การตรวจสอบพฤติกรรมของแผ่นเกราะพรุนแบบเรียงซ้อนที่มีความแข็งแรงสูง ต่อกระสุนเจาะเกราะ 7.62 โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

An Investigation on the Behavior of High-strength Stacked Perforated Armor Plates Against 7.62 Armor-piercing Bullets Using the Finite Element Methodology

กฤษฎา แสงพรายพรรณ์

Krisada Sangparypun

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2565

การตรวจสอบพฤติกรรมของแผ่นเกราะพรุนแบบเรียงซ้อนที่มีความแข็งแรงสูง ต่อกระสุนเจาะเกราะ 7.62 โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

An Investigation on the Behavior of High-strength Stacked Perforated Armor Plates Against 7.62 Armor-piercing Bullets Using the Finite Element Methodology

กฤษฎา แสงพรายพรรณ์

Krisada Sangparypun

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ชื่อวิทยานิพนธ์ การตรวจสอบพฤติกรรมของแผ่นเกราะพรุนแบบเรียงซ้อนที่มีความแข็งแรงสูงต่อกระสุนเจาะเกราะ 7.62 โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ชื่อ นามสกุล กฤษฎา แสงพรายพรรณ์

ชื่อปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

สาขาวิชา และคณะ วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ประกอบ ชาติภุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภูภูมิ พ่วงเจริญชัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้ให้ความเห็นชอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แล้ว

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

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

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฏิภาณ ถิ่นพระบาท)

..... กรรมการ
(ดร.ประกอบ ชาติภุกต์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภูภูมิ พ่วงเจริญชัย)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

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

วันที่ เดือน พ.ศ.

ชื่อวิทยานิพนธ์ การตรวจสอบพฤติกรรมของแผ่นเกราะพรุนแบบเรียงซ้อนที่มีความแข็งแรงสูงต่อกระสุนเจาะเกราะ 7.62 โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
ชื่อ นามสกุล กฤษฎา แสงพรายพรรณ์
ชื่อปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
สาขาวิชา และคณะ วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมการเสียรูปของแผ่นเกราะโลหะพรุนแบบเรียงซ้อนกันและวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นกับแผ่นเกราะโลหะพรุนแบบเรียงซ้อนที่มีความแข็งแรงสูงต่อกระสุนเจาะเกราะ 7.62 โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 ANSYS Explicit/Dynamics ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีการรวมเวลา (Time Integration Method) เพื่อวิเคราะห์ปัญหาการตอบสนองแบบไดนามิกในกลศาสตร์ของแข็ง กระสุนที่ใช้ในการจำลองเป็นกระสุน 7.62x51 มิลลิเมตร ทำจากทังสเตนคาร์ไบด์ที่มีความเร็วตามมาตรฐาน NIJ 3 ในการวิเคราะห์จึงกำหนดรูปแบบความเสียหายของกระสุนเป็นแบบ Johnson-Holmquist Failure Model แผ่นเกราะพรุนทำมาจาก SKD 11 กำหนดให้เป็นวัสดุที่มีเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) และมีสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทุกทาง (Isotropic Materials) ความเสียหายที่เกิดขึ้นพิจารณาตั้งแต่ช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นไปจนถึงช่วงพลาสติกที่มีอัตราความเครียดสูง แผ่นเกราะพรุนมีขนาดความกว้างและความยาวเท่ากับ 300x300 มิลลิเมตร โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นเกราะพรุนเป็นกรณีต่างๆ รูพรุนจะช่วยเบี่ยงเบนทิศทางของกระสุนที่พุ่งเข้าเจาะเกราะที่มุมศูนย์องศา วัสดุ SKD11 ได้รับเลือกมาใช้เป็นวัสดุแผ่นหน้า แผ่นเกราะด้านหลังจะเป็นวัสดุ SUS304 ที่ทำหน้าที่ดูดซับพลังงานการเคลื่อนที่ของกระสุน แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ได้รับการพิสูจน์ความถูกต้องโดยเปรียบเทียบผลวิเคราะห์กับการทดลอง จากผลการวิเคราะห์พบว่า การสร้างแผ่นเกราะให้มีรูพรุนในรูปแบบทะลุผ่านตลอดความหนาแผ่นเกราะนั้นไม่สามารถเพิ่มขีดความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุได้ แต่ในกรณีแผ่นเกราะมีรูพรุนแต่ไม่ทะลุตลอดความหนาจะช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการหักเหทิศทางกระสุน และเพิ่มความสามารถต้านทานการเจาะทะลุ อีกทั้งยังช่วยลดน้ำหนักของแผ่นเกราะลงได้

คำสำคัญ: รถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะ, เกราะโลหะพรุนกันกระสุน, มาตรฐานเอ็นไอเจ, วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Thesis Title An Investigation on the Behavior of High-strength Stacked Perforated Armor Plates Against 7.62 Armor-piercing Bullets Using the Finite Element Methodology

Author Krisada Sangparypun

Degree Master of Engineering (Mechanical Engineering)

Major Program Mechanical Engineering Faculty of Engineering

Academic Year 2022

ABSTRACT

The purpose of this research was to investigate the deformation behavior of stacked perforated metal armor plates and to analyze the attained stress from stacked perforated metal armor plates with high strength against 7.62 armor-piercing bullets using the finite element methodology according to the NIJ Level 3 standards. The analysis of dynamic response problems in solids mechanics was conducted using ANSYS Explicit/Dynamics and the time integration method. The bullet used in the simulation was a 7.62 x 51 mm tungsten carbide bullet with a velocity according to the NIJ 3 standard. The Johnson-Holmquist Failure model was used to analyze the bullet damage pattern. The perforated armor plate was made of SKD 11, defined as homogeneous and isotropic materials. The damage that happened was considered from the linear-elastic range to the high strain rate plastic range. The perforated armor plates had dimensions of width and length equal to 300 x 300 mm. and the thickness of the perforated armor plate might also change in various cases. The porosity helped deflect the bullet direction that penetrated the armor at a zero angle. SKD11 material was chosen to use as the front plate material. The rear armor plate was made of SUS304 material that absorbed the energy of the bullet's movement. The finite element model was validated by comparing the analytical results with the experimental results. According to the analysis results, it was found that making the armor plate with a perforated pattern throughout the thickness of the armor plate could not increase the penetration resistance. However, the perforated armor plate that did not penetrate through the thickness would increase the ability to deflect the bullet direction, increase the ability to resist penetration and reduce the weight of the armor plates as well.

Keywords: Armored Small Regular Truck, Bulletproof Perforated Metal Armor, NIJ Standard, Finite Element Methodology

กิตติกรรมประกาศ

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

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.กระวี ตรีอำนรรค ที่กรุณาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ชี้แนะแนวทาง ให้ความรู้ ตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภูภูมิ พ่วงเจริญชัย ที่กรุณาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ให้ความรู้ ชี้แนะแนวทาง ตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฏิภาณ ถิ่นพระบาท ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ให้ความรู้ ชี้แนะแนวทาง ตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ว่าที่เรือตรี ดร.ทรงวุฒิ มงคลเลิศมณี ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ให้ความรู้ ชี้แนะแนวทาง ตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์แจ๊ค ชุ่มอินทร์ และอาจารย์ประสิทธิ์ แพงเพชร สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องมือและแม่พิมพ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ช่วยสร้างแผ่นเกราะกันกระสุนและชิ้นส่วนเกราะ

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา สมาชิกในครอบครัว และครูอาจารย์ทุกท่าน ผู้ที่ให้ความรู้ อนุเคราะห์ ส่งเสริม สนับสนุนด้านทุนทรัพย์และกำลังใจ ค่อยอบรมสั่งสอนจนประสบความสำเร็จในด้านการศึกษา

ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร รวมถึงเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัยครั้งนี้ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ดี ท้ายที่สุดนี้ ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะมีประโยชน์สำหรับผู้อ่านไม่มากก็น้อยต่อไป

กฤษฎา แสงพรายพรรณ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	4
1.5 สถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรม	
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.2 มาตรฐานแผ่นเกราะกันกระสุน	15
2.3 การทบทวนวรรณกรรม	18
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย	
3.1 ระเบียบวิธีวิจัย	29
3.2 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วย ANSYS: Explicit Dynamics	32
3.3 การเตรียมแผ่นเกราะโลหะสำหรับทดสอบการยิงกระสุน	48
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	
4.1 ผลการดำเนินงานเตรียมการยิงกระสุนลงบนแผ่นเกราะโลหะ	50
4.2 ผลการทดสอบเปรียบเทียบกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	53
4.3 สรุปผลการทดสอบการเปรียบเทียบผลการยิงกระสุนกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	58

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ
5.1 สรุปผล 59
5.2 ข้อเสนอแนะ 60

เอกสารอ้างอิง 62
ภาคผนวก ก บทความตีพิมพ์เผยแพร่และใบรับรองการนำเสนอ 64
ประวัติการศึกษาและการทำงาน 83

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 ตารางภัยคุกคามและการยิงทดสอบความสามารถกันกระสุนของเกราะ 15

2.2 ตารางสรุปการวินิจฉัยการปฏิบัติต่อผลการยิงทดสอบเกราะ 17

3.1 สมบัติของวัสดุ Tungsten carbide (WC) 38

3.2 สมบัติของวัสดุ SKD11 39

3.3 สมบัติของวัสดุ SUS304 40

3.4 ตัวอย่างจำนวนโหนดและเอลิเมนต์ของแผ่นเกราะและผลรวมของโหนดและเอลิเมนต์ทั้งหมด 42

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	รถกระบะ TOYOTA REVO ติดเกราะที่ผ่านการวิจัยและพัฒนาขึ้น	2
1.2	รายละเอียดชิ้นส่วนเกราะกันกระสุนประเภทต่างๆ	2
1.3	ลักษณะกระสุน ขนาด 7.62X51 มิลลิเมตร	3
2.1	ลักษณะความเค้นใน 3 มิติ	6
2.2	เอลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า	8
2.3	Ballistic test setup	17
2.4	เปรียบเทียบผลการเจาะทะลุเกราะด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลอง	18
2.5	ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ความเค้น Von-Mises ในแกนกระสุน และทิศทางการเลี้ยวเบนของกระสุน	19
2.6	การเปลี่ยนรูปสำหรับการเจาะเกราะ 9 มม.SPHแถวที่ 1และการแบ่งลากรองจ์แถวที่ 2	19
2.7	แสดงแผ่นเกราะวัสดุ Stainless Steel (SS304) ทำการซ้อน 2 ชั้นทดสอบยิงจริง ตามมาตรฐาน NIJ 3	20
2.8	ลักษณะความเสียหายของแผ่นเกราะ SUS304 หนา 8 mm ที่มุมปะทะ 15°	20
2.9	ผลการจำลองความเสียหายแผ่นเกราะกันกระสุนวัสดุสแตนเลส SUS304 หนา 40 มิลลิเมตร มุมปะทะ 0 องศา	21
2.10	ผลการวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติแบบรูปที่ 5 ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	22
2.11	แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 10 มิลลิเมตร มุมเอียง 30 องศา	23
2.12	แผ่นเกราะอะลูมิเนียม ความหนา 8 mm มุม 30 องศา	24
2.13	รูปแบบ (a)ผลกระทบและ(b)ส่วนปลายของฐานเกราะแผ่นเกราะ ปรากฏการณ์ที่คล้ายกันไม่ได้รับการทำนายโดยแบบจำลองตัวเลขที่(c)ผลกระทบและ(d)ส่วนปลาย	25
2.14	การเจาะทะลุของกระสุนผ่านแผ่นเกราะฐานในช่วงเวลาต่างๆ	25
2.15	แบบจำลองการกระจายความหนาแน่น (เป็น ก./ลบ.ซม, ซ้าย)และการเชื่อมโยงต่อกัน (เป็น MPa, ขวา)	26
2.16	แบบจำลองการกระจายความเค้นตกค้าง (เป็น MPa), ภาพซ้ายเป็นภาคตัดขวางการดีดคืน ตัว และภาพขวาคือส่วนเบี่ยงเบนแปรผัน	26

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.17	โมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์ของเป้าหมายได้รับผลกระทบตามปกติ (a) เป้าหมายและโพรเจกไทล์จมูกแบบลักษณะหลังคาโค้ง , (b) เป้าหมายหนา 0.5 มม., (c) เป้าหมายสองชั้น และ (d) เป้าหมายสามชั้น	27
3.1	ขั้นตอนการศึกษาวิจัย	30
3.2	กรอบการวิจัย	32
3.3	โมเดลแผ่นเกราะกันกระสุนได้ถูกสร้างขึ้น	29
	รูปที่ 3.3 แบบที่ 1 แผ่นเกราะหน้าเรียบไม่มีรูเจาะหรือไม่มีรูพรุน	32
	รูปที่ 3.4 แบบที่ 2 แผ่นเกราะได้รับการเจาะรูทะลุผ่านตลอดด้วยรูเจาะ	33
	รูปที่ 3.5 แบบที่ 3 แผ่นเกราะได้รับการเจาะรูเช่นเดียวกับกรณีที่ 2 แต่กระสุนพุ่งเข้าปะทะแผ่นเกราะที่จุดตัดตรงแนวทะแยงของรูเจาะทั้ง 4 ร	33
	รูปที่ 3.6 แบบที่ 4 แผ่นเกราะได้รับการเจาะรูลึก 5 มิลลิเมตร(ไม่ทะลุง)	34
	รูปที่ 3.7 แบบที่ 5 แผ่นเกราะได้รับการกัดให้เป็นร่องสี่เหลี่ยมกว้าง 5 มิลลิเมตร ลึก 5 มิลลิเมตร	34
3.8	ผลลัพธ์จากการกำหนดและแบ่งเอลิเมนต์	35
3.9	เทคนิคการควบคุมขนาดและแบ่งเอลิเมนต์	35
310	User interface ของ ANSYS 2020R2	36
3.11	ตัวอย่างการกำหนดวัสดุใหม่สำหรับ SKD11 ด้วย Johnson Cook Strength	37
3.12	ตัวอย่างการกำหนดสมบัติวัสดุของ SKD11	37
3.13	นำเข้าโมเดลเกราะกันกระสุนและลูกกระสุนสู่ ANSYS	40
3.14	นำเข้าโมเดล 10 Parts 10 Bodies สู่ Design Modeler และใช้คำสั่ง From New Part	41
3.15	เข้าสู่หน้าต่าง Mechanical ด้วยคำสั่ง Model	41
3.16	การกำหนดชนิดวัสดุ และกำหนดค่า Stiffness Behavior เป็น Flexible	42
3.17	การกำหนดชนิดวัสดุ และกำหนดค่า Stiffness Behavior เป็น Flexible	42
3.18	การกำหนด Element Size	43
3.19	การกำหนดค่าความเร็วเริ่มต้น (Initial velocity)	44
3.20	ค่าของ End Time และ Result Number of Points	45

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.21	การกำหนด Fixed Support	45
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	ตัวอย่างชิ้นส่วนแผ่นโลหะทั้ง 5 แบบจากโปรแกรม Ansys	48
3.29	การขึ้นรูปแผ่นเกราะพรุนด้วย CNC	49
3.28	ตัวอย่างชิ้นส่วนแผ่นโลหะทั้ง 5 แบบจากโปรแกรม Ansys	48
3.30	แผ่นเกราะพรุนสำหรับการทดสอบ	49
4.1	ตำแหน่งอุปกรณ์ต่างๆ และระยะการยิงตามมาตรฐาน NIJ	51
4.2	เครื่องยิงกระสุนและเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับบันทึกผลและควบคุม	51
4.3	การจัดเตรียม a) กระบะวัสดุหนุนเพื่อรองรับแผ่นเกราะที่จะยิงตามมาตรฐาน NIJ และ b) แผ่นพิสูจน์ถูกเจาะทะลุ	51
4.4	กล้องวัดความเร็วกระสุนตามมาตรฐาน NIJ	52
4.5	แผ่นเกราะกันกระสุนสำหรับการทดสอบ	52
4.6	ความเค้นวอนมิสเสสและลักษณะความเสียหาย ที่เกิดขึ้นบนแผ่นเกราะ SKD 11 ที่มีความหนา 10 มิลลิเมตร	53
4.7	ความเค้นสูงสุดเทียบกับเวลาเมื่อกระสุนพุ่งเข้าแผ่นเกราะ	53
4.8	ความเร็วเฉลี่ยของกระสุนเทียบกับเวลาของกรณีที่ 1	54
4.9	กระสุนทะลุผ่านรูเจาะอย่างสมบูรณ์ในกรณีที่ 2	54
4.10	รูเจาะบนแผ่นเกราะส่งผลให้แผ่นเกราะเกิดการสั่นสะเทือน	54
4.11	ความเค้นวอนมิสเสสและความเสียหายในกรณีที่ 3	55
4.12	ความเค้นสูงสุดเทียบกับเวลา	55
4.13	ความเร็วเฉลี่ยของกระสุนเมื่อ เทียบกับเวลาในกรณีที่ 3	56
4.14	กระสุนไม่ทะลุผ่านแผ่นเกราะในกรณีที่ 4	56

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.15 ความเค้นวอนมิสเสสและความเสียหาย 57
4.16 ความเร็วเฉลี่ยของกระสุน 57
4.17 แผ่นเกราะได้รับการกัดให้เป็นร่องสี่เหลี่ยมกว้าง 5 มิลลิเมตร ลึก 5 มิลลิเมตร 57
4.18 ความเค้นสูงสุดเทียบกับเวลาเมื่อกระสุนพุ่งเข้าแผ่นเกราะในกรณีที่ 5 58
4.19 ผลการทดสอบโดยใช้มาตรฐาน NIJ ระดับ 3 68

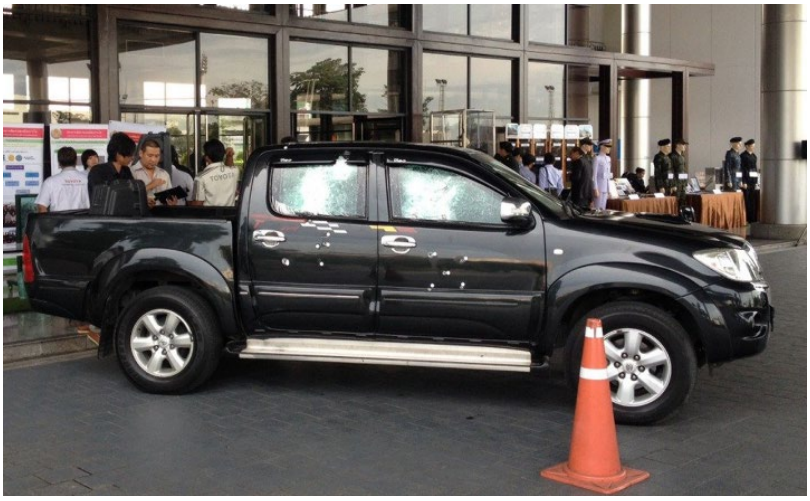
บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

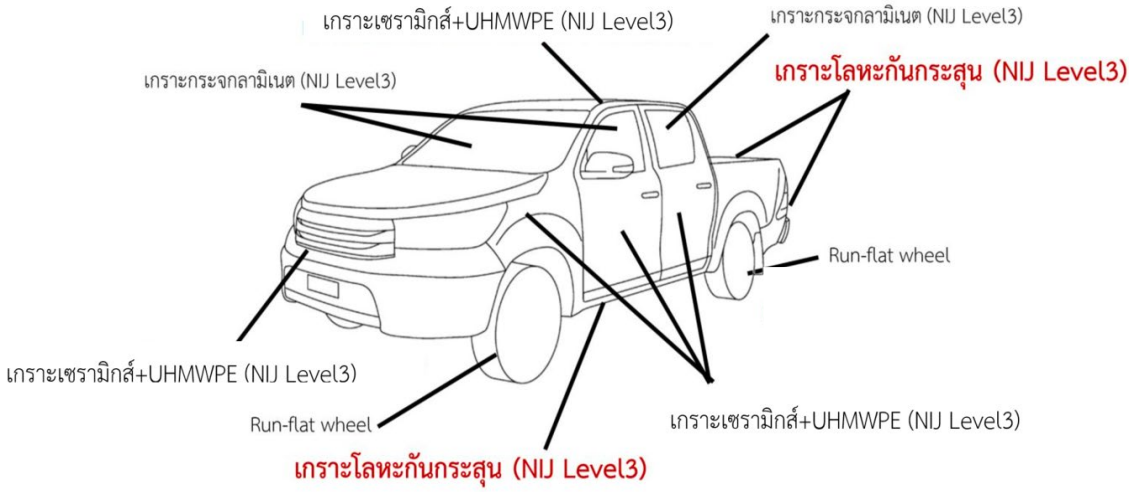
จากยุทธศาสตร์การพัฒนาเพื่อเสริมความมั่นคงของชาติ (พ.ศ. 2561-2564) สำนักงานสภาความมั่นคงแห่งชาติ สำนักนายกรัฐมนตรี ได้กล่าวไว้ในหลักการและเหตุผลว่า “เพื่อเสริมความมั่นคงของชาติ มุ่งเน้นป้องกันแก้ไข และลดเงื่อนไขของปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อความมั่นคงและการพัฒนาคนและชุมชนในพื้นที่เป้าหมายที่มีความเสี่ยงทาง ความมั่นคง โดยให้ความสำคัญกับการดำเนินงานอย่างบูรณาการในกระบวนการด้านเศรษฐกิจ สังคม และการป้องกันประเทศ เข้ามาดำเนินงานร่วมกันอย่างประสานสอดคล้องกันเพื่อพัฒนาความเป็นอยู่ของคนและชุมชนในพื้นที่เป้าหมาย เสริมสร้างความมั่นคงให้ประเทศ เสริมสร้างภูมิคุ้มกันให้คนมีจิตสำนึกด้านความมั่นคงและให้ชุมชนพื้นที่เป้าหมายมีความพร้อมในการรักษาความมั่นคง รวมทั้งให้ความสำคัญในมิติความมั่นคงร่วมกับประเทศเพื่อนบ้านและประชาคมอาเซียน”ดังนั้นการสร้างนวัตกรรมเพื่อการเสริมสร้างขีดความสามารถในการป้องกันและการรบจึงเป็นสิ่งสำคัญมาก และที่ผ่านมาจนปัจจุบันปัญหาความไม่สงบใน 3 จังหวัดชายแดนภาคใต้ ที่เกิดความขัดแย้งมีการก่อความไม่สงบต่างๆ เช่น การวางระเบิด การลอบทำร้ายประชาชนและเจ้าหน้าที่ที่เข้าไปดูแลรักษาความสงบทั้งนี้ในการก่อเหตุความไม่สงบนั้นได้รวมถึงการลอบยิงเจ้าหน้าที่ในขณะขับรถออกปฏิบัติงาน ลาดตะเวนตามเส้นทางล่อแหลมหรือสุ่มเสี่ยงจนทำให้มีเจ้าหน้าที่เกิดอันตรายได้รับบาดเจ็บและเสียชีวิตจากเหตุการณ์ดังกล่าวเป็นจำนวนมาก ซึ่งรถที่ใช้ในการปฏิบัติหน้าที่นั้นอาจป้องกันการโดนลอบยิงนั้นจำเป็นจะต้องใช้รถที่มีสรรถนะการป้องกันที่สูงและดีเยี่ยม การจัดซื้อรถเกราะกันกระสุนขนาดใหญ่นั้นมีราคาสูงเช่นการจัดซื้อ 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 รวมถึงล้อนิรภัยรันแฟลท



รูปที่ 1.1 รถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะที่ผ่านการวิจัยและพัฒนาขึ้น



รูปที่ 1.2 รายละเอียดชิ้นส่วนเกราะกันกระสุนประเภทต่างๆ ที่ติดตั้งบนรถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะ

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาแผ่นเกราะโลหะกันกระสุนพรุนสำหรับรถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กขึ้นมา โดยจะทำการออกแบบโลหะที่ใช้เป็นเกราะพรุนกันกระสุน แล้วทำการทดสอบการกันกระสุนตามมาตรฐานระดับ NIJ 3 เพื่อทำการสร้างแผ่นเกราะโลหะพรุนกันกระสุนที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งมาตรฐาน NIJ เป็นมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับเรื่องวิธีทดสอบ เกณฑ์การทดสอบ ความสามารถหรือประสิทธิภาพการป้องกันกระสุนของเสื้อเกราะที่กำหนดโดยสถาบันความเที่ยงธรรมแห่งชาติ (National Institute of Justice, NIJ) ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งประเทศไทยและอีกหลายประเทศทั่วโลกใช้มาตรฐานสำหรับการทดสอบเสื้อเกราะป้องกันกระสุนด้วยเช่นกัน โดยมาตรฐาน NIJ

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

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมการเสียรูปของแผ่นเกราะโลหะพรุนแบบเรียงซ้อนกันโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นกับแผ่นเกราะโลหะพรุนแบบเรียงซ้อนที่มีความแข็งแรงสูงต่อกระสุนเจาะเกราะ 7.62 โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 การจำลองการทดสอบและวิเคราะห์แผ่นเกราะโลหะกันกระสุนเป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบ NIJ ระดับ 3

1.3.2 ทำการทดสอบด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ Ansys Explicit/Dynamics

1.3.3 วิธีการประกอบแผ่นเกราะโลหะกันกระสุนจะใช้กระบวนการเชื่อมติดด้วยสลักเกลียว

1.3.4 วัสดุที่ใช้สร้างแผ่นเกราะโลหะเจาะรูพรุนเป็น SKD11 กระสุนปืนทำจาก Tungsten Carbide ขนาด 7.62x51 มิลลิเมตร

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.4.1 ได้รูปแบบแผ่นเกราะโลหะกันกระสุนที่เหมาะสมกับรถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะ

1.4.2 เป็นแนวทางในการผลิตแผ่นเกราะโลหะกันกระสุนที่ผ่านมาตรฐานสากล NIJ ระดับ 3

1.4.3 สร้างและสนับสนุนนักวิจัยรุ่นใหม่

1.4.4 ได้ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการหรือการเผยแพร่ผลงานในที่ประชุมสัมนาทางวิชาการที่ได้มาตรฐาน

1.5 สถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

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

1.5.2 โรงงานวัตถุระเบิดทหาร กรมการอุตสาหกรรมทหาร ศูนย์การอุตสาหกรรมป้องกันประเทศและพลังงานทหาร
ตำบลย่านมัทรี อำเภอพยุหะคีรี จังหวัดนครสวรรค์

บทที่ 2
ทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรม

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [1], [2]

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) เป็นวิธีทางตัวเลข เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรม ไม่ว่าจะเป็นการวิเคราะห์ทางโครงสร้าง (Structural) หรืออื่น ๆ โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะสามารถประมาณค่าผลเฉลยโดยการแก้สมการเชิงพีชคณิตแทนการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ ในการแก้ปัญหาดังกล่าว โครงสร้างหรือชิ้นงานจะถูกแบ่งออกเป็นชิ้นส่วนเล็ก ๆ (Element) ในจำนวนที่จำกัด (Finite) และผลเฉลยที่ได้จะเป็นคำตอบที่จุดต่อระหว่างเอลิเมนต์ (โหนด: Node) โดยที่แต่ละเอลิเมนต์จะมีผลเฉลยที่สามารถหาได้ง่าย และเมื่อนำมารวมกันจึงสามารถหาค่าผลเฉลยของทั้งโครงสร้างได้โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะสามารถให้ผลเฉลยของค่าการเสียรูปและแรงที่กระทำ ณ จุดหรือโหนด และค่าความเค้นและความเครียดที่แต่ละเอลิเมนต์ได้ ความเครียดกับการเสียรูปและความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด เป็นสิ่งจำเป็นในการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ตัวอย่างปัญหาใน 1 มิติ ความสัมพันธ์ระหว่างการเสียรูปกับความเครียดเป็นดังนี้

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

ซึ่งเป็นสมการสำหรับปัญหาที่มีการเสียรูปน้อย (Small Displacement) และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดมีค่าเท่ากับ

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

โดยที่ σ_x คือค่าความเค้นในแนวแกน x และ E คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ

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

เมื่อ $[D]$ คือ เมทริกซ์คุณสมบัติของวัสดุ

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

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

เมื่อนำเอาหลักการของสปริงตามสมการที่ (2.4) มาประยุกต์ใช้กับหลักการไฟไนต์เอลิเมนต์ จะสามารถเขียนสมการที่ (2.5) ใหม่ในลักษณะของเมทริกซ์ได้เป็น

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

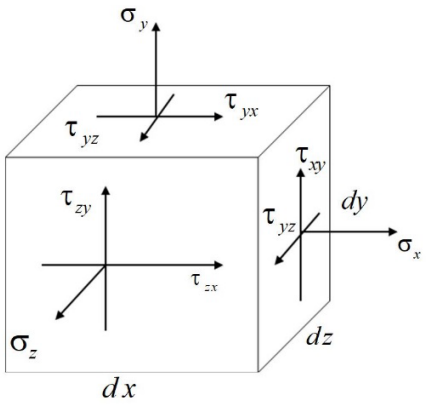
โดยที่ f' คือ เมทริกซ์ของแรงที่กระทำกับสปริง

k' คือ สทิฟเนสเมทริกซ์ของสปริง

d' คือ เมทริกซ์ของระยะยืด/หดตัวของสปริง

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

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



รูปที่ 2.1 ลักษณะความเค้นใน 3 มิติ [1], [2]

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

ดังนั้นจะมีความเค้นเฉือนแค่ 3 ตัวเท่ากันที่ต้องพิจารณารวมกับความเค้นตั้งฉากจะได้เป็น

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

และความเค้นที่เกิดขึ้นในเอลิเมนต์จะมีดังนี้

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

โดยที่

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

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

และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเท่ากับ

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

โดยที่

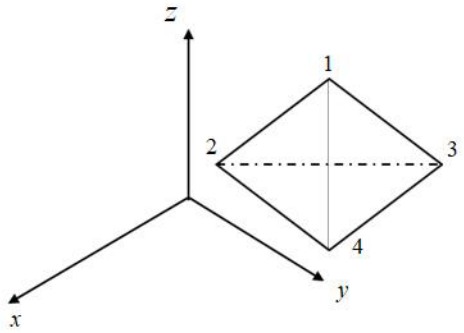
$$[D]=\frac{E}{(1+v)(1-2v)}\begin{bmatrix}1-v & v & v & 0 & 0 & 0\\ & 1-v & v & 0 & 0 & 0\\ & & 1-v & 0 & 0 & 0\\ & & & \frac{1-2v}{2} & 0 & 0\\ & & & & \frac{1-2v}{2} & 0\\ & & & & & \frac{1-2v}{2}\end{bmatrix} \tag{2.11}$$

การหาสทิฟเนสเมทริกซ์สำหรับเอลิเมนต์แบบทรงสี่หน้า

ขั้นตอนที่ 1 เลือกประเภทของเอลิเมนต์

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

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



รูปที่ 2.2 เอลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า [1]-[2]

ขั้นตอนที่ 2 เลือกฟังก์ชันของการเสียรูป

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

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

เป็นฟังก์ชันของการเสียรูปของ 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

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

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

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

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

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

สามารถที่จะเขียนรูปของเมทริกซ์สำหรับฟังก์ชันการเสียรูปเท่ากับ

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

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 $\underline{\mathbf{F}}=\underline{\mathbf{K}}\underline{\mathbf{d}}$ จะได้ว่า

$$[K]=\iiint_v [B]^T [D][B]\,dV \tag{2.28}$$

ในกรณีที่เป็นเอลิเมนต์แบบทรงสี่หน้า (Tetrahedron) จะมีค่าคงที่ ดังนั้น

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

ผลจากน้ำหนัก (Body Force)

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

โดยที่

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

ผลจากแรงที่ผิว (Surface Force) จาก

$$\{f_s\}=\iint_s [N]^T \{T\}\,dS \tag{2.32}$$

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 ซึ่งมีรูพรุนแล้ว ทำให้เศษโลหะที่เกิดจากการแตกทะลุผ่านไปยังแผ่นที่ 2 ที่ไม่มีรูพรุน วิเคราะห์ด้วยวัสดุ SKD 11 ที่ความหนาต่างๆ ด้วยขนาด 300x300 มิลลิเมตร ยิงที่มุม 0 องศา ได้ใช้แบบจำลองความเสียหายของ Johnson-Cook Model (JC) จึงเป็นรูปแบบสมการที่อธิบายตามสมการที่ (2.34)

$$\sigma = \left[A + B\left(\varepsilon_p\right)^n \right]\left[1 + c\,\ln\left(\dot{\varepsilon} \Big/ \dot{\varepsilon}_0 \right) \right]\left[1 - \left\{ \left(T - T_0\right) / \left(T_m - T_0\right) \right\}^m \right] \tag{2.34}$$

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

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

$$Y = \left[A\left(p^* + T^*\right)^n \left(1 - D\right) + B\left(p^*\right)^m D \right]\left[1 + c\,\ln\left(\dot{\varepsilon}_p^*\right) \right] \tag{2.35}$$

$$p^* = \frac{p}{p_{HEL}},\ T^* = \frac{T}{p_{HEL}} \tag{2.36}$$

เมื่อ Y คือ Yield Stress, p_{HEL} คือความดันที่ Hugoniot Elastic Limit (HEL), T คือ Maximum Hydrodynamic Tensile Strength และ A, B, C, n, m คือพารามิเตอร์ของวัสดุ, ค่า HEL คือ Yield limit ที่ Uniaxial Strain 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

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

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

SUS 304 plate model ซึ่งใช้ในการรั้งเศษกระสุนที่กระแทกเข้ากับแผ่นที่ 1 แล้วทะลุออกมา แผ่นมีขนาด 300 x 300 มิลลิเมตร ให้ความหนาเริ่มต้นที่ 6 ที่มุม 0 องศา ในการแทกของกระสุนซึ่งให้ทฤษฎีความเสียหายของ Steinberg-Guinan Strength Model เป็นแบบกึ่งทดลองที่พัฒนาโดยสำหรับสถานการณ์ที่มีอัตราความเครียดสูงและขยายไปยังอัตราความเครียดต่ำ มีสมการดังนี้

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

$$Y = Y_0\left\{1 + \left(\frac{Y_p'}{Y_0}\right)\frac{p}{\eta^{1/3}} + \left(\frac{G_t'}{G_0}\right)\left(T - 300\right)\right\}\left(1 + \beta\varepsilon\right)^n$$ (2.40)

ที่ $Y_0 = \left[1 + \beta\varepsilon\right]^n \le Y_{\max}$

เมื่อ ε = Effective Plastic Strain, T = Temperature (Degree K), η = Compression และพารามิเตอร์ที่พร้อมกับตัวห้อย p และ T เป็นอนุพันธ์ของพารามิเตอร์นั้นเกี่ยวกับความดันและอุณหภูมิที่สถานะอ้างอิง (T = 300 K, p = 0, ε = 0) ตัวห้อยศูนย์ยังอ้างถึงค่าของ G และ Y ที่สถานะนั้น หากอุณหภูมิของวัสดุสูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวที่ระบุไว้โมดูลัสแรงเฉือนและความแข็งแรงของผลผลิตจะถูกตั้งค่าเป็นศูนย์ ค่าคุณสมบัติและพารามิเตอร์ของ SUS304 มีในโปรแกรมจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS

2.1.3 ANSYS Software [3], [4]

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

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

2.1.4 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทาง FEM มีพื้นฐาน 3 ขั้นตอน

ขั้นตอนที่ 1 (Pre-Processing)

เตรียมข้อมูลเบื้องต้นของแบบจำลองก่อนการวิเคราะห์ เป็นการกำหนดและการสร้างแบบจำลองที่จะทำการวิเคราะห์ 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 [5]

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 2.1 จากต่ำไปสูง) ดังนี้

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

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

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

2.2.2.4 แผ่นเกราะระดับ 3A เป็นระดับที่สามารถกันกระสุนปืนพกโดยทั่วไปได้ ซึ่งเป็นระดับที่สามารถกันกระสุนที่เป็นภัยคุกคามในระดับ3A (Type IIIA: High Velocity 9 mm.;.44 Magnum) 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 [5]

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)		

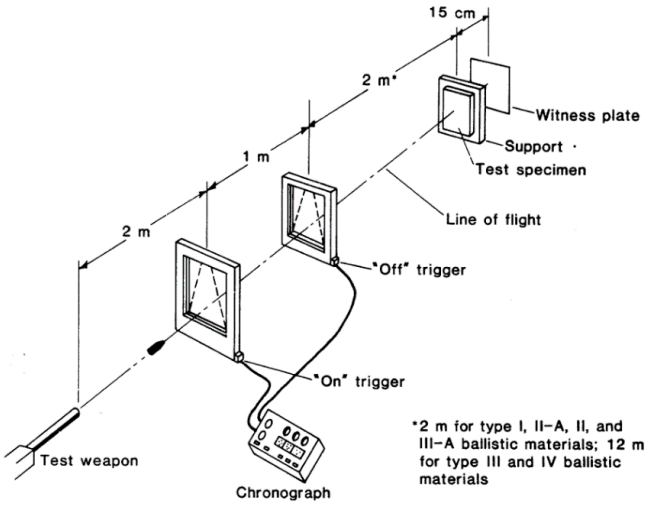
ระดับภัยคุกคาม	ขนาด/ชนิดกระสุนทดสอบ	น้ำหนักของลูกกระสุนเกรน (กรัม)	ความเร็วกระสุน ±30ฟุต/วินาที (±9.1เมตร/วินาที)	จำนวนนัดที่ยิงผ่านเกณฑ์	ปืนทดสอบ
		158 เกรน	880 ฟุต/วินาที		
	.38 Special LRN	(10.2 กรัม)	(268 เมตร/วินาที)		
2A	9 mm.FMJ RN	124 เกรน	1120 ฟุต/วินาที	5	ปืนพก หรือ ลำกล้องทดสอบ
		(8.0 กรัม)	(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)	(878เมตร/วินาที)		

2.2.3 การทดสอบ [5]

2.2.3.1 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° เตรียม

แผ่นพยานและกำหนดจุดยิง (Marking) ให้ครอบคลุมพื้นที่ยิง 12×12 นิ้ว (305×305 มม.) ของเกราะที่จะทดสอบครั้งนี้ให้จัดวางอุปกรณ์ต่างๆได้แก่ฉากจับเวลา เกราะทดสอบ และแผ่นพยานให้อยู่ในแนวตั้งฉากกับวิถีกระสุนตามรูปที่ 2.3



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

2.2.3.2 หลักการทั่วไปในการยิงทดสอบเกราะ

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

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

ตารางที่ 2.2 ตารางสรุปการวินิจฉัยการปฏิบัติต่อผลการยิงทดสอบเกราะ [5]

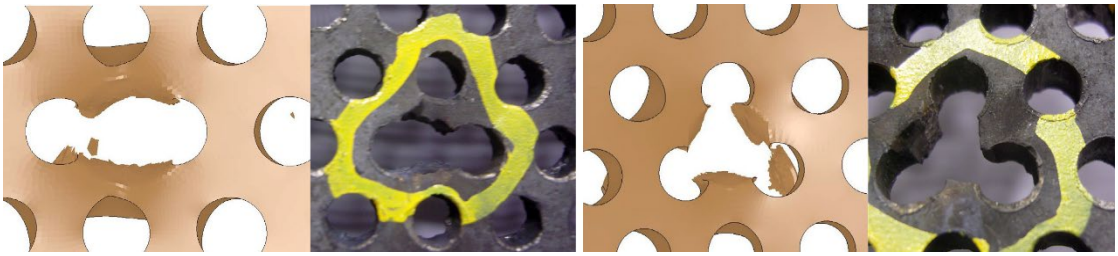
คำนิยาม	กรณีที่	ความเร็วกระสุน	ระยะห่างของรอยยิง	ทะลุผ่าน	ผลการวินิจฉัย
นัดที่ยิงผ่านเกณฑ์	-	ปกติ/สูง	ไม่คำนึง	ไม่ทะลุ	ดำเนินต่อไปได้ปกติ
นัดที่ยิงไม่ผ่านเกณฑ์	-	ปกติ/ต่ำ	ได้	ทะลุ	ให้ยุติการยิงทดสอบ
	1	สูง	ไม่คำนึง	ทะลุ	ให้ยิงทดสอบแก้มือ
	2	ปกติ	ไม่ได้	ทะลุ	
	3	ต่ำ	ไม่ได้	ทะลุ	
	4	ต่ำ	ไม่คำนึง	ไม่ทะลุ	

2.2.3.3 การยิงทดสอบเกราะที่เป็นผลิตภัณฑ์ขนาดใหญ่ เช่น ตู้ยามหุ้มเกราะ ยานหุ้มเกราะ และห้องนิรภัย เป็นต้น ให้พิจารณาประยุกต์เกี่ยวกับลักษณะของการเตรียมการทดสอบอุปกรณ์ต่างๆ และวิธีการในการยิงทดสอบให้เหมาะสมกับสถานการณ์ได้ตามความจำเป็นและเหมาะสม

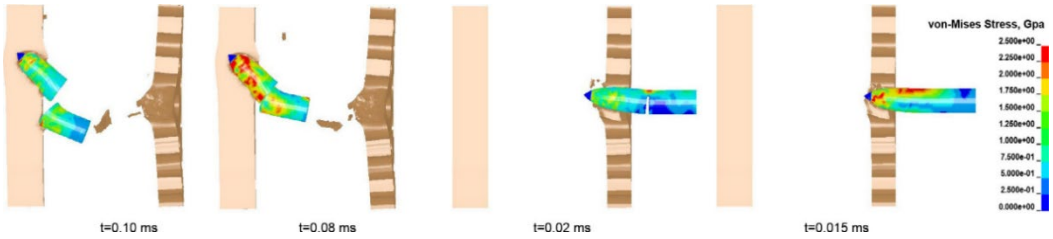
2.2.3.4 การแก้ไขรายละเอียดทางเทคนิคในการทดสอบ ให้คณะอนุกรรมการกำหนดมาตรฐานยุทโธปกรณ์กระทรวงกลาโหมว่าด้วยเกราะกันกระสุน สามารถแก้ไขเปลี่ยนแปลงรายละเอียดทางเทคนิคในการทดสอบในส่วนที่มิใช่สาระสำคัญได้ โดยใช้ดุลพินิจพิจารณาให้เหมาะสมกับความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีและสถานการณ์ที่เปลี่ยนแปลงไป แล้วรีบรายงานให้คณะกรรมการกำหนดมาตรฐานยุทโธปกรณ์กระทรวงกลาโหมทราบ

2.3 การทบทวนวรรณกรรม

Namık Kılıc และคณะ [7] ในบทความนี้ กลไกการเอาชนะที่สำคัญบางประการของแผ่นเพลทที่มีความแข็งสูง 7.62 ตรวจกระสุนเจาะเกราะ 54 นัด ผลการทดลองและตัวเลขระบุได้กลไกการเอาชนะสามแบบมีผลกับแผ่นเกราะที่มีรูพรุนซึ่งเป็นแรงที่ไม่สมมาตรทำให้หัวกระสุนเบี่ยงเบนไปจากวิถีที่ตกกระทบ แกนกระสุนหัก และสันจมูกแกนกระสุนสึกกร่อนการทดสอบเบื้องต้นดำเนินการกับแผ่นเกราะเสาหินที่มีความหนา 9 และ 20 มิลลิเมตร เพื่อยืนยันความเที่ยงตรงของการจำลองและพารามิเตอร์แบบจำลองวัสดุ ลักษณะสุ่มของการทดสอบขีปนาวุธแผ่นเกราะที่มีรูพรุนได้รับการวิเคราะห์ตามโซนการกระแทกของกระสุนโดยคำนึงถึงรู จากสถานการณ์ต่างๆ แบบจำลองความล้มเหลวของสัญลักษณ์แสดงหัวข้อย่อยถูกตรวจสอบเพิ่มเติมเพื่อระบุกลไกของความล้มเหลวของกระสุน ข้อตกลงระหว่างตัวเลขและผลการทดลองมีนัยสำคัญเพิ่มขึ้นโดยรวมถึงเกณฑ์ความล้มเหลวของกระสุนและเกณฑ์การสึกกร่อนของจมูกกระสุนเข้าไปในการจำลอง ดังที่แสดงในผลลัพธ์ ข้อตกลงที่ดีระหว่างการจำลอง Ls-Dyna และข้อมูลการทดลองได้สำเร็จและแสดงให้เห็นกลไกการเอาชนะของแผ่นเพลทที่มีรูพรุนอย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 และ 2.5

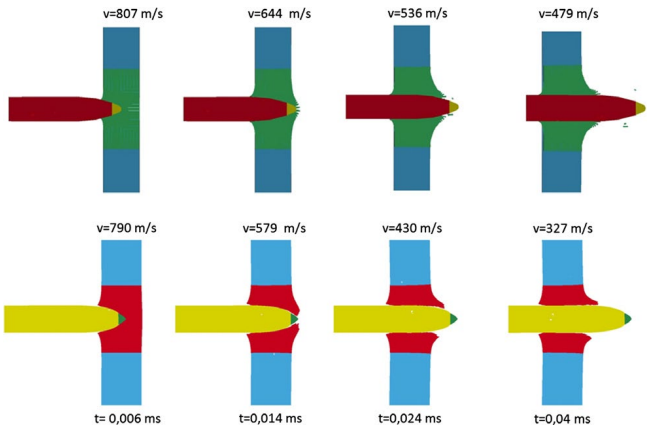


รูปที่ 2.4 เปรียบเทียบผลการเจาะทะลุเกราะด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลอง [7]



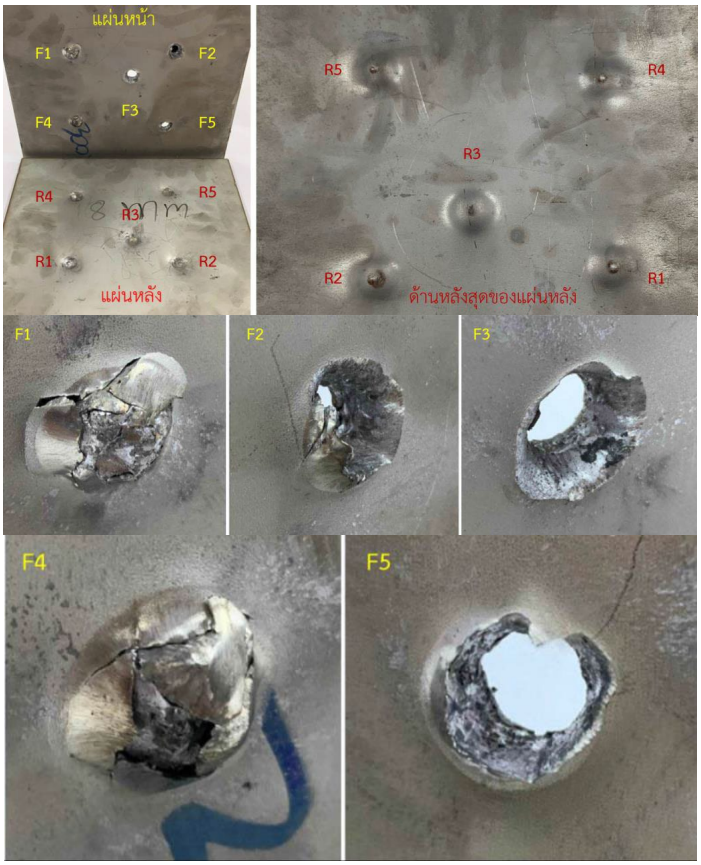
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ความเค้น Von-Mises ในแกนกระสุน และทิศทางการเลี้ยวเบนของกระสุน [7]

Namık Kılıc and Bulent Ekici [8] แม้ว่าจะมีชุดเกราะน้ำหนักเบาขั้นสูง แต่เหล็กกล้าความแข็งสูงในทางการทหารยานเกราะมักถูกใช้เพื่อป้องกันขีปนาวุธด้วยต้นทุนที่ค่อนข้างต่ำและเป็นวัสดุที่น่าสนใจเนื่องจากมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในโครงสร้างรถยนต์ ในการศึกษานี้ กระสุนจำกัดที่ 500 เหล็กเกราะ HB ถูกกำหนดเทียบกับกระสุนแกนเหล็กชุบแข็ง 7.62 มม. 54R B32 API Lagrange และเรียบการจำลองอุทกพลศาสตร์ของอนุภาค (SPH) ดำเนินการโดยใช้แบบจำลอง 3 มิติของกระสุนและความแข็งสูงเป้าหมายเกราะ ทำการทดสอบการเจาะเกราะความหนา 9 และ 20 มม. เพื่อตรวจสอบการจำลองวิธีการ นอกจากนี้ยังมีการทดสอบวัสดุสำหรับเหล็กเกราะและแกนเหล็กชุบแข็งของกระสุนด้วยพัฒนาความสัมพันธ์เชิงสร้างสรรค์ของจอห์นสัน-คุกสำหรับทั้งแบบจำลองความแข็งแกร่งและความล้มเหลว สุดท้ายเป็นผลจากการจำลองเชิงตัวเลข 3 มิติพร้อมแบบจำลองกระสุนและเป้าหมายอย่างละเอียดถูกนำมาเปรียบเทียบกับการทดลองการศึกษาบ่งชี้ว่าขีดจำกัดขีปนาวุธสามารถคาดการณ์เชิงปริมาณได้ดีโดยไม่ขึ้นกับการเลือกวิธีการจำลอง แต่ความแตกต่างในเชิงคุณภาพมีให้เห็นระหว่างการเจาะทะลุและการแยกส่วนดังที่แสดงในผลลัพธ์ ข้อตกลงที่ดีระหว่างการจำลอง Ls-Dyna และข้อมูลการทดลองคือทำได้โดยสูตร Lagrange ด้วยโมเดลกระสุนเต็ม ผลการวิเคราะห์ตามรูปที่ 2.6

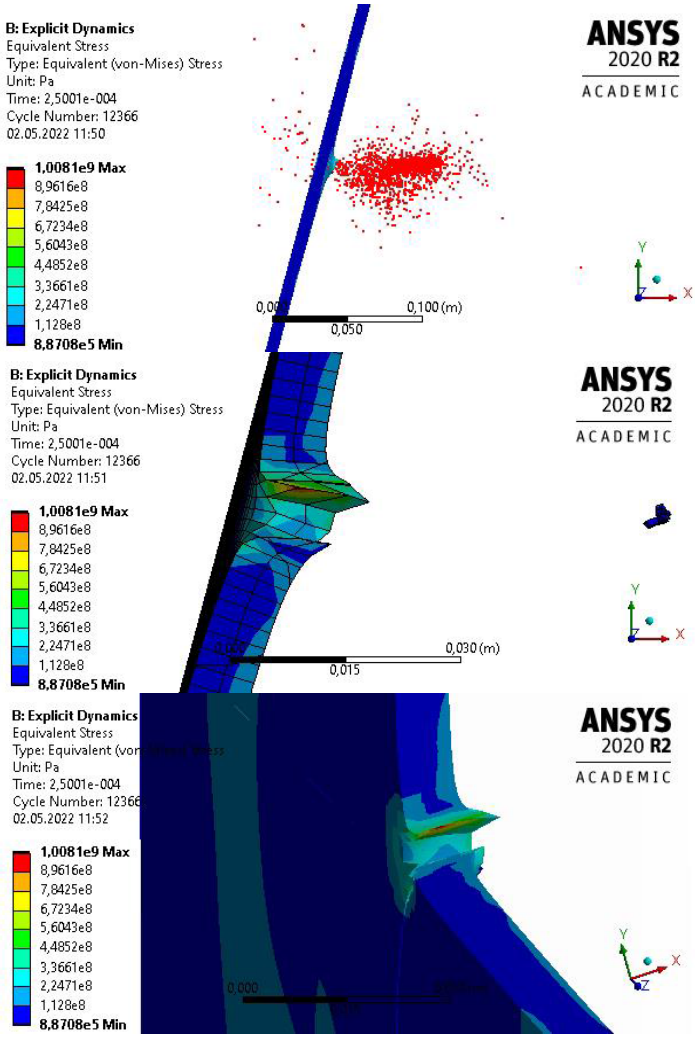


รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนรูปสำหรับการเจาะเกราะ 9 มม.SPH แถวที่ 1และการแบ่งลากรองจ์แถวที่ 2 [8]

วิสา คร้ามอ่ำ [9] จากการทบทวนงานวิจัยนี้สรุปได้ว่าการใช้มาตรฐานการทดสอบ NIJ ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ Ansys วัสดุที่ใช้สร้างแผ่นเกราะโลหะกันกระสุน เป็น SKD11 และ SUS304 ประกอบซ้อนกัน วิธีการประกอบแผ่นเกราะโลหะกันกระสุนจะใช้กระบวนการเชื่อมติดแผ่นโลหะ สร้างแบบจำลองเกราะกันกระสุนแบบ 3 มิติ ด้วยโปรแกรม SolidWorks ในรูปแบบของ Part ที่เป็น Multibody จะได้แผ่นโลหะขนาดความกว้างxความยาวเท่ากับ 300 x 300 mm ที่ความหนาต่างๆ วิเคราะห์แผ่นเกราะกันกระสุนด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ Ansys/Explicit ต้องกำหนดสมบัติของวัสดุตามรูปแบบความเสียหายของวัสดุในโปรแกรม Ansys / Engineering Data โดย SKD11 มีรูปแบบความเสียหายตามทฤษฎีของ Johnson-Cook Strength, กระสุนที่ทำจากทังสเตนคาร์ไบด์ มีรูปแบบความเสียหายตามทฤษฎี Johnson-Holmquist (JH-2) รูปแบบการวิเคราะห์ถูกกำหนดบนตัวแปรสำคัญคือ ค่าความหนาของแผ่นเกราะ การซ้อนกันของแผ่นเกราะสองชนิด ชนิดของวัสดุที่ทำเกราะ และมุมการยิงเข้าหาแผ่นเกราะ เปรียบเทียบผลจากวิธีการทดลองและไฟไนเอลิเมนต์ด้วยลักษณะการเสียหายของแผ่นเกราะ ระยะการนูนของแผ่นเกราะที่ผ่านการยิง เป็นต้น ซึ่งจากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่ามีความสอดคล้องกันดังแสดงรูปที่ 2.7 และรูปที่ 2.8

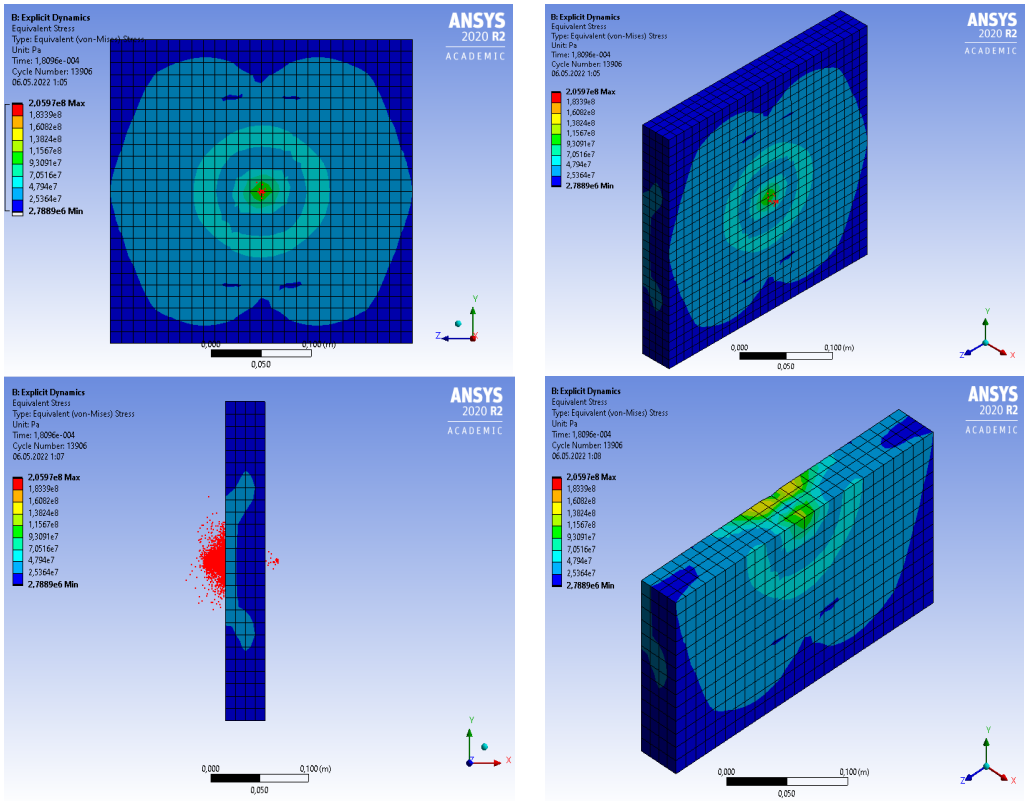


รูปที่ แสดงcผjนเกราะวัสดุ Stainless Steel (SS304) ทำการซ้อน 2 ชั้นทดสอบยิงจริง ตามมาตรฐาน NIJ 3 [9]



รูปที่ 2.7 ลักษณะความเสียหายของแผ่นเกราะ SUS304 หนา 8 mm ที่มุมปะทะ 15° [9]

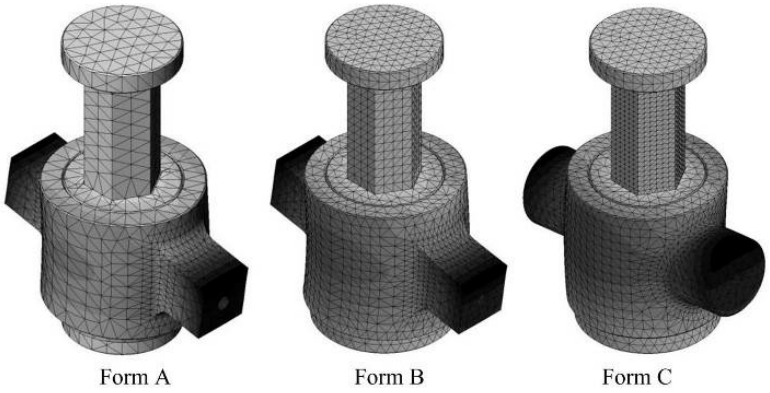
ว่าที่ร้อยโท ไมตรี ถาวรสิน [10] จากการทบทวนงานวิจัยนี้สรุปได้ว่า มาตรฐาน NIJ ระดับ 3 ความเร็วกระสุนที่ 838 m/s โดยไม่คิดแรงเสียดทานอากาศและจากการซ้อนแผ่นเกราะสองชั้นโดยไม่มีช่องว่างระหว่างแผ่นแบบไม่คิดแรงเสียดทานระหว่างผิว ซึ่งการสร้างรูปแบบของเมชในการจำลองนี้ใช้แบบ Hexahedral ขนาด 0.5 มิลลิเมตร ที่กระสุนเพื่อลดระยะเวลาการประมวลผลของคอมพิวเตอร์และค่าการคลาดเคลื่อน ผลความเสียหายและความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุ ซึ่งการเจาะทะลุ และรูปแบบความเสียหาย โดยที่ SUS304 ที่มีความหนาตั้งแต่ 30 มิลลิเมตร ขึ้นไป มีความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุ ในขณะที่ เกราะ 2 ชั้น วัสดุหน้ามีความหนาเพียง 20 มิลลิเมตร และวัสดุเกราะแผ่นหลังที่มีความหนา เพียง 8 มิลลิเมตร หรือ วัสดุทังสเตนคาร์ไบด์และสแตนเลส วัสดุเกราะแผ่นหน้ามีความหนาเพียง 16 มิลลิเมตร และวัสดุเกราะแผ่นหลังที่มีความหนาเพียง 16 มิลลิเมตร ก็สามารถต้านทานการทะลุของกระสุนได้แล้ว ในขณะเดียวกันที่มุมองศาที่มากขึ้นนั้น ส่งผลให้แผ่นเกราะกันกระสุนมีความสามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนเพิ่มขึ้นไปด้วย



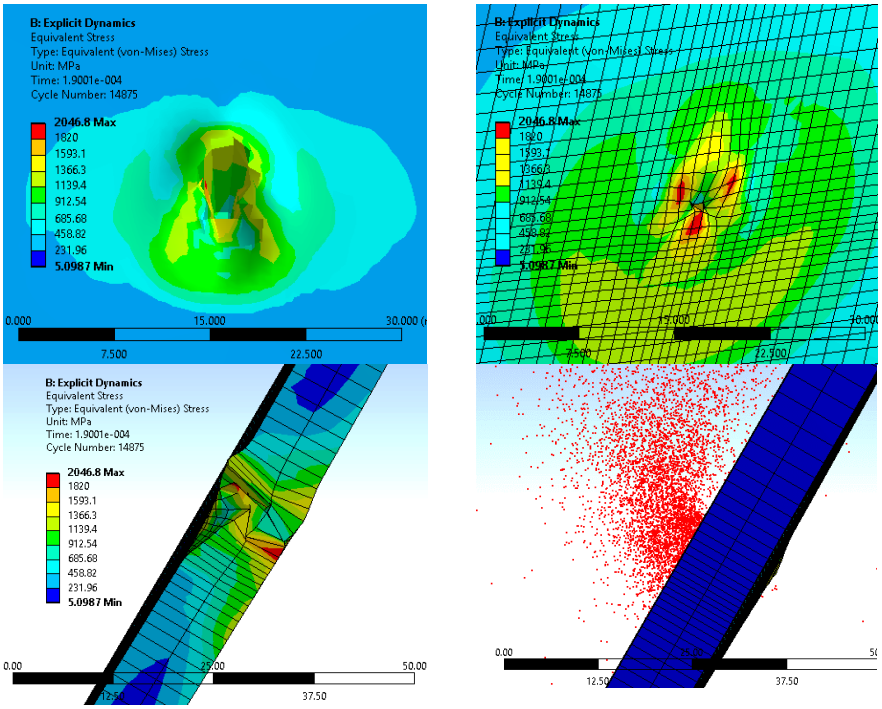
รูปที่ 2.8 ผลการจำลองความเสียหายแผ่นเกราะกันกระสุนวัสดุสแตนเลส SUS304 หนา 40 มิลลิเมตร มุมปะทะ 0 องศา [10]

ชัยวัฒน์ ไชยมหาพฤกษ์ [3] จากการทบทวนงานวิจัยนี้สรุปได้ว่า พบว่าความหนาแน่นของ Green Compact มีความไม่สม่ำเสมอเชิงปริมาตร ความหนาแน่นจะมีค่าสูงมากในบริเวณของอนุภาคผงที่อยู่ใกล้กับแกนอัดที่เคลื่อนที่ได้ เช่น ในกรณีการอัดแบบแกนเดียวนั่นหมายความว่าจะมีแกนอัดหนึ่งแกนอยู่กับที่แกนอัดอีกตัวหนึ่งจะเป็นตัวเคลื่อนที่ อนุภาคผงที่อยู่ใต้แกนอัดที่เคลื่อนที่จะมีความหนาแน่นที่สูง ในขณะที่อนุภาคผงที่อยู่บริเวณแกนอัดที่ไม่เคลื่อนที่จะมีความหนาแน่นต่ำ ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของความหนาแน่นในเชิงความยาวที่แตกต่างอย่างมาก การวิเคราะห์ผงด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นลักษณะพื้นผิวทางกายภาพของอลูมิเนียมออกไซด์ Calcined Al2O3 B grade พบว่าลักษณะสัณฐานของผงอลูมิเนียมออกไซด์มีลักษณะเป็นแผ่นกลมบาง ขนาดเฉลี่ย 5 ไมครอน มีอลูมิเนียมออกไซด์เป็นส่วนประกอบ 98.15 % ตัวแปรที่มีผลต่อการได้มาซึ่งแผ่นเกราะเซรามิกส์ที่ดีนั้น ประกอบด้วย 1) อุณหภูมิการเผาผนึก 2) ระยะเวลาในการเผาผนึก 3) แรงอัดขึ้นรูปในกระบวนการอัดขึ้นรูปแห้ง 4) ความหนาของแผ่นเกราะที่อัดขึ้นรูป 5) สารเติมแต่งช่วยในการขึ้นรูป 6) ขนาดอนุภาคผงเซรามิกส์ 7) ความบริสุทธิ์ของอลูมิเนียมออกไซด์ (อลูมิน่า) แผ่นเกราะเซรามิกส์ติดตั้งโดยการวางเรียงซ้อนกันลงบนแผ่นเส้นใยพอลิเมอร์น้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (UHMWPE-fiber) และใช้ซิลิโคนชนิดพิเศษเป็นตัวเชื่อมเข้าด้วยกันและจะได้แผ่นเกราะเซรามิกส์กัน

กระสุนด้วยวัสดุเชิงประกอบ จากนั้นนำไปทดสอบการยิงกระสุนตามมาตรฐาน NIJ 3 พบว่าสามารถต้านทานการยิงได้โดยไม่ทะลุ และสามารถต้านทานได้ในระดับ NIJ 4 โดยต้องปรับเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ ดังรูปที่ 2.9



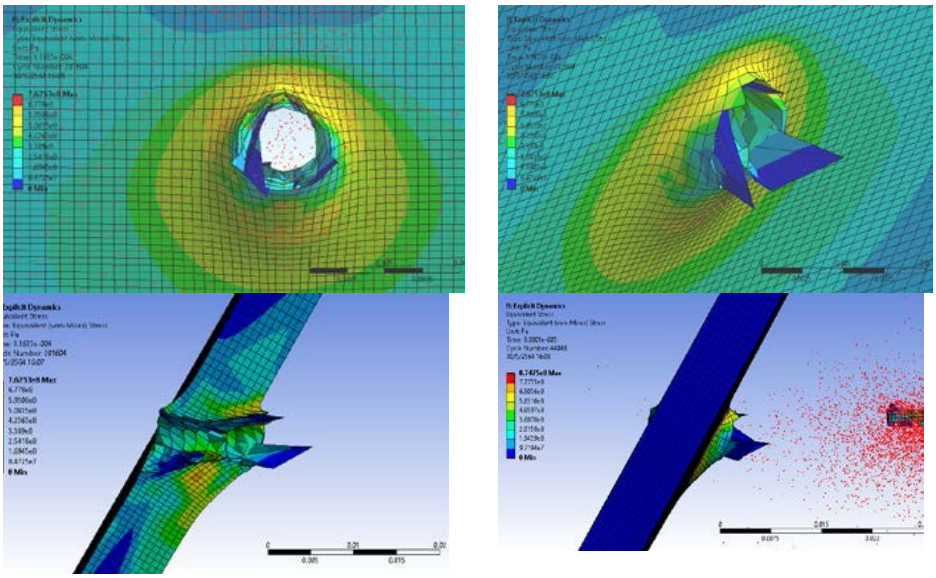
รูปที่ 2.9 ผลการวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติแบบรูปที่ 5 ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [3]



รูปที่ 2.10 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 10 มิลลิเมตร มุมเอียง 30 องศา [2]

นวพล กลางทัพ [2] จากการทบทวนงานวิจัยนี้สรุปได้ว่าเป็นการจำลองตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 4 ความเร็วกระสุน 880 เมตรต่อวินาที ซึ่งไม่คิดแรงเสียดทานอากาศ การซ้อนแผ่นเกราะสอง

ชั้นซึ่งติดกันแบบไม่คิดแรงเสียดทานระหว่างผิว การสร้างรูปแบบของเมชเป็นแบบ Hexahedral ขนาด 0.5 มิลลิเมตร ตัวแปรที่มีผลต่อการวิเคราะห์แผ่นเกราะกันกระสุน 1. ชนิดของวัสดุ 2. ความเร็วของกระสุน 3. มุมกระแทกของกระสุนเข้าที่แผ่นเกราะ 4. พารามิเตอร์ความหนาของแผ่นเกราะกันกระสุน 5. ขนาดของเมชผลจากการจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดลองโดยความโตของเส้นผ่านศูนย์กลางรอยเจาะของกระสุนและรอยนูนที่ผิวด้านหลังแผ่นเกราะซึ่งมีความสอดคล้องกันจึงแสดงให้เห็นว่าการจำลองด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถคาดการณ์ความเสียหายของแผ่นเกราะกันกระสุนได้ ช่วยลดงบประมาณในการวิจัยและระยะเวลาในการวิจัยแผ่นเกราะกันกระสุนได้ การเปรียบเทียบการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการจำลองที่ได้จากการทบทวนวรรณกรรมซึ่งผลการจำลองมีความสอดคล้องกันโดยลักษณะการเจาะทะลุของแผ่นเกราะ ความเร็วของกระสุนในการจำลอง พารามิเตอร์ความหนาของแผ่นเกราะที่เปลี่ยนแปลงไปจนสามารถต้านทานการเจาะทะลุความเร็วที่เหลือของกระสุนหลังกระแทกเข้าที่แผ่นเกราะ ดังนั้นที่รอยเจาะทะลุบริเวณด้านหลังของ M. A. Iqbal กระสุนเป็นรูปทรงหัวปลายแหลมเจาะทะลุแผ่นเกราะที่มุมเอียง 0, 15 และ 30 องศา ตามรูปที่ 2.10 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 10 มิลลิเมตร มุมเอียง 30 องศา

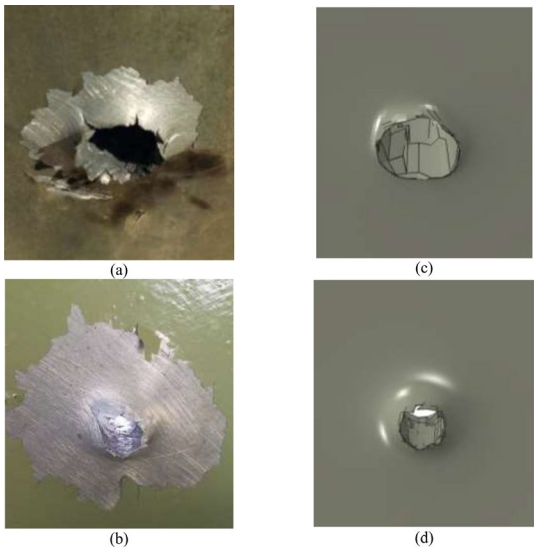


รูปที่ 2.11 แผ่นเกราะอะลูมิเนียม ความหนา 8 mm มุม 30 องศา [11]

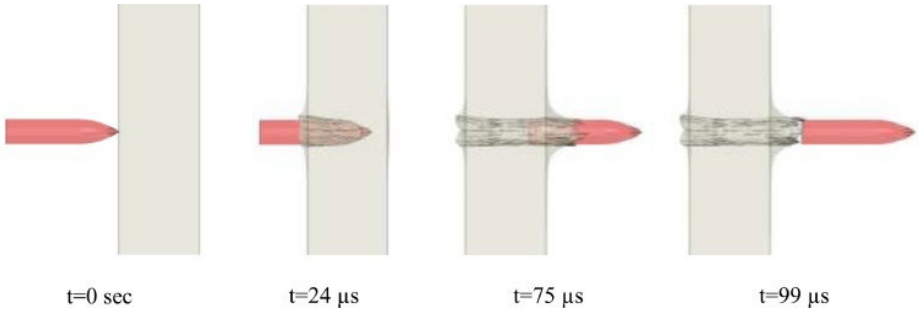
อนุชา สายเจริญ [11] จากการทบทวนงานวิจัยนี้สรุปได้ว่า วัสดุเกราะกันกระสุนที่ใช้จากการจำลองนี้มี 2 ชนิดคือ 1. SKD11 2. อลูมิเนียม AL7075 การจำลองแบ่งออกเป็น 1.การจำลองของแผ่นเกราะชั้นเดียว 2.การจำลองแผ่นเกราะแบบซ้อน ขนาดของแผ่นเกราะนั้นมีขนาด 6, 8, และ 10 mm โดยมุมองศาของการยิงเกราะกันกระสุนนั้นมีมุมที่ 0, 15, 30, และ 45 องศา จากการใช้โปรแกรม “Ansys/Explicit Dynamics” โดยการเคลื่อนที่ของวัตถุด้วยความเร็วสูงมากกว่า 100 m/s

และการจำลองนี้ใช้ทฤษฎีความเสียหาย Johnson Cook Strength Model (JC), Johnson-Holmquist Strength Model (JH-2) และ Steinberg Guinan Strength Model ในการกำหนดรูปแบบความเสียหายของแผ่นเกราะกันกระสุนวัสดุของกระสุนที่กำหนดคือทังสเตนคาร์ไบด์ การจำลองแบบแผ่นเดียวและแผ่นซ้อนนั้น ศึกษาพฤติกรรมของความเสียหายของแต่ละวัสดุว่าความเสียหายของผิวเกราะ ความแข็งแรงของวัสดุ ความเค้น ความเร็วหลังจากการกระจายตัวของกระสุนนั้นมีมากเพียงใดแสดงให้เห็นว่าการจำลองด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นสามารถคาดการณ์ความเสียหายของแผ่นเกราะกันกระสุนได้ เพื่อช่วยในการลดงบประมาณในการวิจัยและระยะเวลาในการวิจัยแผ่นเกราะกันกระสุน

M. WasifAlia และคณะ [12] ได้ทำการตรวจสอบและการคำนวณตัวเลขของการป้องกันขีปนาวุธโดยการรวมกันของแผ่นเกราะปรูและฐาน ใช้กระสุนเจาะเกราะ 7.62 มิลลิเมตร ในระหว่างการทดลองเพื่อหาค่าการตอบสนองของขีปนาวุธของแผ่นเกราะฐานอะลูมิเนียมและการรวมกันของแผ่นเกราะแผ่นเหล็กและแผ่นอลูมิเนียม กระสุนเจาะเกราะสามารถทะลุแผ่นเกราะฐานได้ในขณะที่การรวมแผ่นเกราะแผ่นเจาะและฐานสามารถหยุดการเจาะทะลุเกราะเจาะกระสุนได้ ได้มีการพัฒนาวิธีการแบบจำลององค์ประกอบแบบจำกัดเพื่อหารูปแบบการปะทุของชุดแผ่นเกราะและพรุน การแตกหักแบบเปราะที่เกิดจากการดัดของแกนกระสุนอันเนื่องมาจากผลกระทบที่ไม่สมมาตรถูกคาดการณ์ไว้และชิ้นส่วนที่เป็นผลของกระสุนปืนไม่สามารถเจาะแผ่นเกราะฐานได้ หลุมอุกกาบาตถูกสร้างขึ้นบนพื้นผิวของแผ่นเกราะฐานจากผลกระทบของชิ้นส่วนกระสุนปืน แบบจำลองเชิงตัวเลขสามารถทำนายการเติบโตของรูและการเจาะทะลุของกระสุนปืนได้เมื่อแผ่นเกราะฐานได้รับผลกระทบจากกระสุนเท่านั้น ดังรูปที่ 2.12 และ 2.13

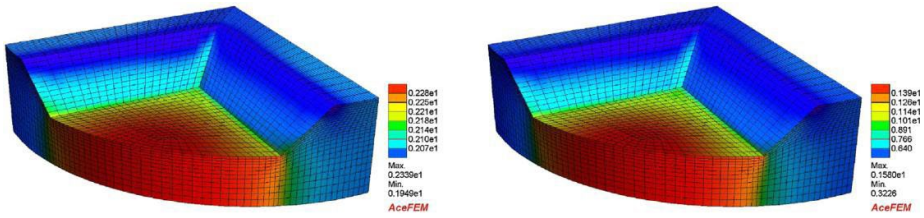


รูปที่ 2.12 รูปแบบ (a) ผลกระทบและ (b) ส่วนปลายของฐานเกราะแผ่นเกราะ ปรากฏการณ์ที่คล้ายกันไม่ได้รับการทำนายโดยแบบจำลองตัวเลขที่ (c) ผลกระทบและ (d) ส่วนปลาย [12]

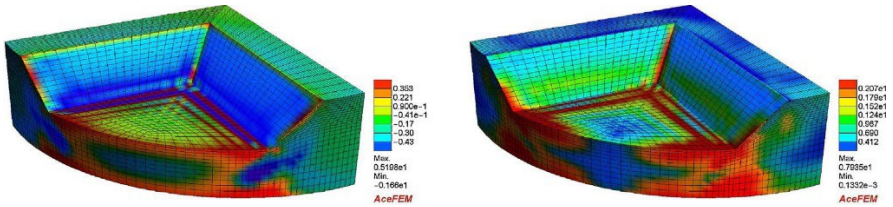


รูปที่ 2.13 การเจาะทะลุของกระสุนผ่านแผ่นเกราะฐานในช่วงเวลาต่างๆ [12]

ณัฐพงศ์ มีสานุ [13] ได้ทำการศึกษาพารามิเตอร์ในการขึ้นรูปแผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนและสร้างโมเดลแผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนสาหรับรถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะ โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เลือกใช้คือ Ansys/Explicit Dynamic โมเดลแผ่นเกราะกันกระสุนมีรูปทรงเว้าด้วยวัสดุ SKD11 ซึ่งส่งผลให้ทิศทางของกระสุนเปลี่ยนแปลงเมื่อกระสุนกระทบกับแผ่นกันกระสุนที่ความเร็ว 880 เมตรต่อวินาที ตามมาตรฐาน NIJ 4 กระสุนทาจากทังสเตนคาร์ไบด์และแผ่นเกราะเซรามิกส์มีขนาด 300×300 มิลลิเมตร และมีความหนา 14, 16, 18 และ 20 มิลลิเมตร พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาการขึ้นรูปแผ่นเกราะเซรามิกส์ประกอบด้วยความหนาของแผ่นเกราะแรงอัด ซึ่งส่งผลต่อการกระจายความหนาแน่นของกรีนคอมแพค แผ่นเกราะเซรามิกส์มีรูปร่างเป็นหกเหลี่ยมและมีหน้ายุบ (Concave Bulletproof Plate) ตามรูปที่ 2.14 และ รูปที่ 2.15



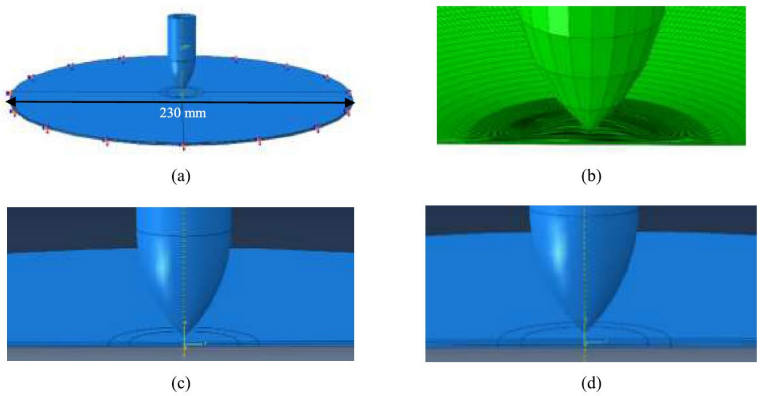
รูปที่ 2.14 แบบจำลองการกระจายความหนาแน่น (เป็น ก./ลบ.ซม, ซ้าย) และการเชื่อมโยงต่อกัน (เป็น MPa, ขวา) [13]



รูปที่ 2.15 แบบจำลองการกระจายความเค้นตกค้าง (เป็น MPa), ภาพซ้ายเป็นภาคตัดขวางการดีดคืน ตัว และภาพขวาคือส่วนเบี่ยงเบนแปรผัน [13]

Woei-ShyanLee และคณะ [14] 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 แต่เป็นทรงกลมที่อุณหภูมิสูงภายใต้สภาวะที่ผ่านการทดสอบการแตกหักของวัสดุดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าวัสดุดังกล่าวไม่สามารถอบได้ง่ายยกเว้นในกรณีที่มีอุณหภูมิที่ 300 องศาเซลเซียส ที่เกิดการแตกตัวของพอลิเทนนินอลด้วยการสะสมของออสเทนไนท์

Gupta et al. [15] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการกระจายพลังงานในการเปลี่ยนแบบพลาสติกของชิ้นงานอลูมิเนียมแบบบางภายใต้สภาวะที่ถูกแรงกระแทกจากการยิงกระสุนปืน โดยทำการทดสอบจริงและทดลองเชิงตัวเลข โดยใช้อลูมิเนียมบางที่ผ่านการชุบแข็ง มีการกำหนดความเร็วของลูกกระสุนเริ่มตั้งแต่ 100 m/s ถึง 500 m/s และมีการใช้กล้องความเร็วสูงในการวิเคราะห์การเสียรูปของแผ่นอลูมิเนียม จากการผลการทดลองพบว่า ชิ้นงานที่หนากว่าจะดูดซับพลังงานมากกว่า ชิ้นงานที่บางกว่าความหนาต่างกัน ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 โมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์ของเป้าหมายได้รับผลกระทบตามปกติ (a) เป้าหมายและโพรเจกไทล์จมูกแบบลักษณะหลังคาโค้ง , (b) เป้าหมายหนา 0.5 มม., (c) เป้าหมายสองชั้น และ (d) เป้าหมายสามชั้น [15]

Corbett และคณะ [16] เปิดเผยว่าอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม มีความแข็งแรงและความเหนียว จุดหลอมเหลวต่ำและมีอัตราความเครียดสูง เหมาะที่จะนำมาประยุกต์เป็นวัสดุเกราะ เป้าหมายในการนำมาใช้งานคือการสร้างให้มีชั้นหลาย ด้วยการใช้วัสดุหลายชนิดร่วมกัน เป็นวิธีการที่จะเพิ่มประสิทธิภาพต่อการปรับปรุงความต้านทานการเจาะเกราะ และปรับปรุงให้มีค่าความแข็งที่ผิวให้สูงขึ้น และต้องออกแบบให้เกิดการเลี้ยวเบนของกระสุนเมื่อเข้ามาปะทะ เป็นการสลายพลังงานจลน์ นี่คือหลักการที่จำเป็นสำหรับวัสดุเกราะ งานวิจัยที่ผ่านมามีการผสมผสานโลหะผสมและโลหะพื้นฐาน (แสตนเลส) เพื่อปรับปรุงวัสดุเกาะ และใช้ในการก่อสร้างยานพาหนะ การเคลือบพื้นผิวโลหะที่มีคาร์ไบด์ เป็นหนทางที่มีประสิทธิภาพในการยืดอายุการใช้งานของส่วนประกอบที่เป็นโลหะในสภาพแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อนหรือลดประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักรกล ระดับการเคลือบคาร์ไบด์ขึ้นอยู่กับของการสลายตัวของคาร์ไบด์ในเมทริกซ์และประเภทของชั้นปฏิกิริยา การทำงานที่กว้างขวางได้รับการดำเนินการสำหรับการผลิตเคลือบป้องกันด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) และทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) โดยใช้เทคนิคการปรับเปลี่ยนพื้นผิวเช่น ใช้พลังงานเลเซอร์สูงละลายและรักษาพื้นผิวในระหว่างกระบวนการนี้เลเซอร์จะละลายพื้นผิวพร้อมกับฝังวัสดุที่เป็นผงคาร์ไบด์ (SiC หรือWC) หรือการรวมกันของผงคาร์ไบด์และวัสดุประสาน (Co, Al หรือ Ni) พื้นผิวประกอบอาจสร้างโดยการผสมผสานอลูมิเนียมขนาดนาโนเป็นอลูมิเนียม AA6082 นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการสึกหรอจะลดลงไปหนึ่งในสาม

บทที่ 3
การดำเนินการวิจัย

จากในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการดำเนินการและวิจัยที่ประกอบด้วยวิธีการดำเนินงานวิจัย ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบ วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ การเปรียบเทียบผลการทดลองกับการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมีรายละเอียดในแต่ละส่วนดังต่อไปนี้

3.1 ระเบียบวิธีวิจัย

3.1.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1.1.1 พิจารณาด้านความพร้อมในการทำวิจัยกับโจทย์วิจัยที่กำหนดไว้ ได้แก่ การทบทวนเครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์การวิจัย และองค์ความรู้เดิม

3.1.1.2 ตั้งโจทย์วิจัย กำหนดวัตถุประสงค์ เป้าหมาย ประโยชน์ที่จะได้รับจากการทำวิจัย

3.1.1.3 ศึกษาบทความ เอกสารรายงานวิจัย เพื่อทบทวนวรรณกรรมจำนวนมากและคัดเลือกบทความที่เกี่ยวข้องกับโจทย์วิจัยทางวิศวกรรมเครื่องกล โดยเน้นไปทางด้านวัสดุศาสตร์และกลศาสตร์วัสดุ

3.1.1.4 ศึกษาเกราะโลหะ แบบรูพรุนและแบบต่างๆ กระสุน ชนิดของวัสดุ วิธีการทดสอบ การออกแบบเกราะกันกระสุน ผ่านการทบทวนวรรณกรรมจากวารสารวิชาการและวิจัย หนังสือ อินเตอร์เน็ต และสิทธิบัตรหรืออนุสิทธิบัตรต่าง ๆ

3.1.1.5 ศึกษาข้อมูลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Ansys Explicit/ Dynamics กระบวนการทำ Pre-Processing ที่ต้องให้ความสำคัญ เช่น การกำหนด Materials Properties, การทำ Element Mesh Control

3.1.1.6 การกำหนดตัวแปร ระเบียบวิธีวิจัย แนวทางวิจัย กรอบการวิจัย และการวางแผน การเตรียมการดำเนินงานทดสอบและวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

3.1.1.7 ออกแบบและสร้างแบบจำลองเกราะกันกระสุนแบบ 3 มิติ ด้วยโปรแกรม Ansys DesignModeler ในรูปแบบของ Part ที่เป็น Multibody

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

3.1.1.9 วิเคราะห์แผ่นเกราะกันกระสุนด้วยโปรแกรม Ansys Explicit/ Dynamics

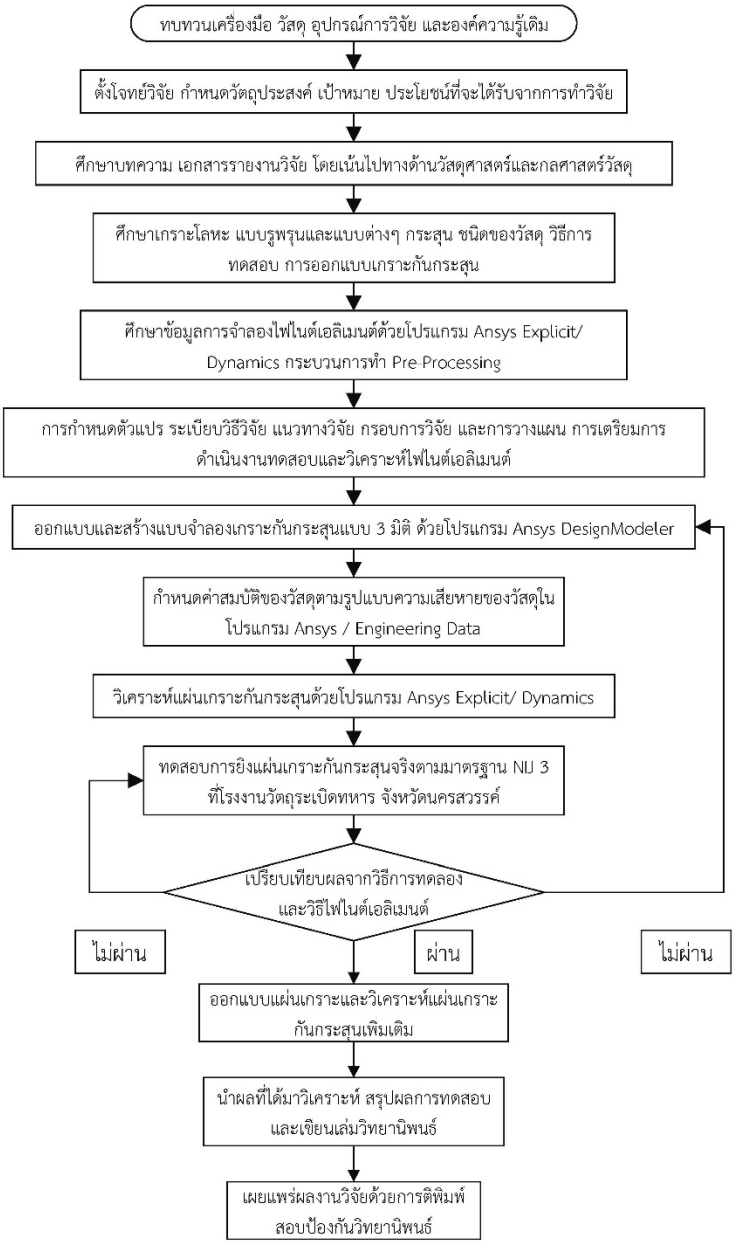
3.1.1.10 ทดสอบการยิงแผ่นเกราะกันกระสุนจริงตามมาตรฐาน NIJ 3 ที่โรงงานวัตถุระเบิดทหาร จังหวัดนครสวรรค์

3.1.1.11 เปรียบเทียบผลจากวิธีการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยลักษณะความเสียหาย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ เป็นต้น

3.1.1.12 ออกแบบแผ่นเกราะและวิเคราะห์แผ่นเกราะกันกระสุนเพิ่มเติมด้วยการสร้างกรณีศึกษาเพิ่มขึ้น

3.1.1.13 นำผลที่ได้มาวิเคราะห์ สรุปผลการทดสอบ และเขียนเล่มวิทยานิพนธ์

3.1.1.14 เผยแพร่ผลงานวิจัยด้วยการตีพิมพ์และสอบป้องกันวิทยานิพนธ์



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

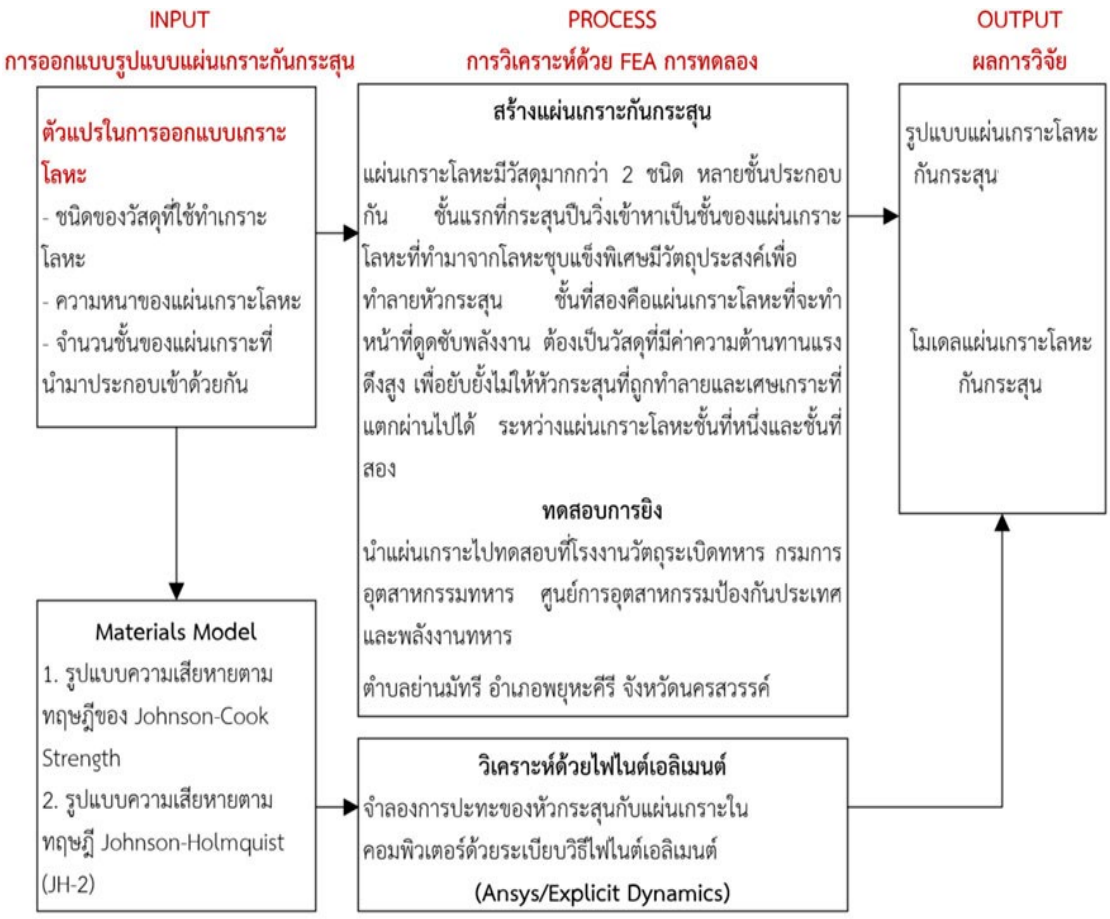
3.1.2.3 โปรแกรม SolidWorks หรือ Ansys DesignModeler

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

3.1.2.5 เครื่อง CNC และเครื่องตัดแผ่นโลหะ

3.1.3 กรอบการวิจัย

งานวิจัยนี้เลือกใช้เครื่องมือในการทำวิจัย ประกอบด้วย การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม Ansys Explicit/Dynamics ร่วมกับการทดลอง ทำการจำลองและทดสอบในบางกรณีเพื่อยืนยันขีดความสามารถในการวิเคราะห์ของโปรแกรมไฟไนเอลิเมนต์ เมื่อได้รูปแบบการดำเนินงานด้วยวิธีไฟไนเอลิเมนต์ที่ถูกต้อง จึงสร้างโมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์กรณีศึกษาที่เป็นแผ่นเกราะโลหะกันกระสุนในกรณีต่างๆ กรอบการวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนด้วยกัน ประกอบด้วย ส่วนของการนำเข้า (Input) เป็นเรื่องของการออกแบบรูปแบบแผ่นเกราะกันกระสุนที่จะต้องกำหนดตัวแปรในการออกแบบแผ่นเกราะ ไม่ว่าจะเป็นชนิดของวัสดุ ความหนา จำนวนชั้นที่นำมาประกอบเข้าด้วยกันจากนั้น จะต้องกำหนดโมเดลวัสดุ เลือกใช้ทฤษฎีความเสียหายให้เหมาะสมตามแต่ชนิดของวัสดุนั้นๆ ส่วนที่สองเป็นส่วนกระบวนการ (Process) ซึ่งประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ การวิเคราะห์ด้วยไฟในต์เอลิเมนต์และการทดสอบการยิงที่โรงงานวัตถุระเบิดทหาร ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์จะต้องสร้างไฟไนต์เอลิเมนต์โมเดลที่ถูกต้อง โดยเปรียบเทียบกับการทดลองการยิง เช่น เปรียบเทียบด้านขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางรูเจาะ รูปแบบความเสียหาย หากผลที่ได้สอดคล้องกันก็จะเข้าสู่กระบวนการที่สามคือผลลัพธ์ที่เป็นการวิเคราะห์ในกรณีศึกษาอื่นๆ แสดงกรอบวิจัยดังรูปที่ 3.2

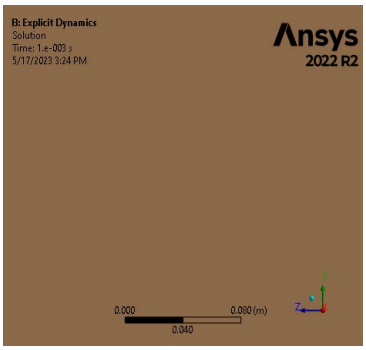


รูปที่ 3.2 กรอบการวิจัย

3.2 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วย ANSYS: Explicit Dynamics

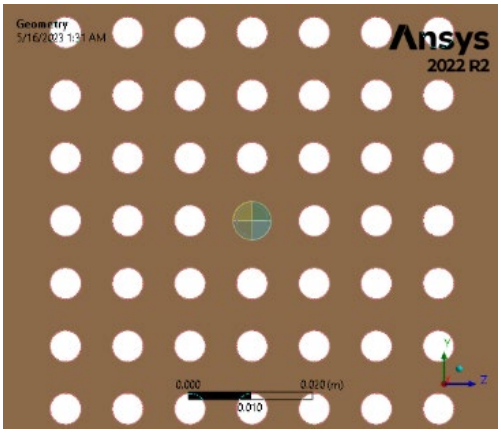
3.2.1 โมเดลแผ่นเกราะกันกระสุนได้ถูกสร้างขึ้น มีขนาดพื้นที่ 300x300 มิลลิเมตร ด้วยความหนา 10 มิลลิเมตร สามารถแบ่งออกเป็น 5 แบบ คือ

3.2.1.1 แบบที่ 1 แผ่นเกราะหน้าเรียบไม่มีรูเจาะหรือไม่มีรูพรุน ซึ่งมีความหนาอยู่ 3 ระดับ คือ 6, 8 และ 10 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.3



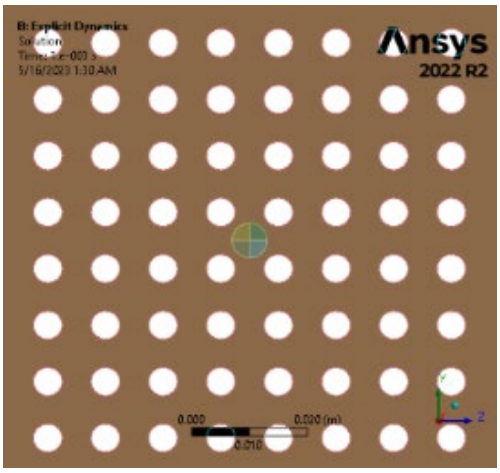
รูปที่ 3.3 แบบที่ 1 แผ่นเกราะหน้าเรียบไม่มีรูเจาะหรือไม่มีรูพรุน

3.2.1.2 แบบที่ 2 แผ่นเกราะได้รับการเจาะรูทะลุผ่านตลอดด้วยรูเจาะที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร และมีระยะพิตช์ระหว่างรูเท่ากับ 10 มิลลิเมตร และกำหนดให้กระสุนพุ่งเข้าปะทะที่ตำแหน่งกลางรูเจาะได้ผลดังรูปที่ 3.4



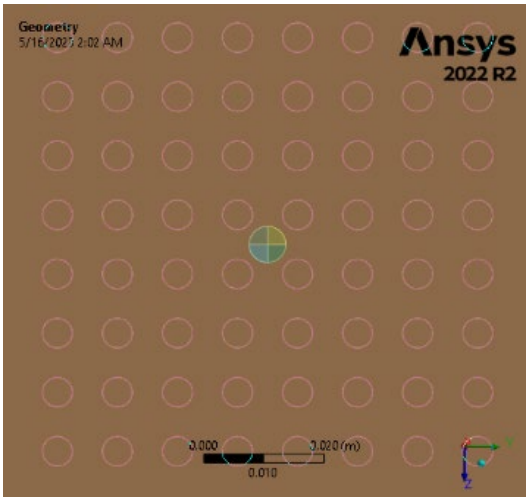
รูปที่ 3.4 แบบที่ 2 แผ่นเกราะได้รับการเจาะรูทะลุผ่านตลอดด้วยรูเจาะ

3.2.1.3 แบบที่ 3 แผ่นเกราะได้รับการเจาะรูเช่นเดียวกับกรณีที่ 2 แต่กระสุนพุ่งเข้าปะทะแผ่นเกราะที่จุดตัดตรงแนวทะแยงของรูเจาะทั้ง 4 รู ได้ผลดังรูปที่ 3.5



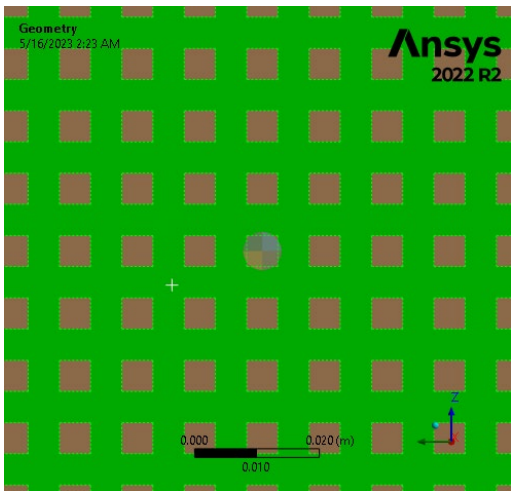
รูปที่ 3.5 แบบที่ 3 แผ่นเกราะได้รับการเจาะรูเช่นเดียวกับกรณีที่ 2 แต่กระสุนพุ่งเข้าปะทะแผ่นเกราะที่จุดตัดตรงแนวทะแยงของรูเจาะทั้ง 4 รู

3.2.1.4 แบบที่ 4 แผ่นเกราะได้รับการเจาะรูลึก 5 มิลลิเมตร (ไม่ทะลุ) ด้วยรูเจาะที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร และมีระยะพิตช์ระหว่างรูเท่ากับ 10 มิลลิเมตร และกำหนดให้กระสุนพุ่งเข้าปะทะแผ่นเกราะที่จุดตัดตรงแนวทะแยงของรูเจาะทั้ง 4 รู ได้ผลดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แบบที่ 4 แผ่นเกราะได้รับการเจาะรูลึก 5 มิลลิเมตร(ไม่ทะลุ

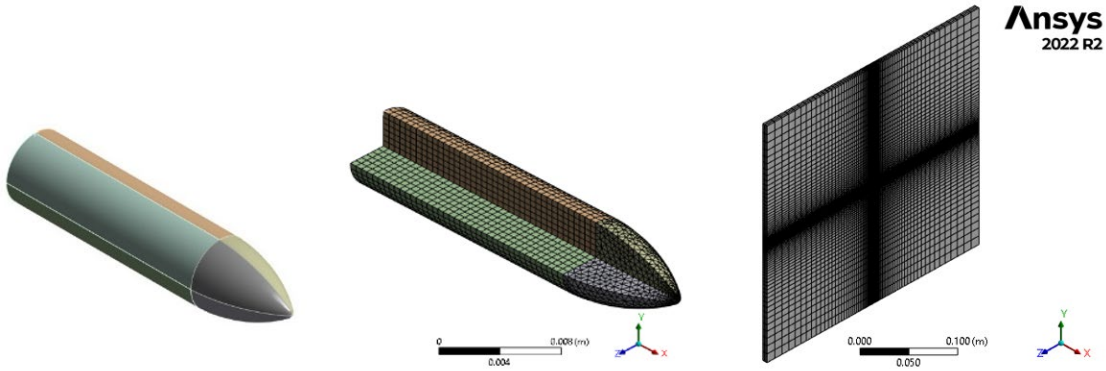
3.2.1.4 แบบที่ 5 แผ่นเกราะได้รับการกัดให้เป็นร่องสี่เหลี่ยมกว้าง 5 มิลลิเมตร ลึก 5 มิลลิเมตร ทั้งแนวนอนและแนวตั้ง กระสุนพุ่งเข้าหาแผ่นเกราะในตำแหน่งที่ไม่มีการกัดร่อง ได้ผลดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แบบที่ 5 แผ่นเกราะได้รับการกัดให้เป็นร่องสี่เหลี่ยมกว้าง 5 มิลลิเมตร ลึก 5 มิลลิเมตร

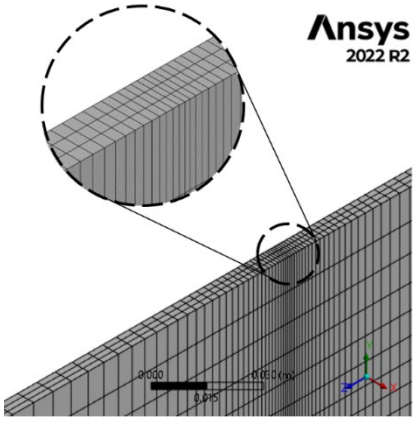
3.2.2 วิธีการเลือกใช้เอลิเมนต์ ด้วยเอลิเมนต์ที่เลือกใช้สำหรับลำตัวทรงกระบอกของกระสุนและแผ่นเกราะควรเป็นเอลิเมนต์ชนิดเฮกซะฮีดรอล (Hexahedral) และหัวกระสุนส่วนที่แหลมควรเป็นเอลิเมนต์ชนิดเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) เพื่อให้เกิดการจัดเรียงและกำหนดชนิดของเอลิเมนต์ได้อย่างง่ายและเหมาะสมโมเดลกระสุนได้รับการออกแบบให้มีชิ้นส่วนแยกจากกันจำนวนแปดชิ้นโดยตัวกระสุนแบ่งออกเป็นสองตอนในส่วนตอนแรกเป็นหัวกระสุนที่มีลักษณะโค้งแหลม ตอนที่สองเป็นลำตัวกระสุนที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกตัน ทั้งสองส่วนจะได้รับการแบ่งในแนวนอนและแนวตั้งทำ

มุม 90 องศา ซึ่งกันและกันส่งผลให้ได้โมเดลกระสุนที่ประกอบรวมกันเป็นจำนวน 8 ชิ้นและมีหน้าสัมผัสติดกันดังรูปที่ 3.8 ก) ในกระบวนการกำหนดหน้าสัมผัสให้กำหนดหน้าสัมผัสด้วย Contacts Bodies เป็นแบบ Bonded ทั้งหมดของกระสุนจำนวน 12 หน้าสัมผัส ภาคตัดของกระสุนเพื่อให้เห็นเอลิเมนต์ด้านในแสดงดังรูปที่ 3.8 ข) และจากรูปที่ 3.8 ค) เป็นการควบคุมขนาดเอลิเมนต์ ให้เกิดการปรับขนาดเอลิเมนต์จากขอบของแผ่นเกราะที่มีขนาดเอลิเมนต์ใหญ่ลู่เข้าไปยังกลางแผ่นเกราะที่มีขนาดเอลิเมนต์ที่เล็กลง ด้วยการกำหนด Bias Type และ Bias Factor เท่ากับ 12 จึงส่งผลให้เห็นว่าเป็นแถบสีดำมืดตรงกลางแผ่น ซึ่งนั่นคือความถี่ของขนาดเอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็ก สำหรับรูปที่ 5 คือการใช้เทคนิคการเพิ่มชั้นเอลิเมนต์ด้วยการกำหนด Number of divisions เท่ากับ 3 คือหมายถึงมีจำนวน 3 ชั้น ซึ่งควรจะกำหนดเท่ากับ 3 เป็นอย่างน้อย กำหนดความเร็วของหัวกระสุนให้พุ่งเข้าแผ่นเกราะด้วยความเร็วตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 เท่ากับ 850 เมตรต่อวินาที ซึ่งในที่นี้คือทิศทางตามแกน +x ทำมุมปะทะกับแผ่นที่ 0 องศา ในทุกกรณีศึกษา จากนั้นกำหนดรูปแบบการวิเคราะห์เป็นแบบ Explicit/Dynamics ด้วยชุดคำนวณ AUTODYN ตั้งค่าการวิเคราะห์ด้วย End Time เท่ากับ 0.001 การแสดงผลการวิเคราะห์ให้เลือกใช้ Equivalent (Von-Mises) Stress



ก) ข) ค)

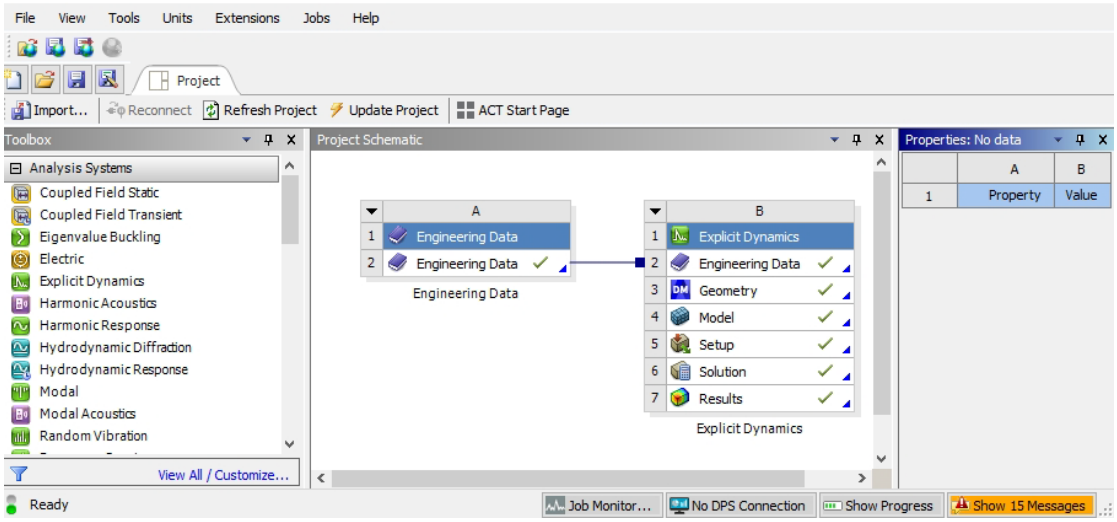
รูปที่ 3.8 ผลลัพธ์จากการกำหนดและแบ่งเอลิเมนต์



รูปที่ 3.9 เทคนิคการควบคุมขนาดและแบ่งเอลิเมนต์

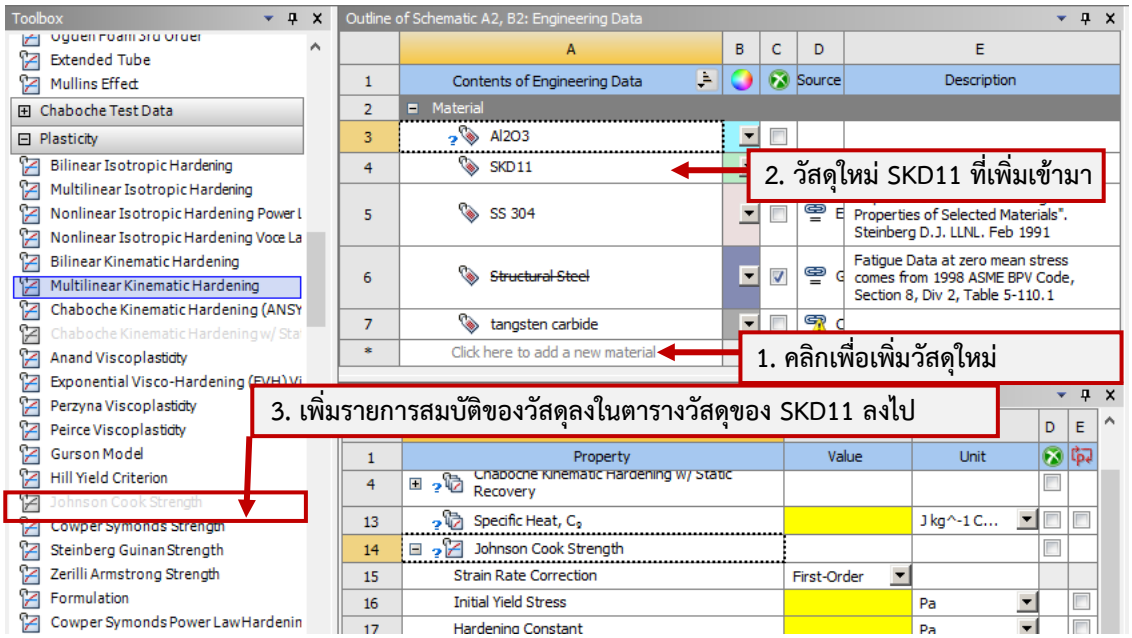
รูปแบบของแผ่นเกราะโลหะกันกระสุนจะได้รับการออกแบบให้เป็นแผ่นซ้อนตั้งแต่ 1-2 แผ่น โดยแผ่นแรกที่กระสุนจะพุ่งเข้าเจาะนั้นจะต้องเป็นแผ่นโลหะที่มีค่าความแข็งสูงที่ผ่านการชุบแข็ง เพื่อทำหน้าที่ในการทำลายหัวกระสุนให้แตกออกจากกัน ยกตัวอย่างวัสดุที่นำมาใช้เป็นแผ่นด้านหน้านี้ คือ ทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) และ SKD11 ที่มีความหนาตั้งแต่ 6, 8, 10, 12 และ 14 มิลลิเมตร สำหรับแผ่นเกราะชั้นที่สองจะทำหน้าที่ในการดูดซับพลังงานจากแรงกระแทกของกระสุนและทำหน้าที่หยุดการเคลื่อนที่ของกระสุนและเศษของแผ่นเกราะแผ่นหน้า โดยเลือกใช้วัสดุเป็น SUS304 ที่มีความหนาเท่ากับ 6 มิลลิเมตร สำหรับกระสุนที่ได้รับการออกแบบเพื่อใช้ในการจำลองและวิเคราะห์ตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 หรือ 4 มีขนาดดังรูปที่ 3.5 ด้วยกระสุน AP 7.62 มิลลิเมตร ซึ่งอ้างอิงขนาดจาก Namık Kılıç . [7], [8] และทำจากวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ (WC)

3.2.3 กระบวนการเตรียมและตั้งค่าการจำลอง (Pre-Processing)การวิเคราะห์เลือกใช้โปรแกรม ANSYS 2020R2 Academic ได้ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือสำคัญในการวิเคราะห์และแสดงผลลัพธ์การจำลองร่วมกับการทดสอบการยิงกระสุนจริง โดยในส่วนของโมดูลที่ใช้วิเคราะห์จะเป็น Explicit Dynamics ที่อยู่ในหน้าต่าง Workbench ดังรูปที่ 3.10 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 [2], [9]-[11]

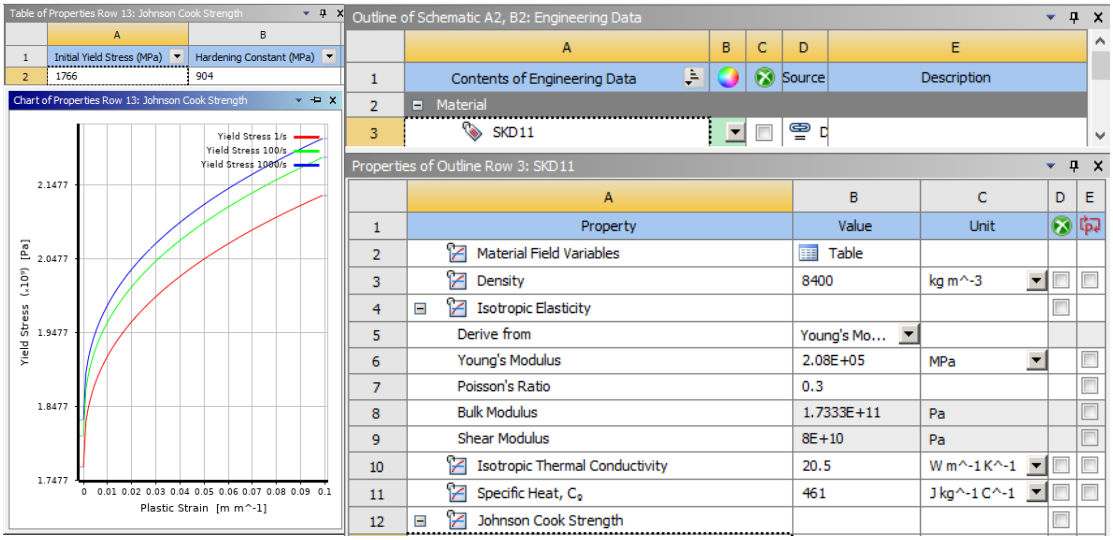


รูปที่ 3.10 User interface ของ ANSYS 2020R2

จากรูปที่ 3.11 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 [2], [9]-[11]



รูปที่ 3.11 ตัวอย่างการกำหนดวัสดุใหม่สำหรับ SKD11 ด้วย Johnson Cook Strength



รูปที่ 3.12 ตัวอย่างการกำหนดสมบัติวัสดุของ SKD11

เมื่อเข้าไปในส่วนของ Engineering Data ให้เพิ่มวัสดุใหม่โดยตั้งชื่อวัสดุตามที่ต้องการ จากนั้นจะได้รายการในช่องวัสดุใหม่ให้ทำการเพิ่มรายการสมบัติของวัสดุโดยคลิกสมบัติของวัสดุที่อยู่ทางด้านซ้ายมือและจะมาปรากฏทางด้านล่างตามรูป จากนั้นให้กำหนดค่าวัสดุต่างๆ ลงไป ทำอย่างนี้จนครบทุกรายการ ตัวอย่างการกำหนดวัสดุที่สมบูรณ์จะแสดงดังรูปที่ 3.12 [2], [9]-[11]

ตารางที่ 3.1 สมบัติของวัสดุ Tungsten carbide (WC) [2], [9]-[11]

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	
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		

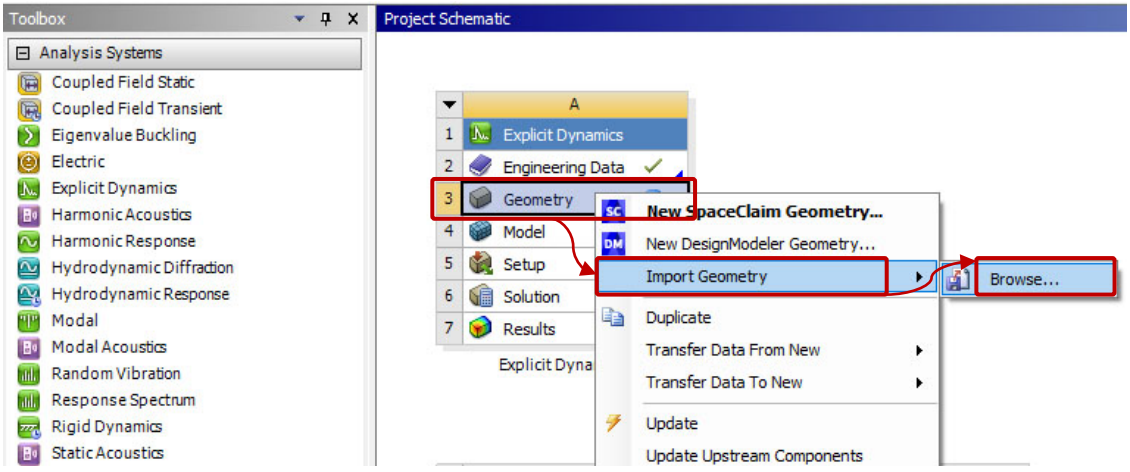
Tungsten carbide		
Damage Constant D1	0	
Damage Constant D2	0.01072	
Damage Constant D3	-1.669	
Damage Constant D4	0	
Damage Constant D5	0	
Melting Temperature	1494.9	°C
Reference Strain Rate(/sec)	1	

ตารางที่ 3.2 สมบัติของวัสดุ SKD11 [2], [9]-[11]

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
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	

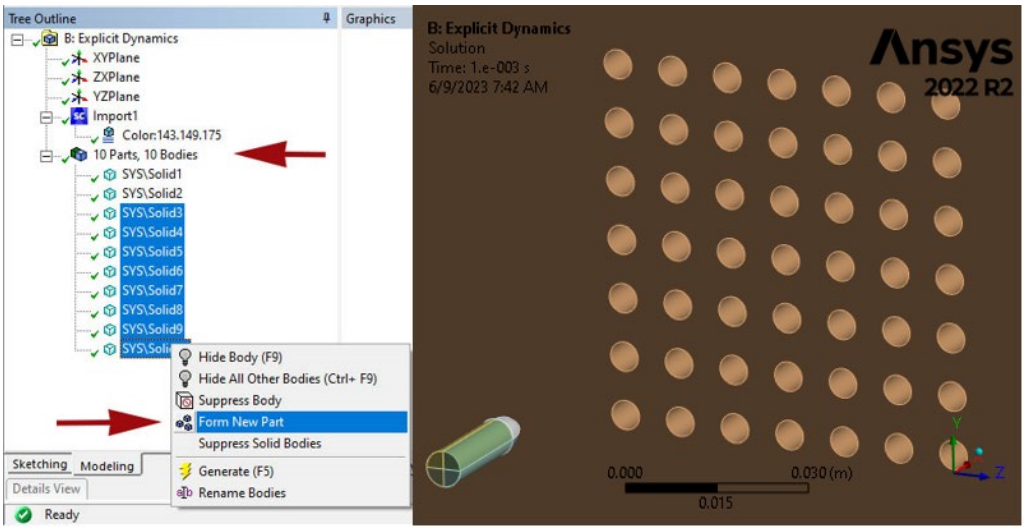
ตารางที่ 3.3 สมบัติของวัสดุ SUS304 [ANSYS]

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	
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

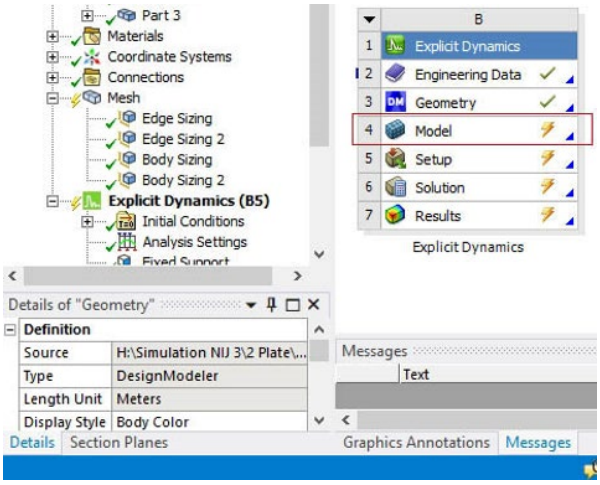


รูปที่ 3.13 นำเข้าโมเดลเกราะกันกระสุนและลูกกระสุนสู่โปรแกรม ANSYS

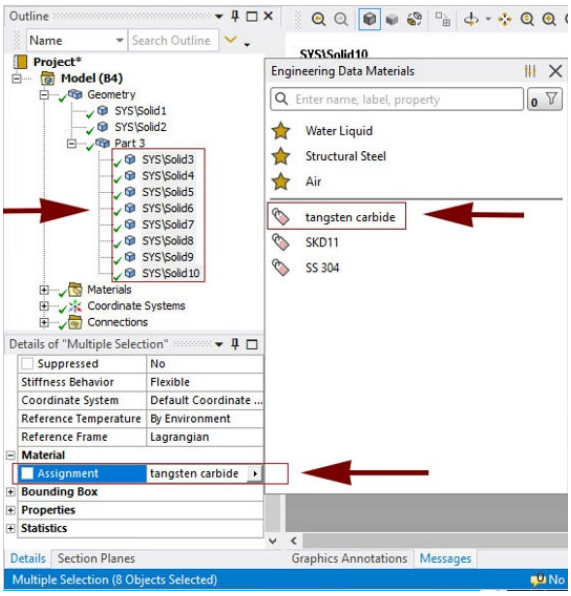
รูปที่ 3.13 เป็นการนำเข้าโมเดลเกราะกันกระสุนและลูกกระสุนเข้าระบบ หลังจากการกำหนดวัสดุในขั้นตอนที่ผ่านมา จึงนำเข้าโมเดล 3 มิติ ที่สร้างจากโปรแกรม Ansys DesignModeler และ SolidWorks เพื่อจำลองการยิงในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งจะมีชุดคำสั่ง “Geometry” โดยเลือกที่ Import Geometry และ Browse ไปยังโมเดลที่สร้างไว้ จากนั้นจะวิเคราะห์โมเดล และจะเข้าสู่หน้าต่างใหม่ที่เรียกว่า Explicit Dynamics-Design Modeler จากนั้นคลิกเลือก Generate และจะได้ผลดังรูปที่ 3.14 คือมี 10 Parts และ 10 Bodies เนื่องจากหัวกระสุนแยกตัวกันเป็นจำนวน 8 ชิ้นส่วน และเพื่อให้สามารถสร้าง Mesh ได้ง่าย จึงต้องทำให้ชิ้นงานของหัวกระสุนเป็นชิ้นส่วนเดียวกันก่อน ด้วยการใช้คำสั่ง “Form New Part” รวมชิ้นส่วนทั้ง 8 เป็นเนื้อเดียวกัน ชิ้นงานของกระสุนก็จะกลายเป็นเนื้อเดียวกัน และเข้าสู่หน้าต่าง Mechanical ด้วยคำสั่ง Model ดังรูปที่ 3.15 และ 3.16



รูปที่ 3.14 นำเข้าโมเดล 10 Parts 10 Bodies สู่ Design Modeler และใช้คำสั่ง From New Part

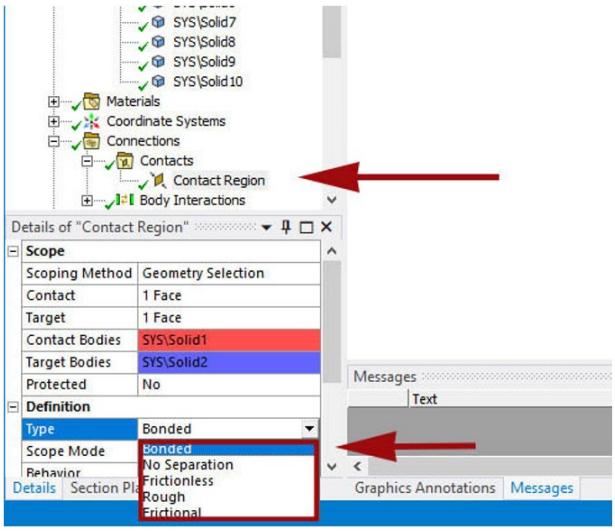


รูปที่ 3.15 เข้าสู่หน้าต่าง Mechanical ด้วยคำสั่ง Model



รูปที่ 3.16 การกำหนดชนิดวัสดุ และกำหนดค่า Stiffness Behavior เป็น Flexible

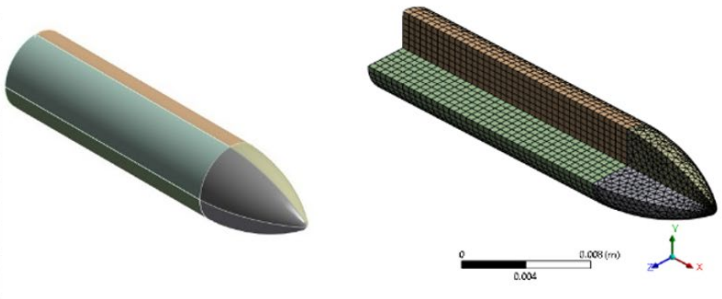
หน้าสัมผัส และชนิดของวัสดุนั้นมีวิธีการกำหนดดังรูปที่ 3.17 โดยให้เข้าสู่หน้าต่างของ Mechanical ด้วยการคลิกเลือกที่ Model เพื่อเข้าไปกำหนดชนิดของวัสดุ ในรูปที่ 3.13 เลือกชิ้นส่วนทั้งหมด กำหนดชนิดวัสดุเป็น SKD11 หรือ SS304 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรณีศึกษานั้นๆ และกำหนดค่า Stiffness Behavior เป็น Flexible สำหรับกรณีที่แผ่นเกราะมีมากกว่า 1 ชิ้น และเกิดการวางทับกันหรือซ้อนกัน จะต้องกำหนดหน้าสัมผัส (Contact) เป็นแบบไม่คิดค่าแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสที่แถบเครื่องมือ “Connections” ให้กำหนดที่ “Body Interaction” เป็นแบบ “Frictionless” หมายความว่ากำหนดให้ชิ้นงานติดกันแต่ไม่คิดค่าความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของแผ่นเกราะทั้ง 2 แผ่น [2], [9]-[11]



รูปที่ 3.17 การกำหนด Body Interaction ของแผ่นเกราะทั้งสองที่ประกบกันเป็นแบบ Frictionless

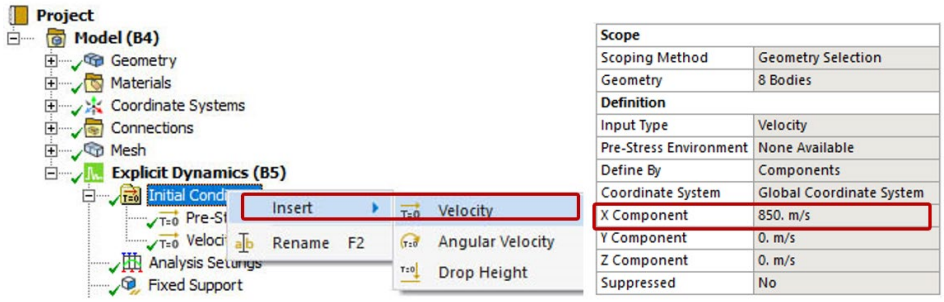
เอลิเมนต์ที่เลือกใช้ในการวิเคราะห์มี 2 ชนิด คือ Hexahedral และ Tetrahedral โดย Hexahedral ดังรูปที่ 3.18 ซึ่งมีความแม่นยำของการแก้ปัญหาโดยใช้เอลิเมนต์ชนิดนี้จะสูงที่สุด ดังนั้นเพื่อให้เหมาะสมกับโจทย์ปัญหานี้จึงต้องเลือกใช้เอลิเมนต์ชนิดนี้กับแผ่นเกราะกันกระสุน และส่วนหนึ่งของลำตัวลูกกระสุน ด้วยเอลิเมนต์ที่เลือกใช้สำหรับลำตัวทรงกระบอกของกระสุนและแผ่นเกราะควรเป็นเอลิเมนต์ชนิดเฮกซะฮีดรอล (Hexahedral) และหัวกระสุนส่วนที่แหลมควรเป็นเอลิเมนต์ชนิดเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) เพื่อให้เกิดการจัดเรียงและกำหนดชนิดของเอลิเมนต์ได้อย่างง่ายและเหมาะสมโมเดลกระสุนได้รับการออกแบบให้มีชิ้นส่วนแยกจากกันจำนวนแปดชิ้นโดยตัวกระสุนแบ่งออกเป็นสองตอนในส่วนตอนแรกเป็นหัวกระสุนที่มีลักษณะโค้งแหลม ตอนที่สองเป็นลำตัวกระสุนที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกตัน ทั้งสองส่วนจะได้รับการแบ่งในแนวนอนและแนวตั้งทำมุม 90 องศา ซึ่งกันและกันส่งผลให้ได้โมเดลกระสุนที่ประกอบรวมกันเป็นจำนวน 8 ชิ้นและมีหน้าสัมผัสติดกัน ในกระบวนการกำหนดหน้าสัมผัสให้กำหนดหน้าสัมผัสด้วย Contacts Bodies เป็นแบบ Bonded ทั้งหมดของกระสุนจำนวน 12 หน้าสัมผัส การควบคุมขนาดเอลิเมนต์จะทำให้เกิดการปรับขนาดเอลิเมนต์จากขอบของแผ่นเกราะที่มีขนาดเอลิเมนต์ใหญ่ลู่เข้าไปยังกลางแผ่นเกราะที่มีขนาดเอลิเมนต์ที่เล็กลง ด้วยการกำหนด Bias type และ Bias factor เท่ากับ 12 จึงส่งผลให้เห็นว่าเป็นแถบสีดำมืดตรงกลางแผ่น ซึ่งนั่นคือความถี่ของขนาดเอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็ก และการใช้เทคนิคการเพิ่มชั้นเอลิเมนต์ด้วยการกำหนด Number of divisions เท่ากับ 3 คือหมายถึงมีจำนวน 3 ชั้น ซึ่งควรจะกำหนดเท่ากับ 3 เป็นอย่างน้อย

Geometry	1 Body
Definition	
Suppressed	No
Method	MultiZone
Mapped Mesh Type	Hexa
Surface Mesh Method	Program Controlled
Free Mesh Type	Hexa Dominant
Element Order	Use Global Setting
Src/Trg Selection	Manual Source
Source Scoping Method	Geometry Selection
Source	1 Face
Sweep Size Behavior	Sweep Element Size
Sweep Element Size	0.5 mm



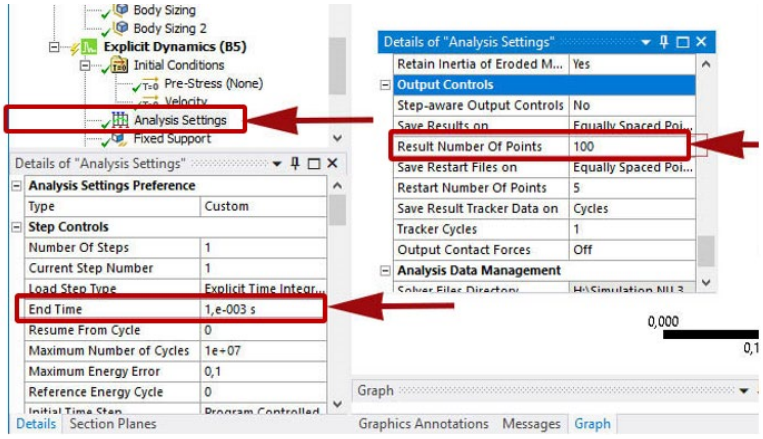
รูปที่ 3.18 การกำหนด Element Size

จากรูปที่ 3.19 การตั้งค่าชุดคำสั่ง Explicit Dynamics เริ่มจากการตั้งค่าความเร็วเริ่มต้นของกระสุน คลิกขวาที่ Initial Condition เลือก Insert และ Velocity บนแถบเครื่องมือเพื่อใส่ค่าเริ่มต้นโดยการจำลองการยิงจะใส่ค่าเริ่มต้นในช่อง x component ซึ่งเป็นค่าตามมาตรฐานการทดสอบ NIJ ระดับ 3 เลือกชิ้นงานจำลองที่เคลื่อนด้วยความเร็ว คือ โมเดลกระสุน ใส่ค่าความเร็วเริ่มต้นให้กับกระสุนเป็นความเร็ว 847±9.1 เมตรต่อวินาที และทิศทางในการเคลื่อนที่ของกระสุนตามแกน +x

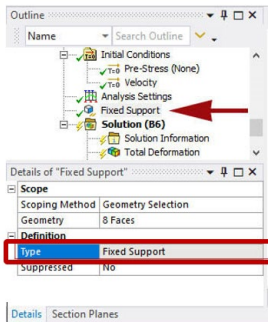


รูปที่ 3.19 การกำหนดค่าความเร็วเริ่มต้น (Initial Velocity)

จากรูปที่ 3.20 คลิกที่ Analysis Settings ตั้งค่าการทำงานของโปรแกรมสำหรับประมวลผลการวิเคราะห์ ให้เลือกที่คำสั่ง End Time เป็นชุดคำสั่งที่จะกำหนดให้ชิ้นงานเคลื่อนที่ไปในระยะเวลาที่ 0.001 วินาที เนื่องจากกระสุนปืนมีความเร็วที่ 847±9.1 เมตรต่อวินาที ซึ่งมีความเร็วสูงมาก จึงต้องกำหนดเวลาของ End Time ที่น้อย เพื่อให้สามารถวิเคราะห์การชนของกระสุนปืนที่กระทบแผ่นเกราะ และที่แถบเครื่องมือ Output Controls ที่ชุดคำสั่ง Result Number of Points เป็นคำสั่งในการบันทึกข้อมูลการวิเคราะห์เมื่อจำนวนค่าที่ใส่เข้าไปเพิ่มขึ้นความเสถียรของผลการวิเคราะห์จะมีการคลาดเคลื่อน (Error) ที่ลดลงค่าที่เหมาะสมควรใส่ที่ 100 จุด



รูปที่ 3.20 ค่าของ End Time และ Result Number of Points



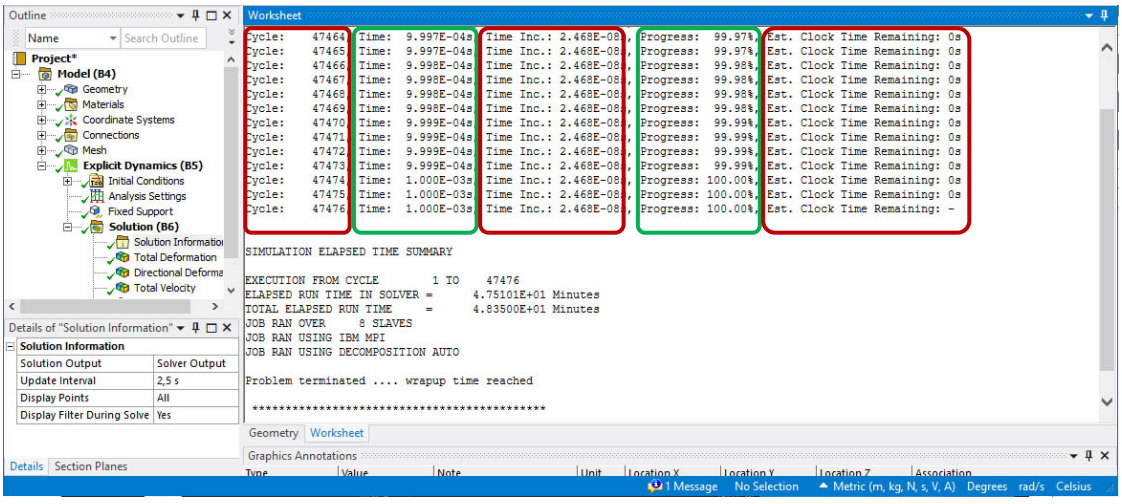
รูปที่ 3.21 การกำหนด Fixed Support

จากแถบชุดคำสั่ง Solution ให้เลือกผลการวิเคราะห์ ประกอบด้วย ความเค้น ความเครียด ความเร็ว การเสียรูป เป็นต้น ดังนั้นได้เลือกแถบเครื่องมือ Equivalent Stress, Total Velocity และ Total Deformation เพื่อให้แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความเค้น ความเร็วที่เกิดขึ้นและการเสียรูปของแบบจำลองที่ได้จากการคำนวณและเลือกแถบเครื่องมือแสดงผลวิเคราะห์จากนั้นเลือกคำสั่ง Solve เพื่อให้โปรแกรมได้เริ่มการคำนวณ [2], [9]-[11]

3.2.4 กระบวนการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Solve-processing)

คือขั้นตอนการคำนวณหรือ Solve-processing จะเป็นการวิเคราะห์ค่าต่าง ๆ ในขั้นตอนการเตรียมซึ่งจะมีส่วนประกอบหลักในการคำนวนอยู่ 2 อย่างคือ 1. ผลการคลาดเคลื่อน (Error) 2. สมรรถนะของคอมพิวเตอร์ในการคำนวณ ซึ่งส่วนประกอบหลักทั้ง 2 อย่างนี้จะเป็นตัวช่วยในการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการคำนวน โดยการคลาดเคลื่อน (Error) ค่าที่ยอมรับได้จากโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าไม่เกินร้อยละ 5-10 สามารถสังเกตได้จากกราฟในโปรแกรม [2], [9]-[11]

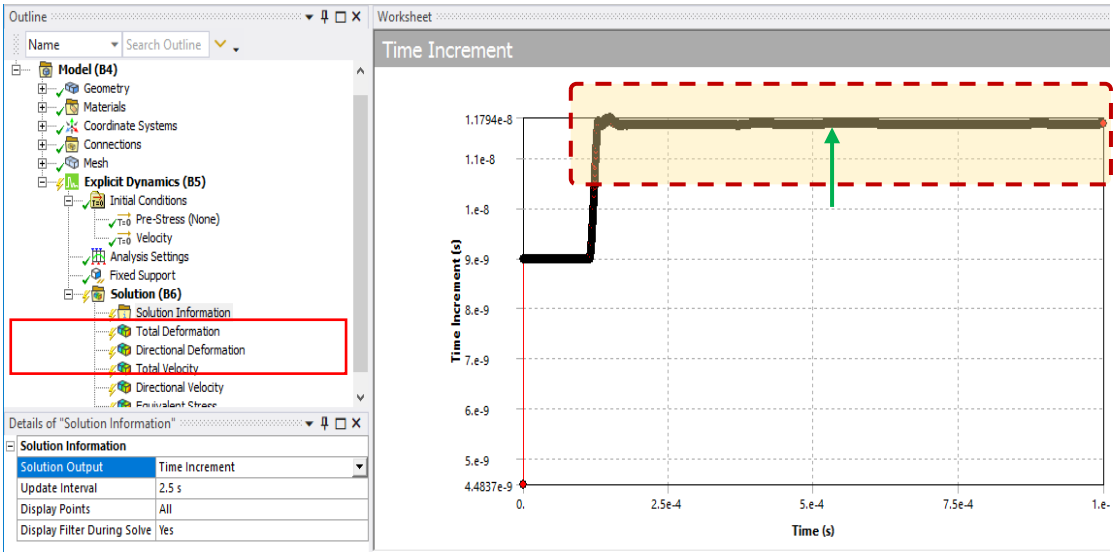
การตรวจสอบผลการคลาดเคลื่อนจะต้องใช้ชุดคำสั่ง Solution Information ในส่วนของ solution Output มีตัวเลือกของแถบเครื่องมืออยู่ 5 แบบด้วยกันดังรูปที่ 3.22 ประกอบด้วย 1. Solver Output ที่จะบ่งบอกเป็นจำนวนรอบวิเคราะห์ 2. Time Increment เป็นเวลาการวิเคราะห์ที่เพิ่มขึ้น 3. Energy Conservation 4. Momentum Summary 5. Energy Summary ซึ่งสามารถใช้ในการตรวจสอบการคลาดเคลื่อนในระหว่างการคำนวณของโปรแกรมได้ [2], [9]-[11]



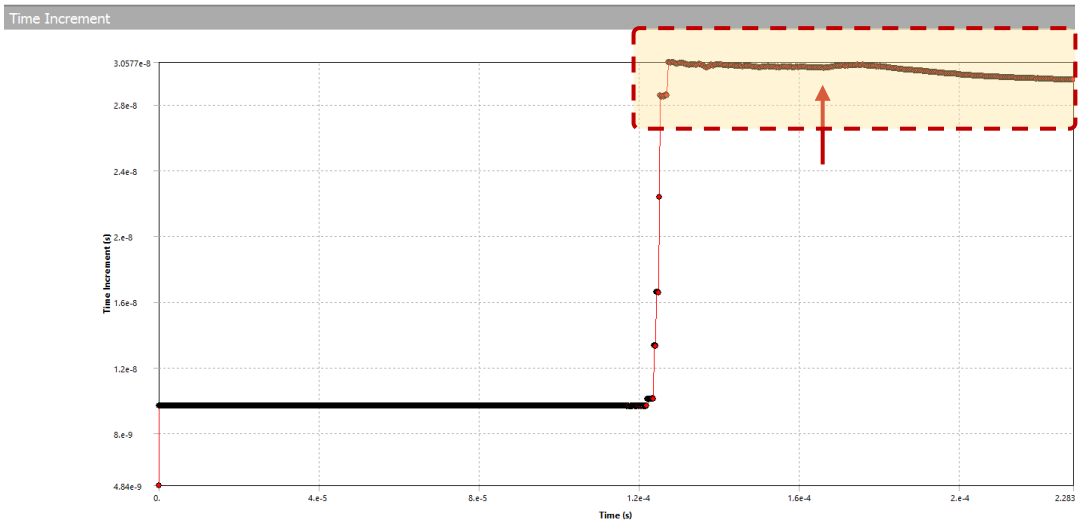
รูปที่ 3.22 การแสดง Solver Output [2], [9]-[11]

ผลการวิเคราะห์จากรูปที่ 3.22 เป็น Solver Output จะแสดง เช่น จำนวนรอบในการคำนวณ (Cycle) เวลาในการคำนวณแต่ละวงรอบ (Time Step) ร้อยละของการคำนวณที่ได้ออกมา (Progress) และเวลาที่คาดว่าจะเสร็จสิ้นการคำนวณ (Clock time remaining) ซึ่งหากมีการผิดพลาด

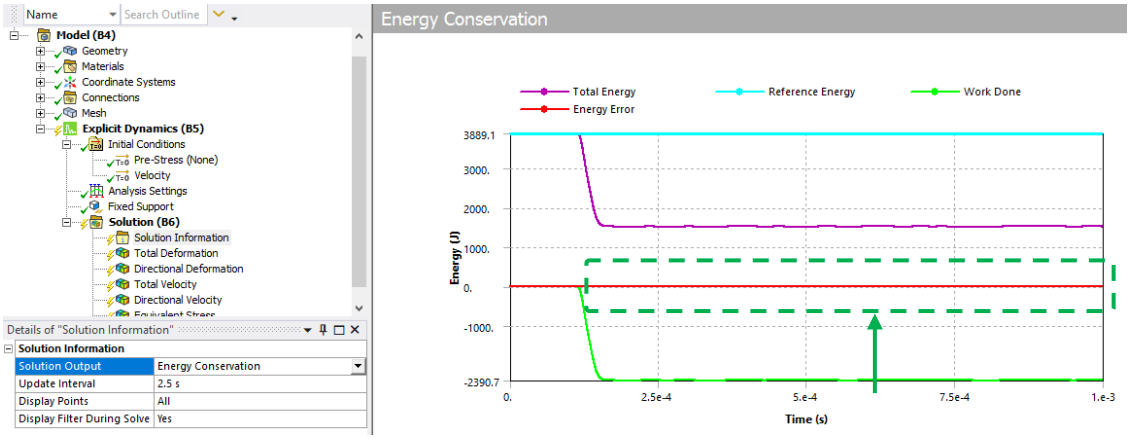
โปรแกรมจะหยุดการทำงานและแสดงผลสาเหตุของความผิดพลาดนั้น สำหรับ Time Increment เป็นกราฟแสดงเวลาของ Time Step ในการคำนวณของการทำงานเมื่อวัตถุเกิดการกระแทกกราฟจะเกิดการเปลี่ยนแปลงในช่วงของ Time Increment ที่สูงและหลังจากที่วัตถุเกิดการกระแทกเรียบร้อยกราฟจะลดลงและคงที่จนครบ Time Step ของการทำงานซึ่งบ่งบอกสถานะการคำนวณที่ปกติไม่เกิดการคลาดเคลื่อนที่มากกว่าร้อยละ 5-10 ตามรูปที่ 3.23 ถ้าการคำนวณมีความผิดปกติโปรแกรมจะยังทำการคำนวณต่อไปแต่หลังจากหลังวัตถุกระแทกกราฟจะมีลักษณะลดลงตาม Time Step ของการคำนวณซึ่งจะไม่คงที่บ่งบอกถึงความผิดปกติตามรูปที่ 3.24 [2], [9]-[11]



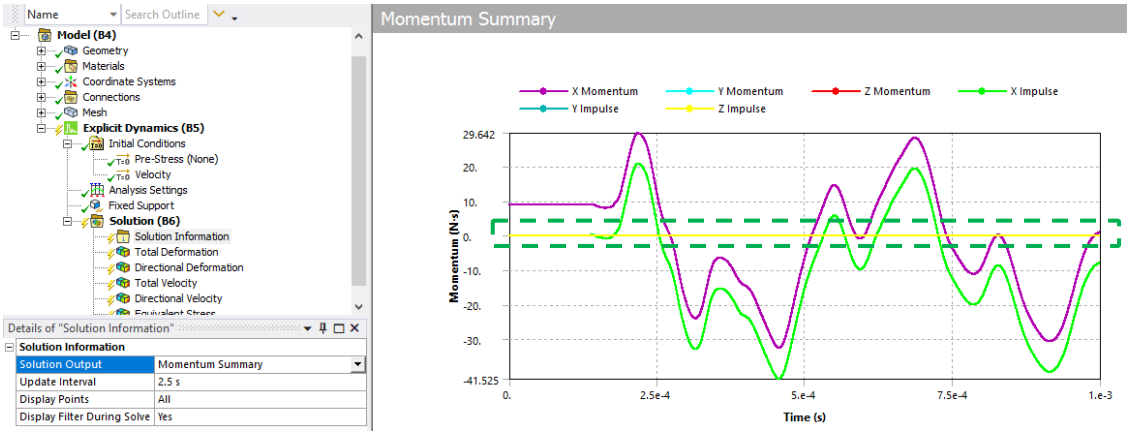
รูปที่ 3.23 สถานะปกติ กราฟมีลักษณะคงที่ในแนวนอน [2], [9]-[11]



รูปที่ 3.24 สถานะไม่ปกติ กราฟไม่อยู่ในแนวนอน [2], [9]-[11]



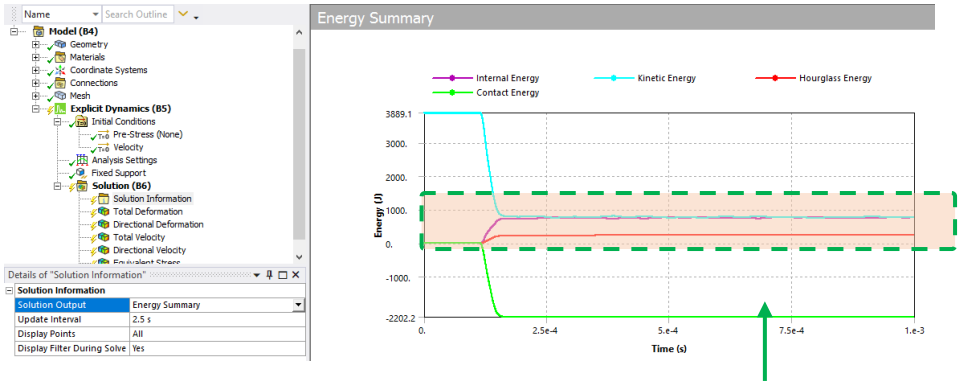
รูปที่ 3.25 เส้นกราฟ Energy Error แสดงสถานะปกติ [2], [9]-[11]



รูปที่ 3.26 เส้นกราฟ Momentum Summary แสดงผลปกติวิ่งในแนวนอน [2], [9]-[11]

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 แสดงผลแล้วมีความสอดคล้องกับวัตถุที่กระแทกหรือชนถือว่าปกติตามรูปที่ 3.26 ในการจำลองนี้มุมมองจาก

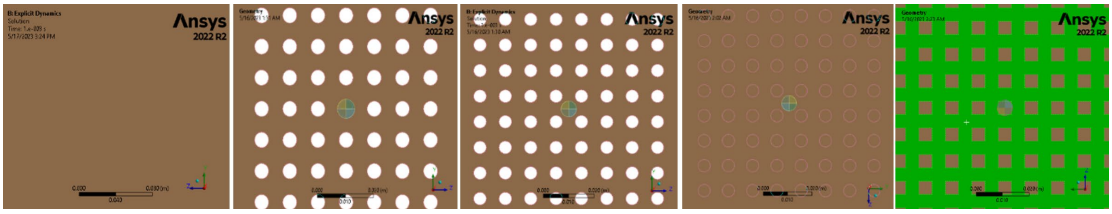
ด้านข้างชิ้นงานอยู่ในแนวแกน Z ซึ่งในเส้นสีเหลืองจะเป็นค่าของ Impulse ในแนวแกน Z เส้นกราฟจะมีลักษณะคงที่และเส้นสีแดงจะแสดงค่าของ Momentum ในแนวแกน Z ซึ่งจะไม่แสดงผลในกราฟ ดังนั้นถ้าวัตถุกระแทกหรือชนแล้วไม่สอดคล้องกันถือว่ามีความผิดปกติ Energy Summary ในกราฟนี้จะแสดงผลของพลังงานที่เกิดขึ้นเมื่อวัตถุเกิดการชนหรือกระแทกซึ่งมีพลังงานดังนี้ 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” ดังนั้นค่าที่แสดงในกราฟของ Hourglass Energy จะแสดงเป็นเส้นสีแดงซึ่งจะต้องมีค่าที่น้อยกว่าเส้นสีม่วงซึ่งแสดงค่าเป็น Internal Energy ซึ่งถือว่าปกติตามรูปที่ 3.27 แต่ถ้าเส้นสีแดง Hourglass Energy มีค่ามากกว่าเส้นสีม่วง Internal Energy ซึ่งมีความผิดปกติเกิดขึ้นในการคำนวณที่มีสาเหตุมาจากการสร้างเมซ (Mesh) [2], [9]-[11]



รูปที่ 3.27 เส้นกราฟ Hourglass Energy แสดงผลที่เป็นปกติ [2], [9]-[11]

3.3 การเตรียมแผ่นเกราะโลหะสำหรับทดสอบการยิงกระสุน

ในกรณีของแผ่นเกราะโลหะกันกระสุนสำหรับรถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะ แผ่นเกราะโลหะได้ถูกออกแบบให้มีขนาดเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 300x300 มิลลิเมตร ด้วยความหนา 10 มิลลิเมตร และแตกต่างกัน 5 แบบ รูปที่ 3.29 คือ ส่วนหนึ่งของแผ่นเกราะโลหะที่ผ่านกระบวนการตัดด้วยเครื่องกัด CNC และผ่านกระบวนการเจาะรูพรุนและชุบแข็งที่ความแข็ง เช่น SKD11 ชุบแข็งที่ 58 HRC มีโมเดลดังรูปที่ 3.28 และการขึ้นรูปแผ่นเกราะพรุนบางส่วน แสดงดังรูปที่ 3.29-3.30



รูปที่ 3.28 ตัวอย่างชิ้นส่วนแผ่นโลหะทั้ง 5 แบบจากโปรแกรม Ansys

รูปที่ 3.29 การขึ้นรูปแผ่นเกราะพรุนด้วย CNC

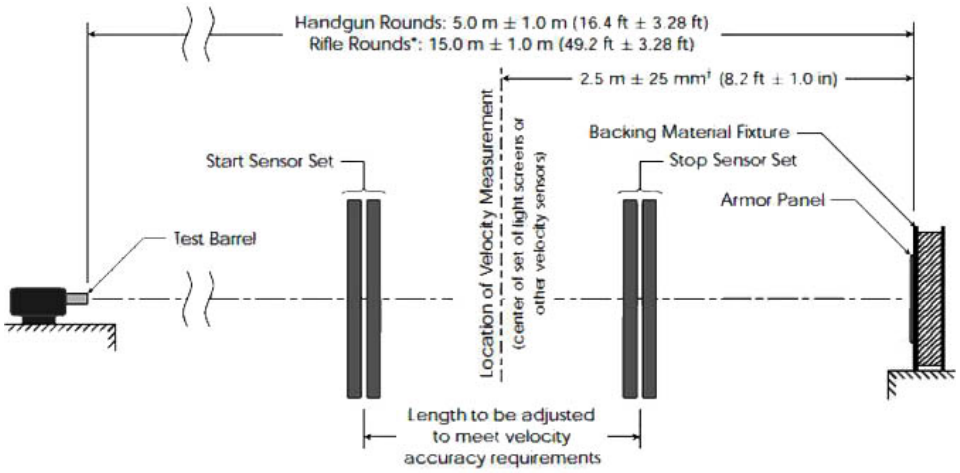
รูปที่ 3.30 แผ่นเกราะพรุนสำหรับการทดสอบ

บทที่ 4
ผลการดำเนินงาน

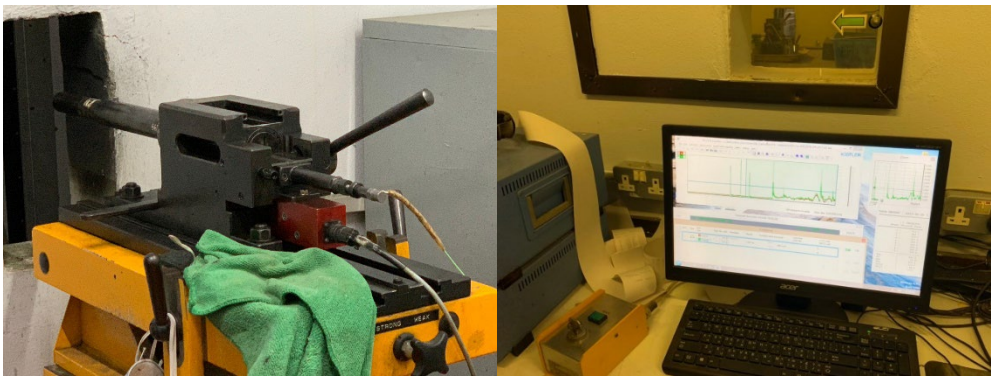
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการดำเนินการวิจัยทั้งหมดที่ได้ทำการดำเนินการด้วยกระบวนการที่อธิบายไว้ในบทที่ 3 ประกอบด้วย ผลการทดสอบการยิงกระสุนลงบนแผ่นเกราะโลหะพรุน ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนเอลิเมนต์ ผลการเปรียบเทียบและกรณีศึกษาต่างๆ ซึ่งผลที่ได้จะนำไปสู่การต่อยอดงานวิจัยอื่นได้ต่อไป โดยรายละเอียดผลการดำเนินการได้มีการแยกอธิบายตามกลุ่มการทดลองที่จะกล่าวถึงดังต่อไปนี้

4.1 ผลการดำเนินงานเตรียมการยิงกระสุนลงบนแผ่นเกราะโลหะพรุน

จากการประสานไปยังผู้อำนวยการโรงงานวัตถุระเบิดทหาร กรมการอุตสาหกรรมป้องกันประเทศและพลังงาน (Military Explosives Factory, Defence Industry Department, Defence Industry and Energy Centre) ตำบลย่านมัทรี อำเภอพยุหะคีรี จังหวัดนครสวรรค์ จึงได้รับการตอบรับให้สามารถนำแผ่นเกราะไปทดสอบได้ ซึ่งทุกครั้งที่มีการจัดเตรียมกระสุนจะต้องมีกระบวนการบรรจุดินปืนลงในปลอกกระสุนใหม่ทุกครั้งด้วยน้ำหนักของดินปืนที่เหมาะสมจะทำให้ได้ความเร็วที่เป็นไปตามมาตรฐาน NIJ 3 และต้องมีการทดสอบความเร็วในการยิงควบคู่ไปด้วย ในห้องทดสอบการยิงจะไม่อนุญาตให้บุคคลทั่วไปเข้าไปได้ เนื่องด้วยต้องรักษาไว้ซึ่งความปลอดภัย 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 กระบะวัสดุหนุนจะต้องยึดอย่างแน่นหนากับแท่นยึด ให้สามารถติดตั้งเสื้อเกราะได้ทั้งแนวตั้งและแนวนอน 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 3 จะใช้กระสุนขนาด 7.62x51 มม. NATO M80 ball หนัก 9.6 กรัม มีความเร็ว 847 ± 9.1 เมตร/วินาที (2780 ± 30 ฟุต/วินาที)



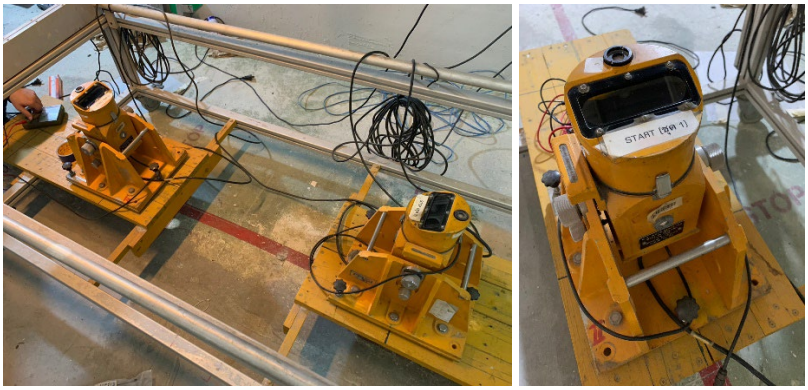
รูปที่ 4.1 ตำแหน่งอุปกรณ์ต่างๆ และระยะการยิงตามมาตรฐาน NIJ [17]



รูปที่ 4.2 เครื่องยิงกระสุนและเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับบันทึกผลและควบคุม

(a) (b)

รูปที่ 4.3 การจัดเตรียม a) กระบะวัสดุหนุนเพื่อรองรับแผ่นเกราะที่จะยิงตามมาตรฐาน NIJ และ b) แผ่นพิสูจน์ถูกเจาะทะลุ



รูปที่ 4.4 กล้องวัดความเร็วกระสุนตามมาตรฐาน NIJ

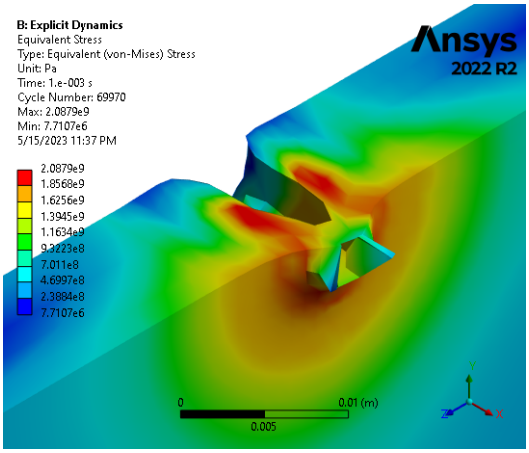
รูปที่ 4.5 แผ่นเกราะกันกระสุนสำหรับการทดสอบ

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

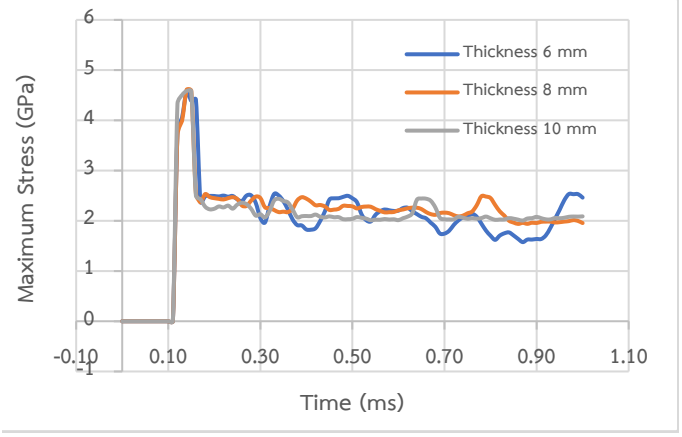
4.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

แบ่งออกเป็นกรณีศึกษาได้ดังนี้

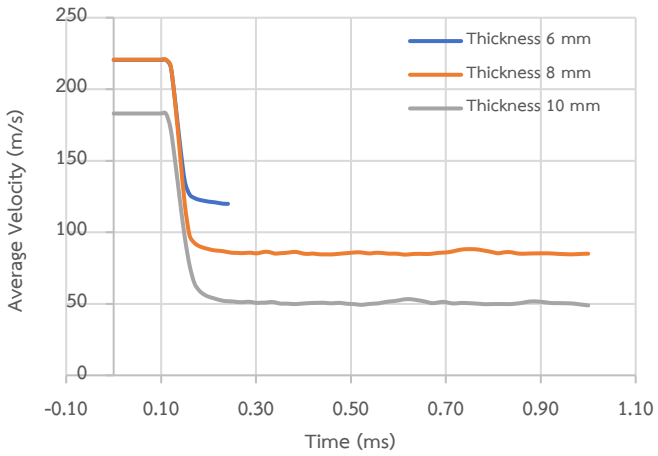
4.2.1 กรณีที่ 1 แผ่นเกราะหน้าเรียบไม่มีรูเจาะหรือรูพรุน ซึ่งมีความหนาอยู่ 3 ระดับ คือ 6, 8 และ 10 มิลลิเมตร รูปที่ 4.6 คือผลการวิเคราะห์แผ่นเกราะที่มีความหนา 10 มิลลิเมตร ด้วยค่าความเค้นวอนมิสเสส และพบว่าแผ่นเกราะถูกเจาะทะลุ จากรูปที่ 4.7 พบว่าค่าความเค้นวอนมิสเสสที่เกิดขึ้นกับแผ่นเกราะที่มีความหนา 6, 8 และ 10 มิลลิเมตร ต่างก็มีลักษณะคล้ายคลึงกัน แต่ยิ่งแผ่นเกราะมีความหนามากขึ้นจะส่งผลให้ความเค้นที่เกิดขึ้นค่อนข้างจะคงที่ตลอดความหนาของแผ่นเกราะที่กำลังถูกเจาะทะลุ จากรูปที่ 4.8 เห็นได้ว่าความเร็วเฉลี่ยของกระสุนจะลดลงเมื่อความหนาแผ่นเกราะมีมากขึ้น กระสุนเมื่อทะลุผ่านแผ่นเกราะที่มีความหนา 6, 8 และ 10 มิลลิเมตร จะมีความเร็วขณะทะลุผ่านเฉลี่ยที่ 120, 85 และ 50 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ และจะเห็นได้ว่าในการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น ระยะห่างระหว่างกระสุนและแผ่นเกราะไม่มีผลต่อผลการวิเคราะห์ แต่อาจส่งผลเกี่ยวกับเวลาในการวิเคราะห์ที่เพิ่มมากขึ้นหากมีระยะห่างดังกล่าวเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 4.6 ความเค้นวอนมิสเสสและลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นบนแผ่นเกราะ SKD 11 ที่มีความหนา 10 มิลลิเมตร

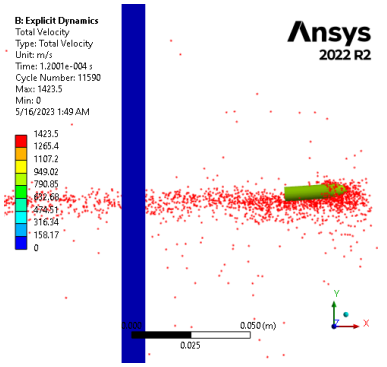


รูปที่ 4.7 ความเค้นสูงสุดเทียบกับเวลาเมื่อกระสุนพุ่งเข้าแผ่นเกราะ

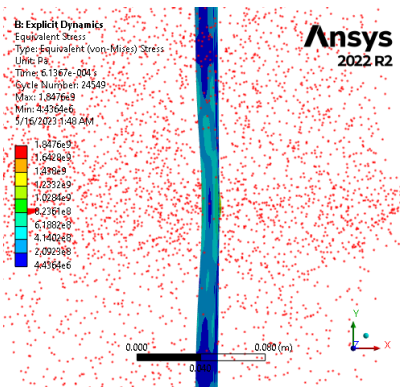


รูปที่ 4.8 ความเร็วเฉลี่ยของกระสุนเทียบกับเวลาของกรณีที่ 1

4.2.2 กรณีที่ 2 แผ่นเกราะได้รับการเจาะรูทะลุผ่านตลอดด้วยรูเจาะที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร และมีระยะพิตช์ระหว่างรูเท่ากับ 10 มิลลิเมตร และกำหนดให้กระสุนพุ่งเข้าปะทะที่ตำแหน่งกลางรูเจาะได้ผลดังรูปที่ 4.9 กระสุนทะลุผ่านในขณะที่กระสุนเสียรูปน้อยมาก ยังคงไว้ซึ่งรูปร่างของกระสุนเดิมแต่สิ่งที่ได้มาคือแรงสั่นสะเทือนของแผ่นเกราะทำให้วิถีกระสุนเปลี่ยนไปดังรูปที่ 4.10

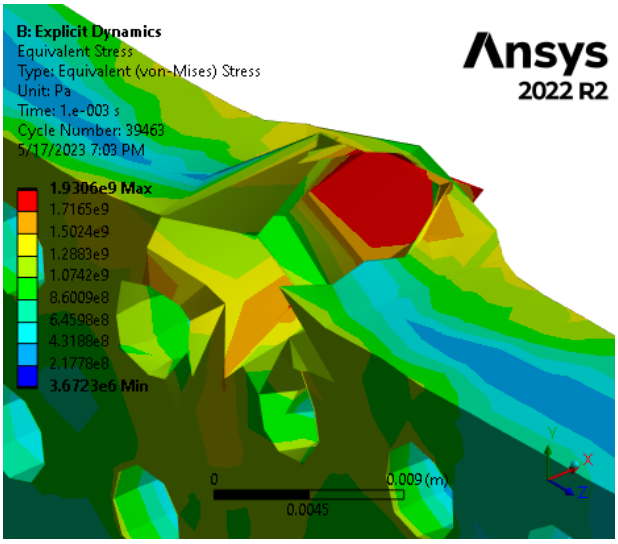


รูปที่ 4.9 กระสุนทะลุผ่านรูเจาะอย่างสมบูรณ์ในกรณีที่ 2

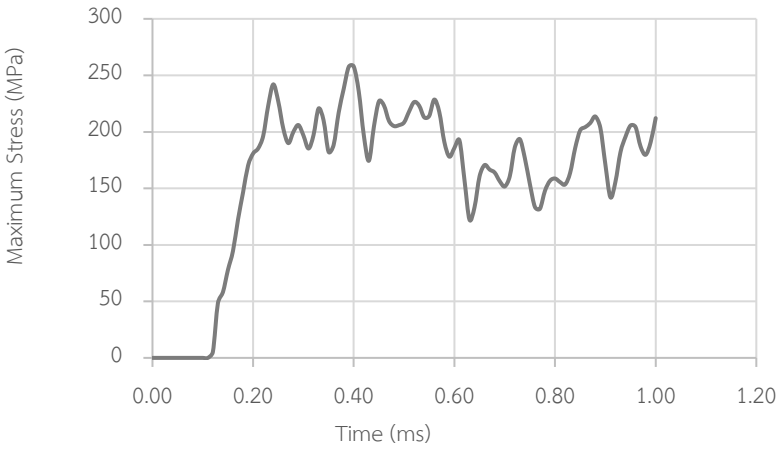


รูปที่ 4.10 รูเจาะบนแผ่นเกราะส่งผลให้แผ่นเกราะเกิดการสั่นสะเทือน

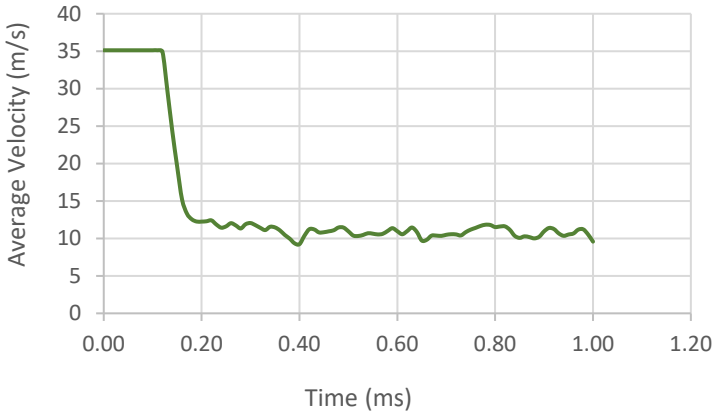
4.2.3 กรณีที่ 3 แผ่นเกราะได้รับการเจาะรูเช่นเดียวกับกรณีที่ 4.2.2 แต่กระสุนพุ่งเข้าปะทะแผ่นเกราะที่จุดตัดตรงแนวทะแยงของรูเจาะทั้ง 4 รู ได้ผลดังรูปที่ 4.11 กระสุนไม่สามารถทะลุผ่านแผ่นเกราะได้เนื่องจากตำแหน่งที่กระสุนปะทะกับแผ่นเกราะจะมีรูเจาะซึ่งทำไว้อยู่รอบด้านเป็นตัวที่รองรับแรงกระแทก เกิดการเสียรูปไปในทิศทางรอบด้านที่มีรูเจาะ จากกรณีที่ 4.2.1 ในรูปที่ 4.6 พบว่าเมื่อกระสุนเข้าปะทะกับแผ่นเกราะจะทำให้ความเค้นสูงสุดมีค่าอยู่ประมาณ 200 เมกะปาสคาล และค่าความเค้นสุงสุดค่อนข้างที่จะไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อเทียบกับเวลาที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ 4.2.3 ในรูปที่ 4.12 พบว่าเมื่อกระสุนวิ่งเข้าปะทะกับแผ่นเกราะจะเกิดค่าความเค้นสูงสุดเปลี่ยนแปลงขึ้นลงในช่วง 120 ถึง 260 เมกะปาสคาล นั่นแสดงให้เห็นว่าการสร้างรูเจาะบนแผ่นเกราะจะส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนเกิดขึ้น การสั่นสะเทือนนี้จะส่งผลให้ค่าความเค้นสูงสุดเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ ตลอดเวลาเป็นการทำให้กระสุนไม่สามารถทะลุผ่านแผ่นเกราะได้



รูปที่ 4.11 ความเค้นวอนมิสเสสและความเสียหายในกรณีที่ 3

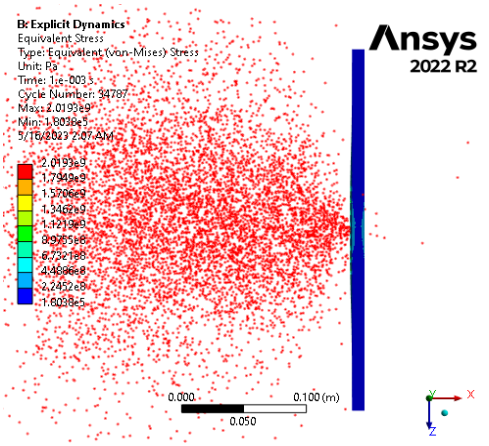


รูปที่ 4.12 ความเค้นสูงสุดเทียบกับเวลา

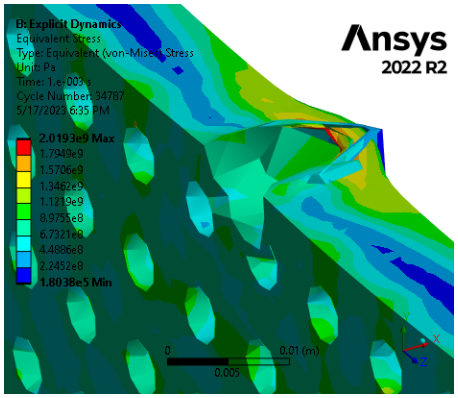


รูปที่ 4.13 ความเร็วเฉลี่ยของกระสุนเมื่อ เทียบกับเวลาในกรณีที่ 3

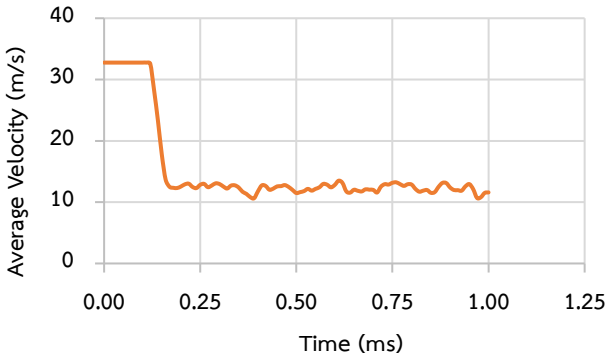
4.2.4 กรณีที่ 4 แผ่นเกราะได้รับการเจาะรูลึก 5 มิลลิเมตรด้วยรูเจาะที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร และมีระยะพิตช์ระหว่างรูเท่ากับ 10 มิลลิเมตร และกำหนดให้กระสุนพุ่งเข้าปะทะแผ่นเกราะที่จุดตัดตรงแนวทะแยงของรูเจาะทั้ง 4 รู ได้ผลดังรูปที่ 4.14 และ4.15 พบว่ากระสุนไม่สามารถทะลุผ่านแผ่นเกราะได้เช่นเดียวกับกรณีที่ 3 จากการเจาะรูลึก 5 มิลลิเมตร(ไม่ทะลุผ่าน)สามารถช่วยรองรับแรงปะทะที่เกิดขึ้นจากกระสุนเกิดการเสียรูปของเนื้อแผ่นเกราะเข้าไปยังบริเวณรูเจาะของแผ่นเกราะและส่งผลให้เกิดแรงสั่นสะเทือนในแผ่นเกราะ ความเร็วเมื่อปะทะกับแผ่นเกราะดังรูปที่ 4.16 พบว่ามีความใกล้เคียงกับความเร็วของกระสุนเมื่อปะทะแผ่นเกราะดังรูปที่ 4.13 จากกรณีที่ 2 และกรณีที่ 3 หากกระสุนปะทะเข้าที่ขอบรูหรือจุดตัดแนวทแยงระหว่างรูก็จะช่วยเบี่ยงเบนและหักเหทิศทางของกระสุนได้แต่หากกระสุนพุ่งตรงไปยังรูเจาะดังกรณีที่ 2 ก็จะไม่สามารถต้านทานการเจาะทะลุใดๆ ได้เลย นั่นหมายความว่าอาจจำเป็นต้องมีแผ่นเกราะชั้นที่สอง หรือใช้กรณีที่ 4 คือการเจาะรูแผ่นเกราะที่ความลึก 5 มิลลิเมตรหรืออาจจะน้อยกว่าเพื่อป้องกันไม่ให้กระสุนทะลุผ่านแผ่นเกราะได้ ซึ่งเป็นการเพิ่มการสั่นสะเทือนให้เกิดขึ้นที่แผ่นเกราะด้วยการเจาะรู



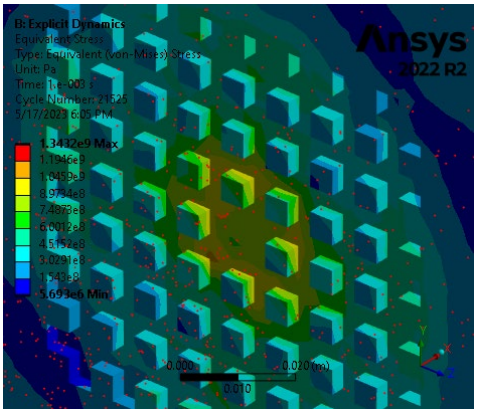
รูปที่ 4.14 กระสุนไม่ทะลุผ่านแผ่นเกราะในกรณีที่ 4



รูปที่ 4.15 ความเค้นวอนมิสเสสและความเสียหาย

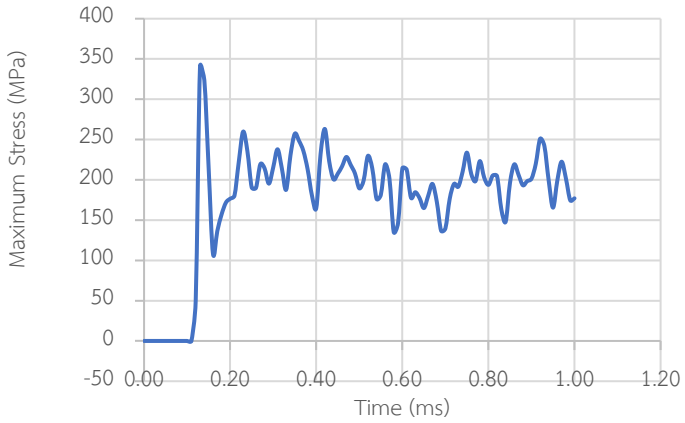


รูปที่ 4.16 ความเร็วเฉลี่ยของกระสุน



รูปที่ 4.17 แผ่นเกราะได้รับการกัดให้เป็นร่องสี่เหลี่ยมกว้าง 5 มิลลิเมตร ลึก 5 มิลลิเมตร

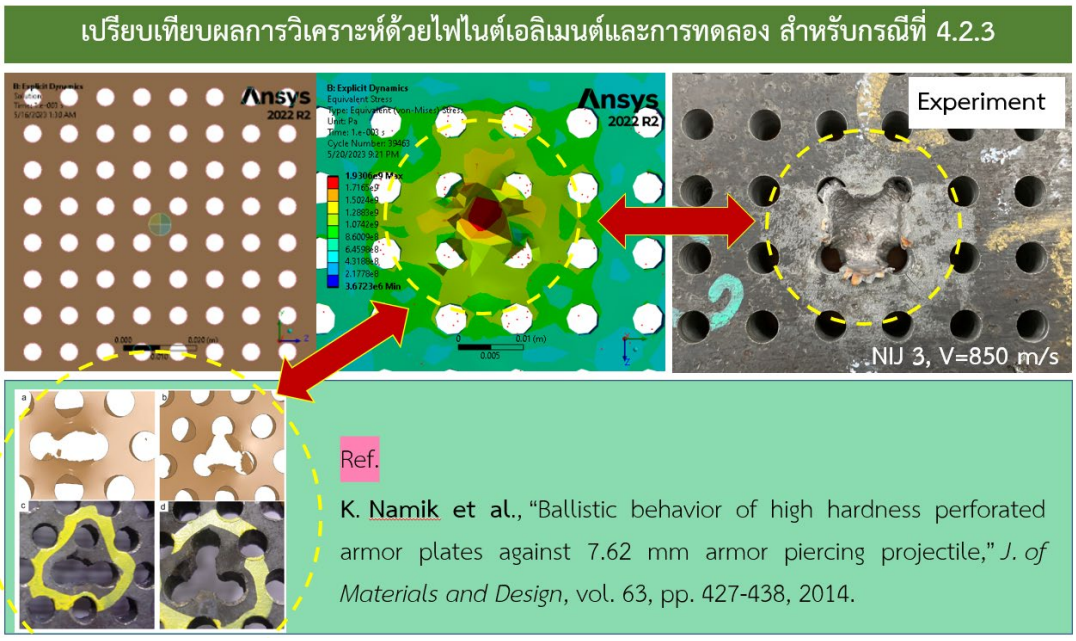
4.2.5 กรณีที่ 5 แผ่นเกราะได้รับการกัดให้เป็นร่องสี่เหลี่ยมกว้าง 5 มิลลิเมตร ลึก 5 มิลลิเมตร ทั้งแนวนอนและแนวตั้ง กระสุนพุ่งเข้าหาแผ่นเกราะในตำแหน่งที่ไม่มีการกัดร่อง ได้ผลดังรูปที่ 4.17-4.18 พบว่าตำแหน่งที่กระสุนพุ่งเข้าปะทะปุ่มนูนบนแผ่นเกราะ จะเข้าไปทำลายปุ่มที่สร้างขึ้นและทำให้มีพื้นที่ในการแตกกระจายออกไปรอบด้านข้าง ปุ่มหรือเนื้อแผ่นเกราะที่ไม่ได้รับการกัดเนื้อออกจึงแตกกระจายตัวออกไปโดยที่แผ่นเกราะจะไม่ทะลุ



รูปที่ 4.18 ความเค้นสูงสุดเทียบกับเวลาเมื่อกระสุนพุ่งเข้าแผ่นเกราะในกรณีที่ 5

4.3 สรุปผลการทดสอบการเปรียบเทียบผลการยิงกระสุนกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากการทดสอบตามมาตรฐาน NIJ 3 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 โดยมีการทดสอบทั้งหมด 5 แบบ ผลการวิเคราะห์ออกมาได้ 5 กรณี และนำไปเปรียบเทียบกับการทดลองเฉพาะกรณีที่ 4.2.3 ได้ผลดังรูปที่ 4.19 พบว่าให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกันคือ มีรูปแบบความเสียหายเหมือนกัน และมีความลึกต่างกันไม่เกิน 5%



รูปที่ 4.19 ผลการทดสอบโดยใช้มาตรฐาน NIJ ระดับ 3 ให้ผลลัพธ์ของ 2 วิธีที่สอดคล้องกัน

บทที่ 5
สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

จากการศึกษาแผ่นเกราะโลหะในแบบต่างๆ และการจำลองการเสียหายทดสอบร่วมกันโดยใช้โปรแกรม Ansys ทำให้ได้รูปแบบวัสดุความหนาที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพที่จะนำไป เป็นโมเดลการสร้างแผ่นเกราะโลหะให้กับรถหุ้มเกราะที่เป็นรถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะที่ใช้ในชายแดนของประเทศไทย ในกระบวนการวิจัยได้กำหนดขอบเขตของการศึกษาเป็นการจำลองการทดสอบและวิเคราะห์แผ่นเกราะโลหะแบบต่างๆกันกระสุนที่ใช้เป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบ NIJ ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ Ansys และการทดสอบ วัสดุที่ใช้สร้างแผ่นเกราะโลหะกันกระสุน เป็น SKD11 และ SUS304 ประกอบซ้อนกัน วิธีการประกอบแผ่นเกราะโลหะกันกระสุนจะใช้กระบวนการเชื่อมติดแผ่นโลหะ วิธีการที่ใช้ในการทำวิจัย ประกอบด้วย การวิเคราะห์ด้วยไฟไนเอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม Ansys/Explicit ร่วมกับการทดสอบตามมาตรฐาน NIJ เป็นการทำการจำลองและทดสอบในบางกรณีเพื่อยืนยันขีดความสามารถในการวิเคราะห์ของโปรแกรมไฟไนเอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Ansys/Explicit ซึ่งวิธีการดำเนินงานเริ่มจากการสร้างแบบจำลองเกราะกันกระสุนแบบ 3 มิติ ด้วยโปรแกรม SolidWorks ในรูปแบบของ Part ที่เป็น Multibody จะได้แผ่นโลหะขนาดความกว้างx ความยาวเท่ากับ 300 x 300 mm ที่ความหนาต่างๆ ในการวิเคราะห์แผ่นเกราะกันกระสุนด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ Ansys/Explicit ต้องกำหนดสมบัติของวัสดุตามรูปแบบความเสียหายของวัสดุในโปรแกรม Ansys / Engineering Data โดย SKD11 มีรูปแบบความเสียหายตามทฤษฎีของ Johnson-Cook Strength, กระสุนที่ทำจากทังสเตนคาร์ไบด์ มีรูปแบบความเสียหายตามทฤษฎี Johnson-Holmquist กำหนดตัวแปรสำคัญคือ ค่าความหนาของแผ่นเกราะ การซ้อนกันการออกแบบของแผ่นเกราะ 5 แบบ ชนิดของวัสดุที่ทำเกราะ และมุมการยิงเข้าหาแผ่นเกราะ จากนั้นเปรียบเทียบผลจากวิธีการทดลองและไฟไนเอลิเมนต์ด้วยลักษณะการเสียหายของแผ่นเกราะ ระยะการนูนของแผ่นเกราะที่ผ่านการยิง เป็นต้น ซึ่งจากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่ามีความสอดคล้องกัน

ผลลัพธ์จากการวิจัยสามารถตอบวัตถุประสงค์ของงานวิจัยได้ดังนี้

1. พฤติกรรมการเสียรูปของแผ่นเกราะโลหะพรุนแบบเรียงซ้อนกันโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการดำเนินงาน ได้กำหนดขอบเขต เป็นกรณีศึกษา 5 กรณี และได้ตรวจสอบพฤติกรรมของแผ่นเกราะพรุน 4 กรณี ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้มาตราฐาน NIJ ระดับ 3, V=850 m/s ผลออกมาดังนี้ กรณี 1 แผ่นเต็มปกติ ค่าที่ออกมา ยุบและทะลุ กรณี 2 แผ่นรูพรุนยิงกลางรู ค่าที่ออกมา กระสุนพุ่งทะลุผ่านรูพรุนตรงกลางอย่างง่ายดาย กรณี 3 แผ่นรูพรุนทะลุตลอด ยิงกระสุนตรงแนวทแยงมุมระหว่างรู ค่าที่ออกมา เกือบทะลุ มีแรงสั่นสะเทือนบนแผ่น ช่วยในการต้านทานกระสุน กรณี

4 รูพรุนลึก 5 mm ยิงตรงแนวทแยงมุมระหว่างรู ผลเกือบทะลุ มีแรงสั่นสะเทือนบนแผ่น ช่วยในการต้านทานกระสุน ดีกว่ากรณี 3 และ กรณี 5 แผ่นถูกเซาะร่องนูน ยิงกระสุนบนปุ่มนูน ปุ่มจะถูกทำลายสามารถต้านทานกระสุนได้

2. ความเค้นที่เกิดขึ้นกับแผ่นเกราะโลหะพรุนแบบเรียงซ้อนที่มีความแข็งแรงสูงต่อกระสุนเจาะเกราะ 7.62 โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้กำหนดขอบเขต เป็นกรณีศึกษา 5 กรณี และได้ความเค้นที่เกิดขึ้นกับแผ่นเกราะโลหะพรุน 4 กรณี ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้มาตราฐาน NIJ ระดับ 3, V=850 m/s ผลออกมาดังนี้ กรณี 1 แผ่นเต็มปกติ ผลที่ออกมา พบว่าค่าความเค้นวอนมิสเสสที่เกิดขึ้นกับแผ่นเกราะที่มีความหนา 6, 8 และ 10 มิลลิเมตร ต่างก็มีลักษณะคล้ายคลึงกัน กรณี 2 แผ่นรูพรุนยิงกลางรู ผลที่ออกมา ไม่มีค่าความเค้นเนื่องจากกระสุนทะลุผ่าน กรณี 3 แผ่นรูพรุนทะลุตลอด ยิงกระสุนตรงแนวทแยงมุมระหว่างรู ผลที่ออกมา เกิดค่าความเค้นสูงสุดเปลี่ยนแปลงขึ้นลงในช่วง 120 ถึง 260 เมกะปาสคาล นั่นแสดงให้เห็นว่าการสร้างรูเจาะบนแผ่นเกราะจะส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนเกิดขึ้น การสั่นสะเทือนนี้จะส่งผลให้ค่าความเค้นสูงสุดเปลี่ยนแปลง กรณี 4 รูพรุนลึก 5 mm ยิงตรงแนวทแยงมุมระหว่างรู ผลที่ออกมา เกิดค่าความเค้นสูงสุดเปลี่ยนแปลงขึ้นลงในช่วง 120 ถึง 260 เมกะปาสคาลแต่ดีกว่ากรณี 3 เพราะมีเนื้อโลหะมากกว่าที่ใช้รองรับกระสุน กรณี 5 แผ่นถูกเซาะร่องนูน ยิงกระสุนบนปุ่มนูน ผลที่ออกมา เกิดค่าความเค้นสูงสุดเปลี่ยนแปลงขึ้นลงในช่วง 100 ถึง 340 เมกะปาสคาล แต่เกราะที่ออกมาทำได้ยากและใช้เวลาในการผลิต

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากกรณีต่างๆทั้ง 5 กรณี ได้มีการเปรียบเทียบทั้งการทดลองจริง และ ใช้โปรม Ansys เพื่อที่จะได้เกราะที่มีคุณภาพและน้ำหนักเบา ในกรณีที่ 4 เกราะแบบ เจาะรูพรุน(ไม่ทะลุผ่าน)ซึ่งเป็นเกราะที่ สร้างได้ไม่ยาก และมีประสิทธิภาพในการป้องกันกระสุน ตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 จึงเหมาะในนำไปทำแผ่นเกราะโลหะกันกระสุนที่ใช้กับรถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็ก ซึ่งสามารถพัฒนาให้อยู่บนมาตรฐาน NIJ ระดับ 4 ได้ โดยมาตรฐานนี้จะใช้สำหรับยานพาหนะหรืออาคารก่อสร้างต้านทานกระสุนเท่านั้น ไม่นำมาใช้กับเกราะส่วนบุคคล การทดลองการยิงด้วยกระสุนจริงมีค่าใช้จ่าย ดังนั้นการใช้โปรแกรมทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีขีดความสามารถในการวิเคราะห์โจทย์ปัญหาแบบนี้จะช่วยลดต้นทุนในการออกแบบและวิเคราะห์ผลลัพธ์ได้เป็นอย่างดี

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

การทดสอบการยิงกระสุน ในงานวิจัยนี้เลือกทดสอบที่โรงงานวัตถุระเบิดทหาร กรมการอุตสาหกรรมทหาร ศูนย์การอุตสาหกรรมป้องกันประเทศและพลังงานทหาร ซึ่งก่อนการเดินทางนำ

แผ่นโลหะที่เตรียมไว้จะต้องประสานและติดต่อไปก่อนล่วงหน้าและจะต้องปฏิบัติตนอย่างเคร่งครัด ขณะทำการทดสอบเพื่อความปลอดภัย การทดสอบการยิงตาม NIJ ระดับ 4 มีความน่าสนใจอย่างมาก เพราะเป็นระดับสูงสุด หากทำการทดสอบมากกว่านี้จะส่งผลต่อผลการเปรียบเทียบและเห็นผลที่ชัดเจนขึ้น ทั้งนี้กระสุนสำหรับการยิงตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 4 ค่อนข้างหายาก และทางหน่วยงานไม่ได้มีสำรองไว้ จึงต้องวางแผนงานและประสานล่วงหน้าอย่างยาวนาน

เอกสารอ้างอิง

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

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

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

[4] What is Explicit Dynamics?. (JULY 27, 2022). [Online]. Available: https://www.ansys.com/blog/what-is-explicit-dynamics

[5] มาตรฐานยุทโธปกรณ์กระทรวงกลาโหมว่าด้วยแผ่นเกราะกันกระสุน, คณะอนุกรรมการกำหนดมาตรฐานยุทโธปกรณ์กระทรวงกลาโหม

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

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

[8] 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.

[9] วิสา คร้ามอ่ำ, “แผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนด้วยวัสดุเชิงประกอบ,” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมแแผ่นเกราะโลหะกันกระสุนครื่องกล, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, 2561.

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

[11] อนุชา สายเจริญ, “การวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนบนผิวเกราะอะลูมิเนียมด้วยระเบียบวิธีไฟไนเอลิเมนต์,” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, 2564.

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

[13] 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.

[14] 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.

[15] .P K Gupta, M A Iqbal, Zaid Mohammad, “Energy dissipation in plastic deformationof thin aluminum targets subjected to projectile impact,” *International Journal of Impact Engineering*, vol. 110, pp. 85-96, Dec. 2017.

[16] 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,

[17] กรมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีกลาโหม, “เอกสารการปรับปรุงมาตรฐานยุทโธปกรณ์กระทรวงกลาโหมว่าด้วยเสื้อเกราะกันกระสุน กรมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีกลาโหม,” 27 พ.ย. 2558.

ภาคผนวก ก

บทความตีพิมพ์เผยแพร่และใบรับรองการนำเสนอ

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

ดำเนินการจัดงาน (Organizer)

โดย

อำนวยการจัดงาน (Hosts)

โดย

ร่วมจัดงาน (Co-Hosts)

โดย

ประวัติ
การประชุมวิชาการราชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ

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

คำนำ

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

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

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

หากการดำเนินงานในครั้งนี้บกพร่องหรือผิดพลาดประการใด ทางคณะกรรมการดำเนินงาน RMTC 2023 ต้องขออภัยมา ณ โอกาส นี้

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

สารบัญ

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

การประชุมวิชาการราชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 8
24 – 26 พฤษภาคม 2566 ณ โรงแรม อมารี พัทยา จังหวัดชลบุรี
รหัสบทความ MSA-346

การตรวจสอบพฤติกรรมของแผ่นเกราะพรุนต่อกระสุนเจาะเกราะ 7.62x51 มม. โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Investigation of the Behavior of Perforated Armor Plates Against 7.62x51 mm Armor-Piercing Projectiles Using the Finite Element Method

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

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

บทคัดย่อ

แผ่นเกราะโลหะกันกระสุนตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 เป็นอีกหนึ่งนวัตกรรมที่มีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง แผ่นเกราะโลหะได้รับการออกแบบที่มีลักษณะหลากหลายรูปแบบ บทความนี้เลือกใช้รูปแบบแผ่นเกราะมีรูพรุน โดยใช้หลักการเบี่ยงเบนทิศทางของกระสุนที่พุ่งเข้าเจาะเกราะที่มุมศูนย์องศา วัสดุ SKD11 ได้รับเลือกมาใช้เป็นวัสดุแผ่นหน้าแผ่นเกราะด้านหลังจะเป็นวัสดุ SUS304 ที่ทำหน้าที่ดูดซับพลังงานการเคลื่อนที่ของกระสุน ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ถูกกำหนดเป็นเครื่องมือในการแก้ปัญหา โดยเลือกใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS ในโหมด Explicit/Dynamics แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ได้รับการพิสูจน์ความถูกต้องโดยเปรียบเทียบผลวิเคราะห์กับการทดลอง ในบทความนี้ได้ใช้แบบจำลองที่ผ่านการพิสูจน์มาใช้ในการวิเคราะห์ต่อเนื่องกับแผ่นเกราะโลหะแบบมีรูพรุน แผ่นเกราะที่มีรูพรุนได้รับการออกแบบให้มีรูพรุนทะลุตลอดความหนาของแผ่นเกราะ และแบบมีรูพรุนทั่วแผ่นแต่ไม่ทะลุแผ่นเกราะ จากผลการวิเคราะห์พบว่า การสร้างแผ่นเกราะให้มีรูพรุนในรูปแบบทะลุผ่านตลอดความหนาแผ่นเกราะนั้นไม่สามารถเพิ่มขีดความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุได้ แต่ในกรณีแผ่นเกราะมีรูพรุนแต่ไม่ทะลุตลอดความหนาจะช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการหักเหทิศทางกระสุน และเพิ่มความสามารถต้านทานการเจาะทะลุ อีกทั้งยังช่วยลดน้ำหนักของแผ่นเกราะลงได้ร้อยละ 10

คำหลัก: รถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะ, เกราะโลหะพรุนกันกระสุน, มาตรฐานเอ็นไอเจ, , วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

The bulletproof metal plate, in accordance with NIJ level 3, is another innovation that has been continuously developed. Numerous shapes of the metal have been created. This article concentrated on the form of porous plates using the principle of the direction deflection of the bullet penetrating the shield at zero degrees It was decided to use material SKD11 for the front plate. Combustible SUS304 material, which absorbs the movement energy of the bullet, would be used to make the rear shield plate. The finished program of ANSYS in Explicit/Dynamic mode in the finite element approach was used to resolve this problem. The finite element model had been proof-validated by comparing the analysis results with the outcomes of the experiment. In this research, a continuous examination of the porous metal plate was conducted using a verified simulation model. Two different types of porous plates were created for all of the surfaces of the plates, which were either completely or partially perforated with holes. According to analysis, it was discovered that a plate with porous material in a pattern that penetrated through the thickness of the plate could not increase the resistance to penetration. However, an armor plate with porous material that was not through the plate would be able to increase both the ability to refract bullet direction and the resistance to penetration. Additionally, it will lighten the shield's weight by 10%.

Keywords: Small Armored Regular Truck, Bulletproof Shield, NIJ Standard, Finite Element Method

1. บทนำ

แผ่นเกราะกันกระสุนที่ใช้ในการป้องกันการเจาะทะลุของกระสุนแบบต่างๆ ได้รับพัฒนาและสร้างขึ้นอย่างต่อเนื่องด้วยเทคโนโลยีด้านวัสดุที่ก้าวล้ำส่งผลให้มีรูปแบบของแผ่นเกราะมากมาย และมีขีดความสามารถที่แตกต่างกันออกไป กระสุนขนาด 7.62 มิลลิเมตร เป็นรูปแบบกระสุนชนิดหนึ่งที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในการทหารและเพื่อความมั่นคงของประเทศ มีการพัฒนาแผ่นเกราะให้สามารถต้านทานกระสุนชนิดนี้มากมาย Namik Kilic et al. [1] ได้ศึกษาความแข็งแรงของแผ่นเกราะรูพรุนที่ต้านทานการเจาะของกระสุน 7.62x54 มิลลิเมตร โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม LS-Dyna และการทดลองร่วมกันเพื่อตรวจสอบความเที่ยงตรง การทดสอบได้ดำเนินการเกี่ยวกับแผ่นเกราะขนาดใหญ่ ที่มีความหนา 9 และ 20 มิลลิเมตร ผลการวิเคราะห์ทั้งสองวิธีมีความสัมพันธ์กันอย่างมาก โดยเมื่อกระสุนกระทบกับแผ่นเกราะที่มีการเจาะรูในบริเวณที่ไม่สมมาตร เช่น ขอบของรูเจาะจะทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของหัวกระสุน และเพิ่มขีดความสามารถในการป้องกันกระสุนได้ B. Z. (Gama) Haque et al. [2] นำเสนอความก้าวหน้าในด้านบุคลากรป้องกันและชุดเกราะของยานพาหนะ โดยรูเจาะหรือร่องที่เกิดขึ้นบนผิวของแผ่นเกราะถูกออกแบบมาเพื่อใช้ต่อต้านกระสุนเมื่อกระสุนพุ่งเข้าหาขอบ ประสิทธิภาพของแผ่นเกราะจะขึ้นกับหลายตัวแปร เช่น ความแข็งแรงของวัสดุ ความหนาของแผ่น และการวางแนวของหลุม รูปร่างของแต่ละรูซึ่งจะเหมือนหรือต่างกันก็ได้ และการจัดเรียงเป็นแบบปกติหรือไม่สม่ำเสมอก็ได้

จากที่ผ่านมามีการนำเสนอบทความเกี่ยวกับแผ่นคอมโพสิตโลหะโฟมเป็นวัสดุอีกประเภทหนึ่งที่มีน้ำหนักเบาความแข็งแรงสูง เป็นวัสดุที่มีรูพรุนมีความสามารถในการดูดซับพลังงานจำนวนมาก [3]-[7] นักวิจัยได้ศึกษาประสิทธิภาพของโลหะคอมโพสิตเกราะโฟมเซรามิก ซึ่งเกราะสามารถทนต่อความเค้นอัดสูงและความเครียดสูงขึ้น 50% บทความวิจัยจำนวนมากที่เกี่ยวข้องกับแผ่นเกราะได้ถูกนำเสนอโดยใช้วิธีการทดลองและการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยการจำลองโดยใช้โปรแกรมที่หลายหลาย แผ่นเกราะโลหะเป็นอีกวัสดุหนึ่งที่นำมาใช้เป็นจำนวนมาก แต่ด้วยน้ำหนักที่มากจึงนำมาใช้กับ

ยานพาหนะเป็นหลัก การพัฒนาแผ่นเกราะด้วยวัสดุเชิงประกอบก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยม วัสดุโลหะชนิดพิเศษอาจหาซื้อไม่ได้ทั่วไปภายในประเทศ เช่น Weldox 460 E เป็นอีกวัสดุหนึ่งที่จัดว่าเป็นเหล็กกล้าประสิทธิภาพสูง (High Performance Steel) ในด้านความต้านทานแรงดึง ความเหนียว การเชื่อม การขึ้นรูปเย็นและความต้านทานการกัดกร่อน T. Borvik et al. [8] ได้ศึกษาพฤติกรรมของแผ่นเหล็กกับการเจาะทะลุของกระสุน พัฒนาโปรแกรมทดสอบลักษณะเฉพาะของวัสดุเพื่อค้นหาแบบจำลองความแข็งแรงและความล้มเหลวของ Johnson–Cook (J–C) สำหรับเหล็กกล้า Weldox 460 E โปรเจกไทล์ที่ใช้ในการจำลองเชิงตัวเลข 2 มิติถูกสร้างเป็นแบบจำลองเชิงเส้นตรงด้วยค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่ 200 จิกะปาสคาล และอัตราส่วนของปัวซองที่ 0.33 และ T. Borvik et al. [9] ได้จำลองวัสดุที่เป็นอิสระจากอัตราความเครียดของพลาสติกและยืดหยุ่นพร้อมการชุบแข็งและกำหนดเป็นไอโซโทรปิก ทำการตรวจสอบผลกระทบรูปร่างของโพรเจกไทล์ด้วยการจำลองที่ดำเนินการบนโปรแกรม Ls-Dyna ปัญหาเชิงตัวเลขจึงถูกขจัดออกไป และบรรลุข้อตกลงที่สมเหตุสมผลเพื่อค้นหาความเร็วจำกัดของขีปนาวุธ

ดังนั้นการพัฒนาแผ่นเกราะด้วยการจำลอง การวิเคราะห์ และทดลองกับวัสดุเท่าที่หาได้ในประเทศจึงเป็นอีกแนวทางที่จะช่วยลดปัญหาด้านวัสดุ การนำเข้า และต้นทุนที่ลดลง เป็นต้น วัสดุที่มีความน่าสนใจคือวัสดุที่สามารถชุบแข็งได้ เช่น เหล็กกล้าแม่พิมพ์ SKD 11 ที่ชุบแข็งได้มาก เมื่อชุบแข็งแล้วจะถูกนำมาใช้เป็นปราการด่านแรกที่กระสุนจะเข้ามาปะทะและถูกทำลาย จากงานวิจัยของ K. Navapon et al. [10] ได้นำเสนอการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของแผ่นเกราะกันกระสุน SKD11 และ SUS304 ที่ต้านทานการเจาะของกระสุน 7.62 มิลลิเมตร โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ตามมาตรฐาน NIJ 4 เปรียบเทียบผลลัพธ์การเสียหายของแผ่นเกราะและกระสุนกับการทดลอง จนได้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เหมาะสมและนำไปสู่การนำเสนอบทความอีกหลายบทความ [11]-[14] ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เดียวกันแต่วิเคราะห์ภายใต้ตัวแปรที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นในบทความนี้จึงเลือกใช้แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ [10]-[14] มาวิเคราะห์ต่อยอด โดยบทความนี้ได้กำหนดตัวแปรที่ใช้วิเคราะห์เป็นวัสดุ SKD 11 ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนา รูพรุนบนแผ่นเกราะและตำแหน่งปะทะของกระสุน เพื่อทำนายพฤติกรรมการเสียหายของแผ่นเกราะกันกระสุน โดยจะใช้ระเบียบวิธีการประมาณค่าเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม Ansys Explicit/Dynamic ในการนำเสนอผลเท่านั้น

2. ระเบียบวิธีวิจัย

Explicit/dynamics ในโปรแกรม ANSYS ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ในบทความนี้ ด้วยวิธีการรวมเวลา (Time integration method) เพื่อวิเคราะห์ปัญหาการตอบสนองแบบไดนามิกในกลศาสตร์ของแข็ง วิธีนี้จะแบ่งเวลาออกเป็นจำนวนขั้นเวลา (Time step) ที่จำกัดและแก้ปัญหาในช่วงเวลาดังกล่าวนั้น สำหรับ Explicit/dynamics ขั้นเวลาต้องน้อยกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำ ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดเอลิเมนต์ขั้นต่ำสุด (Minimum element size) ที่สร้างขึ้นหรือดีกรีของเอลิเมนต์ Explicit/dynamics จึงเหมาะสมกับการวิเคราะห์การเสียรูปและความเครียดขนาดใหญ่ การแพร่กระจายของคลื่นกระแทก พฤติกรรมของวัสดุที่ไม่เป็นเชิงเส้นสูง การสัมผัสที่ซับซ้อน การแยกส่วน การโก่งตัวแบบไม่เชิงเส้น ยกตัวอย่างเช่น การตกกระทบ การกระแทก การเจาะทะลุ การระเบิด เป็นต้น

2.1 กระบวนการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

2.1.1 Pre-processing คือกระบวนการสร้างไฟไนต์เอลิเมนต์โมเดล โดยต้องจัดเตรียมข้อมูลก่อนเข้าสู่การวิเคราะห์ ประกอบด้วย การสร้างแบบโมเดล ซึ่งโครงการวิจัยนี้เลือกใช้โปรแกรม Ansys/DesignModeler ในการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ และนำเข้าสู่โปรแกรม Ansys Explicit/Dynamics กำหนดสภาวะขอบเขตหรือเงื่อนไขขอบเขต (Support type) เช่น การจับยึดแผ่นเกราะกันกระสุน การกำหนดชนิดของวัสดุ (Material type) เพื่อกำหนดสมบัติของวัสดุ (Material properties) เช่น ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น ความเค้นคราก (Tensile Yield Strength) ความหนาแน่นวัสดุ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน การกำหนด Isotropic Elasticity, Johnson- Holmquist Strength Continuous, Johnson Cook Failure, Steinberg Guinan Strength, EOS เป็นต้น เลือกชนิดของเอลิเมนต์และควบคุมความละเอียดของเอลิ

เมนต์ (Element size) สภาวะและตำแหน่งของกระสุนกับแผ่นเกราะ เช่น ตำแหน่ง ขนาดและทิศทางของกระสุนที่จะวิ่งมาปะทะด้วยความเร็วค่าหนึ่งตามมาตรฐานต่อแผ่นเกราะ การกำหนดหน้าสัมผัส (Contact) เป็นต้น

2.1.2 Solve-processing เป็นกระบวนการประมวลผล โดยใช้ Autodyn solver วิเคราะห์แบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นสูง การเสียรูปขนาดใหญ่ ปัญหาที่เกิดจากการสัมผัส ซึ่งเกี่ยวข้องกับผลกระทบการสัมผัสหลายส่วนของรูปร่าง และพฤติกรรมของวัสดุที่ไม่เป็นเชิงเส้นสูง ปัญหาที่มีลักษณะเปลี่ยนรูปถาวรก็ควรเลือกแบบพลาสติก (Plasticity)

2.1.3 Post-processing เป็นการแสดงผลลัพธ์ ประกอบด้วย การเสียรูป ทิศทางการเสียรูป ความเร็วของวัตถุ ทิศทางของความเร็ว ความเค้นและความเครียดต่างๆ

2.2 กำหนดสมมติฐานในการวิเคราะห์

SKD 11 เป็นวัสดุที่ใช้สำหรับทำแผ่นเกราะ กำหนดให้เป็นวัสดุที่มีเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) และมีสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทุกทาง (Isotropic Materials) ความเสียหายที่เกิดขึ้นพิจารณาตั้งแต่ช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นไปจนถึงช่วงพลาสติก ความเสียหายที่เกิดขึ้นอยู่ในระดับที่มีอัตราความเครียดสูง

2.3 ทฤษฎีและสมบัติของวัสดุ

แผ่นเกราะกันกระสุนและหัวกระสุนถูกสร้างโดยโปรแกรม ANSYS DesignModeler ที่มีหลายชิ้นส่วนแยกกันแต่อยู่ในไฟล์ชิ้นส่วนเดียวกัน (Multibody) แผ่นเกราะมีขนาดความกว้างและความยาวเท่ากับ 300x300 มิลลิเมตร โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นเกราะเป็นกรณีต่างๆ สำหรับกระสุนที่ในการจำลองเป็นกระสุน 7.62x51 มิลลิเมตร ที่มีความเร็วในการจำลองของกระสุนตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 สำหรับกระสุนทังสเตนคาร์ไบด์ (Tungsten carbide bullet) เป็นกระสุนเจาะเกราะที่มีส่วนของหัวกระสุนอยู่ภายในปลอกทองเหลืองทำจากทังสเตนคาร์ไบด์ โดยมีชื่อเรียกตามขนาดคือ “7.62 mm” รูปแบบความเสียหายของ Johnson-Holmquist Failure Model จึงถูกนำมาใช้กับกระสุนดังกล่าวที่มีความแข็งเปราะอยู่ภายใต้แรงดันขนาดใหญ่และอัตราความเครียดสูง รูปแบบจะพยายามที่จะรวมปรากฏการณ์ที่พบเมื่อวัสดุที่เปราะบางถูกแรงกระทำและเกิดความเสียหาย ซึ่งเป็นหนึ่งในแบบจำลองที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดเมื่อต้องรองรับกับผลกระทบจากขีปนาวุธ (Ballistic) กำหนดให้ σ คือความเค้นคราก (Yield Stress) เป็นไปตามสมการดังนี้ [15]

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

โดยที่ $T^* = \dfrac{T}{T_{HEL}}$ และ $P^* = \dfrac{P}{P_{HEL}}$ (2)

โดยที่ A, B, C, M, N เป็นค่าคงที่ของวัสดุ ความดันปกติ คือ $P^* = P / P_{HEL}$ โดยที่ P คือความดันไฮโดรสแตติกที่แท้จริง และค่า P_{HEL} คือค่าความดันไฮโดรสแตติกที่ HEL (Hugoniot Elastic Limit) ความดันไฮโดรสแตติก แรงดึงสูงสุดที่ปรับให้เป็นมาตรฐานคือ $T^* = T / T_{HEL}$ โดยที่ T คือแรงดันไฟฟ้าสถิตสูงสุดที่วัสดุสามารถทนได้ $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0$ คืออัตราความเครียดไร้มิติ โดยที่ $\dot{\varepsilon}$ คืออัตราความเครียดที่เทียบเท่าจริง และ $\dot{\varepsilon}_0 = 1\ s^{-1}$ [15]

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

$$\sigma_i^* = A\left(P^* + T^*\right)^N .\left(1 + C\ln\dot{\varepsilon}^*\right) \quad (3)$$

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

$$\sigma_f^* = B(P^*)^M .\left(1 + C\ln\dot{\varepsilon}^*\right) \le SFMAX \quad (4)$$

Johnson-Cook Model คือความสัมพันธ์ของวัสดุโลหะระหว่างความเค้นและความเครียดสามารถอธิบายได้ภายใต้สภาวะของการเปลี่ยนแปลงรูปขนาดใหญ่ (Large deformation) อัตราความเครียดสูง (High strain rate) และอุณหภูมิที่สูงขึ้น (High temperature) โมเดลนี้ได้ถูกนำมาใช้ในการทำนายพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุ แสดงดังสมการที่ (5) [16]

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)\left[1 + C\ln\dot{\varepsilon}^*\right]\left[1 - T^{*m}\right] \quad (5)$$

โดยที่ σ คือ ความเค้นเทียบเท่า (Equivalent stress) และค่า ε คือ ความเครียดพลาสติกที่เท่าเทียมกัน (Equivalent plastic strain) A, B, C, m และ n คือ ค่าคงที่ของวัสดุ โดยที่ A คือ ค่าคงที่ภายใต้เงื่อนไขอ้างอิงความเค้นของวัสดุ B คือ ค่าคงที่การแข็งตัวของความเครียด n คือ สัมประสิทธิ์การแข็งตัวของความเครียด C คือ ค่าสัมประสิทธิ์การเสริมความแข็งแกร่งของอัตราความเครียด (A strain-rate-hardening factor) และ m คือ ค่าสัมประสิทธิ์การอ่อนตัวด้วยความร้อน (Thermal-softening factor) $\dot{\varepsilon}^*$ คือ อัตราความเครียดไร้มิติที่อ้างอิงจากอัตราความเครียดที่ 1/s, T^* คือ อุณหภูมิไร้มิติ (Nondimensional temperature) สำหรับ T^* กำหนดได้ด้วยสมการดังนี้ [16]

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \qquad (6)$$

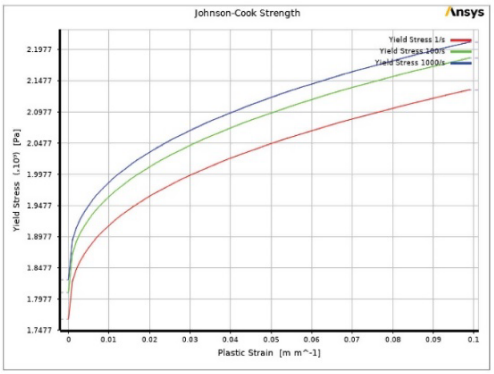
โดยที่ T_r คือ อุณหภูมิห้อง (298 K) และ T_m คือ อุณหภูมิหลอมละลายของวัสดุ โดยค่าสมบัติของวัสดุและพารามิเตอร์ของกระสุน 7.62x51 มิลลิเมตร เป็นวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ (Tungsten carbide) ที่ใช้ในการจำลองแสดงในตารางที่ 1 สำหรับแผ่นเกราะ SKD 11 แสดงดังตารางที่ 2 สำหรับความสัมพันธ์ของความเค้นคราก (Yield stress) และความเครียดแบบคงรูป (Plastic strain) สำหรับ SKD 11 และ Tungsten carbide แสดงดังรูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 Properties and parameter JH of tungsten carbide [10], [12], [17]

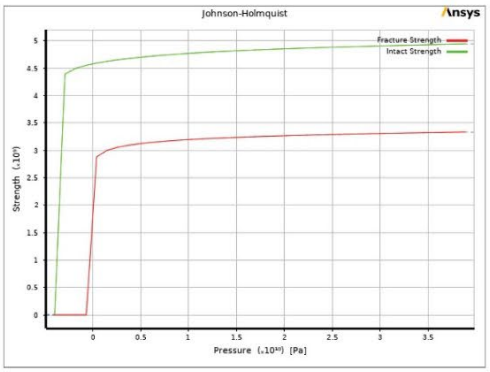
Properties	Tungsten carbide
Density (ρ, g/cm^3)	14.56
Young's modulus (E, GPa)	539
Poisson ratio (υ)	0.23
Bulk modulus (GPa)	332
Shear modulus (GPa)	219
Tensile yield strength (GPa)	3.85
Compressive yield strength (GPa)	4.53
Johnson-Holmquist Strength (Continuous JH-2)	
Damage type	Gradual (JH2)
Hugoniot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

ตารางที่ 2 Properties and parameter of SKD 11 [10], [12], [18]

Properties	SKD11
Density (ρ, g/cm^3)	8.4
Modulus of elasticity (E, GPa)	208
Poisson ratio (υ)	0.3
Bulk modulus (GPa)	173
Shear modulus (GPa)	80
Thermal conductivity (W/mK)	20.5 (350°C)
Thermal expansion (W/mK)	11
Specific heat (J/kg °C)	461
Johnson-cook strength	
Initial yield stress (A, MPa)	1766
Hardening constant (B, MPa)	904
Hardening exponent (n)	0.39
Strain rate constant (C)	0.012
Thermal softening exponent	3.38
Melting temperature (K)	1733



รูปที่ 1 Relationship between yield stress and plastic strain of Johnson-Cook Strength for SKD 11 [18]



รูปที่ 2 Relationship between strength and pressure of Johnson-Holmquist Failure Model for tungsten carbide [18]

2.4 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

โมเดลแผ่นเกราะกันกระสุนได้ถูกสร้างขึ้นให้มีขนาดพื้นที่ 300x300 มิลลิเมตร ด้วยความหนา 10 มิลลิเมตร สามารถแบ่งออกเป็นกรณีศึกษาได้ 4 กรณี คือ

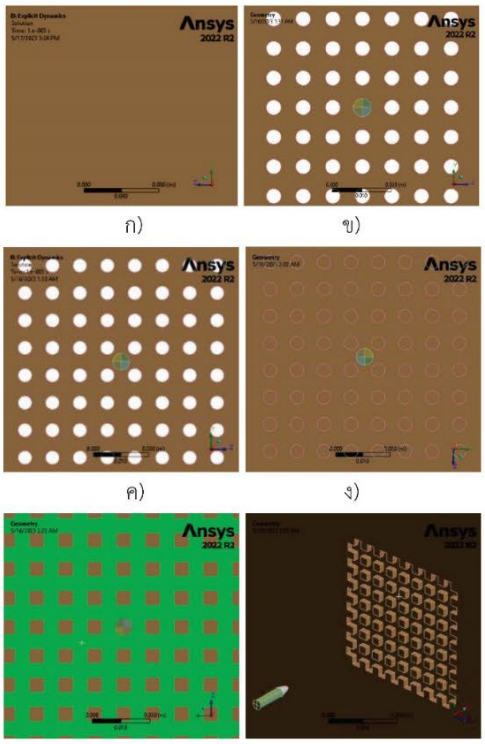
กรณีที่ 1 แผ่นเกราะหน้าเรียบไม่มีรูเจาะหรือรูพรุน ซึ่งมีความหนาอยู่ 3 ระดับ คือ 6, 8 และ 10 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3 ก)

กรณีที่ 2 แผ่นเกราะได้รับการเจาะรูทะลุผ่านตลอดด้วยรูเจาะที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร และมีระยะพิตช์ระหว่างรูเท่ากับ 10 มิลลิเมตร และกำหนดให้กระสุนพุ่งเข้าปะทะที่ตำแหน่งกลางรูเจาะได้ผลดังรูปที่ 3 ข)

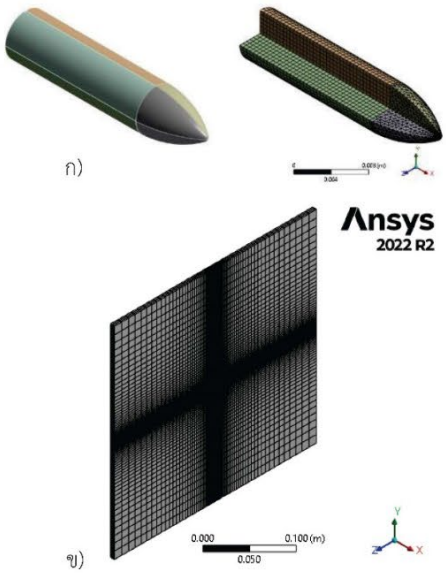
กรณีที่ 3 แผ่นเกราะได้รับการเจาะรูเช่นเดียวกับกรณีที่ 2 แต่กระสุนพุ่งเข้าปะทะแผ่นเกราะที่จุดตัดตรงแนวทะแยงของรูเจาะทั้ง 4 รู ได้ผลดังรูปที่ 3 ค)

กรณีที่ 4 แผ่นเกราะได้รับการเจาะรูลึก 5 มิลลิเมตร ด้วยรูเจาะที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร และมีระยะพิตช์ระหว่างรูเท่ากับ 10 มิลลิเมตร และกำหนดให้กระสุนพุ่งเข้าปะทะแผ่นเกราะที่จุดตัดตรงแนวทะแยงของรูเจาะทั้ง 4 รู ได้ผลดังรูปที่ 3 ง)

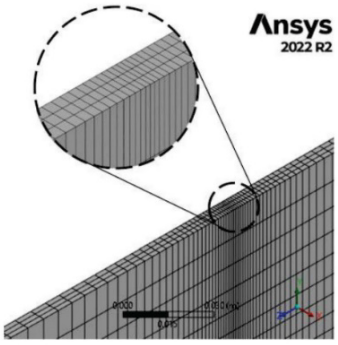
กรณีที่ 5 แผ่นเกราะได้รับการกัดให้เป็นร่องสี่เหลี่ยมกว้าง 5 มิลลิเมตร ลึก 5 มิลลิเมตร ทั้งแนวนอนและแนวตั้ง กระสุนพุ่งเข้าหาแผ่นเกราะในตำแหน่งที่ไม่มีการกัดร่องได้ผลดังรูปที่ 3 จ)



รูปที่ 3 โมเดลแผ่นเกราะกันกระสุน



รูปที่ 4 ผลลัพธ์จากการกำหนดและแบ่งเอลิเมนต์



รูปที่ 5 เทคนิคการควบคุมขนาดและแบ่งเอลิเมนต์

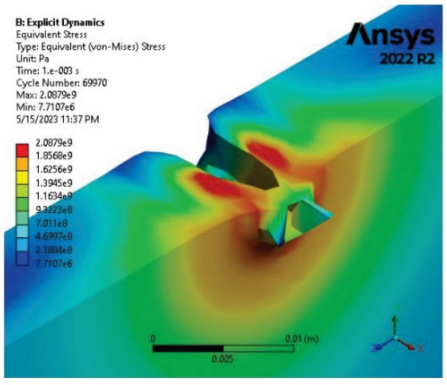
ด้วยเอลิเมนต์ที่เลือกใช้สำหรับลำตัวทรงกระบอกของกระสุนและแผ่นเกราะควรเป็นเอลิเมนต์ชนิดเฮกซะฮีดรอล (Hexahedral) และหัวกระสุนส่วนที่แหลมควรเป็นเอลิเมนต์ชนิดเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) เพื่อให้เกิดการจัดเรียงและกำหนดชนิดของเอลิเมนต์ได้อย่างง่ายและเหมาะสม โมเดลกระสุนได้รับการออกแบบให้มีชิ้นส่วนแยกจากกันจำนวนแปดชิ้นโดยตัวกระสุนแบ่งออกเป็นสองตอนในส่วนตอนแรกเป็นหัวกระสุนที่มีลักษณะโค้งแหลม ตอนที่สองเป็นลำตัวกระสุนที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกตัน ทั้งสองส่วนจะได้รับการแบ่งในแนวนอนและแนวตั้งทำมุม 90 องศาซึ่งกันและกันส่งผลให้ได้โมเดลกระสุนที่ประกอบรวมกันเป็นจำนวน 8 ชิ้นและมีหน้าสัมผัสติดกันดังรูปที่ 4 ในกระบวนการกำหนดหน้าสัมผัสให้กำหนดหน้าสัมผัสด้วย Contacts Bodies เป็นแบบ Bonded ทั้งหมดของกระสุนจำนวน 12 หน้าสัมผัส จากรูปที่ 4 ข) เป็นการควบคุมขนาดเอลิเมนต์ ให้เกิดการปรับขนาดเอลิเมนต์จากขอบของแผ่นเกราะที่มีขนาดเอลิเมนต์ใหญ่ลู่เข้าไปยังกลางแผ่นเกราะที่มีขนาดเอลิเมนต์ที่เล็กลง ด้วยการกำหนด Bias type และ Bias factor เท่ากับ 12 จึงส่งผลให้เห็นว่าเป็นแถบสีดำมืดตรงกลางแผ่น ซึ่งนั่นคือความถี่ของขนาดเอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็ก สำหรับรูปที่ 5 คือการใช้เทคนิคการเพิ่มชั้นเอลิเมนต์ด้วยการกำหนด Number of divisions เท่ากับ 3 คือหมายถึงมีจำนวน 3 ชั้น ซึ่งควรจะกำหนดเท่ากับ 3 เป็นอย่างน้อย

การกำหนดการจับยึดให้กำหนดที่ผิวขอบของแผ่นเกราะทั้ง 4 ด้านเป็นแบบยึดแน่น (Fixed support) กำหนดความเร็วของหัวกระสุนให้พุ่งเข้าแผ่นเกราะด้วยความเร็วตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 เท่ากับ 850 เมตรต่อวินาที ซึ่งในที่นี้คือทิศทางตามแกน +x ทำมุมปะทะกับแผ่นที่ 0 องศา ในทุกกรณีศึกษา จากนั้นกำหนดรูปแบบการวิเคราะห์เป็นแบบ Explicit/Dynamics ด้วยชุดคำนวณ AUTODYN ตั้งค่าการวิเคราะห์ด้วย End time เท่ากับ 0.001 การแสดงผลการวิเคราะห์ให้เลือกใช้ Equivalent (Von-Mises) Stress

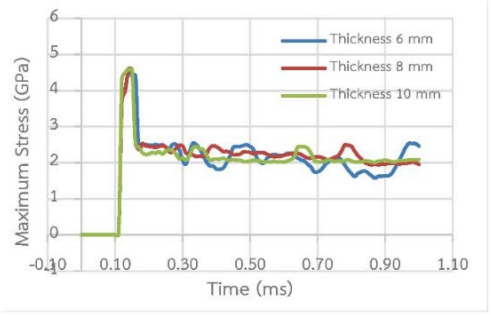
3. ผลการวิเคราะห์และอภิปรายผล

ผลการวิเคราะห์แบ่งออกเป็นกรณีศึกษาได้ดังนี้

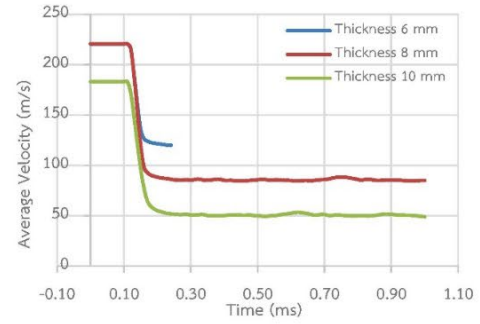
3.1 กรณีที่ 1 แผ่นเกราะหน้าเรียบไม่มีรูเจาะหรือรูพรุน ซึ่งมีความหนาอยู่ 3 ระดับ คือ 6, 8 และ 10 มิลลิเมตร รูปที่ 6 คือผลการวิเคราะห์แผ่นเกราะที่มีความหนา 10 มิลลิเมตร ด้วยค่าความเค้นวอนมิสเสส และพบว่าแผ่นเกราะถูกเจาะทะลุ จากรูปที่ 7 พบว่าค่าความเค้นวอนมิสเสสที่เกิดขึ้นกับแผ่นเกราะที่มีความหนา 6, 8 และ 10 มิลลิเมตร ต่างก็มีลักษณะคล้ายคลึงกัน แต่ยิ่งแผ่นเกราะมีความหนามากขึ้นจะส่งผลให้ความเค้นที่เกิดขึ้นค่อนข้างจะคงที่ตลอดความหนาของแผ่นเกราะที่กำลังถูกเจาะทะลุ จากรูปที่ 8 เห็นได้ว่าความเร็วเฉลี่ยของกระสุนจะลดลงเมื่อความหนาแผ่นเกราะมีมากขึ้น กระสุนเมื่อทะลุผ่านแผ่นเกราะที่มีความหนา 6, 8 และ 10 มิลลิเมตร จะมีความเร็วขณะทะลุผ่านเฉลี่ยที่ 120, 85 และ 50 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ และจะเห็นได้ว่าในการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น ระยะห่างระหว่างกระสุนและแผ่นเกราะไม่มีผลต่อผลการวิเคราะห์ แต่อาจส่งผลเกี่ยวกับเวลาในการวิเคราะห์ที่เพิ่มมากขึ้นหากมีระยะห่างดังกล่าวเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 6 ความเค้นวอนมิสเสสและลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นบนแผ่นเกราะ SKD 11 ที่มีความหนา 10 มิลลิเมตร

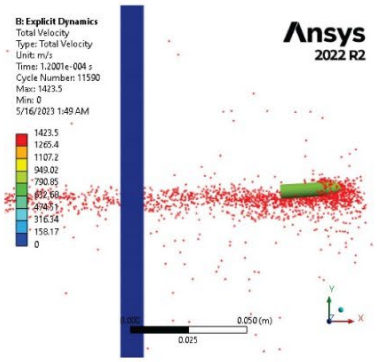


รูปที่ 7 ความเค้นสูงสุดเทียบกับเวลาเมื่อกระสุนพุ่งเข้าแผ่นเกราะ

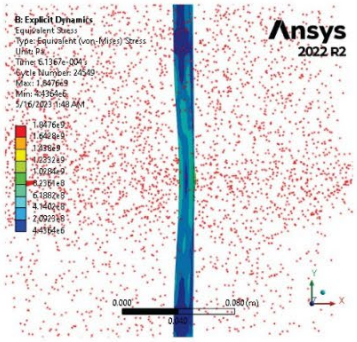


รูปที่ 8 ความเร็วเฉลี่ยของกระสุนเทียบกับเวลาของกรณีที่ 1

กรณีที่ 2 แผ่นเกราะได้รับการเจาะรูทะลุผ่านตลอดด้วยรูเจาะที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร และมีระยะพิตช์ระหว่างรูเท่ากับ 10 มิลลิเมตร และกำหนดให้กระสุนพุ่งเข้าปะทะที่ตำแหน่งกลางรูเจาะได้ผลดังรูปที่ 9 กระสุนทะลุผ่านในขณะที่กระสุนเสียรูปน้อยมาก ยังคงไว้ซึ่งรูปร่างของกระสุนเดิม

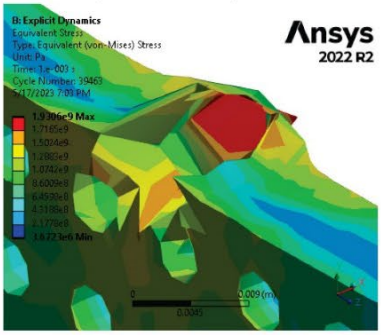


รูปที่ 9 กระสุนทะลุผ่านรูเจาะอย่างสมบูรณ์ในกรณีที่ 2

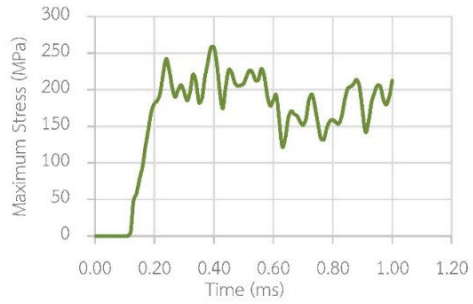


รูปที่ 10 รูเจาะบนแผ่นเกราะส่งผลให้แผ่นเกราะเกิดการสั่นสะเทือน

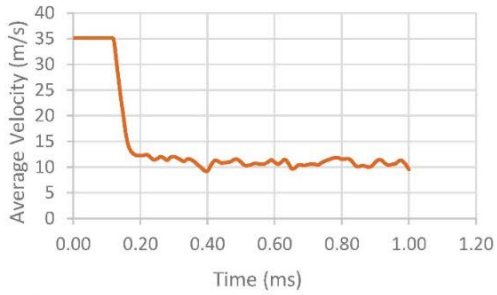
กรณีที่ 3 แผ่นเกราะได้รับการเจาะรูเช่นเดียวกับกรณีที่ 2 แต่กระสุนพุ่งเข้าปะทะแผ่นเกราะที่จุดตัดตรงแนวทะแยงของรูเจาะทั้ง 4 รู ได้ผลดังรูปที่ 11 กระสุนไม่สามารถทะลุผ่านแผ่นเกราะได้เนื่องจากตำแหน่งที่กระสุนปะทะกับแผ่นเกราะจะมีรูเจาะซึ่งทำไว้อยู่รอบด้านเป็นตัวที่รองรับแรงกระแทก เกิดการเสียรูปไปในทิศทางรอบด้านที่มีรูเจาะ จากกรณีที่ 1 ในรูปที่ 7 พบว่าเมื่อกระสุนเข้าปะทะกับแผ่นเกราะจะทำให้ความเค้นสูงสุดมีค่าอยู่ประมาณ 200 เมกะปาสคาล และค่าความเค้นสูงสุดค่อนข้างที่จะไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อเทียบกับเวลาที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ 3 ในรูปที่ 12 พบว่าเมื่อกระสุนวิ่งเข้าปะทะกับแผ่นเกราะจะเกิดค่าความเค้นสูงสุดเปลี่ยนแปลงขึ้นลงในช่วง 120 ถึง 260 เมกะปาสคาล นั่นแสดงให้เห็นว่าการสร้างรูเจาะบนแผ่นเกราะจะส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนเกิดขึ้น การสั่นสะเทือนนี้จะส่งผลให้ค่าความเค้นสูงสุดเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ ตลอดเวลา เป็นการทำให้กระสุนไม่สามารถทะลุผ่านแผ่นเกราะได้



รูปที่ 11 ความเค้นวอนมิสเสสและความเสียหายในกรณีที่ 3

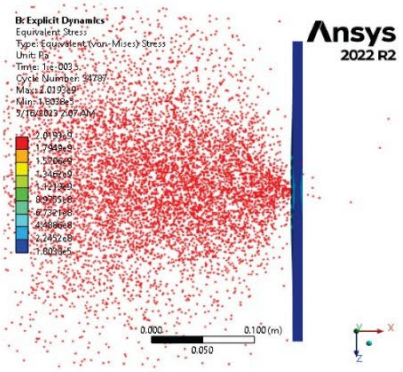


รูปที่ 12 ความเค้นสูงสุดเทียบกับเวลาเมื่อกระสุนพุ่งเข้าแผ่นเกราะในกรณีที่ 3

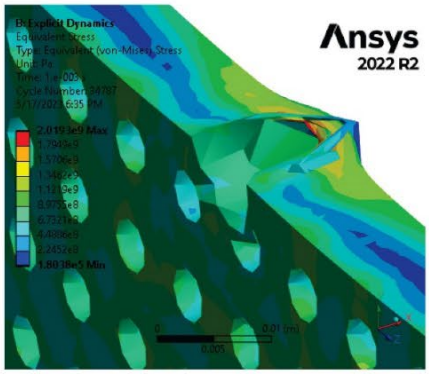


รูปที่ 13 ความเร็วเฉลี่ยของกระสุนเทียบกับเวลาในกรณีที่ 3

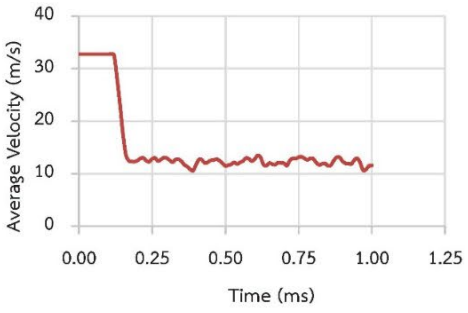
กรณีที่ 4 แผ่นเกราะได้รับการเจาะรูลึก 5 มิลลิเมตร ด้วยรูเจาะที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร และมีระยะพิตช์ระหว่างรูเท่ากับ 10 มิลลิเมตร และกำหนดให้กระสุนพุ่งเข้าปะทะแผ่นเกราะที่จุดตัดตรงแนวทะแยงของรูเจาะทั้ง 4 รู ได้ผลดังรูปที่ 14 และ 15 พบว่ากระสุนไม่สามารถทะลุผ่านแผ่นเกราะได้เช่นเดียวกับกรณีที่ 3 จากการเจาะรูลึก 5 มิลลิเมตรสามารถช่วยรองรับแรงปะทะที่เกิดขึ้นจากกระสุนเกิดการเสียรูปของเนื้อแผ่นเกราะเข้าไปยังบริเวณรูเจาะของแผ่นเกราะและส่งผลให้เกิดแรงสั่นสะเทือนในแผ่นเกราะ ความเร็วเมื่อปะทะกับแผ่นเกราะดังรูปที่ 16 พบว่ามีความใกล้เคียงกับความเร็วของกระสุนเมื่อปะทะแผ่นเกราะดังรูปที่ 13 จากกรณีที่ 2 และกรณีที่ 3 หากกระสุนปะทะเข้าที่ขอบรูหรือจุดตัดแนวทแยงระหว่างรูก็จะช่วยเบี่ยงเบนและหักเหทิศทางของกระสุนได้แต่หากกระสุนพุ่งตรงไปยังรูเจาะดังกรณีที่ 2 ก็จะไม่สามารถต้านทานการเจาะทะลุใดๆ ได้เลย นั่นหมายความว่าอาจจำเป็นต้องมีแผ่นเกราะชั้นที่สอง หรือใช้กรณีที่ 4 คือการเจาะรูแผ่นเกราะที่ความลึก 5 มิลลิเมตร หรืออาจจะน้อยกว่าเพื่อป้องกันไม่ให้กระสุนทะลุผ่านแผ่นเกราะได้ ซึ่งเป็นการเพิ่มการสั่นสะเทือนให้เกิดขึ้นที่แผ่นเกราะด้วยการเจาะรู



รูปที่ 14 กระสุนไม่ทะลุผ่านแผ่นเกราะในกรณีที่ 4

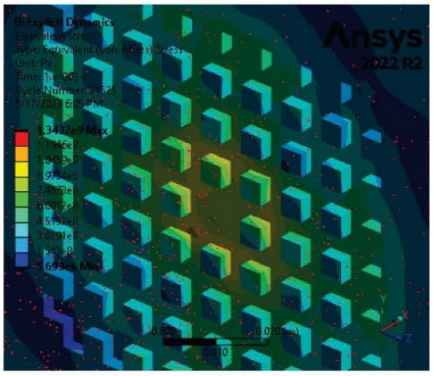


รูปที่ 15 ความเค้นวอนมิสเสสและความเสียหายในกรณีที่ 4 แผ่นเกราะได้รับการเจาะรูลึก 5 มิลลิเมตร

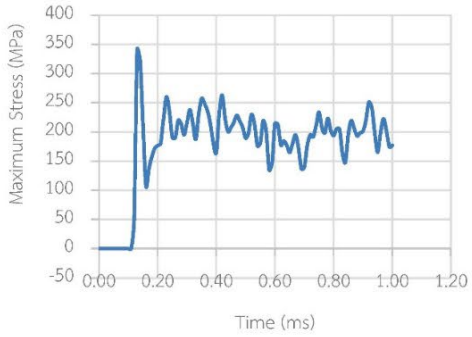


รูปที่ 16 ความเร็วเฉลี่ยของกระสุนเทียบกับเวลาในกรณีที่ 4

กรณีที่ 5 แผ่นเกราะได้รับการกัดให้เป็นร่องสี่เหลี่ยมกว้าง 5 มิลลิเมตร ลึก 5 มิลลิเมตร ทั้งแนวนอนและแนวตั้ง กระสุนพุ่งเข้าหาแผ่นเกราะในตำแหน่งที่ไม่มีการกัดร่อง ได้ผลดังรูปที่ 17-18 พบว่าตำแหน่งที่กระสุนพุ่งเข้าปะทะปุ่มนูนบนแผ่นเกราะ จะเข้าไปทำลายปุ่มที่สร้างขึ้นและทำให้มีพื้นที่ในการแตกกระจายออกไปรอบด้านข้าง ปุ่มหรือเนื้อแผ่นเกราะที่ไม่ได้รับการกัดเนื้อออกจึงแตกกระจายตัวออกไปโดยที่แผ่นเกราะจะไม่ทะลุ



รูปที่ 17 แผ่นเกราะได้รับการกัดให้เป็นร่องสี่เหลี่ยมกว้าง 5 มิลลิเมตร ลึก 5 มิลลิเมตร ในกรณีที่ 5



รูปที่ 18 ความเค้นสูงสุดเทียบกับเวลาเมื่อกระสุนพุ่งเข้าแผ่นเกราะในกรณีที่ 5

4. สรุปผลการวิเคราะห์

การวิเคราะห์แผ่นเกราะกันกระสุนที่ทำจากแผ่นวัสดุ SKD 11 ได้ถูกวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์นี้เป็นแบบจำลองที่ผ่านการพิสูจน์จากงานวิจัยที่ผ่านมา [10]-[14] ที่มีการเปรียบเทียบผลไฟไนต์เอลิเมนต์กับการทดลองมาแล้ว แผ่นเกราะที่กำหนดขึ้นนี้ทำด้วยวัสดุ SKD 11 ถูกนำมาวิเคราะห์โดยตั้งอยู่บนสมมติฐาน คือเป็นวัสดุเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) มีสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทุกทาง (Isotropic Materials) ความเสียหายที่เกิดขึ้นอยู่ในระดับที่มีอัตราความเครียดสูง

จากการศึกษาแผ่นเกราะกันกระสุนที่ไม่มีการเจาะทะลุให้เป็นรูพรุนเปรียบเทียบกับแผ่นเกราะกันกระสุนที่มีการเจาะรูให้เกิดรูพรุน สามารถสรุปออกมาได้ทั้งหมด 5 กรณี พบว่าในการเจาะรูบนแผ่นเกราะให้เกิดรูพรุนนั้นจะส่งผลให้เกิดแรงสั่นสะเทือนบนแผ่นเกราะเมื่อกระสุนวิ่งเข้ามาปะทะ หากกระสุนกระแทกลงไปยังตำแหน่งที่เป็นขอบหรือตำแหน่งที่ไม่ใช่ศูนย์กลางของรูเจาะจะส่งผลให้เกิดการหักเหของหัวกระสุนซึ่งเป็นข้อดี แต่ในกรณีที่กระสุนวิ่งทะลุตรงไปยังรูเจาะและได้ศูนย์กลางพอดีจะส่งผลให้ไม่สามารถต้านทานการเจาะทะลุใดๆ ได้เลย จึงอาจนำมาซึ่งการเพิ่มแผ่นเกราะซ้อนหรือแผ่นกระดาษชนิดอื่นเข้าไป แต่เมื่อทำการออกแบบใหม่โดยใช้การเจาะรูบนแผ่นเกราะให้เกิดรูพรุนโดยรูที่เจาะนั้นไม่ต้องเจาะทะลุผ่านก็สามารถป้องกันการเจาะทะลุของกระสุนได้เช่นกัน หรือในกรณีที่มีการเซาะร่องบนแผ่นเกราะหรือทำให้ผิวหน้าของแผ่นเกราะไม่ใช่แผ่นหน้าเรียบปกติก็จะสามารถส่งผลให้เกิดการหักเหของหัวกระสุนได้เช่นกัน

5. กิตติกรรมประกาศ

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

6. เอกสารอ้างอิง

[1] 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.

[2] B. Z. (Gama) Haque, M. M. Kearney, and J. W. G. Jr, “Advances in Protective Personnel and

Vehicle Armors," *Recent Pat. Mater. Sci.*, vol. 5, no. 2, pp. 105–136. 2012.

[3] B.P. Neville and A. Rabiei, "Composite Metal Foams Processed through Powder Metallurgy," *Mater. Des.*, vol. 29, pp. 388-339, 2008.

[4] A. Rabiei and M. Garcia-Avila, "Effect of Various Parameters on Properties of Composite Steel Foams under Variety of Loading Rates," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 564, pp. 539-547, 2013.

[5] A. Rabiei, B. Neville, N. Reese and L. Vendra, " New Composite Metal Foams under Compressive Cyclic Loadings," *Mater. Sci. Forum*, vol. 539-543, pp. 1868-1873, 2007.

[6] A. Rabiei and L.J. Vendra, "A Comparison of Composite Metal Foam's Properties and Other Comparable Metal Foams," *Mater. Lett.*, vol. 63, no. 5, pp. 533-536, Feb. 2009.

[7] A. Rabiei, L. Vendra, N. Reese, N. Young and B.P. Neville, "Processing and Characterization of a New Composite Metal Foam," *Mater. Trans.*, vol. 47, pp. 2148, 2006.

[8] T. Borvik, M. Langseth, OS, "Hopperstad and Malo KA. Ballistic penetration of steel plates," *Int J Impact Eng.*, vol. 22, pp. 855–886, 1999.

[9] T. Borvik, O. S. Hopperstad, T. Berstad, and M. Langeseth, "Perforation of 12 mm thick steel plates by 20 mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses Part II: numerical simulations," *Int J Impact Eng.*, vol. 27, pp. 37–64, 2002.

[10] K. Navapon and C. Prakorb, "Parameter analysis of SKD11 and SUS304 bulletproof plate that resistance penetration of bullet 7.62 mm according to standard NIJ 4 by finite element method," *International Journal of Mechanical Engineer and Technology*, vol. 10, pp. 207 – 221, Sep. 2019.

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

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

[13] N. Meesanu, P. Wirotcheewan, D. Nicomrat and P. Chartpuk, "Analysis of a Concave Bulletproof Plate for Refracting the Bullet Impact Direction with Finite Element Method," in *Proceeding of the 11th Rajamangala University of Technology International Conference "RMUT Driving toward Innovation, Economy and Green Technology for Sustainable Development"*, 2022, pp. 161-168.

[14] M. Thawornsin, S. Mongkonlerdmanee, D. Nicomrat and P. Chartpuk, "The Parameter Analysis of the Tungsten Carbide and SUS304 Armor Plate with a Finite Element Method," in *Proceeding of the 11th Rajamangala University of Technology International Conference "RMUT Driving toward Innovation, Economy and Green Technology for Sustainable Development"*, 2022, pp. 169-179.

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

[16] W. Hubert, Jr. Meyer and D. S. Kleponis, "An

Analysis of Parameters for the Johnson-Cook Strength Model for 2-in-Thick Rolled Homogeneous Armor," Army Research Laboratory, Jun. 2001.

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

[18] J. L. Li, L. L. Jing and M. Chen, "An FEM study on residual stresses induced by high-speed end-milling of hardened steel SKD11," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 209, no. 9, pp. 4515–4520, May 2009.

การประชุมวิชาการราชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 8

RMTC 2023

The 8th Rajamangala Manufacturing & Management Technology Conference 2023

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ขอมอบใบประกาศเกียรติคุณ ให้ไว้เพื่อแสดงว่า

กฤษฎา แสงพรายพรรณ์, ทรงวุฒิ มงคลเลิศมณี, อนันต์ เต็มเปี่ยม, แจ๊ค ชุ่มอินทร์, ประสิทธิ์ แพงเพชร, ประกอบ ชาติภุกต์

ได้เข้านำเสนอบทความเรื่อง

การตรวจสอบพฤติกรรมของแผ่นเกราะพรุนต่อกระสุนเจาะเกราะ 7.62x51 มม. โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

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

(รองศาสตราจารย์ ดร.พิชัย จันทร์มณี)
อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

(รองศาสตราจารย์ ดร.อนินท์ มีมนต์)
นายกสมาคมเครือข่ายราชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ นามสกุล นายกฤษฎา แสงพรายพรรณ์

วัน เดือน ปีเกิด 27 กุมภาพันธ์ 2523

ภูมิลำเนา 678 ซอยจรัญสนิวงศ์ 3 ต.วัดท่าพระ อ.บางกอกใหญ่ กรุงเทพฯ

ประวัติการศึกษา

วุฒิการศึกษา	**ชื่อสถาบัน**	**ปีที่สำเร็จการศึกษา**
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2545
ปริญญาตรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2548

ตำแหน่งและสถานที่ทำงานปัจจุบัน

- อาจารย์พิเศษ

  สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร 1381 ถ.ประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800