุทโธปกรณ์กระทรวงกลาโหมว่าด้วยเสื้อเกราะกันกระสุน กรมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีกลาโหม," 27 พ.ย. 2558.

[47] M. A. Iqbal, K. Senthil, V. Madhu and N. K. Gupta, “ Oblique impact on single, layered and spaced mild steel targets by 7.62 AP projectiles,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 110, pp. 26–38, Dec. 2017.

ไม่มีเนื้อหาจากต้นฉบับ

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ นามสกุล นายวิสา คร้ามอ่ำ

วัน เดือน ปีเกิด 16 พฤษภาคม 2535

ภูมิลำเนา 600/834 หมู่14 ต.คูคต อ.ลำลูกกา จ.ปทุมธานี

ประวัติการศึกษา

วุฒิการศึกษา	**ชื่อสถาบัน**	**ปีที่สำเร็จการศึกษา**
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ	โรงเรียนช่างฝีมือทหาร	2553
ปริญญาตรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2558

ตำแหน่งและสถานที่ทำงานปัจจุบัน

-