



การศึกษาพารามิเตอร์ในการขึ้นรูปแผ่นเกราะเซรามิกส์รูปร่างหกเหลี่ยมกันกระสุน
Study of Parameters for Forming Hexagonal Bulletproof Ceramic Armor Plate

ณัฐพงศ์ มีसानุ
Nuttapong Meesanu

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2564



การศึกษาพารามิเตอร์ในการขึ้นรูปแผ่นเกราะเซรามิกส์รูปร่างหกเหลี่ยมกันกระสุน
Study of Parameters for Forming Hexagonal Bulletproof Ceramic Armor Plate

ณัฐพงศ์ มีसानุ

Nuttapong Meesanu



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

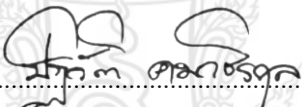
2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร


ชื่อวิทยานิพนธ์ การศึกษาพารามิเตอร์ในการขึ้นรูปแผ่นเกราะเซรามิกส์รูปร่างหกเหลี่ยม
ก้นกระสุน
ชื่อ นามสกุล ณัฐพงศ์ มีसानุ
ชื่อปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
คณะ วิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ วิโรจน์ชีวัน
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.ประกอบชาติภักต์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้ให้ความเห็นชอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แล้ว

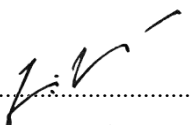

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำนาจ)


..... กรรมการ
(ดร.ปวิวัติ คมวชิรกุล)


..... กรรมการ
(ดร.ประกอบ ชาติภักต์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ วิโรจน์ชีวัน)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร


..... รักษาราชการแทนคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ พันธุ์นะ)

วันที่ 20 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2565

ชื่อวิทยานิพนธ์	การศึกษาพารามิเตอร์ในการขึ้นรูปแผ่นเกราะเซรามิกส์รูปร่างหกเหลี่ยม กันกระสุน
ชื่อ สกุล	ณัฐพงศ์ มีसानุ
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
สาขาวิชา และคณะ	วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา	2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์สองประการเพื่อศึกษาพารามิเตอร์ในการขึ้นรูปแผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนและสร้างโมเดลแผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนสำหรับรถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาการขึ้นรูปแผ่นเกราะเซรามิกส์ประกอบด้วยความหนาของแผ่นเกราะแรงอัด ซึ่งส่งผลต่อการกระจายความหนาแน่นของกรีนคอมแพค แผ่นเกราะเซรามิกส์มีรูปร่างเป็นหกเหลี่ยมและมีหน้ายุบ (Concave Bulletproof Plate) ผลจากการอัดขึ้นรูปแสดงให้เห็นว่าเกิดความหนาแน่นสูงมากที่พื้นผิวด้านข้างของแผ่นเกราะ และกระจายความหนาแน่นไม่เท่ากันทั่วปริมาตรซึ่งเกิดจากแรงเสียดทานที่ผนังแม่พิมพ์ สำหรับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ความเสียหายของแผ่นเกราะกันกระสุนซึ่งโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เลือกใช้คือ Ansys/Explicit Dynamic โมเดลแผ่นเกราะกันกระสุนมีรูปร่างด้วยวัสดุ SKD11 ซึ่งส่งผลให้ทิศทางการเคลื่อนที่ของกระสุนเปลี่ยนแปลงเมื่อกระสุนกระทบกับแผ่นกันกระสุนที่ความเร็ว 880 เมตรต่อวินาที ตามมาตรฐาน NIJ 4 กระสุนทำจากทั้งสแตนคาร์ไบด์และแผ่นเกราะเซรามิกส์มีขนาด 300×300 มิลลิเมตร และมีความหนา 14, 16, 18 และ 20 มิลลิเมตร กระสุนถูกยิงเข้าที่กึ่งกลางของแผ่นเซรามิกส์และบริเวณผิวโค้ง ผลแสดงให้เห็นว่าแผ่นเกราะไม่สามารถต้านทานการเจาะทะลุได้ ในกรณีที่ทิศทางการเคลื่อนที่ของกระสุนปะทะกับแผ่นเกราะ ณ ตำแหน่งผิวโค้งและมีความชัน ส่งผลให้เกิดการหักเหทิศทางของกระสุนและความสามารถในการเจาะทะลุลดลง

คำสำคัญ : รถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะ, แผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุน, วัสดุเชิงประกอบ

Thesis title	Study of Parameters for Forming Hexagonal Bulletproof Ceramic Armor Plate
Author	Nuttapong Meesanu
Degree	Master of Engineering (Mechanical Engineering)
Major program	Mechanical Engineering Faculty of Engineering
Academic Year	2021

ABSTRACT

This research had two objectives that were to study parameters for forming bulletproof ceramic armor plates and to create a model of a bulletproof ceramic armor plate for small armored regular trucks. The parameters used to form a ceramic armor plate contain the thickness of the armor plate and the compressive strength, which affects the density distribution of the green compact. A ballistic ceramic armor plate with a hexagonal shaped material was created as a concave bulletproof plate. Extrusion results displayed that the hexagonal material was formed at a very high density on the side surface of the armor plate but with uneven capacity distributed across the overall plate, due to the friction occurring on the wall of the mold. The finite element method, particularly at the Ansys/Explicit Dynamic tools were applied to analyse the damage of bulletproof plates. The model of a concave-shaped bulletproof plate was set for the SKD1 1 material, influencing the changes in the direction of the bullet firing when the bullet hit the bulletproof plate at a velocity of 880 m/s in accordance with the NIJ 4 standard. The bullet was made of tungsten carbide and the ceramic armor plate was built with a size of 300x300 mm and thicknesses of 14, 16, 18, and 20 mm. The bullet was fired into the center part and onto the curved surface of the ceramic plate. The result shows that the armor plate could not resistant to penetration. In this situation, the direction of the bullet's movement against the armor plate especially at a curved surface as a slope could result the deflection of the bullet direction as well as reduction of penetration capability.

Keywords : Small Armored Regular Truck, Bulletproof Ceramic Armor Plate, Composite Materials

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความเมตตากรุณาและอนุเคราะห์จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ วิโรจน์ชิวัน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.ประกอบชาติภักต์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งกรุณามอบความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ ความช่วยเหลือในทุกด้านทั้งการแก้ปัญหาต่างๆ ตลอดจนตรวจสอบวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงยิ่งไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำนรรค ที่กรุณาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ชี้แนะแนวทาง ให้ความรู้ ตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ดร.ปฎิวัติ คมวชิรกุล ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ให้ความรู้ ชี้แนะแนวทาง ตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัตน์ วรรณศรี สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่างๆ

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา สมาชิกในครอบครัว และครูอาจารย์ทุกท่าน ผู้ที่ให้ความรู้ อนุเคราะห์ ส่งเสริม สนับสนุนด้านทุนทรัพย์และกำลังใจ ค่อยอบรมสั่งสอนจนประสบความสำเร็จในทางการศึกษา

ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร รวมถึงเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัย ครั้งนี้ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ดี ท้ายที่สุดนี้ ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะมีประโยชน์สำหรับผู้อ่านไม่มากนักน้อยต่อไป

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
1.5 สถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล	4
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.2 มาตรฐานแผ่นเกราะกันกระสุน	19
2.3 การทบทวนวรรณกรรม	25
3 การดำเนินการวิจัย	
3.1 ระเบียบวิธีวิจัย	41
3.2 การสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์	44
3.3 การขึ้นรูปและการจำลองแผ่นเกราะที่มีร่องยวบ	60
4 ผลการดำเนินงาน	
4.1 ผลการอัดขึ้นรูปแผ่นเกราะเซรามิกส์และการกระจายความหนาแน่น	62
4.2 ผลการจำลองยิงแผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนด้วยวัสดุและความหนาแปรเปลี่ยน	64
4.3 กรณีศึกษาการจำลองการยิงกระสุนลงบนแผ่นเกราะแบบเว้าหรือแผ่นหน้ายวบ	78

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5 สรุปผล และข้อเสนอแนะ	
5.1 การสรุปผล	81
5.2 ข้อเสนอแนะ	82
เอกสารอ้างอิง	83
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	87



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ตารางภัยคุกคามและการยิงทดสอบความสามารถกันกระสุนของเกราะ	20
2.2	ตารางสรุปการวินิจฉัยการปฏิบัติต่อผลการยิงทดสอบเกราะ	24
2.3	ลักษณะผง (ขนาดอนุภาคและความหนาแน่น)	34
3.1	สมบัติของวัสดุแผ่นเกราะเซรามิกส์	47
3.2	สมบัติของวัสดุอลูมิเนียม 7075 T6	47
3.3	สมบัติของวัสดุ Tungsten carbide (WC)	48
4.1	ผลการจำลองแผ่นเกราะสองชั้นคือเซรามิกส์ (Al_2O_3) + อลูมิเนียม (AL 7075 T6) ที่มุมกระทบ 0 องศา	65



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ชิ้นส่วนเกราะกันกระสุนประเภทต่างๆ ที่ติดตั้งบนรถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะ	2
2.1 ลักษณะความเค้นใน 3 มิติ	6
2.2 เอลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า	8
2.3 Ballistic test setup	24
2.4 เทคนิคการบดอัด Green compact ที่มีความหนาแน่นสูง	25
2.5 ลักษณะทางกายภาพของผงที่ได้จากเครื่อง SEM	25
2.6 ความหนาแน่นเทียบกับความดันที่ใช้อุณหภูมิที่ 450°C	25
2.7 โปรแกรมการเผาผนึกของเซรามิกส์แก้ว	26
2.8 ผงเซรามิกส์ที่ศึกษาซึ่งถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ Zeiss Stemi 2000-C	27
2.9 ขั้นตอนการทดลอง: (a) การกดแกนเดี่ยว (b) การตัดออก และ (c) การกดแบบไม่คงที่	27
2.10 ความหนาแน่นหลังจากอัด (a) การกดแบบปิด (b) กดอัดแบบคงที่ 25 MPa และ (c) 200 MPa	27
2.11 อนุภาคผง UO_2 สังเกตได้จากเทคโนโลยี SEM	28
2.12 ระยะห่างระหว่างส่วนบนแกนอัดและแม่พิมพ์เป็น 40 มิลลิเมตร แกนอัดด้านบนกำลังลดลงเหลือ 37 มิลลิเมตร จากจุดเริ่มต้นด้วยความเร็ว 5 มิลลิเมตร	28
2.13 รูปแบบของกระบวนการขึ้นรูป UO_2	29
2.14 ผลการเก็บค่า	29
2.15 ไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการขึ้นรูปอลูมิเนียมแบบอัดแกนเดี่ยวและแบบอัดแกนคู่ที่มีแรงเสียดทานด้วยค่าสัมประสิทธิ์ได้เท่ากับ 0.4	30
2.16 การกระจายของความหนาแน่น (กรัม/ลบ.ซม., ซ้าย), การเชื่อมโยงต่อกัน (MPa, กลาง), โมดูลัสความยืดหยุ่นสัมผัส Kt (MPa, ขวา) สำหรับการบีบอัดแบบแกนเดี่ยว (แถวบน) และการบีบอัดแบบสองแกน (แถวล่าง) ของอลูมินาที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.4	30
2.17 แบบจำลองการกระจายความหนาแน่น (เป็น ก./ลบ.ซม, ซ้าย) และการเชื่อมโยงต่อกัน (เป็น MPa, ขวา)	30
2.18 การจำลองการติดคันทัว	31

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.19 แบบจำลองการกระจายความเค้นตกค้าง (เป็น MPa), ภาพซ้ายเป็นภาคตัดขวาง การตีตื้นตัว และภาพขวาคือส่วนเบี่ยงเบนแปรผัน	31
2.20 ผงแต่ละชนิดที่แต่ละชั้นความหนา	32
2.21 รายละเอียดของโครงสร้างจุลภาค APT ลามิเนตโดย SEM Micrographs	32
2.22 รูปแบบ XRD ของผง $LaPO_4$ หลังจากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างกัน	33
2.23 ลักษณะการอัด	34
2.24 กราฟเปรียบเทียบแสดงระบบเกราะหลายชั้น (MASS)	35
2.25 รูปแสดงองค์ประกอบแผ่นเกราะ (a) การออกแบบแผนผังของเกราะ (b) ผลการทดสอบการยิง	36
2.26 (A) เกราะคอมโพสิตแสดงเซรามิกส์แต่ละชั้น (B) ขนาดกระสุนที่ใช้ทดสอบ	37
2.27 โครงสร้างคอมโพสิตประกอบด้วยชั้นเซรามิกส์โปร่งใส (C) สารยึดเกาะ(Ad) แก้ว (G) โพลียูรีเทน (PU) และโพลีคาร์บอนเนต (PC)	37
2.28 การตั้งค่าขอบเขตการทดสอบ	37
2.29 ภาพถ่ายความเสียหายของ SiC/UHMWPE หลังจากการทดสอบการยิง	39
2.30 แสดงผลการทดสอบภายใต้ความหนาของพื้นผิวที่แตกต่างกัน	39
3.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย	42
3.2 กรอบการวิจัย	44
3.3 โครงสร้างกระสุน A) มิติของกระสุน AP 7.62 mm และชั้นส่วน: 1. Brass Jacket 2. Point filter 3. Hardened steel core 4. Lead base filler 5. sabot และ B) ขนาดกระสุน มีหน่วยเป็น มม.	45
3.4 ตัวอย่างโมเดลแบบจำลอง 3 มิติ A) แผ่นเกราะกันกระสุนในมุมมองไอโซเมตริก และ B) แบบจำลองหัวกระสุน	45
3.5 หน้าต่าง User interface ของ ANSYS 2020R2	46
3.6 ตัวอย่างหน้าต่างกำหนดวัสดุ Tangsten carbide	49
3.7 ตัวอย่างหน้าต่างกำหนดวัสดุ Alumina 95%	49
3.8 การกำหนดสมบัติวัสดุของ AL 7075 T6	50
3.9 นำเข้าโมเดลเกราะกันกระสุนและลูกกระสุนสู่ ANSYS	50

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10 นำเข้าโมเดล 10 Parts 10 Bodies สู่ Design Modeler และใช้คำสั่ง From New Part	51
3.11 โมเดลเกาะกันกระสุนและลูกกระสุนที่นำเข้าสู่ ANSYS จำนวน 3 Parts 10 Bodies	51
3.12 เข้าสู่หน้าต่าง Mechanical ด้วยคำสั่ง Model	51
3.13 การกำหนดชนิดวัสดุ และกำหนดค่า Stiffness Behavior เป็น Flexible	52
3.14 การกำหนด Body Interaction ของแผ่นเกราะทั้งสองที่ปะกบกันเป็นแบบ Frictionless	52
3.15 การกำหนด Element Size	53
3.16 การตั้งค่าขนาดของ Element Size ที่แผ่นเกราะ	54
3.17 ลักษณะของรูปแบบเมชที่แผ่นเกราะ	54
3.18 การกำหนดค่าความเร็วเริ่มต้น (Initial velocity)	54
3.19 การใส่ค่าความเร็วและทิศทางการเคลื่อนที่	55
3.20 ค่าของ End Time และ Result Number of Points	55
3.21 การกำหนด Fixed Support	56
3.22 การกำหนด Solution	56
3.23 การแสดง Solver Output	57
3.24 สถานะปกติ กราฟมีลักษณะคงที่ในแนวนอน	58
3.25 เส้นกราฟ Energy Error แสดงสถานะปกติ	58
3.26 เส้นกราฟ Momentum Summary แสดงผลปกติวิ่งในแนวนอน	58
3.27 เส้นกราฟ Hourglass Energy แสดงผลที่เป็นปกติ	59
3.28 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ Equivalent Stress	60
3.29 แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปแผ่นเกราะเซรามิกส์แบบร่องยุบ	62
3.30 แกนอัดอัดขึ้นรูปแผ่นเกราะเซรามิกส์แบบร่องยุบ	62
3.31 แผ่นเกราะร่องยุบ	62
3.32 ภาคตัดสำหรับการศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อความหนาแน่น	62
4.1 ภาคตัดแผ่นเกราะเซรามิกส์เพื่อวิเคราะห์ความหนาแน่น	63
4.2 การแบ่งพื้นที่ของชิ้นงานจำนวน 7 ชั้นที่มีความสูง 15 มิลลิเมตร	63

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.3	การกระจายความหนาแน่นสัมพัทธ์เชิงปริมาตรในแผ่นเกราะเซรามิกส์แบบหน้า ยุบ ที่ความสูง 15 มิลลิเมตร ในภาคตัด A-A	63
4.4	การกระจายความหนาแน่นสัมพัทธ์เชิงปริมาตรในแผ่นเกราะเซรามิกส์ แบบหน้ายุบ ที่ความสูง 15 มิลลิเมตร ในภาคตัด B-B	64
4.5	ความเค้นสูงสุดและการเสียรูปของแผ่นเกราะสองชั้นด้วยวัสดุ Al_2O_3 ความหนา 6 มม. จำนวน 2 แผ่น	66
4.6	ความเค้นสูงสุดและการเสียรูปของแผ่นเกราะสองชั้นด้วยวัสดุ Al_2O_3 ความหนา 8 มม. จำนวน 2 แผ่น	67
4.7	ความเค้นสูงสุดและการเสียรูปของแผ่นเกราะสองชั้นด้วยวัสดุ AL 7075-T6 ความหนา 6 มม. จำนวน 2 แผ่นซ้อน	68
4.8	ความเค้นสูงสุดและการเสียรูปของแผ่นเกราะสองชั้นด้วยวัสดุ AL 7075-T6 ความหนา 8 มม. จำนวน 2 แผ่นซ้อน	69
4.9	ความเค้นสูงสุดและการเสียรูปของแผ่นเกราะสองชั้นด้วยวัสดุ AL 7075-T6 ความหนา 10 มม. จำนวน 2 แผ่นซ้อน	70
4.10	ความเค้นสูงสุดและการเสียรูปของแผ่นเกราะสองชั้นด้วยวัสดุ Al_2O_3 ความหนา 6 มม. และ AL 7075-T6 ความหนา 6 มม.	71
4.11	ความเค้นสูงสุดและการเสียรูปของแผ่นเกราะสองชั้นด้วยวัสดุ Al_2O_3 ความหนา 8 มม. และ AL 7075-T6 ความหนา 8 มม.	72
4.12	ความเค้นสูงสุดและการเสียรูปของแผ่นเกราะสองชั้นด้วยวัสดุ Al_2O_3 ความหนา 10 มม. และ AL 7075-T6 ความหนา 10 มม.	73
4.13	ความเค้นสูงสุดและการเสียรูปของแผ่นเกราะสองชั้นด้วยวัสดุ Al_2O_3 ความหนา 12 มม. และ AL 7075-T6 ความหนา 12 มม.	74
4.14	ความเค้นสูงสุดและการเสียรูปของแผ่นเกราะสองชั้นด้วยวัสดุ Al_2O_3 ความหนา 14 มม. และ AL 7075-T6 ความหนา 14 มม.	75
4.15	ความเค้นสูงสุดและการเสียรูปของแผ่นเกราะสองชั้นด้วยวัสดุ Al_2O_3 ความหนา 16 มม. และ AL 7075-T6 ความหนา 16 มม.	76
4.16	ความเค้นสูงสุดและการเสียรูปของแผ่นเกราะสองชั้นด้วยวัสดุ Al_2O_3 ความหนา 18 มม. และ AL 7075-T6 ความหนา 18 มม.	77

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17	78
4.18	79
4.19	79
4.20	79
4.21	80
4.22	80



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
1.5 สถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรม	
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.2 มาตรฐานแผ่นเกราะกันกระสุน	19
2.3 การทบทวนวรรณกรรม	25
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย	
3.1 ระเบียบวิธีวิจัย	41
3.2 การสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์	44
3.3 การขึ้นรูปและการจำลองแผ่นเกราะแบบเว้า	60
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	
4.1 ผลการอัดขึ้นรูปแผ่นเกราะเซรามิกส์และการกระจายความหนาแน่น	62
4.2 ผลการจำลองยิงแผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนด้วยวัสดุและความหนาแปรเปลี่ยน	64
4.3 กรณีศึกษาการจำลองการยิงกระสุนลงบนแผ่นเกราะแบบเว้าหรือแผ่นหน้ายุบ	78

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผล	81
5.2 ข้อเสนอแนะ	82
เอกสารอ้างอิง	83
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	87



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ตารางภัยคุกคามและการยิงทดสอบความสามารถกันกระสุนของเกราะ	20
2.2	ตารางสรุปการวินิจฉัยการปฏิบัติต่อผลการยิงทดสอบเกราะ	24
2.3	ลักษณะผง (ขนาดอนุภาคและความหนาแน่น)	34
3.1	สมบัติของวัสดุแผ่นเกราะเซรามิกส์	47
3.2	สมบัติของวัสดุอลูมิเนียม 7075 T6	47
3.3	สมบัติของวัสดุ Tungsten carbide (WC)	48
4.1	ผลการจำลองแผ่นเกราะสองชั้นคือเซรามิกส์ (Al_2O_3) + อลูมิเนียม (AL 7075 T6) ที่มุมกระทบ 0 องศา	65



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ชิ้นส่วนเกราะกันกระสุนประเภทต่างๆ ที่ติดตั้งบนรถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะ	2
2.1 ลักษณะความเค้นใน 3 มิติ	6
2.2 เอลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า	8
2.3 Ballistic test setup	24
2.4 เทคนิคการบดอัด Green compact ที่มีความหนาแน่นสูง	25
2.5 ลักษณะทางกายภาพของผงที่ได้จากเครื่อง SEM	25
2.6 ความหนาแน่นเทียบกับความดันที่ใช้อุณหภูมิที่ 450°C	25
2.7 โปรแกรมการเผาผนึกของเซรามิกส์แก้ว	26
2.8 ผงเซรามิกส์ที่ศึกษาซึ่งถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ Zeiss Stemi 2000-C	27
2.9 ขั้นตอนการทดลอง: (a) การกดแกนเดี่ยว (b) การตัดออก และ (c) การกดแบบไม่คงที่	27
2.10 ความหนาแน่นหลังจากอัด (a) การกดแบบปิด (b) กดอัดแบบคงที่ 25 MPa และ (c) 200 MPa	27
2.11 อนุภาคผง UO_2 สังเกตได้จากเทคโนโลยี SEM	28
2.12 ระยะห่างระหว่างส่วนบนแกนอัดและแม่พิมพ์เป็น 40 มิลลิเมตร แกนอัดด้านบนกำลังลดลงเหลือ 37 มิลลิเมตร จากจุดเริ่มต้นด้วยความเร็ว 5 มิลลิเมตร	28
2.13 รูปแบบของกระบวนการขึ้นรูป UO_2	29
2.14 ผลการเก็บค่า	29
2.15 ไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการขึ้นรูปอลูมิเนียมแบบอัดแกนเดี่ยวและแบบอัดแกนคู่ที่มีแรงเสียดทานด้วยค่าสัมประสิทธิ์ได้เท่ากับ 0.4	30
2.16 การกระจายของความหนาแน่น (กรัม/ลบ.ซม., ซ้าย), การเชื่อมโยงต่อกัน (MPa, กลาง), โมดูลัสความยืดหยุ่นสัมผัส Kt (MPa, ขวา) สำหรับการบีบอัดแบบแกนเดี่ยว (แถวบน) และการบีบอัดแบบสองแกน (แถวล่าง) ของอลูมินาที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.4	30
2.17 แบบจำลองการกระจายความหนาแน่น (เป็น ก./ลบ.ซม, ซ้าย) และการเชื่อมโยงต่อกัน (เป็น MPa, ขวา)	30
2.18 การจำลองการติดคันทัว	31

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.19 แบบจำลองการกระจายความเค้นตกค้าง (เป็น MPa), ภาพซ้ายเป็นภาคตัดขวาง การตีตื้นตัว และภาพขวาคือส่วนเบี่ยงเบนแปรผัน	31
2.20 ผงแต่ละชนิดที่แต่ละชั้นความหนา	32
2.21 รายละเอียดของโครงสร้างจุลภาค APT ลามิเนตโดย SEM Micrographs	32
2.22 รูปแบบ XRD ของผง $LaPO_4$ หลังจากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างกัน	33
2.23 ลักษณะการอัด	34
2.24 กราฟเปรียบเทียบแสดงระบบเกราะหลายชั้น (MASS)	35
2.25 รูปแสดงองค์ประกอบแผ่นเกราะ (a) การออกแบบแผนผังของเกราะ (b) ผลการทดสอบการยิง	36
2.26 (A) เกราะคอมโพสิตแสดงเซรามิกส์แต่ละชั้น (B) ขนาดกระสุนที่ใช้ทดสอบ	37
2.27 โครงสร้างคอมโพสิตประกอบด้วยชั้นเซรามิกส์โปร่งใส (C) สารยึดเกาะ(Ad) แก้ว (G) โพลียูรีเทน (PU) และโพลีคาร์บอเนต (PC)	37
2.28 การตั้งค่าขอบเขตการทดสอบ	37
2.29 ภาพถ่ายความเสียหายของ SiC/UHMWPE หลังจากการทดสอบการยิง	39
2.30 แสดงผลการทดสอบภายใต้ความหนาของพื้นผิวที่แตกต่างกัน	39
3.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย	42
3.2 กรอบการวิจัย	44
3.3 โครงสร้างกระสุน A) มิติของกระสุน AP 7.62 mm และชั้นส่วน: 1. Brass Jacket 2. Point filter 3. Hardened steel core 4. Lead base filler 5. sabot และ B) ขนาดกระสุน มีหน่วยเป็น มม.	45
3.4 ตัวอย่างโมเดลแบบจำลอง 3 มิติ A) แผ่นเกราะกันกระสุนในมุมมองไอโซเมตริก และ B) แบบจำลองหัวกระสุน	45
3.5 หน้าต่าง User interface ของ ANSYS 2020R2	46
3.6 ตัวอย่างหน้าต่างกำหนดวัสดุ Tangsten carbide	49
3.7 ตัวอย่างหน้าต่างกำหนดวัสดุ Alumina 95%	49
3.8 การกำหนดสมบัติวัสดุของ AL 7075 T6	50
3.9 นำเข้าโมเดลเกราะกันกระสุนและลูกกระสุนสู่ ANSYS	50

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10 นำเข้าโมเดล 10 Parts 10 Bodies สู่ Design Modeler และใช้คำสั่ง From New Part	51
3.11 โมเดลเกาะกันกระสุนและลูกกระสุนที่นำเข้าสู่ ANSYS จำนวน 3 Parts 10 Bodies	51
3.12 เข้าสู่หน้าต่าง Mechanical ด้วยคำสั่ง Model	51
3.13 การกำหนดชนิดวัสดุ และกำหนดค่า Stiffness Behavior เป็น Flexible	52
3.14 การกำหนด Body Interaction ของแผ่นเกราะทั้งสองที่ปะกบกันเป็นแบบ Frictionless	52
3.15 การกำหนด Element Size	53
3.16 การตั้งค่าขนาดของ Element Size ที่แผ่นเกราะ	54
3.17 ลักษณะของรูปแบบเมชที่แผ่นเกราะ	54
3.18 การกำหนดค่าความเร็วเริ่มต้น (Initial velocity)	54
3.19 การใส่ค่าความเร็วและทิศทางการเคลื่อนที่	55
3.20 ค่าของ End Time และ Result Number of Points	55
3.21 การกำหนด Fixed Support	56
3.22 การกำหนด Solution	56
3.23 การแสดง Solver Output	57
3.24 สถานะปกติ กราฟมีลักษณะคงที่ในแนวนอน	58
3.25 เส้นกราฟ Energy Error แสดงสถานะปกติ	58
3.26 เส้นกราฟ Momentum Summary แสดงผลปกติวิ่งในแนวนอน	58
3.27 เส้นกราฟ Hourglass Energy แสดงผลที่เป็นปกติ	59
3.28 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ Equivalent Stress	60
3.29 แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปแผ่นเกราะเซรามิกส์แบบร่องยุบ	62
3.30 แกนอัดอัดขึ้นรูปแผ่นเกราะเซรามิกส์แบบร่องยุบ	62
3.31 แผ่นเกราะร่องยุบ	62
3.32 ภาคตัดสำหรับการศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อความหนาแน่น	62
4.1 ภาคตัดแผ่นเกราะเซรามิกส์เพื่อวิเคราะห์ความหนาแน่น	63
4.2 การแบ่งพื้นที่ของชิ้นงานจำนวน 7 ชั้นที่มีความสูง 15 มิลลิเมตร	63

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.3	การกระจายความหนาแน่นสัมพัทธ์เชิงปริมาตรในแผ่นเกราะเซรามิกส์แบบหน้า ยุบ ที่ความสูง 15 มิลลิเมตร ในภาคตัด A-A	63
4.4	การกระจายความหนาแน่นสัมพัทธ์เชิงปริมาตรในแผ่นเกราะเซรามิกส์ แบบหน้ายุบ ที่ความสูง 15 มิลลิเมตร ในภาคตัด B-B	64
4.5	ความเค้นสูงสุดและการเสียรูปของแผ่นเกราะสองชั้นด้วยวัสดุ Al_2O_3 ความหนา 6 มม. จำนวน 2 แผ่น	66
4.6	ความเค้นสูงสุดและการเสียรูปของแผ่นเกราะสองชั้นด้วยวัสดุ Al_2O_3 ความหนา 8 มม. จำนวน 2 แผ่น	67
4.7	ความเค้นสูงสุดและการเสียรูปของแผ่นเกราะสองชั้นด้วยวัสดุ AL 7075-T6 ความหนา 6 มม. จำนวน 2 แผ่นซ้อน	68
4.8	ความเค้นสูงสุดและการเสียรูปของแผ่นเกราะสองชั้นด้วยวัสดุ AL 7075-T6 ความหนา 8 มม. จำนวน 2 แผ่นซ้อน	69
4.9	ความเค้นสูงสุดและการเสียรูปของแผ่นเกราะสองชั้นด้วยวัสดุ AL 7075-T6 ความหนา 10 มม. จำนวน 2 แผ่นซ้อน	70
4.10	ความเค้นสูงสุดและการเสียรูปของแผ่นเกราะสองชั้นด้วยวัสดุ Al_2O_3 ความหนา 6 มม. และ AL 7075-T6 ความหนา 6 มม.	71
4.11	ความเค้นสูงสุดและการเสียรูปของแผ่นเกราะสองชั้นด้วยวัสดุ Al_2O_3 ความหนา 8 มม. และ AL 7075-T6 ความหนา 8 มม.	72
4.12	ความเค้นสูงสุดและการเสียรูปของแผ่นเกราะสองชั้นด้วยวัสดุ Al_2O_3 ความหนา 10 มม. และ AL 7075-T6 ความหนา 10 มม.	73
4.13	ความเค้นสูงสุดและการเสียรูปของแผ่นเกราะสองชั้นด้วยวัสดุ Al_2O_3 ความหนา 12 มม. และ AL 7075-T6 ความหนา 12 มม.	74
4.14	ความเค้นสูงสุดและการเสียรูปของแผ่นเกราะสองชั้นด้วยวัสดุ Al_2O_3 ความหนา 14 มม. และ AL 7075-T6 ความหนา 14 มม.	75
4.15	ความเค้นสูงสุดและการเสียรูปของแผ่นเกราะสองชั้นด้วยวัสดุ Al_2O_3 ความหนา 16 มม. และ AL 7075-T6 ความหนา 16 มม.	76
4.16	ความเค้นสูงสุดและการเสียรูปของแผ่นเกราะสองชั้นด้วยวัสดุ Al_2O_3 ความหนา 18 มม. และ AL 7075-T6 ความหนา 18 มม.	77

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17	78
4.18	79
4.19	79
4.20	79
4.21	80
4.22	80



บทที่ 1

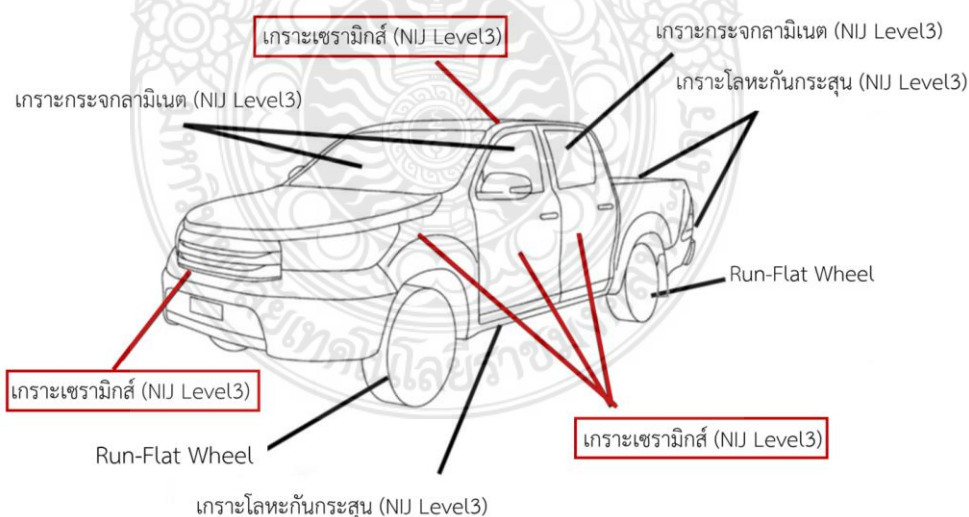
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ความมั่นคงของประเทศไทยโดยเฉพาะในแนวชายแดนนั้น กองทัพไทยก็มีการเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการความมั่นคงชายแดนมาโดยตลอดทั้งที่มีการบูรณาการแบบองค์รวมกับประเทศเพื่อนบ้านต่างๆ ยังต้องอาศัยการบูรณาการ การทำงานร่วมกันทั้งหน่วยงานด้านความมั่นคงในพื้นที่ หน่วยงานราชการอื่น และภาคเอกชน รวมทั้งภาคประชาสังคม ในการขับเคลื่อนระบบเศรษฐกิจและ ความมั่นคงให้เป็นไปอย่างสมดุลและยั่งยืน จากเอกสาร “กองทัพไทยกับการเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการความมั่นคงชายแดนแบบองค์รวมกับประเทศเพื่อนบ้าน : กรณีศึกษาเขตพัฒนาเศรษฐกิจพิเศษตาก” [1] ได้ให้ข้อมูลไว้ว่า “จากการประเมินสถานการณ์ด้านความมั่นคง ชายแดนโดยสภาความมั่นคงแห่งชาติ (สมช.) พบว่า ปัญหาในพื้นที่จังหวัด ชายแดนปัจจุบันมีลักษณะเป็นทั้งภัยคุกคามตามแบบและไม่ตามแบบ ประกอบด้วย 1) ปัญหาการสู้รบตามแนวชายแดน 2) ปัญหาความไม่ชัดเจน ของแนวเขตแดน 3) ปัญหาการลักลอบหลบหนีเข้าเมือง 3) ปัญหาการค้า อาวุธสงคราม 4) ปัญหาการกำหนดสถานะบุคคล 5) ปัญหายาเสพติด 6) ปัญหาแรงงานต่างด้าวผิดกฎหมาย 7) ปัญหาการทำลายทรัพยากรธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลกระทบต่อแนวเขตแดน 8) ปัญหาความขัดแย้งในสังคม 9) ปัญหาสาธารณสุขขนาดใหญ่ 10) โรคระบาดตามแนวชายแดน และ 11) ปัญหาการก่อการร้ายและอาชญากรรมข้ามชาติ ในหลายๆ ปัญหาข้างต้น จึงต้องมีการวางนโยบายความมั่นคงของชาติประเมินสถานะแวดล้อมทางภูมิรัฐศาสตร์ สถานการณ์ และ ความเปลี่ยนแปลงของบริบทความมั่นคง นำไปสู่การกำหนดทิศทางหลัก ในการดำเนินการเพื่อรักษาผลประโยชน์และความมั่นคงของประเทศ โดยนโยบายความมั่นคงแห่งชาติ ซึ่งมีวัตถุประสงค์หลายข้อด้วยกัน หนึ่งในนั้นคือเพื่อเสริมสร้างศักยภาพของกองทัพในการป้องกันประเทศ สนับสนุนภารกิจที่ไม่ใช่การสงคราม และสามารถผนึกกำลังของกองทัพกับ ทุกภาคส่วนในการเผชิญกับภัยคุกคามด้านการป้องกันประเทศในทุกรูปแบบ สำหรับสถานการณ์ใน 3 จังหวัด ชายแดนภาคใต้ เป็นพื้นที่ที่ต้องให้ความสำคัญและดูแลเป็นพิเศษ เนื่องด้วยมีความอ่อนไหวหลายปัจจัย ทั้งนี้ปัญหาความขัดแย้งในชายแดนภาคใต้ของประเทศไทย เป็นปัญหาที่ซับซ้อนมีสาเหตุทั้งจากความขัดแย้งทางเชื้อชาติและศาสนา ภาษา วัฒนธรรม วิถีชีวิต การวิจัยและการพัฒนาวิสดู หรืออุปกรณ์ให้มีศักยภาพสามารถป้องกันการทำลายล้างหรือการโจมตีจากฝ่ายตรงข้ามได้ อุปกรณ์ป้องกันอันตรายจากกระสุน หรือ เกราะกันกระสุน ถือได้ว่าเป็นหนึ่งในหลาย ๆ อุปกรณ์ที่มีบทบาทหน้าที่สำคัญเกี่ยวกับการป้องกันการทำลาย ที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นบุคคล ยานพาหนะ ฐานทัพ รวมถึงสิ่งของต่าง ๆ เป็นต้น เกราะกันกระสุน คือชิ้นงานที่ทำจากวัสดุที่มีความสามารถในการต่อต้าน พลังงานและแรงปะทะของกระสุนปืนไม่ให้ผ่านทะลุเกราะได้

เมื่อหัวกระสุนวิ่งกระทบจะมีการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างกระสุนกับวัสดุเกราะ ถ้าวัสดุเกราะสามารถถ่ายเทพลังงานจากหัวกระสุนทำให้กระสุนหมดพลังงานลง กระสุนก็จะไม่สามารถผ่านทะลุเป้าได้ ในปัจจุบันได้มีการนำวัสดุหลายชนิดมาผลิตเป็นเกราะกันกระสุน ยกตัวอย่างเช่น

1. วัสดุประเภทโลหะ เป็นเกราะที่ทำมาจากแผ่นโลหะ อาจจะใช้โลหะชนิดเดียวหรือหลายชนิดผสมเข้าด้วยกันสามารถป้องกันกระสุนปืนได้ แต่มีน้ำหนักมาก
2. วัสดุประเภทเส้นใยพอลิเมอร์เป็นเกราะอ่อน น้ำหนักเบา ทำจากเส้นใยซึ่งนำมาถักทอแล้วอัดประกบเข้าด้วยกันหลายชั้นสามารถป้องกันกระสุนปืนได้ แต่ไม่สามารถรับแรงกระแทกและกระสุนที่หมุนด้วยความเร็วสูงได้ ไม่ทนต่อความชื้นทำให้คุณภาพเส้นใยด้อยลงไป
3. วัสดุประเภทวัสดุสังเคราะห์จัดเป็นเกราะวัสดุสังเคราะห์ประเภทหนึ่งที่น่าวัสดุหลายชนิดมาประกอบเข้าด้วยกันสามารถป้องกันกระสุนปืนได้ แต่ไม่ทนต่อความร้อน
4. วัสดุประเภทเซรามิกส์ เป็นเกราะที่ทำจากเซรามิกส์ สามารถลดความรุนแรงของหัวกระสุนได้ เป็นอย่างดีเนื่องจากเซรามิกส์มีความแข็งสูง สามารถป้องกันกระสุนปืนได้ แต่เกราะเซรามิกส์มักแตกร้าวได้ง่ายวัสดุประเภทเซรามิกส์ที่นิยมนำมาใช้ประกอบเป็นแผ่นเกราะป้องกันกระสุนได้แก่ อลูมินา เซรามิกส์ เนื่องจากอลูมินามีความแข็งสูง และคงความแข็งแรงได้ที่อุณหภูมิสูงทนต่อความร้อน ทนต่อสารเคมีและสภาวะแวดล้อมต่างๆ ได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุโลหะและวัสดุจำพวกพลาสติก รวมถึงยังมีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเซรามิกส์ประเภทอื่น ๆ



รูปที่ 1.1 ชิ้นส่วนเกราะกันกระสุนประเภทต่างๆ ที่ติดตั้งบนรถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะ

จากรูปที่ 1.1 แสดงรายละเอียดประเภทของเกราะต่างๆ ในรถบรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะ ประกอบด้วย 1) เกราะกระจก ใช้ติดตั้งที่บานหน้ารถยนต์ ด้านข้างคนขับ ด้านข้างผู้โดยสาร และ

ด้านหลัง 2) เกราะโลหะ ใช้ติดตั้งเพื่อกันกระสุนตามแนวขอบระหว่างประตู 3) เกราะเซรามิกส์ โดยปกติจะใช้เป็นแผ่นคู่ซ้อนกับแผ่นเส้นใยสังเคราะห์ โดยแผ่นเซรามิกส์จะอยู่ด้านหน้า ปะทะกับกระสุนก่อนเพื่อทำลายหัวกระสุน ใช้ติดตั้งที่แก้มหน้ารถยนต์ ห้องเครื่อง ประตูรถยนต์ 4) ล้อรันแพลท ใช้ในกรณีที่ยางแบนด้วยเหตุต่างๆ เพื่อให้สามารถวิ่งต่อไปได้ สำหรับในงานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายที่จะทำการศึกษาพารามิเตอร์ในการขึ้นรูปแผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนที่เหมาะสมกับรถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะและสร้างเป็นโมเดลแผ่นเกราะกันกระสุนขึ้นมาเพื่อวิเคราะห์รูปแบบความเสียหายที่จะเกิดขึ้นจริง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ในการขึ้นรูปแผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนที่เหมาะสมกับรถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะ

1.2.2 เพื่อสร้างแผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนสำหรับรถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะ

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัยเป็นผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่เป็นผงขนาดระดับไมครอน

1.3.2 ทำการศึกษาโครงสร้างและสมบัติของอลูมิเนียมออกไซด์

1.3.3 วิธีการขึ้นรูปแผ่นเกราะเซรามิกส์จะใช้กระบวนการอัดขึ้นรูปและอาจใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สร้างโมเดลวิเคราะห์ได้

1.3.4 สำหรับวัตถุประสงค์ข้อที่ 1.2.2 เพื่อสร้างแผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนสำหรับรถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะ คือ การสร้างโมเดลทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อการวิเคราะห์และจำลองสถานการณ์การยิงกระสุนเท่านั้น

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.4.1 ได้ข้อมูลพารามิเตอร์ในการขึ้นรูปแผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนที่เหมาะสมกับรถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะ

1.4.2 แผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับรถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะได้

1.4.3 ผลิตแผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนที่ผ่านมาตรฐานสากล NIJ ระดับ 3

1.4.4 ได้ผลงานตีพิมพ์ในการประชุมทางวิชาการหรืองานสัมมนาทางวิชาการ

1.5 สถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

- 1.5.1 สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถนนประชาราษฎร์1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทรศัพท์/โทรสาร: 0 2836 3000 ต่อ 4138 โทรศัพท์มือถือ: 09 8279 5855
- 1.5.2 สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
399 ถนนสามเสน แขวงชิระพยาบาล เขตดุสิต กรุงเทพฯ 10300
โทรศัพท์/โทรสาร: 0 2665 3777 ต่อ 6099
- 1.5.3 สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
744 ถ.สุรนารายณ์ อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
โทรศัพท์ 0 4423 3000 โทรสาร: 0 4423 3052



บทที่ 2

ทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรม

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [1]-[3]

ทฤษฎีวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) ในหัวข้อ 2.1 นี้อ้างอิงเนื้อหาทั้งหมดจากตำรา “วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เบื้องต้น เรียบเรียงโดย รศ.ดร.ธงชัย พองสมุทร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่” ที่เรียบเรียงไว้ดังต่อไปนี้ว่า เป็นวิธีทางตัวเลข เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรม ไม่ว่าจะเป็นการวิเคราะห์ทางโครงสร้าง (Structural) หรืออื่นๆ โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะสามารถประมาณค่าผลเฉลยโดยการแก้สมการเชิงพีชคณิตแทนการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ โดยในการแก้ปัญหาดังกล่าวโครงสร้างหรือชิ้นงานจะถูกแบ่งออกเป็นชิ้นส่วนเล็กๆ (Element) ในจำนวนที่จำกัด (Finite) และผลเฉลยที่ได้จะเป็นคำตอบที่จุดต่อระหว่างเอลิเมนต์ (โหนด: Node) โดยที่แต่ละเอลิเมนต์จะมีผลเฉลยที่สามารถหาได้ง่าย และเมื่อนำมารวมกันจะสามารถหาค่าผลเฉลยของทั้งโครงสร้างได้ โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะสามารถให้ผลเฉลยของค่าการเสียรูปและแรงที่กระทำ ณ จุดหรือโหนดๆ และค่าความเค้นและความเครียดที่แต่ละเอลิเมนต์ได้ ความเครียดกับการเสียรูปและความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นสิ่งจำเป็นในการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ตัวอย่างปัญหาใน 1 มิติ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเสียรูปกับความเครียดดังนี้

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

ซึ่งเป็นสมการสำหรับปัญหาที่มีการเสียรูปน้อย (Small Displacement) และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจะมีค่าเท่ากับ

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

โดยที่ σ_x คือค่าความเค้นในแนวแกน x และ E คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ

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

เมื่อ $[D]$ คือ เมทริกซ์คุณสมบัติของวัสดุ

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

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

เมื่อนำเอาหลักการของสปริงตามสมการที่ (2.4) มาประยุกต์ใช้กับหลักการไฟไนต์เอลิเมนต์จะสามารถเขียนสมการที่ (2.5) ใหม่ในลักษณะของเมทริกซ์ได้เป็น

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

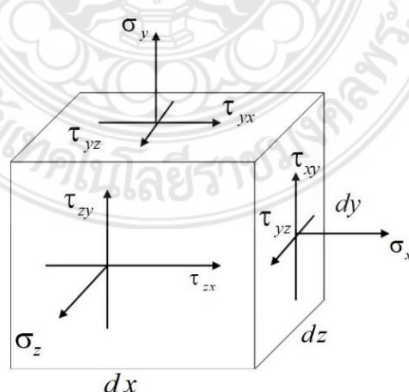
โดยที่ f' คือ เมทริกซ์ของแรงที่กระทำกับสปริง

k' คือ สทิงเฟนสเมทริกซ์ของสปริง และ

d' คือ เมทริกซ์ของระยะยืด/หดตัวของสปริง

ในการวิเคราะห์เอลิเมนต์ในระบบ 3 มิตินั้น เอลิเมนต์ประเภทนี้จะให้คำตอบมากกว่า เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ หรือแบบแกนสมมาตร เอลิเมนต์แบบทรงสี่หน้า (Tetrahedron) เป็นเอลิเมนต์เบื้องต้นสำหรับ 3 มิติ ในส่วนนี้จะยกตัวอย่างจากหนังสือไฟไนต์เอลิเมนต์เบื้องต้น ผู้แต่ง รศ.ดร.ธงชัย พองสมุทร หน้า 175-180

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



รูปที่ 2.1 ลักษณะความเค้นใน 3 มิติ

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

ดังนั้นจะมีความเค้นเฉือนแค่ 3 ตัวเท่ากันที่ต้องพิจารณารวมกับความเค้นตั้งฉากจะได้เป็น

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

และความเค้นที่เกิดขึ้นในเอลิเมนต์จะมีดังนี้

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

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x}, & \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y}, & \varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \gamma_{yx}, & \gamma_{yz} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} = \gamma_{zy}, & \gamma_{zx} &= \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} = \gamma_{xz} \end{aligned} \quad (2.9)$$

และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเท่ากับ

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

โดยที่

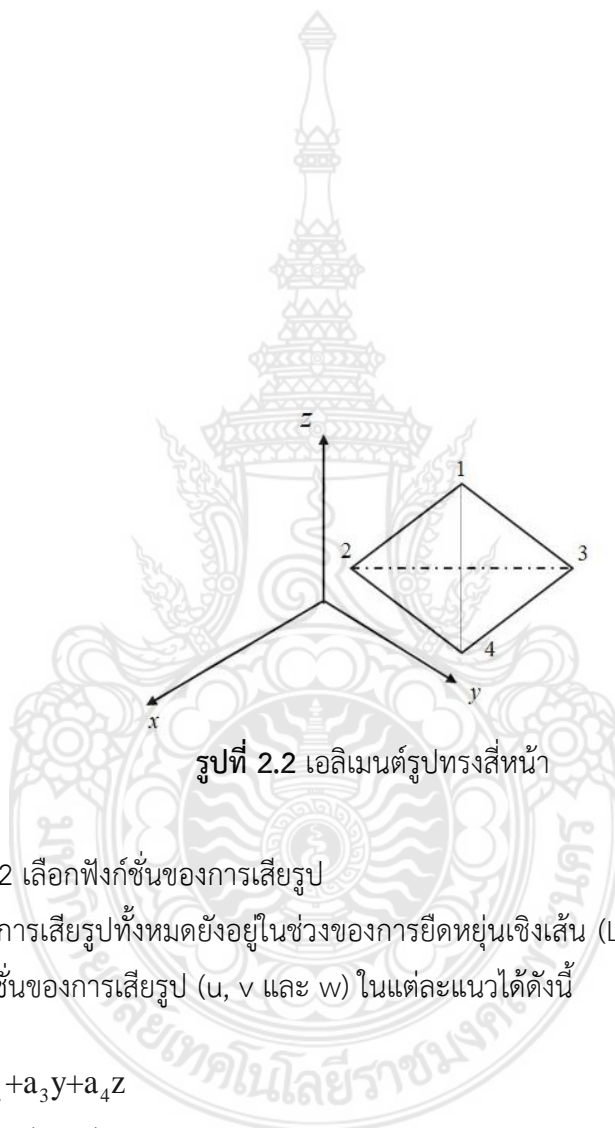
$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ & & & & & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

การหาสทิวเฟนสมเทริกซ์สำหรับเอลิเมนต์แบบทรงสี่หน้า

ขั้นตอนที่ 1 เลือกประเภทของเอลิเมนต์

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

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



รูปที่ 2.2 เอลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า

ขั้นตอนที่ 2 เลือกฟังก์ชันของการเสียรูป

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

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

จากนั้นกำหนดให้ ψ' เป็นฟังก์ชันของการเสียรูปของ u , v และ w โดยที่ในการวิเคราะห์นั้น สามารถทำได้เหมือนกันกับกรณีของเอลิเมนต์สามเหลี่ยม จะได้ว่า

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

โดยที่

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

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

และ

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

และ

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

และ

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

สามารถที่จะเขียนรูปของเมทริกซ์สำหรับฟังก์ชันการเสียรูปเท่ากับ

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{v} \\ \mathbf{w} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_1 \\ \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{w}_1 \\ \mathbf{u}_2 \\ \mathbf{v}_2 \\ \mathbf{w}_2 \\ \mathbf{u}_3 \\ \mathbf{v}_3 \\ \mathbf{w}_3 \\ \mathbf{u}_4 \\ \mathbf{v}_4 \\ \mathbf{w}_4 \end{Bmatrix} \quad (2.20)$$

โดยที่

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

ขั้นตอนที่ 3 ระบุความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการเสียรูป และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดกับการเสียรูป ได้ว่า

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

หรือ

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

โดยที่

$$[B] = [B_1 \quad B_2 \quad B_3 \quad B_4] \quad (2.24)$$

และ

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

และสำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

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

และ

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

ขั้นตอนที่ 4 หาสมการสทริกซ์และสมการสทิฟเนส
เมื่อพิจารณาในรูปของสมการ $\underline{F} = \underline{Kd}$ จะได้ว่า

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

ในกรณีที่เป็นเอลิเมนต์แบบทรงสี่หน้า (Tetrahedron) จะมีค่าคงที่ ดังนี้

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

ผลจากน้ำหนัก (Body Force)

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

โดยที่

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

ผลจากแรงที่ผิว (Surface Force)

จาก

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

โดยที่

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

2.1.2 ขั้นตอนสำหรับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ANSYS

Ansys: Explicit Dynamics เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่ชัดเจน (Explicit analysis) ที่มีความหลากหลายโดยเฉพาะสำหรับการสร้างแบบจำลองพลวัตที่ไม่ใช่เชิงเส้นของของแข็ง ของเหลว ก๊าซ และปฏิสัมพันธ์ของของแข็ง มุ่งเน้นไปที่การวัดหาความสามารถขั้นสูงสุดในรูปแบบของเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพมาก ด้วยอินเทอร์เฟซผู้ใช้แบบกราฟิกที่ผสมผสานรวมและใช้งานง่ายในแพลตฟอร์ม Ansys Workbench/ Ansys: Explicit Dynamics ประกอบด้วย 1) ตัวแก้ไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับพลศาสตร์โครงสร้างเชิงคำนวณ (FE) 2) ตัวแก้ปริมาตร การจำกัด สำหรับพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณชั่วคราว (CFD) ที่รวดเร็ว 3) ตัวทำละลายอนุภาคแบบไม่มีตาข่ายสำหรับความเร็วสูงการเสีรูปร่างขนาดใหญ่และการกระจายตัว (SPH) 4) Multi-solver coupling สำหรับโซลูชันแบบหลายฟิสิกส์รวมถึงการมีความสัมพันธ์ระหว่าง FE, CFD และ SPH 5) แบบจำลองวัสดุที่หลากหลาย ซึ่งรวมเอาการตอบสนองที่เป็นส่วนประกอบและอุณหภูมิศาสตร์ควบคู่ไปด้วย 6) การคำนวณแบบอนุกรมและแบบขนานบนระบบหน่วยความจำแบบแบ่งใช้และแบบกระจาย 7) เข้าถึงรูปทรงเรขาคณิตและมาตรฐานเครื่องมือการเชื่อมต่อที่มีให้ผ่านแพลตฟอร์ม Ansys Workbench 8) การเชื่อมต่อแบบสองทิศทางกับโมเดล Ansys DesignModeler และ CAD แบบพาราเมตริก ในการจำลองการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ในที่นี้ได้เลือกใช้โปรแกรม Ansys และโหมดไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้การจำลอง Ballistic ที่จำลองการเคลื่อนที่ของวัตถุพุ่งชนกระแทกเข้ากับอีกวัตถุหนึ่งโดยอยู่ในภายใต้ความเร็ว ความเร่ง หรือระยะทางในการเคลื่อนที่ของวัตถุเมื่อเทียบกับเวลาเรียกว่า “พลศาสตร์” (Dynamics) สำหรับพลศาสตร์สามารถแยกออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่ง คินเมติกส์ (Kinematics) ลักษณะการเคลื่อนที่ของวัตถุ การหาการขจัด ความเร็ว และความเร่ง โดยไม่มีการพิจารณาแรงกระทำบนวัตถุ ส่วนที่สอง จลศาสตร์ (Kinetics) วิเคราะห์แรงกระทำที่ทำให้วัตถุเกิดการเคลื่อนที่ โหมดที่ใช้ในการวิเคราะห์เรียกว่า “Explicit Dynamics” ซึ่งมีกระบวนการทำงาน 3 กระบวนการ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 (Pre-processing)

คือกระบวนการจัดเตรียมข้อมูลก่อนเข้าสู่การวิเคราะห์ ประกอบด้วย การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ ซึ่งโครงการวิจัยนี้เลือกใช้โปรแกรม SolidWorks ในการสร้างแบบจำลอง 3 มิติทั้งหมด ซึ่งโปรแกรมจะทราบพื้นที่ผิว ปริมาตร และสมบัติอื่นของรูปทรงแบบจำลอง 3 มิตินั้นโดยอัตโนมัติ จากนั้นนำแบบจำลองเข้าสู่โปรแกรม Ansys: Explicit Dynamics ทำการกำหนดสถานะขอบเขตหรือเงื่อนไขขอบเขต (Support type) เช่น การจับยึดแผ่นเกราะกันกระสุน การกำหนดชนิดของวัสดุ (Element type) เพื่อกำหนดสมบัติของวัสดุ (Material properties) เช่น ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น ความเค้นคราก (Tensile Yield Strength) ความหนาแน่นวัสดุ สมบัติความเสียหาย การกำหนด Isotropic Elasticity/Johnson-Holmquist Strength Continuous/Johnson Cook Failure/Steinberg Guinan Strength/Shock EOS Linear เป็นต้น การกำหนดชนิดของเอลิเมนต์ และการควบคุมความละเอียดของเอลิเมนต์ (Element Controlled) สถานะและตำแหน่งของกระสุน

กับแผ่นเกราะ เช่น ตำแหน่ง ขนาดและทิศทางของกระสุนที่จะวิ่งมาปะทะด้วยความเร็วค่าหนึ่งตามมาตรฐานต่อแผ่นเกราะ การกำหนดหน้าสัมผัส (Contact) เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 2 (Solve-processing)

คือขั้นตอนการวิเคราะห์ ซึ่งใช้หลักการวิเคราะห์แบบ Explicit Dynamics สำหรับการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นสูง การเปลี่ยนรูปขนาดใหญ่ ปัญหาที่เกิดจากการสัมผัส ซึ่งเกี่ยวข้องกับผลกระทบการสัมผัสหลายส่วนของรูปร่าง และพฤติกรรมของวัสดุที่ไม่เป็นเชิงเส้นสูง การวิเคราะห์แบบจำลองโดยการคำนวณบนคอมพิวเตอร์เพื่อทำการวิเคราะห์หรือจำลองพฤติกรรมตามธรรมชาติของระบบที่ต้องการ ปัญหาที่มีลักษณะเป็นแบบยืดหยุ่นก็ควรเลือกเป็นแบบ Elasticity หรือปัญหาที่มีลักษณะเปลี่ยนรูปถาวรก็ควรเลือกแบบ Plasticity เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 3 (Post-processing)

เป็นขั้นตอนการแสดงผลหลังจากการวิเคราะห์ โดยค่าที่แสดงจะมีลักษณะเป็นค่าตัวเลขที่โหนด (Node) ค่าสมบัติของแต่ละเอลิเมนต์ (Element) ผลลัพธ์ที่จะต้องใช้ในการแสดงผลเพื่อพิจารณา ประกอบด้วย การเสียรูป ทิศทางการเสียรูป ความเร็วของวัตถุ ทิศทางของความเร็ว ความเค้นและความเครียดต่างๆ รวมทั้งการตัดภาคส่วน (Section Planes)

2.1.3 Material Model ที่นำมาใช้แทนพฤติกรรมของแผ่นเกราะและกระสุน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) สำหรับการวิเคราะห์ในโหมด Explicit Dynamics จะต้องมีการกำหนดสมบัติของวัสดุ ซึ่งแบบจำลองทางวัสดุนั้นมีหลายแบบและได้รับการพัฒนาจนเป็นที่ยอมรับในวงกว้างในงานวิจัยที่ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ประกอบด้วย Plasticity Model, Johnson-Cook Model, Zerilli Armstrong Strength Model, Cowper Symods Strength Model, Steinberg Guinan Strength Model และ Johnson-Holmquist Strength Continuous Model ดังนี้

2.1.4 Material Model สำหรับพลาสติก (Plasticity Model) [4]

หากวัสดุถูกกระทำด้วยแรงในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นและถูกยกเลิกแรงกระทำนั้นไปในภายหลัง พลังงานการเสียรูปทั้งหมดจะถูกกักเก็บและวัสดุจะเปลี่ยนกลับไปสู่การกำหนดค่าเริ่มต้น แต่หากการเสียรูปมีค่ามากเกินไปจนวัสดุเสียรูปเกินขีดจำกัดยืดหยุ่น วัสดุนั้นจะเริ่มเสียรูปแบบพลาสติก ใน Explicit Dynamics การเสียรูปของพลาสติกจะวิเคราะห์โดยอ้างอิงกับ Von Mises yield criterion (หรือที่เรียกว่า Prandtl-Reuss yield criteria) สิ่งนี้ระบุว่าเงื่อนไขได้ตั้งสมการต่อไปนี้

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2Y^2 \quad (2.34)$$

โดยที่ Y คือ Yield Stress ที่ได้จากการดึง และสามารถเขียนสมการในรูปแบบใหม่ได้ดังนี้

$$(S_1 - S_2)^2 + (S_2 - S_3)^2 + (S_3 - S_1)^2 = 2Y^2 \quad (2.35)$$

หรือ

$$(S_1)^2 + (S_2)^2 + (S_3)^2 = \frac{2Y^2}{3} \quad (2.36)$$

โดยที่

$$(S_1) + (S_2) + (S_3) = 0$$

2.1.5 Johnson-Cook Model [5]

ความสัมพันธ์ของวัสดุโลหะระหว่างความเค้นและความเครียดสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองของ Johnson-Cook model ภายใต้สภาวะของการเปลี่ยนรูปขนาดใหญ่ อัตราความเครียดสูง และอุณหภูมิที่สูงขึ้น นักวิจัยได้ใช้โมเดลนี้กันอย่างแพร่หลายในการทำนายพฤติกรรม การเสีรูปร่างของวัสดุ แบบจำลองความเค้น Johnson-Cook แสดงได้ดังนี้

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) [1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*] [1 - T^{*m}] \quad (2.37)$$

โดยที่

σ คือ ความเค้นเทียบเท่า (equivalent stress)

ε คือ ความเครียดพลาสติกที่เท่ากัน (Equivalent plastic strain)

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

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (2.38)$$

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

2.1.6 Zerilli Armstrong Strength Model [6]

Zerilli-Armstrong Model มีพื้นฐานทางกายภาพและมีหลายรูปแบบ ใช้กับกรณีที่เกิดความเครียดสูงอัตราความเครียดสูง และอุณหภูมิสูง ในขั้นต้นแบบจำลองกล่าวถึงโลหะที่มีโครงสร้าง

ผลึก FCC (ลูกบาศก์ที่มีใบหน้าเป็นศูนย์กลาง) หรือ โครงสร้างผลึกแบบ BCC (ลูกบาศก์ที่มีศูนย์กลางของร่างกาย) ดังนั้น yield strength คือ

$$\sigma = A + [C_1 + C_2 \sqrt{\varepsilon}] e^{(-C_3 + C_4 \ln \dot{\varepsilon})T} + C_5 \varepsilon^n \quad (2.39)$$

ซึ่ง ε คือ ความเครียด, $\dot{\varepsilon}$ คือ อัตราความเครียด และ T คือ อุณหภูมิ โดยการเลือกค่าคงที่ (A , C_1 , C_2 , C_3 , C_4 และ C_5) ที่เหมาะสม โมเดลจะถูกนำไปใช้กับโลหะ FCC ($C_1 = C_5 = 0$) หรือ BCC ($C_2 = 0$) โมเดลนี้ได้ถูกนำไปใช้และประสบความสำเร็จ [7]

2.1.7 Cowper Symonds Strength Model [8]

เมื่อใช้ Explicit dynamic FE เพื่อจำลองสภาวะการไหลที่รุนแรง เช่น ปรากฏการณ์การกระแทกจะต้องใช้แบบจำลองวัสดุที่พิจารณาการขึ้นต่ออัตราความเครียดของเส้นโค้งพลาสติกของวัสดุ แบบจำลองวัสดุที่ใช้บ่อยที่สุดสามแบบในงานวิจัย [9]-[15] ที่พิจารณาผลกระทบจากอัตราความเครียด ได้แก่ Cowper-Symonds, Johnson-Cook และ Zerilli-Armstrong เนื่องจากแบบจำลองวัสดุ Cowper-Symonds และ Johnson-Cook นั้นเรียบง่ายกว่าแบบจำลองวัสดุของ Zerilli-Armstrong จึงพิจารณาเพียงสองแบบก่อนหน้าในการวิจัยนี้ ความแตกต่างที่สำคัญคือวิธีที่ Cowper-Symonds, Johnson-Cook อธิบายถึงผลกระทบจากอัตราความเครียด ดังนั้นจำนวนพารามิเตอร์ของวัสดุที่อธิบายความสัมพันธ์ของความเครียด-ความเครียดของพลาสติกกับผลกระทบของอัตราความเครียดจึงแตกต่างกัน [16], [17]

$$\sigma_y = \left(\sigma_0 + \beta \cdot \frac{E_t \cdot E}{E - E_t} \cdot \varepsilon_{eff}^p \right) \left(1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{1/P} \right) \quad (2.40)$$

Flow Stress ตามสมการของ Johnson-Cook, [8] คือ

$$\sigma_{flow} = \left(\sigma_0 + B \cdot (\varepsilon_{eff}^p)^n \right) \cdot \left[1 + c \cdot \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}^p}{\dot{\varepsilon}_0^p} \right) \right] \cdot \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \right)^m \quad (2.41)$$

โดยที่ σ_0 คือความเค้นครากอ้างอิง, E คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุ, E_t คือ โมดูลัสสัมผัส β คือ ค่าสัมประสิทธิ์การชุบแข็ง, ε_{eff}^p คือ ความเครียดของพลาสติกที่มีประสิทธิภาพ $\dot{\varepsilon}$ คือ อัตราความเครียด และ $\dot{\varepsilon}_0$ คือ ความเครียดอ้างอิง ค่า C และ P เป็นพารามิเตอร์อัตราความเครียดของแบบจำลองวัสดุ Cowper-Symonds, ตัวแปร B , n , c และ m เป็นพารามิเตอร์ขึ้นอยู่กับความเค้นและอัตราความเครียดของแบบจำลองวัสดุ Johnson-Cook แบบจำลองวัสดุ Johnson-Cook

พิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อพฤติกรรมความเครียด แต่ไม่ใช่แบบจำลองวัสดุ Cowper Symonds อย่างไรก็ตามผลกระทบของอุณหภูมิสามารถละเว้นจากแบบจำลองวัสดุของ Johnson-Cook ได้หากพารามิเตอร์ m ถูกตั้งค่าเป็นศูนย์ อิทธิพลของอุณหภูมิสามารถละเว้นจากแบบจำลองวัสดุของ Johnson-Cook ได้หากไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมของวัสดุ แบบจำลอง Cowper-Symonds และ Johnson-Cook เป็นแบบจำลองวัสดุที่ใช้กันมากที่สุดเมื่อทำการจำลองแบบ Explicit Dynamics ซึ่งมีอัตราความเครียดปานกลาง (เช่น $\dot{\epsilon} = 10^4$) ([14], [15])

2.1.8 Steinberg Guinan Strength Model [18]

แบบจำลองส่วนประกอบของ Steinberg-Guinan ใช้กันอย่างแพร่หลายในการจำลองการกระแทกทางวิศวกรรม ที่มีอัตราความเครียดสูงมาก พื้นฐานสำหรับแบบจำลองนี้คือ สมมติฐานที่สูงกว่าอัตราความเครียดวิกฤต ($\sim 10^5 \text{ s}^{-1}$) ผลกระทบทั้งหมดเนื่องจากอัตราความเครียดอิมพัลส์และความแข็งแรงของวัสดุ จะไม่ขึ้นอยู่กับอัตราความเครียด พารามิเตอร์ที่มีผลต่อความแข็งแรงในโมเดลนี้คือ P , T , η และความเครียด (ϵ) โดยพื้นฐานแล้วแบบจำลองนี้เป็นการขยายตัวของ first-order Taylor ในด้านความดันและอุณหภูมิเป็นลำดับแรก โดยมีพีรีแฟกเตอร์สำหรับงานชุบแข็ง ($f(\epsilon)$) และการแก้ไขเล็กน้อยสำหรับการอัด [18] ดังสมการ

$$\sigma = \sigma_0 f(\epsilon) \left(1 + \left(\frac{G'_p}{G_0} \right) \frac{P}{\eta^{1/3}} + \left(\frac{G'_T}{G_0} \right) (T - 300) \right) \quad (2.42)$$

$$G = G_0 \left(1 + \left(\frac{G'_p}{G_0} \right) \frac{P}{\eta^{1/3}} + \left(\frac{G'_T}{G_0} \right) (T - 300) \right) \quad (2.43)$$

$$f(\epsilon) = (1 + \beta(\epsilon_i + \epsilon))^n \quad (2.44)$$

โดยที่ σ_0 และ G_0 คือ ambient strength และ shear modulus ตามลำดับ $\eta = \rho / \rho_0$ คือ การอัด และ $G'_p = \partial G / \partial P$ และ $G'_T = \partial G / \partial T$ เป็นอนุพันธ์ของโมดูลัสเฉือนที่มีความดันและอุณหภูมิตามลำดับ ให้สมมติฐานว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของความแข็งแรงของ P และ T เป็นค่าเดียวกับโมดูลัสเฉือน ซึ่งเป็นสมมติฐานที่พิสูจน์ไม่ได้ในสถานะที่รุนแรงเนื่องจากไม่มีข้อมูลควบคุม [18]

2.1.9 Johnson-Holmquist Strength Continuous Model [19]

Johnson-Holmquist Strength Continuous Model ใช้ในการสร้างแบบจำลองวัสดุที่เปราะ (แก้วหรือเซรามิกส์) ภายใต้แรงอัดสูง แรงเฉือนและอัตราความเครียดสูง จะนำแบบจำลอง

ความเป็นพลาสติกและความเสียหายรวมกัน การให้ผลลัพธ์ขึ้นอยู่กับค่าการเติบโตของรอยแตกขนาดเล็ก แทนการเคลื่อนย้าย (ความยืดหยุ่นของโลหะ) ให้ σ คือ Yield Stress ดังสมการที่ 2.45 [19]

$$\sigma^* = \left(A(P^* + T^*)^N (1+D) + B.(P^*)^M D \right) (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (2.45)$$

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

โดยที่ A, B, C, M, N เป็นค่าคงที่ของวัสดุ ความดันปกติ คือ $P^* = P/P_{HEL}$ โดยที่ P คือ ความดันไฮโดรสแตติกที่แท้จริง และ P_{HEL} คือความดันไฮโดรสแตติกที่ HEL (*Hugoniot Elastic Limit*) ความดันไฮโดรสแตติก แรงดึงสูงสุดที่ปรับให้เป็นมาตรฐานคือ $T^* = T/T_{HEL}$ โดยที่ T คือ แรงดันไฟฟ้าสถิตสูงสุดที่วัสดุสามารถทนได้ อัตราความเครียดแบบไร้มิติ คือ $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$ โดยที่ $\dot{\epsilon}$ คือ อัตราความเครียดที่เทียบเท่าจริง และ $\dot{\epsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$ [19]

จากสมการที่ 2.45 กรณีความแข็งแรงตามปกติไม่เสียหาย (The normalized intact strength) จะได้

$$\sigma_i^* = A(P^* + T^*)^N \cdot (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (2.46)$$

จากสมการที่ 2.45 กรณีความแข็งแรงตามปกติเสียหาย (The normalized fracture strength) จะได้

$$\sigma_f^* = B(P^*)^M \cdot (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \leq SFMAX \quad (2.47)$$

2.1.10 Explicit Dynamics Analysis with ANSYS

ANSYS explicit dynamics เป็นเครื่องมือขั้นสูงเพื่อช่วยให้เข้าใจเหตุการณ์ที่สามารถจำลองได้ เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการจำลองทางกายภาพที่มีการรับภาระกระทำรุนแรงในห้วงเวลาสั้น ๆ ตัวอย่างเช่น การกระแทกและการเจาะทะลุของแผ่นเกราะกันกระสุนและกระสุน (Ballistic Impact Test) การติดตามคลื่นกระแทกและแรงกดดันสูงสุด การตกกระแทกของวัสดุ (Drop Test) สำหรับสมการพื้นฐานที่แก้ปัญหาคณิตศาสตร์แบบ Explicit Dynamics คือ FE (Lagrange) เป็นวิธีที่ใช้กันมากที่สุดและเป็นวิธีที่เร็วที่สุดในการคำนวณ วิธีออยเลอร์เหมาะกับการไหลของวัสดุที่แสดงด้วยการแบ่งเอลิเมนต์คงที่ที่เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการสร้างแบบจำลองการเปลี่ยนรูปของของแข็งอย่างรุนแรง รวมทั้งการไหลของของเหลวและก๊าซ ด้วยตัวแก้ย่อยเลอร์เสมือน ด้วย ANSYS Virtual Euler

Solver จะมีเอลิเมนต์ที่ถูกรสร้างขึ้นโดยอัตโนมัติโดยไม่ต้องป้อนข้อมูลโดยผู้ใช้ Arbitrary Lagrange – Euler (ALE) รวมข้อดีของ Lagrange และ Euler ในขณะที่จัดข้อบกพร่องบางประการ เหมาะอย่างยิ่งสำหรับการจำลองวัสดุที่มีการเสีรรูปอย่างรุนแรงซึ่งต้องการการตอบสนองต่อแรงกระทำที่มีความละเอียดสูง [20]

สมการพื้นฐานที่แก้ไขโดย Explicit Dynamics Analysis Express ประกอบด้วย

- การอนุรักษ์มวลโมเมนตัมและพลังงานในพิกัด Lagrange
- แบบจำลองส่วนประกอบของวัสดุ
- จุดเงื่อนไขเริ่มต้นและขอบเขต

สำหรับสูตร Lagrange ตาข่ายจะเคลื่อนที่และบิดเบือนไปกับวัสดุที่เป็นแบบจำลอง ดังนั้นการอนุรักษ์มวลจึง Satisfied โดยอัตโนมัติ ความหนาแน่นสามารถกำหนดได้ตลอดเวลาจากปริมาตรที่เวลาใด ๆ ของบริเวณนั้น ๆ และมวลเริ่มต้น [21] คือ

$$\frac{\rho_0 V_0}{V} = \frac{m}{V} \quad (2.48)$$

สมการเชิงอนุพันธ์ในรูปกฎการอนุรักษ์โมเมนตัมที่เกี่ยวข้องกับความเร่งและเทนเซอร์ของความเค้น σ_{ij} [21]

$$\begin{aligned} \rho \ddot{x} &= b_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \\ \rho \ddot{y} &= b_y + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} \\ \rho \ddot{z} &= b_z + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \end{aligned} \quad (2.49)$$

จากกฎอนุรักษ์พลังงาน [21]

$$\dot{e} = \frac{1}{\rho} (\sigma_{xx} \dot{\epsilon}_{xx} + \sigma_{yy} \dot{\epsilon}_{yy} + \sigma_{zz} \dot{\epsilon}_{zz} + 2\sigma_{xy} \dot{\epsilon}_{xy} + 2\sigma_{yz} \dot{\epsilon}_{yz} + 2\sigma_{zx} \dot{\epsilon}_{zx}) \quad (2.50)$$

สำหรับเวลาในแต่ละขั้นตอน สมการเหล่านี้จะได้รับการแก้ไขสำหรับแต่ละองค์ประกอบในแบบจำลองตามค่าที่ป้อนเมื่อสิ้นสุดขั้นตอนก่อนหน้านี้ การวิเคราะห์ Explicit Dynamics บังคับใช้เฉพาะสมการอนุรักษ์มวลและโมเมนตัม และควรมีสมการอนุรักษ์พลังงานด้วยเช่นกัน

วิธีแก้ปัญหาเริ่มต้นด้วย Mesh ที่กำหนดสมบัติวัสดุ ภาวะกระทำ ข้อจำกัด จุดรองรับ และเงื่อนไขเริ่มต้น:

- การรวมเวลาทำให้เกิดการเคลื่อนไหวที่โหนดตาย
- การเคลื่อนไหวของโหนดทำให้เกิดการเสียรูปขององค์ประกอบ
- การเปลี่ยนรูปขององค์ประกอบส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรและความหนาแน่นของวัสดุในแต่ละองค์ประกอบ
- Constitutive laws ได้จากผลลัพธ์ของความเค้นที่เป็นผลลัพธ์จากอัตราความเครียด
- ความเค้นถูกเปลี่ยนกลับเป็นแรงที่โหนด (โดยใช้องค์ประกอบต่างๆ)
- แรงภายนอกที่โหนดคำนวณจากเงื่อนไขขอบเขตของภาระกระทำและหน้าสัมผัส
- แรงที่โหนดทั้งหมดถูกหารด้วยมวลที่โหนดเพื่อสร้างความเร่งที่โหนด
- ความเร่งถูกรวมเข้าด้วยกันเพื่อสร้างความเร็วโหนดใหม่
- ความเร็วของโหนดถูกรวมเข้าด้วยกันเพื่อสร้างตำแหน่งโหนดใหม่
- กระบวนการแก้ปัญหา (วงรอบ) จะถูกทำซ้ำจนกว่าจะถึงเวลาสิ้นสุดการคำนวณ

2.2 มาตรฐานแผ่นเกราะกันกระสุน [22]

อ้างอิงจากมาตรฐานยุโรปกรณ์กระทรวงกลาโหมว่าด้วยแผ่นเกราะกันกระสุน จัดทำโดย คณะอนุกรรมการกำหนดมาตรฐานยุโรปกรณ์กระทรวงกลาโหม ว่าด้วยเกราะกันกระสุน ซึ่งได้แปลวิเคราะห์สังเคราะห์ ประยุกต์ และเรียบเรียงให้เหมาะสมกับประเทศไทยโดยอิงมาตรฐาน US.NIJ Standard 0108.01 ประยุกต์กับ Threat Level ของ NIJ 0101.04 ตามความจำเป็นและเหมาะสม เพื่อมุ่งส่งเสริมและสนับสนุนกิจการอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของไทยเป็นหลัก ดังนี้

2.2.1 ขอบข่าย มาตรฐานยุโรปกรณ์นี้กำหนด การจำแนกระดับของแผ่นเกราะ นิยามคุณลักษณะที่ต้องการ เครื่องหมายและฉลาก การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน และการทดสอบ ซึ่งครอบคลุมถึงแผ่นเกราะที่ใช้ในการป้องกันหรือลดอันตรายจากการยิงด้วยกระสุน เช่น โล่กันกระสุน ป้อมยามหุ้มเกราะ ยานหุ้มเกราะ และห้องนิรภัย เป็นต้นแต่ไม่รวมถึงเสื้อเกราะและหมวกเกราะ

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

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

ตารางที่ 2.1 ตารางภัยคุกคามและการยิงทดสอบความสามารถกันกระสุนของเกราะ [4]

ระดับภัยคุกคาม	ขนาด/ชนิดกระสุนทดสอบ	น้ำหนักของลูกกระสุนเกรน (กรัม)	ความเร็วกระสุน ± 30 ฟุต/วินาที (± 9.1 เมตร/วินาที)	จำนวนนัดที่ยิงผ่านเกณฑ์	ปืนทดสอบ
1	.22caliber LRLRN	40 เกรน	1,080 ฟุต/วินาที	5	ปืนพก หรือ ลำกล้องทดสอบ
		(2.6 กรัม)	(329เมตร/วินาที)		
	หรือ	95 เกรน	1,055ฟุต/วินาที	5	ปืนพก หรือ ลำกล้องทดสอบ
		(6.2 กรัม)	(322เมตร/วินาที)		
.38 Special LRN	158 เกรน	880ฟุต/วินาที	5	ปืนพก หรือ ลำกล้องทดสอบ	
	(10.2 กรัม)	(268เมตร/วินาที)			
2A	9 mm.FMJ RN	124 เกรน	1120ฟุต/วินาที	5	ปืนพก หรือ ลำกล้องทดสอบ
		(8.0 กรัม)	(341เมตร/วินาที)		
	หรือ	180 เกรน	1055ฟุต/วินาที	5	ปืนพก หรือ ลำกล้องทดสอบ
		(11.7 กรัม)	(322เมตร/วินาที)		
.45 FMJ RN	230 เกรน	840ฟุต/วินาที	5	ปืนพก หรือ ลำกล้องทดสอบ	
	(15.0 กรัม)	(256เมตร/วินาที)			
2	9 mm.FMJ RN	124 เกรน	1205ฟุต/วินาที	5	ปืนพก หรือ ลำกล้องทดสอบ
		(8.0 กรัม)	(367เมตร/วินาที)		
	.357 Mag JSP	158 เกรน	1430ฟุต/วินาที	5	ปืนพก หรือ ลำกล้องทดสอบ
		(10.2 กรัม)	(436เมตร/วินาที)		
3A	9 mm.FMJ RN	124 เกรน	1430ฟุต/วินาที	5	ปืนพก หรือ ลำกล้องทดสอบ
		(8.0 กรัม)	(436เมตร/วินาที)		
	.44 Mag SJHP	240 เกรน	1430ฟุต/วินาที	5	ปืนกลมือ หรือ ลำกล้องทดสอบ
		(15.6 กรัม)	(436เมตร/วินาที)		
3	7.62 mm NATO FMJ	148 เกรน	2780ฟุต/วินาที	5	ปืนเล็กยาว หรือ ลำกล้องทดสอบ
		(9.6 กรัม)	(847เมตร/วินาที)		
4	.30 caliber M2 AP	166 เกรน	2880ฟุต/วินาที	1	ปืนเล็กยาว หรือ ลำกล้องทดสอบ
		(10.8 กรัม)	(878เมตร/วินาที)		

2.2.3 บทนิยาม

2.2.3.1 แผ่นเกราะกันกระสุนหรือแผ่นป้องกันกระสุนหรือ"แผ่นเกราะหมายถึงแผ่นวัสดุทุกชนิดที่มีความสามารถในการป้องกันหรือลดอันตรายจากการยิงด้วยกระสุนปืนที่ผู้ผลิตเจตนาจัดทำขึ้นเพื่อการนี้"ไม่ว่าจะเป็นเกาะ(หรือวัสดุป้องกันกระสุน)ที่ทำด้วยเหล็ก โลหะใดๆ เซรามิกส์ กระฉก วัสดุสังเคราะห์ ฯลฯ ซึ่งต่อไปได้มาตรฐานฉบับนี้จะเรียกลักษณะ "เกราะ"

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

2.2.3.3 การทะลุผ่าน หมายถึง การที่กระสุนเจาะทะลุผ่านเกราะ แล้วปรากฏว่ามีเศษชิ้นส่วนของกระสุนหรือเศษชิ้นส่วนของเกราะเจาะทะลุผ่านแผ่นพยานด้วย ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้โดยการมองเห็นแสงที่รอดผ่านรอยทะลุบนแผ่นพยานนั้น เมื่อนำหลอดไฟฟ้าขนาด 60 วัตต์ไปส่อง

2.2.3.4 ระยะห่างของรอยยิง หมายถึง ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของจุดที่ยิงบนแผ่นเกราะ ไปถึงจุดศูนย์กลางของจุดยิงจุดอื่นๆ บนเกราะนั้น หรือไปถึงริมขอบของเกราะนั้น กำหนดระยะห่างของรอยยิงปกติ ควรมีระยะห่างจากกันเอง และห่างจากขอบเกราะ ไม่น้อยกว่า 2 นิ้ว (5 ซม.)

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

2.2.3.6 นัดที่ยิงผ่านเกณฑ์ หมายถึง ผลการยิงในกระสุนนัดที่ถือว่าผ่านเกณฑ์การยอมรับสำหรับการยิงทดสอบตามตารางที่ 2.1 ซึ่งจำเป็นต้องเกิดขึ้นจากการยิงด้วยความเร็วกระสุนตามที่กำหนดหรือสูงกว่าที่กำหนด แล้วไม่เกิดการทะลุผ่าน โดยที่ไม่ต้องคำนึงถึงระยะห่างของรอยยิง ซึ่งเป็นไปตามตรรกะที่ว่า"ในสถานการณ์ปัจจัยคุกคามตามปกติหรือปัจจัยคุกคามที่สูงกว่าปกติ เกราะนี้สามารถเผชิญได้"

2.2.3.7 นัดที่ยิงไม่ผ่านเกณฑ์ หมายถึง ผลการยิงในกระสุนนัดที่ถือว่าไม่ผ่านเกณฑ์การยอมรับสำหรับการยิงทดสอบตามตารางที่ 2.1 ซึ่งจำเป็นต้องเกิดขึ้นจากกรณีที่ยิงด้วยความเร็วกระสุนตามกำหนดหรือต่ำกว่ากำหนดและมีระยะห่างของรอยยิง (ทั้งห่างจากกันและห่างจากขอบเกราะ) ได้ระยะตามที่กำหนดเกิดการทะลุผ่าน ซึ่งเป็นไปตามตรรกะที่ว่า"ในสถานการณ์ปัจจัยคุกคามตามปกติ

หรือปัจจัยคุกคามที่ต่ำกว่าปกติเพราะนี้เผชิญไม่ได้" ทั้งนี้หากปรากฏว่ามีชนิดที่ยังไม่ผ่านเกณฑ์ตั้งแต่ 1
 ชนิดขึ้นไปก็ให้ยุติการยิงทดสอบในขั้นต่อไปได้และสรุปได้ว่าเพราะนี้ไม่ผ่านการรับรองมาตรฐาน

2.2.3.8 นัดที่ยิงพลาด หมายถึง ผลการยิงในกระสุนนัดที่ถือว่าเป็นการยิงพลาด มิสามารถ
 วินิจฉัยการผ่านหรือไม่ผ่านเกณฑ์การยอมรับสำหรับการยิงทดสอบตามตารางที่ 2.1 ได้ ซึ่งเป็นไป
 ตามตรรกที่ว่า "ในสถานการณ์ปัจจัยคุกคามที่สูงกว่าปกติ เพราะนี้เผชิญไม่ได้ หรือในสถานการณ์
 ปัจจัยคุกคามที่ต่ำกว่าปกติ เกาะนี้สามารถเผชิญได้" จำต้องให้ยิงทดสอบแก้มือในนัดนั้นใหม่ ในการยิง
 แก้มือใหม่นั้นให้ยิงใกล้บริเวณเดิมที่มีระยะห่างของรอยยิงได้ หรืออาจไปเริ่มต้นกระบวนการยิง
 ทดสอบเพราะอันใหม่ก็ได้

2.2.4 คุณลักษณะที่ต้องการ

2.2.4.1 ลักษณะทั่วไป ต้องเป็นแผ่นเกราะสำเร็จรูปพร้อมใช้งาน หรือเป็นผลิตภัณฑ์ที่ทำ
 ด้วยเกราะหรือที่หุ้มด้วยเกราะ สำหรับใช้ในการป้องกันหรือลดอันตรายจากการยิงด้วยกระสุนปืน

2.2.4.2 ความเรียบร้อยทั่วไป เกราะจะต้องไม่มีรอยย่น พอง รอยแตกร้าว ริมขอบต้องไม่
 บิ่นหรือแหลมคม หรือขาดความประณีตในการผลิต

2.2.4.3 ความสามารถในการกันกระสุน เมื่อทำการทดสอบเกราะด้วยวิธีการยิงทดสอบตาม
 ตารางที่ 2.1 และข้อ 2.2.7 เกราะจะต้องสามารถกันกระสุนได้ตามระดับที่ระบุไว้ที่ฉลาก โดยมีจำนวน
 นัดที่ยิงผ่านเกณฑ์ได้ครบจำนวนตามกำหนดไว้ในตารางที่ 2.1

2.2.5 เครื่องหมายและฉลาก

2.2.5.1 แผ่นเกราะทุกหน่วยอย่างน้อยต้องมีเลขอักษรหรือเครื่องหมายแจ้งรายละเอียด
 ต่อไปนี้ให้เห็นได้ง่ายชัดเจนและไม่ลบเลือนง่าย

- (1) คำว่า"เกราะ"หรือ"เกราะกันกระสุน"หรือ"เกราะป้องกันกระสุน"
- (2) ระดับของการกันกระสุน
- (3) เดือนปีที่ทำหรือรหัสรุ่น
- (4) ชื่อผู้ทำหรือโรงงานที่ทำหรือเครื่องหมายการค้าที่จดทะเบียน

2.2.5.2 กรณีที่เป็นกระจกกันกระสุนที่มุ่มใดมุ่มหนึ่งของกระจกทุกแผ่นอย่างน้อยต้องมีเลข
 อักษรหรือเครื่องหมายแจ้งรายละเอียดต่อไปนี้ให้เห็นได้ง่ายชัดเจนและไม่ลบเลือนง่าย

- (1) คำว่า"กระจกกันกระสุน"
- (2) ระดับของการกันกระสุน
- (3) ชื่อผู้ทำหรือโรงงานที่ทำหรือเครื่องหมายการค้าที่จดทะเบียน

2.2.5.2 ในกรณีที่ใช้ภาษาต่างประเทศต้องมีความหมายตรงกับภาษาไทยที่กำหนดไว้ข้างต้น

2.2.6 การชักตัวอย่างหรือเกณฑ์ตัดสิน

2.2.6.1 รุ่นในที่นี้ หมายถึง เกราะแบบและระดับเดียวกัน ทำจากวัสดุและกรรมวิธีผลิต
 เดียวกัน ที่ทำหรือส่งมอบหรือซื้อขายในระยะเวลาเดียวกันหรือใกล้เคียงกัน

2.2.6.2 การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสินให้เป็นไปตามแผนการชักตัวอย่างที่กำหนดต่อไปนี้

1. ให้ผู้ยื่นคำขอการรับรองเกราะส่งมอบเกราะรุ่นเดียวกันจำนวนอย่างน้อย 1 หน่วย (อาจเป็นผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง หรือเป็นชิ้นทดสอบที่ทำขึ้นต่างหากก็ได้ หรือในกรณีที่จำเป็นก็อาจต้องทำการยิงทดสอบ ณ สถานที่ที่ผลิตภัณฑ์เกราะตั้งอยู่ก็ได้) โดยเกราะต้องมีขนาดอย่างน้อย 12 x 12 นิ้ว (305x305 มม.)
2. ให้ตรวจสอบตัวอย่างเกราะตามข้อ 6.2.1 โดยการตรวจพินิจเมื่อตรวจสอบแล้วทุกตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้อ 2.2.4.1, 2.2.4.2 และ 2.2.5 จึงจะถือว่าเกราะรุ่นนี้เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด
3. ให้นำตัวอย่างเกราะตามข้อ 6.2.2 ไปทำการยิงทดสอบตามตารางที่ 2.1 และข้อ 2.2.7 เมื่อทดสอบแล้วทุกตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้อ 2.2.4.3 จึงจะถือว่าเกราะรุ่นนี้เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

2.2.6.3 เกณฑ์ตัดสินตัวอย่างเกราะต้องเป็นไปตามข้อ 6.2.2 และ 6.2.3 ทุกข้อจึงจะถือว่าเกราะรุ่นนี้เป็นไปตามมาตรฐานยุโรปกรณีกระทรวงกลาโหมนี้

2.2.7 การทดสอบ

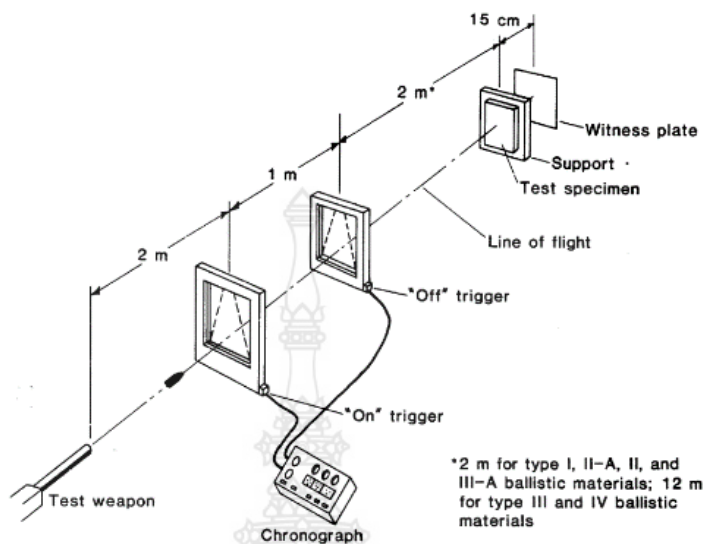
2.2.7.1 การเตรียมการทดสอบ

ให้เตรียมอาวุธ, กระสุน, เครื่องจับเวลาที่มีความเที่ยงตรง (Precision) 1 ไมโครวินาทีและความแม่นยำ (Accuracy) 2 ไมโครวินาที, ฉากจับเวลา (Trigger) ที่เป็นแบบ Photoelectric หรือแบบ Conductive screen ก็ได้ ทำการยิงเป้ากระดาศ (หรือเป้าอื่น) อย่างน้อย 3 นัด โดยให้ปฏิบัติในครั้งเดียวแล้ว ได้ประโยชน์ 3 อย่าง อย่างแรกได้ความมั่นใจในค่าความเร็วกระสุน, อย่างที่สองได้เป็นการลดการล้าล่องไปในตัวและอย่างที่ได้ปรับความแม่นยำในการยิงด้วยแล้วเตรียมสิ่งยึดตรึงเกราะ (Support Fixture) ที่สามารถปรับตำแหน่งในแนวราบและแนวตั้งได้โดยที่สิ่งยึดตรึงนี้ต้องไม่กีดขวางวิถีกระสุนด้วยจัดให้เกราะอยู่ในแนวตั้งฉากกับวิถีกระสุนเพื่อให้เป็นการยิงที่มุมยิง $0^\circ \pm 5^\circ$ เตรียมแผ่นพยานและกำหนดจุดยิง (Marking) ให้ครอบคลุมพื้นที่ยิง 12 x 12 นิ้ว (305x305 มม.) ของเกราะที่จะทดสอบครั้งนี้ให้จัดวางอุปกรณ์ต่างๆ ได้แก่ฉากจับเวลา เกราะทดสอบ และแผ่นพยานให้อยู่ในแนวตั้งฉากกับวิถีกระสุนตามรูปที่ 2.3

2.2.7.2 หลักการทั่วไปในการยิงทดสอบเกราะ

1. ในการยิงทดสอบแต่ละนัด ต้องทำการวินิจฉัยว่าเป็นนัดที่ยิงผ่านเกณฑ์, ยิงไม่ผ่านเกณฑ์หรือเป็นนัดที่ยิงพลาดเสมอ โดยตรวจความเร็วกระสุน ตรวจการทะลุผ่าน วัดระยะห่างของรอยยิงและบันทึกไว้ แล้วพิจารณาปฏิบัติให้สอดคล้องกับผลการยิงนั้นต่อไป (ตามตารางที่ 2.2)
2. สำหรับเกราะกันกระสุนที่ต่ำกว่าระดับ 3 ซึ่งต้องทำการยิงทดสอบด้วยกระสุน 2 ชนิดๆละ 5 นัด เมื่อได้ยิงทดสอบด้วยกระสุนชนิดที่ 1 ครบ 5 นัดเรียบร้อยแล้ว ก่อนที่จะยิงทดสอบด้วยกระสุนชนิดที่ 2 นั้นสมควรที่จะเปลี่ยนเกราะที่จะทดสอบอันใหม่ แต่ก็อาจให้ใช้เกราะอันเดิมก็ได้

หากเกราะนั้นมีขนาดใหญ่มากพอที่จะยิงทดสอบให้ครอบคลุมพื้นที่ยิงและได้ระยะห่างของรอยยิงได้ตามที่กำหนด



รูปที่ 2.3 Ballistic test setup [22], [23]

ตารางที่ 2.2 ตารางสรุปการวินิจฉัยการปฏิบัติต่อผลการยิงทดสอบเกราะ [22]

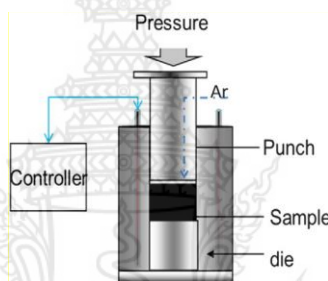
คำนิยาม	กรณี	ความเร็วกระสุน	ระยะห่างของรอยยิง	ทะลุผ่าน	ผลการวินิจฉัย
นัดที่ยิงผ่านเกณฑ์	-	ปกติ/สูง	ไม่คำนึง	ไม่ทะลุ	ดำเนินการต่อไปได้ปกติ
นัดที่ยิงไม่ผ่านเกณฑ์	-	ปกติ/ต่ำ	ได้	ทะลุ	ให้ยุติการยิงทดสอบ
	1	สูง	ไม่คำนึง	ทะลุ	ให้ยิงทดสอบแก้มือ
	2	ปกติ	ไม่ได้	ทะลุ	
	3	ต่ำ	ไม่ได้	ทะลุ	
	4	ต่ำ	ไม่คำนึง	ไม่ทะลุ	

2.2.7.3 การยิงทดสอบเกราะที่เป็นผลิตภัณฑ์ขนาดใหญ่เช่นตู้ยามหุ้มเกราะยานหุ้มเกราะและห้องนิรภัยเป็นต้นให้พิจารณาประยุกต์เกี่ยวกับลักษณะของการเตรียมการทดสอบอุปกรณ์ต่างๆ และวิธีการในการยิงทดสอบให้เหมาะสมกับสถานการณ์ได้ตามความจำเป็นและเหมาะสม

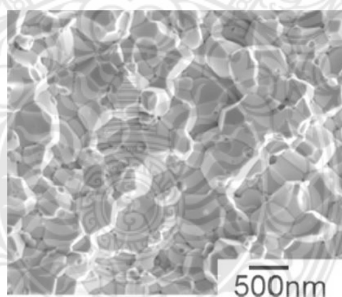
2.2.7.4 การแก้ไขรายละเอียดทางเทคนิคในการทดสอบ ให้คณะกรรมการกำหนดมาตรฐานยุโรปกรณีกระสุนทวงกลาโหมว่าด้วยเกราะกันกระสุน สามารถแก้ไขเปลี่ยนแปลงรายละเอียดทางเทคนิคในการทดสอบในส่วนที่มีสาระสำคัญได้ โดยใช้ดุลพินิจพิจารณาให้เหมาะสมกับความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีและสถานการณ์ที่เปลี่ยนแปลงไป แล้วรีบรายงานให้คณะกรรมการกำหนดมาตรฐานยุโรปกรณีกระสุนทวงกลาโหมทราบ

2.3 การทบทวนวรรณกรรม

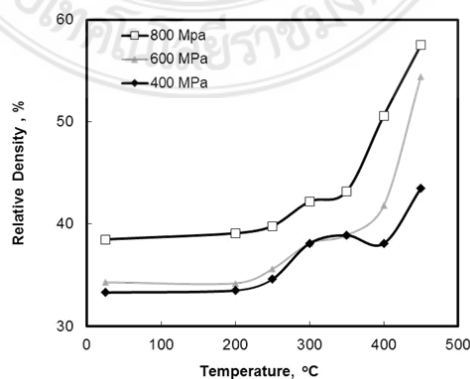
Xu Wang และคณะ [24] ได้ทำการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของ Green compact และความหนาแน่นหลังการเผา Green compact วัสดุนาโนถูกใช้ในการทดสอบการอัดถูกดำเนินการโดยใช้การกดแบบแกนเดียว ผงถูกอัดเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 mm น้ำหนัก 3 g ในระหว่างการอัดผงจะถูกให้ความร้อนขึ้นส่วนแม่พิมพ์เหล็กสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 500 °C จะได้ Green compact ที่มีความหนาแน่นสูง ได้ดำเนินการที่อุณหภูมิตั้งแต่ 200 °C ถึง 500 °C และภายใต้แรงกดอัด 200–800 MPa หลังจากการอัดตัวอย่างจะมีความหนาแน่นของ Green compact ที่แตกต่างกัน จากรูปที่ 2.4 แสดงสัณฐานวิทยาทั่วไปของผงมีขนาดการรวมตัวกันจาก 50 ถึง 500 นาโนเมตร ขนาดผลึกเฉลี่ยถูกกำหนดเป็น 12 นาโนเมตร โดยใช้ X-ray diffraction (XRD)



รูปที่ 2.4 เทคนิคการบดอัด Green compact ที่มีความหนาแน่นสูง [24]



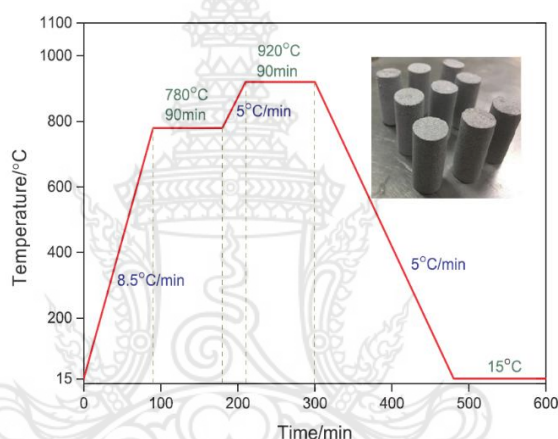
รูปที่ 2.5 ลักษณะทางกายภาพของผงที่ได้จากเครื่อง SEM [24]



รูปที่ 2.6 ความหนาแน่นเทียบกับความดันที่ใช้อุณหภูมิที่ 450°C [24]

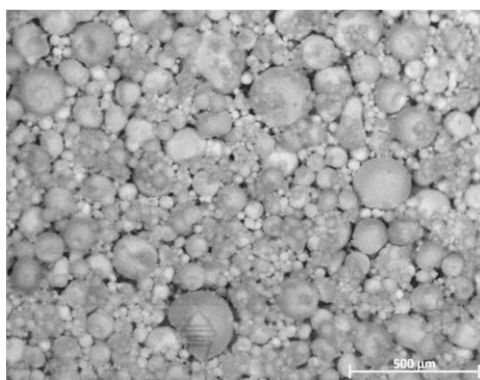
สำหรับการอัดที่ 450 °C ความหนาแน่นสัมพัทธ์ร้อยละ 58 การทดลองเผาผนึกภายใต้เงื่อนไขการเผาเดียวกันที่ 1,100 °C นาน 1 ชั่วโมง Green compact จะมีความหนาแน่นในแนวโน้มที่ดีด้วยความหนาแน่นสัมพัทธ์ร้อยละ 55 หลังถูกเผาผนึกจะมีความหนาแน่นถึงร้อยละ 98 ด้วยขนาดเกรนเฉลี่ยประมาณ 585 นาโนเมตร

H.T. Gao และคณะ [25] ได้ทำการศึกษาผลการรวมของใยแก้วและผงอลูมิเนียมต่อสมบัติเชิงกลของแก้วเซรามิกส์ วัสดุที่ใช้ในการศึกษาตะกรันจากเตาถูถูกเลือกเป็นวัสดุหลักและใยแก้วและผงอลูมิเนียมเป็นวัสดุเสริมแรงที่ต้องพิจารณาองค์ประกอบของโครงสร้างจุลภาค, สมบัติวัสดุ, แรงอัด, ความหนาแน่นของแก้วเซรามิกส์และเวลาการอัดขึ้นรูป หลังจากนั้นทำการเผาผนึกด้วยโปรแกรมตามรูปที่ 2.7 ในการศึกษาครั้งนี้จะได้เซรามิกส์แก้วที่มีความแข็งแรงสูงและมีความเหนียวสูง

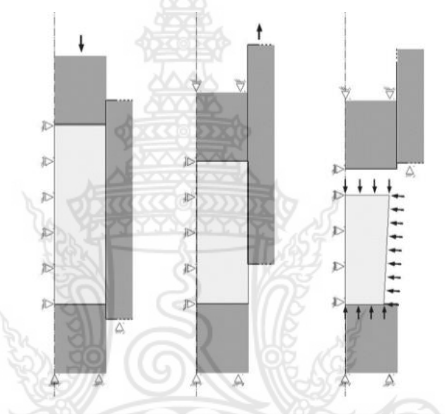


รูปที่ 2.7 โปรแกรมการเผาผนึกของเซรามิกส์แก้ว [25]

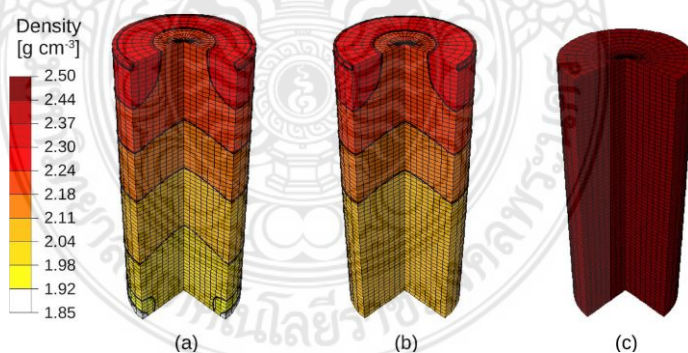
C. C. Melo และคณะ [26] ทำการทดลองเพื่อตรวจสอบแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ใช้ในการจำลองการอัดแบบผงด้วยการอัดแกนเดียวแบบ Isostatic การกดแกนเดียวทำให้เกิดการกระจายความหนาแน่นที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันอันเป็นผลมาจากแรงเสียดทานระหว่างผนังแม่พิมพ์ ผงวัสดุที่ใช้ในการศึกษาคือ ผงอลูมิน่า Al_2O_3 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยคือ 75 ไมครอน ดังแสดงรูปที่ 2.8 รูปร่างของ Green compact วัดได้จากการทดลองและทำนายโดยการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ หลังจากกดแบบ Isostatic แสดงในรูปที่ 2.9 ความแตกต่างระหว่างการทดลองและการจำลองความสูงของส่วนที่ถูกอัดแบบ Isostatically คือ 1.23 มิลลิเมตร (ร้อยละ 1.0 ของการทดลองความสูง) และ 2.99 มิลลิเมตร ที่ 200 MPa (ร้อยละ 2.6 ของการทดลองความสูง) เส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุดที่วัดได้และคาดการณ์ในการบดอัดส่วนหนึ่งมีความแตกต่างของ 0.05 มิลลิเมตร (ร้อยละ 0.2 ของการทดลองเส้นผ่านศูนย์กลาง) เมื่อกดที่ 25 MPa และ 0.40 มิลลิเมตร (ร้อยละ 1.7 ของการทดลองเส้นผ่านศูนย์กลาง) ที่ 200 MPa เมื่อกดที่ 25 MPa และ 0.28 มิลลิเมตร (ร้อยละ 0.3 ของเส้นผ่านศูนย์กลางการทดลอง) ที่ 200 MPa การวัดและผลลัพธ์ FEA ดังรูปที่ 2.10 ผลอยู่ในเกณฑ์ดี



รูปที่ 2.8 ผงเซรามิกส์ที่ศึกษาซึ่งถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ Zeiss Stemi 2000-C [26]



รูปที่ 2.9 ขั้นตอนการทดลอง: (a) การกดแกนเดียว (b) การดีดออก และ (c) การกดแบบไม่คงที่ [26]

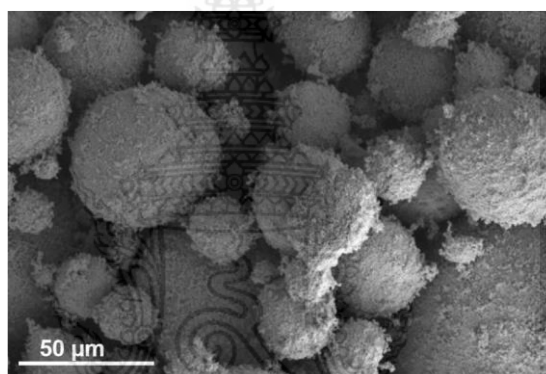


รูปที่ 2.10 ความหนาแน่นหลังจากอัด (a) การกดแบบปิด (b) กดอัดแบบคงที่ 25 MPa และ (c) 200 MPa [26]

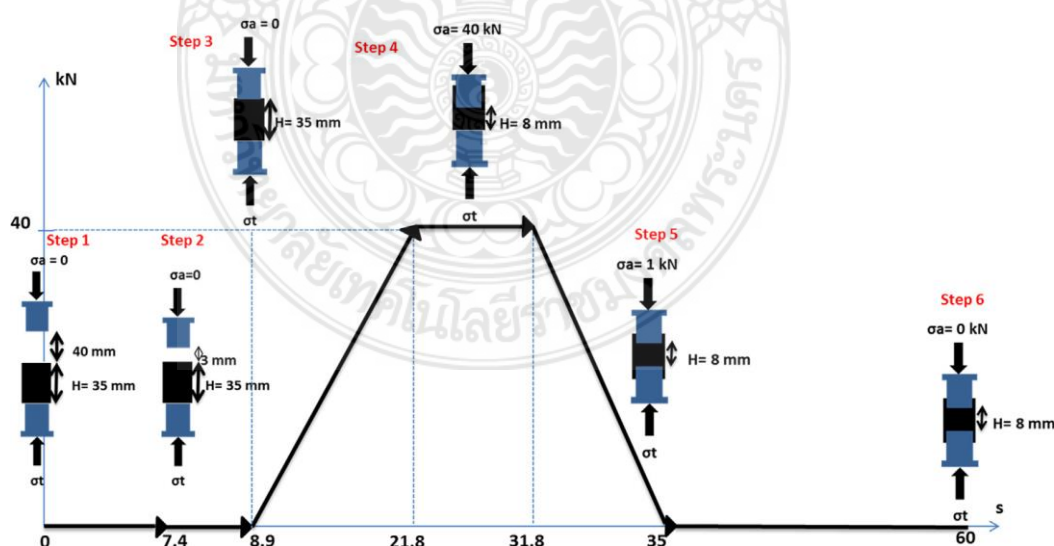
การวัดการกระจายความหนาแน่นใน Green compact ช่วยให้สามารถตรวจสอบแบบจำลองเชิงตัวเลขให้สอดคล้องกับการอัดแบบผงและถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย ขั้นตอนการทดลองนำเสนอพิสูจน์แล้วว่าเป็นการประเมินทางอ้อมของการกระจายความหนาแน่นสัมพัทธ์และง่ายขึ้นกว่า

ขั้นตอนอื่น ๆ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าชุดของพารามิเตอร์ที่ได้รับจากขั้นตอนที่เสนอนั้นถูกต้อง มีความแตกต่างเล็กน้อยระหว่างการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและการทดลอง เช่น พฤติกรรมยืดหยุ่นเชิงเส้น และพารามิเตอร์ที่ไม่ยืดหยุ่นถือว่าเป็นค่าคงที่ระหว่างการบดอัดผงหรือสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างผนังแม่พิมพ์และผงโดยสมมติให้เป็นค่าคงที่

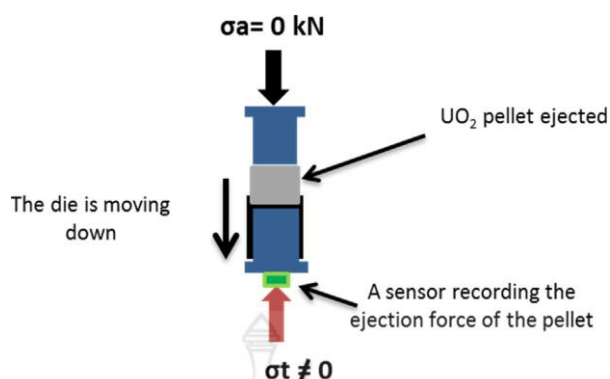
Ousseïni Marou Alzouma และคณะ [27] ได้ทำการศึกษาความหนาของน้ำมันหล่อลื่นที่ผนังแม่พิมพ์สำหรับอัดผง UO_2 ที่ผ่านการอบแห้งอย่างละเอียด คือมีปริมาณร้อยละ 8.5 ของ U_3O_8 ผง UO_2 แสดงในรูปที่ 2.11 พบว่าขนาดอนุภาคมีขนาดใหญ่จาก 0.5 ไมครอน ถึง 150 ไมครอน และเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุดของอนุภาค UO_2 คือ 150 ไมครอน ระยะห่างของแกนอัดตัวบนกับค่าแรงแสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 อนุภาคผง UO_2 สังเกตได้จากเทคโนโลยี SEM [27]



รูปที่ 2.12 ระยะห่างระหว่างส่วนบนแกนอัดและแม่พิมพ์เป็น 40 มิลลิเมตร แกนอัดด้านบนกำลังลดลงเหลือ 37 มิลลิเมตร จากจุดเริ่มต้นด้วยความเร็ว 5 มิลลิเมตร [27]



รูปที่ 2.13 รูปแบบของกระบวนการขึ้นรูป UO_2 [27]

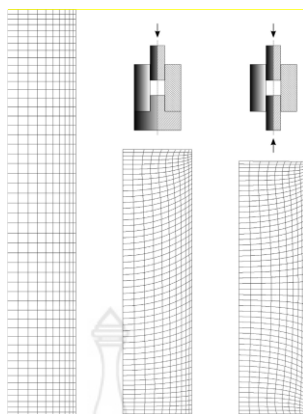
รูปที่ 2.13 แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนแรงส่งเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของชั้นน้ำมันหล่อลื่นที่สะสมบนผนังแม่พิมพ์ (จาก 1 ชั้นถึง 3 ชั้น) อย่างไรก็ตามเมื่อมีการเคลือบที่เกิดจากสารหล่อลื่นกลายเป็นความหนาเกินไป (6 ชั้น) อัตราส่วนแรงส่งต่ำกว่าเมื่อเทียบกับกรณีที่มีสารหล่อลื่นน้อย ซึ่งหมายความว่า การเคลือบหนาจะเป็นอุปสรรคต่อการส่งกำลังระหว่างแกนอัดบนและแกนอัดล่าง ปริมาณน้ำมันหล่อลื่นที่สอดคล้องกับจำนวนชั้นของน้ำมันหล่อลื่นแต่ละประเภทแสดงในรูปที่ 2.14

Approximate values of lubricant quantity corresponding to each number of lubricant layers.

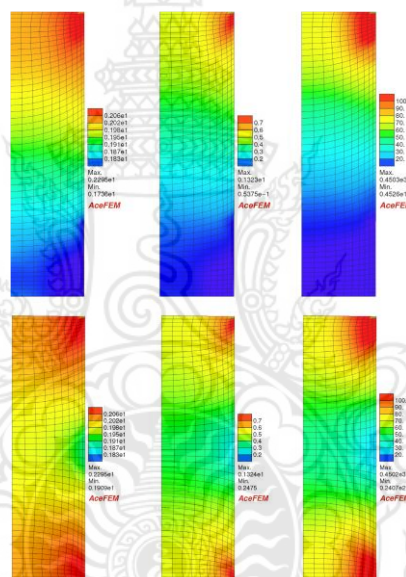
Number of layers	1 layer	3 layers	6 layers
Total quantity of lubricant (mg)	1	3	6
Quantity of lubricant per millimeter square of die wall surface (79 mm^2) (mg/mm^2)	12.7×10^{-3}	38×10^{-3}	76×10^{-3}

รูปที่ 2.14 ผลการเก็บค่า [27]

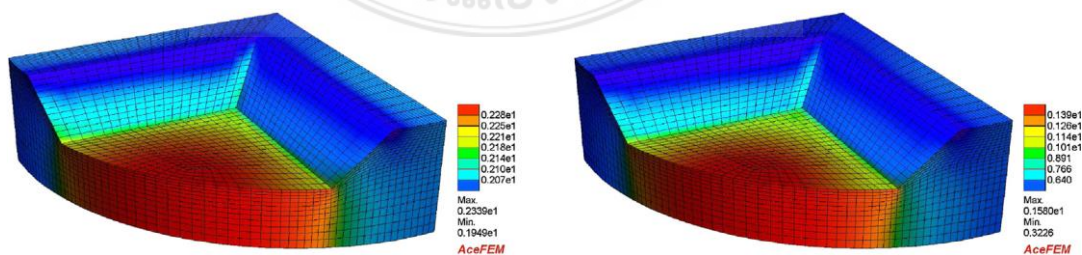
การศึกษาผลกระทบของปริมาณสารหล่อลื่นภายนอกสำหรับผง UO_2 การอัดและคุณสมบัติของ Green compact ที่สอดคล้องกัน (สอดคล้องกับข้อกำหนดก่อนการเผา) ไม่มีสารหล่อลื่นผสมในผง เพื่อประเมินความเป็นไปได้ของแนวทางนี้ ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่ามีปริมาณหรือจำนวนชั้นภายนอกที่ใช้ น้ำมันหล่อลื่นบนผนังแม่พิมพ์จะเป็นผลต่อดัชนีแรงเสียดทานและแรงขับในระหว่างการกดอัด (ข้อบกพร่องของพื้นผิวขึ้นกับความแข็งแรงเชิงกล) ของ Green compact ยังสามารถรับผลกระทบจากปริมาณสารหล่อลื่น ดังนั้นปริมาณและความหนาของสารหล่อลื่นบนผนังแม่พิมพ์จะต้องปรับให้เหมาะสมเพื่อให้มั่นใจว่าโหมดการหล่อลื่นแบบผสมมีประสิทธิภาพสอดคล้องกับโหมดการหล่อลื่นที่ดีขึ้นในกรณีศึกษา



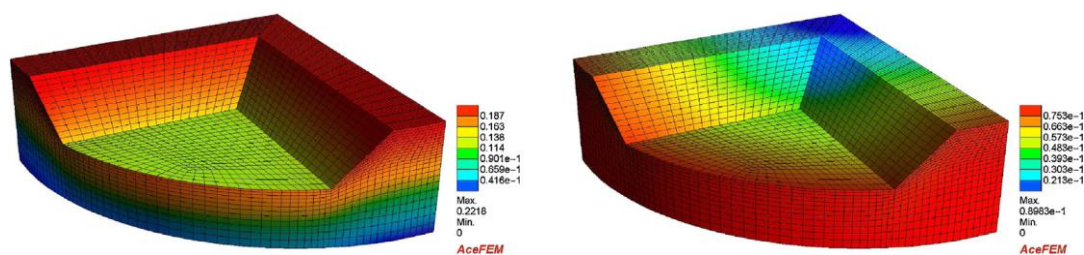
รูปที่ 2.15 ไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการขึ้นรูปอลูมิเนียมแบบอัดแกนเดียวและแบบอัดแกนคู่ที่มีแรงเสียดทานด้วยค่าสัมประสิทธิ์ได้เท่ากับ 0.4 [28]



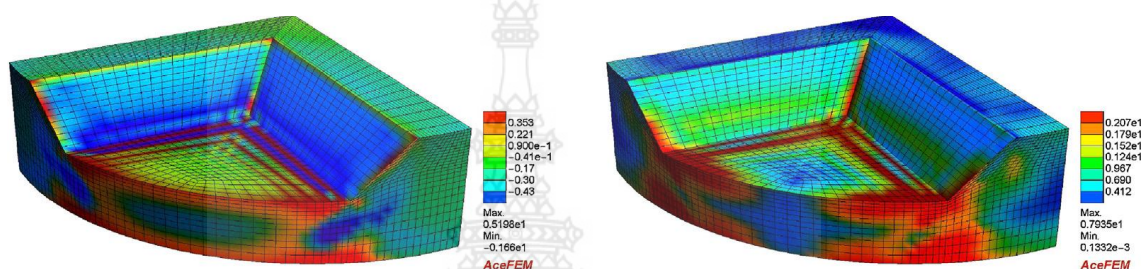
รูปที่ 2.16 การกระจายของความหนาแน่น (กรัม/ลบ.ซม., ซ้ำย), การเชื่อมโยงต่อกัน (MPa, กลาง), โมดูลัสความยืดหยุ่นสัมพันธ์ K_t (MPa, ขวา) สำหรับการบีบอัดแบบแกนเดียว (แถวบน) และการบีบอัดแบบสองแกน (แถวล่าง) ของอลูมินาที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.4 [28]



รูปที่ 2.17 แบบจำลองการกระจายความหนาแน่น (เป็น ก./ลบ.ซม, ซ้ำย) และการเชื่อมโยงต่อกัน (เป็น MPa, ขวา) [28]



รูปที่ 2.18 การจำลองการติดคั่นตัว [28]



รูปที่ 2.19 แบบจำลองการกระจายความเค้นตกค้าง (เป็น MPa), ภาพซ้ายเป็นภาคตัดขวางการติดคั่นตัว และภาพขวาคือส่วนเบี่ยงเบนแปรผัน [28]

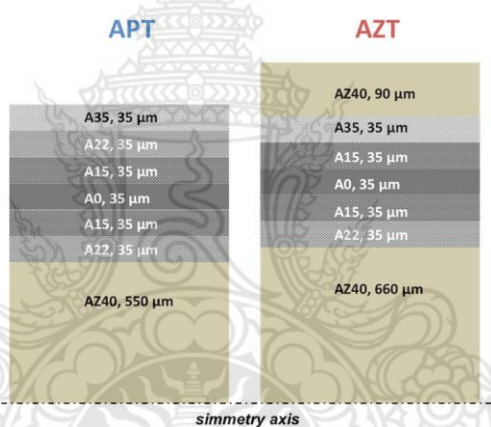
S. Stupkiewicz และคณะ [28] ทำการจำลองกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการอัดแบบเย็นของผงเซรามิกส์เย็น การจำลองดำเนินการด้วยตัวแปลงขนาดเล็กและขนาดใหญ่ของโมเดลอิลาสโตพลาสติกแบบคู่ที่นำเสนอในส่วนที่ผ่านมาการเสียรูปแบบแกนเดียวจากการบดอัดแกนเดี่ยวและสองแกนในแม่พิมพ์ที่มีแรงเสียดทาน ในทุกกรณีการจำลองได้ทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองบางอย่างที่มีอยู่แล้วและอื่นๆ ดำเนินการสำหรับการศึกษาปัจจุบัน

การกระจายความหนาแน่นด้วยจำลองการบีบอัดแบบเย็นด้วยแกนอัดเดี่ยวของผงเซรามิกส์ลงในรูปทรงกระบอกแข็ง (เส้นผ่านศูนย์กลาง 38.2 มม.) ที่มีการเสียดสีระหว่าง Powder และผนังแม่พิมพ์โดยมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.4 ตัวอย่างของอลูมินาและอลูมิเนียมซิลิเกตถูกวิเคราะห์ด้วยความสูงเริ่มต้นที่ 113.9 มม. และ 128.5 มม. การจำลองเชิงตัวเลข (เพื่อจำลองขั้นตอนการทดลอง) ได้ดำเนินการโดยให้แรงเสียดทานแบบไม่เปลี่ยนรูปแบบความเครียดแกนเดียวที่สอดคล้องกับการบีบอัดที่ 3 MPa และจากนั้นให้แรงอัดในการขึ้นรูปสุดท้ายที่ 40 MPa

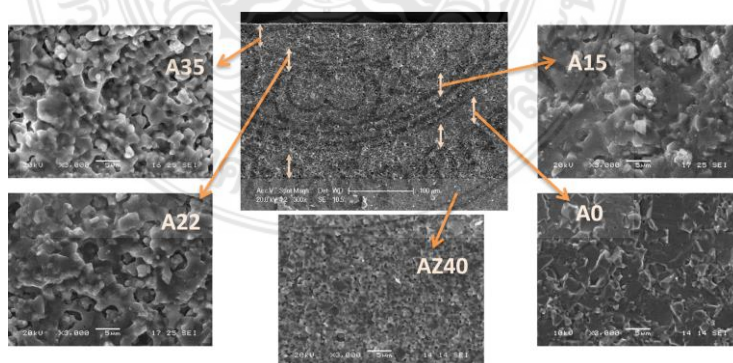
การขึ้นรูปด้วยแกนอัดแบบแกนเดี่ยวและแกนคู่ด้วยแม่พิมพ์ที่มีแรงเสียดทานผนังการกระจายความหนาแน่นได้ดำเนินการโดยให้แรงเสียดทานแบบไม่เปลี่ยนรูปแบบความเครียด การอัดแบบแกนเดี่ยวที่สอดคล้องกับการบีบอัดที่ 3 MPa และหลังจากนั้นให้แรงดันในการขึ้นรูปสุดท้ายที่ 40 MPa ปัญหาได้รับการแก้ไขด้วย axisymmetric นอกจากการกระจายแรงแบบ Nonuniform Mesh ที่เกิดจากการเสียดสีที่ผนังสามารถสังเกตได้จากรูปที่ 2.15 การบดอัดที่เกิดขึ้นเมื่อใช้การอัดแบบสอง

แผนการกระจายตัวของความหนาแน่นความต่อเนื่องการทำงานและโมดูลัสแบบยืดหยุ่นสัมพันธ์แสดงในรูปที่ 2.16 สำหรับการบีบอัดแบบแกนเดี่ยว (ตอนบน) และสองแกน (ล่าง) รูปที่แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าความหนาแน่นการเกาะติดกันและความยืดหยุ่นที่ได้รับในตอนท้ายของกระบวนการขึ้นรูปนั้นมีหลายรูปแบบด้วยอุปกรณ์การอัดแบบสองแกนมากกว่าการอัดแบบแกนเดี่ยว

Vincenzo M. Sglavo และคณะ [29] ได้ทำการศึกษาชั้นลามิเนตเซรามิกส์ที่มีการปรับแต่งความพรุนของชั้นประกอบวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ (CT3000SG, Al matis – D50= 0.5 μm)/(TZ-8YS, Tosoh – D50= 0.6 μm) การเผาผนึกเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ความร้อนที่อัด 80°C เป็นเวลา 15 นาที ภายใต้การอัดแบบแกนเดี่ยว 30 MPa ลามิเนตของ Green compact ถูกเผาผนึกแล้วในขั้นแรกด้วยความร้อนสูงถึง 600°C ในบรรยากาศปกติสารอินทรีย์เกิดการเผาไหม้หมดจากนั้นใช้อัตราความร้อน 4°C ต่อนาที สูงขึ้นที่ 1,550°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนที่จะระบายความร้อนภายในเตาอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 2.20 ผงแต่ละชนิดที่แต่ละชั้นความหนา [29]

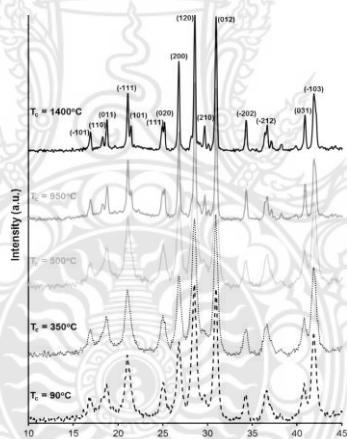


รูปที่ 2.21 รายละเอียดของโครงสร้างจุลภาค APT ลามิเนตโดย SEM Micrographs [29]

รูปที่ 2.21 แสดงภาพตัดขวางของลำแสงที่ได้รับการออกแบบทางวิศวกรรมที่ตรวจพบภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบออปติคัลและแบบสแกนหนึ่งครั้ง สามารถสังเกตเห็นการยึดเกาะที่

สมบรูณ์แบบในแผ่นอลูมิน่าที่แตกต่างกันรูปพรุนที่แตกต่างกันในชั้นอลูมิน่านั้นเห็นได้ชัดว่ามีรายละเอียดชัดเจน อลูมิน่าในชั้นที่สองจะใช้ชั้นอลูมิน่าคอมแพค/เซอร์โคเนียคอมแพค ชั้นที่มีรูปพรุนด้านล่างทั้งสองกรณีโปรไฟล์ Biaxials Tress ที่เหลือมีหน้าที่รับความเหนียวแตกหักที่เห็นได้ชัด ผลลัพธ์ชี้ให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นที่สำคัญของ Weibull modulus ที่เกี่ยวข้องกับความแข็งแรงในการตัด สิ่งที่น่าสนใจที่สุดคือการได้รูปแบบที่ดีที่สุดที่สุดในลามิเนตที่มีรูปพรุน ชี้ให้เห็นว่ามันเป็นไปได้ที่จะปรับสมบัติเชิงกลของลามิเนต Composite

C. Babelot และคณะ [30] ได้ทำการศึกษาการตกผลึกการบีบอัดและการเผาไหม้ของผงแลนทานัมชนิดผง Monazite สังเคราะห์ที่ Hydrothermally โดยใช้วัสดุ LaPO_4 ถูกบดละเอียดและเผาที่ 350, 500 และ 950°C สำหรับ 2 ชั่วโมง จากนั้นกดลงในแม่พิมพ์ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร โดยการกดอัดเย็นแบบแกนเดียว (64–765 MPa) Green compact ถูกเผาที่ 1,400 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศ ในการศึกษาที่พฤติกรรมทางความร้อนของ LaPO_4 Powder ถูกตรวจสอบจาก RT ถึง 1300°C โดย TG ควบคู่กับ DSC รูปที่ 2.22 แสดงการสูญเสียมวลร้อยละ (เส้นประ) และสัญญาณ DSC (เส้นทึบ) เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ



รูปที่ 2.22 รูปแบบ XRD ของผง LaPO_4 หลังจากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างกัน [30]

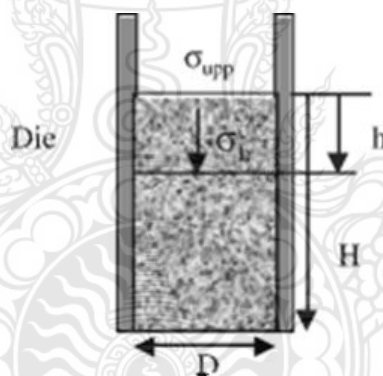
แสดงรูปแบบ XRD ของ LaPO_4 Powder ที่ T_{x1} to T_{x5} ตามลำดับ รูปแบบการเลี้ยวเบนทั้งหมดยืนยันโครงสร้างของโมโนไซต์สำหรับตัวอย่างทั้งหมด แม้สำหรับตัวอย่างหลังจากการสังเคราะห์เฟลิกซ์เฟลิกซ์ของเฟส Rhabdophane ไม่ได้เป็นหลักฐานรูปแบบ XRD ของตัวอย่างถูกเผาที่ T_{x1} , T_{x2} และ T_{x3} ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ปฏิกริยาตอบสนองแบบวงกว้างบ่งบอกถึงความเป็นผลึกต่ำของวัสดุหลังจากเผาที่ T_{x4} (950 °C) จะมีความยืดหยุ่นมากขึ้นเนื่องจากการตกผลึก คุณสมบัติเชิงกลได้รับการวิเคราะห์ใน LaPO_4 Pellets Prepared ที่พารามิเตอร์ที่เหมาะสม ($T_c = 500^\circ\text{C}$, $P_{opt} = 450$ MPa) Interms ของ Vickers Microhardness (HV) และความเหนียวแตกหัก (K1c) โดยใช้สมการ Niihara ขั้นตอนพิเศษถูกนำมาใช้สำหรับการทำ The Determination ของโหลด

ที่ใช้ที่เหมาะสม (150 กรัม) ซึ่งมีค่าเฉลี่ยสำหรับ H และ $K1cof$ 5.7 ± 0.1 GPa และ 1.4 ± 0.1 MPa ตามลำดับ ข้อมูลเหล่านี้เป็นข้อตกลงที่ดีกับข้อมูลวรรณกรรม

A. MICHRAFY และคณะ [31] ได้ศึกษาความหนาแน่นของผงแม่พิมพ์และผลของความหนาแน่นการกระจายในการอัดวัสดุที่ใช้สรุปดังตารางที่ 2.3 ปริมาณของน้ำมันหล่อลื่นคือ ร้อยละ 1 ผงและสารหล่อลื่นถูกผสมในเครื่องปั่น Turbula ความเร็วการบดอัดเฉลี่ย 31.25 มิลลิเมตรต่อวินาที (ค่าเฉลี่ยเวลาในการบดอัดคือ 0.24 วินาที และค่าการเจาะเฉลี่ยการกำจัด 7.5 มิลลิเมตร)

ตารางที่ 2.3 ลักษณะผง (ขนาดอนุภาคและความหนาแน่น) [31]

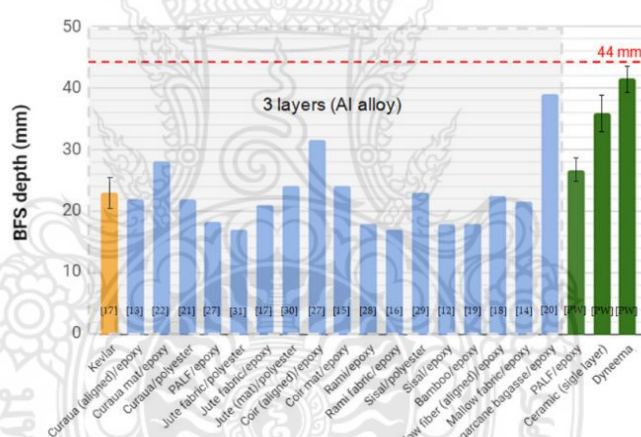
Powder	Mean particle size (μm)	True density ρ_t (g cm^{-3})	Apparent density ρ_a (g cm^{-3})
Avicel PH 105	20	1.514	0.23
Avicel PH 101	50	1.503	0.29
Avicel PH 102	90	1.599	0.31



รูปที่ 2.23 ลักษณะการอัด [31]

ระยะทาง h จากด้านบนของ Green compact ไปยังศูนย์กลางที่ 1–5 คือ 2.31, 6.97, 11.69, 16.46 และ 21.27 มิลลิเมตร คำนวณความหนาแน่นสัมพัทธ์โดยใช้แบบจำลองการทำนายความหนาแน่นสัมพัทธ์ตามในสมการ Heckel ถูกคำนวณแสดงความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่ได้จากการทดสอบความเสียดทานของผงในการกระจายความหนาแน่นตามแนวแกน โดยการสร้างแบบจำลองตัวแบบถูกสร้างขึ้นจากการวิเคราะห์วอลคเกอร์ของ Janssen ควบคู่กับ Heckel สมการสำหรับการเปรียบเทียบมีเพียงการอัดแอกซ์ชันเดียวในแม่พิมพ์ที่ไม่ได้หล่อลื่น การพิจารณาพบว่าความหนาแน่นแกนที่วัดและทำการจำลองได้ลดลงจากบนลงล่าง ด้านล่างของ Green compact นอกจากนี้ความหนาแน่นที่คาดการณ์และวัดมีแนวโน้มเดียวกันแต่ค่าต่างกัน อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ไม่ควรนำไปใช้กับการอัดของผงผสมกับน้ำมันหล่อลื่น

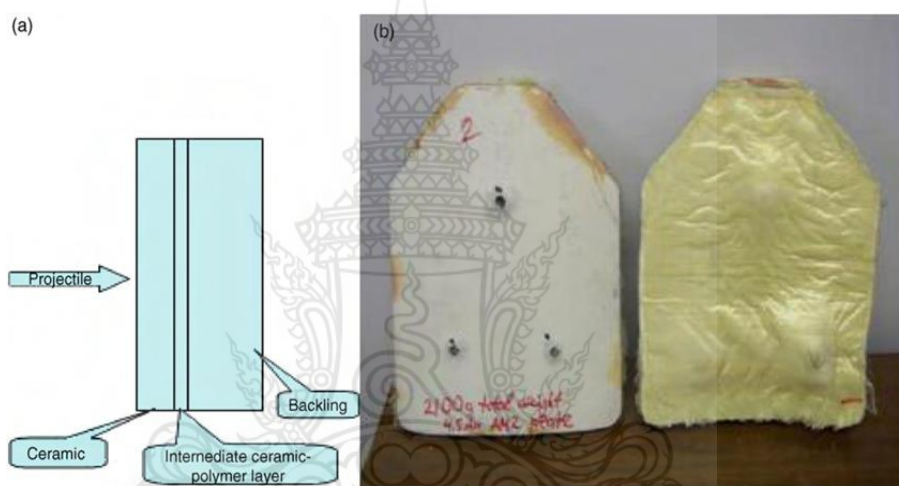
F.S. Luz และคณะ [32] ได้ทำการศึกษาเส้นใยเสริมพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เป็นที่สนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบันเมื่อเทียบกับวัสดุดั้งเดิมที่เป็นแบบคอมโพสิตอย่างเดียวเป็นวัสดุใหม่สำหรับเกราะกันกระสุนเนื่องจากประโยชน์ด้านความยั่งยืนและต้นทุนที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยสังเคราะห์ทั่วไป เช่น อะรามิดและโพลีเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงพิเศษ (UHMWPE) ในงานปัจจุบันการเปรียบเทียบได้ดำเนินการระหว่างประสิทธิภาพเกราะกันกระสุนของคอมโพสิต UHMWPE หรือที่รู้จักในเชิงพาณิชย์ว่า Dyneema (High Modulus Polyethylene) และคอมโพสิตอีพ็อกซีเสริมด้วยเส้นใยธรรมชาติ 30 % ที่สกัดจากใบสับปะรด (PALF) ในระบบเกราะแข็ง ระบบเกราะแข็งนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อให้การป้องกันเพิ่มเติมแก่เสื้อเกราะกันกระสุนระดับ IIIA ทั่วไป ที่ทำด้วยเคพลาร์โดยการแนะนำแผ่นคอมโพสิต PALF ซึ่งจะเปลี่ยนเกราะกันกระสุนเป็นระดับ III ได้อย่างมีประสิทธิภาพการป้องกันระดับนี้ทำให้เกราะกันกระสุนสามารถถูกยิงด้วยกระสุนที่มีแรงกระแทกที่สูงขึ้นได้อย่างปลอดภัยเช่น กระสุนปืนไรเฟิลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7.62 มม. ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเกราะแข็งเซรามิกส์มีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับแผ่น dynaema (High Modulus Polyethylene) ปกติใช้เป็นเสื้อเกราะ



รูปที่ 2.24 กราฟเปรียบเทียบแสดงระบบเกราะหลายชั้น (MASS) [32]

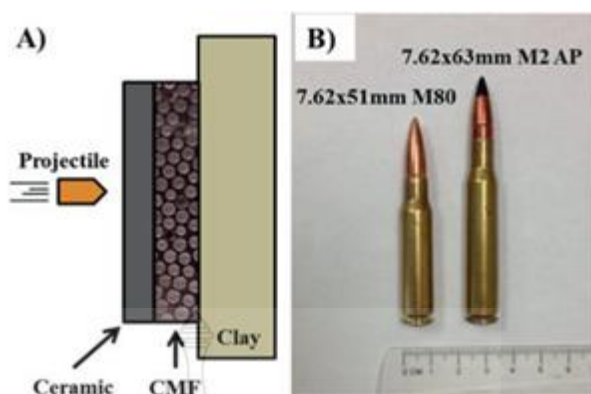
E. Medvedovski [33] ได้ทำการศึกษาการใช้เซรามิกส์ชั้นสูงสำหรับระบบเกราะช่วยให้สามารถเอาชนะการกระจายพลังงานของกระสุนปืนและแรงกระแทกของกระสุนปืนซึ่งให้การป้องกันที่เพียงพอ การพัฒนาการออกแบบเซรามิกส์และชุดเกราะน้ำหนักเบาและราคาไม่แพงนั้นอยู่ภายใต้ความสนใจอย่างต่อเนื่องของทั้งผู้ผลิตชุดเกราะเซรามิกส์และผู้ใช้ชุดเกราะ เอกสารนี้สรุปผลการศึกษาประสิทธิภาพของเกราะเซรามิกส์แบบต่างๆ อย่างละเอียด ซึ่งส่วนใหญ่ได้มาจากการพัฒนาเช่นเดียวกับวัสดุที่ผลิตโดยบริษัทผลิตและออกแบบเกราะเซรามิกส์กันกระสุนที่ได้รับการยอมรับ และเซรามิกส์ที่ศึกษา ได้แก่ เซรามิกส์ออกไซด์และเซรามิกส์คาร์ไบด์ที่มีคุณสมบัติที่เหมือนหรือแตกต่างกัน ได้มีการกล่าวถึง ประสิทธิภาพของเซรามิกส์ที่ทำการศึกษาในฐานะหน้าที่ของโครงสร้างและ

คุณสมบัติ การออกแบบระบบเกราะและประเภทของกระสุนปืนได้ถูกกล่าวถึงแล้วขึ้นอยู่กับข้อกำหนดสำหรับการป้องกันกระสุน เกราะอาจได้รับการออกแบบให้มีการกำหนดค่าและน้ำหนักต่างๆ ตามวัสดุ เซรามิกส์และแผ่นรองที่เหมาะสมที่สุด ตัวอย่างการออกแบบที่ประสบความสำเร็จของระบบเกราะ น้ำหนักเบาพร้อมประสิทธิภาพกันกระสุนที่เพียงพอ รวมถึงประสิทธิภาพการโจมตีหลายจุดที่น่าพอใจ พิจารณาตามโครงสร้างและคุณสมบัติของเซรามิกส์ตลอดจนคุณสมบัติของการออกแบบระบบเกราะ เฉพาะคุณสมบัติทางกายภาพที่เกี่ยวข้องทั้งหมดรวมกันเท่านั้นและโครงสร้างจุลภาครวมถึงความสามารถในการกระจายพลังงานของกระสุน ตลอดจนการปรับกระบวนการผลิตให้เหมาะสมที่สุด ควรพิจารณาเพื่อเลือกและประเมินเกราะเซรามิกส์อย่างเหมาะสม



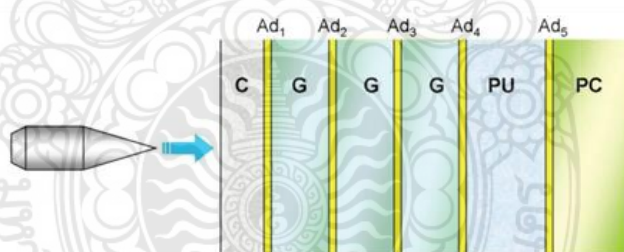
รูปที่ 2.25 รูปแสดงองค์ประกอบแผ่นเกราะ (a) การออกแบบแผ่นผังก่อของเกราะ (b) ผลการทดสอบการยิง [33]

M. Garcia-Avila และ คณะ [34] ได้ทำการศึกษาคอมโพสิตโพลีโพลีเอทิลีนเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบาและความแข็งแรงสูงซึ่งสามารถดูดซับพลังงานมากที่อุณหภูมิสูง ในนี้แผ่นโพลีโพลีเอทิลีนที่ผลิตโดยใช้เทคโนโลยีโพลีเอทิลีนและเหล็กกล้า 2 mm วางบนเหล็กทรงกลมกลวงในและใช้ร่วมกับแผ่นเซรามิกส์เพื่อสร้างเกราะคอมโพสิตใหม่ที่มีน้ำหนักเบา ได้รับการทดสอบด้วยกระสุนปืนขนาด 7.62x51 มม. M80 7.62x63 มม. M2 AP ความเร็วการกระแทกที่แตกต่างกันสำหรับสถานการณ์แบบเดี่ยวและแบบหลายแรงกระแทก ศึกษาพฤติกรรมวัสดุ, กลไกความล้มเหลวและประสิทธิภาพของเกราะเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพที่เหมาะสมที่สุด ในการศึกษาโพลีโพลีเอทิลีนผสมเหล็กกล้าโดยเหล็กกล้ามีประสิทธิภาพการทำงานสูงสำหรับการใช้ความเร็วสูงการดูดซับพลังงานสูงโดยมีการดูดซับพลังงานของวัสดุเพิ่มขึ้นมากกว่า 3 เท่าที่ความเร็วกระแทกสูงถึง 870 ม./วินาที

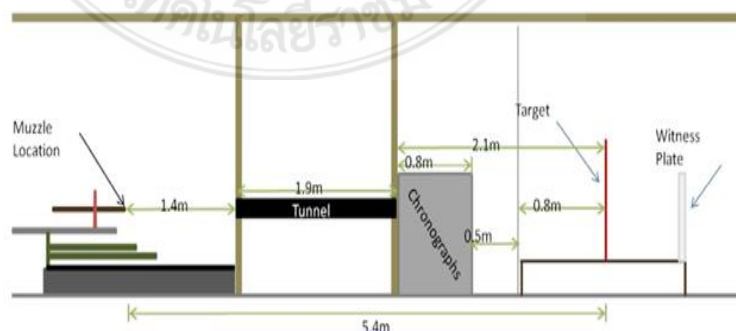


รูปที่ 2.26 (A) เกราะคอมโพสิตแสดงเซรามิกส์แต่ละชั้น (B) ขนาดกระสุนที่ใช้ทดสอบ [34]

LC Alil [35] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับกาวที่ใช้ในปัจจุบันสำหรับโครงสร้างการป้องกันกระสุน เพื่อประสิทธิภาพการผลิตการศึกษาได้ชี้ให้เห็นถึงแง่มุมต่างๆ เช่น ประเภทของการเชื่อมต่อที่พร้อมใช้งานเพื่อให้ได้โครงสร้างแบบหลายชั้นตามเซรามิกส์ โลหะ และพอลิเมอร์ วิธีการที่กาวมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการทำงานของกระสุนของโครงสร้างป้องกัน การวิเคราะห์กาวชนิดต่างๆ ที่ใช้ในอุตสาหกรรมป้องกันกระสุนข้อควรพิจารณาทั่วไปในการเลือกกาวสำหรับเกราะและโครงสร้างป้องกัน บางประเภทข้อควรพิจารณาสำหรับการกำหนดคุณลักษณะ การทดสอบ และการสร้างแบบจำลองของกาว



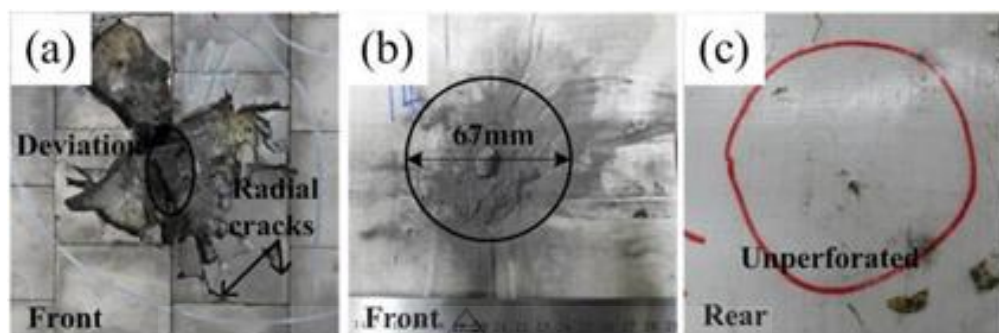
รูปที่ 2.27 โครงสร้างคอมโพสิตประกอบด้วยชั้นเซรามิกส์โปร่งใส (C) สารยึดเกาะ(Ad) แก้ว (G) โพลียูรีเทน (PU) และโพลีคาร์บอนเนต (PC) [35]



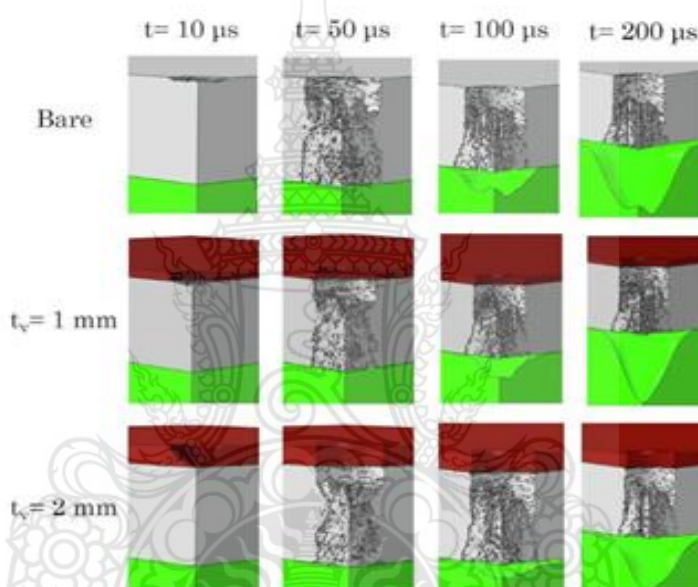
รูปที่ 2.28 การตั้งค่าขอบเขตการทดสอบ [36]

S. D. Bartus และ คณะ [36] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของรูปร่างของหน้าตัดและตำแหน่งที่กระทบต่อการแตกตัวของแผ่นหลังแบบคอมโพสิต ในบางกรณีพบว่ารูปร่างของหน้าตัดกระทบต่อการหลุดลอกมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างพื้นที่การแยกตัวและเส้นผ่านศูนย์กลางกระจกสำหรับกระจกหนา 6 มม. แต่ไม่ใช่กระจกหนา 12.7 มม. สำหรับความหนาทั้งสองความเร็วการขยายตัวของ การแยกตัวจะเพิ่มขึ้นเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของแก้วเพิ่มขึ้น สำหรับกระจกหนา 6 มม. การเปลี่ยนแปลงความเร็วของการขยายตัวของ การแตกตัวเป็นแผ่นจะกลายเป็นเส้นตรงมากขึ้นเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นในการพิจารณาว่าความหนา มีผลกระทบต่อพื้นที่ของการแตกตัวเป็นชั้นพบว่า ความเร็วที่ 500 m/s เหมาะสมที่จะทำให้เกิดการเจาะบางส่วนและยังคงเริ่มต้นการแยกชั้นในกระจกที่มีความหนาหลายตำแหน่งการชนยังส่งผลต่อการหลุดลอกของแผ่นหลังแบบคอมโพสิต การจัดเรียง กระเบื้อง 2 แผ่น มีความเร็วในการแตกตัวของกระจกช้ากว่าในขณะที่การจัดเรียงกระเบื้องเดี่ยวมีความเร็วที่สุดเป้าหมายสามจุดมีพื้นที่แตกตัวเฉลี่ยที่ใหญ่ที่สุดในขณะที่การจัดเรียงกระเบื้องเดี่ยวมีพื้นที่แตกตัวเฉลี่ยที่เล็กที่สุดการวิจัยและพัฒนาในอนาคตควรเน้นที่ตะเข็บ (การจัดเรียง 2 แผ่น) และ จุดสามจุดเพื่อลดความเร็วการแตกตัวของชั้นและพื้นที่การแยกตัวออกจากกันตามลำดับ ควรทำการวิจัยเพื่อหารูปร่างกระเบื้องเซรามิกส์ที่เหมาะสมที่สุดซึ่งให้การปกป้องสูงสุดและลดน้ำหนัก วัสดุ และ ต้นทุนการผลิตที่เกี่ยวข้องให้เหลือน้อยที่สุด งานนี้อาจเป็นวิธีที่รวดเร็วในการประเมินการออกแบบแผ่นหลังแบบคอมโพสิตนอกเหนือจากการทำความเข้าใจพารามิเตอร์การออกแบบหน้าตัด

Y. Gao และ คณะ [37] ได้ศึกษาทดลองเกี่ยวกับความต้านทานการเจาะเกราะของเกราะคอมโพสิต ZSIC/TI6AL4V/UHMWPE” ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างสี่แบบที่แตกต่างกันดำเนินการภายใต้ โพรเจกไทล์ AP ขนาด 12.7 มม. วัสดุหุ้มเกราะสามชนิด (คอมโพสิตไฟเบอร์ SIC, TI6AL4V และ UHMWPE) ถูกจัดเตรียมพร้อมกับการตรวจสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุดังกล่าว เกราะคอมโพสิต ถูกประดิษฐ์ขึ้นด้วยเทคโนโลยีกาวนอกจากรูปแบบการป้องกันของชุดเกราะคอมโพสิตกับกระสุนปืนยัง ได้รับการตรวจสอบอย่างเป็นระบบ ข้อสรุปหลักต่อไปนี้เป็นไปได้ คือ ซิลิคอน UHMWPE TI6AL4V และมีความสามารถในการป้องกันที่ความเร็วเริ่มต้นเป็น 450 M S และ 424 m ตามลำดับ เมื่อเทียบกับตัวอย่าง TIB6AL4v ตัวอย่างมีความต้านทานที่ดีขึ้นสำหรับการเจาะเกราะสำหรับ SIC/TI6AL4V/UHMWPE อินเตอร์เลเยอร์ TI6AL4V สามารถหาฟังก์ชันการสนับสนุนที่มี ประสิทธิภาพให้กับชั้นเซรามิกส์และขยายพื้นที่บังคับของแผ่นรอง UHMWPE ซึ่งเป็นประโยชน์ สำหรับการเพิ่มความต้านทานการเจาะเกราะของชุดเกราะคอมโพสิต ข้อบกพร่องเพียงอย่างเดียวของ TI6AL4V interlayer ก็คือการใส่ TI6AL4V เข้าไปช่วยลดความหนาของชั้น SIC และชั้นคอมโพสิต UHMWPE บางส่วนเมื่อน้ำหนักของชุดเกราะคอมโพสิตคงที่ส่งผลให้ความต้านทานการเจาะลดลงถึง 12.7 มม. AP ของเป้าหมายของSIC/TI6AL4V/ UHMWPE มากกว่าเป้าหมายของ SIC/UHMWPE TI6AL4V ที่มีความแข็งแรงและความเหนียวสูงผสมผสานกันได้ดี เหมาะสมสำหรับใช้เป็นชั้นด้านหน้า แสดงความสามารถในการตีหลายจุดที่ยอดเยี่ยม และต้านทานการเจาะทะลุของเกราะได้ดีเยี่ยม



รูปที่ 2.29 ภาพถ่ายความเสียหายของ SIC/UHMWPE หลังจากการทดสอบการยิง [37]



รูปที่ 2.30 แสดงผลการทดสอบภายใต้ความหนาของพื้นผิวที่แตกต่างกัน [38]

R.C. Batra และ คณะ [38] ได้ทำการศึกษาาระบบเกราะเซรามิกส์ต้องหยุดการเจาะกระสุนมีพลังงานกระแทกจำนวนมากที่ถ่ายทอดไปยังผู้สวมเกราะเซรามิกส์เป็นมาตรฐานของด้านหลัง-การบาดเจ็บจากเกราะ/ระเบิด (BABT) ศึกษาผลกระทบต่อบาBT ของการเพิ่มโพลีเอเธอร์-เอเธอร์-เคโตนบางๆ (PEEK) ชั้นบนด้านหน้าเกราะเซรามิกส์ซิลิโคนคาร์ไบด์ (SIC) ที่กระทบต่อการเกิดปกติโดยโลหะเต็มรูปแบบกระสุนแฉีกเกิดเดินทางด้วยความเร็วต่ำ ร่างกายของมนุษย์ถูกจำลองโดยบล็อกเจลาตินบอลิสติกการบิดเบือนขนาดใหญ่แบบระบบ 3 มิติ ได้รับการวิเคราะห์แบบ numerically โดยใช้ commercial finite ซอฟต์แวร์ BAQUS/Explicit การทดสอบความไวแสงดำเนินการด้วยตัวอย่างสุ่มที่สร้างขึ้นโดยเทคนิคการเก็บตัวอย่าง Hypercube เพื่อกำหนดลักษณะของอิทธิพลของความเครียดในการผลิตสถิติ, การแข็งตัวของวัสดุ, โมดูลัสของยังและความหนาแน่นมวลของชั้น PEEK ในฐานะเช่นเดียวกับโมดูลัสความยืดหยุ่น ความหนาแน่นของมวลและแรงดึงสูงสุดของเซรามิกส์บน BABT.

พบว่าลดความแตกต่างระหว่าง PEEK กับเซรามิกส์ทำให้พลาสติกได้รับแรงกระแทกน้อยลงเนื่องด้วยเซรามิกส์ได้รับแรงส่วนใหญ่ สำหรับแรงกระแทกปกติที่ 180 m/s ของกระสุนที่มีพลังงานจลน์ 130 J, ชั้นผิวหนา 2 มม. ลดแรงปกติจุดสูงสุดทั้งหมด แรงกระตุ้นปกติที่ถ่ายทอดและความดันสูงสุดที่ถ่ายโอนจากเป้าหมาย SIC ไปยังชั้นเจลาคติน 19%, 18% และ 32% ตามลำดับการจำลองโดยใช้กฎการบูรณาการที่ลดลง ทำนายพลังงานจลน์สุดท้ายและหลังน้อยลงอย่างมีนัยสำคัญการเคลื่อนย้ายกระสุนเมื่อเทียบกับที่ใช้กฎการบูรณาการเต็มรูปแบบ สำหรับ PEEK หนา 2 มม.ชั้นที่ตั้งอยู่ด้านบน กลาง และด้านล่างของแผ่น SIC การเคลื่อนย้ายใบหน้าด้านหลังน้อยที่สุดสำหรับชั้นที่ตั้งอยู่ตรงกลางแต่ BABT เพิ่มขึ้น



บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยในบทนี้เป็น การอธิบายระเบียบวิธีวิจัยที่ประกอบด้วยขั้นตอนการวิจัย เครื่องมือ วิธีการวิเคราะห์ การเตรียมข้อมูล การเตรียมการทดสอบ การเตรียมงานก่อนการวิเคราะห์ สำหรับการวิเคราะห์ผลด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ การเปรียบเทียบผลการทดลองและไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมีรายละเอียดในแต่ละส่วนดังต่อไปนี้

3.1 ระเบียบวิธีวิจัย

3.1.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1.1.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเกราะเซรามิกส์กันกระสุน ชนิดของวัสดุ วิธีการทดสอบ การออกแบบเกราะกันกระสุน การอัดขึ้นรูปแผ่นเกราะ การศึกษาความหนาแน่นของกรีนคอมแพค ผ่านการทบทวนวรรณกรรมจากวารสารวิชาการและวิจัย หนังสือ และอินเทอร์เน็ต

3.1.1.2 ศึกษาข้อมูลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Ansys/Explicit Dynamics กระบวนการทำการเตรียมก่อนการวิเคราะห์ ที่ต้องให้ความสำคัญ เช่น การกำหนดสมบัติวัสดุ (Materials Properties) การทำการควบคุมเอลิเมนต์ (Element Mesh control)

3.1.1.3 การกำหนดตัวแปรในการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งจะเป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการต่อยอดต่อไปในกระบวนการอัดขึ้นรูปแผ่นเกราะเซรามิกส์ กำหนดระเบียบวิธีวิจัย แนวทางวิจัย กรอบการวิจัย และการวางแผน การเตรียมการดำเนินงานทดสอบและวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

3.1.1.4 ออกแบบและสร้างแบบจำลองเกราะกันกระสุนแบบ 3 มิติ ด้วยโปรแกรม SolidWorks ในรูปแบบของพาราโซลิด ที่เป็นหลายชิ้นส่วน (Multibody) โดยกระสุนจะต้องแบ่งออกเป็น 8 ชิ้นส่วน เพื่อให้เกิดการแบ่งเอลิเมนต์ที่เหมาะสมและสามารถกำหนดชนิดของเอลิเมนต์ให้แตกต่างกัน

3.1.1.5 กำหนดค่าสมบัติของวัสดุตามรูปแบบความเสียหายของวัสดุในโปรแกรม Ansys / Engineering Data โดยอลูมิเนียม 7075-T6 มีรูปแบบความเสียหายตามทฤษฎีของ Steinberg Guinan Strength, สำหรับ Alumina 95% มีรูปแบบความเสียหายตามทฤษฎี Johnson-Holmquist Strength Continuous และกระสุนที่ทำจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ มีรูปแบบความเสียหายตามทฤษฎี Johnson-Holmquist Strength Continuous และ Johnson Cook Failure

3.1.1.6 วิเคราะห์แผ่นเกราะกันกระสุนด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ Ansys/Explicit Dynamic และเก็บผลของความเค้นวอนมิสเชสและการเสียรูป

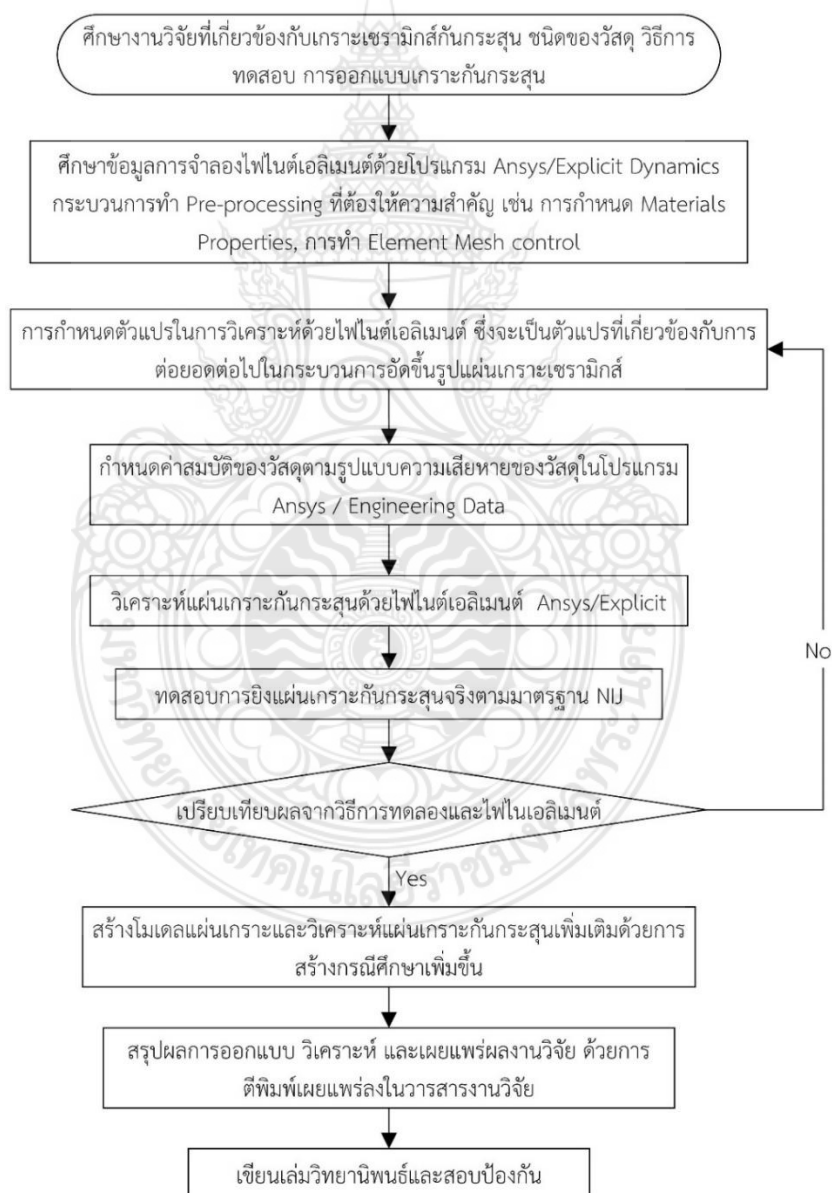
3.1.1.7 อัศจรรย์รูปแผ่นเกราะเซรามิกส์หกเหลี่ยมและศึกษาการกระจายความหนาแน่นและพิจารณาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการขึ้นรูปโดยพิจารณาจากการกระจายความหนาแน่นและการเจาะทะลุด้วยกระสุนซึ่งวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

3.1.1.8 สร้างโมเดลแผ่นเกราะและวิเคราะห์แผ่นเกราะกันกระสุนเพิ่มเติมด้วยการสร้างกรณีศึกษาเพิ่มขึ้น

3.1.1.9 นำผลที่ได้มาวิเคราะห์ สรุปผลการทดสอบ และเขียนเล่มวิทยานิพนธ์

3.1.1.10 เผยแพร่ผลงานวิจัยด้วยการตีพิมพ์เผยแพร่ลงในงานสัมมนาทางวิชาการ

3.1.1.11 สอบป้องกันวิทยานิพนธ์



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

3.1.2 เครื่องมือ วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองศึกษาวิจัย

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองวิจัยมีดังนี้

3.1.2.1 แผ่นเกราะมีขนาดความกว้างxความยาวเท่ากับ 300x300 mm ในกรณีที่เป็นแผ่นเกราะแบบหน้ายุบหรือเป็นหลุมจะมีขนาด 30x30 mm

3.1.2.2 โปรแกรม Ansys/Explicit Dynamics และโปรแกรม SolidWorks

3.1.2.3 เครื่องอัดไฮดรอลิก 2,000 กิโลนิวตัน และเครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 4 ตำแหน่ง

3.1.2.4 เครื่องคอมพิวเตอร์ ในการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม Ansys/Explicit Dynamic มีปัจจัยในการคำนวณที่สำคัญเนื่องจากการคำนวณของโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ จำเป็นจะต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะสูงเนื่องจากการในสร้างขนาดของเมช (Mesh) ที่แบบจำลองมีขนาดเล็กซึ่งเป็นปัจจัยหลักและการคำนวณที่มีเวลาเป็นตัวแปรมาเกี่ยวข้องนั้นซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ของวัตถุ (Dynamics) การเลือกใช้คอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะสูงเพื่อให้ได้ผลการคำนวณที่รวดเร็ว การคาดเคลื่อนที่น้อยและผลการจากการคำนวณที่เที่ยงตรงเพื่อให้ได้มาซึ่งผลการวิเคราะห์ที่สามารถใช้ในการคาดการณ์หรือเปรียบเทียบกับผลการจำลองซึ่งจะต้องมีความใกล้เคียงจากความเป็นจริงเพื่อเป็นการยืนยันผลจากการคำนวณ มีสเปคดังนี้

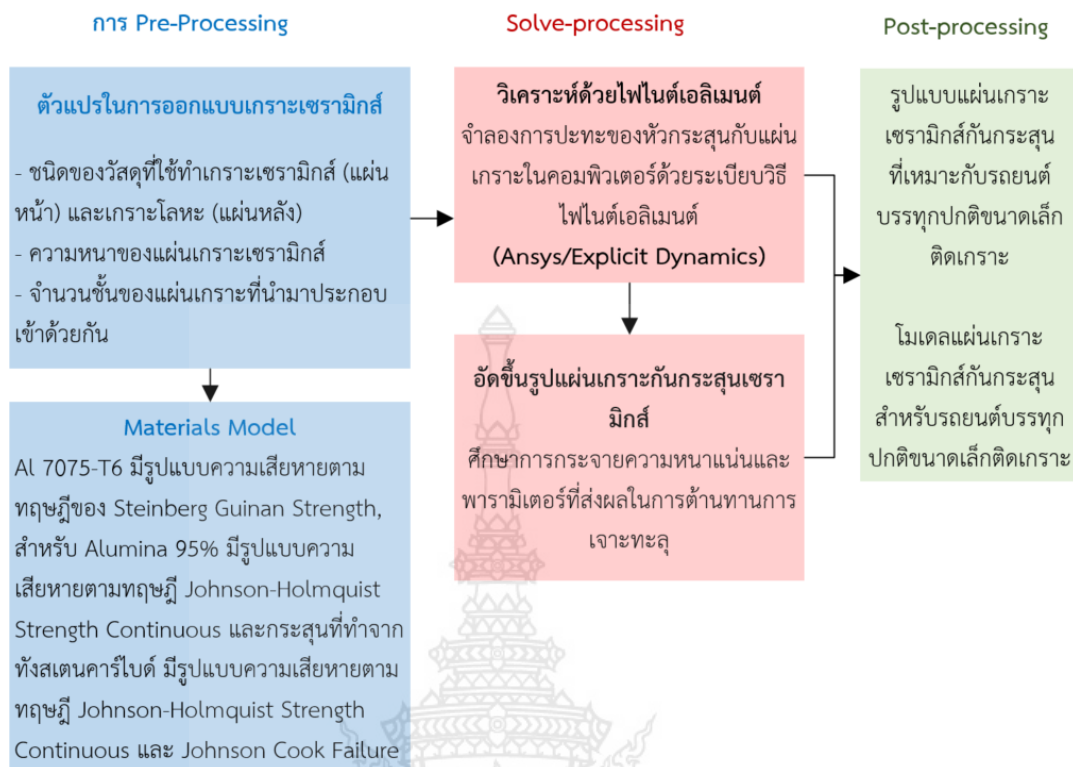
- CPU: AMD Ryzen Threadripper 2990WX 32 Core Processor
- Mainboard: MSI MEG X399 CREATION (MS-7B92)
- RAM Corsair 128 GB DDR4/3200 MHz
- VGA: NVIDIA Quadro RTX 4000
- Power supply: Thermaltake 850W 80 Plus Gold

3.1.2.5 เครื่องเชื่อมอาร์กอน

3.1.2.6 เครื่องตัดแผ่นโลหะ

3.1.3 กรอบการวิจัย

งานวิจัยนี้เลือกใช้เครื่องมือในการทำวิจัย ประกอบด้วย การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม Ansys/Explicit Dynamic ร่วมกับการทดลอง โดยการเปรียบเทียบลักษณะความเสียหายระหว่างสองวิธี ซึ่งเลือกใช้แผ่นเกราะโลหะในการพิสูจน์เพื่อยืนยันขีดความสามารถในการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์และจะได้รูปแบบการดำเนินการในส่วนของการเตรียมการก่อนการวิเคราะห์ (Pre-processing) ที่ถูกต้อง จึงสร้างโมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เป็นแผ่นเกราะเซรามิกส์ โดยอาจประกอบเข้ากับแผ่นเกราะอลูมิเนียม ซึ่งแผ่นเกราะทั้งสองแบบจะทำหน้าที่ในการป้องกันกระสุนที่แตกต่างกัน และวิเคราะห์กรณีศึกษาที่เป็นแผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนร่วมกับแผ่นเกราะอลูมิเนียมด้วยการปรับเปลี่ยนตัวแปรอื่นๆ เช่น ความหนาแผ่นเกราะ จำนวนชั้นแผ่นเกราะ ซึ่งจะได้ในกรณีศึกษาความเสียหายที่หลากหลาย ทั้งนี้อาจจะใช้มาตรฐาน NIJ เป็นตัวแปรในการวิเคราะห์ได้ด้วย โดยกำหนดค่าความเร็วของกระสุนให้ต่างกัน กรอบการวิจัยมีรายละเอียดดังรูปที่ 3.2



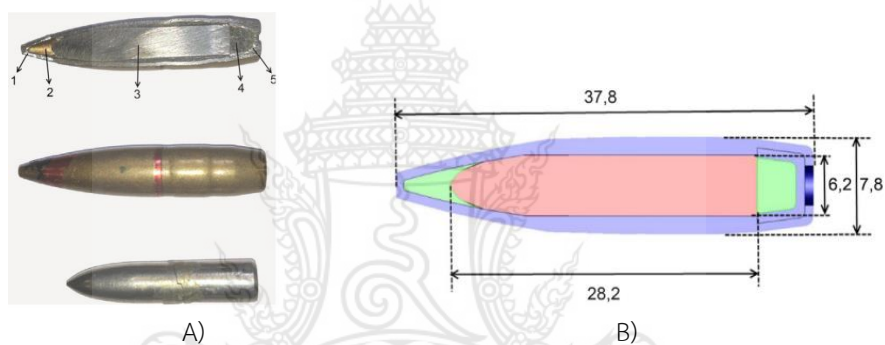
รูปที่ 3.2 กรอบการวิจัย

3.2 การสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

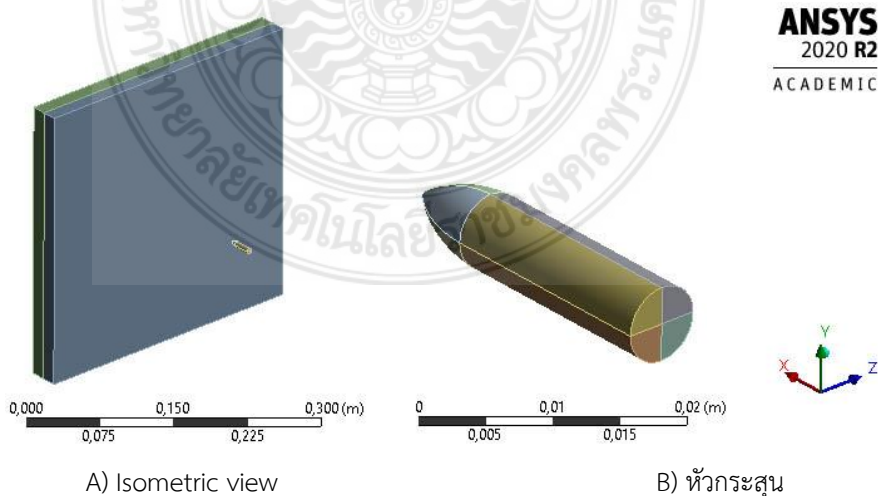
3.2.1 การขึ้นรูปแผ่นเกราะกันกระสุนและหัวกระสุน

การขึ้นรูปแผ่นเกราะกันกระสุนเซรามิกส์ให้มีขีดความสามารถในการต้านทานกระสุนได้นั้น มีพารามิเตอร์ที่สำคัญหลายพารามิเตอร์ หนึ่งในหลายพารามิเตอร์นั้นคือ ความหนา โดยมีคำถามไว้ว่า “ความหนาที่เหมาะสมและสามารถใช้ในการต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนได้นั้นควรมีค่าเท่าไร” อีกทั้งยังต้องแสดงรูปแบบความเสียหายจากการเจาะทะลุที่แต่ละความหนาของแผ่นเกราะเซรามิกส์ด้วยโปรแกรม SolidWorks ถูกนำมาใช้ในการขึ้นรูปแผ่นเกราะรวมทั้งหัวกระสุนให้มีรูปแบบเป็นวัตถุหลายชิ้น (Multibody) และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นเครื่องมือสำคัญในการวิเคราะห์การเสียหายของแผ่นเกราะและวิเคราะห์พารามิเตอร์ความหนาที่จะนำไปใช้ในการขึ้นรูปแผ่นเกราะ การเลือกใช้วัสดุมาเป็นแผ่นเกราะมีความสำคัญอย่างมีนัยยะสำคัญ ในที่นี้เลือกใช้เซรามิกที่เป็นอลูมิเนียมออกไซด์ หรืออลูมินาที่มีความบริสุทธิ์ 95% (Alumina 95%) เป็นแผ่นเกราะด้านหน้า รับการปะทะโดยตรงจากกระสุนและทำลายหัวกระสุนก่อนที่เศษซากจะเข้าไปปะทะกับแผ่นเกราะชั้นที่สองซึ่งในที่นี้เลือกเป็นอลูมิเนียม 7075 T6 ซึ่งทั้งแผ่นเซรามิกส์และแผ่นอลูมิเนียมต่างก็มีน้ำหนักน้อยกว่าโลหะชนิดอื่น แต่สามารถเอามาประกอบเข้าด้วยกันด้วยวิธีการซ้อนทับจะส่งผลให้มีขีดความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุด้วย ดังนั้นการขึ้นรูปแผ่นเกราะในกรณีที่เป็นแผ่นซ้อน

จะต้องให้แต่ละแผ่นแยกเป็นอิสระต่อกันแต่มีพื้นผิวติดชนกันเพื่อให้สามารถจัดการในเรื่องการกำหนดชนิดของวัสดุสำหรับแผ่นเกราะนั้นๆ จากการทบทวนวรรณกรรม K. Namik et al (2014) [39] ได้นำเสนอหัวกระสุนและโครงสร้างภายใน ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งในการจำลองนี้จะสร้างโมเดลหัวกระสุนในส่วนของแกนกลาง (Core) ด้วยวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) จากรูปที่ 3.4 เป็นแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแผ่นเกราะและกระสุน โดยกระสุนถูกขึ้นรูปด้วยการออกแบบเป็นหลายชิ้นส่วน รวมจำนวน 8 ชิ้นส่วน เพื่อให้สามารถกำหนดชนิดของเอลิเมนต์ได้มากกว่า 1 ชนิด ซึ่งหัวกระสุนจะมีเอลิเมนต์ 2 ชนิดที่แตกต่างกัน การขึ้นรูปแบบนี้จะส่งผลให้เกิดความแม่นยำของการวิเคราะห์ที่สูงขึ้น ขนาดของแผ่นเกราะกันกระสุนได้รับการออกแบบให้มีขนาดตามมาตรฐาน NIJ ด้วยขนาดความกว้างxความยาวเท่ากับ 300x300 mm และหากนำแผ่นเกราะจริงไปทดสอบการยิงจะมีขนาด 300x300 mm ด้วยเช่นกัน



รูปที่ 3.3 โครงสร้างกระสุน A) มิติของกระสุน AP 7.62 mm และชิ้นส่วน: 1. Brass Jacket 2. Point filter 3. Hardened steel core 4. Lead base filler 5. sabot และ B) ขนาดกระสุน มีหน่วยเป็น มม. [39]

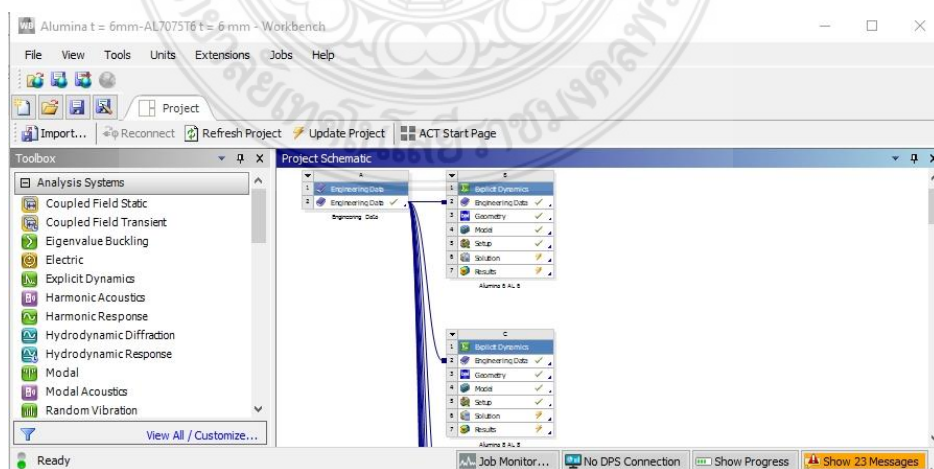


รูปที่ 3.4 ตัวอย่างโมเดลแบบจำลอง 3 มิติ A) แผ่นเกราะกันกระสุนในมุมมองไอโซเมตริก และ B) แบบจำลองหัวกระสุน

จากรูปที่ 3.4 กำหนดให้แผ่นเกราะแผ่นแรกหรือเรียกว่าแผ่นเกราะด้านหน้า หมายถึงแผ่นเกราะที่กระสุนวิ่งเข้ามาปะทะเป็นแผ่นแรก รูปแบบของแผ่นเกราะโลหะกันกระสุนจะได้รับการออกแบบให้เป็นแผ่นซ้อนจำนวน 2 แผ่น โดยแผ่นเกราะแผ่นแรกที่กระสุนจะพุ่งเข้าเจาะนั้นจะต้องเป็นแผ่นเซรามิกส์ (แผ่นอลูมิน่า 95%) ที่มีค่าความแข็งสูง เพื่อทำหน้าที่ในการทำลายหัวกระสุนให้แตกออกจากกัน วัสดุที่นำมาใช้เป็นแผ่นด้านหลังหรือแผ่นที่สองคืออลูมิเนียม 7075 T6 ทำหน้าที่ยับยั้งการเคลื่อนที่ของเศษกระสุน โดยทั้งแผ่นเซรามิกส์และอลูมิเนียม 7075 T6 ต่างก็มีความหนาของแผ่นเดี่ยวตั้งแต่ 6, 8, 10, 12, 14, และ 18 mm และในกรณีที่เป็นแผ่นซ้อนจะทำให้แผ่นเกราะชั้นที่หนึ่งและชั้นที่สองมีความหนารวมกันเท่ากับ 12, 16, 20, 24, 28 และ 32 mm สำหรับกระสุนที่ได้รับการออกแบบเพื่อใช้ในการจำลองและวิเคราะห์ตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 หรือ 4 มีขนาดดังรูปที่ 3.4 ด้วยกระสุน AP 7.62 mm ซึ่งอ้างอิงขนาดจาก Namik Kilic et al. [39] และทำจากวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์

3.2.2 กระบวนการเตรียมและตั้งค่าการจำลอง (Pre-processing)

ANSYS 2020R2 Academic ได้ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือสำคัญในการวิเคราะห์และแสดงผลการจำลองร่วมกับการทดสอบการยิงกระสุนจริง โดยในส่วนของโมดูลที่ใช้วิเคราะห์จะเป็น Explicit/Dynamics ที่อยู่ในหน้าต่าง Workbench ดังรูปที่ 3.5 เริ่มต้นด้วยการนำโมดูล Explicit/Dynamics เข้าสู่พื้นที่ Project schematic และทำการกำหนดสมบัติของวัสดุ 3 ชนิด ประกอบด้วย ทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) สำหรับกระสุน, Alumina 95% สำหรับแผ่นเกราะเซรามิกส์ และอลูมิเนียม 7075 T6 สำหรับแผ่นเกราะชั้นที่สอง โดยวัสดุแต่ละชนิดจะต้องกำหนดค่าเข้าไปในโปรแกรมด้วยตนเองโดยใช้สมบัติของวัสดุที่มาจากการอ้างอิงในบทความต่างๆ ที่ได้มีการนำเสนอไว้มากมายและมีการอ้างอิงต่อกันมา สำหรับวัสดุ Alumina 95%, อลูมิเนียม 7075 T6 และ Tungsten carbide (WC) จะต้องกำหนดค่าทั้งในส่วนความหนาแน่น สมบัติทางกล สมบัติด้านการแตกหัก และอื่นๆ ดังตารางที่ 3.1, 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ



รูปที่ 3.5 หน้าต่าง User interface ของ ANSYS 2020R2

ตารางที่ 3.1 สมบัติของวัสดุแผ่นเกราะเซรามิกส์

Alumina 95%	
Density	3741,0 kg/m ³
Other	
▼ Johnson-Holmquist Strength Continuous	
Failure Type	Gradual
Hugoniot Elastic Limit HEL	6e+09 Pa
Intact Strength Constant A	0,88900
Intact Strength Exponent N	0,76400
Strain Rate Constant C	0,0045000
Fracture Strength Constant B	0,29000
Fracture Strength Exponent m	0,53000
Maximum Fracture Strength Ratio SFMAX	1,0000
Damage Constant D1	0,0050000
Damage Constant D2	1,0000
Bulking Constant B	1,0000
Hydrodynamic Tensile Limit T	-3e+08 Pa
Shear Modulus	1,2034e+11 Pa
Bulk Modulus	1,8456e+11 Pa

ตารางที่ 3.2 สมบัติของวัสดุลูมิเนียม 7075 T6

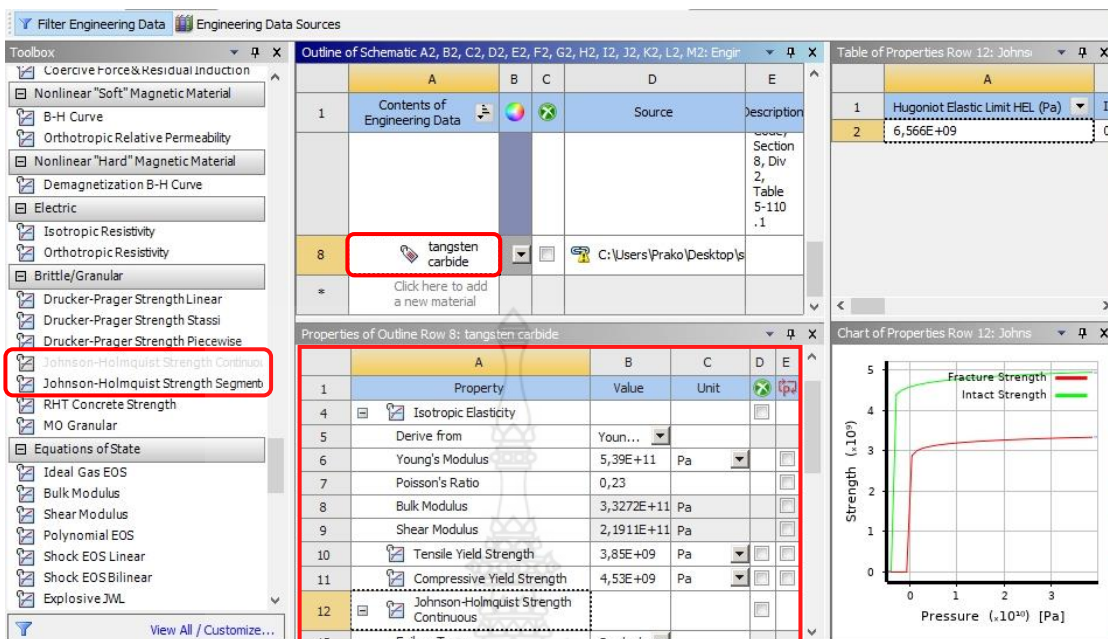
AL 7075-T6	
"Equation of State and Strength Properties of Selected Materials". Steinberg D.J. LLNL. Feb 1991	
Density	2804,0 kg/m ³
Thermal	
Specific Heat Constant Pressure	848,00 J/kg·°C
Other	
▼ Shock EOS Linear	
Gruneisen Coefficient	2,2000
Parameter C1	5200,0 m/s
Parameter S1	1,3600
Parameter Quadratic S2	0 s/m
▼ Steinberg Guinan Strength	
Initial Yield Stress Y	4,2e+08 Pa
Maximum Yield Stress Ymax	8,1e+08 Pa
Hardening Constant B	965,00
Hardening Exponent n	0,100000
Derivative dG/dP G'P	1,7410
Derivative dG/dT G'T	-1,645e+07 Pa/°C
Derivative dY/dP Y'P	0,027380
Melting Temperature Tmelt	946,85 °C
Shear Modulus	2,67e+10 Pa

ตารางที่ 3.3 สมบัติของวัสดุ Tungsten carbide (WC)

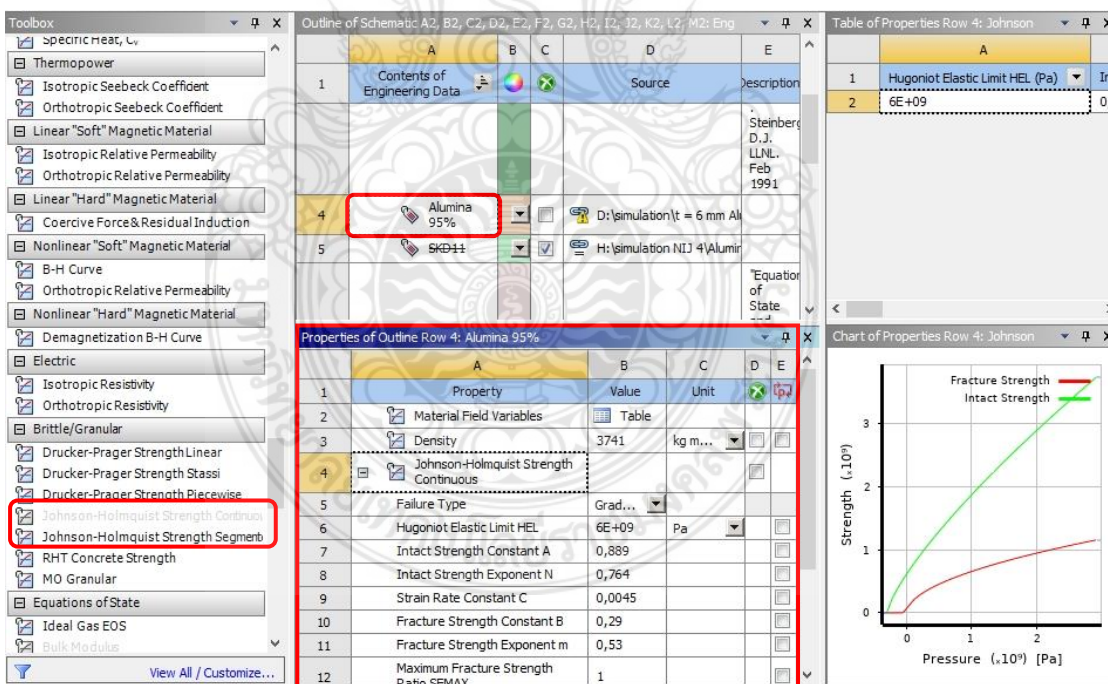
tangsten carbide

Density	14560 kg/m ³
Structural	
▼ Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	5,39e+11 Pa
Poisson's Ratio	0,23000
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
▼ Johnson-Holmquist Strength Continuous	
Failure Type	Gradual
Hugoniot Elastic Limit HEL	6,566e+09 Pa
Intact Strength Constant A	0,98990
Intact Strength Exponent N	0,032200
Strain Rate Constant C	0
Fracture Strength Constant B	0,67000
Fracture Strength Exponent m	0,032200
Maximum Fracture Strength Ratio SFMAX	1000,0
Damage Constant D1	0,0050000
Damage Constant D2	1,0000
Bulking Constant B	0
Hydrodynamic Tensile Limit T	-4e+09 Pa
▼ Johnson Cook Failure	
Damage Constant D1	0
Damage Constant D2	0,010720
Damage Constant D3	-1,6690
Damage Constant D4	0
Damage Constant D5	0
Melting Temperature	1494,9 °C
Reference Strain Rate (/sec)	1,0000

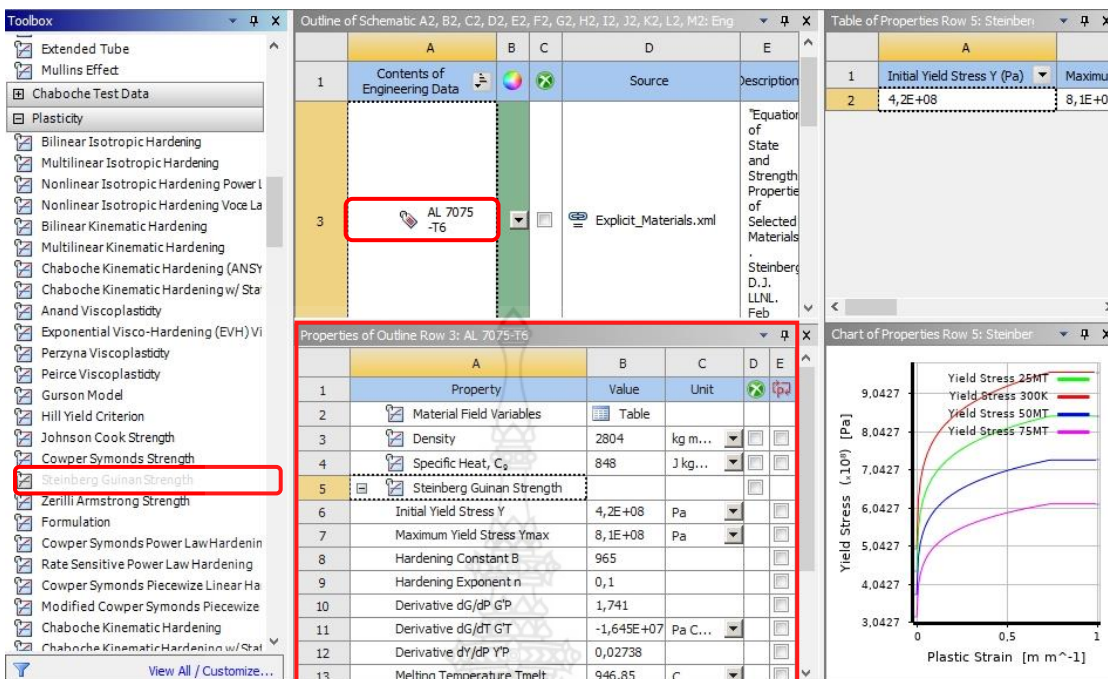
จากข้อมูลดังตารางที่ 3.1-3.3 เป็นข้อมูลที่น่าเข้าไปโดยผู้ใช้โปรแกรม ซึ่งสามารถดำเนินการใส่ข้อมูล โดยเข้าไปที่ Engineering Data ดำเนินการตามรูปที่ 3.6 ให้เพิ่มวัสดุใหม่โดยตั้งชื่อวัสดุตามที่ต้องการจากนั้นจะได้รายการในช่องวัสดุใหม่ให้ทำการเพิ่มรายการสมบัติของวัสดุโดยคลิกสมบัติของวัสดุที่อยู่ทางด้านซ้ายมือและจะมาปรากฏทางด้านล่างตามรูป จากนั้นให้กำหนดค่าวัสดุต่างๆ ลงไป รูปที่ 3.6 กำหนดสมบัติวัสดุ Tangsten carbide รูปที่ 3.7 กำหนดสมบัติวัสดุ Alumina 95% และรูปที่ 3.8 กำหนดสมบัติวัสดุของ AL 7075 T6



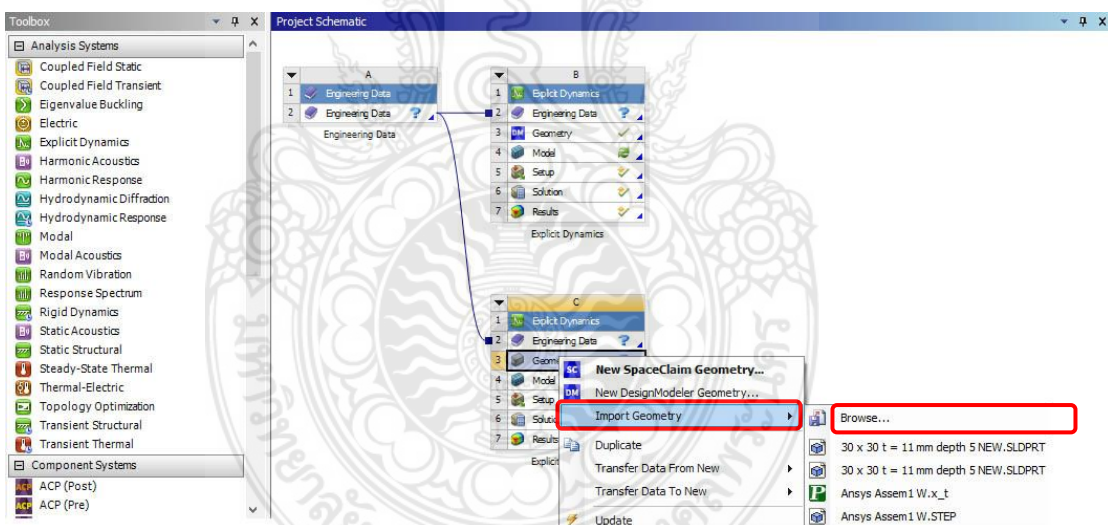
รูปที่ 3.6 ตัวอย่างหน้าต่างกำหนดวัสดุ Tungsten carbide



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างหน้าต่างกำหนดวัสดุ Alumina 95%



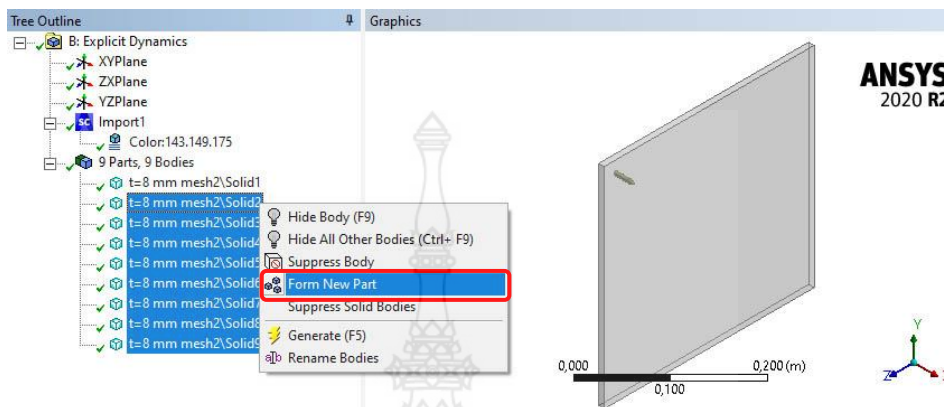
รูปที่ 3.8 การกำหนดสมบัติวัสดุของ AL 7075 T6



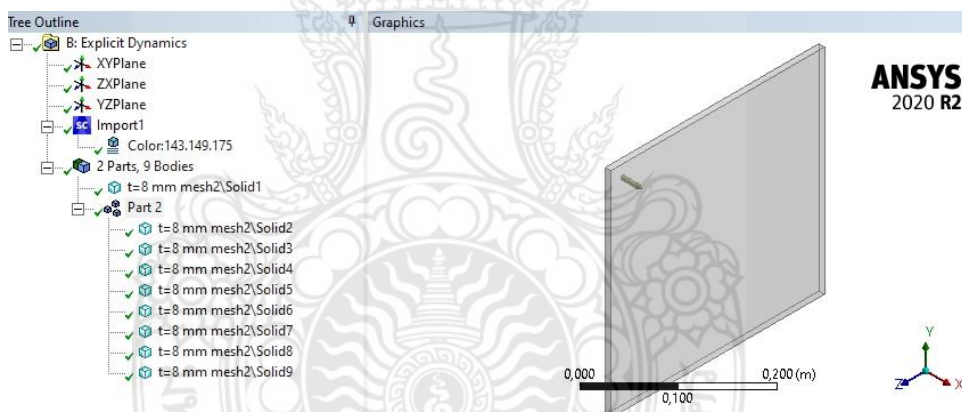
รูปที่ 3.9 นำเข้าโมเดลกระแทกกันกระสุนและลูกกระสุนสู่ ANSYS

นำเข้าโมเดลกระแทกกันกระสุนและลูกกระสุนที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรม SolidWorks ดังรูปที่ 3.9 เพื่อจำลองการยิงในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยคลิกขวาที่ Geometry เลือก Import Geometry และคลิก Browse และเลือกโมเดลที่ต้องการวิเคราะห์ แล้วจึงขึ้นหน้าต่างใหม่เป็น Explicit Dynamics-Design Modeler ทำการคลิก Generate เพื่อเปิดโมเดลได้ผลดังรูปที่ 3.10 จะได้ทั้งหมดจำนวน 10 ชิ้นส่วนประกอบด้วยชิ้นส่วนของกระสุน 8 ชิ้นส่วน และแผ่นเกราะซ้อนจำนวน 2 ชิ้น รวมเป็น 10 ชิ้นส่วน แต่เมื่อเข้าสู่กระบวนการกำหนดหน้าสัมผัส จะต้องกำหนดให้กระสุนทั้ง 8

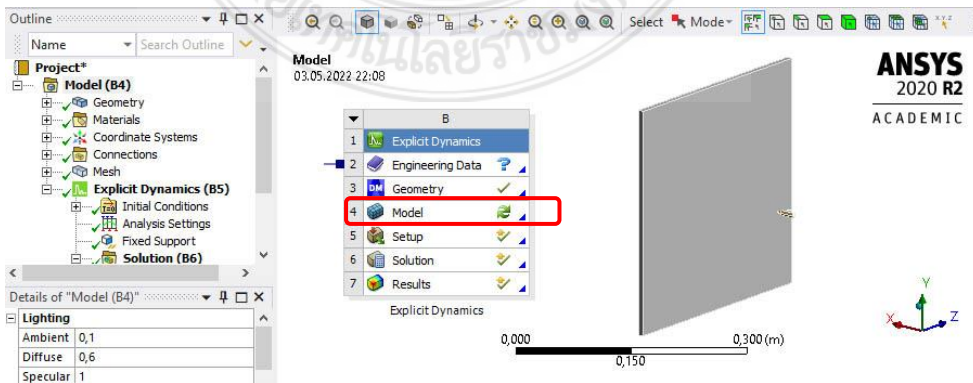
ขึ้นมีหน้าสัมผัสแบบ Bonded เพื่อให้การแบ่งเอลิเมนต์ได้ง่ายและจัดเรียงเอลิเมนต์ จึงต้องทำให้ชิ้นงานของหัวกระสุนเป็นชิ้นส่วนเดียวกันก่อน ด้วยการใช้คำสั่ง “Form New Part” รวมชิ้นส่วนทั้ง 8 เป็นเนื้อเดียวกัน ชิ้นงานของกระสุนก็จะกลายเป็นเนื้อเดียวกันตามรูปที่ 3.10-3.11



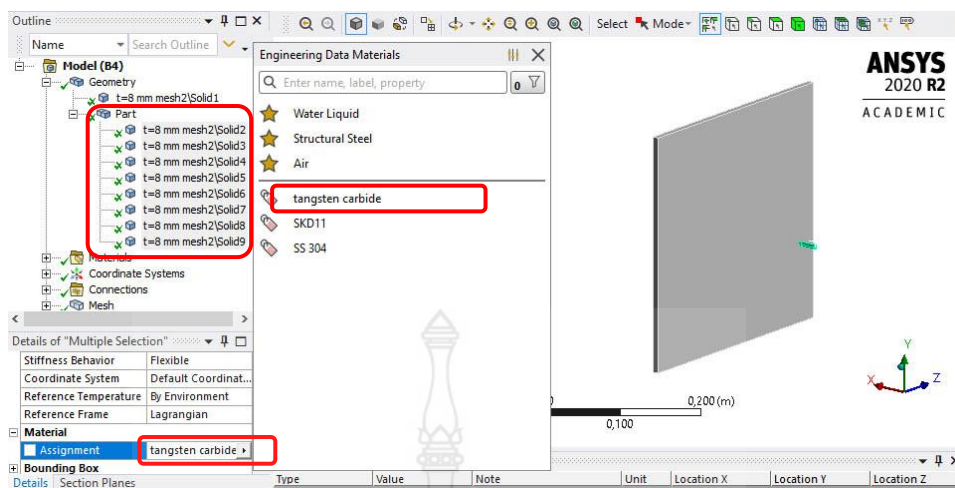
รูปที่ 3.10 นำเข้าโมเดล 10 Parts 10 Bodies สู่อะนาลิซิส Design Modeler และใช้คำสั่ง Form New Part



รูปที่ 3.11 โมเดลเกาะกันกระสุนและลูกกระสุนที่นำเข้าสู่อะนาลิซิส ANSYS จำนวน 3 Parts 10 Bodies

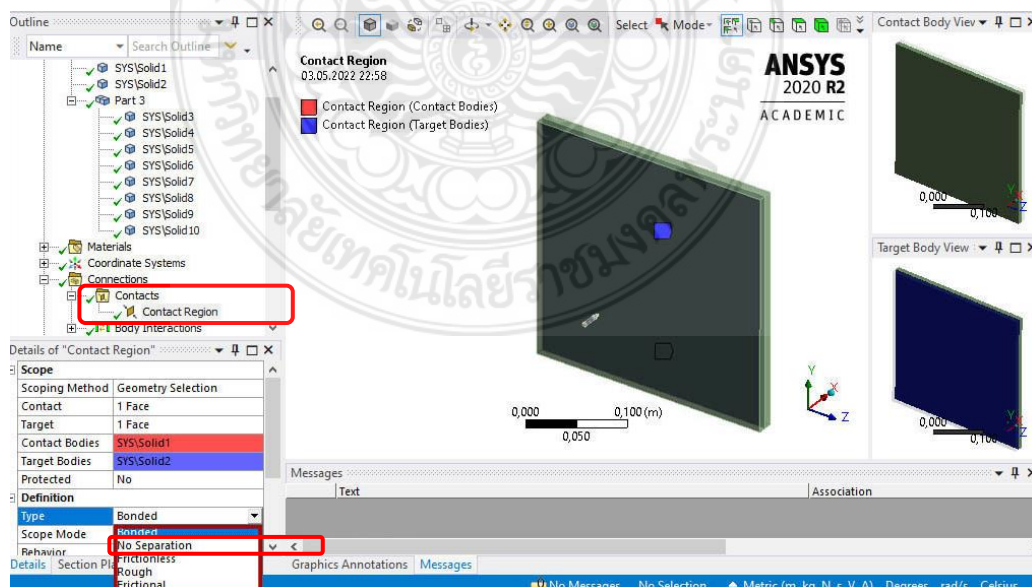


รูปที่ 3.12 เข้าสู่นำหน้าต่าง Mechanical ด้วยคำสั่ง Model



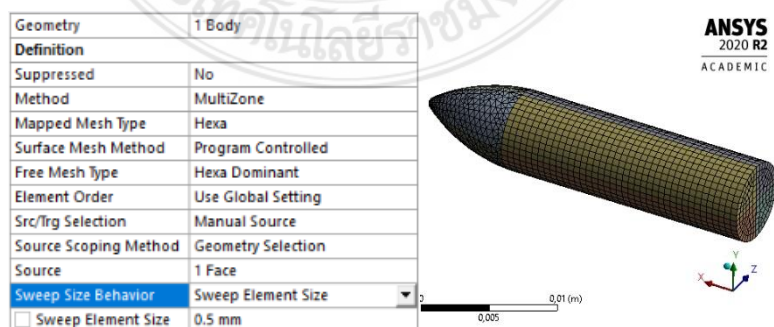
รูปที่ 3.13 การกำหนดชนิดวัสดุ และกำหนดค่า Stiffness Behavior เป็น Flexible

กำหนดหน้าสัมผัสและชนิดของวัสดุนั้นมีวิธีการกำหนดดังรูปที่ 3.11 โดยให้เข้าสู่หน้าต่างของ Mechanical ด้วยการคลิกเลือกที่ Model ดังรูปที่ 3.12 เพื่อเข้าไปกำหนดชนิดของวัสดุ เลือกชิ้นส่วนทั้งหมด ดังรูปที่ 3.13 กำหนดชนิดวัสดุเป็น AL 7075 T6, Alumina 95% หรือ Tungsten carbide และกำหนดค่า Stiffness Behavior เป็น Flexible สำหรับกรณีแผ่นเกราะมีมากกว่า 1 ชิ้น และเกิดการวางทับกันหรือซ้อนกัน จะต้องกำหนดหน้าสัมผัส (Contact) เป็นแบบไม่คิดค่าแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสที่แถบเครื่องมือ “Connections” ให้กำหนดที่ “Body Interaction” เป็นแบบ “Frictionless” หมายความว่ากำหนดให้ชิ้นงานติดกันแต่ไม่คิดค่าความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของแผ่นเกราะทั้ง 2 แผ่น รูปที่ 3.14

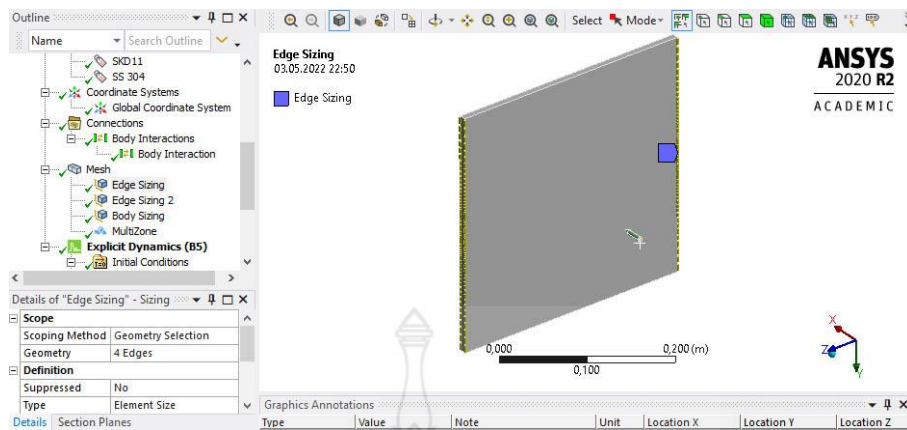


รูปที่ 3.14 การกำหนด Body Interaction ของแผ่นเกราะทั้งสองที่ปะกบกันเป็นแบบ Frictionless

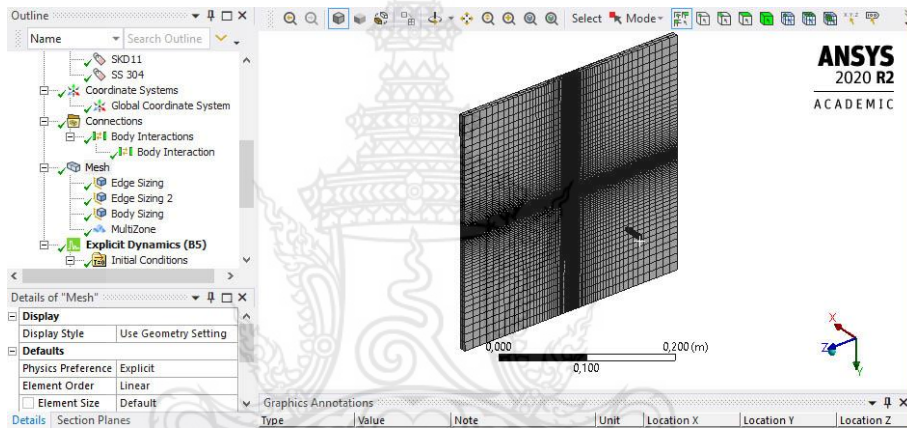
กำหนดชนิดของเอลิเมนต์ที่เลือกใช้ในการวิเคราะห์มี 2 ชนิด คือ Hexahedral และ Tetrahedral โดย Hexahedral คือ รูปทรงหกเหลี่ยมซึ่งเป็นลูกบาศก์มี 8 จุดยอด 12 ขอบล้อมรอบด้วย 6 รูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน มี 20 โหนด เรียกอีกอย่างว่า hex หรือ brick ความแม่นยำของการแก้ปัญหาโดยใช้เอลิเมนต์ชนิดนี้จะสูงที่สุด ดังนั้นเพื่อให้เหมาะสมกับโจทย์ปัญหานี้จึงต้องเลือกใช้เอลิเมนต์ชนิดนี้กับแผ่นเกราะกันกระสุน และส่วนหนึ่งของลำตัวลูกกระสุน และสามารถลดจำนวนเซลล์ลดความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์และลดระยะเวลาในการคำนวณ สำหรับเอลิเมนต์ชนิด Tetrahedral คือ รูปทรงสี่หน้า มี 4 จุดยอด 6 ขอบ และมี 10 โหนด ซึ่งจะถูกนำมาใช้กับส่วนหัวของกระสุนเท่านั้น เนื่องจากเอลิเมนต์ชนิดนี้มีความเหมาะสมกับหัวกระสุนที่มีความเรียว แหลม และเล็ก (ไม่รวมส่วนลำตัวกระสุน) ดำเนินการสร้างเมชที่ขึ้นงานให้เป็นแบบ Hexahedral ที่บริเวณหัวกระสุนเลือกแถบเครื่องมือ Mesh Method แล้วเลือกเป็นแบบ Multizone โดยเลือกเป็น Manual Source และกำหนดให้ Element Size ที่หัวกระสุนมีขนาดเท่ากับ 0.5 mm ตามรูปที่ 3.15 และที่บริเวณลำตัวใช้แถบเครื่องมือ Sizing กำหนดให้ Element Size เท่ากับ 0.5 mm กำหนดรูปแบบ Mesh Method ในแต่ละส่วนของชิ้นงานจำลองและการตั้งค่าขนาดของ Element Size ในแต่ละส่วนเพื่อความเหมาะสมของชิ้นงานจำลองและกำหนดการคำนวณของโปรแกรมให้ได้ผลการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีประสิทธิภาพและถูกต้อง ซึ่งทำให้หัวกระสุนมีจำนวนโหนดรวม 8,229 และเอลิเมนต์รวมเท่ากับ 14,926 ในกรณีแผ่นเกราะ 1 ชั้นไม่มีการซ้อนที่แถบเครื่องมือ Sizing ให้เลือกตัว Cursor เป็นแบบ Edge เลือกที่บริเวณขอบของชิ้นงานตามรูปที่ 3.16 กำหนดให้ Element Size เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และเลือก Bias Type ให้มีความละเอียดตรงกลาง กำหนดอัตราความละเอียดด้วยคำสั่ง Bias Factor เป็น 15 เท่า ของขนาด Element Size และรูปที่ 3.17 ลักษณะรูปแบบที่สร้างขึ้นที่แผ่นเกราะ ซึ่งจำนวนของโหนดและเอลิเมนต์ของแบบจำลองจะมีทั้งในส่วนของแผ่นเกราะและกระสุน ซึ่งจำนวนโหนดและเอลิเมนต์ของกระสุนจะคงที่ ด้วยเพราะว่าในทุกการวิเคราะห์จะใช้ขนาด Element size ที่คงที่สำหรับกระสุน แต่สำหรับแผ่นเกราะจะมีการปรับเปลี่ยนขนาดความหนา ส่งผลให้จำนวนโหนดและจำนวนเอลิเมนต์มีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 3.15 การกำหนด Element Size

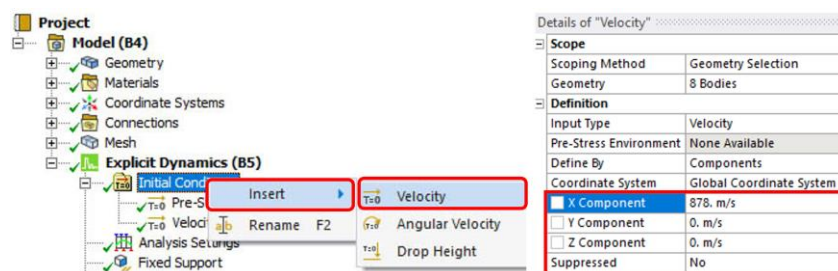


รูปที่ 3.16 การตั้งค่าขนาดของ Element Size ที่แผ่นเกราะ

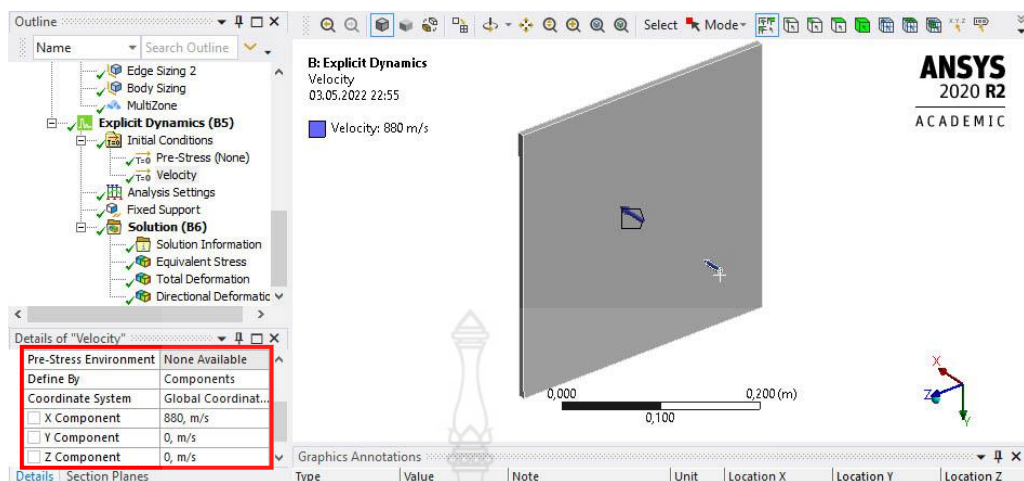


รูปที่ 3.17 ลักษณะของรูปแบบเมชที่แผ่นเกราะ

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

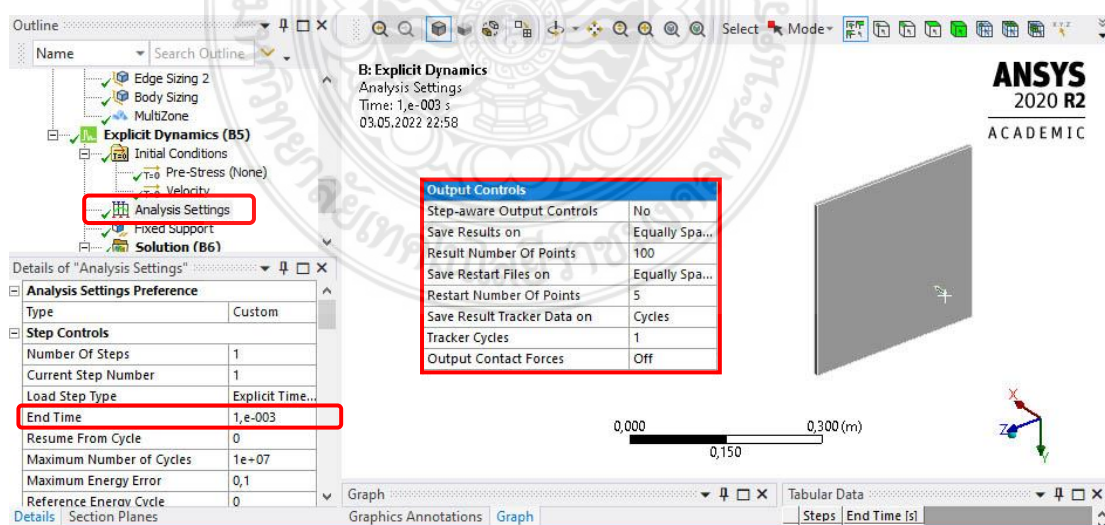


รูปที่ 3.18 การกำหนดค่าความเร็วเริ่มต้น (Initial velocity)

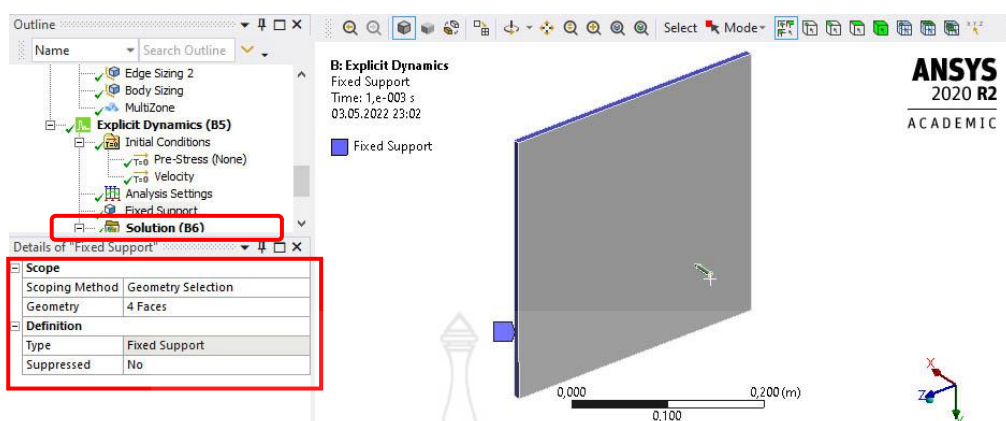


รูปที่ 3.19 การใส่ค่าความเร็วและทิศทางการเคลื่อนที่

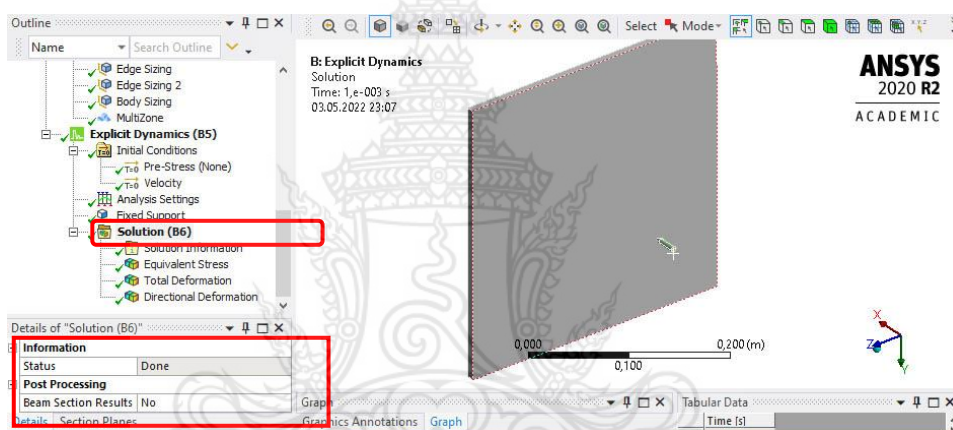
จากชุดคำสั่ง Explicit Dynamics ให้มองแถบเครื่องมือของ Analysis Settings เป็นการตั้งค่าการทำงานของโปรแกรมสำหรับประมวลผลการวิเคราะห์ ให้เลือกที่คำสั่ง End Time เป็นชุดคำสั่งที่จะกำหนดให้ชิ้นงานเคลื่อนที่ไปในระยะเวลาที่ 0.001 วินาที ตามรูปที่ 3.19 เนื่องจากกระสุนปืนมีความเร็วที่ 878 ± 9.1 เมตรต่อวินาที [4] ซึ่งมีความเร็วสูงมาก จึงต้องกำหนดเวลาของ End Time ที่น้อย เพื่อให้สามารถวิเคราะห์การชนของกระสุนปืนที่กระทบแผ่นเกราะ และที่แถบเครื่องมือ Output Controls ที่ชุดคำสั่ง Result Number of Points เป็นคำสั่งในการบันทึกข้อมูลการวิเคราะห์เมื่อจำนวนค่าที่ใส่เข้าไปเพิ่มขึ้นความเสถียรของผลการวิเคราะห์จะเกิดการคลาดเคลื่อน (Error) ที่ลดลงค่าที่เหมาะสมควรใส่ที่ 50-100 จุด ขึ้นไป



รูปที่ 3.20 ค่าของ End Time และ Result Number of Points



รูปที่ 3.21 การกำหนด Fixed Support



รูปที่ 3.22 การกำหนด Solution

รูปที่ 3.21 การกำหนดในชุดคำสั่ง Analysis Settings จะใช้แถบเครื่องมือ “Fixed Support” เพื่อเป็นการจับยึดงานที่บริเวณผิวด้านข้างของแผ่นเกราะทั้ง 4 หน้า หากเป็นแผ่นซ้อน 2 แผ่น จะต้องทำการกำหนดทั้ง 8 หน้า ตามรูปที่ 3.21 สังเกตว่าจะมีสัญลักษณ์ลูกศรชี้ที่ผิวขอบเพื่อแสดงว่าเป็นพื้นที่ที่ถูกจับยึดแล้ว ตามรูปที่ 3.22 ที่แถบชุดคำสั่ง Solution สามารถเลือกผลการวิเคราะห์ได้ เช่น ความเค้น ความเครียด ความเร็ว การเสียรูป เป็นต้น ดังนั้นได้เลือกแถบเครื่องมือ Equivalent Stress, Total Velocity และ Total Deformation เพื่อให้แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความเค้น ความเร็วที่เกิดขึ้นและการเสียรูปของแบบจำลองที่ได้จากการคำนวณและเลือกแถบเครื่องมือแสดงผลวิเคราะห์จากนั้นเลือกคำสั่ง Solve เพื่อให้โปรแกรมได้เริ่มการคำนวณ

3.2.3 กระบวนการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Solve-processing)

ขั้นตอนการคำนวณหรือ “Solve-processing” จะเป็นการวิเคราะห์ค่าต่าง ๆ ในขั้นตอนการเตรียมซึ่งจะมีส่วนประกอบหลักในการคำนวณอยู่ 2 อย่างคือ 1. ผลการคลาดเคลื่อน (Error) 2.

สมรรถนะของคอมพิวเตอร์ในการคำนวณ ซึ่งส่วนประกอบหลักทั้ง 2 อย่างนี้จะเป็นตัวช่วยในการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการคลาดเคลื่อน (Error) ค่าที่ยอมรับได้จากโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าไม่เกินร้อยละ 5-10 สามารถสังเกตได้จากกราฟในโปรแกรม การตรวจสอบผลการคลาดเคลื่อนจะต้องใช้ชุดคำสั่ง Solution Information ในส่วนของ solution Output มีตัวเลือกของแถบเครื่องมืออยู่ 5 แบบด้วยกันดังรูปที่ 3.23 ประกอบด้วย 1. Solver Output ที่จะบ่งบอกเป็นจำนวนรอบวิเคราะห์ 2. Time Increment เป็นเวลาการวิเคราะห์ที่เพิ่มขึ้น 3. Energy Conservation 4. Momentum Summary 5. Energy Summary ซึ่งสามารถใช้ในการตรวจสอบการคลาดเคลื่อนในระหว่างการคำนวณของโปรแกรมได้

The screenshot shows the ANSYS Workbench interface. On the left is the Outline tree with 'Solution (B6)' selected. The main window displays the 'Solver Output' window, which is divided into several columns. The first column shows the cycle number (e.g., 256611 to 256625). The second column shows the time (e.g., 9.997E-04s to 1.000E-03s). The third column shows the time increment (Time Inc.: 2.012E-08s). The fourth column shows the progress percentage (e.g., 99.97% to 100.00%). The fifth column shows the estimated clock time remaining (e.g., 3s to 0s). Below the Solver Output window, there is a 'SIMULATION ELAPSED TIME SUMMARY' section with the following text:

```

EXECUTION FROM CYCLE 1 TO 256625
ELAPSED RUN TIME IN SOLVER = 1.99091E+02 Minutes
TOTAL ELAPSED RUN TIME = 1.99586E+02 Minutes
JOB RAN OVER 2 SLAVES
JOB RAN USING IBM MPI
JOB RAN USING DECOMPOSITION AUTO
Problem terminated .... wrapup time reached
  
```

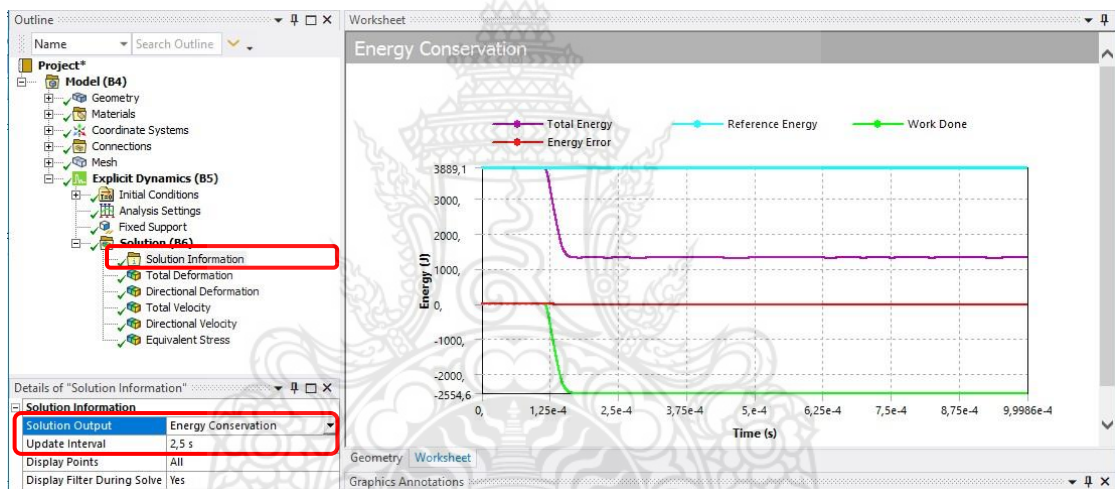
At the bottom of the screenshot, there is a table with the following columns: Type, Value, Note, Unit, Location X, Location Y, Location Z, Association.

รูปที่ 3.23 การแสดง Solver Output

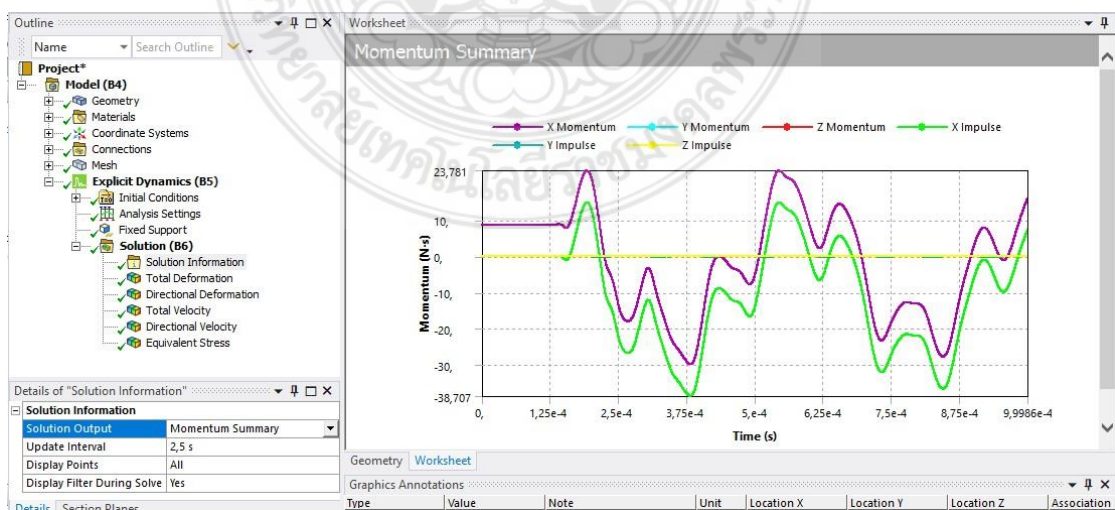
ผลการวิเคราะห์จากรูปที่ 3.23 เป็น Solver Output จะแสดง เช่น จำนวนรอบในการคำนวณ (Cycle) เวลาในการคำนวณแต่ละวงรอบ (Time Step) ร้อยละของการคำนวณที่ได้ออกมา (Progress) และเวลาที่คาดว่าจะเสร็จสิ้นการคำนวณ (Clock time remaining) ซึ่งหากมีการผิดพลาดโปรแกรมจะหยุดการทำงานและแสดงผลสาเหตุของความผิดพลาดนั้น สำหรับ Time Increment เป็นกราฟแสดงเวลาของ Time Step ในการคำนวณของการทำงานเมื่อวัตถุเกิดการกระแทกกราฟจะเกิดการเปลี่ยนแปลงในช่วงของ Time Increment ที่สูงและหลังจากที่วัตถุเกิดการกระแทกเรียบร้อยละกราฟจะลดลงและคงที่จนครบ Time Step ของการทำงานซึ่งบ่งบอกสถานะการคำนวณที่ปกติไม่เกิดการคลาดเคลื่อนที่มากกว่าร้อยละ 5-10 ตามรูปที่ 3.24 ถ้าการคำนวณมีความผิดพลาดโปรแกรมจะยังทำการคำนวณต่อไปแต่หลังจากหลังวัตถุกระแทกกราฟจะมีลักษณะลดลงตาม Time Step ของการคำนวณซึ่งจะไม่คงที่บ่งบอกถึงความผิดพลาดตามรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.24 สถานะปกติ กราฟมีลักษณะคงที่ในแนวนอน

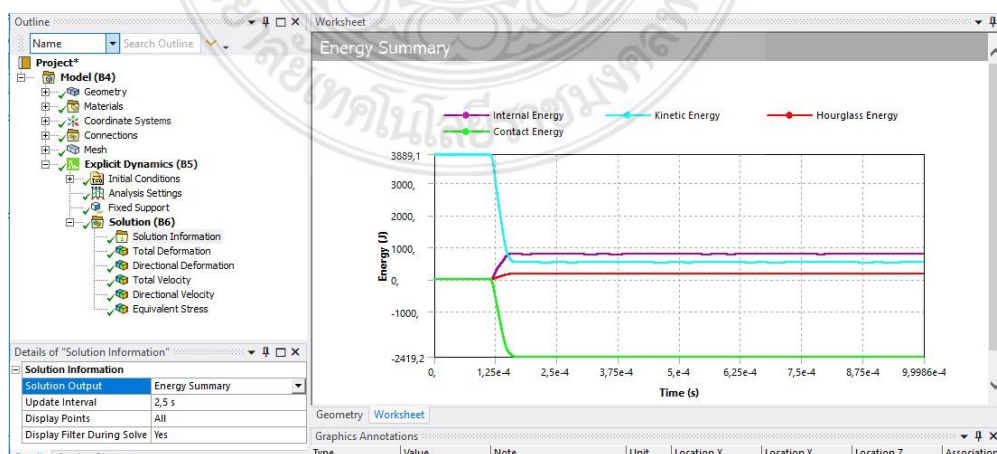


รูปที่ 3.25 เส้นกราฟ Energy Error แสดงสถานะปกติ



รูปที่ 3.26 เส้นกราฟ Momentum Summary แสดงผลปกติวิ่งในแนวนอน

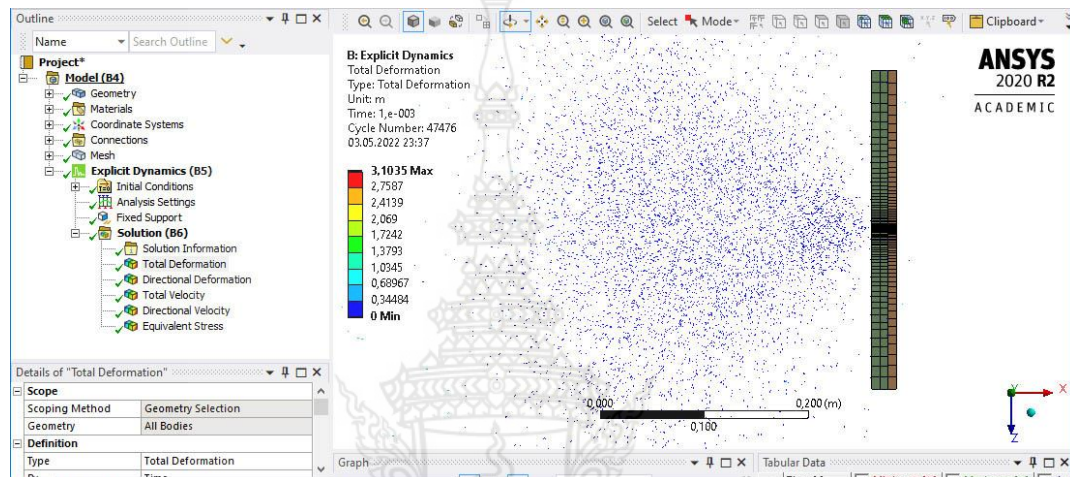
สำหรับกราฟที่แสดงค่าที่เป็นหน่วยของพลังงาน (Energy) จะเป็น Energy Conservation คือ พลังงานที่เกิดขึ้นจากการคำนวณเมื่อวัตถุเคลื่อนที่กระทบหรือชนจะแสดงพลังงานที่เกิดขึ้นเทียบกับ Time Step ของการคำนวณโดยจะแสดงค่าของพลังงานดังนี้ Total Energy, Reference Energy, Work Done และ Energy Error ในส่วนนี้เราจะสังเกตที่เส้นกราฟของ Energy Error เป็นเส้นสีแดงตามรูปที่ 3.25 ซึ่งจะแสดงลักษณะหลังจากเกิดการกระทบหรือชนเส้นกราฟจะมีลักษณะคดงที่ซึ่งบ่งบอกถึงความผิดปกติของการคำนวณแต่ถ้ากราฟมีลักษณะวิ่งออกหรือลู่ลง ไม่อยู่ในแนวนอน แสดงว่ามีความผิดปกติ Momentum Summary กราฟในส่วนของ Momentum Summary นั้นจะแสดงผลค่าของ Momentum ในแต่ละแกนที่เกิดความเสียหายเทียบกับ Time Step ของการทำงาน และแสดงค่าของ Impulse ในแต่ละแกนเหมือนกันซึ่งจะสามารถตรวจสอบการคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากแกนได้หลังจากวัตถุเกิดการกระทบหรือชนแล้วมี Momentum และ Impulse แสดงผลแล้วมีความสอดคล้องกับวัตถุที่กระทบหรือชนถือว่าปกติตามรูปที่ 3.26 ในการจำลองนี้มุมมองจากด้านข้างชิ้นงานอยู่ในแนวแกน Z ซึ่งในเส้นสีเหลืองจะเป็นค่าของ Impulse ในแนวแกน Z เส้นกราฟจะมีลักษณะคดงที่และเส้นสีแดงจะแสดงค่าของ Momentum ในแนวแกน Z ซึ่งจะไม่แสดงผลในกราฟ ดังนั้นถ้าวัตถุกระทบหรือชนแล้วไม่สอดคล้องกันถือว่ามีความผิดปกติ Energy Summary ในกราฟนี้จะแสดงผลของพลังงานที่เกิดขึ้นเมื่อวัตถุเกิดการชนหรือกระทบซึ่งมีพลังงานดังนี้ Internal Energy, Kinetic Energy, Hourglass Energy, Contact Energy ในการตรวจสอบการคลาดเคลื่อนจะสังเกตที่เส้นกราฟของ Hourglass Energy เนื่องจากจะมีผลที่เกิดจากการสร้างเมช (Mesh) แบบ Hexahedral ซึ่งค่าของ Element ทั้ง 4 จุด มีขนาดที่เท่ากันดังนั้นจะทำให้ค่าของความเครียด (Strain) เป็นศูนย์หรือเรียกว่า “Hourglass Effect” [45] ดังนั้นค่าที่แสดงในกราฟของ Hourglass Energy จะแสดงเป็นเส้นสีแดงซึ่งจะต้องมีค่าน้อยกว่าเส้นสีม่วงซึ่งแสดงค่าเป็น Internal Energy ซึ่งถือว่าปกติตามรูปที่ 3.27 แต่ถ้าเส้นสีแดง Hourglass Energy มีค่ามากกว่าเส้นสีม่วง Internal Energy ซึ่งมีความผิดปกติเกิดขึ้นในการคำนวณที่มีสาเหตุมาจากการสร้างเมช (Mesh)



รูปที่ 3.27 เส้นกราฟ Hourglass Energy แสดงผลที่เป็นปกติ

3.2.4 การแสดงผลการวิเคราะห์ (Post-processing)

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

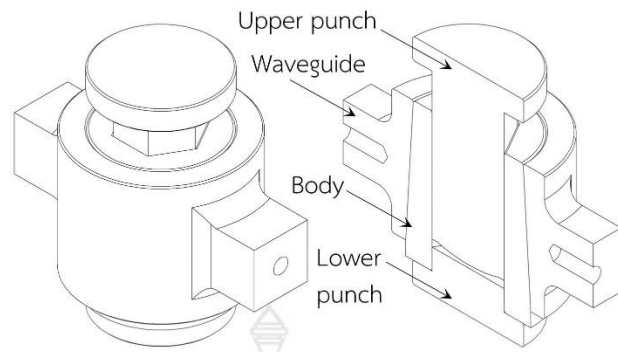


รูปที่ 3.28 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ Equivalent Stress

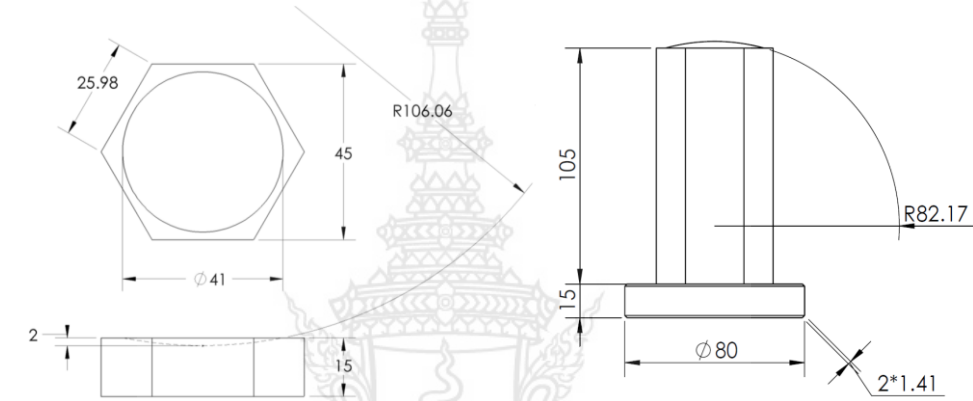
3.3 การขึ้นรูปและการจำลองแผ่นกระเบื้องแก้ว

นอกเหนือจากการทดสอบการยิงลงบนแผ่นเซรามิกซ์หรือแผ่นอลูมิเนียมหรือการซ้อนกันระหว่างแผ่นเซรามิกซ์กับแผ่นเซรามิกซ์หรือการซ้อนกันระหว่างแผ่นอลูมิเนียมและแผ่นอลูมิเนียมหรือการซ้อนกันระหว่างเซรามิกซ์กับอลูมิเนียมยังได้มีการวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในรูปแบบอื่นเพิ่มเติมเช่น ในกรณีที่แผ่นกันกระสุนมีร่องยุบเท่าที่ว่าเป็นการเพิ่มมุมปะทะให้มากขึ้นจะส่งผลต่อขีดความสามารถในการป้องกันกระสุนได้ดีขึ้นกว่าเดิม

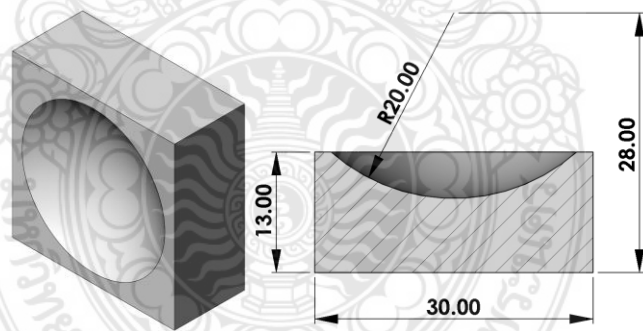
หลังจากวิเคราะห์โครงสร้างของวัสดุผง ก่อนจะดำเนินการอัดขึ้นรูปแผ่นกระเบื้องเซรามิกซ์ เตรียมทำการชั่งผงอลูมิเนียมออกไซด์เกรด HTM 30 ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Shimadza รุ่น ATX224 นำผงที่ได้จากการชั่งจากนั้นเทลงแม่พิมพ์มีขนาด 45×51.96×98 ทำการอัดขึ้นรูปแผ่นกระเบื้องเซรามิกซ์ด้วยแม่พิมพ์ดังรูปที่ 3.29-3.30 โดยทำการอัดด้วยแรงขนาด 1,300 กิโลนิวตัน ความเร็วในการอัด 3 กิโลนิวตันต่อนาที พื้นที่หน้าตัดแกน 1,753.7 ตารางมิลลิเมตร กระทำลงบนแกนอัด เครื่องมือที่ใช้ในการอัด Universal Testing Machine: (UTM) ยี่ห้อ Hualong รุ่น waw-2000 ที่มีขีดความสามารถในการอัดด้วยแรง 2,000 กิโลนิวตัน ควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ หลังจากผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปเสร็จ ใช้เครื่องอัดไฮดรอลิคแบบควบคุมด้วยมือ อัดขึ้นงานออกจากแม่พิมพ์ จะได้แผ่นกระเบื้องดังโมเดลในรูปที่ 3.31-3.32



รูปที่ 3.29 แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปแผ่นเกราะเซรามิกส์แบบเว้า



รูปที่ 3.30 แกนอัดอัดขึ้นรูปแผ่นเกราะเซรามิกส์แบบเว้า



รูปที่ 3.31 แผ่นเกราะเว้า



รูปที่ 3.32 ภาคตัดสำหรับการศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อความหนาแน่น

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

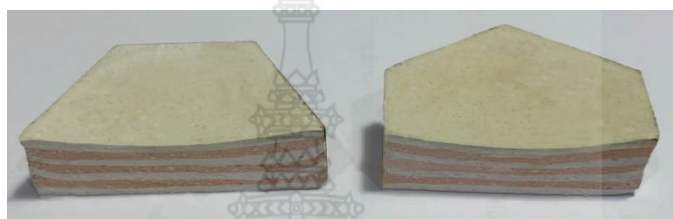
จากการดำเนินงานในบทที่ 3 ซึ่งมีการเตรียมความพร้อมในด้านของการอัดขึ้นรูปแผ่นเกราะ และได้ดำเนินการอัดขึ้นรูปแผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนและศึกษาการกระจายความหนาแน่น การเตรียมความพร้อมสำหรับโมเดลการวิเคราะห์ การจำลองการเจาะทะลุของแผ่นเกราะเซรามิกส์รวมถึงแผ่นเกราะอลูมิเนียม ทำให้ทราบถึงพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการอัดขึ้นรูปของแผ่นเกราะเซรามิกส์ ซึ่งมีปัจจัยจากหลายปัจจัยด้วยกันคือ ค่าความหนาจึงได้ทำการวิเคราะห์การเจาะทะลุที่ความหนาแตกต่างกันแล้วได้ผลลัพธ์ที่มีความเชื่อมโยงกันดังต่อไปนี้

4.1 ผลการอัดขึ้นรูปแผ่นเกราะเซรามิกส์และการกระจายความหนาแน่น

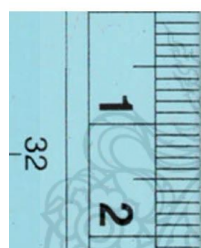
จากการที่นำผงอลูมิเนียมออกไซด์มาอัดขึ้นรูปจนได้กรีนคอมแพค (Green Compact) และนำมาผ่าครึ่งด้วยการนำไปอยู่กับกระดาษทรายจนกระทั่งได้หน้าตัด Section A-A และ Section B-B ดังรูปที่ 4.1 เนื่องด้วยในการอัดขึ้นรูปจะแบ่งผงอลูมิเนียมออกไซด์ออกเป็นส่วนๆ จำนวน 7 ส่วน ก็จะได้จำนวนชั้นเท่ากับ 7 ชั้นเช่นกัน โดยจะมีการผสมสีลงไปทำให้เกิดการแบ่งแยกชั้นดังรูปที่ 4.1 พบว่ามีชั้นของการเคลื่อนที่ของอนุภาคผงในแต่ละชั้นของแต่ละรูปแบบ จึงได้นำพื้นที่หน้าตัดมาทำการสแกนด้วยเครื่องสแกนเนอร์ โดยเทียบระยะกับไม้บรรทัด จากนั้นนำเส้นการเคลื่อนที่ของอนุภาคมาทำการแบ่งพื้นที่ออกเป็นส่วน ๆ และพื้นที่ในแต่ละส่วนจะถูกบังคับด้วยเส้น Isoline หรือเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคผง ทำให้พื้นที่สีเหลี่ยมแต่ละช่องมีพื้นที่ที่แตกต่างกัน กำหนดให้ชั้นงานมีความสูง 15 มิลลิเมตร จำนวน 7 ชั้นเลเยอร์ จึงทำการแบ่งจำนวนคอลัมน์ออกเป็น 10 คอลัมน์ ส่งผลให้มีพื้นที่ย่อยจำนวน 70 พื้นที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 เมื่อมีพื้นที่ที่แตกต่างกันจึงหมายถึงปริมาตรในวงรอบจะมีค่าไม่เท่ากันและมวลก็จะมีค่าไม่เท่ากันเช่นกัน ส่งผลให้เกิดการกระจายความหนาแน่นของแต่ละพื้นที่แตกต่างกัน จากนั้นจึงนำพื้นที่ไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Image J ซึ่งเป็นโปรแกรมฟรี (Free Software) ใช้ในการคำนวณหาพื้นที่ทั้งหมดของหน้าตัดที่ผ่าครึ่ง แล้วนำไปวิเคราะห์ค่าทางสถิติและเปลี่ยนพื้นที่ให้ออกมาเป็นเส้นการกระจายความหนาแน่น ซึ่งได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4

สำหรับแผ่นเกราะเซรามิกส์แบบร่องยวบหรือหน้าตัดยวบที่มีความหนา 15 มิลลิเมตร ใน Section A-A และ Section B-B พบว่าความหนาแน่นจะเกิดการกระจายตัวไม่เท่ากันในเชิงปริมาตร ความหนาแน่นจะมีค่าสูงมากในบริเวณผนังขอบด้านบนของกรีนคอมแพค (Green compact) ที่ติดกับแม่พิมพ์การอัดตัวบนคือเคลื่อนที่ลงมา ส่วนแกนอัดตัวกลางไม่ได้เคลื่อนที่ความหนาแน่นจะมีค่าต่ำกว่าด้านบนและความหนาแน่นจะมีค่าน้อยที่สุด ณ ตำแหน่งใจกลางของแผ่นเกราะ และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของชัยวัฒน์ ไชยมหาพฤกษ์ [2] พบว่ามีรูปแบบคล้ายคลึงกัน แต่งานวิจัยนี้จะมีค่าความ

หนาแน่นที่สูงกว่า เนื่องด้วยพารามิเตอร์สำคัญคือแรงอัด 1,300 กิโลนิวตัน สูงกว่าของชัยวัฒน์ ไชยมหาพฤกษ์ ซึ่งอัดที่ 1,000 กิโลนิวตัน จากการดำเนินการสรุปได้ว่ากระบวนการอัดขึ้นรูปแห้งเป็นกระบวนการที่ง่ายที่สุด แต่จะพบปัญหาในเรื่องของค่าความเสียหาย เป็นแรงเสียหายที่เกิดขึ้นระหว่างผนังแม่พิมพ์กับผงอัด ยิ่งผงอัดมีขนาดเล็กมาเท่าไรจะส่งผลให้แรงเสียหายมากขึ้นเท่านั้น นอกเหนือจากแรงเสียหายที่ผนังกับผงอัดแล้ว ยังมีแรงเสียหายระหว่างอนุภาคผงด้วยที่เรียกว่า Interparticle เป็นปัญหาสำคัญและเป็นสิ่งไม่พึงประสงค์ถึงแม้ว่ากระบวนการอัดขึ้นรูปจะเป็นกระบวนการที่ง่ายและต้นทุนต่ำแต่ก็ยังเป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมอย่างมาก

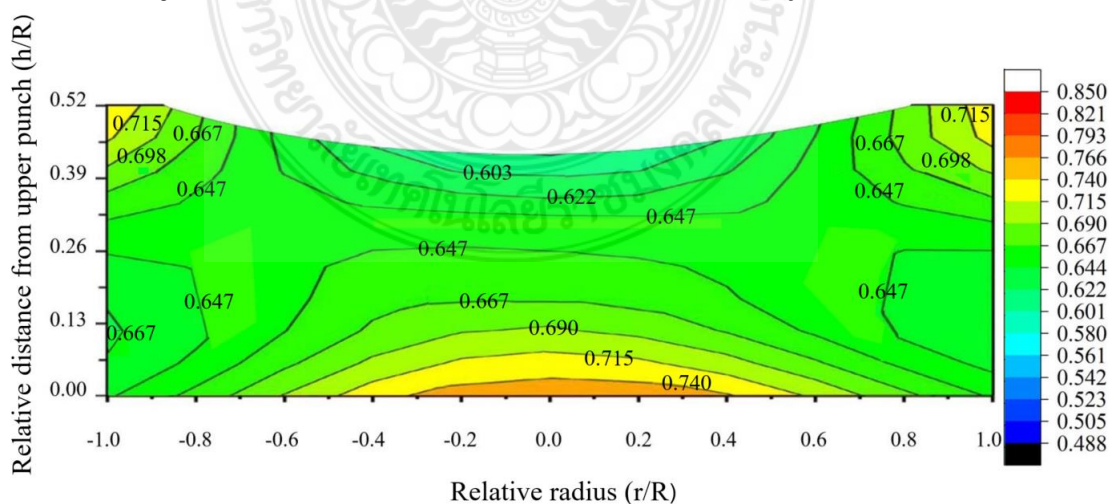


รูปที่ 4.1 ภาคตัดแผ่นเกราะเซรามิกส์เพื่อวิเคราะห์ความหนาแน่น

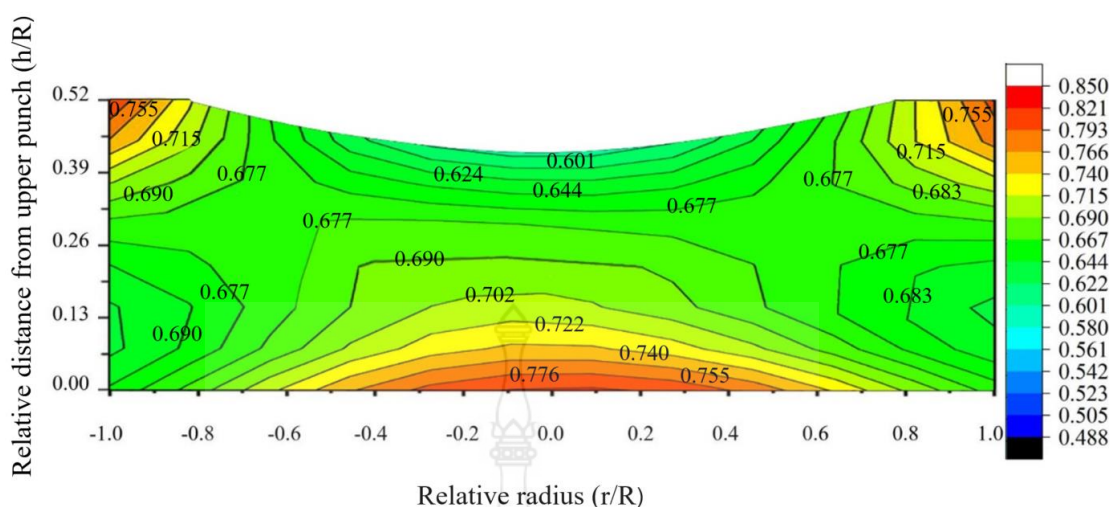


1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70

รูปที่ 4.2 การแบ่งพื้นที่ของชิ้นงานจำนวน 7 ชั้นที่มีความสูง 15 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.3 การกระจายความหนาแน่นสัมพัทธ์เชิงปริมาตรในแผ่นเกราะเซรามิกส์แบบหน้ายุบ ที่ความสูง 15 มิลลิเมตร ในภาคตัด A-A



รูปที่ 4.4 การกระจายความหนาแน่นสัมพัทธ์เชิงปริมาตรในแผ่นเกราะเซรามิกส์แบบหน้ายุบ ที่ความสูง 15 มิลลิเมตร ในภาคตัด B-B

4.2 ผลการจำลองยิงแผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนด้วยวัสดุและความหนาแปรเปลี่ยน

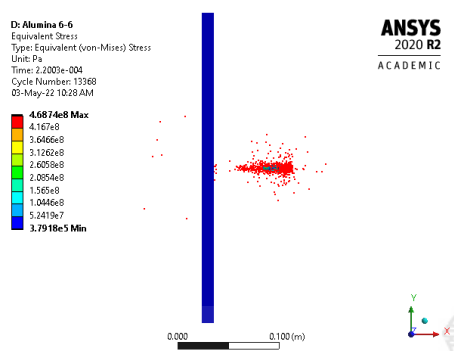
จากกระบวนการเตรียมโมเดลเพื่อจำลองและการตั้งค่าเริ่มต้น (Pre-processing) จนถึงขั้นตอนการคำนวณด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Solve-processing) จากที่กำหนดไว้ในบทที่ผ่านมา โมเดลแบบจำลองแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ 1) รูปแบบแผ่นเกราะแบบสองชั้นแต่วัสดุเดียวกัน 2) รูปแบบแผ่นเกราะแบบสองชั้นแต่วัสดุต่างกัน โดยแผ่นที่ 1 คือแผ่นด้านหน้าทำจากวัสดุเซรามิกส์ แผ่นด้านหลังเป็นอลูมิเนียม 7075 T6 ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองนั้นเป็นขั้นตอนของการแสดงผลหรือ “Post-processing” มุมของหัวกระสุนเมื่อกระแทกเข้ากับแผ่นเกราะเท่ากับ 0 องศา ผลที่ได้จากการจำลองแสดงในตารางที่ 4.1

กรณีการจำลองแผ่นเกราะสองชั้น Al_2O_3 เป็นแผ่นเกราะด้านหน้า และ AL7075 เป็นแผ่นเกราะด้านหลังมากกว่า 12 รูปแบบ ที่มุมกระทบ 0 องศา แสดงผลการจำลองแสดงดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.5-4.16 โดยรูป a) เป็นการนำเสนอภาพด้านข้างให้เห็นการทะลุผ่านของเศษกระสุนจากด้านหน้าไปด้านหลัง รูป b) เป็นการนำเสนอภาพในมุมมองไอโซเมตริก รูป c) หากมองในทิศทางการยิงกระสุนเข้ามาปะทะและทะลุผ่านจะเป็นภาพด้านหลังของแผ่นเกราะแผ่นที่สอง แต่โปรแกรมถือได้ว่าเป็นภาพด้านหน้า รูป d) เป็นการตัดแผ่นเกราะในภาคตัดขวางเพื่อให้เห็นการเสียหายของแผ่นเกราะที่ชัดเจนขึ้น รูป e) และ f) เป็นรูปด้านหน้าและด้านหลัง ตามลำดับ ของแผ่นเกราะแผ่นแรกที่กระสุนเข้ามาปะทะ รูปที่ g) และ h) เป็นรูปด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นเกราะแผ่นที่สอง ตามลำดับ จากการจำลองการยิงกระสุน พบว่าที่มุมกระทบ 0 องศา ความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุเริ่มขึ้นกับแผ่นเกราะกรณีที่ 9, 10, 11, 12 ทั้งนี้แนะนำตั้งแต่กรณีที่ 10, 11 หรือ 12 เนื่องด้วยกรณีที่ 9 มีระยะที่ไม่เจาะทะลุของแผ่นเกราะแผ่นหลังเพียง 2 mm เท่านั้น ดังนั้นจึงควรเพื่อ

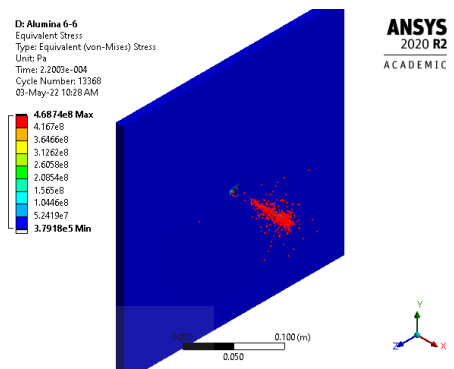
ระยะให้มากกว่านี้ที่ 5 mm จากความเสียหายที่เกิดขึ้น พบว่า แผ่นเกราะเซรามิกส์ซึ่งมีความแข็งสูง จะทำหน้าที่ทำลายหัวกระสุน และลักษณะการแตกเสียหายของแผ่นเซรามิกส์จะแตกต่างจากแผ่น อลูมิเนียมอย่างเห็นได้ชัดในทุกรูปที่แสดง เป็นการเสียหายในลักษณะการแตกออกเป็นเศษๆ เนื่อง ด้วยมีความเปราะสูงแต่แข็ง สำหรับแผ่นอลูมิเนียมมีรูปแบบการเสียหายในลักษณะมีความยืดหยุ่นสูง การเสียหายไม่ใช่ลักษณะการแตกตัวออก จึงทำหน้าที่ในการยับยั้งการเคลื่อนที่ของเศษกระสุนต่างๆ ได้ดี

ตารางที่ 4.1 ผลการจำลองแผ่นเกราะสองชั้นคือเซรามิกส์ (Al_2O_3)+อลูมิเนียม (AL 7075 T6) ที่มุม กระทบ 0 องศา

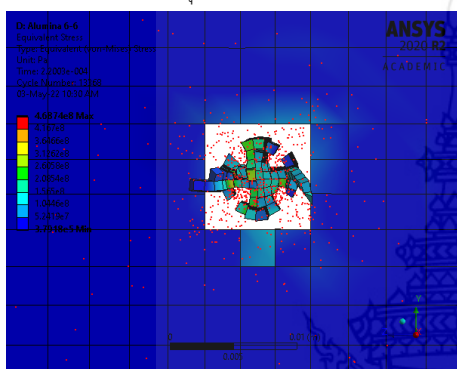
กรณีที่	Thickness (mm)				ผลการยิง	Remark
	แผ่นที่ 1 เซรามิกส์	แผ่นที่ 2 เซรามิกส์	แผ่นที่ 3 อลูมิเนียม 7075 T6	แผ่นที่ 4 อลูมิเนียม 7075 T6		
1	6	6	-	-	ทะลุทั้งสองแผ่น	รูปที่ 4.1
2	8	8	-	-	ทะลุทั้งสองแผ่น	รูปที่ 4.2
3	-	-	6	6	ทะลุทั้งสองแผ่น	รูปที่ 4.3
4	-	-	8	8	ทะลุแผ่นแรก	รูปที่ 4.4
5	-	-	10	10	ทะลุแผ่นแรก	รูปที่ 4.5
6	6	-	6	-	ทะลุทั้งสองแผ่น	รูปที่ 4.6
7	8	-	8	-	ทะลุทั้งสองแผ่น	รูปที่ 4.7
8	10	-	10	-	ทะลุทั้งสองแผ่น	รูปที่ 4.8
9	12	-	12	-	ทะลุเฉพาะแผ่นแรก	รูปที่ 4.9
10	14	-	14	-	ทะลุเฉพาะแผ่นแรก	รูปที่ 4.10
11	16	-	16	-	ทะลุเฉพาะแผ่นแรก	รูปที่ 4.11
12	18	-	18	-	ทะลุเฉพาะแผ่นแรก	รูปที่ 4.12



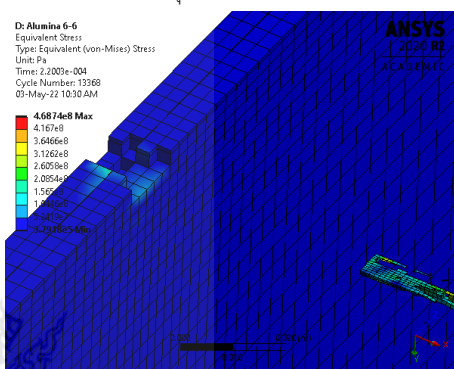
a) มุมมองด้านซ้าย



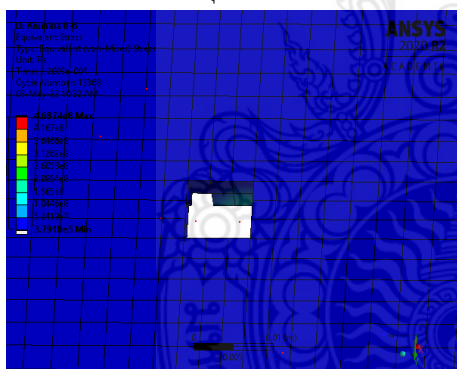
b) มุมมองไอโซเมตริก



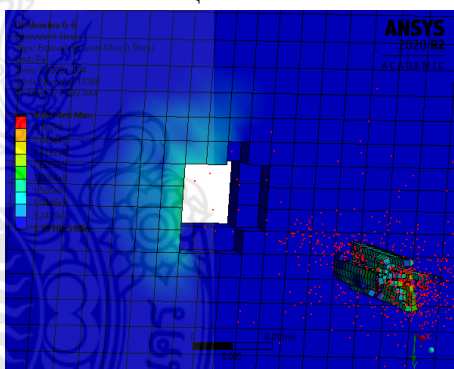
c) มุมมองด้านหน้า



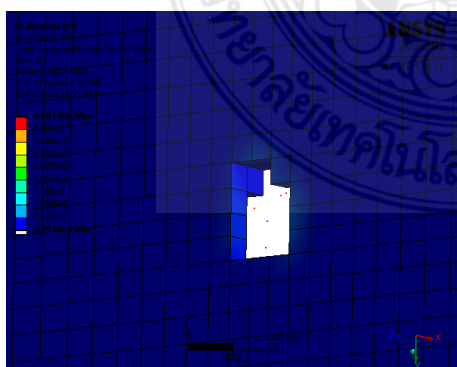
d) มุมมองภาคตัดขวาง



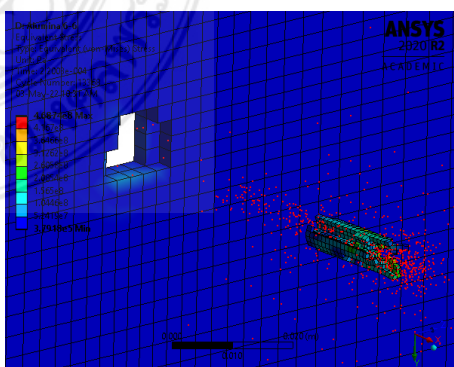
e) ด้านหน้าของแผ่นกระเบื้องแรก



f) ด้านหลังของแผ่นกระเบื้องแรก



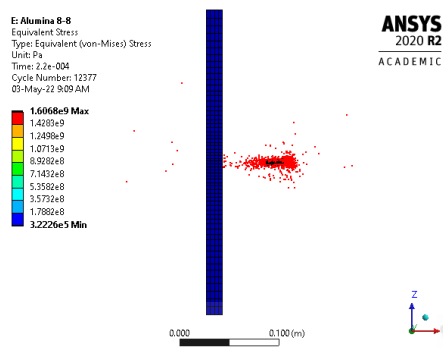
g) ด้านหน้าของแผ่นกระเบื้องที่สอง



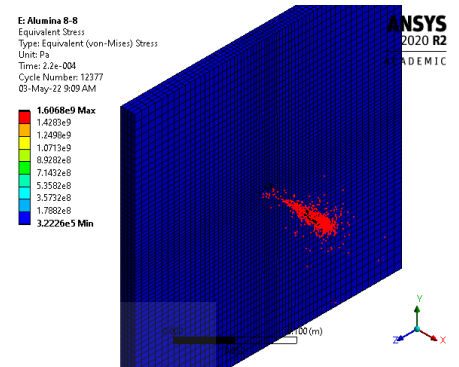
h) ด้านหลังของแผ่นกระเบื้องที่สอง

รูปที่ 4.5 ความเค้นสูงสุดและการเสียรูปของแผ่นกระเบื้องสองชั้นด้วยวัสดุ Al_2O_3 ความหนา 6 มม.

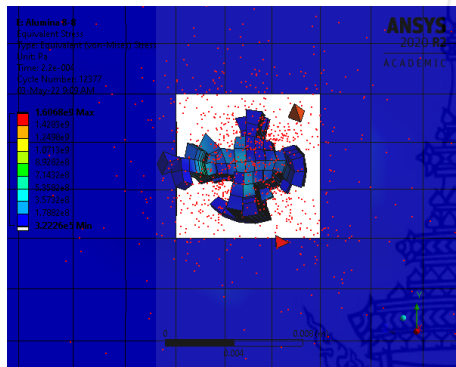
จำนวน 2 แผ่น



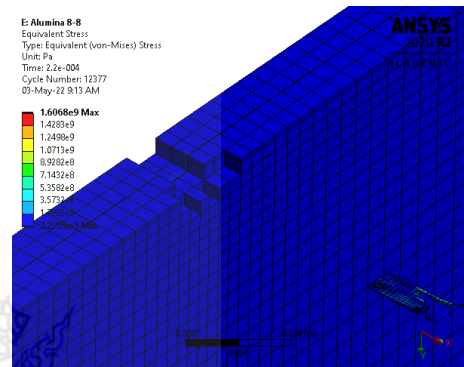
a) มุมมองด้านซ้าย



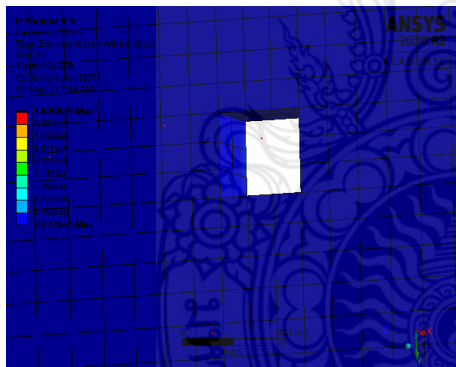
b) มุมมองไอโซเมตริก



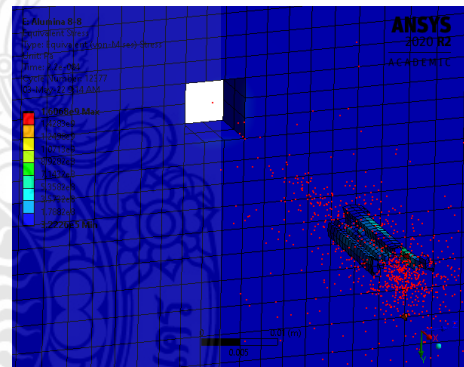
c) มุมมองด้านหน้า



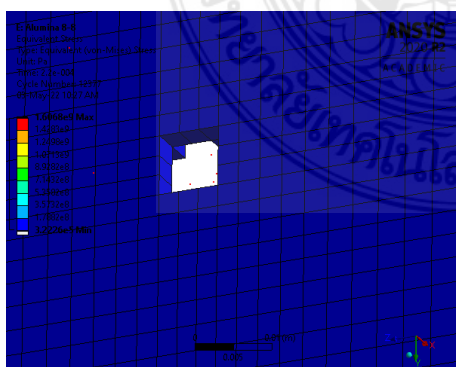
d) มุมมองภาคตัดขวาง



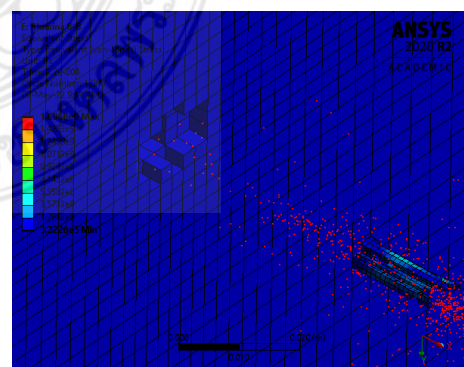
e) ด้านหน้าของแผ่นเกราะแผ่นแรก



f) ด้านหลังของแผ่นเกราะแผ่นแรก



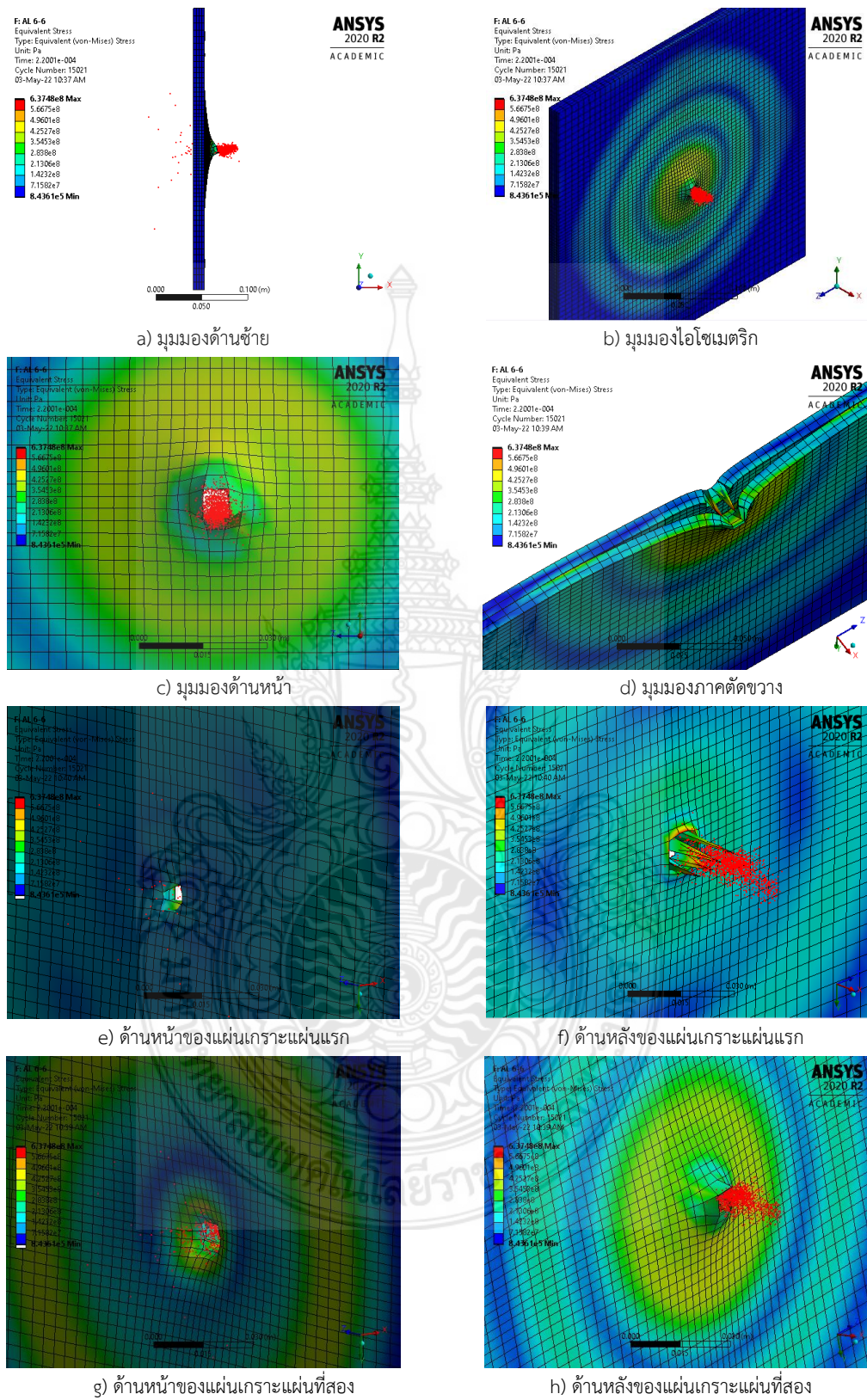
g) ด้านหน้าของแผ่นเกราะแผ่นที่สอง



h) ด้านหลังของแผ่นเกราะแผ่นที่สอง

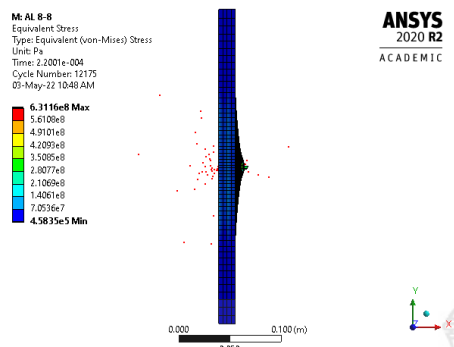
รูปที่ 4.6 ความเค้นสูงสุดและการเสียรูปของแผ่นเกราะสองชั้นด้วยวัสดุ Al_2O_3 ความหนา 8 มม.

จำนวน 2 แผ่น

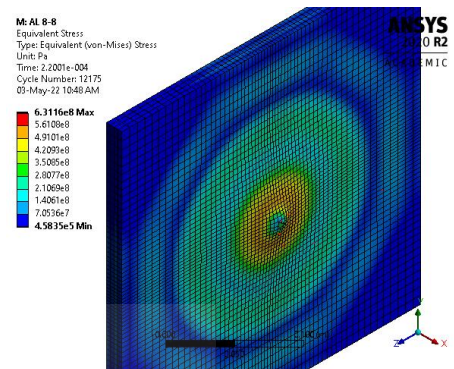


รูปที่ 4.7 ความเค้นสูงสุดและการเสียรูปของแผ่นเกราะสองชั้นด้วยวัสดุ AL 7075-T6

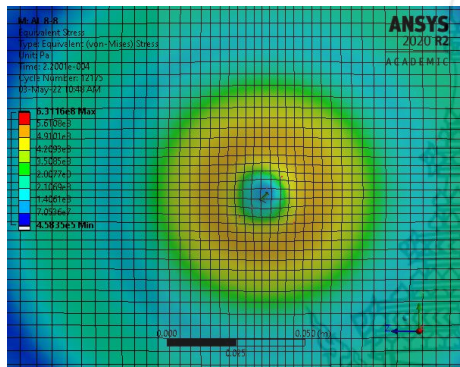
ความหนา 6 มม. จำนวน 2 แผ่นซ้อน



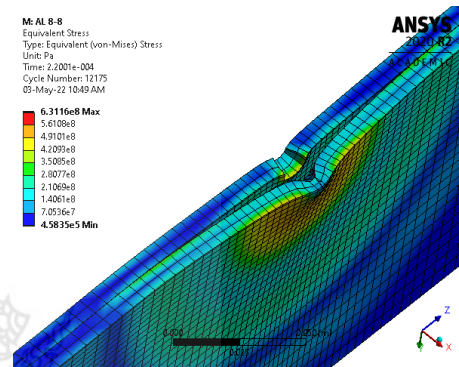
a) มุมมองด้านซ้าย



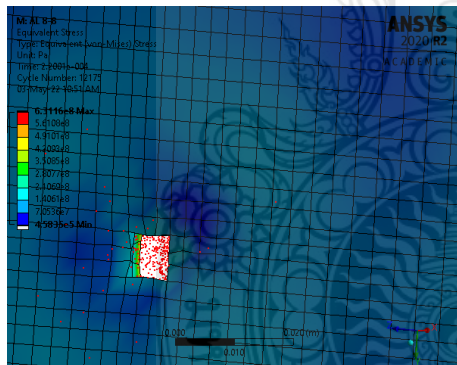
b) มุมมองไอโซเมตริก



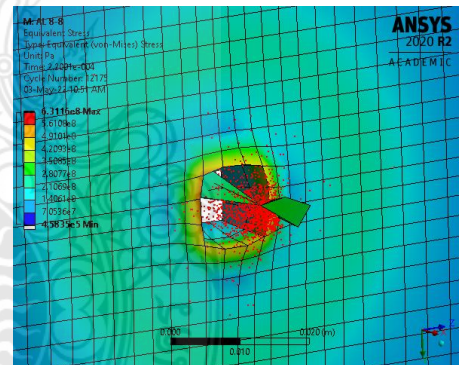
c) มุมมองด้านหน้า



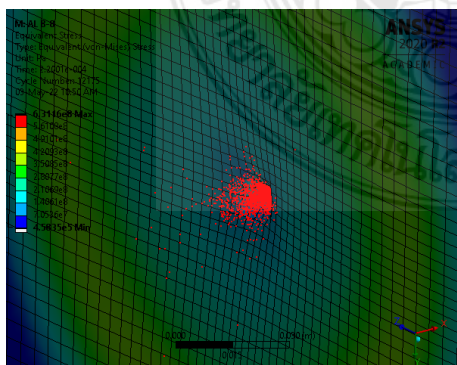
d) มุมมองภาคตัดขวาง



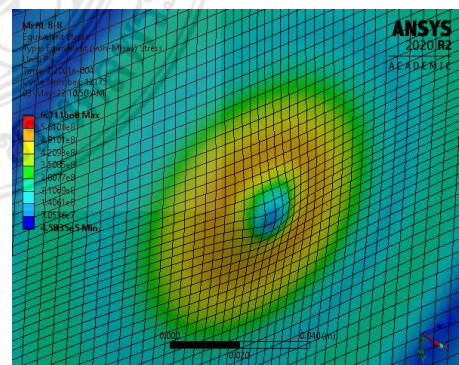
e) ด้านหน้าของแผ่นเกราะแผ่นแรก



f) ด้านหลังของแผ่นเกราะแผ่นแรก



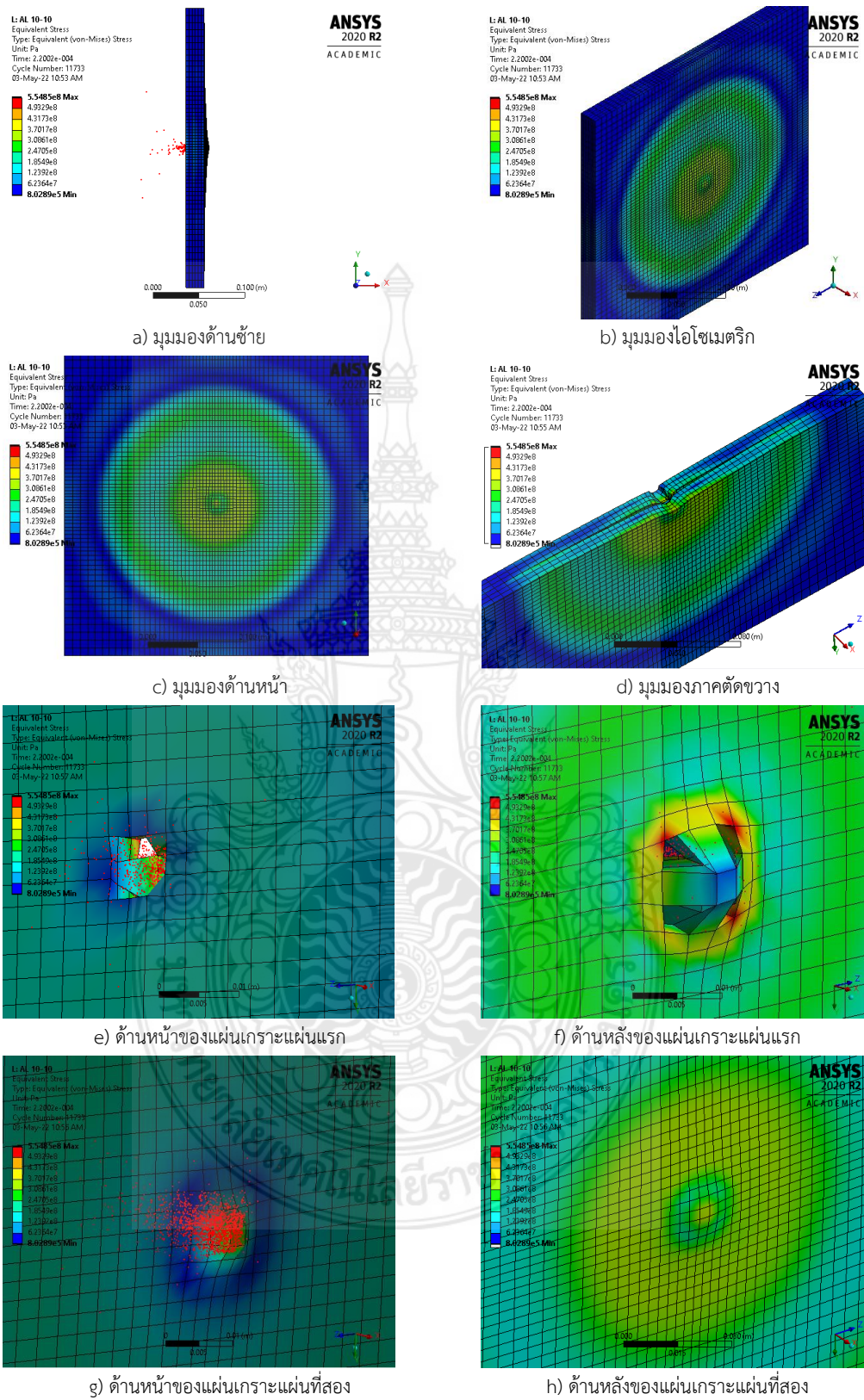
g) ด้านหน้าของแผ่นเกราะแผ่นที่สอง



h) ด้านหลังของแผ่นเกราะแผ่นที่สอง

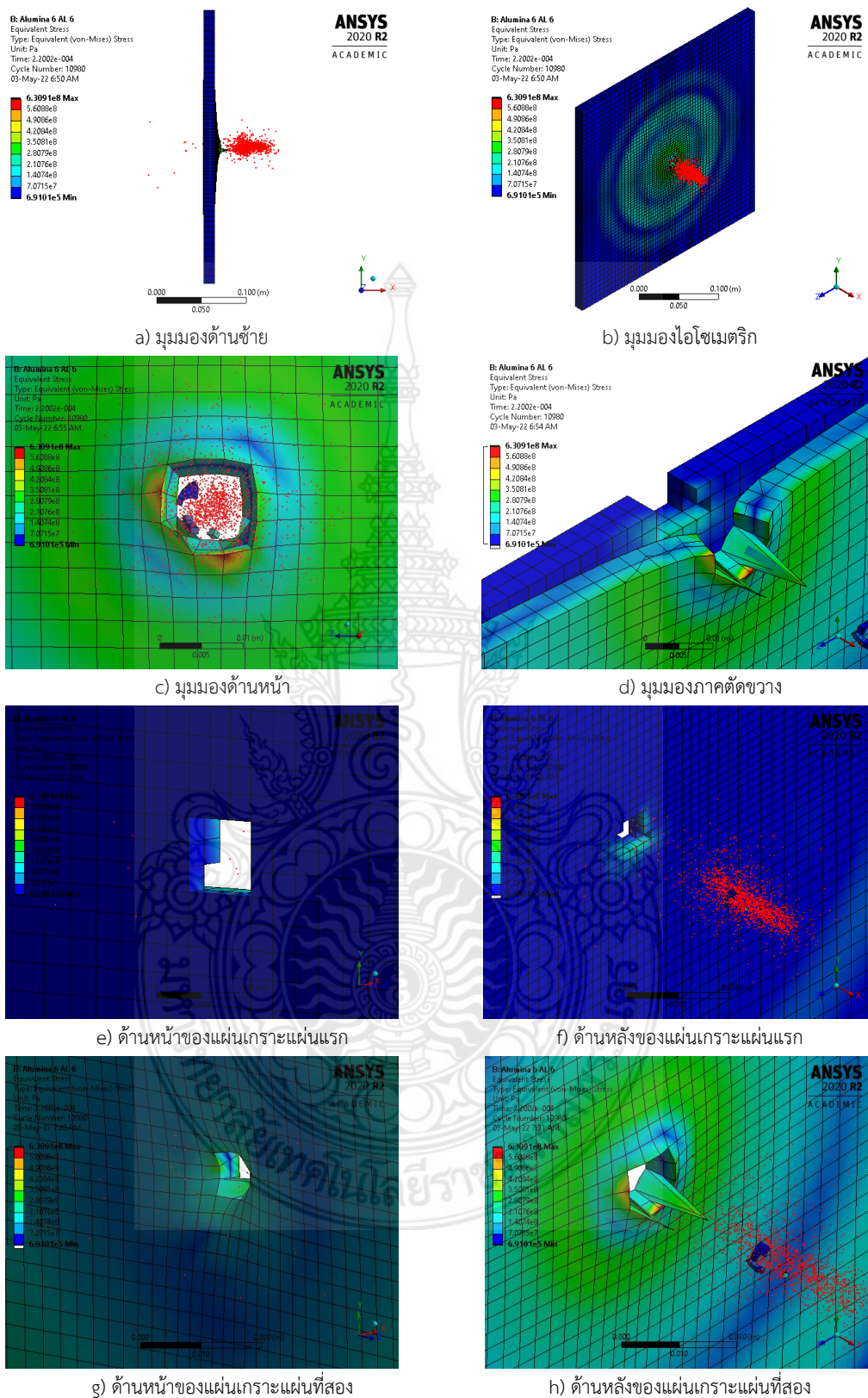
รูปที่ 4.8 ความเค้นสูงสุดและการเสียรูปของแผ่นเกราะสองชั้นด้วยวัสดุ AL 7075-T6

ความหนา 8 มม. จำนวน 2 แผ่นซ้อน

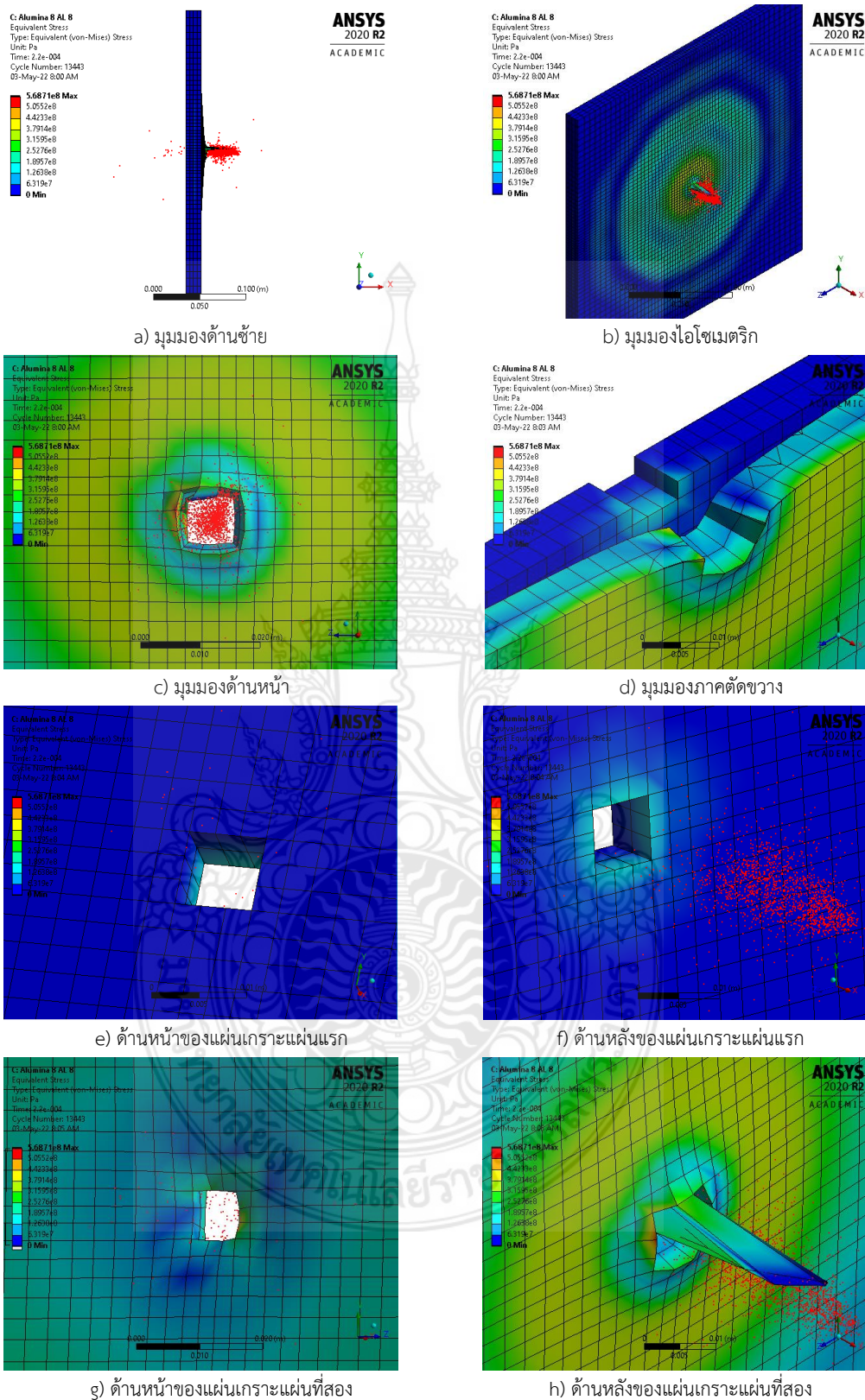


รูปที่ 4.9 ความเค้นสูงสุดและการเสียรูปของแผ่นเกราะสองชั้นด้วยวัสดุ AL 7075-T6

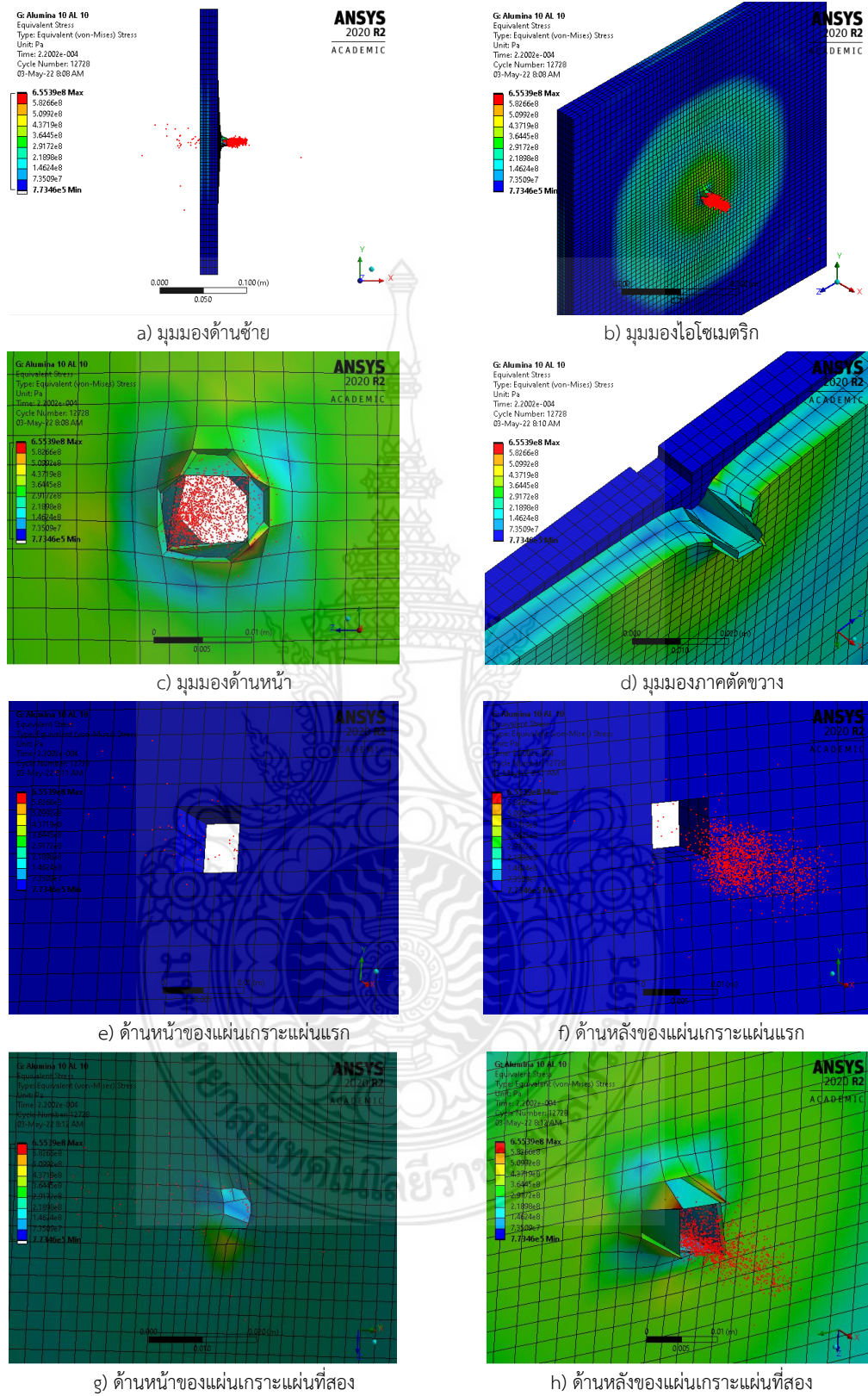
ความหนา 10 มม. จำนวน 2 แผ่นซ้อน



รูปที่ 4.10 ความเค้นสูงสุดและการเสียรูปของแผ่นเกราะสองชั้นด้วยวัสดุ Al_2O_3 ความหนา 6 มม. และ AL 7075-T6 ความหนา 6 มม.

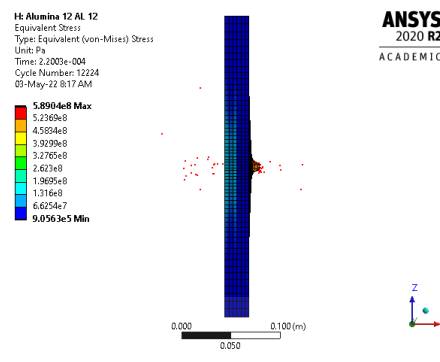


รูปที่ 4.11 ความเค้นสูงสุดและการเสียรูปของแผ่นเกราะสองชั้นด้วยวัสดุ Al_2O_3 ความหนา 8 มม. และ AL 7075-T6 ความหนา 8 มม.

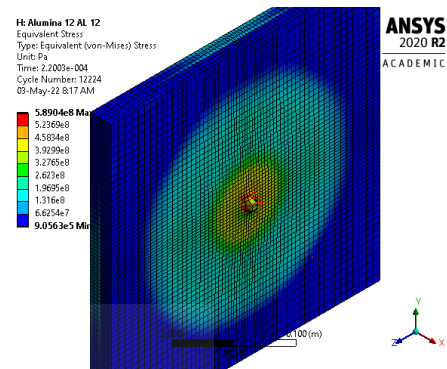


รูปที่ 4.12 ความเค้นสูงสุดและการเสียรูปของแผ่นเกราะสองชั้นด้วยวัสดุ Al_2O_3 ความหนา 10 มม.

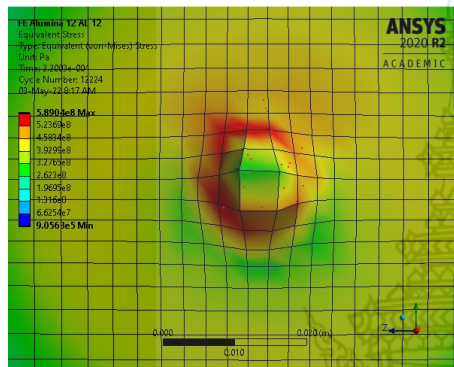
และ AL 7075-T6 ความหนา 10 มม.



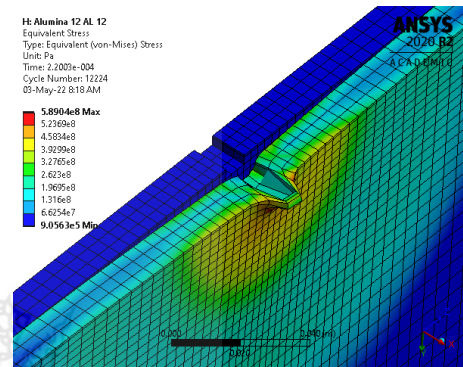
a) มุมมองด้านซ้าย



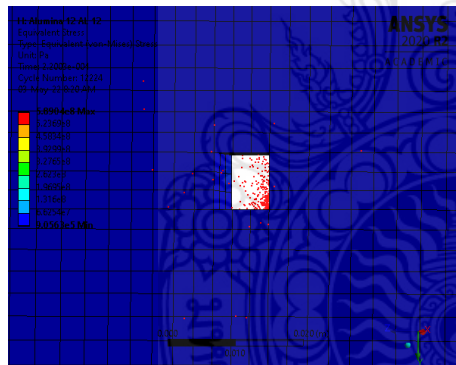
b) มุมมองไอโซเมตริก



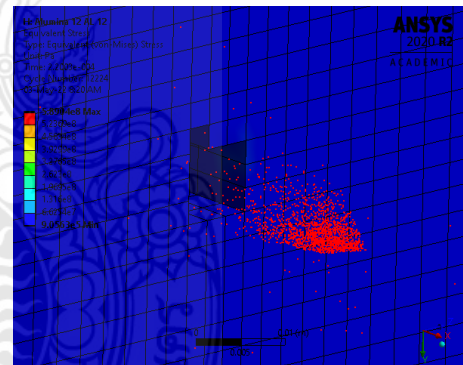
c) มุมมองด้านหน้า



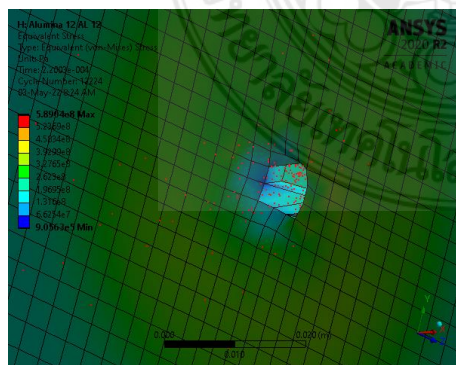
d) มุมมองภาคตัดขวาง



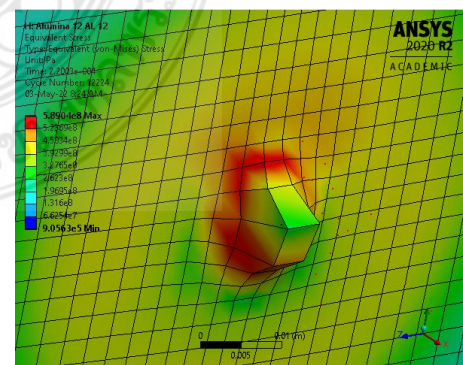
e) ด้านหน้าของแผ่นเกราะแผ่นแรก



f) ด้านหลังของแผ่นเกราะแผ่นแรก



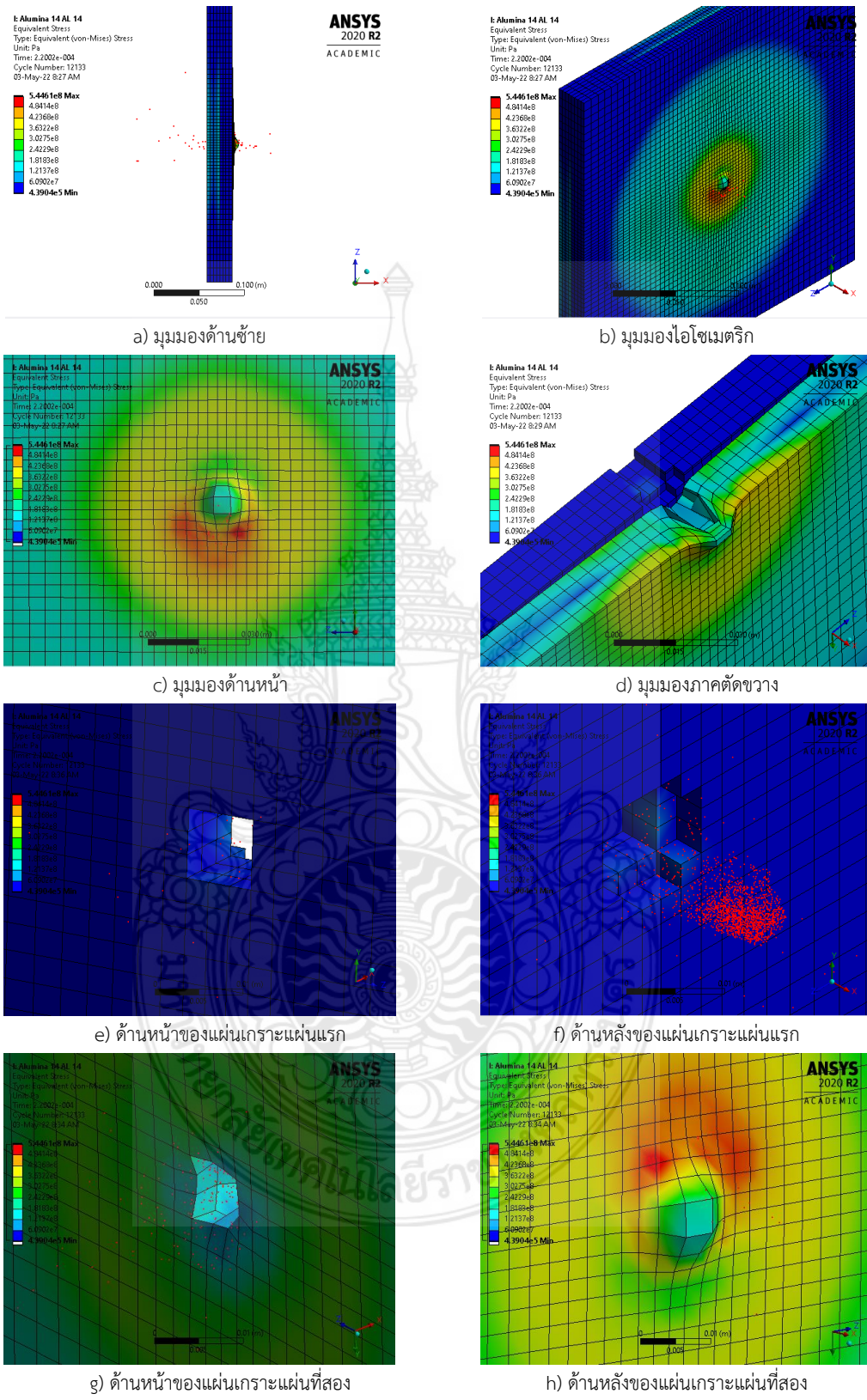
g) ด้านหน้าของแผ่นเกราะแผ่นที่สอง



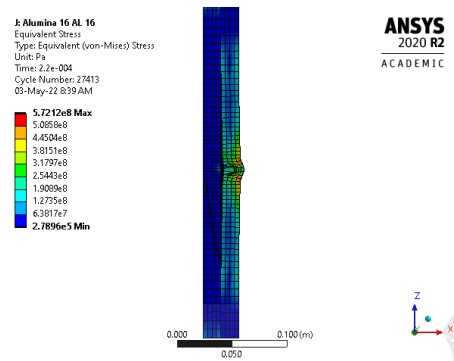
h) ด้านหลังของแผ่นเกราะแผ่นที่สอง

รูปที่ 4.13 ความเค้นสูงสุดและการเสียรูปของแผ่นเกราะสองชั้นด้วยวัสดุ Al_2O_3 ความหนา 12 มม.

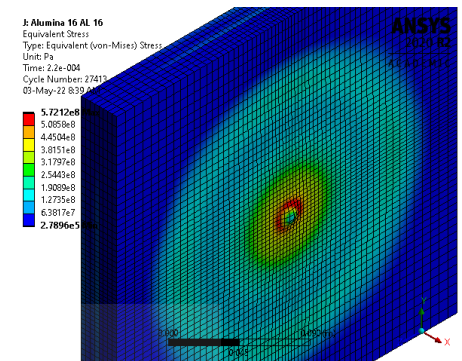
และ AL 7075-T6 ความหนา 12 มม.



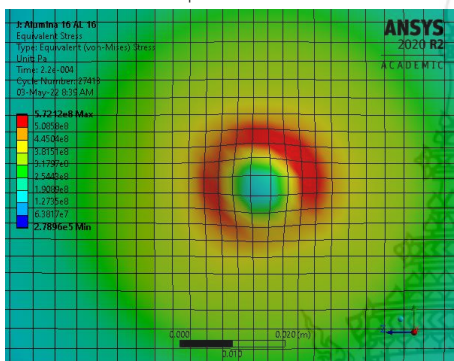
รูปที่ 4.14 ความเค้นสูงสุดและการเสียรูปของแผ่นเกราะสองชั้นด้วยวัสดุ Al_2O_3 ความหนา 14 มม. และ AL 7075-T6 ความหนา 14 มม.



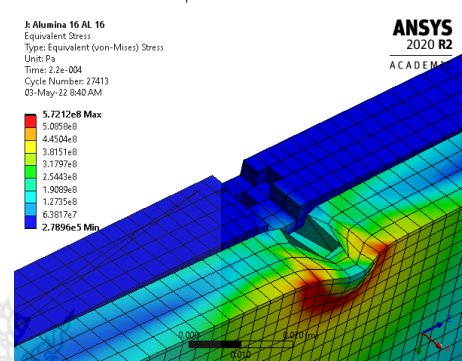
a) มุมมองด้านซ้าย



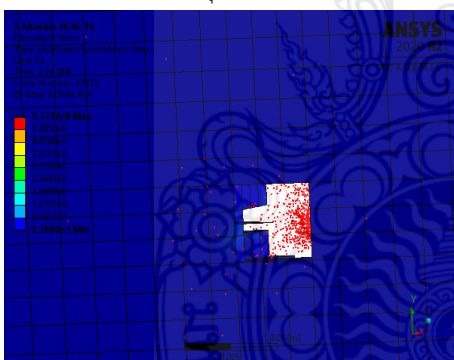
b) มุมมองไอโซเมตริก



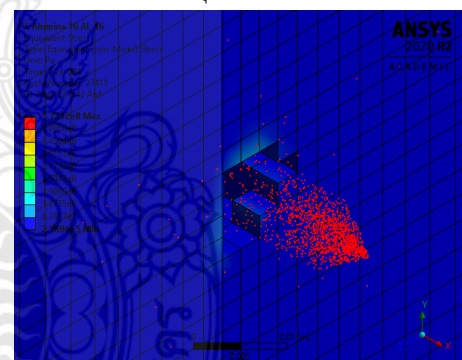
c) มุมมองด้านหน้า



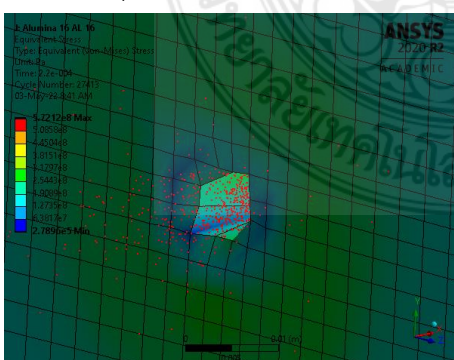
d) มุมมองภาคตัดขวาง



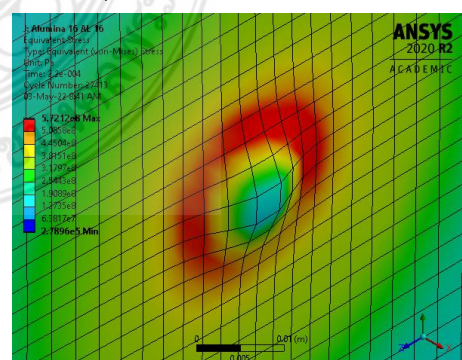
e) ด้านหน้าของแผ่นเกราะแผ่นแรก



f) ด้านหลังของแผ่นเกราะแผ่นแรก

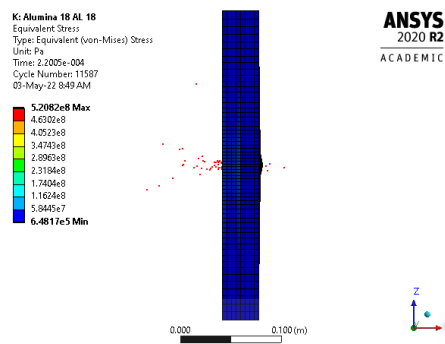


g) ด้านหน้าของแผ่นเกราะแผ่นที่สอง

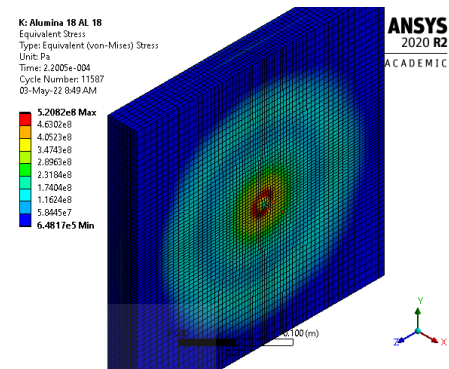


h) ด้านหลังของแผ่นเกราะแผ่นที่สอง

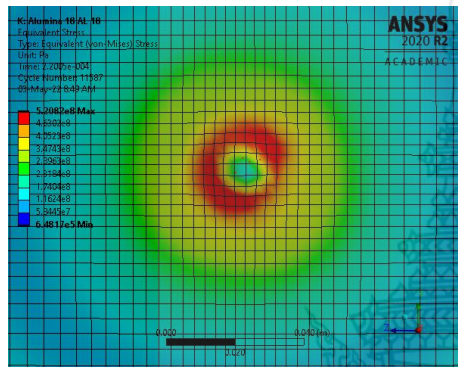
รูปที่ 4.15 ความเค้นสูงสุดและการเสียรูปของแผ่นเกราะสองชั้นด้วยวัสดุ Al_2O_3 ความหนา 16 มม. และ AL 7075-T6 ความหนา 16 มม.



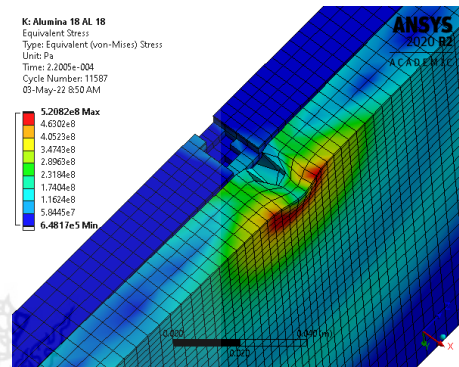
a) มุมมองด้านซ้าย



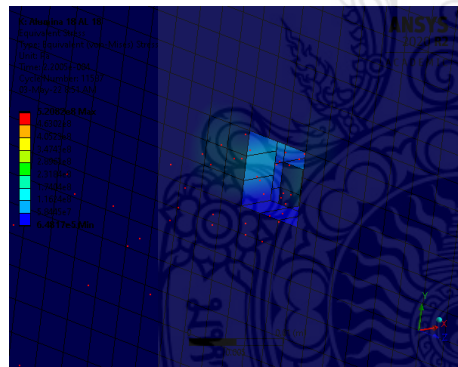
b) มุมมองไอโซเมตริก



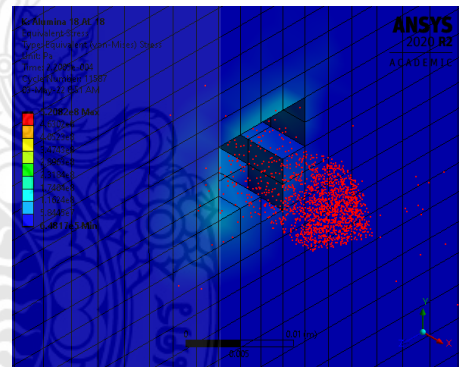
c) มุมมองด้านบน



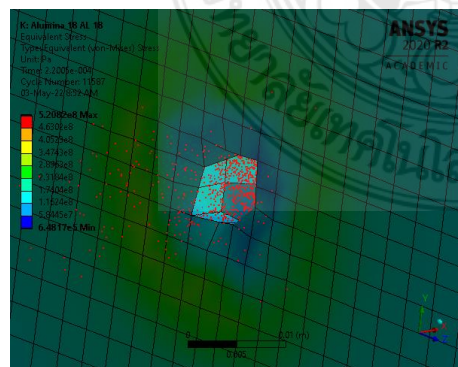
d) มุมมองภาคตัดขวาง



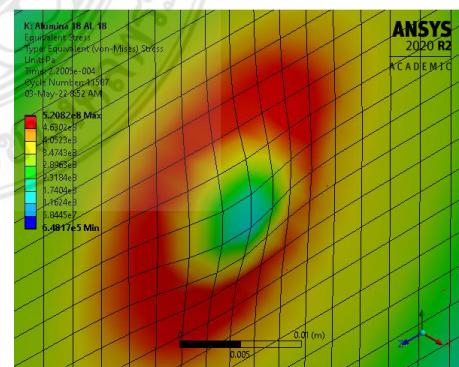
e) ด้านหน้าของแผ่นเกราะแผ่นแรก



f) ด้านหลังของแผ่นเกราะแผ่นแรก



g) ด้านหน้าของแผ่นเกราะแผ่นที่สอง



h) ด้านหลังของแผ่นเกราะแผ่นที่สอง

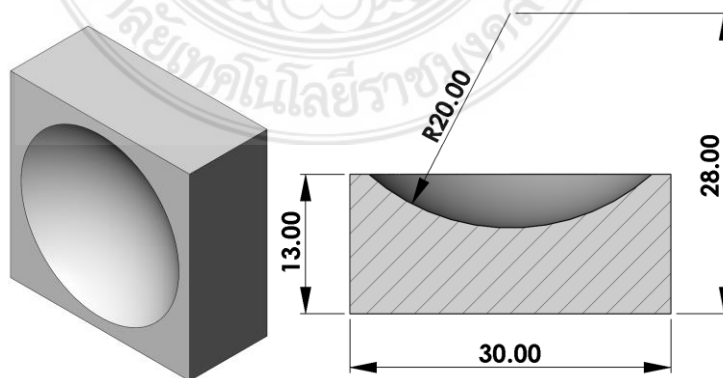
รูปที่ 4.16 ความเค้นสูงสุดและการเสียรูปของแผ่นเกราะสองชั้นด้วยวัสดุ Al_2O_3 ความหนา 18 มม.

และ AL 7075-T6 ความหนา 18 มม.

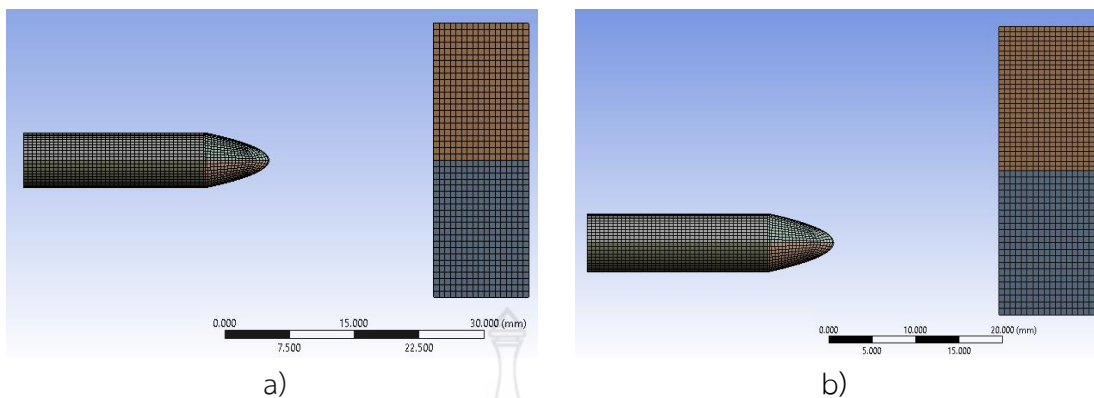
4.3 กรณีศึกษาการจำลองการยิงกระสุนลงบนแผ่นเกราะแบบเว้าหรือแผ่นหน้ายุบ

นอกเหนือจากการทดสอบการยิงลงบนแผ่นเซรามิกซ์หรือแผ่นอลูมิเนียมหรือการซ้อนกันระหว่างแผ่นเซรามิกซ์กับแผ่นเซรามิกซ์หรือการซ้อนกันระหว่างแผ่นอลูมิเนียมและแผ่นอลูมิเนียมหรือการซ้อนกันระหว่างเซรามิกซ์กับอลูมิเนียมยังได้มีการวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในรูปแบบอื่นเพิ่มเติมเช่น ในกรณีที่แผ่นกันกระสุนมีร่องยุบเท่ากับการเพิ่มมุมปะทะให้มากขึ้นจะส่งผลต่อขีดความสามารถในการป้องกันกระสุนได้ดีขึ้นกว่าเดิม รูปภาพของแผ่นเกราะกันกระสุนที่มีร่องยุบแสดงดังรูปที่ 4.13 ในที่นี้ออกแบบให้มีขนาด 30x30 มิลลิเมตร มีความหนา 13 มิลลิเมตรดังรูปที่ 4.17 โดยออกแบบแผ่นกันกระสุนรูปทรงเว้าด้วยวัสดุ SKD11 ทดสอบตามมาตรฐาน NIJ 4 ซึ่งนำไปสู่ทิศทางการเปลี่ยนกระสุนเมื่อกระสุนกระทบกับแผ่นกันกระสุนที่ความเร็ว 880 เมตร/วินาที กระสุนทำจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่อ้างอิงจากทฤษฎีการจำลองความเสียหายของจอห์นสัน-โฮล์มควิสต์ (JH-2) ด้วยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม Ansys/Explicit dynamics กระสุนถูกยิงที่กึ่งกลางของแผ่นกันกระสุนที่มีความลึก 5, 6, 7 และ 8 มม. ของพื้นที่เว้า แสดงให้เห็นว่าแผ่นกันกระสุนไม่สามารถต้านทานการเจาะจากกระสุนและไม่มีการสะท้อนเมื่อกระสุนกระทบตรงกลางของแผ่นเกราะ ตำแหน่งยิงซึ่งเล็งจากจุดศูนย์กลางด้วยรัศมี 7.5 มม. สามารถเปลี่ยนทิศทางการกระสุนเมื่อกระทบกับแผ่นกันกระสุน มันทะลุเข้าไปตรงกลางจานแล้วกระจัดกระจายเป็นชิ้นโลหะเล็กๆ ผลของแบบจำลองจำลองทั้ง 2 แบบนี้ระบุว่าแผ่นกันกระสุนไม่สามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนได้ การวิเคราะห์พารามิเตอร์นี้สามารถใช้ในการวิเคราะห์ทิศทางการหักเหของกระสุนเพื่อลดความเสียหายจากการทำลายกระสุน 7.62 มม. พารามิเตอร์ที่สำคัญมุ่งเน้นไปที่ประเภทวัสดุที่ใช้ทำแผ่นกันกระสุนและความหนาของแผ่นกันกระสุน

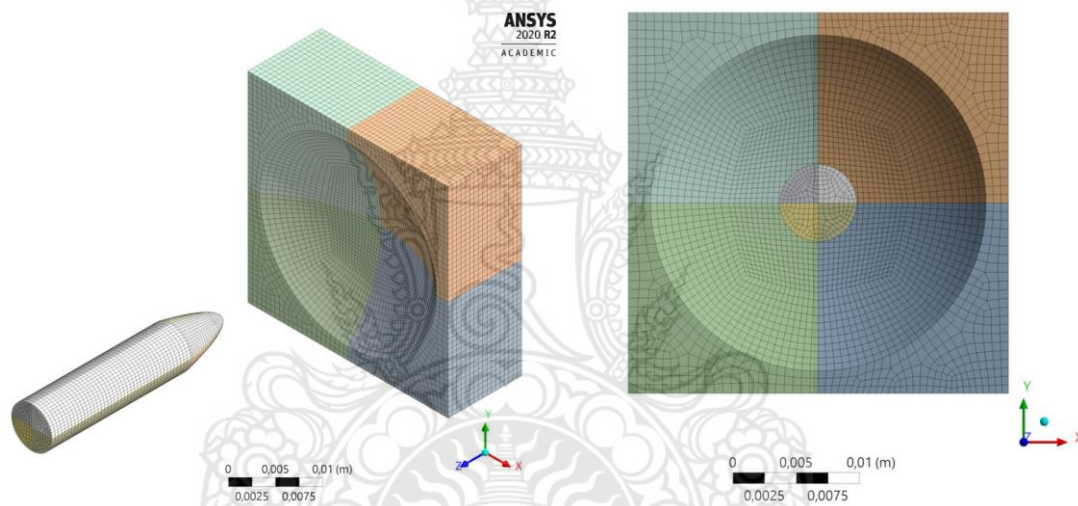
จากรูปที่ 4.22 ตำแหน่งการกระทบของกระสุนตั้งอยู่ในพื้นที่เว้าและเบี่ยงเบนไปจากทิศทางการตรงกลางของแผ่นเกราะเว้า (พื้นที่เว้า) SKD11 สามารถต้านทานการเจาะทะลุได้เมื่อความลึกมากถึง 16 มม. ณ ตำแหน่งที่กระสุนปะทะกับของเว้าซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีค่าความชันสูง



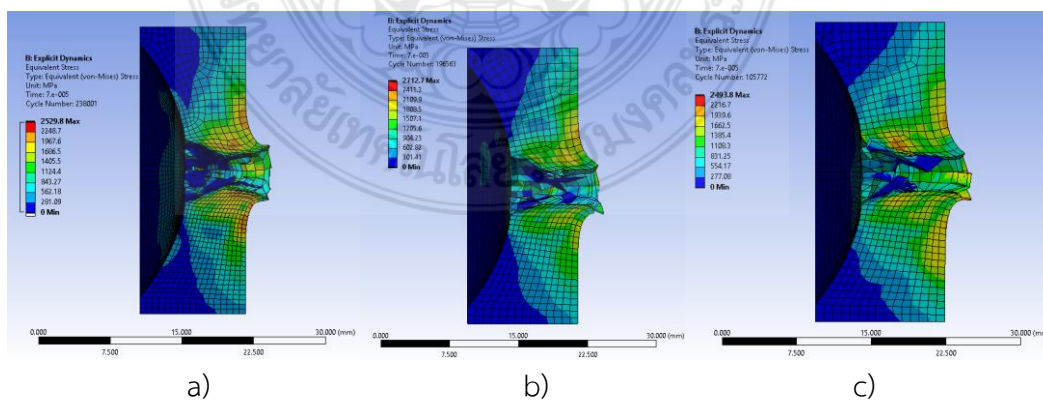
รูปที่ 4.17 แผ่นเกราะร่องยุบ



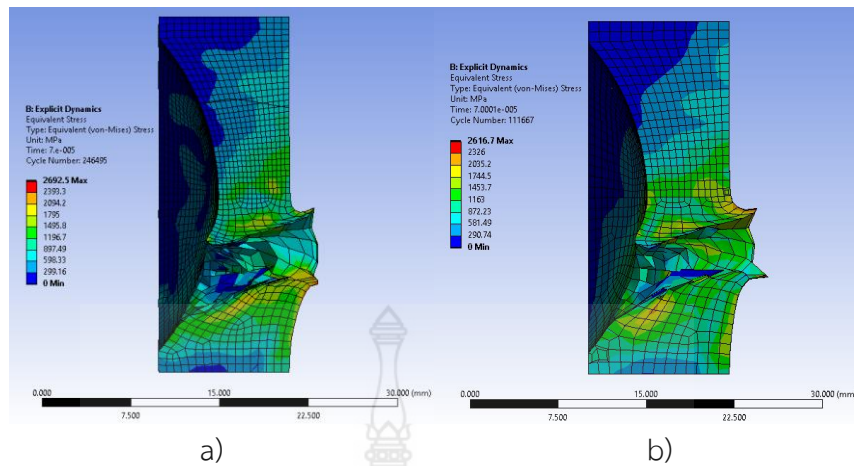
รูปที่ 4.18 โมเดลจำลองการยิง a) การจำลองเสี้ยนกระสุนไปที่กึ่งกลางของแผ่นและ b) การจำลองเสี้ยนกระสุนออกจากกึ่งกลางด้วยระยะ 7.5 มม.



รูปที่ 4.19 การแบ่งเอลิเมนต์และการปรับขนาดเอลิเมนต์

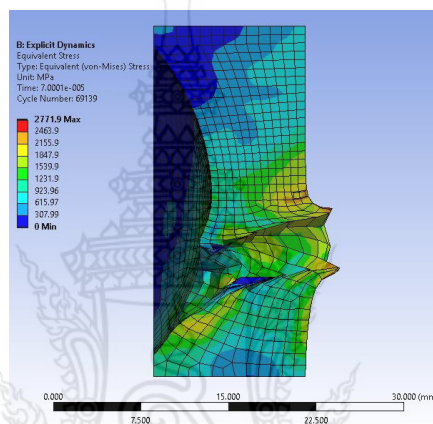


รูปที่ 4.20 รอยกระสุนเจาะแผ่นเว้าที่เวลา 0.07 ms และความกว้างแผ่นหนาที่ a) 11 mm b) 12 mm และ c) 13 mm



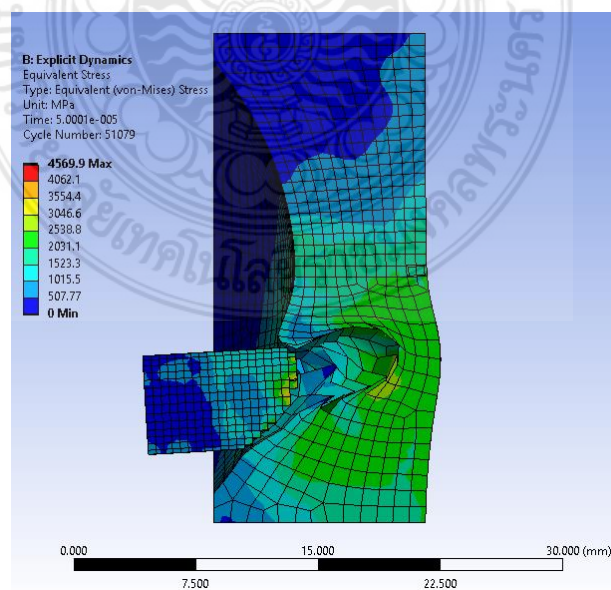
a)

b)



c)

รูปที่ 4.21 รอยกระสุนการเจาะทะลุของแผ่นแก้ว ณ เวลา 0.07 ms จากแบบจำลองที่ 2 a) ความหนาของแผ่น 11 มม. b) ความหนาของแผ่นเกราะ 12 มม. และ c) ความหนาของแผ่นเกราะ 13 มม.



รูปที่ 4.22 การหักเหของกระสุนเมื่อกระทบกับพื้นที่แก้ว

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

การสรุปผล คือการนำผลงานการวิจัยทั้งหมดที่ได้ทำ มาสรุปผลให้สั้นและต้องตอบต่อวัตถุประสงค์และประโยชน์ที่ได้รับ สำหรับการอภิปรายผลเป็นส่วนประกอบสำคัญของการทำรายงานการวิจัยเพื่อให้เหตุผลยืนยันว่าผลการวิจัยที่ได้มีความน่าเชื่อถือ มีความถูกต้อง สอดคล้องหรือไม่ สอดคล้องกับสมมติฐานการวิจัย โดยอาศัยแนวคิด ทฤษฎีและผลการวิจัยที่ผ่านมา โดยการนำเสนอข้อมูลในภาพรวมหรือสรุปเพียงคร่าวๆ ทั้งในส่วนของผลการศึกษาและสมมติฐานการวิจัย โดยมีเนื้อหาใจความสรุปที่สามารถตอบวัตถุประสงค์ได้ดังต่อไปนี้

1. การทำวิจัยแผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนด้วยวัสดุเชิงประกอบ ได้ตอบสนองต่อวัตถุประสงค์ ครบถ้วนทั้งหมด ประกอบด้วย 1) ได้ทำการออกแบบ วิเคราะห์ และกำหนดรูปแบบของแผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนที่เหมาะสมกับรถยนต์บรรทุกทุกประเภทเล็กติดเกราะ 2) ได้สร้างแผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนด้วยวัสดุเชิงประกอบสำหรับรถยนต์บรรทุกทุกประเภทเล็กติดเกราะ และ 3) ได้ผลการศึกษาความหนาแน่นของแผ่นเกราะจากกระบวนการอัดขึ้นรูปผง

2. การทำวิจัยอยู่ภายใต้ขอบเขตการวิจัยที่ต้องใช้ผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่เป็นผงขนาดระดับไมครอน โดยได้ศึกษาโครงสร้างและสมบัติของอลูมิเนียมออกไซด์ และใช้กระบวนการอัดขึ้นรูปในการขึ้นรูปแผ่นเกราะและใช้วิธีการเผาในในการทำให้เป็นแผ่นเกราะแข็ง ทั้งนี้ประโยชน์ที่เกิดขึ้นนั้นประกอบด้วย 1) ได้รูปแบบของแผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนและสามารถติดตั้งได้อย่างเหมาะสมกับรถยนต์บรรทุกทุกประเภทเล็กติดเกราะ 2) จากการจำลองการยิง พบว่าแผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนผ่านมาตรฐานสากล NIJ ระดับ 3 และ 3) ได้ผลงานตีพิมพ์ในงานสัมมนาทางวิชาการ

3. งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความหนาแน่นของกรีนคอมแพค ที่เป็นอลูมินาผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปด้วยแรงอัดสูงสุด 1,300 กิโลนิวตัน ในการศึกษาความหนาแน่นของกรีนคอมแพค ได้ศึกษาความหนาแน่นที่กระจายเชิงปริมาตร การวิเคราะห์ความหนาแน่นของกรีนคอมแพค จะอาศัยหลักการศึกษาเส้นทางการเคลื่อนตัวของอนุภาคผงในกระบวนการอัด โดยแบ่งชั้นของผงออกเป็นจำนวนชั้นต่างๆ และนำเส้นทางการเคลื่อนตัวของอนุภาคผงหรือเส้นไอโซไลน์ (Isoline) มาทำการวิเคราะห์หาค่าความหนาแน่นด้วยสมการของอาร์คิมิดีส แผ่นเกราะกรีนคอมแพค ด้วยวัสดุเซรามิกส์ถูกสร้างขึ้นมา 4 รูปแบบด้วยกัน ประกอบด้วย กรีนคอมแพคที่มีความหนา 15 มิลลิเมตร สำหรับแผ่นเกราะที่มีหน้าตัดเรียบและแผ่นเกราะที่มีหน้าตัดยวบและอีก 2 รูปแบบ คือ แผ่นเกราะที่มีความหนาสูงถึง 28 มิลลิเมตร ที่เป็นทั้งหน้าตัดเรียบและหน้าตัดยวบ ในการวิจัยได้ทำการศึกษาแผ่นเกราะที่มีความหนา

15 มิลลิเมตร และ 28 มิลลิเมตร เพื่อเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของความหนาแน่นเชิงปริมาตรว่ามีผลอย่างไร พบว่ายิ่งชิ้นงานมีความสูงหรือความหนาแน่นมากขึ้นเท่าไรจะส่งผลให้เกิดความหนาแน่นที่แตกต่างมากขึ้นเท่านั้น เป็นความหนาแน่นที่แตกต่างกันระหว่างด้านบนสุดและด้านล่างสุดของแกนอัด ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับลักษณะของกระบวนการอัดขึ้นรูปด้วยว่าจะเป็นการอัดแบบแกนเดี่ยวหรือการอัดแบบสองแกน ในกรณีที่เป็นการอัดแบบแกนเดี่ยวความหนาแน่นของอนุภาคผงจะมีค่าสูงมากภายใต้การอัดที่แกนอัดกำลังเคลื่อนที่อยู่ ส่วนแกนอัดที่ไม่ได้เคลื่อนที่หรือแกนอัดตัวล่างนั้น ความหนาแน่นของอนุภาคผงในบริเวณนั้นจะมีค่าน้อยกว่า นั้นหมายความว่าเมื่อไหร่ก็ตามที่นำกรีนคอมแพค เข้าสู่กระบวนการเผาผนึกจะส่งผลให้ได้ Net-shaping ที่มีรูปร่างไม่สม่ำเสมอมีการหดตัวสูงหรือมีการเสียรูปหลังการเผาผนึกสูงนั่นเอง

4. จากการศึกษาการกระจายความหนาแน่นเชิงปริมาตรนั้น พบว่าความหนาแน่นจะมีค่าสูงมากในบริเวณของอนุภาคผงที่อยู่ใกล้กับแกนอัดที่เคลื่อนที่ได้ เช่น ในกรณีการอัดแบบแกนเดียวนั้น หมายความว่า จะมีแกนอัดหนึ่งแกนอยู่กับที่ แกนอัดอีกตัวหนึ่งจะเป็นตัวเคลื่อนที่ อนุภาคผงที่อยู่ใต้แกนอัดที่เคลื่อนที่ที่มีความหนาแน่นที่สูง ในขณะที่อนุภาคผงที่อยู่บริเวณแกนอัดที่ไม่เคลื่อนที่จะมีความหนาแน่นต่ำ ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของความหนาแน่นในเชิงความยาวที่แตกต่างกันอย่างมาก ในกรณีที่เป็นการอัดแบบสองแกนแน่นอนว่าความหนาแน่นจะมีค่าสูงมากในบริเวณการอัดตัวบนและตัวล่าง แต่จะมีความหนาแน่นต่ำในบริเวณของอนุภาคที่อยู่ตรงกลางระหว่างแกนอัดตัวบนและแกนอัดตัวล่าง ผลของการอัดแบบสองแกนย่อมดีกว่าการอัดแบบแกนเดี่ยว แต่กระบวนการอัดแบบสองแกนก็มีความยุ่งยากและกระทำได้ยากกว่า

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในกระบวนการอัดขึ้นรูปผงเซรามิกส์ครั้งนี้พบว่าความหนาแน่นของกรีนคอมแพค มีความไม่สม่ำเสมอเชิงปริมาตร เพื่อที่จะลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคผลต่ออนุภาคผงที่เรียกว่า Interparticle และลดปัญหาความเสียดทานระหว่างอนุภาคของกับผนังแม่พิมพ์สามารถประยุกต์ใช้คลื่น Ultrasonic โดยการนำ Ultrasonic Transducer ต่อเข้าไปยังตัวเรือนของแม่พิมพ์ส่งผ่านคลื่นไปยังอนุภาคผงด้านในระหว่างการอัด และสามารถลดแรงเสียดทานต่างๆ ลง ได้อย่างมาก

งานวิจัยนี้ยังควรต้องเสริมเพิ่มเติมในเรื่องการทดสอบการยิงจริง ซึ่งต้องลงทุนในการวิจัยเพิ่มเติม สร้างแผ่นเกราะจำนวนมาก และทดสอบจริง เพื่อให้เกิดความน่าเชื่อถือเพิ่มขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] ธงชัย ฟองสมุทร, วิถีไฟไนต์เอลิเมนต์เบื้องต้น, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่: ห้างหุ้นส่วนจำกัด ดาราวรรณการพิมพ์ เชียงใหม่. 2549.
- [2] ชัยวัฒน์ ไชยมหาพฤกษ์, “แผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนด้วยวัสดุเชิงประกอบ,” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, 2561.
- [3] นวพล กลางทัพ, “การวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนบนโลหะด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์,” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, 2562.
- [4] ANSYS, Inc. Proprietary. (2009). Explicit Dynamics Chapter 9 Material Models. [Online]. Available: <https://www.scribd.com/doc/152222317/Explicit-Dynamics-Chapter-9-Material-Models#download>
- [5] Hubert W. Meyer, Jr. and David S. Kleponis, “An Analysis of Parameters for the Johnson-Cook Strength Model for 2-in-Thick Rolled Homogeneous Armor,” Army Research Laboratory, Jun. 2001.
- [6] Hubert W. Meyer, Jr., “A Modified Zerilli-Armstrong Constitutive Model Describing the Strength and Localizing Behavior of Ti-6Al-4V,” Army Research Laboratory, Sep. 2006.
- [7] H. W. Meyer and D. S. Kleponis, “Modeling the High Strain Rate behavior of Titanium Undergoing Ballistic Impact and Penetration,” *International Journal of Impact Engineering*, vol. 26, pp. 509-521, 2001.
- [8] Andrej Škrlec and Jernej Klemenc, “Estimating the Strain-Rate-Dependent Parameters of the Cowper-Symonds and Johnson-Cook Material Models using Taguchi Arrays,” *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 62, no. 4, pp. 220-230, 2016.
- [9] Singh, N.K., Cadoni, E., Singha, M.K., Gupta, N.K. “Mechanical behavior of a structural steel at different rates of loadings,” in *Proceedings of the International*

Symposium on Engineering under Uncertainty: Safety Assessment and Management, 2013, pp. 859-868.

- [10] Marais, S.T., Tait, R.B., Cloete, T.J., Nurick, G.N. "Material testing at high strain rate using the split Hopkinson pressure bar," *Latin American Journal of Solids and Structures*, vol. 1, no. 3, pp. 219-339, 2004.
- [11] Markiewicz, E., Ducrocq, P., Drazetic, P. "An inverse approach to determine the constitutive model parameters from axial crushing of thin-walled square tubes," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 21, no. 6, pp. 433-449, 1998.
- [12] Belingardi, G., Chiandussi, G., Ibba, A. "Identification of strain-rate sensitivity parameters of steel sheet by genetic algorithm optimisation. Brebbia, C.A. (ed), *High Performance Structures and Materials III*," WIT Press, Wessex Institute of Technology, pp. 201-210, 2006.
- [13] Rule, W.K. "A numerical scheme for extracting strength model coefficients from Taylor test data," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 19, no. 9-10, pp. 797-810, 1997.
- [14] Kurtaran H., Buyuk, M., Eskandarian, A., "Ballistic impact simulation of GT model vehicle door using finite element method," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 40, no. 2, pp. 113-121, 2003.
- [15] Schwer, L.E., Hacker, K., Poe, K. "Perforation of metal plates: laboratory experiments and numerical simulations," in *Proceedings to the 9th Annual LS DYNA Users Conference*, 2006.
- [16] Hallquist, J.O. (1998). *LS-DYNA Theoretical Manual*, Livermore Software Technology Corporation, Livermore.
- [17] J.O. Hallquist. (2007). *LS-DYNA Keyword User's Manual - Version 971*, Livermore Software Technology Corporation, Livermore.
- [18] B.A. Remington et al., "Materials Science under Extreme Conditions of Pressure and Strain Rate," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 3A, pp. 2587-2607, Sep. 2004.
- [19] Jianxiu Wang, Yao Yin and Chuanwen Luo, "Johnson-Holmquist-II (JH-2) Constitutive Model for Rock Materials: *Parameter Determination and Application in Tunnel Smooth Blasting*," *Appl. Sci.*, vol. 8, pp.1675, 2018.

- [20] ANSYS Inc. (2011). Explicit Dynamics. [Online]. Available: <https://www.ansys.com/-/media/ansys/corporate/resourcelibrary/brochure/ansys-explicit-dynamics-brochure-140.pdf>.
- [21] ANSYS Inc. (2011). Module 02: Introduction to Explicit Dynamics. ANSYS Explicit Dynamics, Release 19.2, 2018.
- [22] มาตรฐานยุทธโศปกรณ์กระทรวงกลาโหมว่าด้วยแผ่นเกราะกันกระสุน, คณะอนุกรรมการกำหนดมาตรฐานยุทธโศปกรณ์กระทรวงกลาโหม
- [23] Ballistic resistance of police body armor. NIJ Standard-0108.01. National Institute of Justice, U.S. Department of Justice, Washington, DC 20531.1985.
- [24] X. Wang, Z. Zak Fang and M. Koopman, “The relationship between the green density and as-sintered density of nano-tungsten compacts,” *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 53, pp. 134–138, Nov. 2015.
- [25] H. T. Gao, X. H. Liu, S. J. Zhang and J. L. Qi, “Synergistic effect of glass fibre and Al powder on the mechanical properties of glass-ceramics,” *Ceramics International*, vol. 44, no. 13, pp. 15167–15175, Sep. 2018.
- [26] C. C. Melo, A. L. I. Moraes, F. O. Rocco, F. S. Montilha and R. B. Canto, “A validation procedure for numerical models of ceramic powder pressing,” *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 38, no. 8, pp. 2928–2936, Jul. 2018.
- [27] O. Marou Alzouma, F. Marion and A.-C. Robisson, “The importance of the amount/thickness of die wall lubricant for UO₂ pellets pressing,” *Ceramics International*, vol. 44, no. 11, pp. 12073–12080, Aug. 2018.
- [28] S. Stupkiewicz, A. Piccolroaz and D. Bigoni, “Elastoplastic coupling to model cold ceramic powder compaction,” *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 34, no. 11, pp. 2839–2848, Sep. 2014.
- [29] V. M. Sglavo and N. Bellettati, “Ceramic laminates with improved mechanical reliability by tailoring the porosity of the constituting layers,” *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 37, no. 4, pp. 1643–1650, Apr. 2017.
- [30] C. Babelot, A. Bukaemskiy, S. Neumeier, G. Modolo and D. Bosbach, “Crystallization processes, compressibility, sinterability and mechanical properties of La-monazite-type ceramics,” *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 37, no. 4, pp. 1681–1688, Apr. 2017.

- [31] A. Michrafy, J. A. Dodds and M. S. Kadiri, "Wall friction in the compaction of pharmaceutical powders: measurement and effect on the density distribution," *Powder Technology*, vol. 148, no. 1, pp. 53–55, Oct. 2004.
- [32] F.S.d. Luz , F.D.C. Garcia Filho, M.S.Oliveira, L.F.C.Nascimento, and S.N.Monteiro, "Composites with Natural Fibers and Conventional Materials Applied in a Hard Armor: A Comparison," *Journal of polymers* , vol. 12, pp. 1–14, Aug. 2020.
- [33] E. Medvedovski, "Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. Part 2," *Ceramics International*, vol. 36, no. 7, pp. 2117–2127, Sep. 2010.
- [34] M. Garcia-Avilaa, M. Portanovab, and A. Rabiei, "Ballistic performance of a composite metal foam-ceramic armor system," *Procedia Materials Science*, vol. 4, pp. 2117–2127, Aug. 2014.
- [35] Luminita-Cristina ALLIL, "Theoretical study on adhesives used in ballistic protection structures and transparent armor," *Scientific Bulletin*, vol. 39, no. 1, pp. 86-91, Aug. 2015.
- [36] S.D.Bartus, J.T.Le, "The Effect of Strike Face Geometry on the Dynamic Delamination of Composite Back Plates," Army Research Laboratory, 2015.
- [37] Y. Gao, X. Feng, J. Liu, H. Fu, S. Li, and C. He, "Design and Ballistic Penetration of "SiC/Ti6Al4V/UHMWPE" Composite Armor," *Materials Science and Engineering*, pp. 104-111, Aug. 2015.
- [38] R.C.Batra, Anup Pydah, "Impact analysis of PEEK/ceramic/gelatin composite for finding behind the armor trauma," Department of Biomedical Engineering and Mechanics, Virginia Polytechnic institute and State University, 2019.
- [39] 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.

ไม่มีเนื้อหาจากต้นฉบับ



ประวัติการศึกษาและการทำงาน



ชื่อ นามสกุล	นายณัฐพงศ์ มีसानู	
วัน เดือน ปีเกิด	1 มกราคม 2536	
ภูมิลำเนา	105/45 หมู่ 1 ตำบลบางชะแยง อำเภอเมือง จังหวัดปทุมธานี	
ประวัติการศึกษา		
วุฒิการศึกษา	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
มัธยมต้น	โรงเรียนนวมินทราชินูทิศ หอวัง นนทบุรี	2550
ปวช	วิทยาลัยเทคนิคปทุมธานี	2553
ปริญญาตรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2558
ตำแหน่งและสถานที่ทำงานปัจจุบัน		
วิศวกรเครื่องกล บริษัท เอสทีไอที จำกัด		