



การวิเคราะห์มุมเอียงและความหนาของแผ่นเกราะที่มีผลกระทบต่อ การต้านทานการเจาะทะลุของ
กระสุนบนแผ่นเกราะอลูมิเนียมและสแตนเลสด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
Analysis of the Inclination Angle and Thickness of the Armor Plate of the Bullet
Resistant on the Aluminum and Stainless Steel Plates by Finite Element Method

ว่าที่ร้อยโท ไมตรี ถาวรสิน
Acting Lt. Maitree Thawornsini

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



การวิเคราะห์มุมเอียงและความหนาของแผ่นเกราะที่มีผลกระทบต่อ การต้านทานการเจาะทะลุของ
กระสุนบนแผ่นเกราะอลูมิเนียมและสแตนเลสด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
Analysis of the Inclination Angle and Thickness of the Armor Plate of the Bullet
Resistant on the Aluminum and Stainless Steel Plates by Finite Element Method

ว่าที่ร้อยโท ไมตรี ถาวรสิน
Acting Lt. Maitree Thawornsini

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ชื่อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์หมุมเอียงและความหนาของแผ่นเกราะที่มีผลกระทบต่อ การต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนบนแผ่นเกราะอลูมิเนียมและสแตนเลส ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ชื่อ นามสกุล ว่าที่ร้อยโท ไมตรี ถาวรสิน

ชื่อปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะ วิศวกรรมศาสตร์

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่เรือตรี ดร.ทรงวุฒิ มงคลเลิศมณี


อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.ประกอบชาติภักต์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้ให้ความเห็นชอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แล้ว

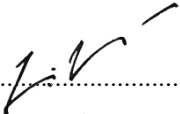

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำนาจ)


..... กรรมการ
(ดร.กฤษณ์ อภิญาวิศิษฐ์)


..... กรรมการ
(ดร.ประกอบชาติภักต์)


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

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร


..... รักษาการแทนคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ พันธุ์)

วันที่ 20 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2565

ชื่อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์หุ้มเอียงและความหนาของแผ่นเกราะที่มีผลกระทบต่อการต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนบนแผ่นเกราะอลูมิเนียมและสแตนเลส ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
ชื่อ นามสกุล	ว่าที่ร้อยโท ไมตรี ถาวรสิน
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
สาขาวิชา และคณะ	วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา	2564

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการวิเคราะห์หุ้มเอียงและความหนาของแผ่นเกราะที่มีผลกระทบต่อการต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนบนแผ่นเกราะอลูมิเนียมและสแตนเลส ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการวิจัยนี้จะเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างการทดสอบยิงเกราะกันกระสุนจริงกับการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ตามมาตรฐาน NIJ 3 ซึ่งในการสร้างรูปแบบของเกราะกันกระสุนและกระสุนนั้นได้ใช้โปรแกรม SolidWorks ในการสร้าง และในส่วนการจำลองรูปแบบการยิงเกราะนั้นใช้โปรแกรม Ansys/Explicit Dynamics วัสดุของกระสุน คือ ทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) ขนาด 7.62 มิลลิเมตร วัสดุเกราะกันกระสุนที่ใช้ในการจำลองนี้มี 3 ชนิดคือ 1) สแตนเลส SUS304 ขนาดความหนา 5 6 8 10 14 20 30 40 45 และ 55 มิลลิเมตร 2) อลูมิเนียม AL7075 ขนาดความหนา 6 8 10 และ 20 มิลลิเมตร และ 3) ทังสเตนคาร์ไบด์ ขนาดความหนา 6 8 และ 10 มิลลิเมตร โดยวัสดุทั้ง 3 ชนิดนี้ มีขนาดความกว้าง x ความยาว คือ 300 x 300 มิลลิเมตร รูปแบบการจำลองแบ่งเป็น 2 รูปแบบ คือ รูปแบบที่ 1 จำลองการยิงทีละแผ่น และรูปแบบที่ 2 จำลองการยิงแบบซ้อนแผ่นกัน 2 ชั้น โดยไม่มีช่องว่างระหว่างแผ่น ซึ่งแผ่นหน้าเป็นสแตนเลส แผ่นหลังเป็นอลูมิเนียม และแผ่นหน้าเป็นทังสเตนคาร์ไบด์ แผ่นหลังเป็นสแตนเลส มุมองศาของการยิงเกราะกันกระสุนนั้นมีมุม 0 30 และ 45 องศา ซึ่งผลที่ได้คือ สแตนเลส 1 แผ่น ที่มีความหนา 30 มิลลิเมตร ขึ้นไปมีความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุของกระสุน ส่วนเกราะ 2 ชั้น วัสดุหน้าสแตนเลส มีความหนา 20 มิลลิเมตร และวัสดุเกราะแผ่นหลัง คือ อลูมิเนียมที่มีความหนา 8 มิลลิเมตร หรือวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์และสแตนเลสซึ่งวัสดุทั้งแผ่นหน้าและแผ่นหลังมีความหนาเท่ากัน 16 มิลลิเมตร ก็สามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนได้ในขณะเดียวกันที่มุมมองที่มากขึ้นนั้น ส่งผลให้แผ่นเกราะกันกระสุนมีความสามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนเพิ่มขึ้นไปด้วย

คำสำคัญ : เกราะกันกระสุน, แผ่นเกราะ, วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Thesis title	Analysis of the Inclination Angle and Thickness of the Armor Plate of the Bullet Resistant on the Aluminum and Stainless Steel Plates by Finite Element Method
Author	Acting Lt. Maitree Thawornsin
Degree	Master of Engineering (Mechanical Engineering)
Major program	Mechanical Engineering Faculty of Engineering
Academic Year	2021

ABSTRACT

This thesis was an analysis of the significance of angle of inclination and the thickness of the armor plate on the penetration resistance of bullets on aluminum and stainless steel armor plates, determined by the finite element method. In this study, the information results obtained from actual firing of bulletproof armor and the finite element simulation according to NIJ 3 standards were compared to create a pattern of bulletproof and bulletproof armor using the SolidWorks program. The simulation model of the armor shooting was created by the Ansys/Explicit Dynamics program. The bullet material was 7.62 mm tungsten carbide (WC). There were three plate types used in the simulation were made of different bulletproof armor materials: 1) stainless steel SUS304 using for the plate thickness of 5, 6, 8, 10, 14, 20, 30, 40, 45, and 55 mm. 2) aluminum AL7075 using for the plate thicknesses of 6, 8, 10, and 20 mm. Additionally, 3) tungsten carbide using for the plate thicknesses of 6, 8, and 10 mm. Each of these plates had a width x length of 300 x 300 mm. The simulation models were divided into two types: Type I, a simulation firing at one plate at a time. Type II, a simulation firing at two layered plates stacked together without any gaps between plates. The front and the back plates, made of stainless steel and aluminum, respectively, or tungsten carbide and stainless steel, respectively, were determined. The angles of firing at bulletproof armor were set at 0, 30, and 45 degrees. The output results were that in Type I, the stainless-steel plate with a thickness of 30 mm or more could resist the penetration of bullets. However, in Type II, 2 stacked layers of the armor plates using the front stainless plate with a thickness of only 20 mm and the back aluminum plate with a thickness of only 8 mm could provide the same constructive results as those of tungsten carbide and stainless steel plates for the front and back plates, with both thickness setting at 16 mm. All of them showed the resistance of the penetration to the bullets. More observation was that the increases in angles, as a result, enhanced more resistance of the bulletproof plates to bullet penetration.

Keywords : Bulletproof Armor, Armor Plates, Finite Element Method

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดีจากความอนุเคราะห์ ความกรุณาเมตตาและความช่วยเหลือในทุกด้านจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่เรือตรี ดร.ทรงวุฒิ มงคลเลิศมณี อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และอาจารย์ ดร.ประกอบ ชาติภักต์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่เป็นกรรมการคุมสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งกรุณามอบความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ การแก้ปัญหาต่าง ๆ ตลอดจนตรวจสอบวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงยิ่งไว้ ณ โอกาสนี้

กราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำนาจรค ผู้ซึ่งกรุณาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.กฤษณ์ อภิญาวิศิษฐ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์เป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งทั้งสองท่านได้ให้ความรู้และการถ่ายทอดประสบการณ์ ตลอดจนตรวจสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมให้คำแนะนำ ความรู้และแนวความคิดในด้านต่าง ๆ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อผู้เขียนเป็นอย่างมาก

กราบขอบพระคุณคณาจารย์ คุณครูทุกท่านที่อำนวยความสะดวกให้เกิดวิชาความรู้ อบรมสั่งสอน แนะนำตักเตือนผู้เขียนจนมีวันนี้

กราบขอบพระคุณคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล รวมถึงเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องมือเพื่อใช้ในการทำวิจัยในครั้งนี้ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี

กราบขอบพระคุณบิดา มารดา สมาชิกในครอบครัว ที่คอยให้การส่งเสริม สนับสนุนด้านทุนทรัพย์และกำลังใจ ให้เป็นแรงผลักดันผู้เขียนทั้งในด้านการเรียน การดำเนินชีวิตด้วยดีมาโดยตลอด

ท้ายที่สุด ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะมีประโยชน์สำหรับผู้อ่านไม่มากนักน้อยต่อไป

ว่าที่ร้อยโท ไมตรี ถาวรสิน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของโครงการ	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	4
1.5 สถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรม	
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
2.2 วัสดุแผ่นเกราะโลหะ	13
2.3 มาตรฐานการทดสอบแผ่นเกราะกันกระสุน	26
2.4 โปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง	28
2.5 การทบทวนวรรณกรรม	29
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	
3.1 ระเบียบวิธีวิจัย	45
3.2 วิธีการออกแบบการจำลองด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์	47
3.3 การตั้งค่ากำหนดสมบัติของการจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS	50
3.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Solve-processing)	60
3.5 สมรรถนะเครื่องคอมพิวเตอร์ในการประมวลผล	64
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	
4.1 การเปรียบเทียบการทดลองจริงและการทดลองด้วยโปรแกรม ANSYS	65

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ผลการจำลองรูปแบบความเสียหายและความสามารถในการต้านทานการเจาะ ทะลุแผ่นเกราะกันกระสุนตามมาตรฐาน NIJ 3 ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิ เมนต์	69
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผล	90
5.2 ข้อเสนอแนะ	91
เอกสารอ้างอิง	93
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	97



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติและพารามิเตอร์ JH ของทั้งสแตนคาร์ไบด์	25
2.2 สมบัติและพารามิเตอร์ของ SUS304	26
2.3 มาตรฐาน NIJ (National Institute of Justice)	27
2.4 พลังงานในการเคลื่อนที่ของกระสุนปืนที่ใช้ทดสอบเสื้อเกราะ	27
3.1 สมบัติของเกราะกันกระสุนวัสดุ SUS304	52
3.2 สมบัติของเกราะกันกระสุนวัสดุอลูมิเนียม (AL-7075-T6)	53
3.3 สมบัติของกระสุนวัสดุทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC)	53
4.1 ผลความเสียหายและความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุที่มุมปะทะ 0 องศา	70
4.2 ผลความเสียหายและความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุที่มุมปะทะ 30 องศา	76
4.3 ผลความเสียหายและความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุที่มุมปะทะ 45 องศา	79
4.4 Number of node and element	82
4.5 ผลความเสียหายและความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุที่มุมปะทะ 0 องศา วัสดุ Tungsten carbide	82
4.6 ผลความเสียหายและความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุที่มุมปะทะ 0 องศา วัสดุ SUS304	84
4.7 ผลความเสียหายและความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุที่มุมปะทะ 0 องศา วัสดุ ทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC) กับ สแตนเลส SUS304	86

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ลักษณะเสื่อเกราะกันกระสุน	1
1.2 ลักษณะแผ่นเกราะกันกระสุน	2
1.3 ลักษณะกระสุน ขนาด 7.62X51 มิลลิเมตร	3
2.1 ลักษณะความเค้นใน 3 มิติ	7
2.2 เอลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า	9
2.3 การผลิตอลูมิเนียม	15
2.4 แผ่นอลูมิเนียมพร้อมใช้งาน	15
2.5 ตัวอย่างการสึกกร่อนและความเสียหายของวาล์วไอเสียในเครื่องยนต์	17
2.6 สมบัติของคาร์ไบด์	18
2.7 ผลการทดลองชุดเกราะผสมเซรามิกสองชั้น	30
2.8 การทดลองประสิทธิภาพการเจาะทะลุของกระสุนปืนคอมโพลีตเซรามิก	30
2.9 การเปรียบเทียบผลการจำลองเชิงตัวเลขและการทดสอบยิงจริง	31
2.10 การออกแบบมุมปลายของการทะลุออกของกระสุนแบบอลูมิเนียมทรงกรวย	32
2.11 การทดสอบการทะลุออกของกระสุนปืนบนแผ่นเหล็กเป้าหมาย	34
2.12 รูปแบบความเสียหายของแผ่นเกราะจากการเปลี่ยนแปลงรูปทรงปลายกระสุน	34
2.13 การทดสอบยิงกระสุนขนาด 9 มิลลิเมตร ผ่านแผ่นเหล็กกล้า AISI1008	35
2.14 การเปรียบเทียบผลการทดสอบและการจำลองเชิงตัวเลขบนเป้าหมาย	37
2.15 การทดสอบคอมโพลีตที่ใช้เส้นใย UHMWPE	38
2.16 ความเสียหายของเกราะกันกระสุนทั้งสแตนคาร์ไบด์	39
2.17 ความเสียหายของการยิงเจาะทะลุแผ่นลามิเนตโพลีเมอร์และอลูมิเนียม	40
2.18 ความเสียหายของเกราะกันกระสุนด้วยการทดสอบและการจำลองเชิงตัวเลข	41
2.19 ความต้านทานในการป้องกันกระแทกอุกกาบาตและเศษซากที่ความเร็วสูง	42
2.20 การทดสอบประสิทธิภาพกระสุนปืนเจาะทะลุเกราะเซรามิก 2 ชั้น	42
2.21 เกราะป้องกันที่ทำด้วยไม้ไผ่ผนวดยูธอนีเนียม	43
2.22 แบบจำลองเป้าหมายกระสุน	44
2.23 ผลความเสียหายของกระสุนเจาะเกราะที่สร้างจากแกนเหล็ก	44
3.1 ขั้นตอนกระบวนการวิจัย	46
3.2 กรอบการวิจัย	47

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3 การจำลองแบบแผ่นเกราะกันกระสุนแบบชั้นเดียว (a) Isometric view และ (b) Front view	48
3.4 การจำลองแบบแผ่นเกราะกันกระสุนแบบ 2 ชั้น โดยไม่มีช่องว่างระหว่างแผ่น (a) Isometric view และ (b) Front view	49
3.5 กระสุนวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ Tungsten carbide ขนาด 7.62 มิลลิเมตร	49
3.6 การเข้าคำสั่งการบน Workbench	50
3.7 การตั้งค่าของ Explicit Dynamics และชุดคำสั่ง Engineering Data	51
3.8 การเพิ่มวัสดุใหม่เพื่อหาค่าสมบัติต่าง ๆ	51
3.9 การหาค่า Johnson-Cook Strength Model ของวัสดุ	52
3.10 ตั้งค่าสมบัติโดยใช้ชุดคำสั่ง Geometry	54
3.11 นำแบบจำลองเข้าโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยคำสั่ง Generate	54
3.12 การกำหนดค่าการรวมวัตถุของแบบจำลองกระสุน	55
3.13 การสร้างเมชของแบบจำลองกระสุนปืนเสร็จสิ้นแล้ว	55
3.14 การกำหนดวัสดุให้กับแบบจำลองและจุดยึดสัมผัสของผิวชิ้นงานในคำสั่ง Model	56
3.15 การเลือกคำสั่งพฤติกรรมความยืดหยุ่น ในการจำลองให้เป็นแบบ Flexible	56
3.16 การกำหนดผิวสัมผัสของวัสดุจำลองของแผ่นเกราะชั้น 2 ชั้น	57
3.17 การตั้งค่าขนาด Element Size บริเวณหัวกระสุน	57
3.18 การกำหนดอัตราของความละเอียดด้วยคำสั่ง “Bias Factor” ของแผ่นเกราะ	57
3.19 รูปแบบเมชบนแผ่นเกราะกันกระสุนที่ใช้ในการจำลอง	58
3.20 คำสั่งกำหนดค่าความเร็วและทิศทางของกระสุน	58
3.21 ค่าของ “End Time” และ “Result Number of Points”	59
3.22 การยึดชิ้นงานแบบ Fixed Support	59
3.23 ขั้นตอนการเลือกคำสั่งแสดงผลการวิเคราะห์	60
3.24 ผลการประมวลผลของ Solver Output	61
3.25 ผลจากการประมวลผลที่ผิดปกติ	61
3.26 สถานะกราฟปกติ	62
3.27 สถานะที่กราฟมีความผิดปกติ	62

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.28	เส้นกราฟ Energy Error สถานะปกติ	62
3.29	ผลที่เป็นปกติของ Impulse ในแกน Z	63
3.30	Hourglass Energy ปกติ	64
4.1	กระบวนการทดสอบยิงจริงตามมาตรฐาน NIJ	65
4.2	แผ่นเกราะกันกระสุนวัสดุสแตนเลส SUS304 ที่ใช้ในการทดสอบจริง	66
4.3	แผ่นเกราะกันกระสุนวัสดุ SKD11 ที่ใช้ในการทดสอบจริง	66
4.4	การเจาะทะลุผ่านแผ่นเกราะกันกระสุนวัสดุสแตนเลส SUS304 ด้านหน้า	67
4.5	การเกิดรอยย่นด้านหลังของแผ่นเกราะกันกระสุนวัสดุสแตนเลส SUS304	67
4.6	ผลการจำลองด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์	68
4.7	เปรียบเทียบรอยย่นที่แผ่นเกราะด้านหลัง	68
4.8	ผลการทดสอบยิงจริงของเกราะกันกระสุนวัสดุ SKD11 และ SUS304	69
4.9	ผลการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์	69
4.10	ผลการจำลองความเสียหายแผ่นเกราะกันกระสุนวัสดุสแตนเลส SUS304 หนา 40 มิลลิเมตร มุมปะทะ 0 องศา	71
4.11	ผลการจำลองความเสียหายแผ่นเกราะกันกระสุนวัสดุสแตนเลส SUS304 หนา 45 มิลลิเมตร มุมปะทะ 0 องศา	72
4.12	ผลการจำลองความเสียหายแผ่นเกราะกันกระสุนวัสดุสแตนเลส SUS304 หนา 55 มิลลิเมตร มุมปะทะ 0 องศา	72
4.13	ผลการจำลองความเสียหายแผ่นเกราะกันกระสุนแผ่นด้านหน้าวัสดุสแตนเลส SUS304 หนา 6 มิลลิเมตร แผ่นด้านหลังวัสดุอลูมิเนียม AL7075 หนา 6 มิลลิเมตร มุมปะทะ 0 องศา	73
4.14	ผลการจำลองความเสียหายแผ่นเกราะกันกระสุนแผ่นด้านหน้าวัสดุสแตนเลส SUS304 หนา 8 มิลลิเมตร แผ่นด้านหลังวัสดุอลูมิเนียม AL7075 หนา 8 มิลลิเมตร มุมปะทะ 0 องศา	73
4.15	ผลการจำลองความเสียหายแผ่นเกราะกันกระสุนแผ่นด้านหน้าวัสดุสแตนเลส SUS304 หนา 10 มิลลิเมตร แผ่นด้านหลังวัสดุอลูมิเนียม AL7075 หนา 8 มิลลิเมตร มุมปะทะ 0 องศา	74

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.26 ผลการจำลองความเสียหายแผ่นเกราะกันกระสุนแผ่นด้านหน้าวัสดุสแตนเลส SUS304 หนา 20 มิลลิเมตร แผ่นด้านหลังวัสดุอลูมิเนียม AL7075 หนา 10 มิลลิเมตร มุมปะทะ 45 องศา	81
4.27 ที่ time step 13 ms (ก, ข, ค) ซ้าย-การเจาะทะลุของกระสุนเมื่อกระทบกับแผ่นเกราะ กลาง-เศษกระสุนเมื่อทะลุผ่านแผ่นเกราะ ขวา-การกระจายตัวของความเค้นที่เกิดเมื่อกระสุนทะลุผ่านแผ่นเกราะ	83
4.28 กราฟความเค้นเทียบ time step ของ WC ความหนา 6 8 และ 10 มิลลิเมตร	83
4.29 ที่ time step 20 ms (ก,ข,ค,ง) ซ้าย-การเจาะทะลุของกระสุนเมื่อกระทบกับแผ่นเกราะ กลาง-เศษกระสุนเมื่อทะลุผ่านแผ่นเกราะ ขวา-การกระจายตัวของความเค้นที่เกิดเมื่อกระสุนทะลุผ่านแผ่นเกราะ	85
4.30 ความหนา 10 8 6 และ 5 มิลลิเมตร ลักษณะรอยทะลุของแผ่นเกราะด้านหลัง (time step 20 ms)	85
4.31 ที่ time step 20 ms (ก, ข, ค, ง) ซ้าย-การเจาะทะลุของกระสุนเมื่อกระทบกับแผ่นเกราะ กลาง-เศษกระสุนเมื่อทะลุผ่านแผ่นเกราะ ขวา-การกระจายตัวของความเค้นที่เกิดเมื่อกระสุนทะลุผ่านแผ่นเกราะ	87
4.32 กราฟความเค้นเทียบ time step ของ WC และ SUS 304	87
4.33 ที่ time step 20 ms ซ้าย-ความหนา $T_1 = 12$ มิลลิเมตร $T_2 = 12$ มิลลิเมตร ขวา-ความหนา $T_1 = 14$ มิลลิเมตร $T_2 = 14$ มิลลิเมตร	88
4.34 ที่ time step 20 ms แผ่นเกราะเริ่มสามารถต้านทานการเจาะทะลุได้ที่ความหนาทั้ง 2 แผ่นเท่ากับ 16 มิลลิเมตร	88
4.35 กราฟความเค้นเทียบ time step ของ WC และ SUS 304	88
4.36 ซ้าย-ความหนา 12 มิลลิเมตร แผ่นเกราะ 2 ชั้น WC และ SUS 304 ขวา-ความหนา 12 มิลลิเมตร ของ mild steel M.A. Iqbal	89

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องด้วยในปัจจุบัน ด้านเทคโนโลยีวัสดุขั้นสูง (Advanced Materials) ได้มีการพัฒนาความก้าวหน้า เพื่อการประยุกต์ใช้งานในด้านวิศวกรรมเครื่องกลซึ่งได้มีการพัฒนาก้าวหน้าไปเป็นอย่างมาก โดยได้พัฒนาลงไปถึงในระดับโครงสร้างวัสดุที่มีความเสถียร แม่นยำ และเฉาะเจาะจงพร้อมทั้งมีประสิทธิภาพ มีเทคโนโลยีในระดับที่สามารถจัดเรียงอะตอมและก้าวล้ำไปในระดับนาโนเทคโนโลยี อันจะส่งผลให้เกิดสมบัติของวัสดุที่พิเศษเพื่อนำไปพิจารณาในการใช้งานทางด้านใดด้านหนึ่งโดยเฉพาะ ทั้งนี้ยังต้องมีการควบคุมคุณภาพในกระบวนการผลิตด้วย ในการวิจัยขั้นแนวหน้า (Frontier Research) ทางด้านวัสดุ ตัวอย่างเช่น นาโนคอมพอสิต วัสดุนาโนของคาร์บอน เส้นใยและวัสดุคอมพอสิต ไบโอบอลิเมอร์ หรือ อนุภาคผงระดับนาโน เป็นต้น ได้รับการพัฒนาและนำมาประยุกต์ใช้ในงานทางด้านความมั่นคง เพื่อรักษาไว้ซึ่งเอกราช ชีวิตและทรัพย์สินของประชาชน นวัตกรรมที่เกิดขึ้นจากการวิจัยจำนวนมากได้รับการพัฒนาต่อเนื่องและต่อยอดอย่างไม่หยุดยั้งหน่วยงานภาคการอุดมศึกษาเป็นหน่วยงานหนึ่งที่ทำงานวิจัยและตอบสนองต่อนโยบายของประเทศ สร้างนวัตกรรมที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง ทั้งนี้เพื่อสร้างเทคโนโลยีของตนเองและลดการนำเข้าจากต่างประเทศ

ในการรบ หรือการปฏิบัติหน้าที่ของเจ้าหน้าที่ทหารหรือตำรวจ สิ่งที่จะสามารถช่วย ลดการบาดเจ็บ ลดการเสียชีวิต ในขณะที่กำลังปฏิบัติหน้าที่ในกรณีที่มีการยิงต่อสู้กับคนร้าย คงจะหนีไม่พ้นเสื้อเกราะกันกระสุน ซึ่งเสื้อเกราะกันกระสุนนั้นจะมีแผ่นเกราะกันกระสุนใส่ไว้อยู่ด้านในอีกชั้น ดังรูปที่ 1.1 แผ่นเกราะกันกระสุนนั้นถือว่าเป็นอีกหนึ่งนวัตกรรมที่ได้ใช้องค์ความรู้ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์



รูปที่ 1.1 ลักษณะเสื้อเกราะกันกระสุน [1]

ในการปรับปรุงพัฒนา ทั้งในด้านการพัฒนาการออกแบบรูปร่างของแผ่นเกราะกันกระสุน โดยวัสดุที่นำมาประยุกต์ใช้งาน กระบวนการผลิต การประกอบและการกำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้การวิเคราะห์ เพื่อให้ได้แผ่นเกราะกันกระสุนที่มีประสิทธิภาพ ชนิดของแผ่นเกราะกันกระสุนมีมากมายหลายแบบ ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยในองค์ประกอบ หากมองในด้านการนำไปใช้อาจแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ 1. แผ่นเกราะที่นำมาใช้กับมนุษย์ ซึ่งจะมีน้ำหนักที่มนุษย์ยังสามารถแบกรับไว้ได้ขณะใช้งาน โดยปกติจะมีระดับมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 และ 2. แผ่นเกราะที่นำไปใช้กับยานพาหนะ ซึ่งมีน้ำหนักมากและไม่เหมาะสมกับการนำมาใช้งานกับมนุษย์ แต่เป็นการใช้งานกับยานพาหนะเพื่อป้องกันการโจมตีจากกระสุนได้สูงสุดถึงมาตรฐาน NIJ ระดับ 4 ในกรณีที่แบ่งตามชนิดของวัสดุสามารถแบ่งออกได้ดังนี้ 1. แผ่นเกราะเซรามิกส์ที่อาจต้องนำเส้นใยมาประกอบเข้าร่วมกับแผ่นเกราะด้วย 2. แผ่นเกราะโลหะกันกระสุนที่อาจผลิตขึ้นโดยนำโลหะหลายชนิดมาวางซ้อนกัน 3. แผ่นเกราะเส้นใยคอมโพสิต ทั้งที่เป็นเส้นใยสังเคราะห์และเส้นใยธรรมชาติ 4. แผ่นเกราะโปร่งแสง ซึ่งโดยทั่วไปเราจะเรียกแผ่นเกราะโปร่งแสงนี้ว่ากระฉากกันกระสุน และยังมี การแบ่งชนิดของแผ่นเกราะอีกแบบคือ 1. แผ่นเกราะอ่อน ซึ่งทำมาจากเส้นใยต่างๆ ประกอบเข้าด้วยกัน และ 2. แผ่นเกราะแข็ง เป็นต้น



รูปที่ 1.2 ลักษณะแผ่นเกราะกันกระสุน [2]

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยได้เลือกทำการวิเคราะห์หุ้มเอียงและความหนาของแผ่นเกราะที่มีผลกระทบต่อการใช้งานการเจาะทะลุของกระสุนบนแผ่นเกราะอลูมิเนียม สแตนเลส และ ทังสเตนคาร์ไบด์ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อการออกแบบพัฒนาเกราะกันกระสุนหรืออุปกรณ์ ให้มีศักยภาพสามารถป้องกันการทำลายล้างหรือการโจมตีจากฝ่ายตรงข้ามได้ เป็นการจำลองและคาดการณ์ความเสียหายที่เกิดจากการทำลายล้างของกระสุน ด้วยการจำลองการยิงตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 จะใช้กระสุนขนาด 7.62x51 มิลลิเมตร ความเร็วกระสุน 847 ± 9.1 m/s ดังแสดงในรูปที่ 1.3 เพื่อหาคำตอบของผลลัพธ์ที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนบนแผ่นเกราะอลูมิเนียม สแตนเลส และทังสเตนคาร์ไบด์ ซึ่งผลที่ได้รับจากการจำลอง วิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะทำให้สามารถลดระยะเวลาในการทดสอบจริง ลดงบประมาณในการ

วิจัยและสามารถนำผลจากการจำลองมาเปรียบเทียบการทดสอบจริงบางกรณี เพื่อวิเคราะห์ผลการแตกต่างระหว่างการทดสอบจริงกับการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) โดยเงื่อนไขในการออกแบบและวิเคราะห์ของงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 1. วัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ อลูมิเนียม สแตนเลส และ ทังสเตนคาร์ไบด์ 2. วิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Ansys/Explicit Dynamics 3. การจัดวางแผ่นเป็นแบบซ้อนแผ่น โดยไม่มีช่องว่างระหว่างแผ่นอย่างน้อย 1 แผ่น 4. พารามิเตอร์ที่สำคัญ คือ ความหนาของแผ่นอลูมิเนียม แผ่นสแตนเลส และทังสเตนคาร์ไบด์ ที่ต้องปรับเปลี่ยนจำนวนชั้นของแผ่นเกราะ และ 5. โมเดลสำหรับกระสุนปืนซึ่งทำจากทังสเตนคาร์ไบด์ ขนาด 7.62x51 มิลลิเมตร เพื่อการพิสูจน์ความถูกต้องจะใช้รูปแบบการ Pre-processing และ Solve- Processing เพื่อปรับปรุงพัฒนาต่อยอดผลการออกแบบและวิเคราะห์ของงานวิจัยที่ผ่านมา โดยมีความคาดหวังถึงผลลัพธ์ที่ได้รับคือ องค์กรความรู้ที่สามารถนำไปใช้ในการออกแบบและสร้างแผ่นเกราะกันกระสุนที่สามารถใช้งานได้ต่อไป



รูปที่ 1.3 ลักษณะกระสุน ขนาด 7.62X51 มิลลิเมตร [3]

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อวิเคราะห์มุมเอียงและความหนาของแผ่นเกราะที่มีผลกระทบต่อแผ่นเกราะกันกระสุน มาตรฐาน NIJ ระดับ 3
- 1.2.2 เพื่อวิเคราะห์รูปแบบความเสียหายและความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุของแผ่นเกราะอลูมิเนียม สแตนเลส และทังสเตนคาร์ไบด์ ตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1.3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์ ประกอบด้วย สแตนเลส SUS304 ความหนา 5 6 8 10 14 20 30 40 45 และ 55 มิลลิเมตร วัสดุอลูมิเนียม ความหนา 6 8 10 และ 20 มิลลิเมตร และ วัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ ความหนา 6 8 และ 10 มิลลิเมตร

- 1.3.2 วิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) โดยใช้โปรแกรม Ansys/Explicit Dynamics
- 1.3.3 การจัดวางแผ่นเป็นแบบซ้อนแผ่นอย่างน้อย 1 แผ่น โดยไม่มีช่องว่างระยะห่างระหว่างแผ่น
- 1.3.4 พารามิเตอร์ที่สำคัญคือ ความหนาของแผ่นอลูมิเนียม แผ่นสแตนเลส และแผ่นทังสเตนคาร์ไบด์ ที่ต้องปรับเปลี่ยน จำนวนชั้นของแผ่นเกราะ
- 1.3.5 โมเดลสำหรับกระสุนปืนทำจาก Tungsten Carbide ขนาด 7.62x51 มิลลิเมตร
- 1.3.6 การวิเคราะห์ทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์อ้างอิงข้อมูล ความเร็วของกระสุน และรูปแบบกระสุนตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 [10]
- 1.3.7 การกำหนด constraints จะดำเนินการยึดขอบทั้ง 4 ด้านของแผ่นเกราะเป็นแบบ Fixed เท่านั้น
- 1.3.8 แผ่นเกราะที่ใช้ในการจำลองมีขนาด 300x300 มิลลิเมตร
- 1.3.9 คอมพิวเตอร์ประสิทธิภาพสูงที่ใช้ในวิเคราะห์ กำหนดข้อมูลจำเพาะ
 - 1.3.9.1 หน่วยประมวลผล (CPU) AMD Ryzen Threadripper 2990WX 32 Cores
 - 1.3.9.2 Mainboard MEG X399 creation (MS-7B92)
 - 1.3.9.3 หน่วยความจำ (Memory) Type DDR4 size 96 Gbytes Channel # Quad NB Frequency Memory slot DD4-2132 (1066 MHz) corsair
 - 1.3.9.4 VGA: NVIDIA Quadro RTX 4000

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.4.1 ได้องค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานการเจาะของกระสุน
- 1.4.2 ได้ต้นแบบโมเดล 3 มิติ ของแผ่นเกราะโลหะกันกระสุนชนิดแผ่นซ้อน สำหรับแผ่นเกราะอลูมิเนียมและเกราะโลหะชนิดอื่นที่ผ่านมาตรฐานสากล NIJ ระดับ 3
- 1.4.3 ได้รูปแบบความเสียหายของแผ่นเกราะและความสามารถในการต้านทานของการเจาะทะลุของแผ่นเกราะอลูมิเนียม สแตนเลส และทังสเตนคาร์ไบด์
- 1.4.4 สามารถนำไปใช้ในการออกแบบและผลิตแผ่นเกราะโลหะกันกระสุนแบบแผ่นซ้อนได้
- 1.4.5 ได้ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการหรือวารสารวิจัย

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 แขวงวิริยะพยาบาล เขตดุสิต กรุงเทพฯ 10300

โทรศัพท์/โทรสาร: 0 2665 3777 ต่อ 6099

1.5.3 โรงงานวัตถุระเบิดทหาร กรมการอุตสาหกรรมทหาร ศูนย์การอุตสาหกรรมป้องกัน
ประเทศและพลังงานทหาร

199 หมู่ 4 ต.ย่านมัทรี อ.พยุหะคีรี จ.นครสวรรค์ 60130

โทร. 0 5627 8056



บทที่ 2

ทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรม

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [4]-[6]

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) คือ การวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรม การวิเคราะห์เกี่ยวกับโครงสร้าง (Structural) และอื่น ๆ ซึ่งวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความสามารถประมาณค่าผลเฉลยในลักษณะการแก้สมการเชิงพีชคณิตแทนการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ด้วยการแบ่งชิ้นงานออกเป็นชิ้นส่วนเล็ก ๆ (Element) ในปริมาณจำนวนที่จำกัด (Finite) ซึ่งค่าประมาณผลที่ได้คือคำตอบของจุดต่อระหว่างเอลิเมนต์หรือที่เรียกว่า โหนด (Node) โดยสามารถหาค่าผลเฉลยของทั้งโครงสร้างได้เมื่อนำแต่ละเอลิเมนต์มารวมกัน วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นยังสามารถแสดงค่าผลเฉลยของการเสียรูปและแรงที่กระทำ ณ จุดหรือโหนด ตลอดจนสามารถแสดงค่าความเค้นและความเครียดในแต่ละเอลิเมนต์ได้อีกด้วย ในการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ยังมีความจำเป็นต้องอาศัยความสัมพันธ์กับการเสียรูปและความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด เช่นตัวอย่างในมิติที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเสียรูปกับความเครียด ดังสมการที่ (2.1)

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

ในกรณีที่มีการเสียรูปน้อย (Small Displacement) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจะมีค่าตามสมการที่ (2.2) และเมตริกซ์สมบัติของวัสดุหาได้ตามสมการที่ (2.3)

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

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 เมตริกซ์สมบัติของวัสดุ

กรณีหาสทิพเนสเมทริกซ์สำหรับเอลิเมนต์แบบสปริง เมื่อค่านิจของสปริง (Stiffness) มีค่าเท่ากับ k รับแรงดึงเท่ากับ F สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำต่อชิ้นงานกับระยะสปริงยืดตัวได้ตามสมการที่ (2.4)

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

เมื่อนำเอาหลักการของสปริงตามสมการที่ (2.4) มาประยุกต์ใช้กับหลักการไฟไนต์เอลิเมนต์จะสามารถเขียนสมการที่ (2.5) ใหม่ในลักษณะของเมทริกซ์ได้เป็น

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

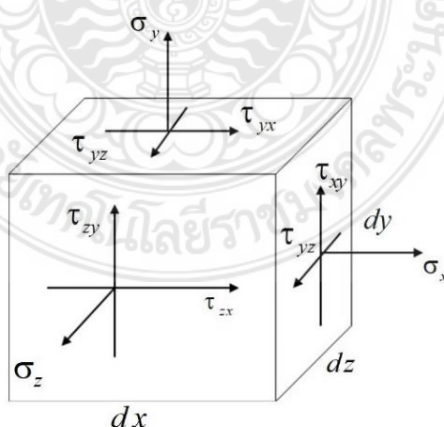
โดยที่ f' คือ เมทริกซ์ของแรงที่กระทำกับสปริง

k' คือ สทิพเนสเมทริกซ์ของสปริง

d' คือ เมทริกซ์ของระยะยืดหรือหดตัวของสปริง

สำหรับการวิเคราะห์เอลิเมนต์ในระบบ 3 มิตินั้น เอลิเมนต์ประเภทนี้จะให้ผลของคำตอบมากกว่าแบบ 2 มิติ หรือแบบแกนสมมาตร เอลิเมนต์แบบทรงสี่หน้า (Tetrahedron) เป็นเอลิเมนต์เบื้องต้นสำหรับ 3 มิติ ในส่วนนี้จะยกตัวอย่างจากหนังสือไฟไนต์เอลิเมนต์เบื้องต้นเพื่อง่ายต่อการทำความเข้าใจ โดยใช้ตัวอย่างจาก รศ.ดร.ธงชัย ฟองสมุทร หน้า 175-180 [6]

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



รูปที่ 2.1 ลักษณะความเค้นใน 3 มิติ [6]

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

ดังนั้น ความเค้นเฉือนจะเหลือแค่ 3 ตัวที่ต้องพิจารณาร่วมกับความเค้นตั้งฉากจะได้เป็น

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

และความเค้นที่เกิดขึ้นในเอลิเมนต์จะมีดังนี้

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

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

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

(2.9)

โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเท่ากับ

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

เมตริกซ์สมบัติของวัสดุจะมีค่าเป็น

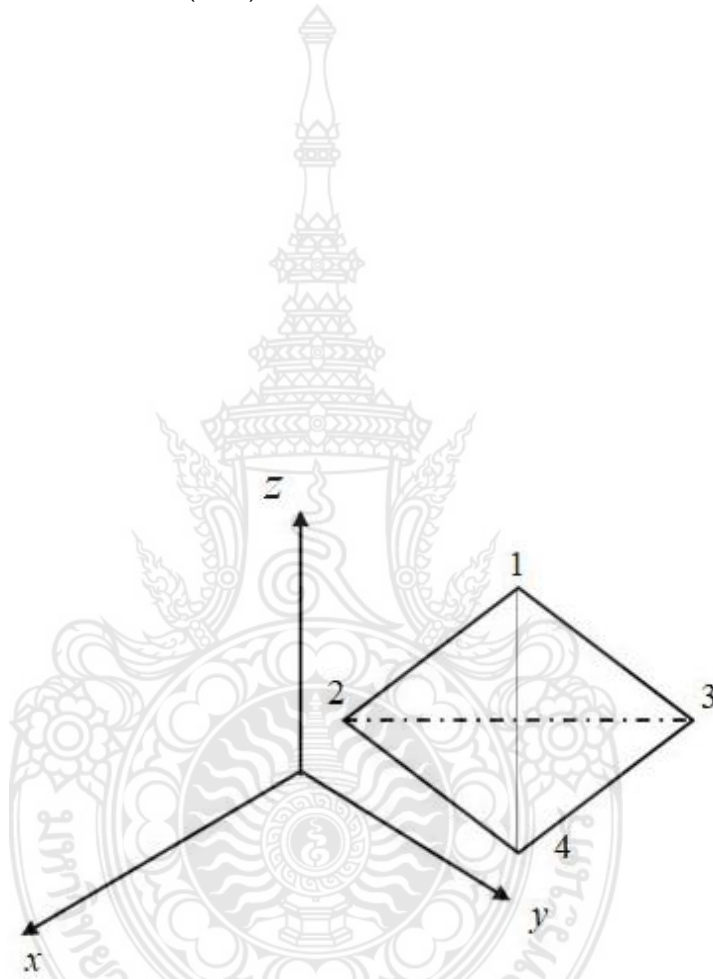
$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ & & & & & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

การหาสทิงเฟนสมเทริกซ์สำหรับเอลิเม้นต์แบบทรงสี่หน้า

ขั้นตอนที่ 1 เลือกประเภทของเอลิเม้นต์

พิจารณาเอลิเม้นต์ 3 มิติแบบสี่หน้า (Tetrahedron) ตามรูปที่ 2.2 ซึ่งภายใน 1 เอลิเม้นต์จะประกอบด้วย 4 โหนด แต่ละโหนดมีระดับความเสรี (Degree of Freedom) เท่ากับ 3 และเมเทริกซ์สำหรับการเสีयरูปมีค่าดังสมการที่ (2.12)

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



รูปที่ 2.2 เอลิเม้นต์รูปทรงสี่หน้า [6]

ขั้นตอนที่ 2 เลือกฟังก์ชันของการเสีयरูป

กำหนดให้การเสีयरูปทั้งหมดอยู่ในช่วงการยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic) ดังนั้นสามารถเขียนฟังก์ชันของการเสีयरูป (u , v และ w) ในแต่ละแนวได้ตามสมการที่ (2.13)

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

จากนั้นกำหนดให้ ψ' เป็นฟังก์ชันของการเสียรูปของ u , v และ w สำหรับการวิเคราะห์ที่สามารถทำได้เช่นเดียวกันกับกรณีของเอลิเมนต์สามเหลี่ยม จึงเขียนได้ตามสมการที่ (2.14)

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

โดยที่การจัดกลุ่มเมตริกซ์จะเป็น

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

ดังนั้น α_1 จะมีค่าตามสมการ 2.16

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

α_2 มีค่าตามสมการ 2.17

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

α_3 มีค่าตามสมการ 2.18

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

และ α_4 หาค่าได้ตามสมการ 2.19

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

สามารถที่จะเขียนรูปของเมตริกซ์สำหรับฟังก์ชันการเสียรูปเท่ากับ

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

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 ระบุความสัมพันธ์ของความเครียดและการเสียรูป และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดกับการเสียรูป ได้ดังนี้

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

หรือเขียนได้เป็น

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

โดยที่

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

และ

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

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

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

ดังนั้น

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

ขั้นตอนที่ 4 หาสมการสมมาตรและสมการสทิพเนส

เมื่อพิจารณาในรูปของสมการ $F = Kd$ จะได้ว่า

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

กรณีเป็นเอลิเมนต์แบบทรงสี่หน้า (Tetrahedron) จะมีค่าคงที่ ดังนั้นสามารถเขียนรูปสมการได้ดังนี้

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

โดยผลจากน้ำหนัก (Body Force)

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

โดยที่

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

โดยผลจากแรงที่ผิว (Surface Force) จาก

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

โดยที่

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

2.2 วัสดุแผ่นเกราะโลหะ

แผ่นเกราะโลหะจำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีความแข็งแรงสูงและสามารถป้องกันการเจาะทะลุหรือทำลายหัวกระสุนเมื่อหัวกระสุนกระแทกเข้ากับแผ่นเกราะโลหะได้ ปัจจุบันแผ่นเกราะโลหะมีการออกแบบโดยใช้วัสดุที่หลากหลาย เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานที่เฉพาะเจาะจง

2.2.1 อลูมิเนียม (Aluminum) [7]-[8]

อลูมิเนียม เป็นโลหะชนิดหนึ่งที่พบได้มากในธรรมชาติ ซึ่งจะพบในรูปของแร่อลูมิน่า มีการสกัดออกมาให้ได้อลูมิเนียมที่บริสุทธิ์ เนื้อของอลูมิเนียมนั้นจะมีสีขาวคล้ายกับเงิน มีความมันวาว สามารถชุบสีเพื่อเพิ่มความสวยงามได้ สมบัติของอลูมิเนียมมีความโดดเด่นดังนี้ ความคงทนแข็งแรงของอลูมิเนียมก็มีความโดดเด่นเทียบเท่าโลหะชนิดอื่น ๆ มีจุดหลอมละลายที่ 660 องศาเซลเซียส จึงสามารถนำมาขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีต่าง ๆ ได้ง่าย สามารถทนความร้อนสูง ทำความสะอาดได้ง่าย ไม่มีพิษต่อร่างกายและสิ่งแวดล้อม ทนทานต่อการเกิดสนิมและการผุกร่อน มีความหนาแน่นน้อยกว่าเหล็กถึง 3 เท่า มีความเหนียวสูง สามารถต้านทานต่อการแตกหักได้สูงมาก และมีค่าการนำไฟฟ้าร้อยละ 64.95 นอกเหนือจากสมบัติที่โดดเด่นแล้วนั้น อลูมิเนียมมีราคาถูก หาซื้อง่าย จึงนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมและเศรษฐกิจ โดยเฉพาะการนำมาใช้ผลิตอุปกรณ์ของอุตสาหกรรมมากมายรวมถึงการใช้งานทางการทหาร

สำหรับการผลิตอลูมิเนียม เริ่มต้นจากอุตสาหกรรมต้นน้ำในเมืองแร่ผลิตแร่บอกไซต์มีลักษณะเป็นก้อนแข็ง อัดตัวแน่น มีสีเหลืองออกสีน้ำตาลจนถึงน้ำตาลแดง การผลิตในต่างประเทศ เริ่มต้นด้วยการนำแร่บอกไซต์มาถลุงจนได้อลูมินาบริสุทธิ์ และหลอมเป็นแท่งจนได้อลูมิเนียมบริสุทธิ์ ลักษณะเป็นแท่ง ซึ่งอลูมิเนียมบริสุทธิ์ถูกใช้เป็นตัวดิบในการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ส่วนเศษอลูมิเนียมเก่าสามารถนำมาหลอมเป็นแท่งอลูมิเนียมบริสุทธิ์ด้วยการแยกสกัดออกจากอลูมินาจากการถลุงด้วยไฟฟ้าในเตาหลอมไฟฟ้าขนาดใหญ่ โดยอลูมิเนียมบริสุทธิ์ถูกแยกตัวออกจากอลูมินาและตกลงสู่ด้านล่างของเตาหลอม สำหรับในประเทศไทยจะไม่สามารถผลิตอลูมิเนียมจากแหล่งแร่ต้นน้ำได้ ซึ่ง

สามารถทำได้เพียงผลิตอลูมิเนียมบริสุทธิ์จากการหลอมเศษเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่เท่านั้น [8] สำหรับการผลิตอลูมิเนียมแสดงตามรูปที่ 2.3 ส่วนแผ่นอลูมิเนียมพร้อมใช้งานแสดงตามรูปที่ 2.4 ตามลำดับในกรณีการจัดลำดับของอลูมิเนียมของสมาคมอลูมิเนียมแห่งสหรัฐอเมริกา (JIS) ดังนี้ [8]

2.2.1.1. อลูมิเนียมความบริสุทธิ์มากกว่า 99.00 % AL แทนด้วย 1XXX เหมาะสำหรับการทำงานที่อ่อนแอ สำหรับงานอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการใช้เป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้า งานที่ต้องการการขึ้นรูปจากสมบัติความทนทานต่ำ ง่ายต่อการแปรรูป และทนต่อการกัดกร่อนได้ดีเช่น อลูมิเนียม AA1100 และ AA1050 เป็นต้น

2.2.1.2. อลูมิเนียมผสมทองแดง หรือ Copper (Cu) Al-Cu แทนด้วย 2XXX เหมาะสำหรับนำไปใช้งานทางด้านความร้อน เนื่องจากทองแดงสามารถละลายได้สูงสุดร้อยละ 5.65 ภายใต้อุณหภูมิ 548 องศาเซลเซียส การหลอมละลายจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส การละลายของทองแดงเหลือเพียงร้อยละ 0.5 เท่านั้น ตัวอย่างเกรดของอลูมิเนียมผสมทองแดงที่ใช้งานคือ A2001 A2014 A2017 และ A2024

2.2.1.3. อลูมิเนียมผสมแมงกานีส หรือ Manganese (Mn) Al-Mn แทนด้วย 3XXX การเพิ่มของแร่แมงกานีสเพียงร้อยละ 1.2 จะสามารถได้วัสดุโลหะผสมที่ค่อนข้างมีความแข็งแรง หากแต่ยากต่อการแปรรูป ดังนั้น อลูมิเนียมผสมแมงกานีสจึงไม่เหมาะกับการนำไปใช้งานด้านการผลิตโครงสร้างที่ต้องการความทนทานได้แก่เกรด A3003

2.2.1.4. อลูมิเนียมผสมซิลิคอน หรือ Silicon (Si) Al-Si แทนด้วย 4XXX เป็นระดับที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานที่ต้องการความทนทานต่อความร้อนสูง เช่น ลูกสูบ กระจบอกสูบ ห้องเครื่อง และก้านสูบ เป็นต้น ซึ่งรหัสที่ใช้สำหรับระดับนี้ คือ A4032

2.2.1.5. อลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม หรือ Magnesium (Mg) Al-Mg แทนด้วย 5XXX จากสมบัติความสามารถในการละลายและการหลอมรวมร่วมกับวัสดุอื่นได้ดีของแร่แมกนีเซียม จึงเหมาะกับการใช้งานที่เกี่ยวข้องกับความแข็งแรงทนทาน เช่น ล้อแม็กซ์ ซึ่งใช้เกรดดังนี้ A5052 A5056 และ A5083

2.2.1.6. อลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม Magnesium (Mg) และซิลิคอน หรือ Silicon (Si) Al-Mg-Si แทนด้วย 6XXX เป็นอลูมิเนียมผสมที่มีสัดส่วนและปริมาตรโดยทั่วไปแมกนีเซียมอยู่ที่ประมาณร้อยละ 0.6-1.2 และซิลิคอนร้อยละประมาณ 0.4-1.3 ได้แก่ A6061 และ A6063

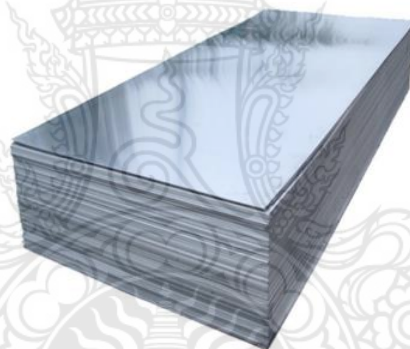
2.2.1.7. อลูมิเนียมผสมสังกะสี หรือ Zinc (Zn) Al-Zn แทนด้วย 7XXX มีสมบัติเด่นในด้านความแข็งแรงและมีความทนทานสูงสุดในกลุ่มอลูมิเนียมอัลลอยทั้งหมด สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านโครงสร้างขนาดใหญ่และการผลิตยานอวกาศ เป็นต้น ซึ่งอยู่ในระดับหรือเกรด A7075

2.2.1.8. อลูมิเนียมผสมกับธาตุอื่น ๆ เช่น นิกเกิล Nickel (Ni) ไทเทเนียม Titanium (Ti) โครเมียม Chromium (Cr) บิสมัท bismuth (Bi) และตะกั่ว Lead (Pb) แทนด้วย 8XXX

2.2.1.9. อลูมิเนียม 9XXX ยังไม่มีใช้



รูปที่ 2.3 การผลิตอลูมิเนียม [8]



รูปที่ 2.4 แผ่นอลูมิเนียมพร้อมใช้งาน [8]

2.2.2 เหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steels) 304 [9]

เหล็กกล้าไร้สนิม เกิดจากการเติมธาตุโครเมียม (chromium) ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก ระหว่างกระบวนการหลอมเหล็ก มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มสมบัติที่ทนต่อการเกิดสนิม เป็นผลจากการหลอมโครเมียมที่ทำให้เกิดฟิล์มโครเมียม ออกไซด์ไฮดรอกไซด์ ($Cr_x O_y (OH)_z$) ปกคลุมผิวหน้าของเหล็ก ดังนั้นเนื้อของเหล็กจึงไม่สามารถทำปฏิกิริยากับอากาศส่งผลให้ไม่เกิดการเกิดเป็นสนิมที่บริเวณผิวหน้า เหล็กกล้าไร้สนิมสามารถแบ่งเป็น 5 ประเภท ตามลักษณะของโครงสร้างจุลภาค (microstructure) ได้แก่

2.2.2.1. เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก (Ferritic grade) เป็นเหล็กกล้าที่มีการผสมโครเมียม ในปริมาณร้อยละ 12-27 อยู่ในกลุ่มของ AISI 430 AISI 446 และ AISI 409 เป็นต้น ในกลุ่มนี้มีโครงสร้างจุลภาคเป็น เฟอร์ไรต์ (ferrite) ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานของเหล็กกล้าทั่วไป จึงไม่สามารถเพิ่มความแข็งแรงด้วยการชุบแข็ง (hardening) ได้ และยังคงสมบัติที่แม่เหล็กสามารถดูดติดได้

2.2.2.2. เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Austenitic grade) คือ กลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิมที่เติมธาตุนิเกิล (nickel) หรือธาตุ แมงกานีส (manganese) โครงสร้างจุลภาคแบบออสเทนไนต์จะมีสมบัติโดดเด่นด้านการยึดตัวสูงกว่าโครงสร้างแบบเฟอร์ไรต์ จึงสามารถขึ้นรูปได้ และไม่มีสมบัติเป็นแม่เหล็ก เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในเกรด AISI 304 304L 316 และ 316L เป็นต้น

2.2.2.3. เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก (Martensitic grade) มีลักษณะคล้ายคลึงกับเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก หากแต่มีปริมาณธาตุคาร์บอนที่สูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก สามารถชุบแข็ง (hardening) เพิ่มความแข็งแรงได้ ทั้งนี้ หลังการชุบแข็งจะมีโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ (martensite) ทำให้มีปริมาณคาร์บอนที่สูงจึงทำให้ความต้านทานต่อการกัดกร่อนลดลง ดังนั้น การใช้งานจึงต้องคำนึงถึงเหตุผลดังกล่าวด้วย อย่างไรก็ตาม เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกสามารถใช้งานกับในสารละลายที่มีการกัดกร่อนไม่สูงมากนักหรือในสารละลายที่เป็นกลางได้ เช่น สปริง ลูกปืน เฟือง และเพลลา เป็นต้น โดยทั่วไปเกรดที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย เช่น AISI 403 และ AISI 420

2.2.2.4. เหล็กกล้าไร้สนิมสองเฟส (Duplex grade) เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีความแข็งแรงและความทนทานต่อการกัดกร่อนสูง มีความแข็งแรงสูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก ออสเทนนิติก จึงทำให้เหล็กกล้าในกลุ่มนี้มีราคาแพง ตัวอย่างของกลุ่มนี้ คือ AISI 329

2.2.2.5. เหล็กกล้าไร้สนิมแบบตกผลึกแข็ง (Precipitation-hardening grade: PH grade) เป็นกลุ่มที่มีความโดดเด่นด้านการคงรูปหรือมีการบิดเบี้ยวน้อยภายหลังจากกระบวนการอบชุบ เนื่องจากเกิดการตกผลึกของเฟสต่าง ๆ เช่น Ni_3Al , Ni_3Ti และ Ni_3Cu ภายในเนื้อวัสดุที่มีโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (เกรด AISI 17-4 PH) โครงสร้างกึ่งออสเทนไนต์ (เกรด AISI 17-7 PH) หรือโครงสร้างออสเทนไนต์ (เกรด AISI 600) อย่างไรก็ตาม เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้นิยมใช้งานในประเทศไทยน้อยมาก

เหล็กกล้าไร้สนิมทั้ง 5 ประเภทที่กล่าวถึงข้างต้น ส่วนใหญ่แล้วจะถูกนำไปใช้งาน 2 ลักษณะ คือ งานสำหรับทนการกัดกร่อน และงานสำหรับทนความร้อน โดยมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น (Japanese Industrial Standard: JIS) แบ่งแยกเหล็กกล้าไร้สนิมทั้ง 2 ลักษณะ ด้ยการใช้รหัส SUS และ SUH สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมทนการกัดกร่อนและทนความร้อน ตามลำดับ รหัส SUH จะใช้คำอธิบายโดยรวมว่า heat resisting steels ในขณะที่รหัส SUS จะใช้คำ อธิบายว่า stainless steels จากเหตุดังกล่าวนี้ จึงนิยมมุ่งเน้นไปที่เหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับการใช้งานที่ทนการกัดกร่อนเป็นส่วนใหญ่มากกว่างานทนความร้อน

การใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับงานทนการกัดกร่อน มีวัตถุประสงค์เพื่อความสะอาดของพื้นผิวเป็นสำคัญ ดังนั้นเหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับงานทนการกัดกร่อน จึงสามารถทนต่ออุณหภูมิได้ในระดับสูงตามไปด้วย เช่น การใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304 หรือ 304H สำหรับงานท่อไอน้ำ (boiler tube) ที่มีอุณหภูมิสูงถึง 800 °C แต่จุดด้อยที่สำคัญของเหล็กกล้าไร้สนิมทนการกัดกร่อน

เมื่อนำไปใช้งานที่มีอุณหภูมิสูงคือ มีความแข็งแรง (strength) และความแข็ง (hardness) ที่ต่ำกว่า เหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับงานทนความร้อนโดยตรง แต่สามารถเผื่อขนาดความหนาของชิ้นงานเพื่อชดเชยได้ แต่ในกรณีความแข็งของเนื้อเหล็กถือเป็นเรื่องยากที่จะชดเชยได้ ตัวอย่างเช่น การใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับงานทนการกัดกร่อนและงานทนความร้อน คือ การผลิตชิ้นส่วนวาล์วไอเสียที่ใช้กับเครื่องยนต์เบนซินจากเหล็กกล้าไร้สนิมรหัส SUS และ SUH วาล์วไอเสียของเครื่องยนต์เบนซิน (ไอเสียมีอุณหภูมิสูงกว่า 800 °C) จะผลิตจากเหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับงานทนความร้อน โดยใช้เกรด SUH 31 ซึ่งชิ้นส่วนดังกล่าวสามารถทนความร้อนและการสึกกร่อนจากไอเสียได้สูง ทำให้เครื่องยนต์สามารถเปลี่ยนไปใช้แก๊สธรรมชาติที่มีความร้อนสูงขึ้นและไม่เป็นปัญหากับชิ้นส่วนดังกล่าว แต่ในปัจจุบัน เครื่องยนต์บางยี่ห้อได้เปลี่ยนไปใช้วาล์วไอเสียที่ผลิตจากเหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับงานทนการกัดกร่อน เช่น เกรด SUS 304 ซึ่งทนความร้อนและการเสียดสีได้ต่ำกว่าเกรด SUH 31 จึงทำให้เกิดปัญหาวาล์วสึกหรือวาล์วทะลุได้โดยง่ายเมื่อเครื่องยนต์ถูกปรับเปลี่ยนไปใช้แก๊สธรรมชาติตามรูปที่ 2.5

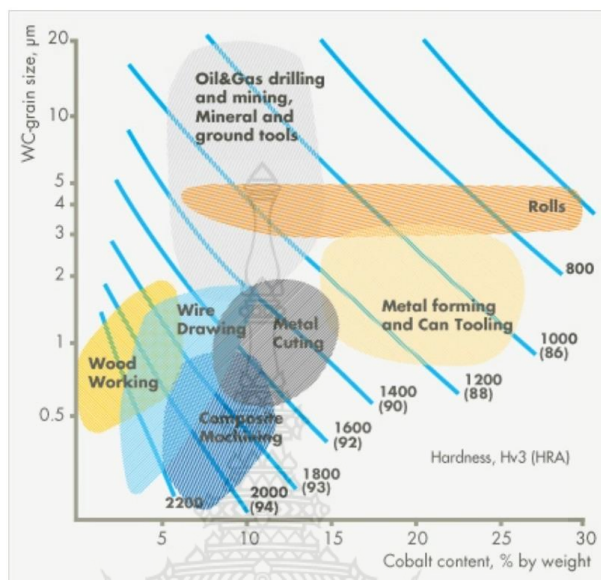


รูปที่ 2.5 ตัวอย่างการสึกกร่อนและความเสียหายของวาล์วไอเสียในเครื่องยนต์ [9]

2.2.3 ทังสเทนคาร์ไบด์ (WC) [47]

ทังสเทนคาร์ไบด์ (WC) เกิดจากการผสมกันของแร่ทังสเทนกับคาร์บอน ซึ่งถือเป็นวัสดุที่เป็นสิ่งสำคัญในวงการเครื่องมือตัดหลายประเภท เพราะมีสมบัติความแข็งสูงกว่า HSS (ค่าความแข็งประมาณ HV 2,600) และทนความร้อนได้สูง (จุดหลอมเหลวสูงถึง 2,870 องศา) ทังสเทนคาร์ไบด์ นั้นเริ่มพัฒนาขึ้นที่ประเทศเยอรมนี ประมาณปี ค.ศ. 1920 โดยบริษัท Osram โดยมีจุดประสงค์ที่ต้องการสร้างวัสดุใหม่ที่คล้ายเพชรเพื่อมาใช้ตัดชิ้นรูปอุปกรณ์เครื่องจักรต่างๆ ทังสเทนคาร์ไบด์นั้นผลิตขึ้นมาจากส่วนผสม 3 ส่วน ซึ่งส่วนแรกคือผงทังสเทนคาร์ไบด์ ส่วนที่สองคือตัวประสาน เช่น Co, Ni และส่วนที่สามคือสารประกอบอื่น ๆ ซึ่งเป็นตัวช่วยเสริม เช่น Tic, NbC มาตรฐานของทังสเทนคาร์ไบด์เครื่องมือตัดนั้นขึ้นกับ ขนาดของอนุภาคผง (Grind Size) ค่าไบต์(WC) และปริมาณของตัวประสาน Co สารตัวอื่น ๆ เป็นตัวช่วยเร่งสมบัติของคาร์ไบด์ให้ทนทานต่อการสึกหรอ หรือทนทานต่อการแตกหัก ให้ไปในทิศทางที่ต้องการในระหว่างกระบวนการผลิต ต้องเลือกว่าจะเน้นสมบัติด้านไหน ดังแสดงตามรูปที่ 2.6 จะเห็นว่าปริมาณ Co ที่มากขึ้นในทังสเทนคาร์ไบด์นั้นจะช่วยเพิ่มสมบัติความ

ทนทานต่อการแตกหัก แต่ก็จะไปลดความแข็งของคาร์ไบด์ลง ในทางกลับกันถ้าปริมาณ Co น้อยลง จะช่วยเพิ่มความทนทานต่อการสึกหรอ หรือแข็งขึ้นแต่จะเปราะหรือแตกหักได้ง่าย



รูปที่ 2.6 สมบัติของคาร์ไบด์ [47]

2.2.4 พฤติกรรมของวัสดุ

2.2.4.1 โมเดล Mie-Gruneisen พฤติกรรมของวัสดุอุทกพลศาสตร์ [13] ที่ผลกระทบถูกรวมไว้ในแบบจำลองวัสดุโดยกำหนดสมการ Mie-Gruneisen ของสถานะสำหรับแผ่นเกราะและกระสุนปืน Mie-Gruneisen equation of state ให้ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความเร็วช็อคและความเร็วของอนุภาค ซึ่งรูปแบบทั่วไปของ Mie-Gruneisen equation กำหนดสมการของสถานะโดย

$$P = P_{ref} + T\rho(I - I_{ref}) \quad (2.36)$$

โดยที่ P = ความดัน

ρ = ความหนาแน่น

I = พลังงานภายในที่เฉพาะเจาะจง

T = พารามิเตอร์ Gruneisen T เป็นฟังก์ชันของปริมาณเท่านั้น ความพอดีกับข้อมูล Hugoniot สามารถหาได้จากการพล็อตไฟล์ข้อมูลการทดลองในระนาบของแรงกระแทกและความเร็วของอนุภาคมีการกำหนดสมการเชิงเส้นที่แสดงถึงความพอดีกับข้อมูลการทดลองโดย

$$U = C + Su \quad (2.37)$$

สามารถกำหนดค่าได้จาก

$$P_{ref} = \frac{\rho_0 C^2 \eta}{(1 - S\eta)^2} \quad (2.38)$$

2.2.4.2 โมเดลของ Johnson Holmquist [14] คำอธิบายของแบบจำลอง Johnson Holmquist เป็นการทำนายพฤติกรรมแบบจำลองส่วนประกอบที่เหมาะสมของวัสดุประาในที่ต้องรับน้ำหนักมาก ความแข็งแรงคือสมบัติหลักโดยขึ้นอยู่กับแรงกด ความเสียหายและการแตกหักความแข็งแรงที่สำคัญหลังจากการแตกหักและผลกระทบจากอัตราความเครียด ในภาพรวมทั่วไปของ Johnson Holmquist เงื่อนไขของความแข็งแรง คือ วัสดุเริ่มอ่อนตัวลงเมื่อเกิดความเสียหายเริ่มสะสม ($D > 0$) ซึ่งจะช่วยให้ค่อย ๆ อ่อนลง ภายใต้ความเครียดพลาสติกที่เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นแนวคิดเบื้องหลังแบบจำลองการกำหนด ความแข็งแรงโดยทั่วไปเป็นฟังก์ชันที่แตกต่างกันความแข็งแรงที่สมบูรณ์การแตกหักความแข็งแรงอัตราความเครียดและความเสียหาย

$$\sigma^* = \sigma_i^* - D(\sigma_i^* - \sigma_f^*) \quad (2.39)$$

ที่ σ_i^* และ σ_f^* เป็นค่าเทียบเท่าที่ไม่เสียหายและแตกหักตามปกติความเครียดตามลำดับ และ D คือความเสียหาย ($0 < D < 1$) ค่าความแข็งแรงที่ไม่บอบสลายและแตกหักเป็นมาตรฐานตามลำดับมอบให้โดย

$$\sigma_i^* = A(P^* + T^*)^N (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (2.40)$$

$$\sigma_f^* = B(P^*)^M (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (2.41)$$

ค่าคงที่ของวัสดุคือ A, B, C, M และ N, P^* และ T^* คือความดันปกติและความเค้นไฮโดรสแตติก แรงดึงสูงสุดอัตราความเครียดแบบไร้มิติคือ $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0$ โดยที่ $\dot{\epsilon}$ คืออัตราความเครียดที่แท้จริง และ $\dot{\epsilon}_0$ คืออัตราความเครียดอ้างอิง ความเสียหายจากการแตกหักคือการแตกหักสะสมในลักษณะเดียวกับที่ใช้ในแบบจำลอง Johnson Cook โดยแสดงเป็น

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon_p}{\epsilon_f^p} \quad (2.42)$$

โดยที่ $\Delta \epsilon_p$ คือการเพิ่มขึ้นของความเครียดพลาสติกที่เทียบเท่ากันในระหว่างรอบของการรวม และ $\epsilon_f^p = f(P)$ คือความเครียดพลาสติกที่จะแตกภายใต้ความดันคงที่ สำหรับ ϵ_f^p จะแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\varepsilon_f^p = D_1(P^* + T^*)^{D_2} \quad (2.43)$$

D_1 และ D_2 เป็นค่าคงที่ของวัสดุ ความเค้นไฮโดรสแตติก คือ กำหนดในรูปของความดันคงที่ โดยกำหนดสมการของ (EOS) ได้ดังต่อไปนี้

$$P = K_1\mu + K_2\mu^2 + K_3\mu^3 \quad (2.44)$$

K_1 คือ โมดูลัสจำนวนมาก K_2 และ K_3 คือ ค่าคงที่ของวัสดุ μ คือ ปัจจัยการบีบอัดหลังจากเริ่มมีการสะสมของความเสียหาย ($D > 0$) ค่า bulking ในขณะที่ความดันเพิ่มขึ้น (ΔP) จะถูกเพิ่มเช่นกัน ตามสมการที่ (2.45)

$$P = K_1\mu + K_2\mu^2 + K_3\mu^3 + \Delta P \quad (2.45)$$

การเพิ่มขึ้นของความดันจะพิจารณาจากพลังงานซึ่งแปรเปลี่ยนตาม $\Delta P = 0$ ที่ $D = 0$ ถึง $\Delta P = \Delta P_{\max}$ ที่ $D = 1$

2.2.4.3 แบบจำลองของ Johnson Cook [14] ถูกนำไปใช้งานด้วยการวิเคราะห์เชิงตัวเลขในโปรแกรม ABAQUS/Explicit finite element code ตามแนวทางของ Lagrangian ที่ได้พัฒนาร่วมกับผลลัพธ์ของสมการพลวัตที่ไม่เป็นแบบเชิงเส้น วิธีการนี้ ถือว่าเป็นการแก้ไขเชิงเส้นสำหรับความเร็วระหว่างสองขั้นตอนที่ไม่มีการผกผันของเมทริกซ์ ข้อเสียเปรียบของวิธีการนี้ คือ มีเสถียรภาพตามเงื่อนไขสำหรับปัญหาทางไดนามิกที่ไม่ใช่เชิงเส้น และความเสถียรสำหรับตัวดำเนินการที่ชัดเจนขึ้นอยู่กับค่าวิกฤตของการเพิ่มเวลาที่น้อยที่สุด การใช้ ABAQUS VUMAT สามารถดำเนินการได้ตามขั้นตอนต่อไปนี้

1) ภายใต้อุปกรณ์ปัจจุบันในการคำนวณความเครียด การเพิ่มขึ้นของความเค้น การอัปเดตความเครียดและการทดลองหาความเครียด ณ เวลาปัจจุบัน

$$\{\varepsilon\}^{n+1} = \{\varepsilon\}^n + \{\Delta\varepsilon\} \quad (2.46)$$

$${}^{trial}\{\sigma\}^{n+1} = \{\sigma\}^n + [C]\{\Delta\varepsilon\} \quad (2.47)$$

โดยที่ $[C]$ และ $\{\Delta\varepsilon\}^T = \{\Delta\varepsilon_{xx} \Delta\varepsilon_{yy} \Delta\varepsilon_{zz} \Delta\varepsilon_{xy} \Delta\varepsilon_{yz} \Delta\varepsilon_{zx}\}$ เมทริกซ์ความแข็งของวัสดุและเวกเตอร์การเพิ่มความเครียดตามลำดับ

2) ค่าเบี่ยงเบนจากการคำนวณความเครียดในปัจจุบันเน้นการทดลองใช้ ${}^{trial}\{S\}^{n+1}$ เกี่ยวกับการสลายตัวของความเครียดในการทดลองทั้งหมด ${}^{trial}\{\sigma\}^{n+1}$ เป็นเบี่ยงเบน ${}^{trial}\{S\}^{n+1}$ และไฮโดรสแตติก σ_H^{n+1}

$${}^{trial}\{S\}^{n+1} = {}^{trial}\{\sigma\}^{n+1} - \sigma_H^{n+1} \delta_{ij} \quad (2.48)$$

โดยที่ δ_{ij} คือ ฟังก์ชันเดลต้า

3) Δt ขึ้นอยู่กับขั้นตอนเวลาปัจจุบัน และการเพิ่มขึ้นของความเครียดปัจจุบัน $\{\Delta \varepsilon\}$ คำนวณ
 เวกเตอร์อัตราความเครียดปัจจุบัน $\{\dot{\varepsilon}\}^{n+1}$ และอัตราความเครียดที่มีประสิทธิภาพในปัจจุบัน $\dot{\varepsilon}_{eff}^{n+1}$

$$\{\dot{\varepsilon}\}^{n+1} = \frac{1}{\Delta t} \{\Delta \varepsilon\} \quad (2.49)$$

$$\dot{\varepsilon}_{eff}^{n+1} = \sqrt{\frac{2}{3}((\dot{\varepsilon}_{xx}^{n+1})^2 + (\dot{\varepsilon}_{yy}^{n+1})^2 + (\dot{\varepsilon}_{zz}^{n+1})^2 + 0.5((\dot{\gamma}_{xy}^{n+1})^2 + (\dot{\gamma}_{yz}^{n+1})^2 + (\dot{\gamma}_{zx}^{n+1})^2))}^{1/2} \quad (2.50)$$

4) การคำนวณความเครียดเทียบเท่าปัจจุบัน

$$\bar{\sigma}^{n+1} = \sqrt{3} \left[\frac{1}{2} (({}^{trial}S_{xx}^{n+1})^2 + ({}^{trial}S_{yy}^{n+1})^2 + ({}^{trial}S_{zz}^{n+1})^2) + ({}^{trial}S_{xy}^{n+1})^2 + ({}^{trial}S_{yz}^{n+1})^2 + ({}^{trial}S_{zx}^{n+1})^2 \right]^{1/2} \quad (2.51)$$

5) การคำนวณ ความเครียดค่ามาตรฐานในปัจจุบัน $(\sigma^*)^{n+1}$ กับ $(\dot{\varepsilon}^*)^{n+1} = \dot{\varepsilon}_{eff}^{n+1} / \dot{\varepsilon}_0$,

$$(\sigma_i^*)^{n+1} = A((P^*)^{n+1} + T^*)^N (1 + C \ln(\dot{\varepsilon}^*)^{n+1}) \quad (2.52)$$

$$(\sigma_f^*)^{n+1} = B((P^*)^{n+1})^M (1 + C \ln(\dot{\varepsilon}^*)^{n+1}) \quad (2.53)$$

$$(\sigma^*)^{n+1} = (\sigma_i^*)^{n+1} - D((\sigma_i^*)^{n+1} - (\sigma_f^*)^{n+1}) \quad (2.54)$$

กับ $(P^*)^{n+1} = \bar{\sigma}^{n+1} / P_{HEL}$

6) การตรวจสอบผล ณ เวลาปัจจุบัน $n+1$

$$F^{n+1}(\bar{\sigma}) = \bar{\sigma}^{n+1} - \sigma_{HEL} (\sigma^*)^{n+1} \quad (2.55)$$

ถ้า $F^{n+1}(\bar{\sigma}) > 0$, คือ ความเค้นเบี่ยงเบนไปที่พื้นผิววัสดุโดยใช้ Radial Return Algorithm

$$\{S\}^{n+1} = ((\sigma^*)^{n+1} \sigma_{HEL} / \bar{\sigma}^{n+1}) ({}^{trial}\{S\}^{n+1}) \quad (2.56)$$

และคำนวณการเพิ่มขึ้นของความเครียดพลาสติกที่เท่ากัน $\Delta \varepsilon_p$ ปัจจุบันสายพันธุ์พลาสติกสู่
 ความล้มเหลว $(\varepsilon_f^p)^{n+1}$ และอัปเดตตัวแปรความเสียหาย D^{n+1}

$$\Delta \varepsilon_p = \frac{\{a\}^T [C] \{\varepsilon\} \Delta t}{\sqrt{2} \{a\}^T [C] \{a\}} \sqrt{(S_{xx}^{n+1} - S_{yy}^{n+1})^2 + (S_{xx}^{n+1} - S_{zz}^{n+1})^2 + (S_{zz}^{n+1} - S_{yy}^{n+1})^2 + 6 \left[(S_{xy}^{n+1})^2 + (S_{yz}^{n+1})^2 + (S_{zx}^{n+1})^2 \right]} \quad (2.57)$$

$$(\varepsilon_f^p)^{n+1} = D_1 ((P^*)^{n+1} + T^*)^{D_2} \quad (2.58)$$

$$D^{n+1} = D^n + \frac{\Delta \varepsilon_p}{(\varepsilon_f^p)^{n+1}} \quad (2.59)$$

เมื่อ $\Delta \varepsilon_p = 0$ และ $D^{n+1} = D^n$ โดย $\{a\} = \partial F^{n+1}(\bar{\sigma}, \sigma_{HEL}, \sigma^*) / \partial \{S\}$

7) ปัจจัยคำนวณการบีบอัด μ^{n+1} ขึ้นอยู่กับความเครียดเชิงปริมาตร ε_v^{n+1}

$$\mu^{n+1} = \ln(\varepsilon_v^{n+1} + 1) \quad (2.60)$$

8) อัปเดตความดันโดยใช้ EOS

$$P^{n+1} = \begin{cases} K_1 \mu^{n+1} + K_2 (\mu^{n+1})^2 + K_3 (\mu^{n+1})^3 \\ K_1 \mu^{n+1} \end{cases} \quad (2.61)$$

ถ้า $\mu^{n+1} > 0$

หาก $D^{n+1} > 0$ การสูญเสียพลังงานในการคำนวณเนื่องจากความเสียหาย ΔU และยอดรวมการเพิ่มความดัน P^{n+1} โดยใช้การเพิ่มแรงดันเพิ่มเติม ΔP^{n+1}

$$\Delta U = \frac{\sigma_{HEL}^2}{6G} \left(((\sigma^*)^n)^2 - ((\sigma^*)^{n+1})^2 \right) \quad (2.62)$$

$$\Delta P^{n+1} = -K_1 \mu^{n+1} + \sqrt{(-K_1 \mu^{n+1} + \Delta P^n) + 2\beta K_1 \Delta U} \quad (2.63)$$

เมื่อ $\Delta P^{n+1} = 0$

$$P^{n+1} = P^{n+1} + \Delta P^{n+1} \quad (2.64)$$

9) เพิ่มความเครียดทั้งหมด

$$\{\sigma\}^{n+1} = \{S\}^{n+1} + P^{n+1} \delta_{ij} \quad (2.65)$$

10) สิ้นสุดวงจรการรวมทางตรง

11) คำนวณการเพิ่มเวลาใหม่ที่มีความคงที่ Δt และการเพิ่มขึ้นของความเครียด $\Delta \epsilon$ โดยใช้รูปแบบการรวมวิธีการแตกต่างส่วนกลาง

2.2.4.4 โมเดล Johnson-Cook [14] เป็นแบบจำลองเชิงปรากฏการณ์มักใช้ในการคาดการณ์การตอบสนองของโลหะภายใต้ผลกระทบและการเจาะ เนื่องจากสามารถสร้างความเครียดได้ การชูบแข็งผลกระทบจากอัตราความเครียดและการอ่อนตัวจากความร้อน สมบัติเหล่านี้ควบคุมไปในลักษณะที่เพิ่มขึ้นโดยใช้สิ่งต่อไปนี้

$$\sigma_y = [C_1 + C_2(\epsilon_{eff}^p)^N] \left[1 + C_3 \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}_{eff}^p}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_R}{T_M - T_R} \right)^M \right] \quad (2.66)$$

ที่ ϵ_{eff}^p คือ ชนิดพลาสติกที่มีประสิทธิภาพ T_M คือ อุณหภูมิหลอมละลาย T_R คือ อุณหภูมิอ้างอิง เมื่อกำหนดให้ C_1, C_2, C_3, M และ N ; $\dot{\epsilon}_0$ คือ อัตราความเครียดอ้างอิง C_1, C_2, C_3, N และ M คือ ค่าคงที่ของวัสดุ การแตกหักในแบบจำลอง Johnson Cook ภายใต้เงื่อนไขที่ค่าของความเครียดพลาสติกที่เท่ากัน ความล้มเหลวคือสันนิษฐานว่าจะเกิดขึ้นเมื่อความเสียหายเกิน 1 ความเสียหายสะสมโดยให้

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon_{eff}^p}{\epsilon^F} \quad (2.67)$$

กับ

$$\epsilon^F = \left[D_1 + D_2 \exp \left(D_3 \frac{P}{\sigma_{eff}} \right) \right] \left[1 + D_4 \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}_{eff}^p}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \times \left[1 + D_5 \left(\frac{T - T_R}{T_M - T_R} \right)^M \right] \quad (2.68)$$

โดยที่ P คือ ความดัน σ_{eff} คือ ความเครียดของ Mises D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 คือ พารามิเตอร์ความล้มเหลว แบบจำลองของ Johnson-Cook ที่ใช้ในงานนี้คือขณะนี้มีอยู่ในไลบรารีแบบจำลองวัสดุที่ชัดเจนของสำหรับองค์ประกอบทั้งเปลือกและของแข็ง

2.2.4.5 การกำหนดสูตร [14] พฤติกรรมของวัสดุเชื่อมต่อถูกกำหนดขึ้นในรูปแบบของการยึดเกาะและการกระจัดแบบสัมพันธ์กันระหว่างส่วนบนและส่วนล่างพื้นผิวของอินเทอร์เฟซ เวกเตอร์การกระจัดสัมพันธ์ คือ ประกอบด้วยการกำหนดส่วนประกอบปกติและการเลื่อนที่เป็นผลลัพธ์โดยการเคลื่อนที่สัมพันธ์ระหว่างพื้นผิวด้านบนและด้านล่างขององค์ประกอบการติดต่อกันสำหรับ hexahedron จุบรวมจุดเดียวขององค์ประกอบที่เป็นของแข็ง เวกเตอร์การกระจัดสัมพันธ์สามารถเขียนเงื่อนไขของความเครียดปกติที่ผ่านความหนาและแรงเฉือนนอกระนาบดังนี้

$$\{\mathcal{D}\}^T = \{uvw\}^T = \{h^* \gamma_{xz} \ h^* \gamma_{yz} \ h^* \varepsilon_{zz}\}^T \quad (2.69)$$

โดย $u = u_T - u_b$, $v = v_T - v_b$, และ $w = w_T - w_b h^*$ คือ องค์ประกอบความหนาของรูปทรงเรขาคณิตที่ปรับปรุงให้เป็นไปตามมาตรฐานการกำหนดองค์ประกอบของอินเทอร์เฟซ ความยืดหยุ่นเชิงเส้น องค์ประกอบโดยไม่มีผลกระทบของเมมเบรนสำหรับการสัมผัสองค์ประกอบสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} \sigma_I \\ \sigma_{II} \\ \sigma_{III} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} K_{ww} & 0 & 0 \\ 0 & K_{uu} & 0 \\ 0 & 0 & K_{vv} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} w \\ u \\ v \end{Bmatrix} \quad (2.70)$$

โดยที่ σ_I , σ_{II} และ σ_{III} คือ ความเค้นระหว่างส่วนบนและพื้นผิวส่วนล่างที่เกี่ยวข้องกับการหลุดของโหมด *I*, *II* และโหมด *III* ตามลำดับ

2.2.4.6 โมเดลของ Steinberg Guinan Strength [11] ที่คำนวณโมดูลัสเฉือนและความเค้นที่จุดครากซึ่งได้ผลอันเนื่องมาจากความเครียดของพลาสติก Plastic Strain ความดันและพลังงานหรืออุณหภูมิภายใน นั้นเหมาะสมกับข้อมูลของการทดลองที่เกิดความเร็วย่างกะทันหันที่ผิวหน้าอิสระ พบว่าค่าความเค้นที่จุดครากและค่าโมดูลัสเฉือนเพิ่มขึ้นเมื่อความดันเพิ่มและลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าความเค้นที่จุดครากนั้นจะมีค่าสูงที่สุดเมื่อไม่มีผลเนื่องจากอัตราความเครียด ในกรณี $Y_0 [1 + \beta \varepsilon]^n < Y_{max}$ ตัวแปร P และ t แทนค่าความดันและอุณหภูมิตามลำดับ

$$Y = Y_0 \left\{ 1 + \left(\frac{Y'_p}{Y_0} \right) \frac{P}{n^{1/3}} + \left(\frac{G'_t}{G_0} \right) (t - 300) \right\} (1 + \beta \varepsilon)^n \quad (2.71)$$

หรือ

$$G = G_0 \left\{ 1 + \left(\frac{G'_p}{G_0} \right) \frac{P}{n^{1/3}} + \left(\frac{G'_t}{G_0} \right) (t - 300) \right\} \quad (2.72)$$

ε คือ ผลกระทบของ Plastic Strain, t คือ อุณหภูมิ (K), n คือ ผลกระทบจากการอัด V_0 / V

2.2.4.7 โมเดลของ Johnson-Holmquist failure model (JH-2) ในการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นกระสุนมีขนาด 7.62 มิลลิเมตร และแผ่นเกราะกันกระสุนแผ่นที่ 1 ทำจาก WC ขนาด 300 x 300 มิลลิเมตร ความหนา 6 8 และ 10 มิลลิเมตร เพื่อให้กระสุนกระแทกเข้ากับแผ่นแล้วเกิดการแตกเสียหายซึ่งค่าสมบัติทางกลและพารามิเตอร์ในการจำลองการเสียหายของ Johnson-Holmquist failure model (JH-2) ตารางที่ 1 โดยสมการความเสียหายดังนี้ เมื่อ Y คือ Yield Stress

$$y = [A(p^* + T^*)^n (1 - D) + B(p^*)^m D][1 + C \ln(\dot{\epsilon}_p^*)] \quad (2.73)$$

$$p^* = \frac{P}{P_{HEL}}, T^* = \frac{T}{P_{HEL}} \quad (2.74)$$

ที่ P_{HEL} คือความดันที่ Hugoniot Elastic Limit (HEL), T คือ Maximum hydrodynamic tensile strength และ A, B, C, n, m คือพารามิเตอร์ของวัสดุ ค่า HEL คือ Yield limit ที่ uniaxial strain เมื่อวัสดุรับภาระโหดในทิศทางเดียว ดังนั้นจะมี 2 สมการ แยกกันเพื่อค่า Yield stress เมื่อ $D = 1$ หรือ $D < 1$ ใน Johnson-Holmquist ค่า Yield stress เป็นฟังก์ชันความเสียหาย ต่อเนื่องของ D ดังนั้นรูปแบบวัสดุที่มีสมบัตินี้เรียกว่าแบบจำลองการแตกหักแบบ “active” สำหรับกรณีพิเศษ $D = 0$ ไม่มีความเสียหาย (และ $D = 1$ มีความเสียหาย ค่า Yield stress จะลดลงตามสมการ [41])

$$y = A(p^* + T^*)^n [1 + C \ln(\dot{\epsilon}_p^*)] \quad (\text{ไม่มีความเสียหาย Intact, } D=0) \quad (2.75)$$

$$y = B(p^*)^m [1 + C \ln(\dot{\epsilon}_p^*)] \quad (\text{มีความเสียหาย fragmented, } D=1) \quad (2.76)$$

ตารางที่ 2.1. สมบัติและพารามิเตอร์ JH ของทังสเตนคาร์ไบด์ [41]

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

แผ่นที่ 2 เป็นวัสดุ SUS304 ซึ่งใช้ในการรังสีเศษกระสุนที่กระทบเข้ากับแผ่นที่ 1 แล้วทะลุออกแผ่นมีขนาด 30 x 30 เซนติเมตร ให้ความหนาเริ่มต้นที่ 5 มิลลิเมตร เนื่องจาก SUS304 ทั่วไปมีขนาดความหนาที่ 1 – 5 มิลลิเมตร หลังจากนั้นก็จะเพิ่มเป็น 6 8 และ 10 มิลลิเมตร เป็นต้น ความหนาที่ใช้ในการจำลอง 5 6 8 และ 10 มิลลิเมตร ได้ใช้ทฤษฎีความเสียหายของ Steinberg-Guinan Strength model เป็นแบบกึ่งทดลองที่พัฒนาโดยสำหรับสถานการณ์ที่มีอัตราความเครียดสูงและขยายไปยังอัตราความเครียดต่ำ [42] มีสมการดังนี้

$$G = G_0 \left\{ 1 + \left(\frac{G'p}{G_0} \right) \frac{p}{\eta^{1/3}} + \left(\frac{G't}{G_0} \right) (T - 300) \right\} \quad (2.77)$$

หรือ

$$Y = Y_0 \left\{ 1 + \left(\frac{Y'p}{Y_0} \right) \frac{p}{\eta^{1/3}} + \left(\frac{G't}{G_0} \right) (T - 300) \right\} (1 + \beta \varepsilon)^n \quad (2.78)$$

ที่ $Y_0 = [1 + \beta \varepsilon]^n \leq Y_{\max}$ เมื่อ ε = Effective plastic strain, T = temperature (degree K), η = compression และพารามิเตอร์ที่พร้อมกันด้วย p และ T เป็นอนุพันธ์ของพารามิเตอร์นั้นเกี่ยวกับความดันและอุณหภูมิที่สถานะอ้างอิง ($T = 300$ K, $p = 0$, $\varepsilon = 0$) ตัวห้อยศูนย์ยังอ้างอิงถึงค่าของ G และ Y ที่สถานะนั้น หากอุณหภูมิของวัสดุสูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวที่ระบุไว้โมดูลัสแรงเฉือนและความแข็งแรงของผลผลิตจะถูกตั้งค่าเป็นศูนย์ [43] ค่าสมบัติและพารามิเตอร์ของ SUS304 มีในโปรแกรมจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติและพารามิเตอร์ของ SUS304

Properties	SUS304	Steinberg guinan strength	
Density ($\rho, kg / m^3$)	7900	Initial yield stress (Y, MPa)	340
Specific heat ($J / kg \cdot ^\circ C$)	423	Max. yield stress (Ymax, GPa)	2.5
Shock EOS linear		Shear modulus (GPa)	80
Gruneisen coefficient	1.93	Hardening constant (B)	43
Parameter (C1, m/s)	4570	Hardening exponent (n)	0.35
Parameter (S1)	1.49	Derivative ($dG / dP, G'P$)	1.74
Parameter quadratic (S2)	0	Derivative ($dG / dT, G'T, MPa / ^\circ C$)	-35
		Derivative ($dY / dP, Y'P$)	0.007684
		Melting temperature (Tmelt, $^\circ C$)	2106.9
		Shear modulus (GPa)	77

2.3 มาตรฐานการทดสอบแผ่นเกราะกันกระสุน [10], [11]

ในส่วนของเกณฑ์หรือมาตรฐานการทดสอบแผ่นเกราะกันกระสุนการทดสอบประสิทธิภาพหรือความสามารถของแผ่นเกราะกันกระสุนในการป้องกันกระสุน ของเสื้อเกราะที่กำหนดมาตรฐานที่เกี่ยวกับวิธีทดสอบโดยสถาบันความเที่ยงธรรมแห่งชาติ (National Institute of Justice, NIJ) ประเทศสหรัฐอเมริกา รวมไปถึงอีกหลายอีกหลายประเทศทั่วโลกและรวมถึงประเทศไทย ก็ใช้มาตรฐานสำหรับการทดสอบเสื้อเกราะป้องกันกระสุนด้วยเช่นกัน การแบ่งระดับความสามารถในการป้องกันกระสุนของเสื้อเกราะ โดยมาตรฐาน NIJ นั้นได้แบ่งมาตรฐานไว้ถึง 6 ระดับ และพลังงานการเคลื่อนที่ ดังแสดงในตารางที่ 2.3 และ 2.4 ดังนี้

ตารางที่ 2.3 มาตรฐาน NIJ (National Institute of Justice) [10], [11]

การป้องกัน	ประสิทธิภาพ
ระดับ I (.22 LR; .380 ACP)	เกราะสามารถป้องกันกระสุน .22 Long Rifle น้ำหนัก 2.6 g มีความเร็ว 329 ± 9.1 m/s (1080 ± 30 ft/s) และกระสุน .380 ACP น้ำหนัก 6.2 g มีความเร็ว 322 ± 9.1 m/s (1055 ± 30 ft/s) แต่ปัจจุบัน NIJ ได้ยกเลิกการใช้มาตรฐานการป้องกันระดับ I เนื่องจากไม่เพียงพอที่จะป้องกันกระสุนปืน
ระดับ IIA (9 mm; .40 S&W)	เกราะสามารถป้องกันกระสุน 9 mm น้ำหนัก 8 g มีความเร็ว 373 ± 9.1 m/s (1225 ± 30 ft/s) และกระสุน .40 S&W น้ำหนัก 11.7 g มีความเร็ว 352 ± 9.1 m/s (1155 ± 30 ft/s) เสื้อเกราะป้องกันกระสุนปืนระดับ I ได้
ระดับ II (9 mm; .357 Magnum)	เกราะสามารถป้องกันกระสุน 9 mm น้ำหนัก 8 g มีความเร็ว 398 ± 9.1 m/s (1305 ± 30 ft/s) และกระสุน .357 Magnum น้ำหนัก 10.2 g มีความเร็ว 436 ± 9.1 m/s (1430 ± 30 ft/s) เสื้อเกราะป้องกันกระสุนปืนระดับ I และ IIA ได้ด้วย
ระดับ IIIA (.357 Sig; .44 Magnum)	เกราะสามารถป้องกันกระสุนขนาด .357 SIG น้ำหนัก 8.1 g มีความเร็ว 448 ± 9.1 m/s (1470 ± 30 ฟุต/วินาที) และกระสุนขนาด .44 Magnum น้ำหนัก 15.6 g มีความเร็ว 436 ± 9.1 m/s (1430 ± 30 ft/s) เสื้อเกราะป้องกันกระสุนปืนระดับ I, IIA และ II ได้ด้วย
ระดับ III (Rifles)	เกราะสามารถป้องกันกระสุนขนาด 7.62 x 51 mm NATO M80 ball และ น้ำหนัก 9.6 g มีความเร็ว 847 ± 9.1 m/s (2780 ± 30 ft/s) เสื้อเกราะป้องกันกระสุนปืนระดับ I, IIA, II และ IIIA ได้ด้วย
ระดับ IV (Armor Piercing Rifle)	เกราะสามารถป้องกันกระสุนขนาด .30-06 Springfield M2 น้ำหนัก 10.8 g มีความเร็ว 878 ± 9.1 m/s (2880 ± 30 ft/s) เสื้อเกราะป้องกันกระสุนปืนระดับ I, IIA, II, IIIA และ III ได้ด้วย

ตารางที่ 2.4 พลังงานในการเคลื่อนที่ของกระสุนปืนที่ใช้ทดสอบเสื้อเกราะ [10]

ระดับการป้องกัน	ชนิดกระสุน	น้ำหนักกระสุน (กรัม)	ความเร็วหัวกระสุน (เมตร/วินาที)	พลังงาน (จูล)
IIIA	.357 SIG	8.1	457.1	846
IIIA	.44 Magnum	15.6	445.1	1545
III	M-16 (5.56mm NATO)	5.18	940	2288
III	7.62 mm NATO	9.33	838	3275

ดังนั้น การเปรียบเทียบประสิทธิภาพสามารถพิจารณาในรูปของพลังงานในการเคลื่อนที่ของ กระสุน (พลังงานจลน์) ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.34)$$

เมื่อ E = พลังงาน (J)

m = มวลวัตถุ (kg)

v = ความเร็ววัตถุ (m/s)

2.4 โปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง

2.4.1 Program ANSYS software [11]

โปรแกรม ANSYS มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้สามารถใช้วิเคราะห์พฤติกรรมทางฟิสิกส์ที่หลากหลาย โปรแกรมกลุ่มนี้เรียกว่า โปรแกรมมัลติฟิสิกส์ (Multiphysic Program) และนิยมใช้ใน CAE (Computer-Aided Engineering) คืองานวิศวกรรมที่ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ โดยอาศัยทั้งหลักการคำนวณวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) และไฟไนต์โวลุ่ม (Finite Volume Method, FVM) โปรแกรม ANSYS สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น ในการแก้ปัญหาในระบบสามมิติของกลศาสตร์ของแข็งสามารถประยุกต์ใช้กับโครงสร้างที่มีลักษณะพื้นฐาน (Stationary geometrically) และระบบที่มีโครงสร้างซ้ำซ้อน (Non-stationary geometrically) ได้ ปรากฏการณ์ของก๊าซและของไหล กลศาสตร์ของไหล การแผ่รังสีความร้อนและการถ่ายเทความร้อน ปรากฏการณ์ด้านไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ปรากฏการณ์ของคลื่นเสียงเป็น ปรากฏการณ์ที่สามารถจำลองได้บนโปรแกรม เพื่อใช้ในการจำลองและการวิเคราะห์กระบวนการในอุตสาหกรรม หลีกเลี่ยงค่าใช้จ่ายที่สูงและลดระยะเวลาในการออกแบบ

2.4.2 การใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Software) [12]

ในการวิเคราะห์ ด้วยการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Software) โดยปกติทั่วไปจะประกอบด้วย 3 หลักการ ซึ่งสามารถจัดเรียงลำดับขั้นตอน ได้ดังนี้

2.4.2.1 ขั้นตอนการเตรียมกระบวนการ (Pre Processing) โดยทั่วไปการแบ่งรูปทรงเรขาคณิตออกเป็นชิ้นส่วนย่อย ๆ ที่เรียกว่า เอลิเมนต์ เพื่อใช้สำหรับการสร้างแบบจำลองของส่วนที่จะทำการวิเคราะห์ โดยเอลิเมนต์แต่ละเอลิเมนต์จะเชื่อมต่อกันด้วยจุดโหนด ซึ่งโหนดนี้จะถูกกำหนดการเคลื่อนที่ และนอกเหนือจากนี้จะต้องทำการกำหนดแรง หรือ ภาระที่มากระทำกับชิ้นงานที่ต้องวิเคราะห์ การเตรียมแบบจำลองซึ่งจะต้องใช้เวลาในการเตรียมเป็นจำนวนมาก และนอกจากนี้ในขั้นตอนเตรียมการ บางกระบวนการยังสามารถกระทำรวมกับขั้นตอนออกแบบโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบได้

2.4.2.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ (Analysis) ข้อมูลต่าง ๆ ได้ถูกเตรียมการจากขั้นตอนการเตรียมกระบวนการ เช่น แบบจำลอง เอลิเมนต์ เงื่อนไขต่าง ๆ จะถูกนำมาใช้ป้อนเข้าสู่ระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ตามหลักการของระเบียบการที่สร้างและแก้ไขปัญหาแบบเชิงเส้น (Linear) หรือ ไม่เชิงเส้น (Nonlinear) ด้วยสมการทางพีชคณิต ดังแสดงในสมการที่ (2.35)

$$\mathbf{kd}=\mathbf{f} \quad (2.35)$$

เมื่อ \mathbf{k} = เมทริกซ์ความแข็งเกร็ง (Stiffness Matrix)

\mathbf{f} = ค่าแรงที่มากระทำต่อเอลิเมนต์

\mathbf{d} = ความเคลื่อนที่อิสระของโหนด เอลิเมนต์ (DOF)

2.4.2.3 ขั้นตอนการนำเสนอกระบวนการ (Post Processing) เมื่อได้ผลการจำลองที่มีลักษณะเป็นค่าตัวเลขของแต่ละจุดหรือโหนด (Node) ค่าสมบัติของแต่ละเอลิเมนต์ (Element) ซึ่งเป็นผลที่ได้หลังจากการวิเคราะห์ โดยจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ผลลัพธ์และแสดงในลักษณะที่เข้าใจง่ายเพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อไป โดยทั่วไปแล้วสำหรับโปรแกรมคอมพิวเตอร์เชิงพาณิชย์มีความสามารถในการแสดงผลแบบกราฟิกสามมิติผ่านทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ เช่น แสดงภาพกราฟิกและค่าของความเค้นในแต่ละเอลิเมนต์และโหนด แสดงภาพกราฟของโครงข่ายที่บิดไปหลังจากถูกแรงมากระทำ แสดงกราฟิกและค่าของโหนดที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมหรือแสดงภาพการเคลื่อนไหวของเอลิเมนต์หลังจากถูกแรงมากระทำ

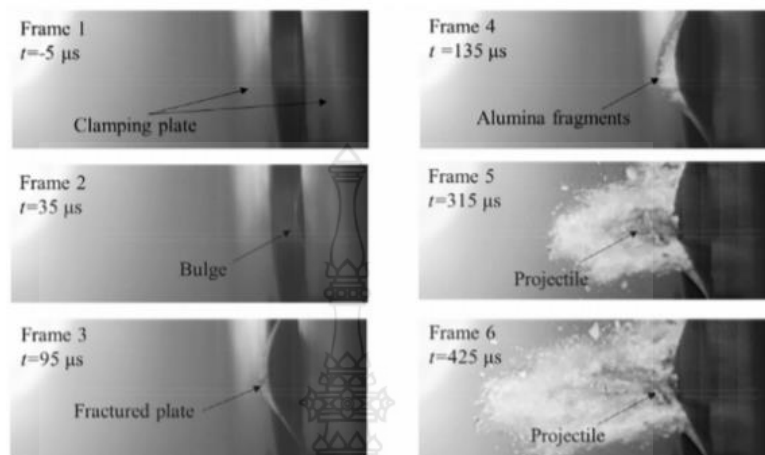
2.5 การทบทวนวรรณกรรม

สำหรับการทบทวนวรรณกรรมในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ใช้วิธีการแบ่งเป็นข้อย่อยสำหรับจัดกลุ่มงานวิจัยที่เกี่ยวข้องอันจะเป็นประโยชน์ยิ่งและง่ายต่อการทำความเข้าใจ โดยมีการสรุปจากการทบทวนวรรณกรรมดังนี้

2.5.1 การวิเคราะห์เชิงตัวเลขและการใช้โปรแกรมจำลองแผ่นเกราะกันกระสุน

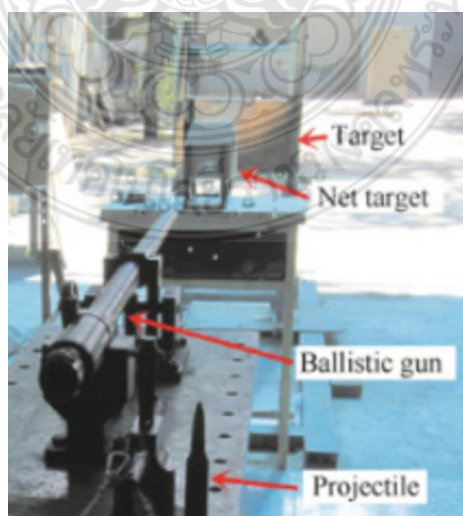
งานวิจัยของ Z. Rui และคณะ [15] ดำเนินการศึกษาเกี่ยวกับสมรรถนะของชุดเกราะผสมเซรามิกสองชั้นจากอิทธิพลของแรงอัด ด้วยการทดลองและการจำลองเชิงตัวเลขของแรงกดต่อสมรรถนะของชุดเกราะวัสดุผสม (composite) เซรามิกสองชั้นร่วมกับแผ่นเกราะ 3 ประเภทที่มีความแตกต่างของระดับแรงดันภายใต้ระยะเวลาที่กระสุนยิงผ่านเกราะ การทดลองทำการพิจารณาผลลัพธ์ต่าง ๆ ของตัวแปรดังนี้ คือ เศษของกระสุน (fragment) การแตกหักของเกราะ (fractured) การหนีบของแผ่นเกราะ (clamping) การนูนของแผ่นเกราะ (bulge) การทะลุออกของกระสุน (projectile) ดังรูปที่ 2.7 ยิ่งไปกว่านั้น ผู้วิจัยได้นำเสนอเทคนิคเชิงตัวเลขสำหรับการสำรวจกระบวนการเจาะทะลุ

ของกระสุนและกลไกการเพิ่มประสิทธิภาพของแรงอัดด้วย รวมไปถึงยังพบอีกว่าการอัดตัวของเซรามิกทำให้เกิดพลังงานจลน์มากขึ้นส่งผลให้การเสียหายของกระสุนที่ผ่านเกราะเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 25



รูปที่ 2.7 ผลการทดลองชุดเกราะผสมเซรามิกสองชั้น [15]

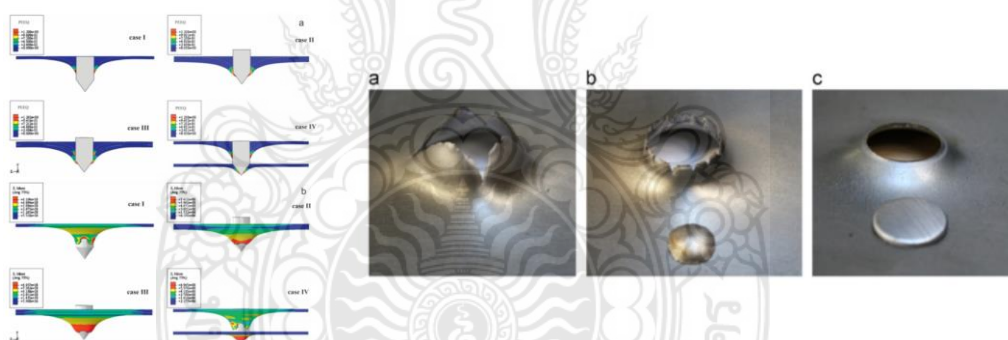
ในขณะที่งานวิจัยของ Y. Rong-cheng และคณะ [16] มีการศึกษาประสิทธิภาพการเจาะทะลุของกระสุนปืนคอมโพสิตเซรามิกเข้าไปในชิ้นงานเซรามิกคอมโพสิต การทดสอบพิจารณาความคมชัดและใช้วิธีการจำลองเชิงตัวเลขของการทะลุออกของกระสุนปืน 2 แบบ คือ แบบมาตรฐานและแบบเซรามิกผสม การทดลองกระทำด้วยการยิงกระสุนผ่านแผ่นเกราะผสมเซรามิกคอมโพสิต ผลการวิจัยพบว่า ประสิทธิภาพการเจาะทะลุของกระสุนปืนเซรามิกคอมโพสิตนั้นกระทำได้น้อยกว่ากระสุนปืนมาตรฐานอย่างเห็นได้ชัด โดยส่วนผสมของเซรามิกในกระสุนปืนคอมโพสิตสามารถทำลายแผงเซรามิกที่ติดตั้งด้านหน้าของลำตัวกระสุนเจาะเกราะได้ ดังนั้น กระสุนปืนแบบเซรามิกผสมมีความสามารถในการเจาะทะลุเกราะผสมเซรามิกคอมโพสิต ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การทดลองประสิทธิภาพการเจาะทะลุของกระสุนปืนคอมโพสิตเซรามิก [16]

J. Li และคณะ [17] ดำเนินการวิจัยด้วยการศึกษาเกี่ยวกับการทดลองและการจำลองเชิงตัวเลขของกระสุนปืนผสมทั้งสแตนเลสที่เจาะเข้าไปในแผ่นเกราะกันกระสุนอลูมินาเซรามิก 603 โดยพิจารณาความลึกของการเจาะที่เหลือในแผ่นหลังเหล็กทั้งการทดลองและการจำลองเชิงตัวเลข ผลการวิจัยพบว่า การกระจายตัวของความเสียหายระหว่างกระบวนการเจาะผ่านแผ่นเกราะด้วยการจำลองเชิงตัวเลขสามารถแสดงให้เห็นเด่นชัดมาก ทั้งนี้ การศึกษานี้สามารถสรุปได้ว่า ความลึกของการเจาะผ่านเกราะมีค่าลดลงเชิงเส้นจากความหนาที่เพิ่มขึ้นของปริมาณเซรามิก

สำหรับงานวิจัยของ T. Jankowiak และคณะ [18] ได้ศึกษาและอธิบายเกี่ยวกับการวิเคราะห์เชิงตัวเลข สำหรับการเจาะรูแผ่นเหล็กด้วยกระสุนปืน ภายใต้สภาวะการยิงด้วยความเร็วและกระแทกสูง ด้วยพฤติกรรมแบบพลวัตในแบบจำลองตัวเลขโดยใช้รหัสสองค้ประกอบจำกัดของ ABAQUS/Explicit โดยพิจารณาคูณลักษณะของตัวแปร (Parametric) หลายตัว เช่น โครงสร้างของเป้าหมาย (แผ่นเหล็ก) ความหนา แรงเสียดทานระหว่างการทะลุออกของกระสุนกับเป้าหมายและรูปร่างการทะลุออกของกระสุน งานวิจัยมีวัตถุประสงค์คือทำนายพฤติกรรมและขีดจำกัดการเจาะทะลุของกระสุนปืน นอกจากนี้ผลของการวิจัยยังมีการเปรียบเทียบผลการจำลองเชิงตัวเลขควบคู่กับการทดลองจริงตามรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การเปรียบเทียบผลการจำลองเชิงตัวเลขและการทดสอบยิงจริง [18]

V. Vijeesh และคณะ [19] มีการศึกษาผลการเปลี่ยนรูปและประสิทธิภาพการทะลุออกของกระสุนปืนที่ทำจากอลูมิเนียมรูปทรงกรวยที่ทดลองกับชิ้นงานอลูมิเนียมแบบบาง (เป้าหมาย) โดยพิจารณาอิทธิพลของมุม เอเพ็กซ์ (มุมปลายของการทะลุออกของกระสุน) จากกระสุนปืนและการต้านทานการเจาะทะลุเป้าหมาย ด้วยวิธีการจำลองเชิงตัวเลขโดยใช้ ABAQUS/Explicit ผลการวิจัยพบว่า มุมยอดของการทะลุออกของกระสุนที่มีเปลี่ยนแปลงกระทบต่อการเปลี่ยนรูปแบบการทะลุออกของกระสุน สมบัติของกระสุนปืน และการทำลายของกระสุนปืนดังรูปที่ 2.10 นอกจากนี้ยังพบว่า วิธีการจำลองเชิงตัวเลขโดยใช้ ABAQUS/Explicit มีความสามารถสำหรับการทำนายการเปลี่ยนรูปแบบการทะลุออกของกระสุนและพฤติกรรมที่อยู่บนเป้าหมายที่เกี่ยวข้องได้อย่างมีประสิทธิภาพเพียงพอ



รูปที่ 2.10 การออกแบบมุมปลายของการทะลุออกของกระสุนแบบอลูมิเนียมทรงกรวย [19]

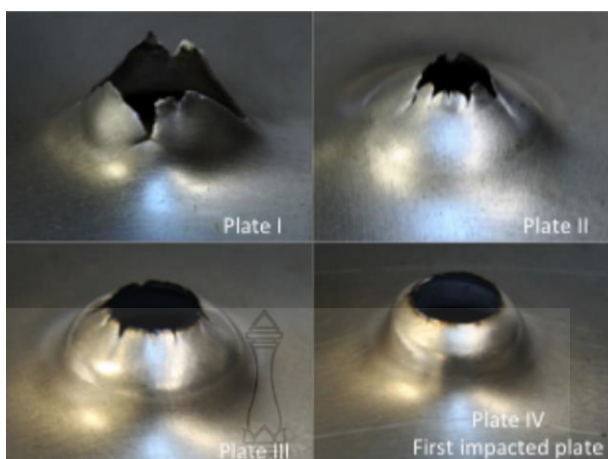
ในขณะที่งานวิจัยของ K. Senthil และคณะ [20] ได้ศึกษาเกี่ยวกับความต้านทานกระสุนรูปทรงครึ่งวงกลม ทรงกลม และปลายหัวกระสุนที่ออกแบบที่เจาะผ่านแผ่นอลูมิเนียม (เป้าหมาย) ด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ด้วย ABAQUS/Explicit เช่นเดียวกับงานวิจัยที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ การทดลองกับเป้าหมายแผ่นอลูมิเนียมเทียบกับการทะลุออกของกระสุนของเหล็กชุบแข็งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มิลลิเมตร ความต้านทานกระสุนปืนของเป้าหมายที่มีความหนา 1.27 มิลลิเมตร ตลอดจนมีการศึกษาการทะลุออกของกระสุนปืนทรงกลมกับทรงกระบอกครึ่งวงกลมที่ปลายหัวกระสุนที่ออกแบบเช่นเดียวกัน สำหรับการสร้างแบบจำลองเป้าหมายเป็นแบบที่เปลี่ยนรูปได้และกำหนดให้มีการทะลุออกของกระสุนปืนบนพื้นผิว 3 มิติ นอกจากนี้ แบบจำลองอีลาสโตวิสโคพลาสติกของ Johnson-Cook (JC) ยังถูกนำมาใช้สำหรับการทำนายพฤติกรรมการไหลและการแตกหักของแผ่นอลูมิเนียมเป้าหมายอีกด้วย รวมไปถึงตรวจสอบประสิทธิภาพของแบบจำลอง Johnson-Cook (JC) ในการสร้างผลการจำลองเชิงตัวเลขของการเป็ยงเบนเป้าหมายสูงสุดและแรงกระแทกสูงสุดที่เกิดจากการทะลุออกของกระสุนปืนที่มีรูปร่างแตกต่างกัน 3 แบบ ในขณะที่กระสุนพุ่งเข้าเจาะเป้าหมายโดยตัวแปรที่สำคัญในการศึกษานี้ คือ การโก่งตัวและแรงกระแทก ผลการวิจัยเปิดเผยให้เห็นว่ารูปทรงกระสุนมีอิทธิพลของการโก่งตัวและแรงกระแทก

ส่วนงานวิจัยของ M. Rodriguez และคณะ [21] ได้ศึกษาเกี่ยวกับกลไกการเจาะของแผ่นเกราะป้องกันที่ทำจากอลูมิเนียมภายใต้รูปร่างของปลายหัวกระสุนที่แตกต่างกัน โดยผลการศึกษามุ่งเน้นไปที่พฤติกรรมเชิงกลของอลูมิเนียมอัลลอย 2024-T351 ภายใต้การรับแรงกระแทก วิธีการวิจัยถูกดำเนินการแบบผสมผสานระหว่างเทคนิคการจำลองเชิงตัวเลขและการทดลองตามเงื่อนไขดังนี้ 1) ทดลองกับแผ่นเป้าหมายที่มีความหนา 4 มิลลิเมตร ที่มีช่วงความเร็วการกระแทกระหว่าง 50 ถึง 200 เมตร/วินาที โดยเปลี่ยนค่าความเค้นผ่านตามรูปทรงปลายหัวกระสุน การทะลุออกของกระสุนปืน ทั้งแบบทรงกรวยครึ่งวงกลมและปลายที่มน 2) จำลองเชิงตัวเลขเกี่ยวกับพฤติกรรมเชิงกลของ

อลูมิเนียมอัลลอย 2024-T351 ภายใต้การรับแรงกระแทก ผ่านแบบจำลอง 3 มิติบนโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ABAQUS/Explicit โดยใช้องค์ประกอบ Lagrangian และ Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า ผลการทดลองและการทำนายพฤติกรรมด้วยจำลองเชิงตัวสามารถให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน

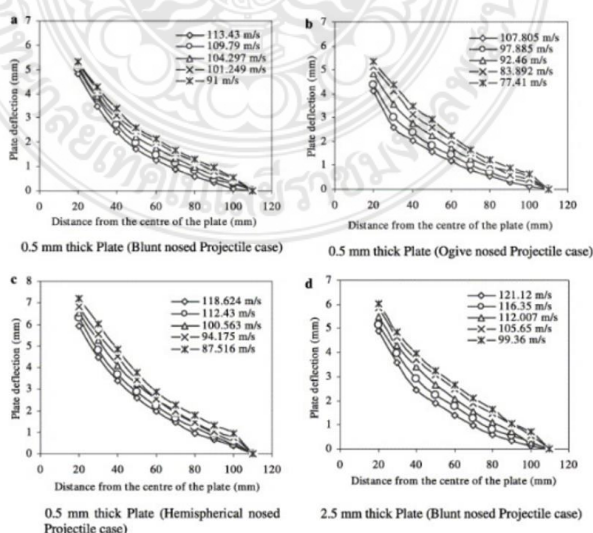
R. Abhishek และคณะ [22] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการการเจาะทะลุของกระสุนปืนบนคอนกรีตเกรดที่เป็นวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างโครงสร้างทางการทหาร เช่น โครงสร้างของห้องบรรจุหัวรบนิวเคลียร์ โครงสร้างสะพานโครงสร้างบังเกอร์ทางการทหาร ด้วยวิธีการทดลองเจาะรูและการจำลองบนโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ABAQUS/Explicit เพื่อทำความเข้าใจในพฤติกรรมของคอนกรีตต่อผลกระทบของกระสุนปืน การทดลองเจาะถูกกระทำบนชิ้นงานคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตเสริมเหล็กรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส 450×450 มิลลิเมตร ที่มีกำลังอัด 48 MPa และทดลองเพิ่มด้วยการเสริมแรงตะแกรงเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ที่เสริมบริเวณกึ่งกลางของความหนาของชิ้นงานเป้าหมาย ด้วยการทะลุออกของกระสุนปืนของหัวรัศมีลำกล้องปืน (CRH) 3 และอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/d) 23.7 และ 11.8 ตามลำดับ ภายใต้ความเร็วของการทะลุออกของกระสุนปืนในช่วงระหว่าง 43 ถึง 178 เมตร/วินาที ผลลัพธ์ที่ได้นี้ คือ อิทธิพลต่อประสิทธิภาพการทะลุออกของกระสุนจากความแปรผันของอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/d) โดยคอนกรีตธรรมดามีประสิทธิภาพการต้านทานการทะลุออกของกระสุนปืนต่ำกว่าคอนกรีตเสริมเหล็กร้อยละ 14 นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าเบี่ยงเบนจากการทดลองและการจำลองเชิงตัวเลขของคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตเสริมเหล็กมีค่าเป็นร้อยละ 16.1 และ 6.7 ตามลำดับ

ในกรณีผลงานของ K.M. Kpenyigba และคณะ [23] ที่มีการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของรูปร่างการทะลุออกของกระสุนปืนต่อพฤติกรรมไดนามิกของเหล็กแผ่น ผลงานวิจัยนี้ได้อธิบายถึงกระบวนการเจาะเหล็กแผ่น ด้วยการทดลองและการจำลองเชิงตัวเลข ซึ่งทั้ง 2 วิธีนี้ได้ศึกษาสมบัติและวัสดุของกระสุนปืน และความล้มเหลวของการทะลุออกของกระสุนปืนจากอิทธิพลของรูปร่างของปลายกระสุนปืนรูปทรงกรวยปลายมน รวมถึงการบีบอัดและการคอเส้นรอบวงของการเจาะทะลุ ยิ่งไปกว่านั้นมีการทดลองเกี่ยวกับความแตกต่างของปลายกระสุนปืนโดยใช้ผลของการทะลุออกของกระสุนปืน การสมดุลพลังงาน และการดูดซับพลังงานที่กระทำต่อแผ่นเหล็กเป้าหมาย หนา 1 มิลลิเมตร การทดลองกระทำตามเงื่อนไขที่ความเร็วในการกระแทกหลากหลายค่าระหว่าง ตั้งแต่ 35 ถึง 180 เมตร/วินาที ดังรูปที่ 2.11 กระสุนปืนทุกรูปทรงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร ที่อัตราส่วนมวล (มวลการทะลุออกของกระสุนปืน/มวลแผ่นเหล็ก) มีค่า 0.38 และอัตราส่วนระหว่างระยะของเหล็กแผ่นและเส้นผ่านศูนย์กลางของการทะลุออกของกระสุนปืนที่ 3.85 ตามลำดับ



รูปที่ 2.11 การทดสอบการทะลุออกของกระสุนปืนบนแผ่นเหล็กเป้าหมาย [23]

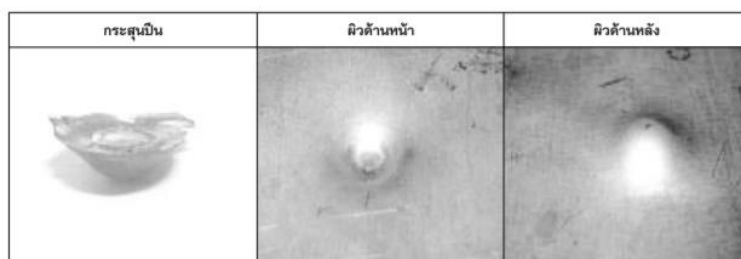
N.K. Gupta และคณะ [24] มีการศึกษาเกี่ยวกับผลของรูปทรงปลายกระสุนทำจากเหล็ก ปลายทู่มนและแบบครึ่งซีก รูปแบบการทะลุออกของกระสุนปืน ความเร็วในการกระแทก และความหนาของชิ้นงานต่อพฤติกรรมการเสียรูปของแผ่นเกราะอลูมิเนียมที่มีความหนา 0.5 0.71 1 1.5 2 2.5 และ 3 มิลลิเมตร ภายใต้ความเร็วที่แตกต่างกัน โดยใช้วิธีการตรวจสอบเชิงการทดลองและการจำลองเชิงตัวเลข ผลการวิจัยแสดงให้เห็นถึง กระสุนปืนรูปทรงครึ่งซีกส่งผลต่อการเสียรูป (dishing) ของแผ่นเกราะเป้าหมายสูงสุด ซึ่งมีการกล่าวอ้างสนับสนุนเพิ่มเติมอีกว่า ทั่วโลกพบว่าปลายกระสุนปืนแบบ Ogive มีประสิทธิภาพในการเจาะทะลุที่สูงที่สุดสำหรับแผ่นเกราะที่มีความหนา 0.5 0.71 1.0 และ 1.5 มิลลิเมตร ส่วนในกรณีของกระสุนปืนปลายทู่มนมีประสิทธิภาพดีมากที่สุดสำหรับแผ่นเกราะที่มีความหนา 2.0 2.5 และ 3.0 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2.12 นอกจากนี้ยังพบว่า การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบของการจำลองเชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของ ABAQUS นั้นมีผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับการทดลองจริงอีกด้วย



รูปที่ 2.12 รูปแบบความเสียหายของแผ่นเกราะจากการเปลี่ยนแปลงรูปทรงปลายกระสุน [24]

ในผลงานของ W.M. Gao และคณะ [25] มีการวิจัยเพื่อศึกษารอยขีดข่วนของวัสดุพอลิเมอร์ด้วยการใช้แบบจำลองที่เป็นส่วนประกอบของวัสดุ เนื่องจากสามารถให้การตอบสนองการวิเคราะห์ผลที่ค่อนข้างซับซ้อนและมีขนาดใหญ่ได้ดี ตลอดจนวิธีการสร้างแบบจำลองสามารถแก้ไขปัญหาคะบวนการคำนวณทางฟิสิกส์ได้หลากหลายประการครอบคลุมไปถึง ความเสียหาย (tribology) การเปลี่ยนรูป (deformation) และความเสียหายของวัสดุสถิตยศาสตร์ (static damage) และพลศาสตร์ (dynamic damage) การวิจัยนี้ใช้วิธีการจำลององค์ประกอบ 2 วิธี ได้แก่ 1) ABAQUS/Explicit Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) adaptive meshing และ 2) Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) เพื่อสร้างแบบจำลองรอยขีดข่วนของพลาสติกยืดหยุ่น (โพลีโพรพิลีน) ที่ชุบแข็งแบบไอโซโทรปิก แบบจำลองวัสดุและแบบจำลอง hyperelastic-viscoelastic ทั้งนี้ แบบจำลองดังกล่าวถูกประเมินด้วยการทดลองจริงด้วยการขีด ผลการวิจัยพบว่า แบบจำลองสามารถให้ผลความเสียหาย การเปลี่ยนรูป ความเสียหายของวัสดุสถิตยศาสตร์ และพลศาสตร์ ได้ใกล้เคียงกับการทดลองจริง ทั้งนี้ ผู้วิจัยยังมีการกล่าวอีกว่า การสร้างแบบจำลองรอยขีดข่วนของวัสดุพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค วิธีใหม่ ๆ ถือเป็นความท้าทายในการพัฒนาให้ประสบความสำเร็จต่อไป

งานวิจัยของ ทศน์ชัย ผ่องผาย และคณะ [26] ศึกษาเกี่ยวกับการจำลองสถานการณ์การกระแทกจากกระสุนปืนแบบไม่เชิงเส้น (non-linear) ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยการใชกระสุนขนาด 9 มิลลิเมตร ที่ทำจากวัสดุ Parabellum AISI1008 AA1100 และ AA5083 โดยมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายโอนของพลังงานจากลูกกระสุนปืนไปยังเป้าหมาย โดยมีเงื่อนไขการทดลอง คือ ใช้วัสดุ 3 ชนิดที่ได้แก่ เหล็กกล้า AAISI1008 AA1100 และ AA5083 มีความหนาของวัสดุ 2 4 และ 6 มิลลิเมตร และวัสดุอลูมิเนียม AA5083 ความหนา 4 และ 6 มิลลิเมตร ตามลำดับ การทดลองใช้ปืน Glock 19 กระสุนปืนขนาด 9 มิลลิเมตร Parabellum ผลการทดลองพบว่า พฤติกรรมช้ำบ่งทางกายภาพทำให้เห็นว่าวัสดุเหล็กกล้า AA1100 ในทุก ๆ ความหนาถูกกระสุนปืนขนาด 9 มิลลิเมตรเจาะทะลุทั้งหมด ส่วนแผ่นวัสดุเหล็กกล้า AISI1008 และวัสดุอลูมิเนียม AA5083 เกิดความเสียหายด้วยการเปลี่ยนรูปหากแต่กระสุนไม่สามารถทะลุผ่านไปได้ งานวิจัยสรุปได้ว่า แผ่นวัสดุเหล็กกล้า AISI1008 ภายใต้อุณหภูมิ 6 มิลลิเมตร มีความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุมากที่สุด โดยผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.13



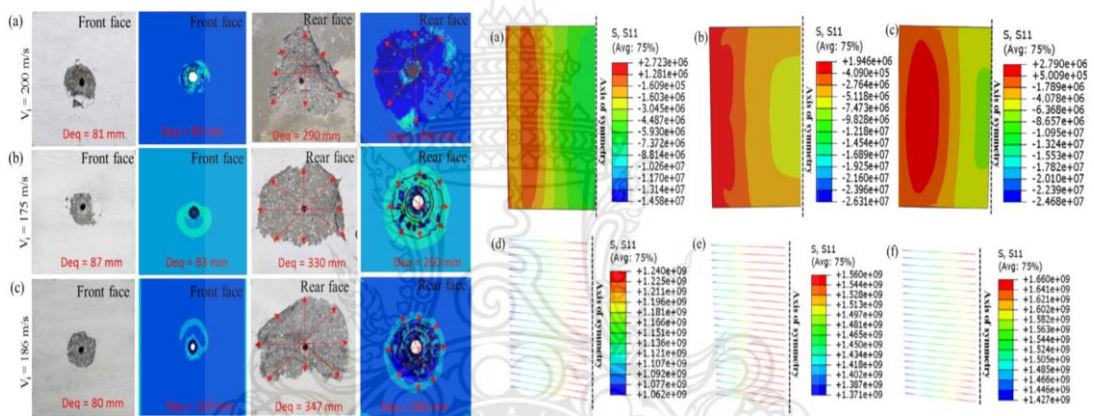
รูปที่ 2.13 การทดสอบยิงกระสุนขนาด 9 มิลลิเมตร ผ่านแผ่นเหล็กกล้า AISI1008 [26]

B. Tore และคณะ [27] มีการวิจัยเกี่ยวกับวิถีกระสุนที่เข้ากระทบแผ่นเกราะป้องกัน อลูมิเนียม AA6082-T4 (เป้าหมาย) แบบปกติและแบบเฉียงที่ความหนา 20 มิลลิเมตร วิธีการวิจัยใช้ในเชิงทดลองและการจำลองเชิงตัวเลข โดยใช้ปืนไรเฟิลแมกเซออร์และกระสุนขนาดเล็ก 2 ประเภท ได้แก่ขนาด 7.62 × 63 มิลลิเมตร พร้อมแกนตะกั่วอ่อนและ APM2 ขนาด 7.62 × 63 มิลลิเมตร เป้าหมายถูกกระแทกด้วยมุม 0 15 30 45 และ 60 องศา ความเร็วในการกระแทกประมาณ 830 เมตร/วินาที การตรวจวัดความเร็วกระสุนในช่วงเริ่มต้นการยิงและความเร็วที่เหลือใช้ของพดิกอลเซนเซอร์ เลเซอร์หลายชนิด ส่วนในช่วงการเจาะทะลุใช้กล้องวิดีโอความเร็วสูงในการถ่ายภาพ สิ่งค้นพบที่น่าสนใจในงานวิจัยนี้เป็นพิเศษ คือ มุมเฉียงวิกฤตที่เปลี่ยนจากระบวนการเจาะทะลุเป็นการฝังหรือการฉีกตัวของลูกกระสุน ผลการศึกษาเปิดเผยว่า มุมเฉียงวิกฤตคือมุมที่น้อยกว่า 60 องศา สำหรับการจำลองเชิงตัวเลขมีการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ที่เป็นส่วนประกอบของ Johnson-Cook ที่และเกณฑ์ความล้มเหลวของ Cockcroft – Latham ทั้งนี้ ผลในเชิงทดลองและการจำลองเชิงตัวเลขให้ผลที่มีความใกล้เคียงกัน

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวกับการวิเคราะห์องค์ประกอบทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของ Z. Xuhong และคณะ [28] ที่มีการศึกษาความเค้นตกค้างจากความร้อนในคานหล่อ งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การตรวจสอบความเค้นตกค้างในคานเอชปีม จากกระบวนการผลิตด้วยการตัดและการเชื่อมที่มีการสร้างแบบจำลองด้วยการจำลองเชิงตัวเลข โดยที่ความเค้นตกค้างจะเกิดผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อความต้านทานการโก่งงอด้านข้างของคานที่มีการบิดงอ นอกเหนือจากนี้ ทิศทางของการศึกษานี้ได้ดำเนินการพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ เพื่อจำลองความเค้นตกค้างและอุณหภูมิจากความร้อนของคานหล่อในกระบวนการผลิต โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากการตัดและการเชื่อมที่สามารถตรวจสอบและให้ผลลัพธ์เป็นตัวเชิงตัวเลข มากไปกว่านั้น ความเค้นตกค้างจากความร้อนที่ทำนายไว้จะถูกดำเนินการตรวจสอบความถูกต้อง (Validation) กับผลการทดลองอีกด้วย ทั้งนี้ แบบจำลองที่ผ่านการตรวจสอบความถูกต้องแล้ว คุณลักษณะของตัวแปร (Parametric) คือความหนาของหน้าแปลน (tf) ความกว้างของหน้าแปลน (bf) และความหนาของเว็บ (tw) ที่มีผลกระทบต่อความเค้นตกค้างและการพัฒนาศักยภาพการกระจายความเค้นตกค้างในคานแบบคาสเทลจะดำเนินการทดลองต่อไป

งานวิจัยของ M.A.Iqbal และคณะ [29] ที่ดำเนินการศึกษาการกระจายพลังงานในชิ้นงานคอนกรีตอัดแรงเทียบกับผลกระทบของการทะลุออกของกระสุนปืนเหล็กขนาดใหญ่มีลักษณะเป็นแท่งยาว การทดลองกระทำกับแผ่นคอนกรีตอัดแรงหนา 60 80 และ 100 มิลลิเมตร ที่มีผลกระทบจากการทะลุออกของกระสุนปืนเหล็กแท่งยาวมวล 1 กิโลกรัม ภายใต้ความเร็วใกล้เคียงกับขีดจำกัดของขนาดกระสุนปืน ที่ทดสอบด้วยแรงอัดเริ่มต้นร้อยละ 10 และ 20 ของกำลังอัดที่ไม่ได้กำหนด 40 MPa แผ่นคอนกรีตอัดแรงผ่านการปรับความแข็งแรงสูงด้วยสายเหล็กเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร (1646 MPa) ทั้งนี้ การเสริมแรงไว้ในชิ้นงานคอนกรีตอัดแรงถูกเตรียมการเพื่อทดลองและเปรียบเทียบ

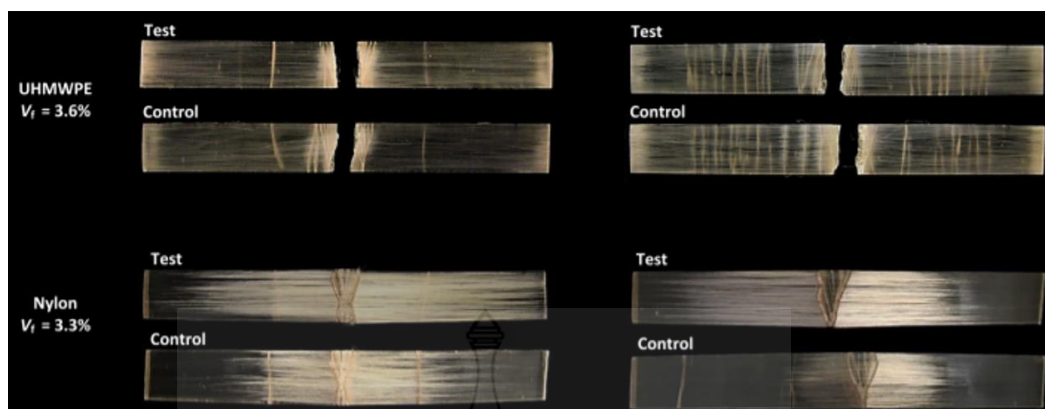
ประสิทธิภาพกับชิ้นงานคอนกรีตเสริมเหล็ก ผลการวิจัยพบว่า การอัดแรงอัดในคอนกรีตที่มีการอัดแรงมีประสิทธิภาพในการลดความเสียหายและช่วยเพิ่มความต้านทานการเจาะทะลุของลูกกระสุนปืน โดยมีการค้นพบอีกว่า อิทธิพลของแรงอัดมีความโดดเด่นชัดเจนมากขึ้นภายใต้การเพิ่มขึ้นของความหนาของคอนกรีตอัดแรงและส่งผลความเร็วของกระสุนปืนลดลงอีกด้วย สำหรับการจำลองเชิงตัวเลขมีการจำลองด้วยการทำซ้ำด้วยองค์ประกอบบนไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อทำนายพฤติกรรมอันเป็นลักษณะเฉพาะของลวดอัดแรงเหล็กเสริมและคอนกรีต ซึ่งแรงกดอัดที่ได้รับการถ่ายโอนในคอนกรีตเสมือนการจำลองสถิต ส่วนการจำลองการเจาะทะลุด้วยการทะลุออกของกระสุนปืนโดยใช้แบบจำลอง Johnson-Holmquist และ Johnson Cook สำหรับคอนกรีตและแบบจำลอง Johnson-Cook elasto-viscoplastic model โดยผลการจำลององค์ประกอบพบว่า คอนกรีตอัดเสริมแรงทำให้กระสุนปืนด้อยประสิทธิภาพการเจาะทะลุลงจึงก่อให้เกิดความเสียหายต่ำกว่าคอนกรีตอัด ตามรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การเปรียบเทียบผลการทดสอบและการจำลองเชิงตัวเลขบนเป้าหมาย [29]

2.5.2 การเพิ่มประสิทธิภาพแผ่นเกราะกันกระสุน

F. Adnan และคณะ [30] ดำเนินการศึกษาการเพิ่มสมบัติการกระแทกที่เกิดจากแรงกดของวัสดุ Nylon และวัสดุคอมโพสิตโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมเส้นใย UHMWPE ด้วยการตรวจสอบสมบัติการรับแรงกระแทกแบบทิศทางเดียวอย่างต่อเนื่อง และนำมาใช้สำหรับการอธิบายผลกระทบของแรงกดที่มีต่อลักษณะการดูดซับพลังงาน Prestress ภายในตัวอย่างวัสดุคอมโพสิตโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมเส้นใย UHMWPE สำหรับผลการทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปตัวอย่างวัสดุที่ได้ผ่านการบีบอัดด้วยแรงหนืดบางจุดมีความสามารถในการดูดซับพลังงานมากกว่าถึงร้อยละ 20 โดยบางจุดมีความสามารถในการดูดซับพลังงานมากกว่าถึงร้อยละ 30-40 ทั้งนี้ไม่ว่าการสร้างแรงกดด้วยวิธียืดหยุ่นหรือความหนืดการตีบอนด์แบบไฟเบอร์ - เมทริกซ์ถือได้ว่าเป็นการสร้างกลไกการดูดซับพลังงานสำคัญสำหรับวัสดุคอมโพสิตประเภทนี้ อย่างไรก็ตาม มีหลักฐานบางอย่างแสดงให้เห็นว่าในบริเวณผิวแกนกลาง (อินเทอร์เฟซสกินคอร์) ของเส้นใย UHMWPE มีความแข็งและความหนืดลดลง ดังรูปที่ 2.15 ทั้งนี้การขัดผิวแกนกลางของเส้นใยจะส่งผลต่อการดูดซับพลังงานอย่างมีนัยสำคัญ

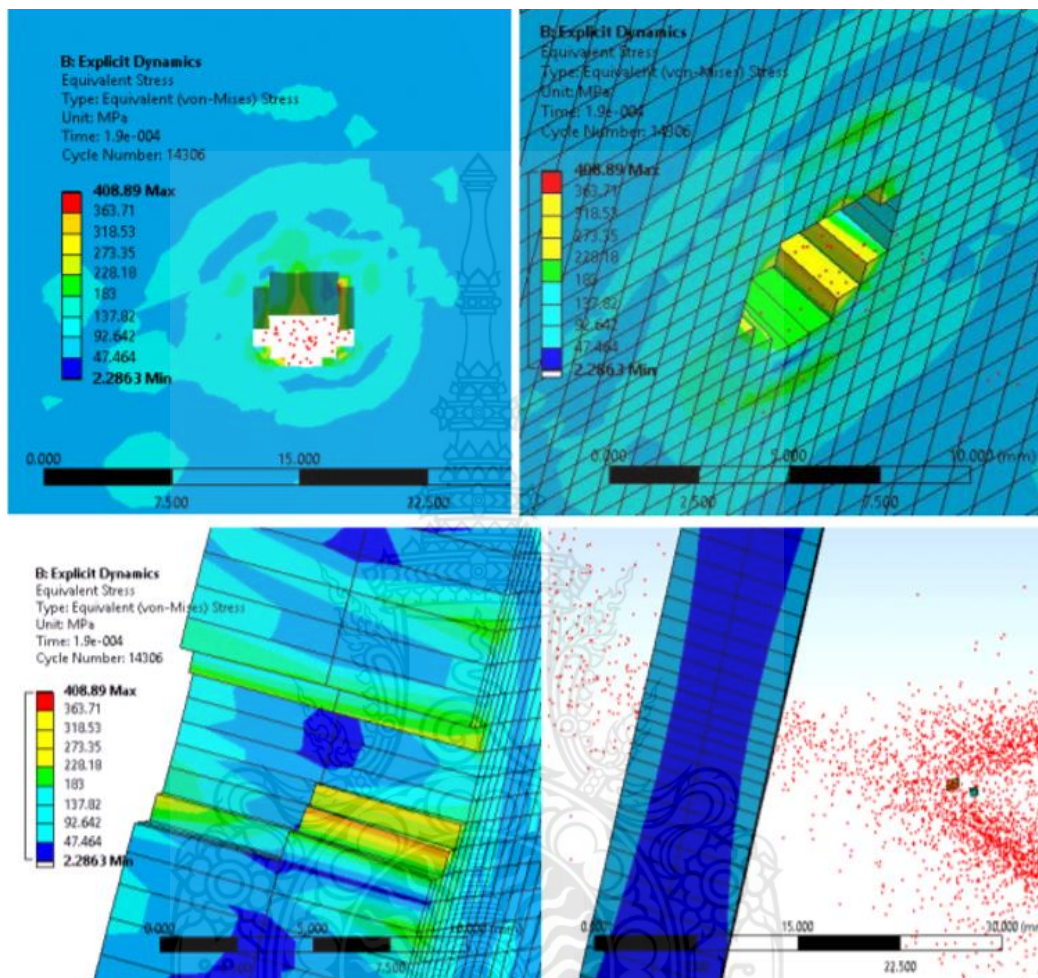


รูปที่ 2.15 การทดสอบคอมโพสิตที่ใช้เส้นใย UHMWPE [30]

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพความแข็งแรงของเกราะกันกระสุนด้วยการเคลือบผิวฟิล์มแข็ง ของธรรมชาติ วันแดง [31] มุ่งเน้นไปการเพิ่มประสิทธิภาพสูงด้วยน้ำหนักเบาที่เบาและสามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนได้ งานวิจัยนี้เลือกการทดสอบตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 2 ด้วยการยิงจริงของกระสุนตะกั่วหุ้มโลหะแข็ง ขนาด 9 มิลลิเมตร ซึ่งมีวัสดุที่ใช้ทำเกราะกันกระสุน 3 วัสดุ ประกอบด้วย 1) แผ่นเหล็กกล้า S50C หนา 3 มิลลิเมตร ขนาด 220 X 250 มิลลิเมตร ชุบแข็งด้วยเปลวไฟ 2) แผ่นเหล็กกล้าเคลือบผิวฟิล์มแข็ง Tic ความหนา 10 μm ขนาด 150 X 150 มิลลิเมตร 3) แผ่นเหล็กกล้าเคลือบผิวฟิล์มแข็ง TicN ความหนา 10 μm ขนาด 150 X 150 มิลลิเมตร ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเกราะกันกระสุนที่ทำจากแผ่นเหล็กกล้าเคลือบผิวฟิล์มแข็ง Tic และ TicN ไม่มีความสามารถในการเพิ่มประสิทธิภาพความแข็งแรงให้กับเกราะกันกระสุนได้ ในขณะที่เกราะกันกระสุนแผ่นเหล็กกล้า S50C ชุบแข็งด้วยเปลวไฟ มีความสามารถในการหยุดการทะลุได้

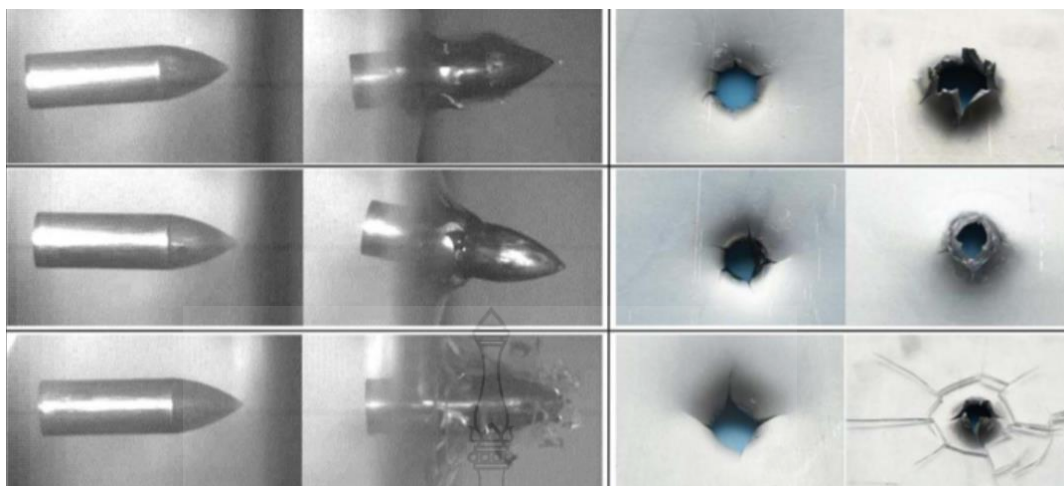
ผลงานวิจัยของ นวพล กลางทัพ [5] มุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนปืนผ่านแผ่นเกราะโลหะด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่ผ่านการออกแบบแผ่นเกราะโลหะด้วยโปรแกรม Solidworks โดยใช้โปรแกรม ANSYS /Explicit Dynamic สำหรับการวิเคราะห์ การจำลองอยู่ภายใต้มาตรฐานการทดสอบ NIJ ระดับ 4 ด้วยการจำลองกระสุนที่ทำจากวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) ขนาด 7.62 มิลลิเมตร ความเร็วของกระสุน 878 ± 9.1 เมตรต่อวินาที ด้วยการใช้วัสดุทำเกราะกันกระสุน 3 ชนิด ได้แก่ 1) SKD11 2) ทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) และ 3) สแตนเลส (SUS304) การออกแบบการทดลองมีการจำลองแบบเกราะ 1 และ 2 ชั้น มุมกระแทกของกระสุนที่แผ่นเกราะกันกระสุนที่ 0 15 30 45 และ 60 องศา ตามลำดับ นอกจากนี้มีการกำหนดความหนาของแผ่นเกราะกันกระสุนเข้ามาเป็นตัวแปรในการจำลองอีกด้วย สำหรับการจำลองการเจาะทะลุของกระสุนใช้ทฤษฎีความเสียหายของ Johnson-Holmquist, Johnson-Cook และ Steinberg Guinan Strength model ตามรูปที่ 2.16 ผลการวิจัยพบว่า ผลที่ได้จากการจำลองเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม ANSYS/Explicit Dynamic และการทดลองจริงให้ค่า

คล้ายคลึงใกล้เคียงกันมาก นอกจากนี้ผู้วิจัยยังสรุปได้ว่า การจำลองเชิงตัวเลขด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำนายความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ใกล้เคียงกับการทดลองจริง



รูปที่ 2.16 ความเสียหายของเการะกันกระสุนทั้งสแตนคาร์ไบด์ [5]

Wei Zhang และคณะ [32] ดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาและทดลองการเจาะทะลุ ของกระสุนปืนปลายแหลมที่กระทำบนแผ่นเกราะกันกระสุนด้วยวัสดุที่แตกต่างกัน คือ แผ่นลามิเนตโพลีเมอร์อลูมิเนียมที่มีชั้นโพลีคาร์บอเนต PC ชั้นโพลีเมธิลเมทาคริเลต ชั้น AA2024-T4 หนาชั้นละ 2 มิลลิเมตร และชั้น AA2024-T4 หนา 3 มิลลิเมตร เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของความแข็งแรง ความเหนียวระหว่างวัสดุ และความต้านทานกระสุนปืน สำหรับกระสุนปืนถูกยิงด้วยแก๊สที่ความเร็วกระแทกเหนือและต่ำกว่าความเร็วจำกัดของกระสุนปืน โดยมีช่วงความเร็วระหว่าง 60–150 เมตร/วินาที สำหรับความเร็วเริ่มต้นและความเร็วคงเหลือที่กระทบต่อแผ่นเกราะเป้าหมายถูกวัดโดยกล้องความเร็วสูง Photron FASTCAM SA5 จากผลลัพธ์จากการวิจัยแสดงให้เห็นว่า ลำดับชั้นโพลีเมอร์ และพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุโพลีเมอร์มีผลโดยตรงกับประสิทธิภาพป้องกันหรือลดความเสียหายของแผ่นลามิเนตโพลีเมอร์ - อลูมิเนียม ดังรูปที่ 2.17

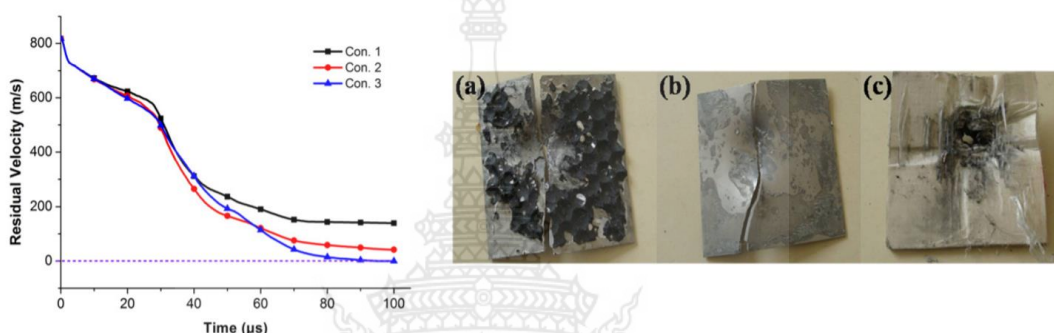


รูปที่ 2.17 ความเสียหายของการยิงเจาะทะลุแผ่นลามิเนตโพลีเมอร์และอลูมิเนียม [32]

G. Yubo และคณะ [33] ศึกษาประสิทธิภาพการกระแทกความเร็วสูงของเกราะโลหะคอมโพสิตเซรามิก ที่เป็นผลของอิทธิพลของชั้นกาวยึดกระเบื้องเซรามิกและแผ่นรองหลัง (backing plate) ด้วยวิธีเชิงทดลองและการจำลองเชิงตัวเลข จากการใช้เซรามิก 2 ประเภท คือ โครงสร้างเซรามิกเสาทิน และโครงสร้างเซรามิกเคลือบโลหะผสมอลูมิเนียม ความหนาของชั้นกาวแตกต่างกันที่ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 มิลลิเมตร ตามลำดับ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าความหนาของกาวที่เพิ่มขึ้นสามารถลดการแตกร้าวขนาดเซรามิกลงได้ และการแตกของชิ้นส่วนในโครงสร้างเซรามิกเคลือบโลหะผสมอลูมิเนียมมีขนาดเล็กกว่าชิ้นส่วนในโครงสร้างเซรามิกเสาทิน นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงวิธีการแตกร้าวของส่วนต่อประสานในชั้นเซรามิกและกาวของเกราะคอมโพสิตเซรามิกเคลือบ ชี้ให้เห็นว่า มีความสามารถในการดูดซับพลังงานดีขึ้นในทิศทางด้านข้าง ความลึกของการเจาะทะลุของโครงสร้างเซรามิกเสาทิน อลูมิเนียมที่เชื่อมด้วยอีพอกซีเรซินพบว่ามากกว่าเกราะที่ไม่มีกาว ในทางกลับกัน การเพิ่มชั้นกาวช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการรับแรงกระแทกสำหรับโครงสร้างเซรามิก อลูมิเนียมลามิเนต ยิ่งไปกว่านั้น ความลึกของการเจาะสำหรับเกราะคอมโพสิตทั้งสองรูปแบบลดลงหากความหนาของกาวเพิ่มขึ้น ในส่วนของผลการจำลองเชิงตัวเลขพบว่า การแพร่กระจายคลื่นความเค้นของชั้นกาวด้านในมีผลน้อยมากจากความหนาของกาว เนื่องจากความแตกต่างของยืดหยุ่นระหว่างแผ่นเกราะกันกระสุนทำให้ค่าของความดันลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโครงสร้างเซรามิก อลูมิเนียมเคลือบ รวมไปถึงความเค้นเฉือนและอัตราความเค้นเฉือนของชั้นกาวมีค่าลดลงตามการเพิ่มของความหนากาว ดังนั้นจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการรับแรงกระแทกของเกราะคอมโพสิตเคลือบลามิเนตได้ดีขึ้น

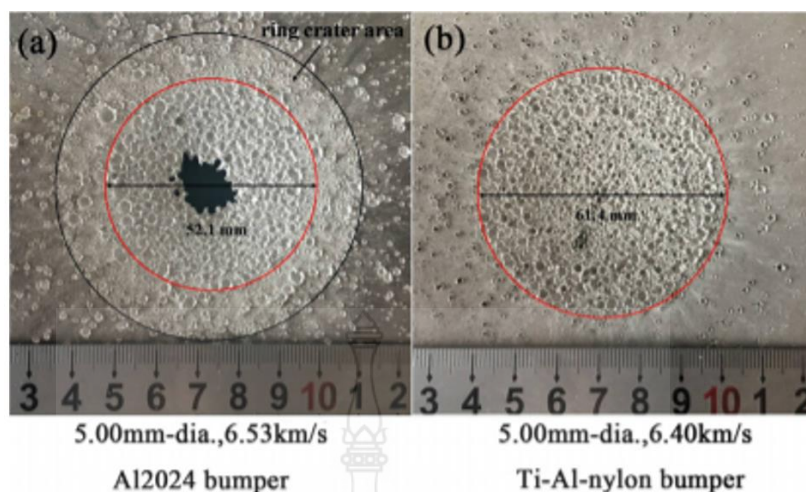
L.Weilan และคณะ [34] มีการวิจัยเกี่ยวกับอิทธิพลของความแตกต่างของชั้นลามิเนตด้านหลังที่ส่งผลต่อ กลไกการเจาะเกราะและประสิทธิภาพการเจาะทะลุกระสุนปืนของเกราะคอมโพสิตเซรามิกเรียงตัวกันดังนี้คือ Ti6Al4V/UHMWPE/Ti6Al4V ทดลองกับกระสุนปืนเจาะเกราะ

ขนาด 12.7 มิลลิเมตร ความเร็ว 818 เมตร/วินาที ด้วยการทดลองและการจำลองเชิงตัวเลข ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า กลไกต้านการเจาะทะลุนั้นเริ่มต้นด้วยชั้น Ti6Al4V นอกสุดมีประสิทธิภาพต้านการเจาะทะลุให้กับชั้น UHMWPE ก่อนพุ่งทะลุไปสู่ชั้น UHMWPE ในเวลาเดียวกันกับชั้น UHMWPE ตรงกลางมีการสมมูลพลังงานเชื่อมโยงไปยังชั้น Ti6Al4V ที่อยู่ในและนอกสุดของเกราะกันกระสุน ส่งผลให้มีความเสียหายเล็กน้อยในชั้นลามิเนตด้านหลัง ดังนั้น ภายใต้เงื่อนไขนี้จะทำให้เกราะกันกระสุนมีประสิทธิภาพในการดูดซับหรือกระจายพลังงานของกระสุนปืนเพิ่มมากขึ้นตามรูปที่ 2.18



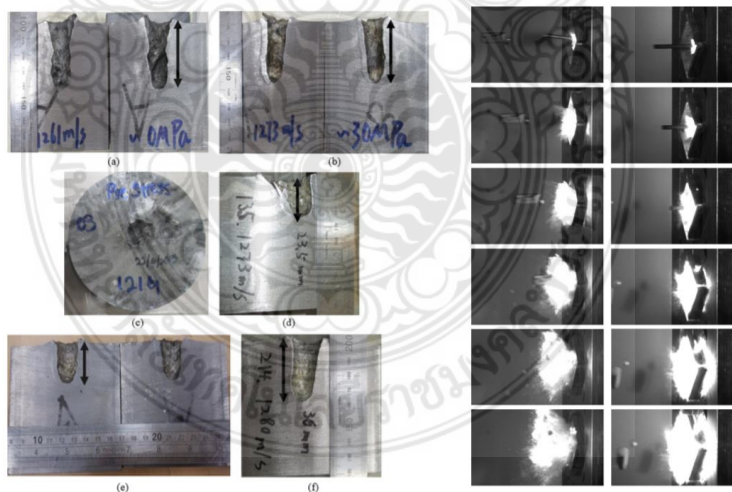
รูปที่ 2.18 ความเสียหายของเกราะกันกระสุนด้วยการทดสอบและการจำลองเชิงตัวเลข [34]

P. Zhang และคณะ [35] การศึกษาประสิทธิภาพของโครงสร้างป้องกันอวกาศและเศษซาก (Whipple shield) สำหรับยานอวกาศ โดยปรับปรุงวัสดุกันชนที่สร้างที่มีความต้านทานจากวัสดุไนลอนซิลด์ (Ti-Al-nylon shield) และวัสดุอลูมิเนียมวิปเปิลซิลด์ (Aluminum Whipple shield) ที่มีประสิทธิภาพความต้านทานในป้องกันการกระแทกที่ความเร็วสูง สำหรับการสร้างความเร็วมี 2 ขั้นตอน คือความเร็ว 3.50 และ 6.50 กิโลเมตร/วินาที ดังรูปที่ 2.19 ความเร็วถูกสร้างด้วยการยิงใช้ปืนแก๊ส การศึกษามุ่งไปที่การพิจารณาลักษณะการกระแทก การทะลุของรูเจาะในกันชน และรูปแบบความเสียหายที่ผนังด้านหลัง ผลการศึกษาสะท้อนให้เห็นถึงความสามารถในการป้องกันของกันชนที่ทำจากวัสดุไนลอนซิลด์มีค่ามากกว่าวัสดุอลูมิเนียมวิปเปิลซิลด์ภายใต้ความหนาแน่นเท่ากัน นอกจากนี้ การวิจัยยังมีการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีและการจำลองเชิงตัวเลขเพื่อหาเหตุผลว่าวัสดุไนลอนซิลด์จึงมีประสิทธิภาพในการป้องกันที่ดีขึ้น ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่า วัสดุไนลอนซิลด์สามารถสร้างแรงกดกระแทกและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นในการแยกชิ้นส่วนอวกาศและเศษซาก ผู้วิจัยยังกล่าวอีกว่า ความต้านทานแรงกระแทกส่งผลต่อการแพร่กระจายของการกระแทก ยิ่งไปกว่านั้น วัสดุที่มีอุณหภูมิการหลอมเหลวและการเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอต่ำ มีผลต่อการปรับปรุงประสิทธิภาพของกันชนที่สร้างที่มีความต้านทานจากวัสดุไนลอนซิลด์ เนื่องด้วยความสามารถในการป้องกันอวกาศ/เศษซากที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง



รูปที่ 2.19 ความต้านทานในการป้องกันการกระแทกอุกกาบาตและเศษซากที่ความเร็วสูง [35]

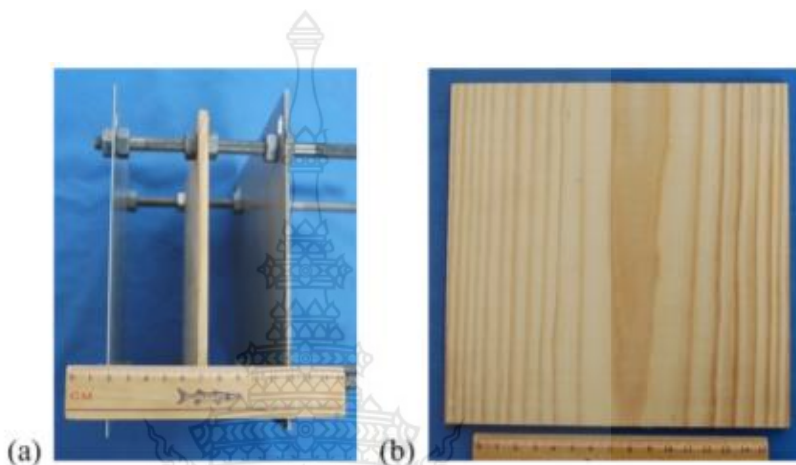
ผลงานวิจัยของ S. Ahmad และคณะ [36] มีวัตถุประสงค์ในการเพิ่มประสิทธิภาพกระสุนปืนของการเจาะทะลุเกราะเซรามิก 2 ชั้น ด้วยการปรับปรุงขีดจำกัดด้วยวิธีการทดลองและการจำลองเชิงตัวเลข โดยในเบื้องต้นมีการกำหนดความเข้มของความเค้นล่องสำหรับเกราะเซรามิกเพื่อพิจารณาความลึกของการเจาะทะลุสำหรับวัดประสิทธิภาพของกระสุนปืน ทั้งนี้ ผู้วิจัยอ้างว่า การตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองเชิงตัวเลขที่มีการดำเนินมาก่อนพิจารณาไปถึงค่าความเครียดกับขีดจำกัดกระสุนปืนเจาะเกราะเซรามิก ผลการทดสอบแสดงตามรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 การทดสอบประสิทธิภาพกระสุนปืนเจาะทะลุเกราะเซรามิก 2 ชั้น [36]

สำหรับงานวิจัยของ W. Xue-zhong และคณะ [37] การศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพของเกราะป้องกัน ที่มีแรงจูงใจจากความพยายามในการแสวงหาเกราะป้องกันการกระแทกที่มีน้ำหนักเบา ลง ด้วยการเปรียบเทียบการใช้วัสดุหลายแบบ คือ ไม้ไผ่หวูด ผนังอลูมิเนียม และผ้า Nextel/Kevlar

งานวิจัยนี้พิจารณาสมบัติต่าง ๆ ของไม้ เช่น ความหนาแน่นต่ำ ความแข็งแรง อัตราความเครียด สำหรับการทดสอบแรงกระแทกเป็นแบบ Hypervelocity ที่กำหนดความหนา 5.0 ถึง 8.0 มิลลิเมตร และความเร็ว 4.79 ถึง 7.24 กิโลเมตร/วินาที ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ภายใต้ความหนาแน่นที่เท่ากันของวัสดุ ความสามารถในการป้องกันจากการยึดใส่ไม้มีค่ามากกว่าเกราะป้องกันผนังสามชั้น อลูมิเนียม โดยมีความสามารถใกล้เคียงกับเกราะป้องกันยึดใส่ผ้า Nextel/Kevlar ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.21

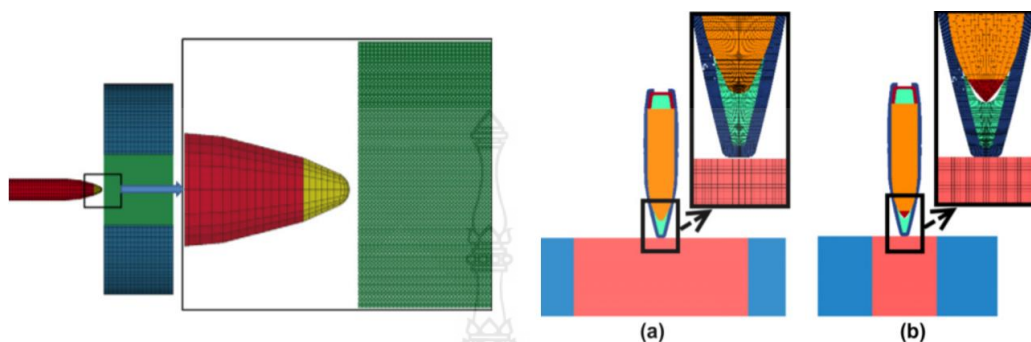


รูปที่ 2.21 เกราะป้องกันที่ทำด้วยไม้ไพน์วูดผนังอลูมิเนียม [37]

E.A. Flores-Johnson และคณะ [38] ได้ศึกษาเกี่ยวกับแผ่นเกราะโลหะเสาทิน 2 และ 3 ชั้น ทำจากเหล็ก อลูมิเนียม และวัสดุผสมต่อประสิทธิภาพการป้องกันกระสุนปืน APM2 ขนาด 7.62 มิลลิเมตร ด้วยวิธีการจำลองเชิงตัวเลข ในช่วงความเร็ว 775–950 เมตร/วินาที แบบจำลองเชิงตัวเลข ใช้องค์ประกอบจำกัดบัพโปรแกรม LS-DYNA สำหรับผลการวิจัยพบว่า แผ่นเสาทินมีประสิทธิภาพในการป้องกันการกระสุนปืนได้ดีกว่าแผ่นหลายชั้นที่ทำจากวัสดุชนิดเดียวกัน โดยพิจารณาจากความเร็วที่ลดลงหลังการกระแทก นอกจากนี้ยังพบอีกว่า แผ่นเกราะโลหะ 2 ชั้น ที่ใช้แผ่นอลูมิเนียมด้านหน้าบาง แต่แผ่นเหล็กด้านหลังหนาจะมีความต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนมากกว่าแผ่นเหล็กหลายชั้น ภายใต้ความหนาแน่นที่มีความใกล้เคียงกัน

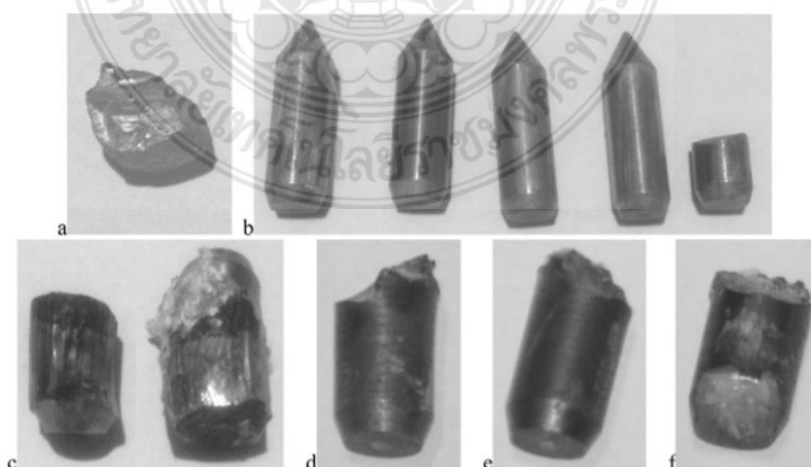
ในกรณีของ K. Namik และคณะ [39] เป็นงานวิจัยที่มุ่งไปที่การศึกษาการต้านทานของเกราะกันกระสุนปืนเจาะเกราะขนาด 7.62 มิลลิเมตร ซึ่งเกราะกันกระสุนมีความแข็งแรงสูงและใช้วัสดุผสมน้ำหนักเบาชั้นสูง ในทางกลับกัน วัสดุเหล็กกล้าที่มีความแข็งแรงสูงที่ใช้กับงานของรถทหารจึงนิยมนำมาใช้ในการป้องกันด้วยเหตุผลด้านต้นทุนที่ค่อนข้างต่ำและเป็นวัสดุที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย สำหรับงานที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างยานพาหนะ การศึกษานี้ใช้กระสุนปืน 500 HB เทียบเท่ากับกระสุนแกนเหล็กชุบแข็งขนาด 7.62 มิลลิเมตร วิธีการจำลอง 3 มิติ ใช้แบบจำลองอุทกพลศาสตร์อนุภาคเรียบ (SPH) 54R B32 API Lagrange ตามรูปที่ 2.22 โดยการทดสอบเจาะเกราะกันกระสุนที่ความหนา 9 และ 20 มิลลิเมตร นอกจากนี้ มีการทดสอบแบบจำลองความแข็งแรงและความล้มเหลว

ที่เป็นส่วนประกอบของ Johnson-Cook ผลการวิจัยสรุปว่า การจำลองเชิงตัวเลขสามารถทำนายประสิทธิภาพการเจาะทะลุของเกราะกันกระสุนได้ดีและแม่นยำเพียงพอ โดยผลการทำนายขึ้นอยู่กับกำหนดเงื่อนไขการจำลองที่มีความละเอียดอ่อน



รูปที่ 2.22 แบบจำลองเป้าหมายกระสุน [39]

B. Giovanni Di และคณะ [40] ได้ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการกระแทกและประสิทธิภาพของกระสุนปืนเจาะเกราะที่ทำด้วยแกนเหล็ก ซึ่งโดยปกติแล้วกระสุนปืนเจาะเกราะ (AP) จะมีแกนแข็งอยู่ในปลอกหุ้มทองแดง และเมื่อยิงเข้ากระทบกับเป้าหมายที่แข็ง ปลอกหุ้มทองแดงจะหลุดออก ในขณะที่ตัวกระสุนจะแทงทะลุเป้าหมาย สำหรับแกนของกระสุนเจาะเกราะ (AP) ประสิทธิภาพสูง สร้างขึ้นจากโลหะผสมทั้งสแตนเลสหรือเรเนียมที่มีปริมาณอย่างจำกัด นอกจากนี้ยังนิยมใช้เหล็กกล้าอัลลอยด์เข้ามาทดแทน เนื่องจากราคาถูกกว่าและก่อมลพิษน้อยกว่าถึงแม้ว่าจะมีประสิทธิภาพน้อยกว่ามากก็ตาม ผลการวิจัยพิจารณาการเสียรูปและพฤติกรรมแตกหักของกระสุนเจาะเกราะที่สร้างจากแกนเหล็ก 3 แกนที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 2.23 ตลอดจนต้องการหาประสิทธิภาพของกระสุนปืนที่เป็นความสัมพันธ์ของสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมกับการเจาะเกราะ ที่อาจอธิบายกลไกการแตกหักของของกระสุนเจาะเกราะได้



รูปที่ 2.23 ผลความเสียหายของกระสุนเจาะเกราะที่สร้างจากแกนเหล็ก [40]

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการดำเนินงานวิจัยประกอบด้วย วิธีการดำเนินงานวิจัย การออกแบบแผ่นเกราะที่ใช้วัสดุที่แตกต่างกัน การวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ การสร้างแบบจำลองการยิงชุดเกราะกันกระสุน การกำหนดค่าสมบัติของวัสดุตามสมการความเสียหาย การสร้างรูปแบบเมช การวิเคราะห์แผ่นเกราะ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1 ระเบียบวิธีวิจัย

3.1.1 กระบวนการดำเนินงานวิจัย

3.1.1.1 ทบทวนวรรณกรรมจากงานวิจัยเกี่ยวกับการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ของการทดสอบตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 รูปแบบในการวิเคราะห์ความเสียหายของวัสดุ สมบัติของวัสดุแต่ละชนิด

3.1.1.2 ศึกษาข้อมูลการทดสอบการจำลองยิงเกราะกันกระสุนตามมาตรฐาน NIJ

3.1.1.3 ศึกษาข้อมูลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการใช้โปรแกรม ANSYS/Explicit Dynamic การตั้งค่าสมบัติของวัสดุตามสมการความเสียหายและชุดคำสั่งในโปรแกรม

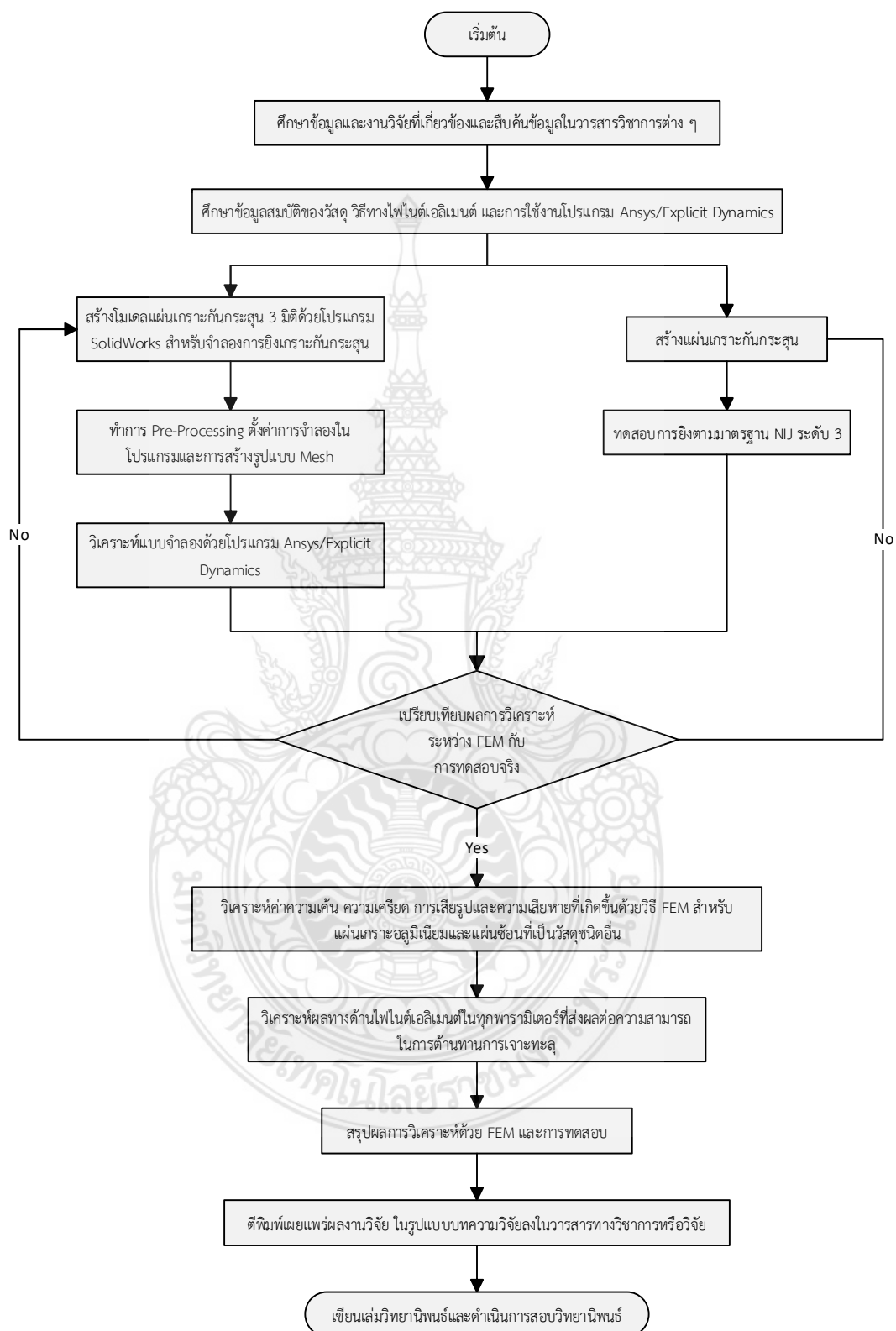
3.1.1.4 ใช้โปรแกรม SolidWorks ออกแบบและสร้างแบบจำลองเกราะกันกระสุนแบบ 3 มิติ ทั้ง 2 แบบ ซึ่งแบบที่หนึ่งเป็นแผ่นเกราะกันกระสุน 1 ชั้น และ 2 ชั้น โดยมีขนาดความกว้างxความยาว 300 x 300 มิลลิเมตร วัสดุที่ใช้ทำแผ่นเกราะกันกระสุนมี 3 ชนิด ประกอบด้วย สแตนเลส SUS304 ความหนา 5 6 8 10 14 20 30 40 45 และ 55 มิลลิเมตร อลูมิเนียม ความหนา 6 8 10 และ 20 มิลลิเมตร และทั้งสแตนคาร์ไบด์ ความหนา 6 8 และ 10 มิลลิเมตร

3.1.1.5 ตั้งค่าสมบัติของวัสดุตามรูปแบบความเสียหายของวัสดุในโปรแกรม Ansys/Engineering Data ดังนี้ SUS304 รูปแบบความเสียหายของ Johnson-Cook Strength รูปแบบความเสียหายของ Johnson-Holmquist (JH-2) รูปแบบความเสียหายของ Steinburg-Guinan-Strength ซึ่งทำการสร้างเมชที่ใช้ในการจำลองเป็นแบบ Hexahedral โดยกำหนดกระสุนที่มีขนาด 7.62 มิลลิเมตร ค่าความเร็วกระสุนตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 [9]

3.1.1.6 ทำการวิเคราะห์แผ่นเกราะกันกระสุน โดยใช้คอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะสูงวิเคราะห์การคลาดเคลื่อน (Error) ของโปรแกรมจำลองด้วยกราฟ Energy Conservation Energy Summary และ Time Increment ผลลัพธ์การจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์แบบ Equivalent (Von Mises) Stress

3.1.1.7 สรุปผลการทดสอบและการวิเคราะห์การจำลองแผ่นเกราะกันกระสุนทั้ง 2 รูปแบบแล้วนำมาพิจารณาเปรียบเทียบผลความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ และเขียนเล่มวิทยานิพนธ์

3.1.1.8 เผยแพร่ผลงานวิจัยด้วยการตีพิมพ์ เผยแพร่ลงในวารสารทางวิชาการ



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนกระบวนการวิจัย

3.1.2 กรอบการวิจัย

กรอบการวิจัยเป็นการวางแผนการดำเนินงานของงานวิจัยที่มีลักษณะเป็นลำดับขั้นตอนที่สามารถสะท้อนกิจกรรมต่าง ๆ ที่อยู่ภายใต้ขอบเขตการวิจัย ที่มีการนำประเด็นที่เป็นหัวข้อสำคัญมาระบุเพื่อใช้ในการกำหนดทิศทาง เช่น วิธีการออกแบบ การตัวแปรต่าง ๆ สำหรับการออกแบบ แนวทางการสร้างภายหลังการออกแบบ ตลอดจนการทดสอบเพื่อหาผลลัพธ์ของตัวแปรที่กำหนดขึ้น สำหรับกรอบในงานวิจัยจะต้องมีความสัมพันธ์กันและสอดคล้องกับระเบียบวิธีวิจัยบนพื้นฐานตามทฤษฎีต่าง ๆ ของระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความแม่นยำ เทียบตรงสามารถตรวจสอบความถูกต้องของกระบวนการทำวิจัยได้ ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 กรอบการวิจัย

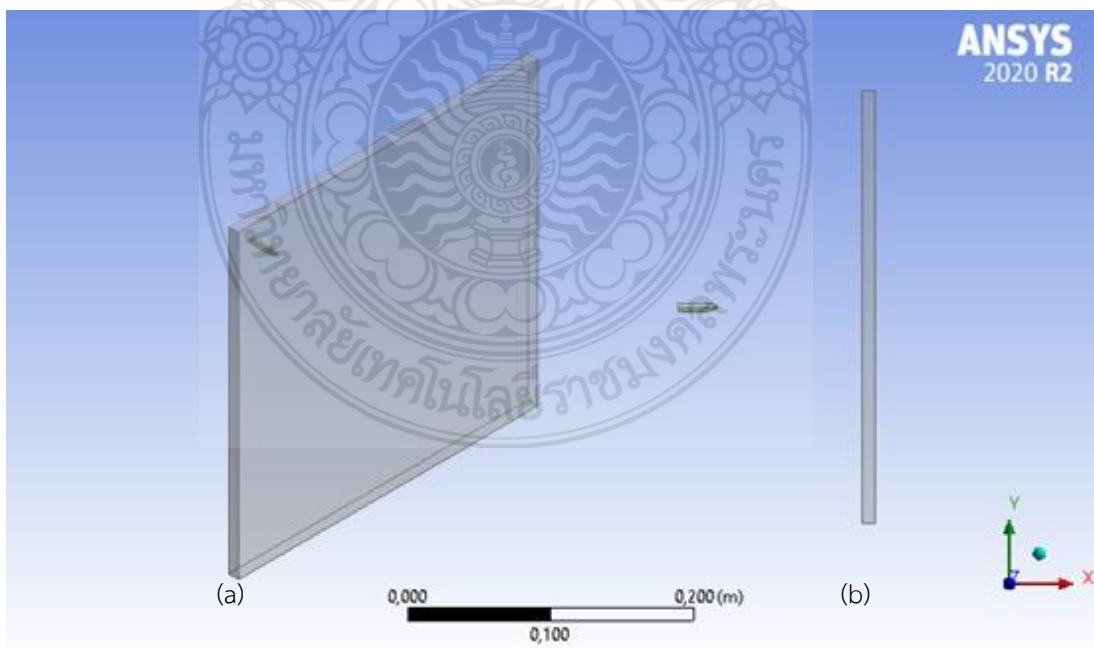
3.2 วิธีการออกแบบการจำลองด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการจำลองเพื่อวิเคราะห์ผลจากการกระทบของลูกกระสุนกับเกราะกันกระสุน ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น จำเป็นต้องทำการสร้างแบบจำลองด้วยการใช้โปรแกรม SolidWorks แล้วกำหนดสมบัติของชิ้นส่วนต่าง ๆ ด้วย โปรแกรม ANSYS ที่ทำการจำลองด้วยวัสดุตามที่ต้องการทดลอง รวมถึงการกำหนด ความเร็ว ทิศทางของแรงที่กระทบเข้ากับเกราะกันกระสุน

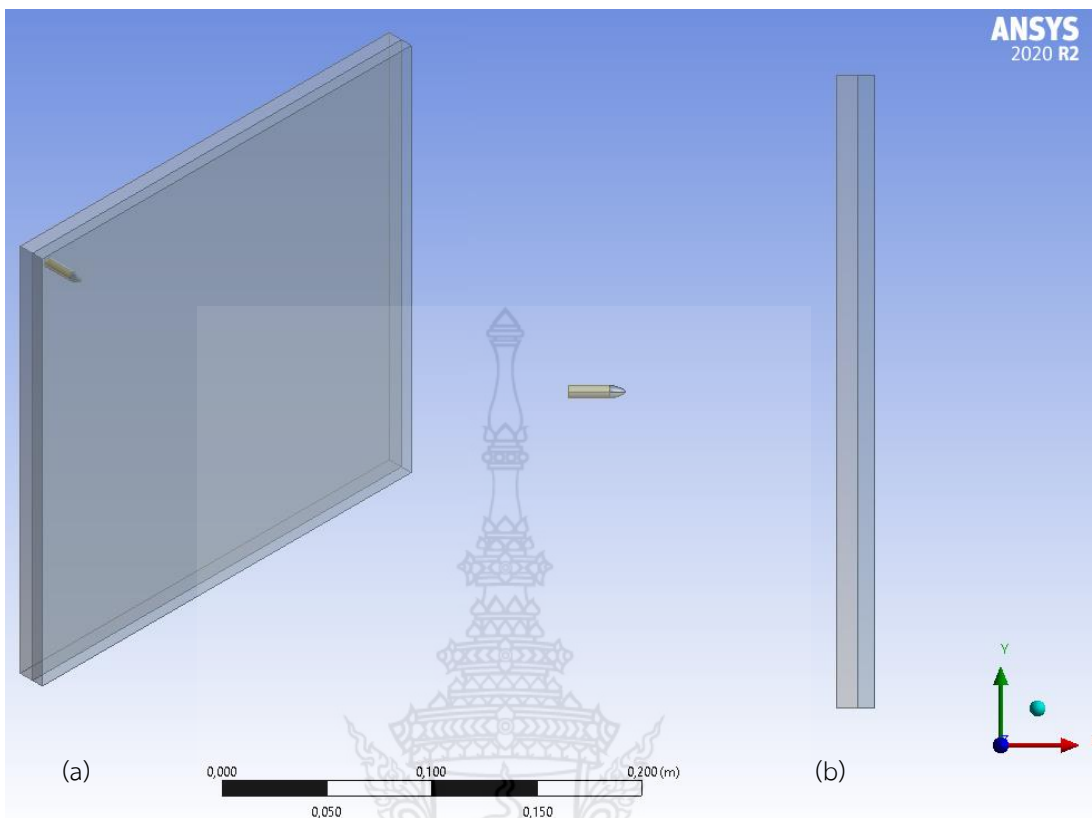
แล้วทำการวิเคราะห์ผลในแต่ละกรณี เพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบเทียบความเสียหายระหว่างการทดลองทางกายภาพจริงและด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

3.2.1 การออกแบบแผ่นเกราะกันกระสุนและลูกกระสุน

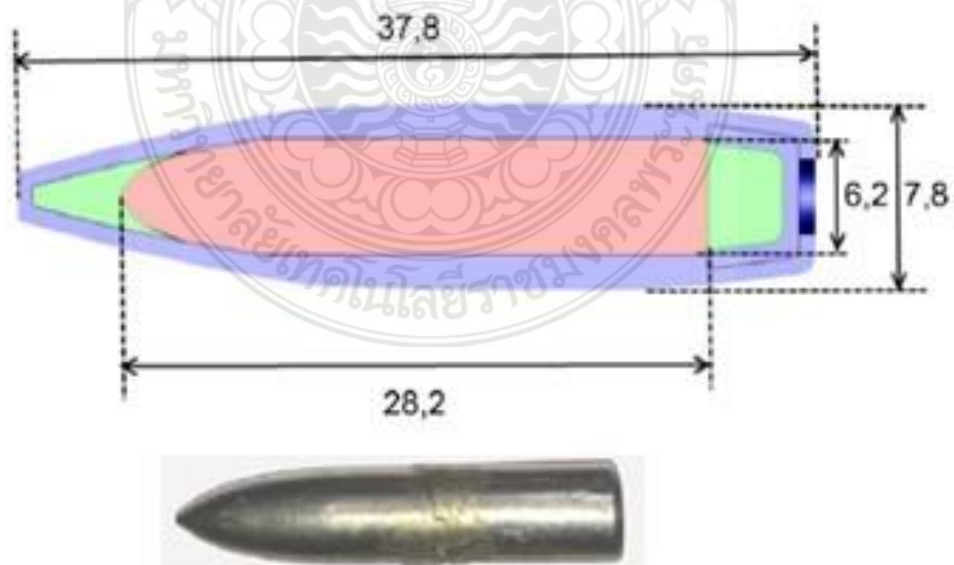
การออกแบบแผ่นเกราะกันกระสุนด้วยการใช้ โปรแกรม SolidWorks ได้กำหนดการแบ่งลักษณะของรูปแบบแผ่นเกราะกันกระสุนออกเป็น 2 รูปแบบ คือ รูปแบบที่ 1 เป็นการออกแบบแผ่นเกราะกันกระสุนที่มีชั้นเดียว และรูปแบบที่ 2 เป็นการออกแบบแผ่นเกราะกันกระสุนแบบ 2 ชั้นซ้อนกัน พร้อมทั้งได้กำหนดให้ขนาดของแผ่นเกราะกันกระสุนมีขนาดความกว้างและความยาว เท่ากับ 300×300 มิลลิเมตร พร้อมด้วยกำหนดขนาดความหนาของแผ่นเกราะกันกระสุน วัสดุสแตนเลส SUS304 ที่ 6 8 10 14 20 30 40 45 และ 55 มิลลิเมตร และอลูมิเนียม ที่ 6 8 10 และ 20 มิลลิเมตร โดยกำหนดมุมมองสำหรับการทดสอบ คือ 0 30 และ 45 องศา เพื่อจำลองการยิงแบบแผ่นเกราะชั้นเดียวและแผ่นเกราะ 2 ชั้น และอีกกรณีใช้วัสดุแผ่นหน้าคือ ทังสเตนคาร์ไบด์ ความหนา 6 8 และ 10 มิลลิเมตร โดยไม่มีช่องว่างระหว่างแผ่นตามรูปที่ 3.3 และ 3.4 ในส่วนของกระสุนที่ใช้ในการจำลองได้กำหนดให้เป็นกระสุนวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ Tungsten carbide ขนาด 7.62 มิลลิเมตร NATO M80 ball และ น้ำหนัก 9.6 g มีความเร็ว $847 \pm 9.1 \text{ m/s}$ ($2780 \pm 30 \text{ ft/s}$) ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 [10] ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.3 การจำลองแบบแผ่นเกราะกันกระสุนแบบชั้นเดียว (a) Isometric view และ (b) Front view



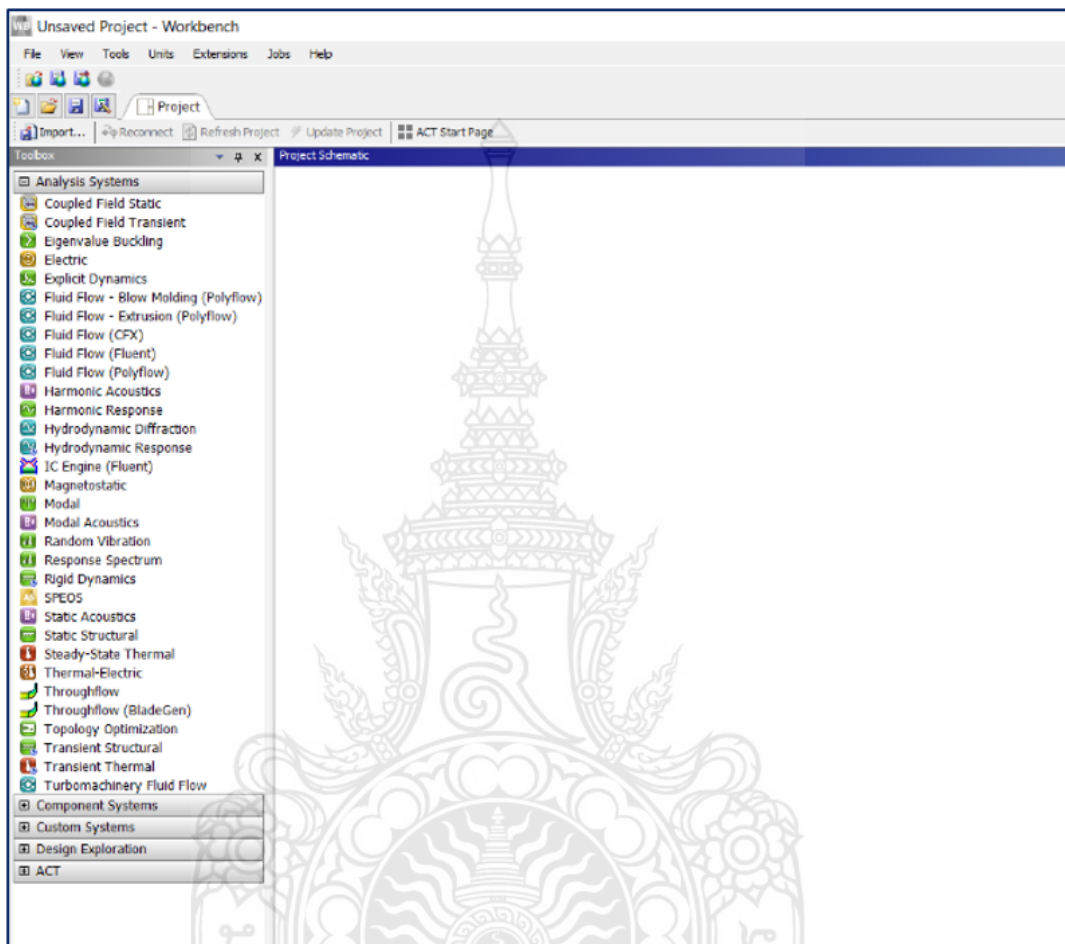
รูปที่ 3.4 การจำลองแบบแผ่นเกราะกันกระสุนแบบ 2 ชั้น โดยไม่มีช่องว่างระหว่างแผ่น (a) Isometric view และ (b) Front view



รูปที่ 3.5 กระสุนวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ Tungsten carbide ขนาด 7.62 มิลลิเมตร [5]

3.3 การตั้งค่ากำหนดสมบัติของการจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS

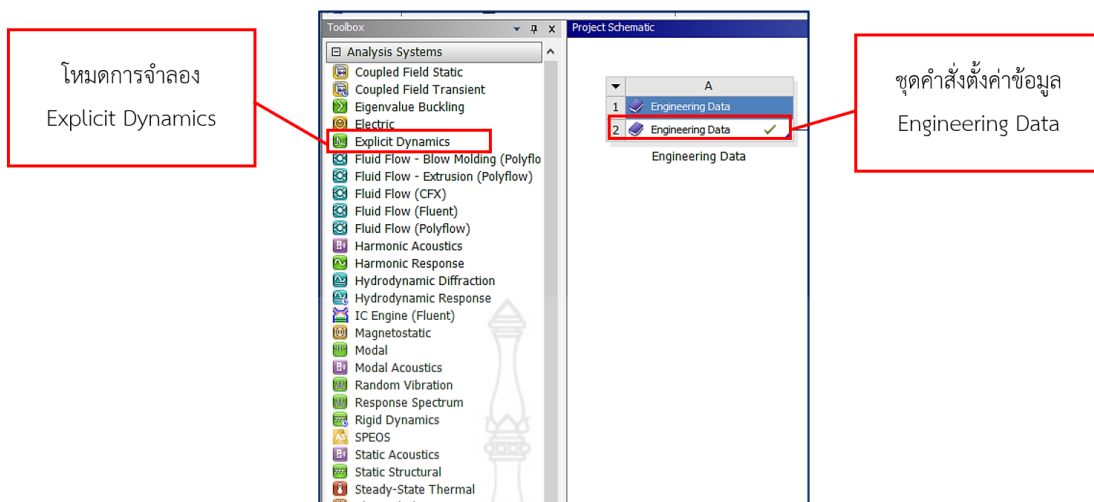
สำหรับขั้นตอนการสร้างแบบจำลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ 1) กำหนดสมบัติของวัสดุ 2) สร้างเมช (Mesh) ของวัสดุ 3) ตั้งค่าพารามิเตอร์ Explicit Dynamics ตามรูปที่ 3.6



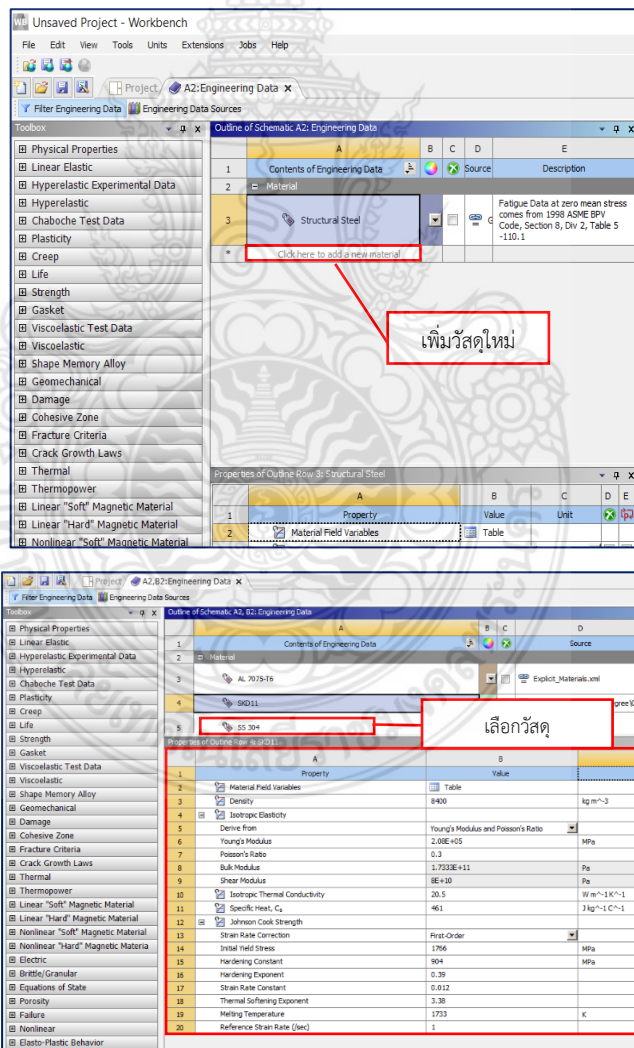
รูปที่ 3.6 การเข้าคำสั่งการบน Workbench

3.3.1 การเข้าคำสั่งการบน Workbench

3.3.1.1 เริ่มต้นด้วยเข้าคำสั่งการบน Workbench ของโปรแกรม ANSYS และการตั้งค่าของ Explicit Dynamics ซึ่งมีชุดคำสั่ง “Engineering Data” ตามรูปที่ 3.7 จากนั้น ตั้งค่าสมบัติของวัสดุของเกราะกันกระสุน 2 ชนิด ได้แก่ อลูมิเนียม และสแตนเลส (SUS304) ซึ่งกระสุนเป็นวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) โดยวัสดุที่กล่าวมามีรายละเอียดอยู่ในโปรแกรม ANSYS สำหรับกรณีที่ไม่มีข้อมูลของวัสดุ ให้ทำการกำหนดวัสดุขึ้นใหม่ของการจำลองนั้น ๆ เช่น วัสดุ SUS304 ตามรูปที่ 3.8 สำหรับการเพิ่มวัสดุใหม่ในโปรแกรม ANSYS มีความจำเป็นต้องใช้ทฤษฎีในการจำลองวิเคราะห์ความเสียหายของ Johnson-Cook Strength Model เข้ามาด้วยตามรูปที่ 3.9 สำหรับสมบัติวัสดุของเกราะกันกระสุนและกระสุนแสดงในตารางที่ 3.1 ถึง 3.3



รูปที่ 3.7 การตั้งค่าของ Explicit Dynamics และชุดคำสั่ง Engineering Data



รูปที่ 3.8 การเพิ่มวัสดุใหม่เพื่อหาค่าสมบัติต่าง ๆ

เลือกวัสดุที่ต้องการ
หาค่าสมบัติต่าง ๆ

ค่า Johnson-Cook
Strength Model

Property	Value	Unit
Material Field Variables	Table	
Density	14.56	g cm ⁻³
Isotropic Elasticity		
Derive from	Young's Modulus ...	
Young's Modulus	5.39E+11	Pa
Poisson's Ratio	0.23	
Bulk Modulus	3.3272E+11	Pa
Shear Modulus	2.1911E+11	Pa
Tensile Yield Strength	3.85E+09	Pa
Compressive Yield Strength	4.53E+09	Pa
Johnson-Holmquist Strength Continuous		
Failure Type	Gradual	
Hugoniot Elastic Limit HEL	6.566E+09	Pa
Intact Strength Constant A	0.9899	
Intact Strength Exponent N	0.0322	
Strain Rate Constant C	0	
Fracture Strength Constant B	0.67	
Fracture Strength Exponent m	0.0322	
Maximum Fracture Strength Ratio SFMAX	1000	
Damage Constant D1	0.005	
Damage Constant D2	1	
Bulking Constant B	0	
Hydrodynamic Tensile Limit T	-4E+09	Pa

รูปที่ 3.9 การหาค่า Johnson-Cook Strength Model ของวัสดุ

ตารางที่ 3.1 สมบัติของเกราะกันกระสุนวัสดุ SUS304

SS 304	
"Equation of State and Strength Properties of Selected Materials". Steinberg D.J. LLNL. Feb 1991	
Density	7900,0 kg/m ³
Thermal	
Specific Heat Constant Pressure	423,00 J/kg·°C
Other	
▼ Shock EOS Linear	
Gruneisen Coefficient	1,9300
Parameter C1	4570,0 m/s
Parameter S1	1,4900
Parameter Quadratic S2	0 s/m
▼ Steinberg Guinan Strength	
Initial Yield Stress Y	3,4e+08 Pa
Maximum Yield Stress Ymax	2,5e+09 Pa
Hardening Constant B	43,000
Hardening Exponent n	0,35000
Derivative dG/dP G'P	1,7400
Derivative dG/dT G'T	-3,504e+07 Pa/°C
Derivative dY/dP Y'P	0,0076840
Melting Temperature Tmelt	2106,9 °C
Shear Modulus	7,7e+10 Pa

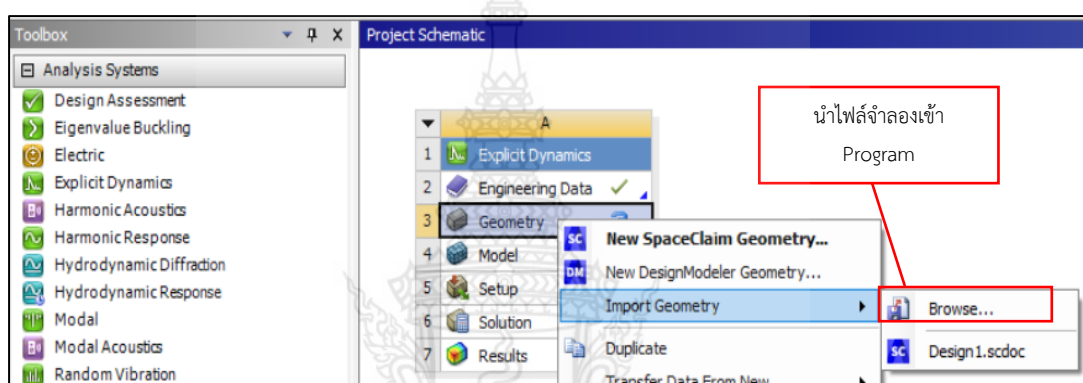
ตารางที่ 3.2 สมบัติของเกราะกันกระสุนวัสดุอลูมิเนียม (AL-7075-T6)

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

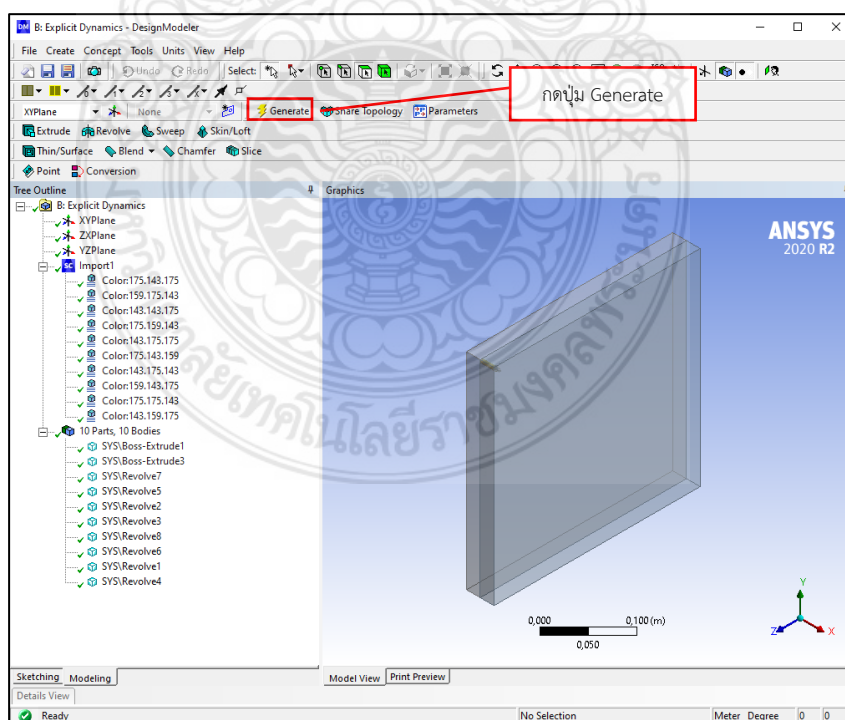
ตารางที่ 3.3 สมบัติของกระสุนวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ (WC)

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	0,230000
Bulk Modulus	3,3272e+11 Pa
Shear Modulus	2,1911e+11 Pa
Compressive Yield Strength	4,53e+09 Pa
Tensile Yield Strength	3,85e+09 Pa
Other	
▼ 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

3.3.1.2 การสร้างเมช (Mesh) การสร้างรูปจำลองด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) นิยมใช้ 2 แบบคือ Hexahedral และ Tetrahedral ในกรณีนี้ใช้แบบ Hexahedral เพื่อลดจำนวนของเซลล์ในการประมวลผลในการจำลอง ซึ่งจะช่วยให้การคลาดเคลื่อนของผลวิเคราะห์และลดระยะเวลาในการประมวลผลลงได้อย่างมาก การสร้างเมชแบบจำลองการยิงเริ่มต้นด้วยนำแบบจำลองที่ออกแบบไว้มาตั้งค่าสมบัติก่อน โดยใช้คำสั่ง “Geometry” ตามรูปที่ 3.10 จากนั้นตั้งค่าแบบจำลองด้วยคำสั่ง “Design Modeler Geometry” โดยเลือก “Generate” เพื่อนำแบบจำลองเข้าโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังรูปที่ 3.11

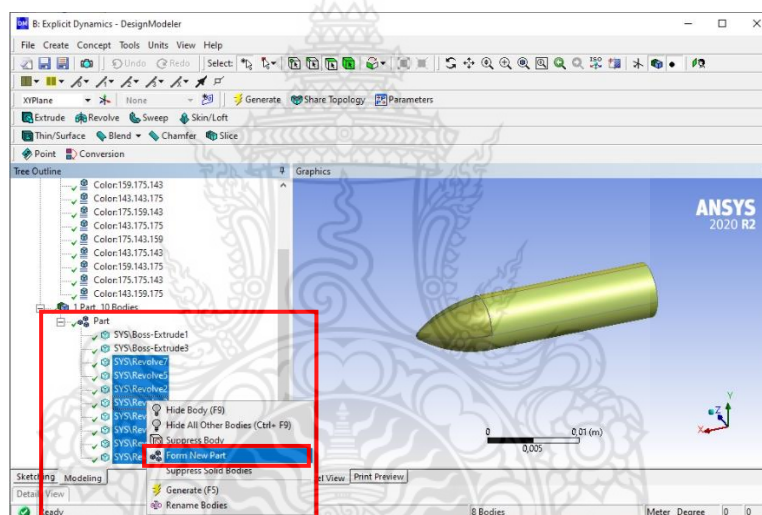


รูปที่ 3.10 ตั้งค่าสมบัติโดยใช้ชุดคำสั่ง Geometry

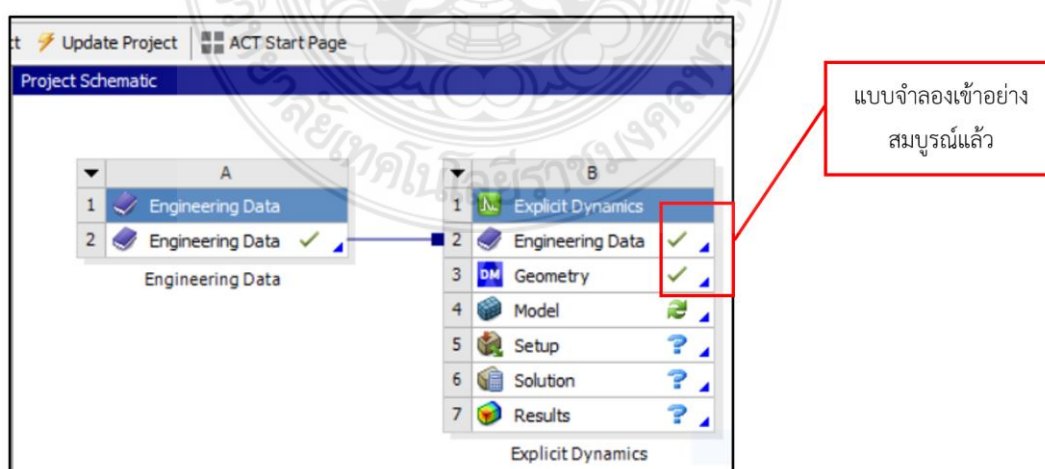


รูปที่ 3.11 นำแบบจำลองเข้าโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยคำสั่ง Generate

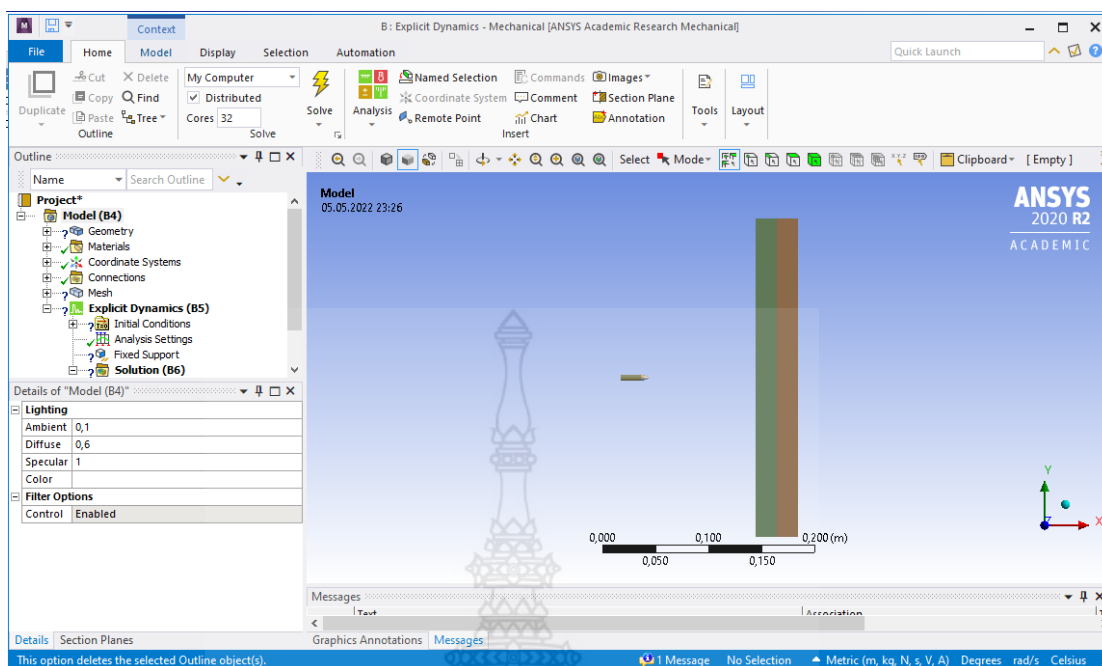
ในกรณีการสร้างเมชของกระสุนปืน ปกติกระสุนที่ออกแบบมาจะถูกแยกชิ้นส่วนทั้งหมด 8 ส่วน ดังนั้น เมื่อต้องการสร้างเมชจำเป็นต้องรวมส่วนทั้งหมดให้เป็นเสมือนวัตถุเดียวกันด้วยการใช้คำสั่ง “Form New Part” ตามรูปที่ 3.12 จากนั้น สร้างเมชให้กับชิ้นงานจำลองโดยการ ใช้คำสั่ง “Model” เมื่อทำการสั่งการสร้างเมชเรียบร้อยแล้วจะปรากฏเครื่องหมายถูก (✓) แสดงบนแถบคำสั่ง “Engineering Data” และ “Geometry” ตามรูปที่ 3.13 ต่อจากนั้นดำเนินการในคำสั่ง “Model” เพื่อเลือกแถบเครื่องมือสำหรับกำหนดค่าต่าง ๆ ที่จำเป็นในการจำลอง โดยในเบื้องต้นต้องกำหนดวัสดุให้กับแบบจำลองและจุดยึดสัมผัสของผิวชิ้นงานแสดงตามรูปที่ 3.14 ต่อจากนั้น เลือกไปที่คำสั่งพฤติกรรมความยืดหยุ่น (stiffness behavior) ในการจำลองให้เป็นแบบ “Flexible” ตามรูปที่ 3.15 ทั้งในกรณีแผ่นเกราะกันกระสุนและกระสุนปืน ทั้งนี้ วัสดุที่จะทำการจำลองต้องกำหนดให้ถูกต้องว่าเป็นวัสดุของเกราะกันกระสุนหรือกระสุนปืน เพื่อป้องกันการวิเคราะห์ที่ผิดพลาด



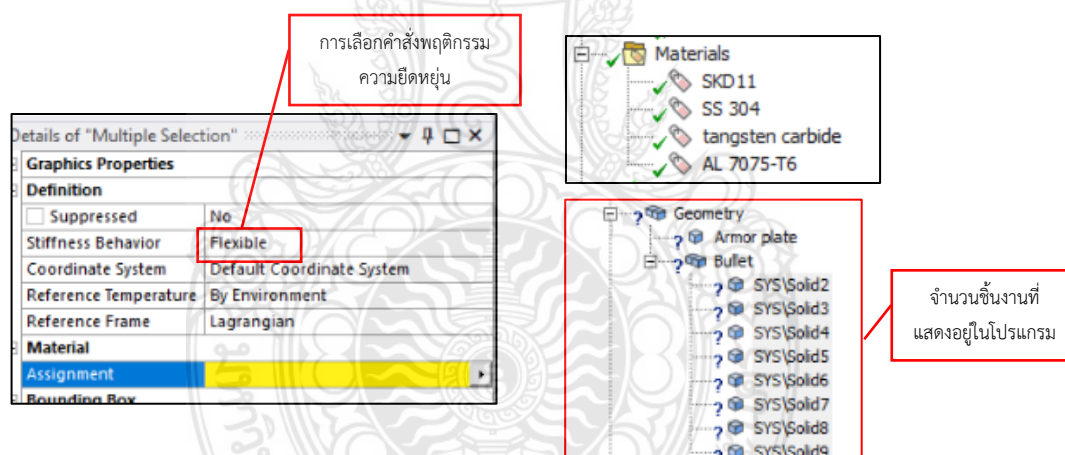
รูปที่ 3.12 การกำหนดค่าการรวมวัตถุของแบบจำลองกระสุน



รูปที่ 3.13 การสร้างเมชของแบบจำลองกระสุนปืนเสร็จสิ้นแล้ว



รูปที่ 3.14 การกำหนดวัสดุให้กับแบบจำลองและจุดยึดสัมผัสของผิวชิ้นงานในคำสั่ง Model

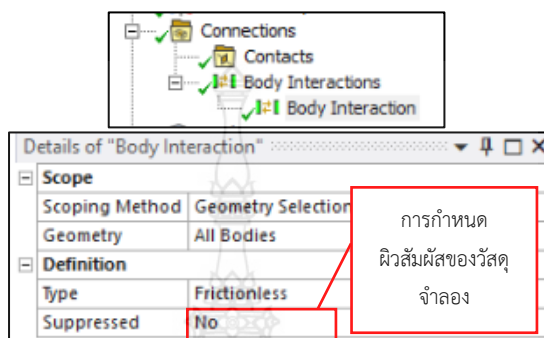


รูปที่ 3.15 การเลือกคำสั่งพฤติกรรมความยืดหยุ่น ในการจำลองให้เป็นแบบ Flexible

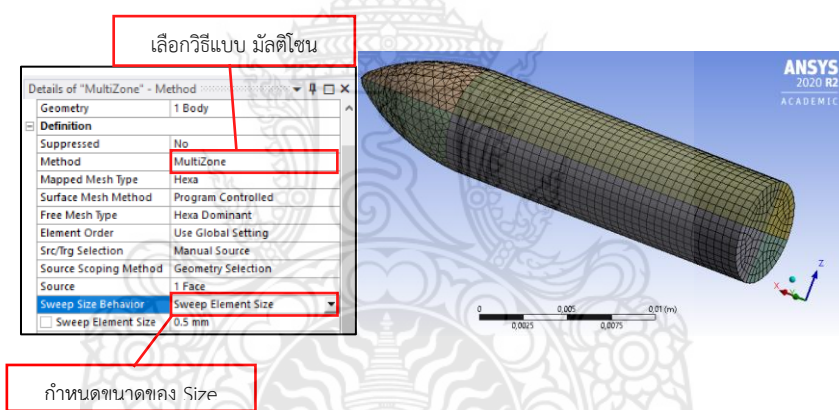
ขั้นตอนต่อไป เป็นการกำหนดเงื่อนไขการจำลองแผ่นเกราะกันกระสุน เนื่องจาก หากเป็นกรณีที่มีแผ่นเกราะตั้งแต่ 2 ชั้น ขึ้นไป การวางแผ่นเกราะกันกระสุนมีทั้งแบบมีและไม่มีช่องว่างระหว่างแผ่น การจำลองจึงต้องเลือกไปที่คำสั่ง “Connections” จากนั้นเลือกไปที่คำสั่งย่อย “Body Interaction” ต่อไปเป็นการเลือกที่รูปแบบ Type และเลือกเป็นแบบ “Frictionless” ซึ่งหมายถึงให้แผ่นเกราะติดกันและไม่คิดค่าความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของแผ่นเกราะทั้ง 2 แผ่น ดังรูปที่ 3.16

ก่อนการจำลอง ต้องเข้าไปกำหนดขนาดของลูกกระสุนโดยเข้าไปที่ Element Size โดยเมชเป็นแบบ Hexahedral ตามที่กล่าวมาแล้ว จากนั้นเลือกแถบเครื่องมือ “Mesh Method” แล้วเลือกแบบ “Multizone” ต่อด้วยเลือกคำสั่ง “Manual Source” กำหนดให้ Element Size ที่บริเวณ

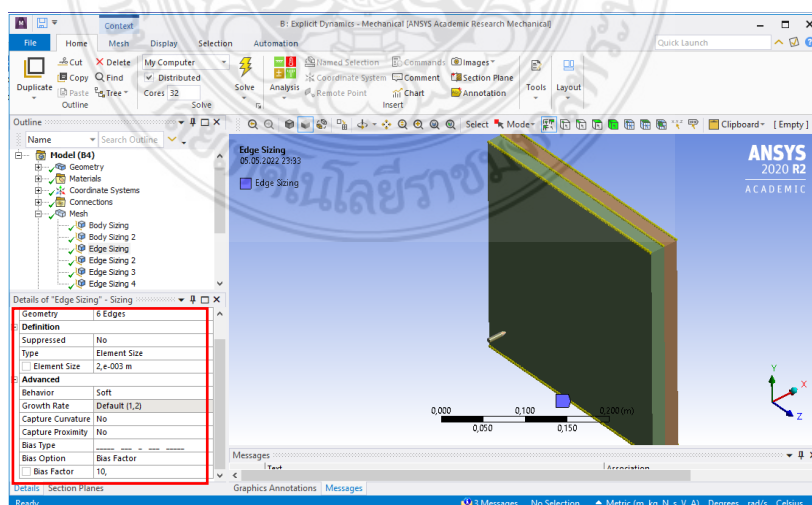
หัวกระสุนมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.17 ในกรณีของเกราะกันกระสุน 1 แผ่น กำหนดด้วยคำสั่ง “Sizing” เลือกเป็นแบบ “Edge” และทำการเลือกบริเวณขอบแบบจำลองเพื่อกำหนด “Element Size” เลือกของ “Bias Type” เพื่อให้มีความละเอียดบริเวณตรงกลางแบบจำลอง กำหนดอัตราของความละเอียดด้วยคำสั่ง “Bias Factor” 15 เท่า ของขนาด Element Size ดังรูปที่ 3.18 และ 3.19



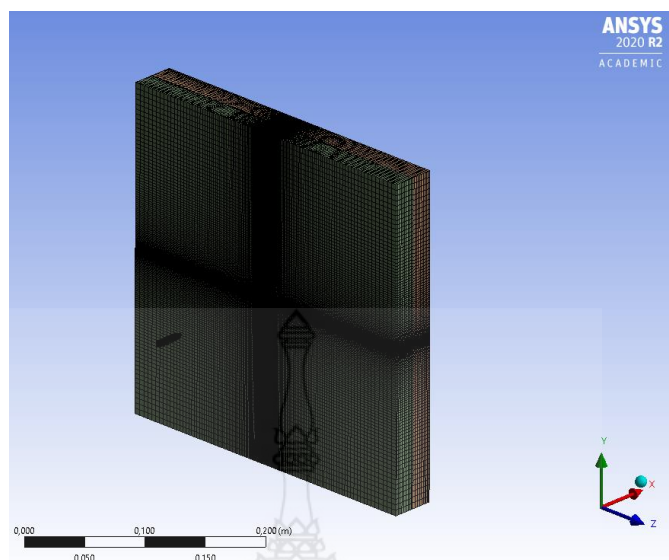
รูปที่ 3.16 การกำหนดผิวสัมผัสของวัสดุจำลองของแผ่นเกราะซ้อน 2 ชั้น



รูปที่ 3.17 การตั้งค่าขนาด Element Size บริเวณหัวกระสุน



รูปที่ 3.18 การกำหนดอัตราของความละเอียดด้วยคำสั่ง “Bias Factor” ของแผ่นเกราะ



รูปที่ 3.19 รูปแบบเมชบนแผ่นเกราะกันกระสุนที่ใช้ในการจำลอง

3.3.1.3 การตั้งค่าชุดคำสั่ง Explicit Dynamics ในส่วนของการตั้งค่าของชุดคำสั่ง “Explicit Dynamics” จากแถบเครื่องมือเพื่อกำหนดค่าเริ่มต้นโดยการจำลองการยิงจะใช้ความเร็วซึ่งมีความเร็ว 847 ± 9.1 m/s เป็นค่าตามมาตรฐานการทดสอบ NIJ ระดับ 3 [10] ด้วยการเข้าไปเลือกจากแถบเครื่องมือ “Initial Condition” โดยเลือกเป็น “Velocity” แล้วเลือกชิ้นงานจำลองที่เป็นการเคลื่อนที่ด้วยความของเร็วกระสุนปืน กำหนดค่าความเร็วของกระสุนปืนพร้อมด้วยกำหนดทิศทางของการเคลื่อนที่กระสุนตามทิศทางของกระสุนเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามกับแกน Z ดังนั้นค่าความเร็วจึงต้องใส่เครื่องหมาย “-” เพื่อให้เคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามกับแกน Z ดังรูปที่ 3.20

กำหนดค่าความเร็วและทิศทาง

Input Type	Velocity
Pre-Stress Environment	None Available
Define By	Components
Coordinate System	Global Coordinate System
<input type="checkbox"/> X Component	0. mm/s
<input type="checkbox"/> Y Component	0. mm/s
<input checked="" type="checkbox"/> Z Component	-8.8e+005 mm/s
Suppressed	No

รูปที่ 3.20 คำสั่งกำหนดค่าความเร็วและทิศทางของกระสุน

หลังจากกำหนดค่า “Initial Condition” แล้วในชุดคำสั่งแถบเครื่องมือของ “Analysis Settings” เป็นการกำหนดค่าของโปรแกรมเพื่อใช้ในการคำนวณประมวลผลการจำลองและผลการวิเคราะห์ โดยเลือกที่คำสั่ง “End Time” เป็นการกำหนดให้กระสุนเคลื่อนที่ในระยะเวลา 0.001 วินาที เนื่องจากกระสุนปืนมีความเร็ว $847 \pm 9.1\text{m/s}$ ซึ่งมีความเร็วมากจึงต้องกำหนดเวลาของ “End Time” ให้น้อยมากเช่นกัน เพื่อให้สามารถวิเคราะห์การกระแทกของกระสุนปืนที่แผ่นเกราะจากการมองเห็นได้และที่แถบเครื่องมือ “Output Controls” ที่ชุดคำสั่ง “Result Number of Points” ซึ่งเป็นคำสั่งในการบันทึกข้อมูลการวิเคราะห์เมื่อจำนวนค่าที่ใส่เข้าไปเพิ่มขึ้นความเสถียรของผลการวิเคราะห์จะเกิดการคลาดเคลื่อน (Error) ที่น้อยลง ดังนั้นในการกำหนดค่า ควรกำหนดที่ 50-100 จุด ดังรูปที่ 3.21

Step Controls		Output Controls	
Number Of Steps	1	Step-aware Output Controls	No
Current Step Number	1	Save Results on	Equally Spaced Points
End Time	1.e-003 s	Result Number Of Points	100
Resume From Cycle	0	Save Restart Files on	Equally Spaced Points
Maximum Number of Cycles	1e+07	Restart Number Of Points	5
		Save Result Tracker Data on	Cycles

รูปที่ 3.21 ค่าของ “End Time” และ “Result Number of Points”

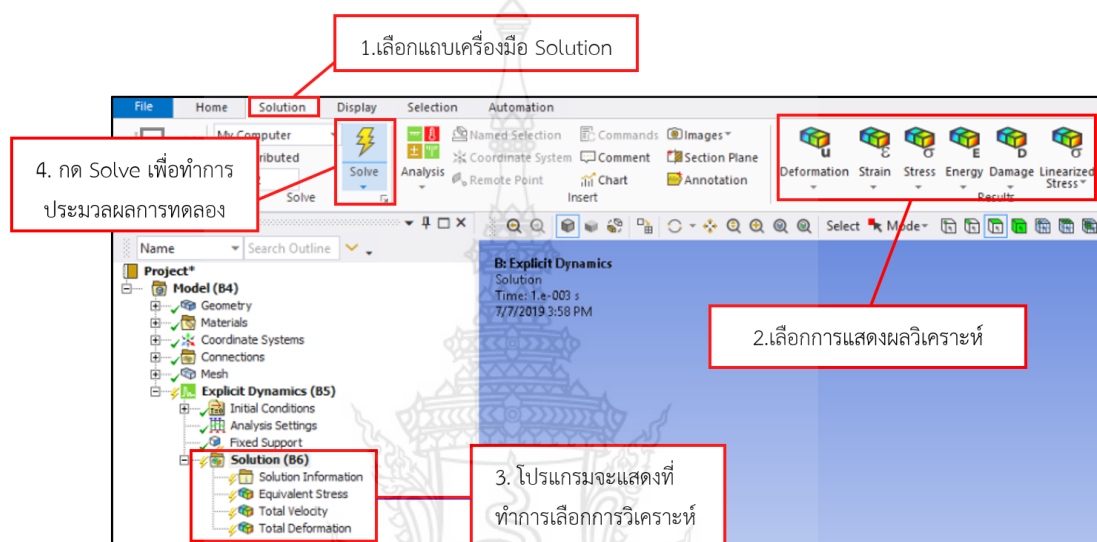
ในส่วนของการยึดชิ้นงานของแบบจำลองเกราะกันกระสุนทั้ง 4 ด้าน จะใช้คำสั่ง “Analysis Settings” ซึ่งจะใช้แถบเครื่องมือ “Fixed Support” จะมีสีน้ำเงินที่แสดงในช่องสี่เหลี่ยม ซึ่งเป็น การบ่งบอกว่าทั้ง 4 ด้าน มีการยึดชิ้นงานเป็นที่เรียบร้อย ดังรูปที่ 3.22

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	4 Faces
Definition	
Type	Fixed Support

Details of "Fixed Support"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	4 Faces
Definition	
Type	Fixed Support
Suppressed	No

รูปที่ 3.22 การยึดชิ้นงานแบบ Fixed Support

สามารถเลือกผลการวิเคราะห์ ความเค้น ความเครียด ความเร็ว การยุบตัว โดยเข้าไปที่แถบชุดคำสั่งของการวิเคราะห์ “Solution” จากนั้นเลือกแถบเครื่องมือ “Equivalent Stress, Total Velocity และ Total Deformation” เพื่อให้แสดงผลของการวิเคราะห์ค่าความเค้น ความเร็วและการยุบตัวของชิ้นงานการจำลองที่ได้จากการคำนวณและเมื่อเลือกแถบเครื่องมือแสดงผลวิเคราะห์ จากนั้นเลือกคำสั่ง “Solve” เพื่อให้โปรแกรมได้เริ่มประมวลผลการจำลอง ดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 ขั้นตอนการเลือกคำสั่งแสดงผลการวิเคราะห์

3.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Solve-processing)

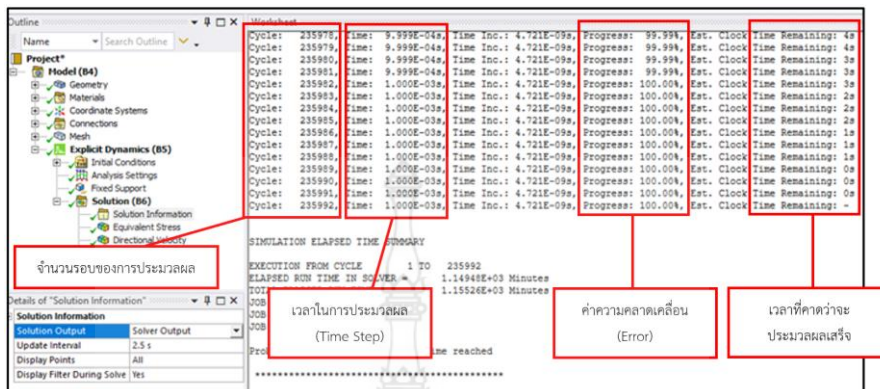
ในส่วนของการวิเคราะห์ค่าในขั้นตอนการเตรียมค่าที่กำหนดโดยใช้โปรแกรมในการประมวลผลจากการปฏิบัติการนั้น จำเป็นต้องมีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน คือ 1. ผลของการคลาดเคลื่อน (Error) ได้จากโปรแกรม 2. สมรรถนะเครื่องคอมพิวเตอร์ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งส่วนประกอบทั้ง 2 นี้จะเป็นตัวช่วยในการวิเคราะห์ผลจากการคำนวณ การคลาดเคลื่อน (Error) ซึ่งค่าที่ยอมรับได้จากโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์จะต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ 5-10 หลังจาก “Solve” ในโปรแกรม

3.4.1 ขั้นตอนการตรวจสอบผลของการคลาดเคลื่อน (Error)

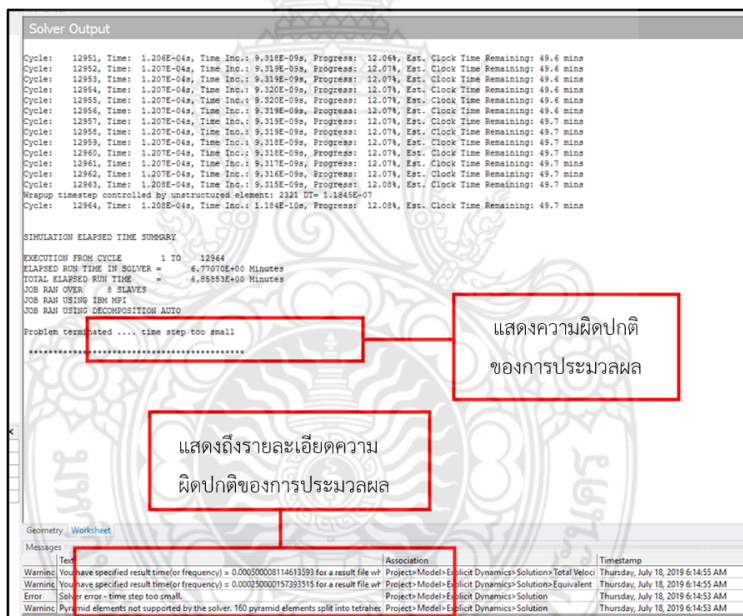
โดยการตรวจสอบผลของการคลาดเคลื่อนให้ไปที่คำสั่ง “Solution Information” ขั้นตอนต่อไปให้เข้าไปที่คำสั่ง “Solution Output” โดยจะมีตัวเลือกอยู่ทั้งหมด 5 รายการ คือ 1. Solver Output 2. Time Increment 3. Energy Conservation 4. Momentum Summary 5. Energy Summary ที่สามารถใช้ในการตรวจสอบผลการคลาดเคลื่อนในระหว่างการประมวลผลได้

3.4.1.1. Solver Output จะบอกถึงจำนวนรอบของการทำงาน เวลาของการปฏิบัติงานในแต่ละขั้นตอน (Time Step) จำนวนร้อยละของการคำนวณและเวลาในการประมวลผลหลังจากเสร็จสิ้น

แล้ว หากเกิดข้อผิดพลาดจากการวิเคราะห์ โปรแกรมจะหยุดการประมวลผลทันทีพร้อมกับแสดงสถานะของจุดที่เกิดความผิดพลาด ตามรูปที่ 3.24 และ 3.25

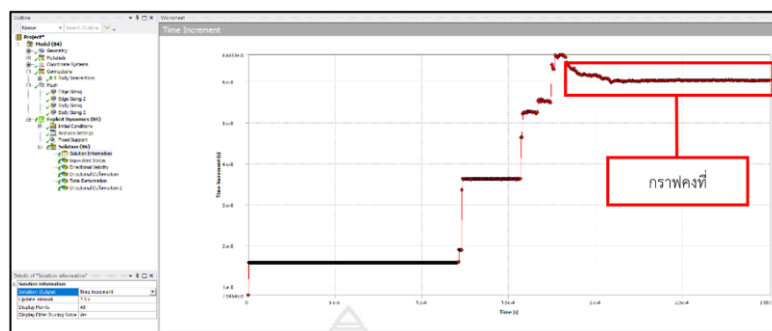


รูปที่ 3.24 ผลการประมวลผลของ Solver Output

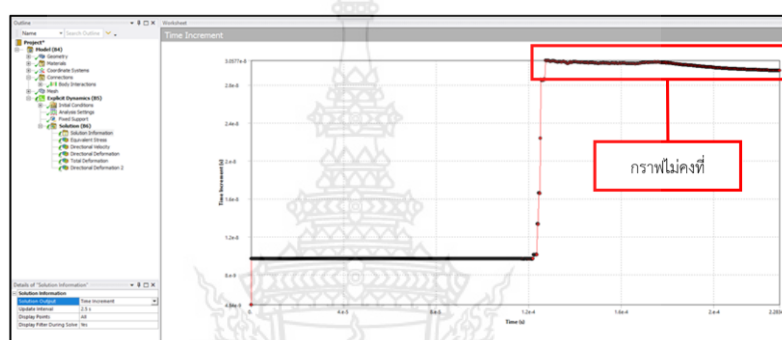


รูปที่ 3.25 ผลจากการประมวลผลที่ผิดปกติ

3.4.1.2. Time Increment เป็นกราฟแสดงเวลาของ Time Step สำหรับการประมวลผลการทำงาน เมื่อเกิดการกระแทกของการจำลองกราฟจะเปลี่ยนแปลงในช่วงของ Time Increment ที่สูง หลังจากเกิดการกระแทกเป็นที่เรียบร้อยแล้วกราฟจะลดลงคงที่จนครบ Time Step ของการทำงาน พร้อมกับบอกสถานะของการประมวลผลที่ปกติไม่มีการคลาดเคลื่อน ที่มากกว่าร้อยละ 5-10 ถ้าการประมวลผลนั้นมีความผิดปกติโปรแกรมจะยังทำการประมวลผลต่อไปแต่หลังจากที่วัตถุกระแทกแล้วกราฟจะมีลักษณะลดลงตาม Time Step ของการประมวลผลซึ่งจะไม่คงที่เพื่อเป็นการบอกถึงความผิดปกติ ตามรูปที่ 3.26 และ 3.27

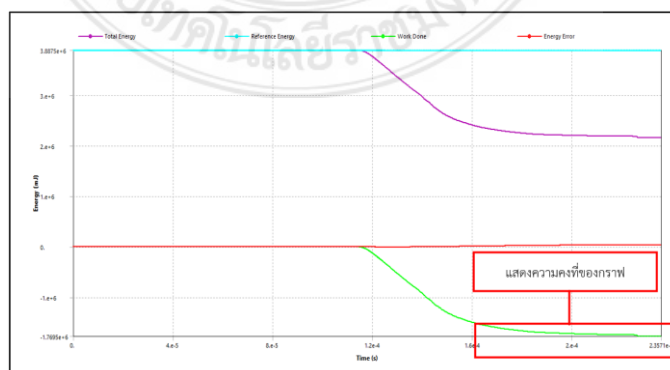


รูปที่ 3.26 สถานะกราฟปกติ



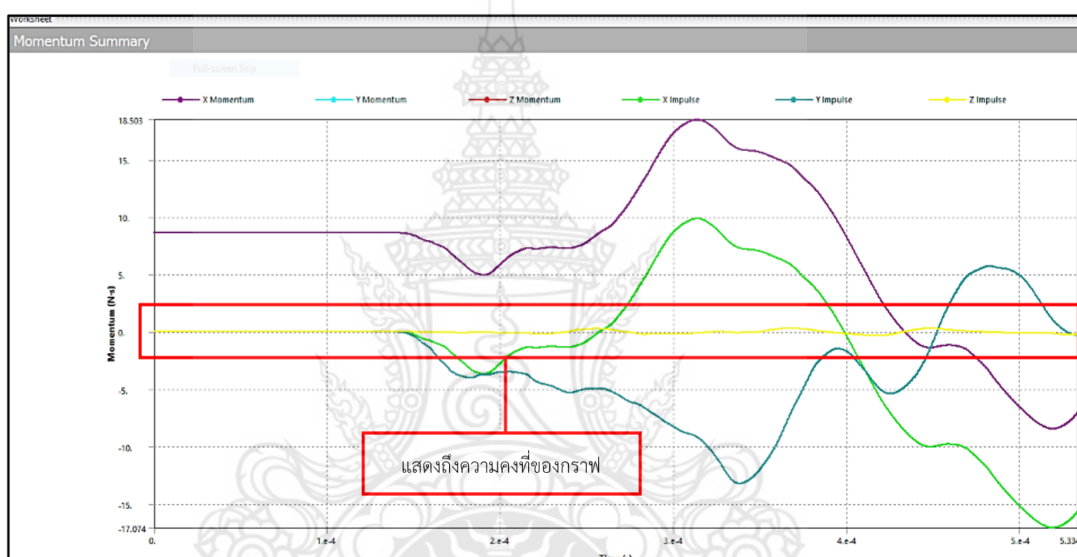
รูปที่ 3.27 สถานะที่กราฟมีความผิดปกติ

3.4.1.3. Energy Conservation ลักษณะของกราฟที่แสดงค่าหน่วยของพลังงาน (Energy) ซึ่งพลังงานที่เกิดขึ้นจากการประมวลผลของวัตถุเคลื่อนที่เข้ากระแทกนั้น จะแสดงให้เห็นถึงพลังงานที่เกิดขึ้นเทียบกับ Time Step การประมวลจะแสดงค่าของพลังงาน Total Energy, Reference Energy, Work Done และ Energy Error ในส่วนของการจำลองนี้ให้สังเกตที่เส้นกราฟของ Energy Error ที่เป็นเส้นสีแดง จะแสดงลักษณะหลังเกิดการกระแทกของกระสุน จากการจำลองเส้นกราฟจะมีลักษณะคงที่เป็นการบอกถึงความปกติของการประมวลผลในทางตรงกันข้ามถ้ากราฟมีลักษณะที่เพิ่มขึ้นก็จะเป็นการบอกถึงความผิดปกติในการประมวลผล ตามรูปที่ 3.28



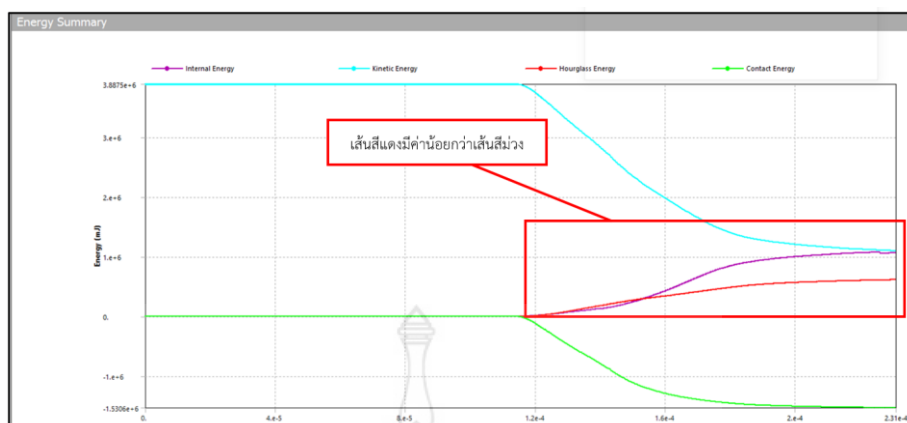
รูปที่ 3.28 เส้นกราฟ Energy Error สถานะปกติ

3.4.1.4. Momentum Summary เป็นกราฟที่จะแสดงผลของ Momentum ที่เกิดความเสียหายเทียบกับ Time Step ในแต่ละแกน ในการทำงานจะแสดงค่าของ Impulse ในแต่ละแนวแกนโดยสามารถตรวจสอบผลการคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากแนวแกนหลังวัตถุเกิดการกระทบของการจำลองแล้ว เมื่อผลของ Momentum และ Impulse มีความสอดคล้องกับการจำลองที่กระทบถือว่าปกติ การจำลองจากด้านข้างของชิ้นงานซึ่งอยู่ในแนวแกน Z เส้นสีเหลืองจะเป็นค่าของ Impulse ในแนวแกน Z เส้นกราฟจะมีลักษณะคงที่และเส้นสีแดงจะบอกถึงค่าของ Momentum ในแนวแกน Z ซึ่งจะไม่แสดงผลในกราฟ ดังนั้นเมื่อวัตถุกระทบแล้วและไม่สอดคล้องกันถือว่ามีความผิดปกติของการจำลองนี้ ตามรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.29 ผลที่เป็นปกติของ Impulse ในแกน Z

3.4.1.5. Energy Summary เป็นการแสดงผลของพลังงานที่เกิดขึ้นจากการที่วัตถุเกิดการกระทบโดยมีพลังงานที่เกี่ยวข้องดังนี้ Internal Energy, Kinetic Energy, Hourglass Energy, Contact Energy สามารถตรวจสอบของการคลาดเคลื่อนจากเส้นกราฟของ Hourglass Energy ซึ่งเป็นผลที่เกิดจากการสร้างเมช (Mesh) แบบ Hexahedral โดยเฉพาะค่าของ Element ทั้ง 4 จุด จะมีขนาดเท่ากัน ซึ่งจะทำให้ค่าความเครียด (Strain) เป็นศูนย์หรือที่เรียกว่า “Hourglass Effect” ค่าที่แสดงผลของกราฟ Hourglass Energy จะแสดงผลเป็นเส้นสีแดงโดยจะต้องมีค่าที่น้อยกว่าเส้นสีม่วงที่เป็นค่าของ Internal Energy จึงจะถือว่าปกติ ในทางตรงกันข้ามถ้าเส้นสีแดง Hourglass Energy มีค่ามากกว่าเส้นสีม่วง Internal Energy ก็จะทำให้เกิดความผิดปกติขึ้นจากการประมวลผล ที่มีสาเหตุอันเนื่องมาจากการกำหนดการตั้งค่าจากการสร้างรูปแบบเมช (Mesh) ตามรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 Hourglass Energy ปกติ

3.5 สมรรถนะเครื่องคอมพิวเตอร์ในการประมวลผล

สมรรถนะเครื่องคอมพิวเตอร์เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญในการประมวลผลการตรวจสอบค่าคลาดเคลื่อน (Error) เนื่องจากการประมวลผลด้วยการใช้โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการสร้างขนาดของเมช (Mesh) แบบจำลองที่มีขนาดเล็ก เป็นปัจจัยที่มีเวลาเป็นตัวแปรมาเกี่ยวข้อง โดยเป็นการเคลื่อนที่ของวัตถุ (Dynamics) เพื่อความเที่ยงตรงของการจำลองที่เหมือนจริงทั้งทางด้านของความเสียหาย ด้านพลังงานจากวัตถุ ดังนั้นจึงต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงในการประมวลผล โดยอุปกรณ์ของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ประกอบด้วย

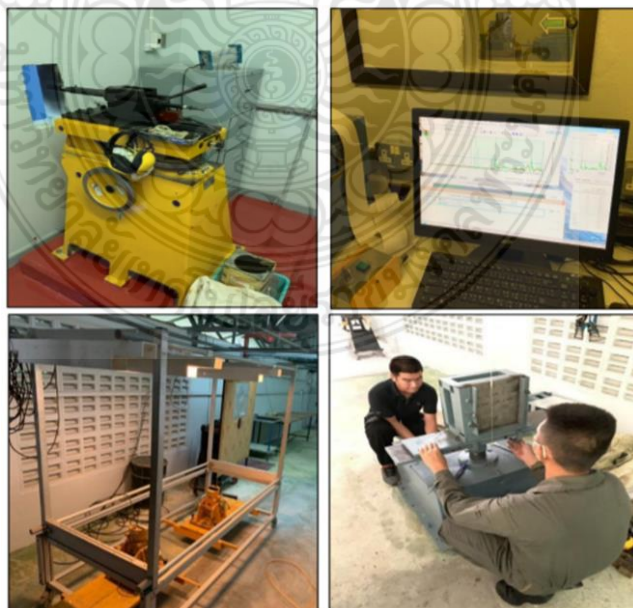
- หน่วยประมวลผล (CPU) AMD Ryzen Threadripper 2990WX 32 Cores
- Mainboard MEG X399 creation (MS-7B92)
- หน่วยความจำ (Memory) Type DDR4 size 96 Gbytes Channel # Quad NB Frequency Memory slot DD4-2132 (1066 MHz) corsair
- VGA: NVIDIA Quadro RTX 4000

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

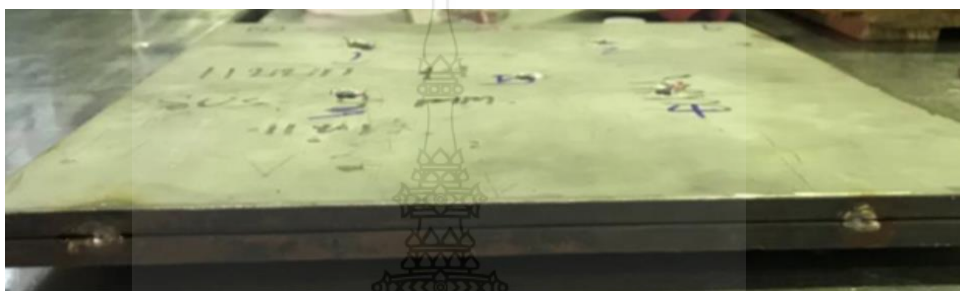
4.1 การเปรียบเทียบการทดลองจริงและการทดลองด้วยโปรแกรม ANSYS

เนื่องจาก ผลงานหลักในงานวิจัยนี้ เป็นการวิเคราะห์ตัวแปรมุมเอียงและความหนาของแผ่นเกราะกันกระสุนที่ทำจากวัสดุอลูมิเนียมและสแตนเลส เพื่อวิเคราะห์รูปแบบความเสียหายและความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุของแผ่นเกราะจากการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์บนโปรแกรมสำเร็จรูป Ansys/Explicit Dynamics ดังนั้น เพื่อเป็นการตรวจสอบการวิเคราะห์ตัวแปรด้วยวิธีการดังที่กล่าวมา ผู้วิจัยจึงใช้ผลการทดสอบกับผลการทดลองจริง โดยการนำงานวิจัยของนพพล กลางทัพ เรื่อง “การวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนบนโลหะด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์” [5] ที่มีการดำเนินการทดสอบการยิงจริงผ่านเกราะกันกระสุนภายใต้มาตรฐาน NIJ ระดับ 3 เข้ามาเป็นแนวทางหลัก มากไปกว่านั้น การนำผลการทดสอบจริงที่ผ่านกระบวนการวิจัยที่มีความคล้ายคลึงใกล้เคียงกัน และมีการตรวจสอบความถูกต้องมาแล้ว ถือเป็นภาระลดข้อจำกัดทั้งในด้านระยะเวลา งบประมาณ และอื่น ๆ ที่จำเป็นเพียงพอสำหรับการนำมาใช้งานได้อีกด้วย การทดสอบจริงนี้ถูกกระทำ ณ โรงงานวัตถุระเบิดทหารกรมการอุตสาหกรรมป้องกันประเทศและพลังงาน ตั้งอยู่ที่จังหวัดนครสวรรค์ (Military Explosives Factory, Defense Industry Department, Defense Industry and Energy Centre) ภายใต้กระบวนการยิงจริงตามมาตรฐาน NIJ ดังแสดงในรูปที่ 4.1

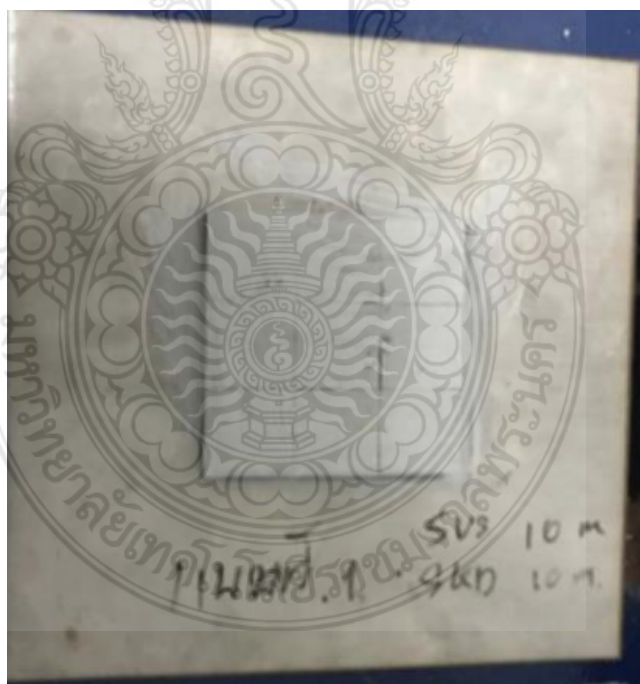


รูปที่ 4.1 กระบวนการทดสอบยิงจริงตามมาตรฐาน NIJ [5]

สำหรับการทดสอบยิงจริงในผลงานวิจัยของของนพพล กลางทัพ มีรายละเอียดประกอบด้วย แผ่นเกราะเพื่อใช้ในการทดสอบยิงจริง 2 แบบ คือ แบบที่ 1 แผ่นเกราะทำจากวัสดุ สแตนเลส SUS304 ซ้อนกัน 2 ชั้น ขนาด 40 x 40 มิลลิเมตร ด้านหน้าและแผ่นด้านหลังมีความหนา 10 มิลลิเมตร และ 10 มิลลิเมตร ตามรูปที่ 4.2 แบบที่ 2 แผ่นเกราะทำจากวัสดุ SKD11 ซ้อนกัน 2 ชั้น มีความหนาด้านหน้าและด้านหลัง 10 มิลลิเมตร และ 10 มิลลิเมตร มีขนาด 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.3



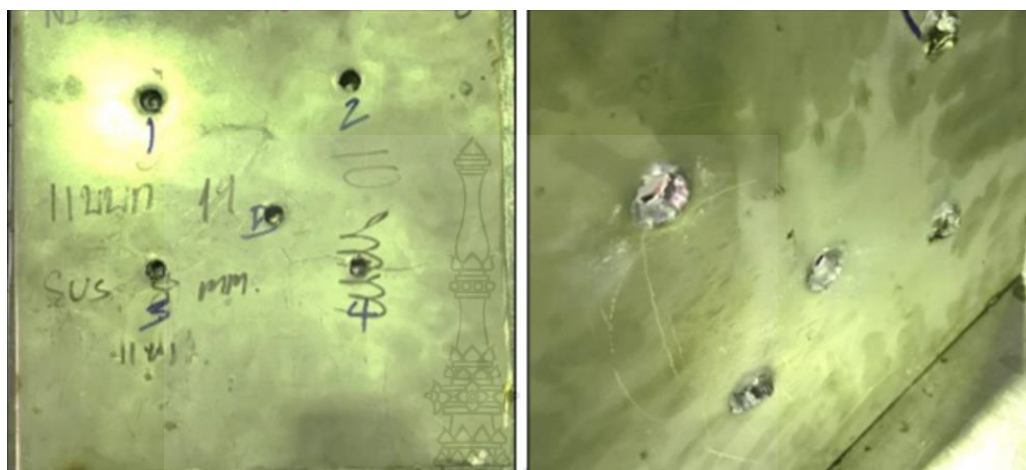
รูปที่ 4.2 แผ่นเกราะกันกระสุนวัสดุสแตนเลส SUS304 ที่ใช้ในการทดสอบจริง [5]



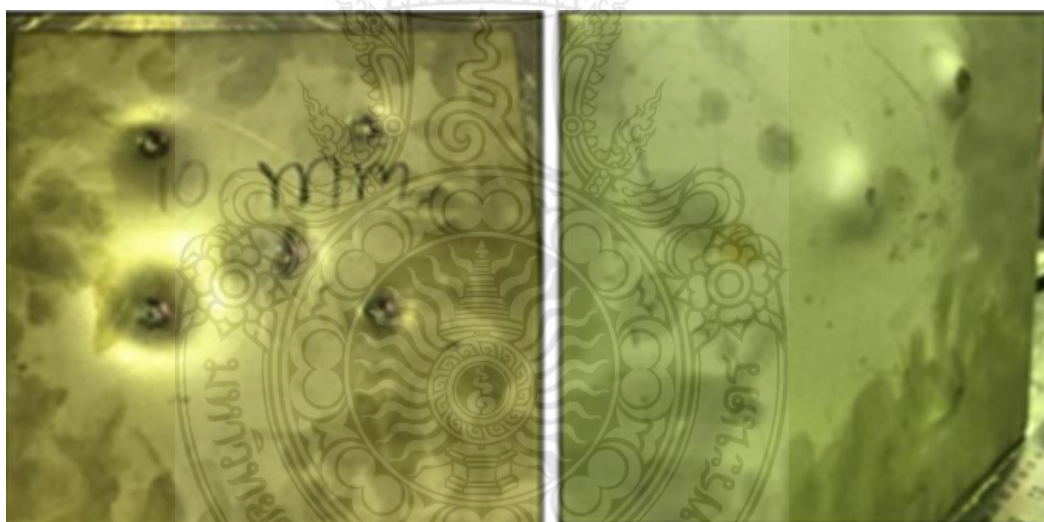
รูปที่ 4.3 แผ่นเกราะกันกระสุนวัสดุ SKD11 ที่ใช้ในการทดสอบจริง [5]

โดยผลการทดสอบพบว่า แผ่นเกราะกันกระสุนวัสดุสแตนเลส SUS304 ถูกกระสุนเจาะทะลุ แผ่นเกราะด้านหน้าอย่างสมบูรณ์ตามรูปที่ 4.4 ในขณะที่แผ่นเกราะด้านหลังเกิดเพียงแครอยบุ๋มที่

บริเวณผิวตามรูปที่ 4.5 ทั้งนี้ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในรูปที่ 4.6 พบว่า เกิดความเสียหายของแผ่นเกราะด้านหน้าอย่างสมบูรณ์และเกิดรอยนูนบนแผ่นหลัง เช่นเดียวกับการทดสอบจริง

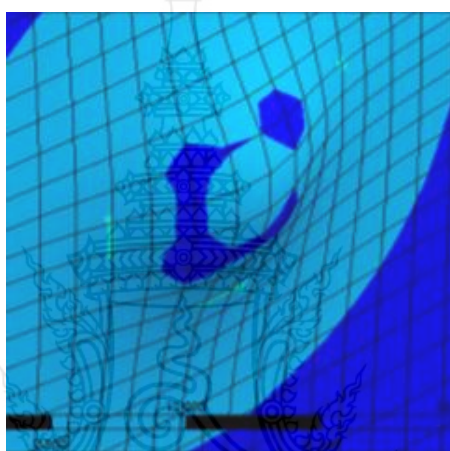
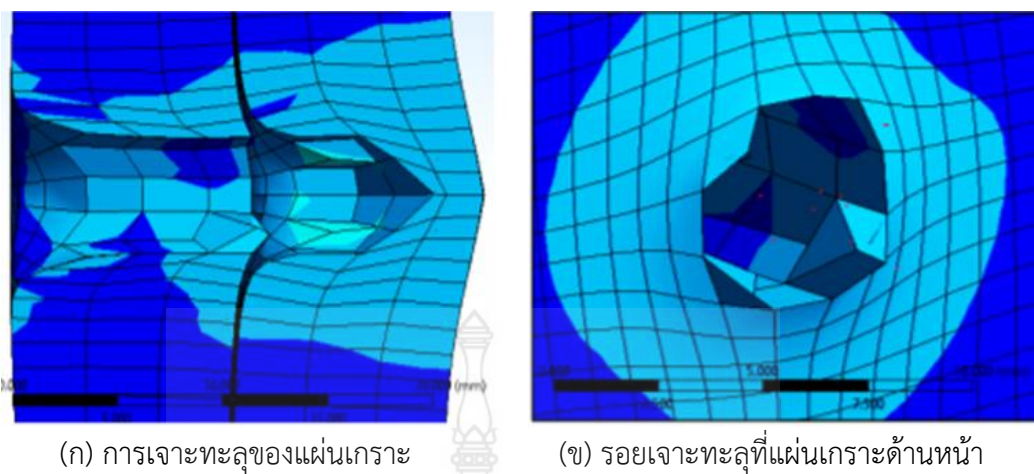


รูปที่ 4.4 การเจาะทะลุผ่านแผ่นเกราะกันกระสุนวัสดุสแตนเลส SUS304 ด้านหน้า [5]



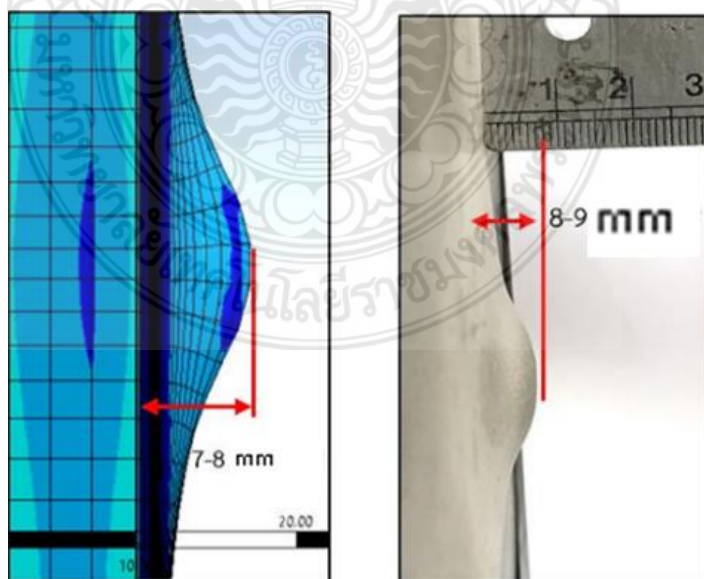
รูปที่ 4.5 การเกิดรอยนูนด้านหลังของแผ่นเกราะกันกระสุนวัสดุสแตนเลส SUS304 [5]

นอกเหนือจากนี้ ผู้วิจัยได้มีการวัดรอยนูนของแผ่นเกราะด้านหลังที่เกิดจากการทดสอบจริง และที่เกิดจากการจำลองด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยพบว่า ผลการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ตามรูปที่ 4.7 (ก) ที่มีความหนาของผิวประมาณ 7-8 มิลลิเมตร ในขณะที่รอยนูนที่เกิดจากการทดสอบจริงอยู่ที่ 8-9 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.7 (ข) ดังนั้น การตรวจสอบด้วยผลการเปรียบเทียบทั้ง 2 วิธี แสดงให้เห็นว่า มีความใกล้เคียงกันโดยมีความแตกต่างของผลการทดลองอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้และเป็นไปในทิศทางเดียวกัน



(ค) รอยนูนที่แผ่นเกราะด้านหลัง

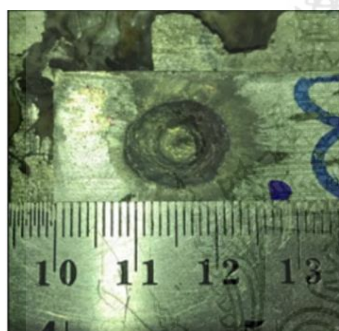
รูปที่ 4.6 ผลการจำลองด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ [5]



(ก) รอยนูนจากการจำลอง (ข) รอยนูนจากการทดสอบยิงจริง

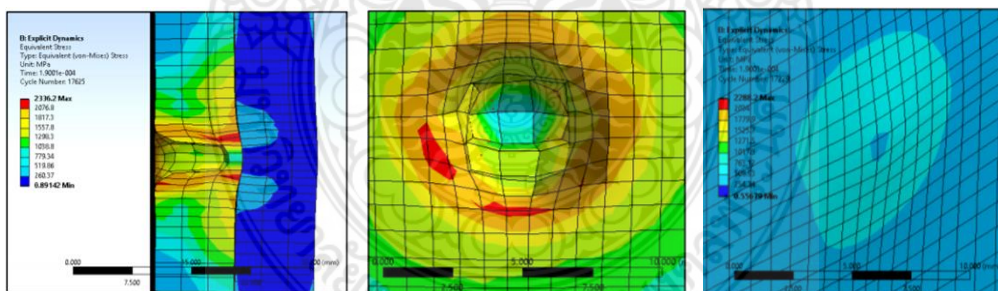
รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบรอยนูนที่แผ่นเกราะด้านหลัง [5]

ในการทดสอบจริงผ่านแผ่นเกราะกันกระสุนด้านหน้าวัสดุ SKD11 และด้านหลังวัสดุ สแตนเลส SUS304 ตามรูปที่ 4.8 พบว่า ทั้งแผ่นเกราะด้านหน้าและด้านหลังไม่เกิดการทะลุซึ่งบริเวณ ด้านหน้าพบร่องรอยการเจาะของหัวกระสุนวัดได้ 10-11 มิลลิเมตร ตามรูปที่ 4.8 (ก) ส่วนด้านหลัง พบรอยนูนออกมาเล็กน้อยตามรูปที่ 4.8 (ข) ส่วนผลการจำลองด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าบริเวณด้านหน้าของแผ่นเกราะกันกระสุนมีเพียงรอยเจาะของหัวกระสุนวัดเส้นผ่านศูนย์กลางได้ ประมาณ 8-9 มิลลิเมตร ตามรูปที่ 4.9 (ก) และ (ข) ส่วนการจำลองบริเวณด้านหลังพบมีรอยนูน เล็กน้อย ตามภาพที่ 4.9 (ค) ดังนั้น หลังการเปรียบเทียบผลจากทั้ง 2 กรณี แสดงให้เห็นว่าการใช้ การจำลองด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีที่สามารถใช้งานได้จริงมีผลใกล้เคียงกับการ ทดสอบจริง



(ก) รอยเจาะของหัวกระสุนที่แผ่นเกราะด้านหน้า (ข) รอยนูนที่แผ่นเกราะด้านหลัง

รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบจริงของเกราะกันกระสุนวัสดุ SKD11 และ SUS304 [5]



(ก) รอยเจาะของกระสุน

(ข) รอยเจาะที่แผ่นด้านหน้า

(ค) รอยนูนที่แผ่นด้านหลัง

รูปที่ 4.9 ผลการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

4.2 ผลการจำลองรูปแบบความเสียหายและความสามารถในการต้านทานการเจาะ ทะลุแผ่นเกราะกันกระสุนตามมาตรฐาน NIJ 3 ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์
ตามที่กล่าวไปแล้วเบื้องต้นว่าการวิจัยนี้ศึกษาตัวแปรของมุมปะทะ ที่ 0 30 และ 45 องศา วัสดุที่ใช้ทำเกราะกันกระสุน ได้แก่ สแตนเลส SUS304 อลูมิเนียม AL7075 ที่มีความ

หนาหลากหลายเริ่มต้นตั้งแต่ 6 8 10 14 20 30 40 45 และ 55 มิลลิเมตร และ ทั้งสแตนคาร์ไบด์ ความหนา 6 8 และ 10 มิลลิเมตร โดยการทดสอบมีทั้งแบบวัสดุชนิดเดียว และวัสดุ 2 ชนิด ซ้อนกันโดยไม่มีช่องว่างระหว่างแผ่น สำหรับนำไปวิเคราะห์รูปแบบความเสียหายและความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุ เพื่อความง่ายต่อความเข้าใจผู้วิจัยจึงขอนำเสนอในรูปแบบของตารางผลการจำลองโดยใช้ตัวแปรเรื่องมุมปะทะเป็นหลักโดยมีผลการจำลองตามตารางที่ 4.1 ถึง 4.3

4.2.1 ผลการจำลองที่มุมปะทะ 0 องศา

สำหรับผลการทดลองในส่วนนี้เป็นการจำลองมุมปะทะที่ 0 องศา ซึ่งตารางที่ 4.1 เป็นการสรุปผลในรูปแบบต่าง ๆ โดยภาพผลลัพธ์การจำลองด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ตามลำดับในตาราง 4.1 ถูกแสดงตามรูปที่ 4.10 ถึง 4.18 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ผลความเสียหายและความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุที่มุมปะทะ 0 องศา

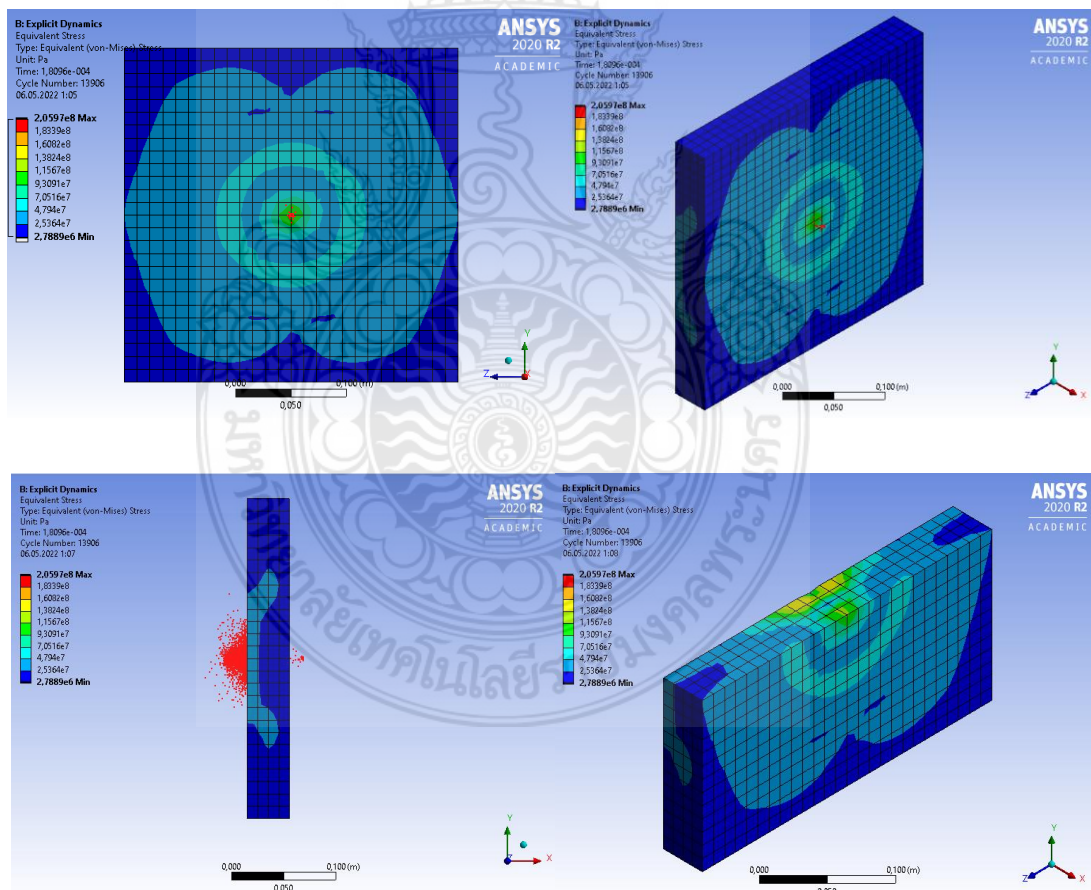
มุมปะทะ (องศา)	วัสดุ				รูปที่แสดง
	แผ่นหน้า ความหนา (mm)	ลักษณะการ เสียหาย	แผ่นหลัง ความหนา (mm)	ลักษณะการ เสียหาย	
0	SUS304 (40)	ไม่ทะลุ	-	-	รูปที่ 4.10
	SUS304 (45)	ไม่ทะลุ	-	-	รูปที่ 4.11
	SUS304 (55)	ไม่ทะลุ	-	-	รูปที่ 4.12
	SUS304 (6)	ทะลุ	AL7075 (6)	ทะลุ	รูปที่ 4.13
	SUS304 (8)	ทะลุ	AL7075 (8)	ทะลุ	รูปที่ 4.14
	SUS304 (10)	ทะลุ	AL7075 (8)	ทะลุ	รูปที่ 4.15
	SUS304 (10)	ทะลุ	AL7075 (10)	ทะลุ	รูปที่ 4.16
	SUS304 (14)	ทะลุ	AL7075 (10)	ไม่ทะลุ	รูปที่ 4.17
	SUS304 (20)	ทะลุ	AL7075 (20)	ไม่ทะลุ	รูปที่ 4.18

หมายเหตุ : ทะลุ หมายถึง แผ่นเกราะกันกระสุน ไม่สามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนได้ซึ่งกระสุนสามารถผ่านแผ่นเกราะกันกระสุนโดยตลอด ส่งผลให้เกิดความเสียหายแบบสมบูรณ์

ไม่ทะลุ หมายถึง แผ่นเกราะกันกระสุน สามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนได้และสามารถทำให้กระสุนเกิดการแตกเสียหาย ซึ่งกระสุนไม่สามารถผ่านแผ่นเกราะกันกระสุนโดยตลอด หรือส่งผลให้เกิดความเสียหาย เพียงรอยนูนบริเวณด้านหลังของแผ่นเกราะ

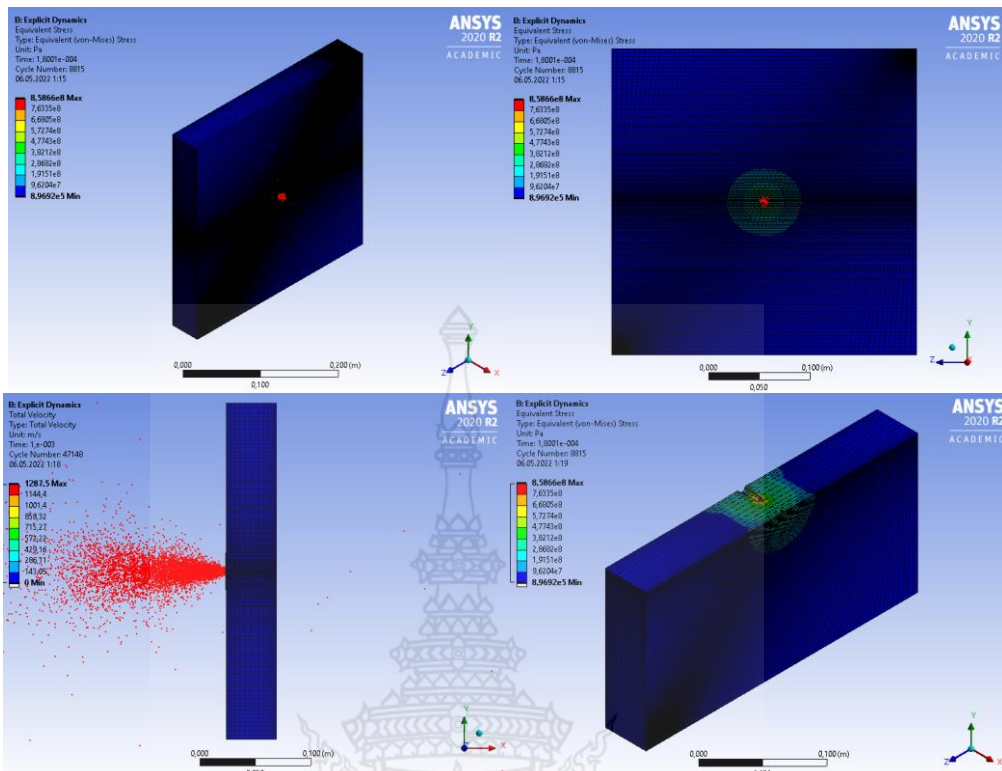
จากตารางที่ 4.1 พบว่าภายใต้มุมปะทะ 0 องศา กับเกราะกันกระสุน วัสดุ SUS304 สามารถทนการเจาะทะลุได้เมื่อมีความหนาตั้งแต่ 40 mm ทั้งนี้เมื่อนำแผ่นโลหะ SUS304 และ AL7075 มาวางซ้อนกัน โดยใช้แผ่นโลหะ SUS304 ขนาด 6 – 20 มิลลิเมตร กับ AL7075 ขนาด 10 และ 20 มิลลิเมตร กระสุนสามารถผ่านแผ่นเกราะกันกระสุนแผ่นที่ 1 โดยตลอด ส่งผลให้เกิดความเสียหายแบบสมบูรณ์ ผ่านไปยังแผ่นเกราะกันกระสุนแผ่นที่ 2 AL7075 ขนาด 10 และ 20 มิลลิเมตร แต่กระสุนไม่สามารถผ่านแผ่นเกราะกันกระสุนแผ่นที่ 2 ได้ ดังนั้นจึงไม่เกิดการทะลุของแผ่นเกราะกันกระสุน ทั้งนี้ ความหนาของวัสดุถือเป็นเหตุผลที่สำคัญที่ทำให้รูปแบบความเสียหายมีความแตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.10 ถึง 4.12 กรณีแผ่นเกราะกันกระสุน 1 แผ่น พบว่า ผลการจำลองความเสียหายด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของแผ่นเกราะกันกระสุนวัสดุสแตนเลส SUS304 มุมปะทะ 0 องศา ที่ความหนา 40 45 และ 55 มิลลิเมตร ตามรูปที่ 4.10 ถึง 4.12 นั้น แผ่นเกราะกันกระสุนสามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนได้

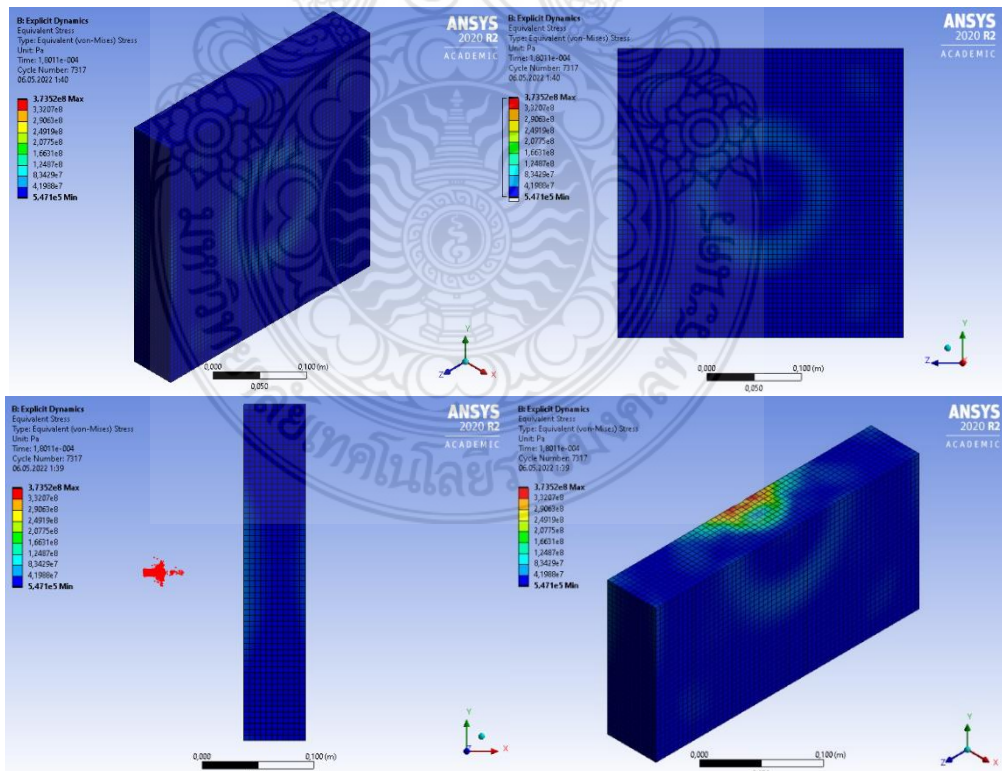


รูปที่ 4.10 ผลการจำลองความเสียหายแผ่นเกราะกันกระสุนวัสดุสแตนเลส SUS304

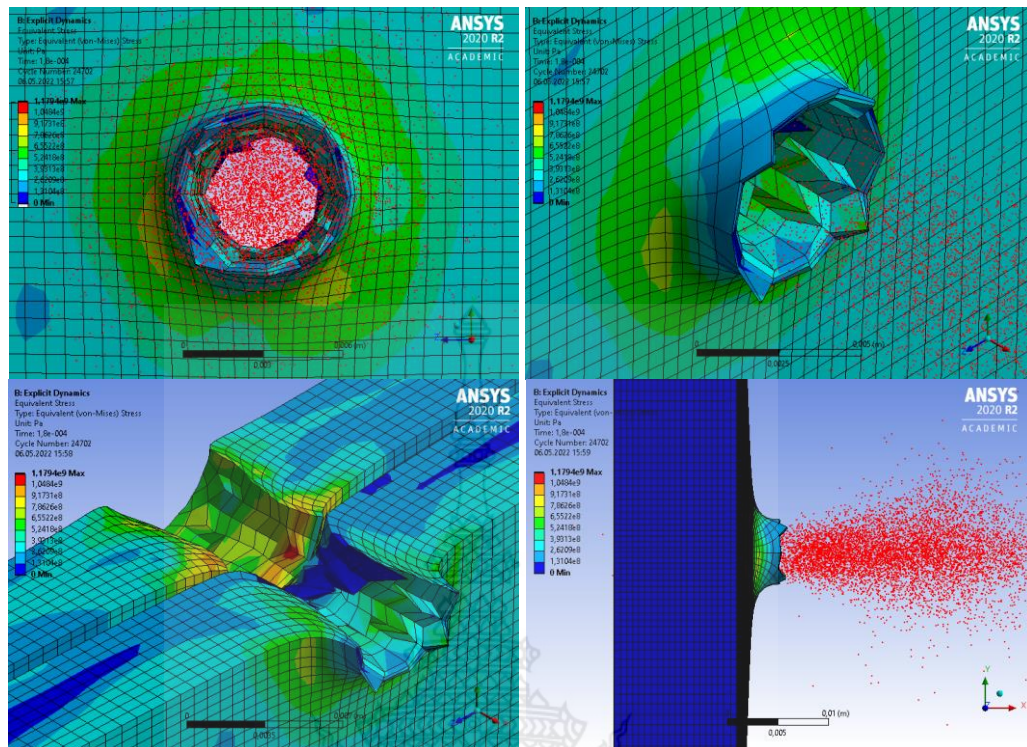
หนา 40 มิลลิเมตร มุมปะทะ 0 องศา



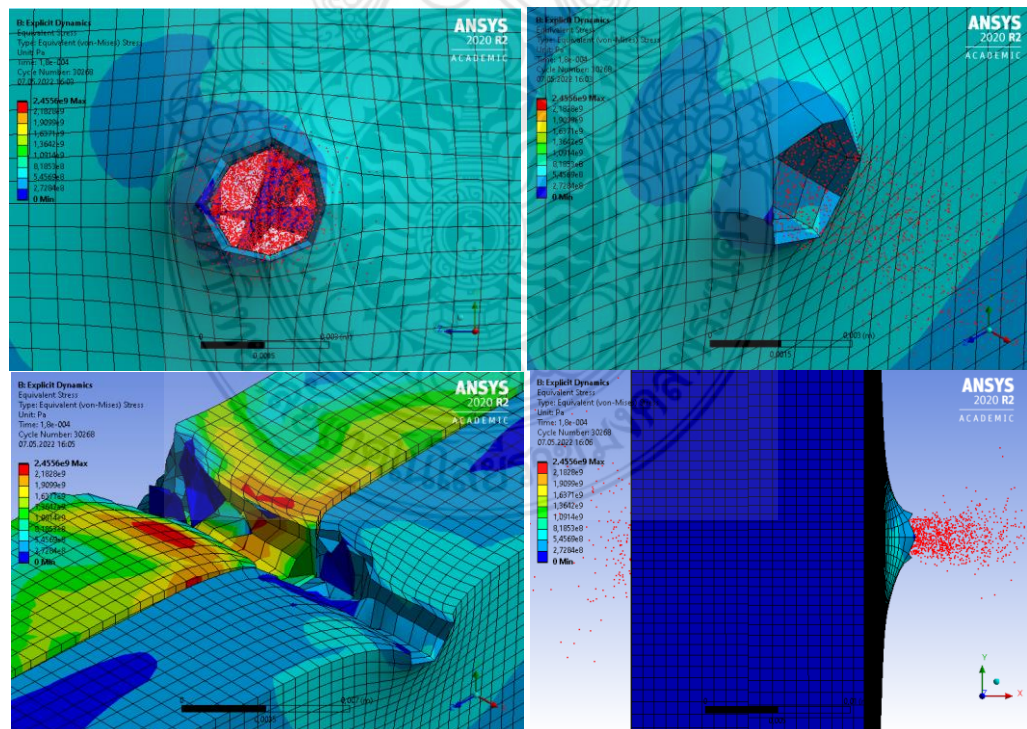
รูปที่ 4.11 ผลการจำลองความเสียหายแผ่นเกราะกันกระสุนวัสดุสแตนเลส SUS304
หนา 45 มิลลิเมตร มุมปะทะ 0 องศา



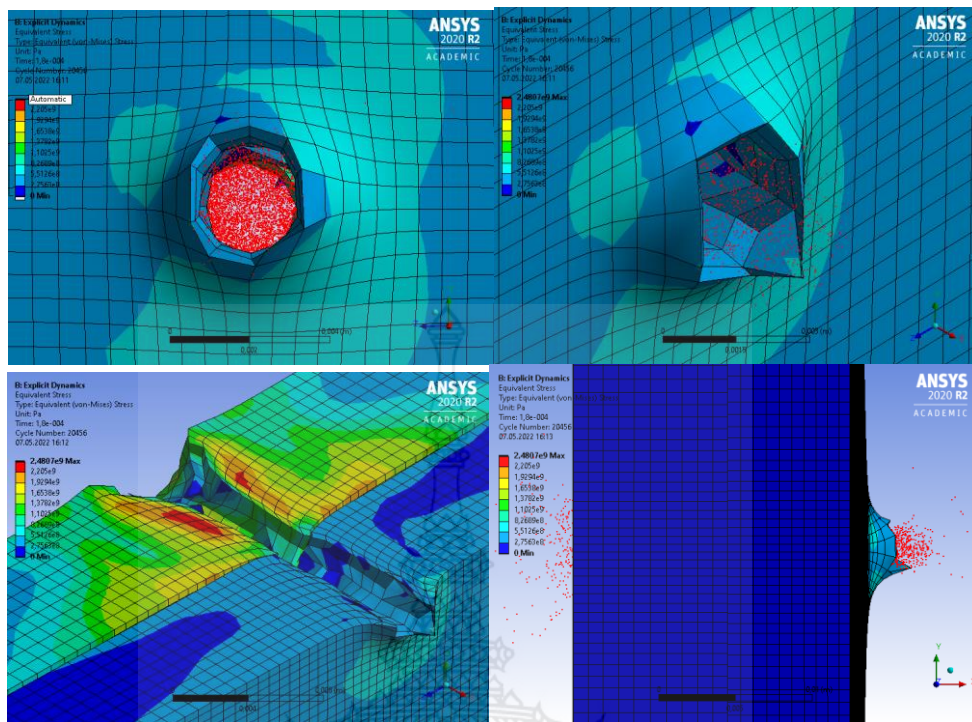
รูปที่ 4.12 ผลการจำลองความเสียหายแผ่นเกราะกันกระสุนวัสดุสแตนเลส SUS304
หนา 55 มิลลิเมตร มุมปะทะ 0 องศา



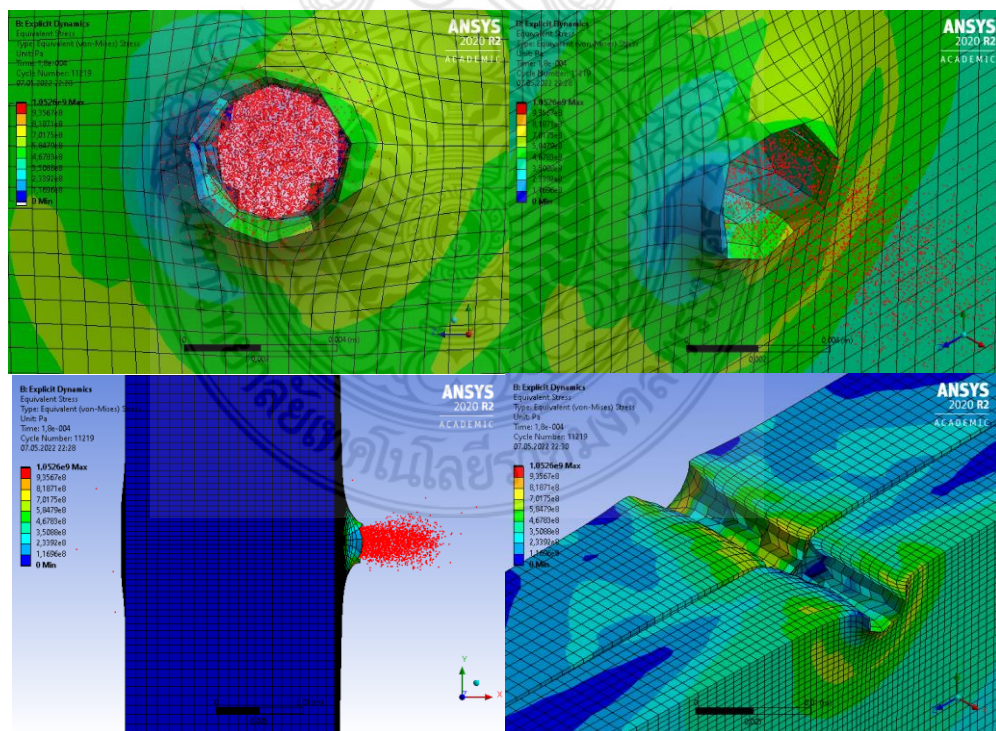
รูปที่ 4.13 ผลการจำลองความเสียหายแผ่นเกราะกันกระสุนแผ่นด้านหน้าวัสดุสแตนเลส SUS304 หนา 6 มิลลิเมตร แผ่นด้านหลังวัสดุอะลูมิเนียม AL7075 หนา 6 มิลลิเมตร มุมปะทะ 0 องศา



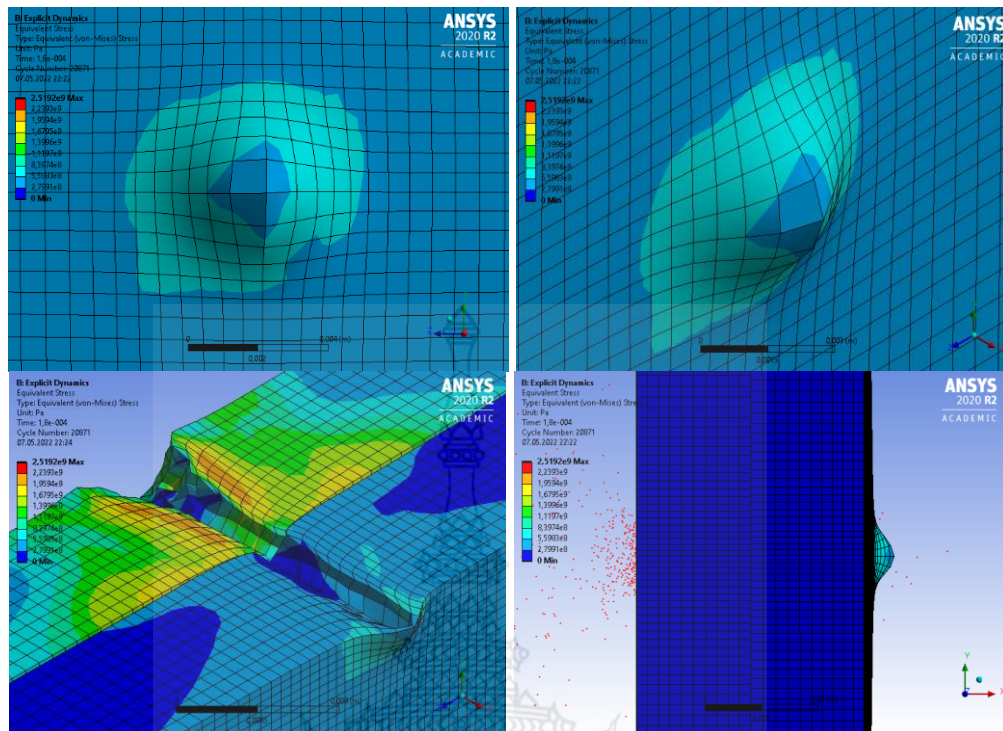
รูปที่ 4.14 ผลการจำลองความเสียหายแผ่นเกราะกันกระสุนแผ่นด้านหน้าวัสดุสแตนเลส SUS304 หนา 8 มิลลิเมตร แผ่นด้านหลังวัสดุอะลูมิเนียม AL7075 หนา 8 มิลลิเมตร มุมปะทะ 0 องศา



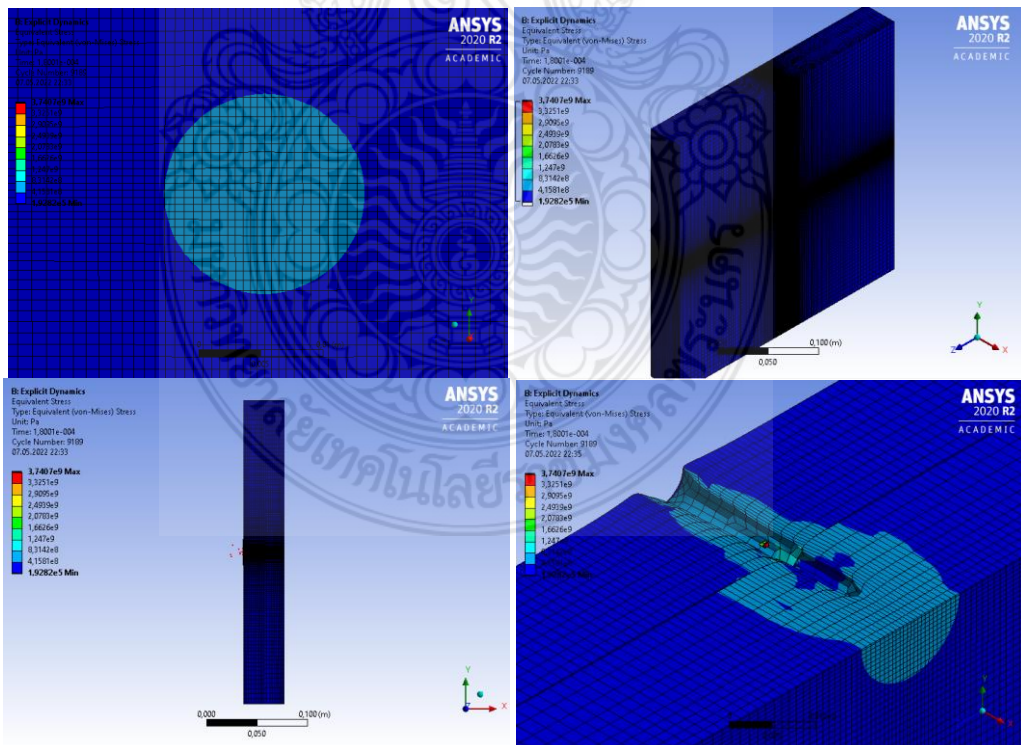
รูปที่ 4.15 ผลการจำลองความเสียหายแผ่นเกราะกันกระสุนแผ่นด้านหน้าวัสดุสแตนเลส SUS304 หนา 10 มิลลิเมตร แผ่นด้านหลังวัสดุอลูมิเนียม AL7075 หนา 8 มิลลิเมตร มุมปะทะ 0 องศา



รูปที่ 4.16 ผลการจำลองความเสียหายแผ่นเกราะกันกระสุนแผ่นด้านหน้าวัสดุสแตนเลส SUS304 หนา 10 มิลลิเมตร แผ่นด้านหลังวัสดุอลูมิเนียม AL7075 หนา 10 มิลลิเมตร มุมปะทะ 0 องศา



รูปที่ 4.17 ผลการจำลองความเสียหายแผ่นเกราะกันกระสุนแผ่นด้านหน้าวัสดุสแตนเลส SUS304 หนา 14 มิลลิเมตร แผ่นด้านหลังวัสดุอลูมิเนียม AL7075 หนา 10 มิลลิเมตร มุมปะทะ 0 องศา



รูปที่ 4.18 ผลการจำลองความเสียหายแผ่นเกราะกันกระสุนแผ่นด้านหน้าวัสดุสแตนเลส SUS304 หนา 20 มิลลิเมตร แผ่นด้านหลังวัสดุอลูมิเนียม AL7075 หนา 20 มิลลิเมตร มุมปะทะ 0 องศา

ผลการจำลองความเสียหายด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของแผ่นเกราะกันกระสุน 2 ชั้น แผ่นด้านหน้าวัสดุสแตนเลส SUS304 แผ่นด้านหลังวัสดุอลูมิเนียม AL7075 มุมปะทะ 0 องศา ตามภาพที่ 4.13 ถึง 4.18 พบว่า SUS304 ที่ความหนา 6 มิลลิเมตร ซ้อนด้วย AL7075 ที่ความหนา 6 มิลลิเมตร ถึง SUS304 ที่ความหนา 10 มิลลิเมตร ซ้อนด้วย AL7075 ที่ความหนา 10 มิลลิเมตร แผ่นเกราะกันกระสุนไม่สามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนได้ ส่วนแผ่นเกราะกันกระสุนที่ใช้ SUS304 ที่ความหนา 14 มิลลิเมตร ซ้อนด้วย AL7075 ที่ความหนา 10 มิลลิเมตร พบว่าแผ่นเกราะกันกระสุนสามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนได้

4.2.2 ผลการจำลองที่มุมปะทะ 30 องศา

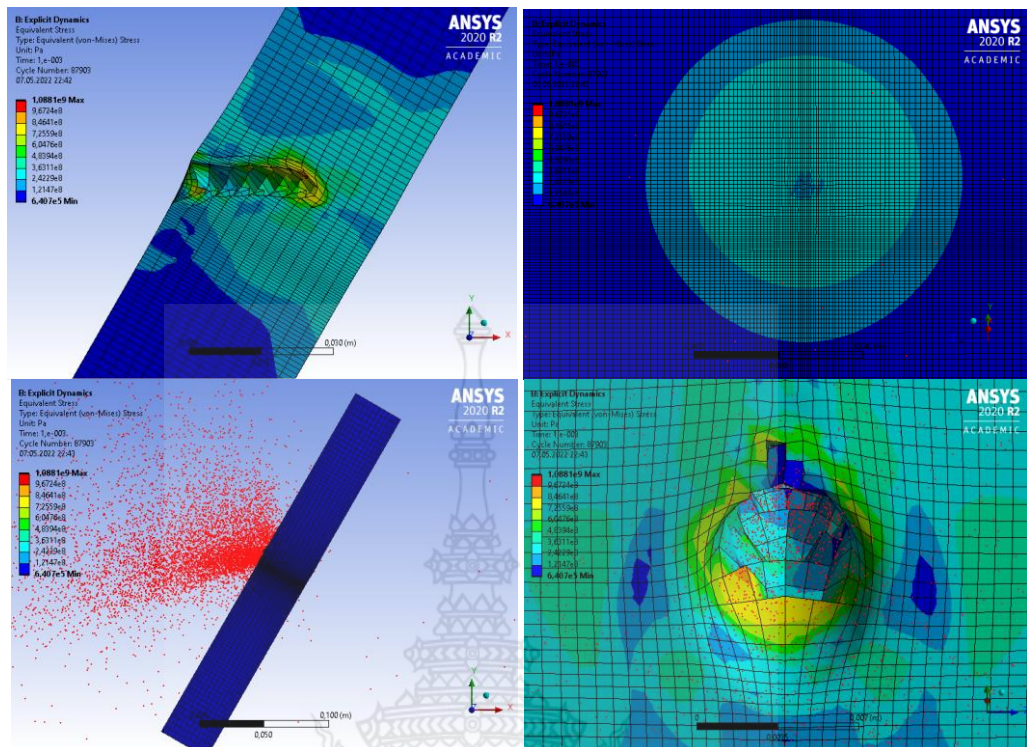
ผลการจำลองมุมปะทะที่ 30 องศา แสดงตามตารางที่ 4.2 และภาพผลลัพธ์การจำลองด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ แสดงตามรูปที่ 4.19 ถึง 4.22

ตารางที่ 4.2 ผลความเสียหายและความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุที่มุมปะทะ 30 องศา

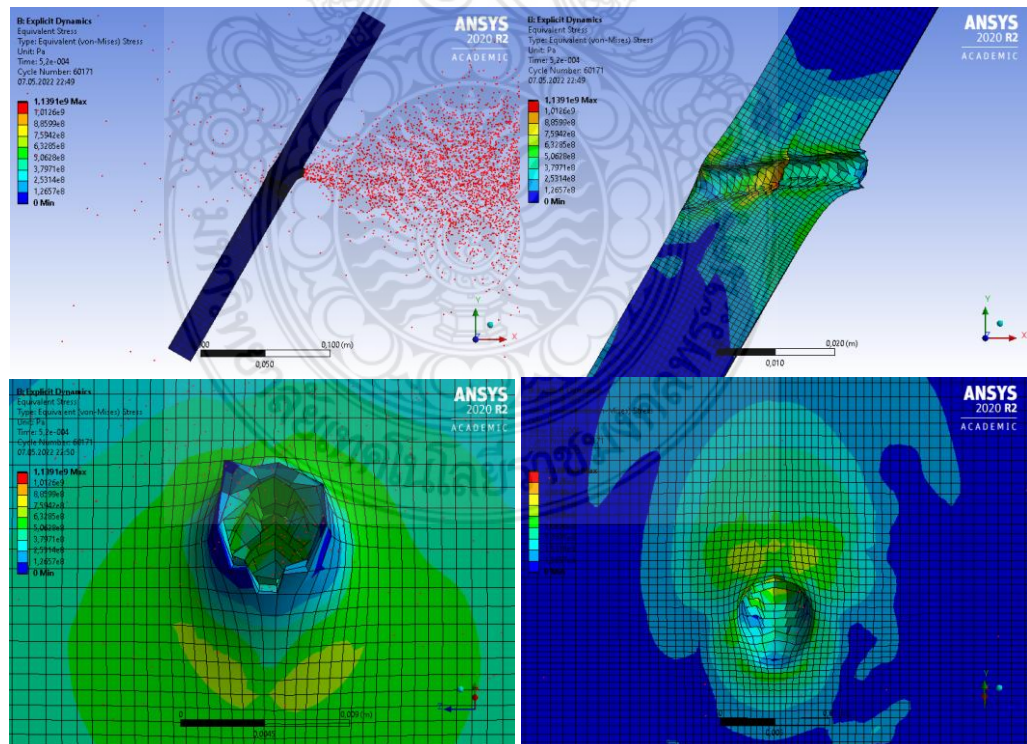
มุมปะทะ (องศา)	วัสดุ				รูปที่แสดง
	แผ่นหน้า ความหนา (mm)	ลักษณะการ เสียหาย	แผ่นหลัง ความหนา (mm)	ลักษณะการ เสียหาย	
30	SUS304 (40)	ไม่ทะลุ	-	-	รูปที่ 4.19
	SUS304 (10)	ทะลุ	AL7075 (10)	ทะลุ	รูปที่ 4.20
	SUS304 (30)	ไม่ทะลุ	AL7075 (10)	ไม่ทะลุ	รูปที่ 4.21
	SUS304 (40)	ไม่ทะลุ	AL7075 (10)	ไม่ทะลุ	รูปที่ 4.22

จากตารางที่ 4.2 พบว่าภายใต้มุมปะทะ 30 องศา กับแผ่นเกราะกันกระสุน วัสดุสแตนเลส SUS304 ขนาด 10 มิลลิเมตร ซ้อนกับ วัสดุอลูมิเนียม AL7075 ขนาด 10 มิลลิเมตร ไม่สามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนได้ หรือกระสุนสามารถเจาะทะลุผ่านแผ่นวัสดุได้แบบสมบูรณ์ ในขณะที่ วัสดุสแตนเลส SUS304 ขนาด 40 มิลลิเมตร 1 ชั้น และวัสดุแบบ 2 ชั้น วัสดุสแตนเลส SUS304 ขนาด 30 มิลลิเมตร กับอลูมิเนียม AL7075 ขนาด 10 มิลลิเมตร และวัสดุสแตนเลส SUS304 ขนาด 40 มิลลิเมตร กับอลูมิเนียม AL7075 ขนาด 10 มิลลิเมตร มีความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนได้ ทั้งนี้ จะเห็นได้ว่าความหนาของแผ่นวัสดุนั้นถือเป็นเหตุผลที่สำคัญที่ทำให้รูปแบบความเสียหายมีความแตกต่างกันไป

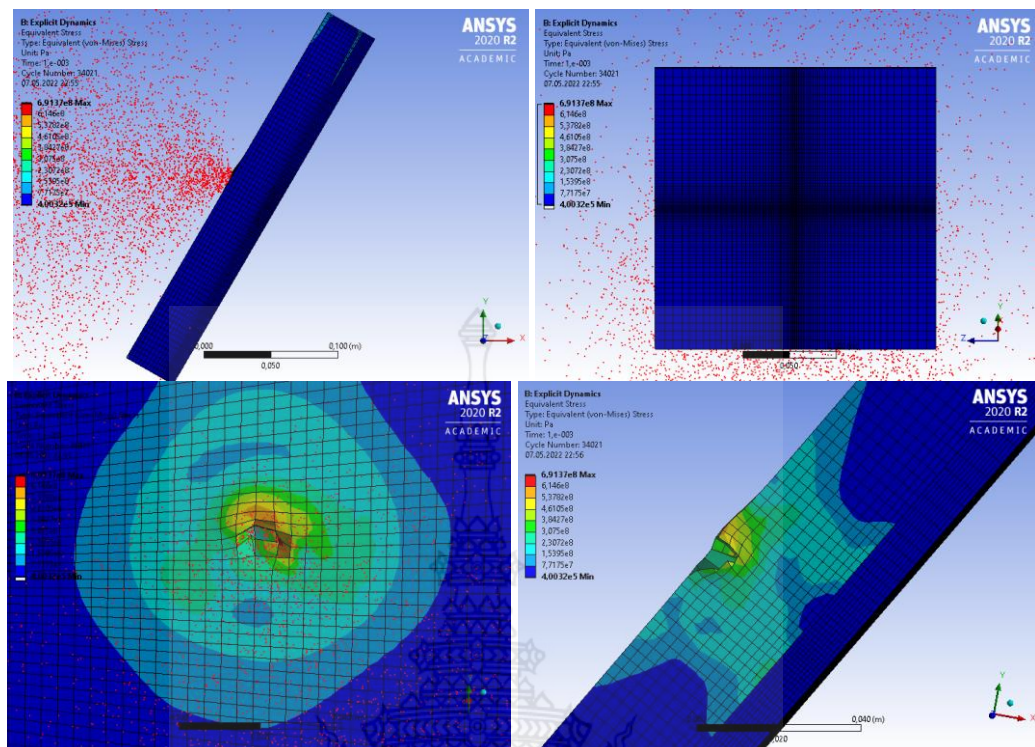
ในส่วนของการจำลองความเสียหายด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของแผ่นเกราะกันกระสุนวัสดุสแตนเลส SUS304 มุมปะทะ 30 องศา ที่ความหนา 40 มิลลิเมตร ตามรูปที่ 4.19 พบว่ามีความสามารถทนต่อความเสียหายได้



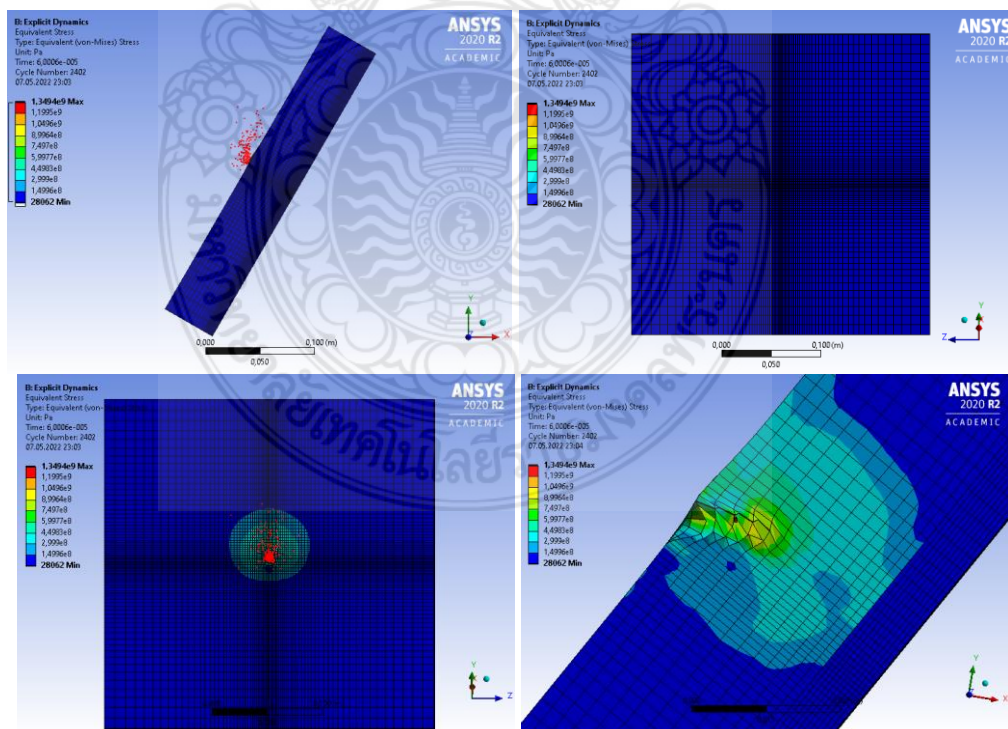
รูปที่ 4.19 ผลการจำลองความเสียหายแผ่นเกราะกันกระสุนวัสดุสแตนเลส SUS304
หนา 40 มิลลิเมตร มุมปะทะ 30 องศา



รูปที่ 4.20 ผลการจำลองความเสียหายแผ่นเกราะกันกระสุนแผ่นด้านหน้าวัสดุสแตนเลส SUS304
หนา 10 มิลลิเมตร แผ่นด้านหลังวัสดุอลูมิเนียม AL7075 หนา 10 มิลลิเมตร มุมปะทะ 30 องศา



รูปที่ 4.21 ผลการจำลองความเสียหายแผ่นเกราะกันกระสุนแผ่นด้านหน้าวัสดุแตนเลส SUS304 หนา 30 มิลลิเมตร แผ่นด้านหลังวัสดุอะลูมิเนียม AL7075 หนา 10 มิลลิเมตร มุมปะทะ 30 องศา



รูปที่ 4.22 ผลการจำลองความเสียหายแผ่นเกราะกันกระสุนแผ่นด้านหน้าวัสดุแตนเลส SUS304 หนา 40 มิลลิเมตร แผ่นด้านหลังวัสดุอะลูมิเนียม AL7075 หนา 10 มิลลิเมตร มุมปะทะ 30 องศา

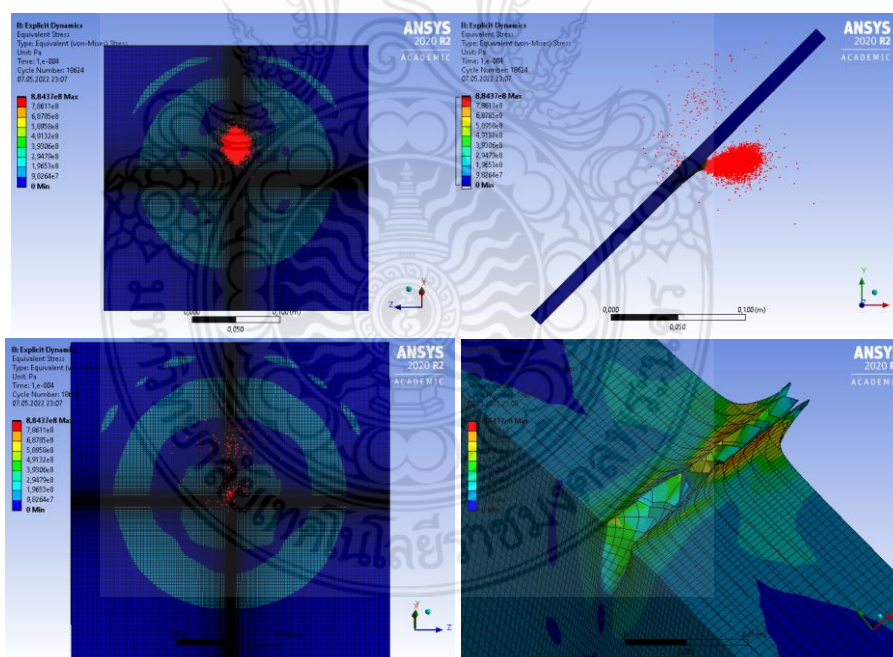
4.2.3 ผลการจำลองที่มุมปะทะ 45 องศา

ผลการจำลองมุมปะทะที่ 45 องศา แสดงตามตารางที่ 4.3 และภาพผลลัพธ์การจำลองด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงตามรูปที่ 4.23 ถึง 4.26

ตารางที่ 4.3 ผลความเสียหายและความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุที่มุมปะทะ 45 องศา

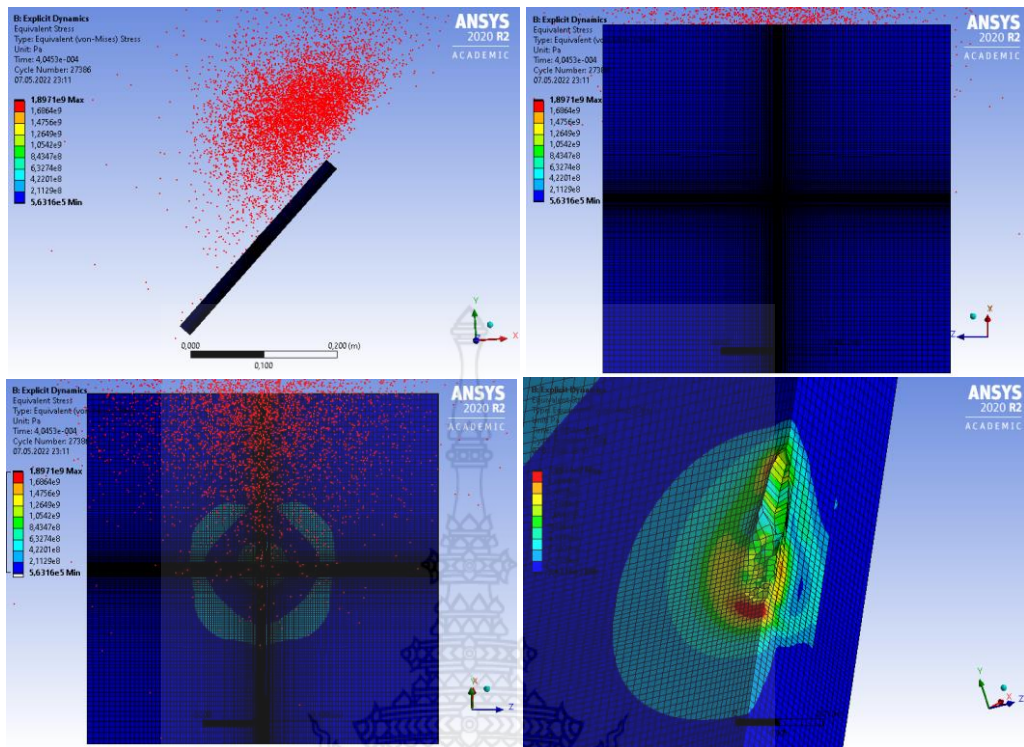
มุมปะทะ (องศา)	วัสดุ				รูปที่แสดง
	แผ่นหน้า ความหนา (mm)	ลักษณะการ เสียหาย	แผ่นหลัง ความหนา (mm)	ลักษณะการ เสียหาย	
45	SUS304 (20)	ทะลุ	-	-	รูปที่ 4.23
	SUS304 (10)	ไม่ทะลุ	AL7075 (8)	ไม่ทะลุ	รูปที่ 4.24
	SUS304 (10)	ไม่ทะลุ	AL7075 (10)	ไม่ทะลุ	รูปที่ 4.25
	SUS304 (20)	ไม่ทะลุ	AL7075 (10)	ไม่ทะลุ	รูปที่ 4.26

จากตารางที่ 4.3 พบว่าภายใต้มุมปะทะ 45 องศา กับเกราะกันกระสุน วัสดุ SUS304 ขนาด 20 มิลลิเมตร ไม่สามารถทนการเจาะทะลุได้หรือเจาะทะลุสมบูรณ์ ในขณะที่ วัสดุ SUS304 ขนาด 10 มิลลิเมตรขึ้นไป กับ AL7075 ขนาด 8 มิลลิเมตรขึ้นไป มีความสามารถทนต่อความเสียหายได้ ทั้งนี้ ความหนาของวัสดุถือเป็นเหตุผลที่สำคัญที่ทำให้รูปแบบความเสียหายมีความแตกต่างกัน

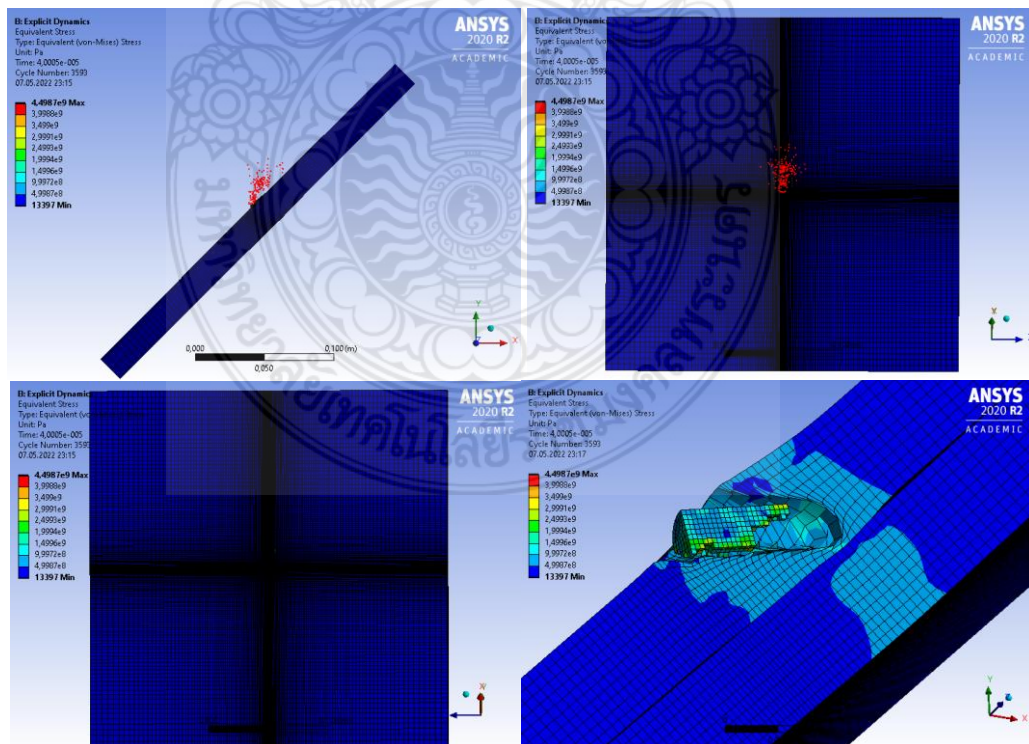


รูปที่ 4.23 ผลการจำลองความเสียหายแผ่นเกราะกันกระสุนวัสดุสแตนเลส SUS304 หนา 20 มิลลิเมตร มุมปะทะ 45 องศา

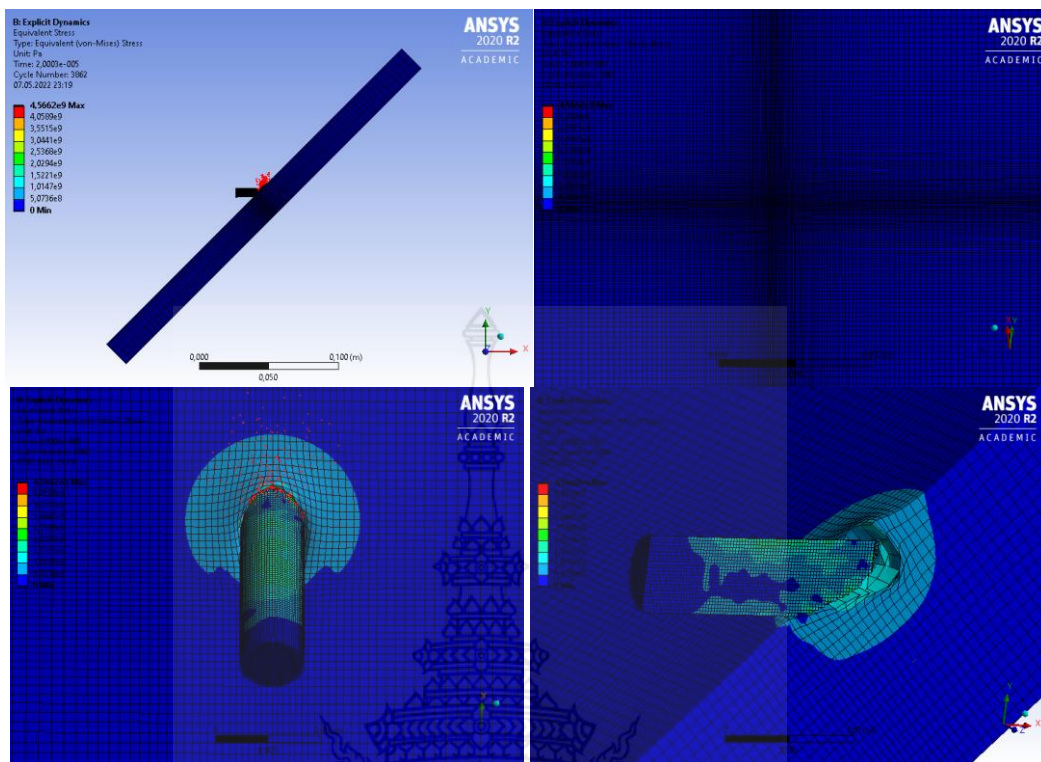
ผลการจำลองความเสียหายด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของแผ่นเกราะกันกระสุนวัสดุสแตนเลส SUS304 มุมปะทะ 45 องศา ที่ความหนา 20 มิลลิเมตร ตามรูปที่ 4.23 พบว่า ไม่สามารถทนการเจาะทะลุได้หรือเจาะทะลุสมบูรณ์



รูปที่ 4.24 ผลการจำลองความเสียหายแผ่นเกราะกันกระสุนแผ่นด้านหน้าวัสดุสแตนเลส SUS304 หนา 10 มิลลิเมตร แผ่นด้านหลังวัสดุอลูมิเนียม AL7075 หนา 8 มิลลิเมตร มุมปะทะ 45 องศา



รูปที่ 4.25 ผลการจำลองความเสียหายแผ่นเกราะกันกระสุนแผ่นด้านหน้าวัสดุสแตนเลส SUS304 หนา 10 มิลลิเมตร แผ่นด้านหลังวัสดุอลูมิเนียม AL7075 หนา 10 มิลลิเมตร มุมปะทะ 45 องศา



รูปที่ 4.26 ผลการจำลองความเสียหายแผ่นเกราะกันกระสุนแผ่นด้านหน้าวัสดุสแตนเลส SUS304 หนา 20 มิลลิเมตร แผ่นด้านหลังวัสดุอลูมิเนียม AL7075 หนา 10 มิลลิเมตร มุมปะทะ 45 องศา

ผลการจำลองความเสียหายด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของแผ่นเกราะกันกระสุน 2 ชั้น แผ่นด้านหน้าวัสดุสแตนเลส SUS304 ความหนา 10 และ 20 มิลลิเมตร แผ่นด้านหลังวัสดุอลูมิเนียม AL7075 ที่ความหนา 8 และ 10 มิลลิเมตร มุมปะทะ 45 องศา ตามรูปที่ 4.24 ถึง 4.26 พบว่ามีความสามารถทนต่อความเสียหายได้

4.2.4 ผลการจำลองที่มุมปะทะ 0 องศา วัสดุทั้งสแตนเลสแผ่นหน้า และ SUS 304 แผ่นหลัง

ในการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ใช้โปรแกรม Ansys/Explicit Dynamics โดยมีขนาดของกระสุน 7.62 มิลลิเมตร ที่ความเร็ว 880 m/s โดยให้ความเร็วคงที่ ตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 4 [10] ขนาดรูปแบบสร้าง mesh ที่กระสุนเป็นแบบ hexahedral ขนาด 0.5 มิลลิเมตร มี 35,857 node และ 65,861 element ซึ่งขนาด mesh มีความละเอียดเพื่อลดการคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการจำลองและได้จำลองการยิงเป็น 2 แบบ แบบที่ 1 จำลองยิงทีละแผ่นซึ่งแผ่นที่ 1 เป็น Tungsten carbide และแผ่นที่ 2 เป็น SUS304 โดย mesh มีความหนา 4 มิลลิเมตร เป็นแบบ hexahedral ซึ่งได้ปรับขนาดของ mesh ให้เล็กลงบริเวณตรงกลางแผ่นเป็น 15 เท่าของขนาด mesh การจำลองแบบที่ 2 ให้แผ่นทั้ง 2 วัสดุ ซ้อนกันเป็น 2 ชั้น [44] โดยแผ่นด้านหน้าเป็น Tungsten carbide แผ่นหลังเป็น SUS304 ในส่วนของจำนวน

node และ element ที่ความหนาของแต่ละพารามิเตอร์ตามตารางที่ 4.4 จุดจับยึดแผ่นเกราะกันกระสุนเป็นแบบ Fix support ทั้ง 4 ด้าน ในการสร้าง mesh เป็นแบบ hexahedral เพื่อลดจำนวนของ node และ element ลงเพราะแบบ tetrahedral จะได้จำนวน node และ element ที่มากกว่าและทำให้การ Run-Program ใช้เวลามากขึ้น [45]

ตารางที่ 4.4 Number of node and element

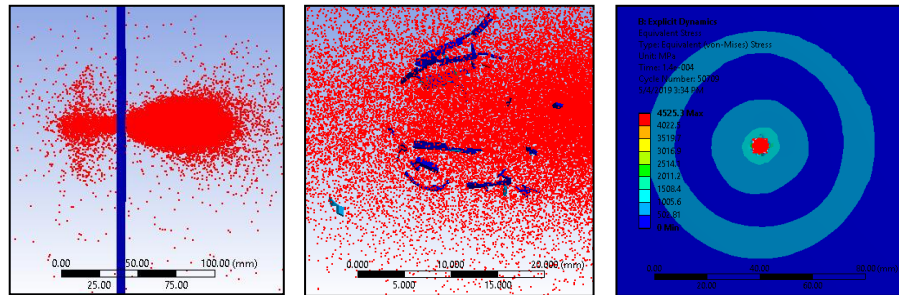
Thickness of plate	Armor plate		Thickness of plate	Armor plate	
	1 plate			2 plate	
	node	element		node	element
T = 5 mm.	12,168	5,929	$T_1 = 6 \text{ mm.}, T_2 = 5 \text{ mm.}$	22,826	11,113
T = 6 mm.	12,168	5,929	$T_1 = 6 \text{ mm.}, T_2 = 6 \text{ mm.}$	22,826	11,113
T = 8 mm.	18,252	11,858	$T_1 = 8 \text{ mm.}, T_2 = 8 \text{ mm.}$	35,580	23,108
T = 10 mm.	18,252	11,858	$T_1 = 10 \text{ mm.}, T_2 = 10 \text{ mm.}$	35,580	23,108

* T_1 คือความหนาแผ่นด้านหน้าหรือชั้นแผ่นที่ 1, T_2 คือความหนาแผ่นด้านหลังหรือชั้นแผ่นที่ 2

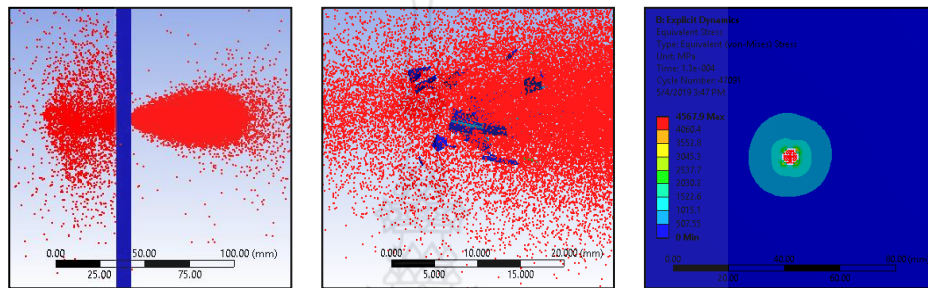
ในการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยการยิงของกระสุนขนาด 7.62 มิลลิเมตร ความเร็ว 880 m/s โดยแผ่นเกราะที่ 1 ซึ่งเป็นวัสดุ Tungsten carbide ที่ความหนา 6 8 และ 10 มิลลิเมตร ผลที่ได้แผ่นเกราะไม่สามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนได้ทั้ง 3 ความหนา ตามตารางที่ 4.5 แต่กระสุนเกิดการแตกเสียหายเมื่อกระแทกเข้ากับแผ่นเกราะแล้วทะลุออกไป แต่ที่ความหนา 6 และ 8 มิลลิเมตร มีเศษโลหะของกระสุนที่ขนาดใหญ่แตกออกจากการเจาะทะลุส่วนความหนา 10 มิลลิเมตร มีเศษโลหะของกระสุนที่มีขนาดเล็กกว่าความหนา 6 และ 8 มิลลิเมตร ตามรูปที่ 4.27

ตารางที่ 4.5 ผลความเสียหายและความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุที่มุมปะทะ 0 องศา วัสดุ Tungsten carbide

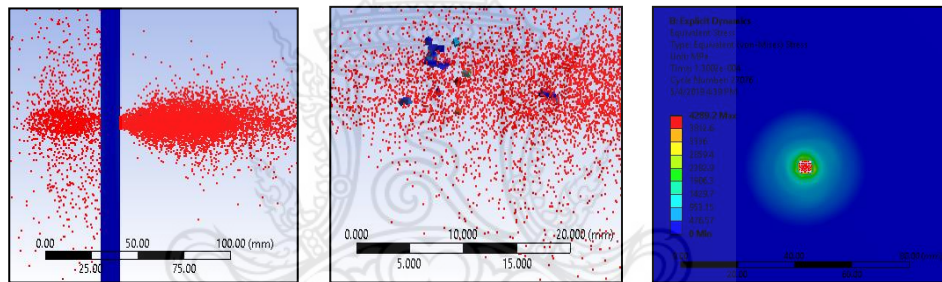
มุมปะทะ 0 (องศา)	วัสดุ				รูปที่แสดง
	แผ่นหน้า	ลักษณะการ	แผ่นหลัง	ลักษณะการ	
	ความหนา (mm)	เสียหาย	ความหนา (mm)	เสียหาย	
	WC (6)	ทะลุ	-	-	รูปที่ 4.27 (ก)
	WC (8)	ทะลุ	-	-	รูปที่ 4.27 (ข)
	WC (10)	ทะลุ	-	-	รูปที่ 4.27 (ค)



(ก) แผ่นเกราะหนา 6 มิลลิเมตร

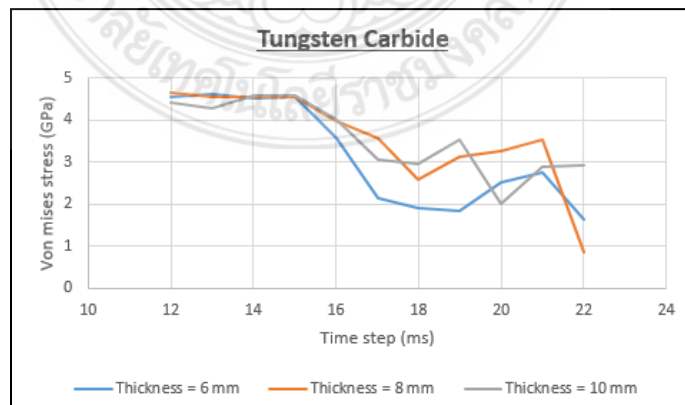


(ข) แผ่นเกราะหนา 8 มิลลิเมตร



(ค) แผ่นเกราะหนา 10 มิลลิเมตร

รูปที่ 4.27 ที่ time step 13 ms (ก, ข, ค) ซ้าย-การเจาะทะลุของกระสุนเมื่อกระแทกกับแผ่นเกราะ
 กลาง-เศษกระสุนเมื่อทะลุผ่านแผ่นเกราะ
 ขวา-การกระจายตัวของความเค้นที่เกิดเมื่อกระสุนทะลุผ่านแผ่นเกราะ



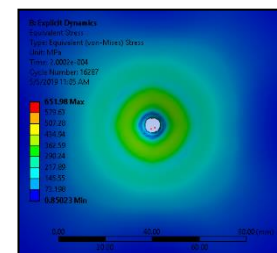
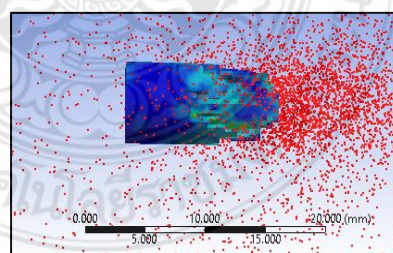
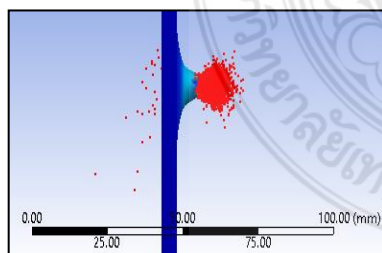
รูปที่ 4.28 กราฟความเค้นเทียบ time step ของ WC ความหนา 6 8 และ 10 มิลลิเมตร

เมื่อเปรียบเทียบความเค้นที่เกิดจากรูปที่ 4.28 จากการกระแทกทั้ง 3 แผ่น พบว่าแผ่นเกราะที่ความหนา 6 มิลลิเมตร ช่วง time step 16-20 ms สามารถช่วยลดและกระจายความเค้นที่เกิดขึ้นจากการเจาะทะลุได้มากกว่าเนื่องจากแผ่นเกราะมีการยุบตัวได้มากกว่าความหนา 8 และ 10 มิลลิเมตร และที่ความหนา 8 และ 10 มิลลิเมตร นั้นเมื่อกระสุนทะลุผ่านแผ่นเกราะพบว่าความเค้นที่เกิดขึ้นกระจายตัวรอบ ๆ รอยเจาะทะลุน้อยกว่าความหนา 6 มิลลิเมตร เนื่องจากมีความหนาที่เพิ่มขึ้นทำให้การยุบตัวของแผ่นเกราะลดลง

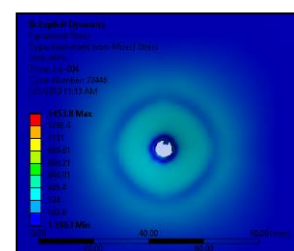
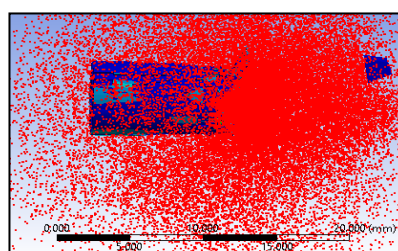
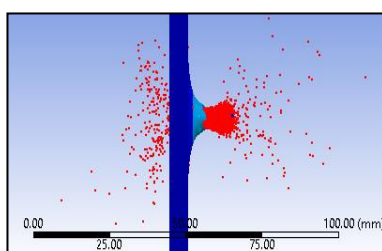
แผ่นที่ 2 เป็นวัสดุ SUS304 ที่ความหนา 5 6 8 และ 10 มิลลิเมตร ซึ่งผลที่ได้นั้นแผ่นเกราะไม่สามารถต้านทานการเจาะทะลุได้เหมือนกันกับวัสดุ Tungsten carbide ตามตารางที่ 4.6 ที่ความหนา 5 และ 6 มิลลิเมตร พบว่ากระสุนทะลุออกไปมีเศษลำตัวกระสุนที่แตกเสียหายทะลุออกไปด้วย แต่ที่ความหนา 8 และ 10 มิลลิเมตร พบว่ากระสุนทะลุแผ่นเกราะออกไปเป็นกลุ่มเศษโลหะกระสุนตามรูปที่ 4.29 พร้อมกับจะเห็นลักษณะรอยทะลุของแผ่นเกราะด้านหลัง ตามรูปที่ 4.30

ตารางที่ 4.6 ผลความเสียหายและความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุที่มุมปะทะ 0 องศา วัสดุ SUS304

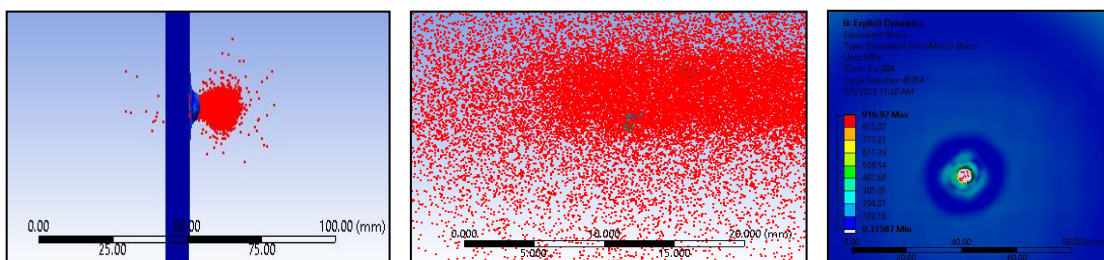
มุมปะทะ	วัสดุ				รูปที่แสดง
	แผ่นหน้า ความหนา (mm)	ลักษณะการ เสียหาย	แผ่นหลัง ความหนา (mm)	ลักษณะการ เสียหาย	
0 (องศา)	SUS304 (5)	ทะลุ	-	-	รูปที่ 4.29 (ก)
	SUS304 (6)	ทะลุ	-	-	รูปที่ 4.29 (ข)
	SUS304 (8)	ทะลุ	-	-	รูปที่ 4.29 (ค)
	SUS304 (10)	ทะลุ	-	-	รูปที่ 4.29 (ง)



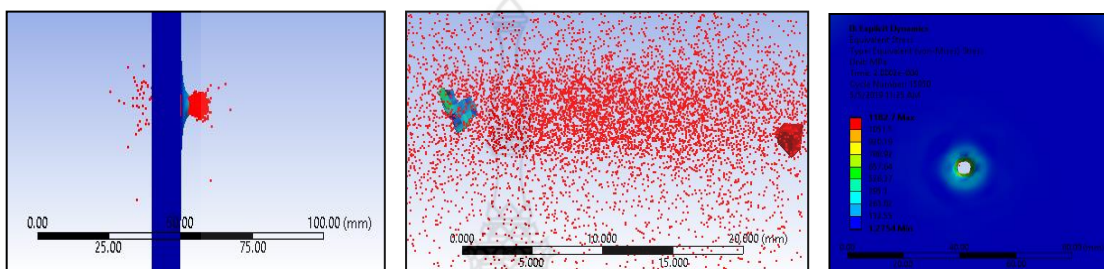
(ก) ความหนา 5 มิลลิเมตร



(ข) ความหนา 6 มิลลิเมตร

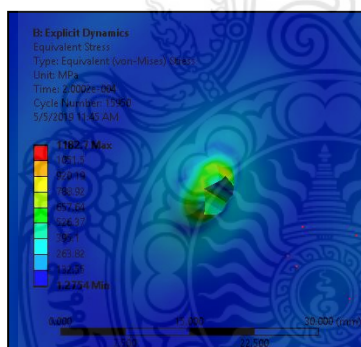


(ค) ความหนา 8 มิลลิเมตร

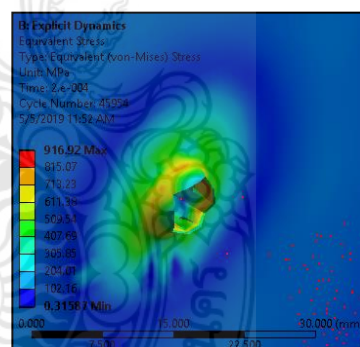


(ง) ความหนา 10 มิลลิเมตร

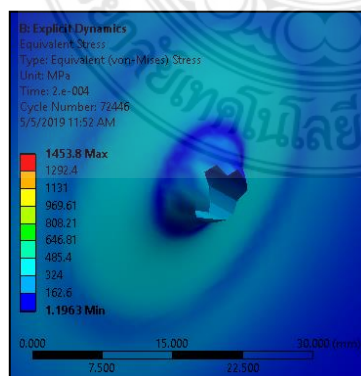
รูปที่ 4.29 ที่ time step 20 ms (ก,ข,ค,ง) ซ้ำย-การเจาะทะลุของกระสุนเมื่อกระแทกกับแผ่นเกราะกลาง-เศษกระสุนเมื่อทะลุผ่านแผ่นเกราะ ขว-การกระจายตัวของความเค้นที่เกิดเมื่อกระสุนทะลุผ่านแผ่นเกราะ



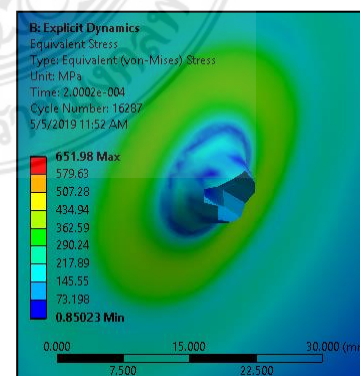
(ก) ความหนา 10 มิลลิเมตร



(ข) ความหนา 8 มิลลิเมตร



(ค) ความหนา 6 มิลลิเมตร



(ง) ความหนา 5 มิลลิเมตร

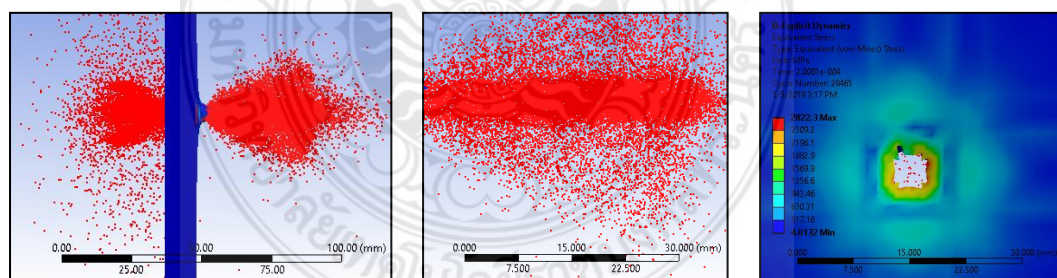
รูปที่ 4.30 ความหนา 10 8 6 และ 5 มิลลิเมตร ลักษณะรอยทะลุของแผ่นเกราะด้านหลัง (time step 20 ms)

ดังนั้นจึงได้นำแผ่นเกราะกันกระสุนมาซ้อนกันเป็น 2 ชั้น โดยแผ่นวัสดุที่ 1 เป็น Tungsten carbide แผ่นวัสดุแผ่นที่ 2 เป็น วัสดุสแตนเลส SUS304 โดยแบ่งออกเป็น 4 รูปแบบในการจำลอง ซึ่งการจำลองในรูปแบบที่ 1 แผ่นวัสดุที่ 1 กำหนดให้มีความหนา 6 มิลลิเมตร แผ่นวัสดุที่ 2 กำหนดให้มีความหนา 5 มิลลิเมตร การจำลองรูปแบบที่ 2 3 และ 4 กำหนดให้แผ่นวัสดุที่ 1 และ 2 มีขนาดความหนาของแผ่นเกราะเท่ากันคือ 6 8 และ 10 มิลลิเมตร

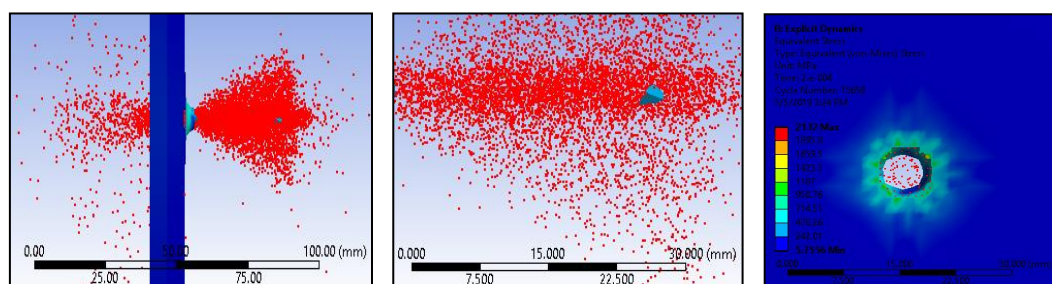
ตารางที่ 4.7 ผลความเสียหายและความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุที่มุมปะทะ 0 องศา วัสดุ ทังสเทนคาร์ไบด์ (WC) กับ สแตนเลส SUS304

มุมปะทะ 0 (องศา)	วัสดุ				รูปที่แสดง
	แผ่นหน้า ความหนา (mm)	ลักษณะการ เสียหาย	แผ่นหลัง ความหนา (mm)	ลักษณะการ เสียหาย	
(องศา)	WC (6)	ทะลุ	SUS304 (5)	ทะลุ	รูปที่ 4.31 (ก)
	WC (6)	ทะลุ	SUS304 (6)	ทะลุ	รูปที่ 4.31 (ข)
	WC (8)	ทะลุ	SUS304 (8)	ทะลุ	รูปที่ 4.31 (ค)
	WC (10)	ทะลุ	SUS304 (10)	ทะลุ	รูปที่ 4.31 (ง)

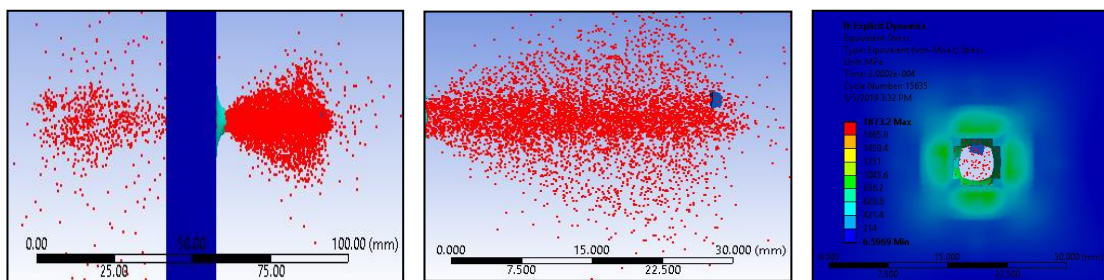
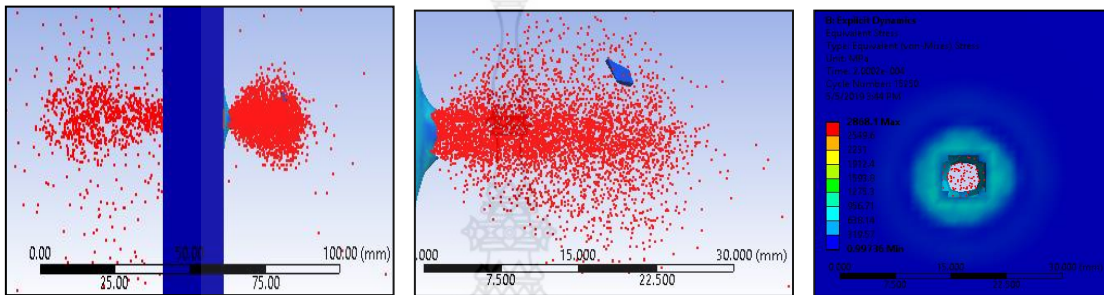
ผลที่ได้จากการจำลองทั้ง 4 รูปแบบนั้นแผ่นเกราะกันกระสุนไม่สามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนขนาด 7.62 มิลลิเมตร ตามตารางที่ 4.7 แต่กระสุนเกิดการแตกเสียหายเมื่อกระแทกเข้ากับแผ่นเกราะแล้วทะลุออกไปเป็นกลุ่มเศษโลหะที่แตกต่างกันตามรูปที่ 4.31



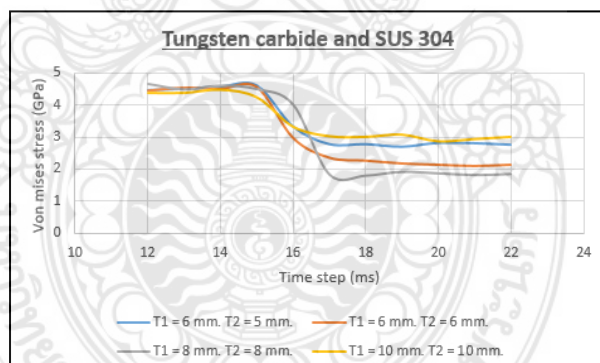
(ก) การจำลองที่ 1 $T_1 = 6$ มิลลิเมตร $T_2 = 5$ มิลลิเมตร



(ข) การจำลองที่ 2 $T_1 = 6$ มิลลิเมตร $T_2 = 6$ มิลลิเมตร

(ค) การจำลองที่ 3 $T_1 = 8$ มิลลิเมตร $T_2 = 8$ มิลลิเมตร(ง) การจำลองที่ 4 $T_1 = 10$ มิลลิเมตร $T_2 = 10$ มิลลิเมตร

รูปที่ 4.31 ที่ time step 20 ms (ก,ข,ค,ง) ซ้าย-การเจาะทะลุของกระสุนเมื่อกระทบกับแผ่นเกราะ
กลาง-เศษกระสุนเมื่อทะลุผ่านแผ่นเกราะ
ขวา-การกระจายตัวของความเค้นที่เกิดเมื่อกระสุนทะลุผ่านแผ่นเกราะ

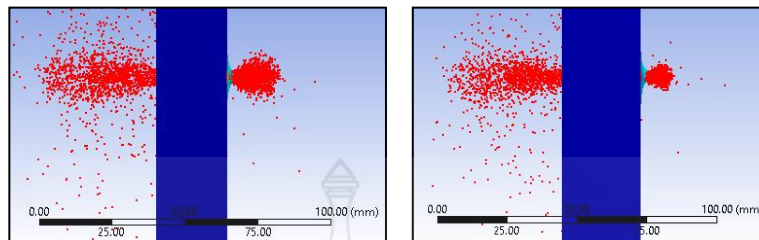


รูปที่ 4.32 กราฟความเค้นเทียบ time step ของ WC และ SUS 304

จากกราฟรูปที่ 4.32 time step 15 – 20 ms แสดงให้เห็นว่าการจำลองที่ 3 แผ่นที่ 1 หนา 8 มิลลิเมตร แผ่นที่ 2 หนา 8 มิลลิเมตร สามารถลดความเค้นที่เกิดขึ้นจากการเจาะทะลุของกระสุนได้มากกว่าการจำลองที่ 1 2 และ 4 และเมื่อแผ่นเกราะมีความหนาเพิ่มขึ้นทำให้กลุ่มเศษโลหะที่ทะลุออกไปมีขนาดเล็กลงซึ่งแสดงให้เห็นว่าถ้าให้ความหนาเพิ่มขึ้นเท่า ๆ กันทั้ง 2 แผ่นจนแผ่นเกราะสามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนขนาด 7.62 มิลลิเมตร ได้

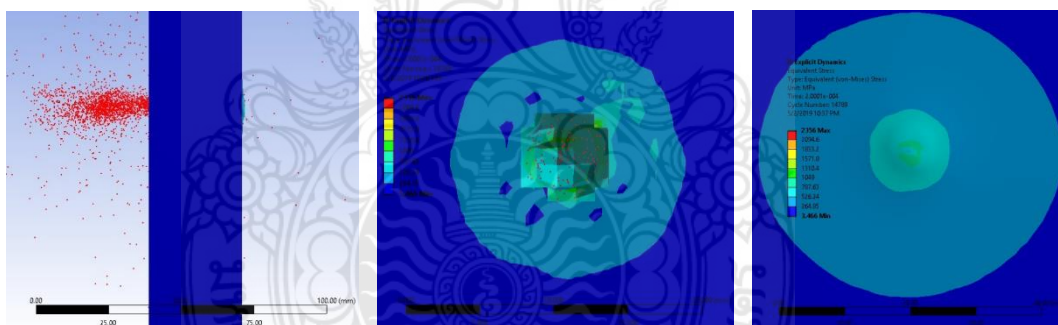
ดังนั้นจึงได้เพิ่มความหนาของแผ่นเกราะทั้ง 2 วัสดุโดยให้มีขนาดเท่ากันเริ่มที่ 12 มิลลิเมตร ขึ้นไปจนแผ่นเกราะสามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนขนาด 7.62 มิลลิเมตร [46] ที่ความหนา

12 มิลลิเมตร และ 14 มิลลิเมตร แผ่นเกราะยังไม่สามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนได้แต่กลุ่มเศษโลหะที่ทะลุออกไปเริ่มเล็กลงตามความหนาที่เพิ่มขึ้นตามรูปที่ 4.33

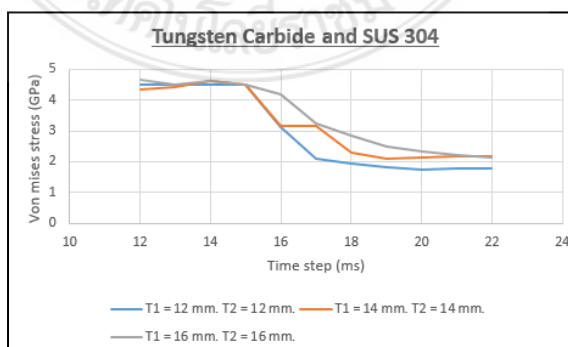


รูปที่ 4.33 ที่ time step 20 ms ซ้าย-ความหนา $T_1 = 12$ มิลลิเมตร $T_2 = 12$ มิลลิเมตร
ขวา-ความหนา $T_1 = 14$ มิลลิเมตร $T_2 = 14$ มิลลิเมตร

และความหนาที่สามารถเริ่มต้านทานการเจาะทะลุได้ที่แผ่นที่ 1 หนา 16 มิลลิเมตร แผ่นที่ 2 หนา 16 มิลลิเมตร ตามรูปที่ 4.34 และรูปที่ 4.35 กราฟแสดงให้เห็นว่าที่ความหนาทั้ง 2 แผ่นเท่ากับ 16 มิลลิเมตร มีความเค้นเกิดขึ้นที่แผ่นเกราะมากกว่าความหนา 12 และ 14 มิลลิเมตร เนื่องจากแผ่นเกราะสามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุน 7.62 มิลลิเมตรได้ จึงมีความเค้นสะสมมากที่แผ่นเกราะ

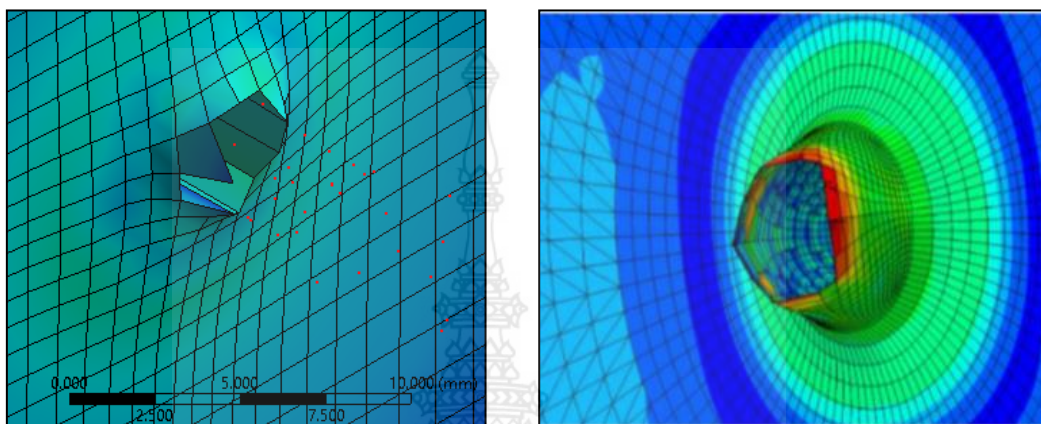


รูปที่ 4.34 ที่ time step 20 ms แผ่นเกราะเริ่มสามารถต้านทานการเจาะทะลุได้ที่ความหนาทั้ง 2 แผ่นเท่ากับ 16 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.35 กราฟความเค้นเทียบ time step ของ WC และ SUS 304

จึงได้เปรียบเทียบแผ่นเกราะที่ความหนา 12 มิลลิเมตร กับ M.A. Iqbal [45] ลักษณะการเจาะทะลุที่บริเวณด้านหลังของแผ่นเกราะมีขนาดรูที่เล็กกว่าบริเวณด้านหน้าเป็นการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใกล้เคียงกับการทดลองจริงตามรูปที่ 4.36 ดังนั้นผลการจำลองสามารถนำไปใช้วิเคราะห์แผ่นเกราะก่อนสร้างแผ่นเกราะจริงได้



รูปที่ 4.36 ซ้าย-ความหนา 12 มิลลิเมตร แผ่นเกราะ 2 ชั้น WC และ SUS 304
ขวา-ความหนา 12 มิลลิเมตร ของ mild steel M.A. Iqbal [45]



บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

จากการวิเคราะห์หุ้มเอียงและความหนาของแผ่นเกราะที่มีผลกระทบต่อการต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนบนแผ่นเกราะอลูมิเนียม สแตนเลส และทังสเตนคาร์ไบด์ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์หุ้มเอียงและความหนาของแผ่นเกราะที่มีผลกระทบต่อแผ่นเกราะกันกระสุน มาตรฐาน NIJ ระดับ 3 และเพื่อวิเคราะห์รูปแบบความเสียหายและความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุของแผ่นเกราะอลูมิเนียม AL7075 สแตนเลส SUS304 และทังสเตนคาร์ไบด์ ตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยแบ่งกรณีศึกษาเป็น 3 มุมกระทบ คือ 0 องศา 30 องศา และ 45 องศา ซึ่งทั้ง 3 มุมกระทบนี้ทำการจำลองวัสดุชนิดเดียว และวัสดุ 2 ชนิด ซ้อนกันโดยไม่มีช่องว่างระหว่างแผ่น ซึ่งมีความหนาที่แตกต่างกัน จากการดำเนินงานได้ใช้วิธีการระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับผลการทดสอบเปรียบเทียบกัน เพื่อใช้ในการยืนยันแนวคิดและทฤษฎีที่ใช้กับการจำลองนี้ โดยมีเนื้อหาที่สรุปและอภิปรายผลได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 จากการศึกษาศึกษาและการทบทวนวรรณกรรมพบว่าวิธีการที่ใช้ในการจำลองโดยใช้การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นการจำลองที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งการจำลองได้ใช้โปรแกรม Ansys/Explicit Dynamics โดยกำหนดการเคลื่อนที่ของวัตถุด้วยความเร็วสูงที่มากกว่า 500 m/s และการจำลองนี้ทำการกำหนดรูปแบบความเสียหายของแผ่นเกราะกันกระสุนโดยใช้ทฤษฎีความเสียหายของ Johnson Cook Strength Model (JC), Johnson-Holmquist Strength Model (JH-2) และ Steinberg Guinan Strength Model

5.1.2 จากการวิเคราะห์หุ้มเอียงและความหนาของแผ่นเกราะที่มีผลกระทบต่อการต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนบนแผ่นเกราะอลูมิเนียมและสแตนเลสด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และผลการทดสอบจริงพบว่ามี ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับแผ่นเกราะกันกระสุนมีความสอดคล้องกัน ซึ่งเป็นการบ่งบอกว่าโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการจำลองความเสียหายของแผ่นเกราะกันกระสุนสามารถเชื่อถือได้ ดังนั้นจึงสามารถใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ จำลองความเสียหายของแผ่นเกราะกันกระสุนที่สามารถต้านทานการเจาะทะลุของกันกระสุนตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 ได้

5.1.3 ตั้งค่ารูปแบบการจำลองตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 ความเร็วกระสุนที่ 838 m/s โดยไม่คิดแรงเสียดทานอากาศและการซ้อนแผ่นเกราะสองชั้นโดยไม่มีช่องว่างระหว่างแผ่นแบบไม่คิดแรงเสียดทานระหว่างผิว ซึ่งการสร้างรูปแบบของเมชในการจำลองนี้ใช้แบบ Hexahedral ขนาด 0.5 มิลลิเมตร ที่กระสุนเพื่อลดระยะเวลาการประมวลผลของคอมพิวเตอร์และค่าการคลาดเคลื่อน

5.1.4 ตัวแปรที่มีผลต่อการวิเคราะห์แผ่นเกราะกันกระสุนในการจำลองนี้มี 5 องค์ประกอบหลัก ดังนี้ 1) ชนิดของวัสดุที่นำมาใช้ทำเป็นแผ่นเกราะกันกระสุนและชนิดของวัสดุที่นำมาใช้ทำเป็นกระสุน 2) ความเร็วของกระสุนที่ใช้ในการจำลองต้องเป็นไปตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 3) มุมกระทบของกระสุนที่เจาะเข้ากับแผ่นเกราะกันกระสุน 4) ความหนาของแผ่นเกราะกันกระสุน 5) ขนาดของเมฆที่ใช้การในการวิเคราะห์ซึ่งบอกถึงความละเอียดจากความเสียหาย

5.1.5 ผลความเสียหายและความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุ ซึ่งการเจาะทะลุ และรูปแบบความเสียหาย โดยที่ SUS304 ที่มีความหนาตั้งแต่ 30 มิลลิเมตร ขึ้นไป มีความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุ ในขณะที่ เกราะ 2 ชั้น วัสดุหน้ามีความหนาเพียง 20 มิลลิเมตร และวัสดุเกราะแผ่นหลังที่มีความหนา เพียง 8 มิลลิเมตร หรือ วัสดุทั้งสแตนคาร์ไบด์และสแตนเลส โดยวัสดุเกราะแผ่นหน้ามีความหนาเพียง 16 มิลลิเมตร และวัสดุเกราะแผ่นหลังที่มีความหนา เพียง 16 มิลลิเมตร ก็สามารถต้านทานการทะลุของกระสุนได้แล้ว ในขณะที่เดียวกันที่มุมมองที่มากขึ้นนั้น ส่งผลให้แผ่นเกราะกันกระสุนมีความสามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนเพิ่มขึ้นไปด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการวิเคราะห์มุมเอียงและความหนาของแผ่นเกราะที่มีผลกระทบต่อการต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนบนแผ่นเกราะอลูมิเนียมและสแตนเลส ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่มุมมองกระทบแผ่นเกราะกันกระสุนคือ 0 30 และ 45 องศา และ ทั้งสแตนคาร์ไบด์ซ้อนแผ่นด้วยสแตนเลสที่มุมมองกระทบแผ่นเกราะกันกระสุน 0 องศา ซึ่งในแต่ละกรณีควรได้รับการทดสอบควบคู่ไปด้วยในทุกกรณี เพื่อเปรียบเทียบและเป็นการยืนยันความถูกต้องแม่นยำอย่างแท้จริง

เอกสารอ้างอิง

- [1] tb. (2022). Networks [Online]. Available: <https://th.crazypng.com/848.html>
- [2] สรศักดิ์ สุขงกช. (2013, Jan 06). Networks [Online]. Available: <http://tacticalthinker.blogspot.com/2013/01/blog-post.html>
- [3] Ammoandbullet. Networks [Online]. Available: <https://www.ammoandbullet.com/7-62-x-51-m80-data>
- [4] ชัยวัฒน์ ไชยมหาพฤกษ์, “แผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนด้วยวัสดุเชิงประกอบ,” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตพระนคร, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, 2561.
- [5] นवल กลางทัพ, “การวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนบนโลหะด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์,” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตพระนคร, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, 2562.
- [6] ผศ.ดร.ธงชัย พองสมุทร, วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เบื้องต้น, ห้างหุ้นส่วนจำกัด ดารารวรรณการพิมพ์, 2549.
- [7] เจาะลึกอลูมิเนียมโลหะสีขาวคล้ายกับเงินน้ำหนักเบาแต่แข็งแรง. (2016, Dec. 07). Networks [Online]. Available: <https://www.chi.co.th/article/article-858>
- [8] อลูมิเนียม (Aluminum). Networks [Online]. Available: <http://www.trinitydynamic.com/ดูบทความ-93061-อลูมิเนียม-aluminium.html>
- [9] อธิพงษ์ หาญวิโรจน์กุล, “เหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับงานทนความร้อน” ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, มกราคม - มีนาคม 2554.
- [10] Admin, สารานุกรม : การพัฒนาสื่อเกราะกันกระสุนแบบเกราะแข็ง. (2021, Apr. 13). Networks [Online]. Available: <http://treatise.16mb.com/viewtopic.php?t=9055>.
- [11] วริญดา จิรัญญาวรรณ, “การจำลองผิวหน้ารอยแตกของคอมพอสิตโดยใช้โปรแกรม ANSYS,” มหาวิทยาลัยศิลปากร, สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์, 2555.
- [12] เสน่ห์ กลิ่นขุนนาค, ปพน สมประสงค์, และ นายสัญญา คำจริง “การศึกษาอิทธิพลในการตัดเฉือนเพื่อลดครีบ โดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์,” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์, 2555.
- [13] M. Wasif, A. Mubashar, Emad Uddin, S. Waheed Ul Haqa, and M. Khanb, “An experimental and numerical investigation of the ballistic response of multi-level armour against armour piercing projectiles,” Int. J. Impact Eng., vol. 110, pp. 47–56, Dec. 2017.

- [14] B. Daniel, R. Alfredo, F.M. de Almeida, C.L. de Melo, and V. Donadon, "Ballistic impact simulation of an armour-piercing projectile on hybridceramic/fiber reinforced composite armours," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 43, pp. 63 –77, Dec. 2011
- [15] Z. Rui, H. Bin, L. Lang, Z. Zhong-Nan, Z. Qi, Z. Qian-Cheng, N. Chang-Ye, and L. Tian Jian, "Influence of prestress on ballistic performance of bi-layer ceramic compositen armors : Experiments and simulations," *Thin-Walled Struct.*, vol. 227, pp. 111–258, Jul. 2019.
- [16] Y. Rong-cheng, Y. Li-kui, W. Jian-ru, C. Zhi-gang, and H. Di-qi, "Study on the performance of ceramic composite projectile penetrating into ceramic composite target," *Def. Technol.*, vol. 13, pp. 295–299, Aug. 2017.
- [17] J. Li, L. Zhang, and F. Huang, "Experiments and Simulations of Tungsten Alloy Rods Penetrating into Alumina Ceramic/603 Armor Steel Composite Targets." *Int. J. Impact Eng.*, vol. 101, pp. 1 –8, Nov. 2016.
- [18] T. Jankowiak, A. Rusinek, and P. Wood, "A numerical analysis of the dynamic behaviour of sheet steel perforated by a conical projectile under ballistic conditions," *Finite Elem. Anat. Des.*, vol. 65, pp. 39–49, Oct. 2013.
- [19] V. Vijeesh, S. Hegdeb, and N.K. Guptab, "Deformation and ballistic performance of conical aluminum projectiles impacting thin aluminum targets: Influence of apex angle," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 110, pp. 39-46, May. 2017.
- [20] K. Senthil, M.A. Iqbal, B. Arindam, R. Mittal, and N.K. Gupta, "Ballistic resistance of 2024 aluminium plates against hemispherical, sphere and blunt nose projectiles," *Thin-Walled Struct.*, vol. 126, pp. 94–105, Mar. 2017.
- [21] M. Rodriguez, D. Garcia, A. Rusinek, F. Aed, and A. Arias, "Perforation mechanics of 2024 aluminium protective plates subjected to impact by different nose shapes of projectiles," *Thin-Walled Struct.*, vol. 123, pp. 1–10, Nov. 2017.
- [22] R. Abhishek, M.A. Iqbal, and N.K. Gupta, "Ballistic performances of concrete targets subjected to long projectile impact," *Thin-Walled Struct.*, vol. 126, pp. 171 –181, Jan. 2017.
- [23] K.M. Kpenyigba, T. Jankowiak, A. Rusinek, and R. Pesci, "Influence of projectile shape on dynamic behavior of steel sheet subjected to impact and perforation," *Thin-Walled Struct.*, vol. 65, pp. 93–104, Jan. 2013.

- [24] N.K. Gupta, M.A.Iqbal, and G.S. Sekhon, "Effect of projectile nose shape, impact velocity and target thickness on deformation behavior of aluminum plates," *Int. J. Solid. Struct.*, vol. 44, pp. 3411–3439, May. 2007.
- [25] W.M. Gao, L. Wang, J.K. Coffey, and F. Daver, "Finite element simulation of scratch on polypropylene panels," *Mater. Des.*, vol. 140, pp. 400–408, Feb. 2018.
- [26] ทศน์ชัย ผองผาย, ทวีภัทร์ บุรณฉิติ, "การจำลองสถานการณ์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของการกระแทกจากกระสุนปืน: กรณีศึกษา กระสุน 9 มม. Parabellum กับ AISI1008, AA1100 และ AA5083," มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ, 2551.
- [27] B. Tore, O. Lars, D. Sumita, and L. Magnus, "Normal and oblique impact of small arms bullets on AA6082-T4 aluminium protective plates," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 38, pp. 557 –589, Mar. 2011.
- [28] Z. Xuhong, L. Jingchao, H. Yongjun, H. Ziqi, and L. Zhanjie, "Finite element analysis of thermal residual stresses in castellated beams," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 148, pp. 741–755, Sep. 2018.
- [29] M.A.Iqbala, R. Abhishek, and N.K.Guptab, "Performance of prestressed concrete targets against projectile impact," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 110, pp. 15-25, Nov. 2016.
- [30] [F. Adnan, and Kevin S. Fancey, "UHMWPE fibre-based composites: Prestress-induced enhancement of impact properties," *Compos. Part B Eng.*, vol. 66, pp. 1-6, Apr. 2014.
- [31] ธรรม์ณชาติ วันแต่ง, "การเพิ่มประสิทธิภาพความแข็งแรงของแผ่นเหล็กในเสื้อเกราะกันกระสุนโดยทำการเคลือบผิวฟิล์มแข็ง," มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์, คณะเทคโนโลยีการเกษตร, สาขาวิชาเทคโนโลยีการเกษตร, 2552.
- [32] H. Xianglin, Z. Wei, D. Yunfei, and J. Xiongwen, "Experimental investigation on the ballistic resistance of polymer-aluminum laminated plates," *Int. J. Impact Eng.*, vol.113, pp.212-221, Dec.2017.
- [33] G. Yubo, Z. Wei, X. Peng, C. Xuanming, and F. Zhiqiang, "Influence of epoxy adhesive layer on impact performance of TiB2-B4C composites armor backed by aluminum plate," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 122, pp. 60-72, Jul. 2018.
- [34] L. Weilan, C. Zhaohai, C. Zhaofeng, C. Xingwang, W. Yangwei, C. Xianhui, L. Jingyi, L. Binbin, and W. Shaogang, "Influence of different back laminate layers on

- ballistic performance of ceramic composite armor,” *Mater. Des.*, vol. 87, pp. 421-427, Aug. 2015.
- [35] P. Zhang, K. Xu, M. Li, Z. Gong, G. Song, Q. Wu, Y. Cao, D. Tian, and Z. Yu “Study of the shielding performance of a Whipple shield enhanced by Ti-Alnylon impedance-graded materials,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 124, pp. 23–30, Aug. 2018.
- [36] S. Ahmad, G. Govind, Z. Xianfeng, I. Sridhar, and G.E.B. Tan, “On improving ballistic limit of bi-layer ceramic–metal armor,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 105, pp. 54-67, Sep. 2016.
- [37] W. Xue-zhong, H. Jie, L. Yi , C. Ping, J. Lin, L. Yao, and L. Sen, “Preliminary study on shielding performance of wood stuffed shield,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 91, pp. 94–101, Dec. 2016.
- [38] E.A. Flores-Johnson, M.Saleh, and L. Edwards, “Ballistic performance of multi-layered metallic plates impacted by a 7.62-mm APM2 projectile,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 38, pp. 1022–1032, Dec. 2011.
- [39] K. Namık, and E. Bülent, “Ballistic resistance of high hardness armor steels against 7.62 mm armor piercing ammunition,” *Mater. Des.*, vol. 44, pp. 35–48, Jul. 2012.
- [40] B. Giovanni Di, M. Paolo, and S. Giorgio, “Impact behavior and ballistic efficiency of armor-piercing projectiles with tool steel cores,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 115, pp. 10 –18, Jan. 2018.
- [41] F. M. John, T. Jan Arild, S. Stian, B. Svien Morten, S.-E. Lasse, and F. Haakon, “Development of material models for semi-brittle materials like tungsten carbide,” *Norwegian Defence Research Establishment (EFI)*, pp. 1–51, 09-Nov-2010.
- [42] B. Banerjee, “An evaluation of plastic flow stress models for the simulation of high-temperature and high-strain-rate deformation of metals,” p. 53, Dec. 2005.
- [43] “Steinberg-Guinan Strength.” [Online]. Available: https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/enus/help/wb_sim/ds_ex_mat_steingui.html. [Accessed: 01-May-2019].
- [44] D. Bürger, A. Rocha de Faria, S. F. M. de Almeida, F. C. L. de Melo, and M. V. Donadon, “Ballistic impact simulation of an armour-piercing projectile on hybrid ceramic/fiber reinforced composite armours,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 43, pp. 63–77, May 2012.

- [45] M. A. Iqbal, K. Senthil, P. Bhargava, and N. K. Gupta, "The characterization and ballistic evaluation of mild steel," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 78, pp. 98–113, Apr. 2015.
- [46] P. Tan, "Numerical simulation of the ballistic protection performance of a laminated armor system with pre-existing debonding/delamination," *Compos. Part B Eng.*, vol. 59, pp. 50–59, Mar. 2014.
- [47] Power tungsten. (2016, Nov. 04). Networks [Online]. Available: <http://www.power-tungsten.com/Article-showdetail-26022-87240-.html>



ไม่มีเนื้อหาจากต้นฉบับ



ประวัติการศึกษาและการทำงาน



ชื่อ นามสกุล ว่าที่ร้อยโท ไมตรี ถาวรสิน
 วัน เดือน ปีเกิด 23 เมษายน 2530
 ภูมิลำเนา 101 หมู่ที่ 4 ตำบลนาดี อำเภอนาดี จังหวัดปราจีนบุรี 25220

ประวัติการศึกษา

วุฒิการศึกษา	สถานศึกษา	ปีที่สำเร็จการศึกษา
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ	โรงเรียนพระรามหกเทคโนโลยี	2549
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2551
ปริญญาตรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2553

ประวัติการทำงาน

2564-ปัจจุบัน	Mechanics team TANN RACING CONNECT 85/4 ตำบลบางกร่าง อำเภอเมืองนนทบุรี จังหวัดนนทบุรี 11000
2561-2564	ครู ประจำแผนกวิชาช่างยนต์ วิทยาลัยการอาชีพท่าแซะ 245/1 หมู่ 4 ถนนเพชรเกษม อำเภอท่าแซะ จังหวัดชุมพร 86140
2555-2561	ครู ประจำแผนกวิชาช่างยนต์ สถาบันเทคโนโลยีจิตรลดา อาคาร 60 พรรษาราชสุดาสมภพ (604) สำนักพระราชวัง สนามเสือป่า ถนนศรีอยุธยา แขวงดุสิต เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร 10300
2553-2555	ครู ประจำแผนกวิชาช่างยนต์ วิทยาลัยเทคโนโลยีรัตนโกสินทร์ 95, 151 ซอยแจ้งวัฒนะ 3 แขวงตลาดบางเขน เขตหลักสี่ กรุงเทพมหานคร 10210