



การวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการต้านทานของการเจาะ
ทะลุของกระสุนบนผิวเกราะอะลูมิเนียมด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
Parameter Analysis that Affects the Ability to Resist Penetration of Metal-Based
Ammunition Aluminum armor using Finite Element Method

นายอนุชา สายเจริญ
Mr.Anucha Saicharoen

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ปีการศึกษา 2564



การวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการต้านทานของการเจาะ
ทะลุของกระสุนบนผิวเกราะอะลูมิเนียมด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
Parameter Analysis that Affects the Ability to Resist Penetration of Metal-Based
Ammunition Aluminum armor using Finite Element Method

นายอนุชา สายเจริญ
Mr.Anucha Saicharoen

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ชื่อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการต้านทาน
ของการเจาะทะลุของกระสุนบนผิวเกราะอะลูมิเนียมด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์
เอลิเมนต์

ชื่อ นามสกุล นายอนุชา สายเจริญ

ชื่อปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)


สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

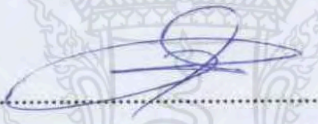
คณะ วิศวกรรมศาสตร์

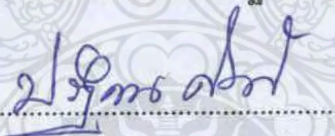
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ประกอบชาติภักต์

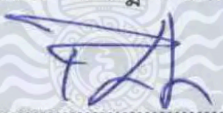
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฏิภาณ ถิ่นพระบาท

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้ให้ความเห็นชอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แล้ว

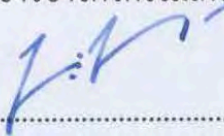

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำนาจ)


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


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


..... กรรมการ
(ดร.ประกอบ ชาติภักต์)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร


..... รักษาการแทนคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ พันธุ์นะ)

วันที่ 19 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2564

ชื่อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการต้านทานของการเจาะทะลุของกระสุนบนผิวเกราะอะลูมิเนียมด้วยระเบิดวิถีไฟไนต์เอลิเมนต์
ชื่อ สกุล	นายอนุชา สายเจริญ
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
สาขาวิชา และคณะ	วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา	2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการต้านทานของการเจาะทะลุของกระสุนบนผิวเกราะด้วยระเบิดวิถีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการวิจัยนี้จะเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างการทดสอบยิงเกราะกันกระสุนจริงกับการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ การสร้างรูปแบบของเกราะกันกระสุนและกระสุนใช้โปรแกรม SolidWorks ในการสร้างและการจำลองของรูปแบบการยิงเกราะนั้นใช้โปรแกรม ANSYS Explicit Dynamic ซึ่งการทดสอบของความเสียหายนั้นใช้ มาตรฐาน National Institute of Justice (NIJ) ระดับ 3 ด้วยกระสุน วัสดุของกระสุนคือทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC) ขนาด 7.62 mm วัสดุเกราะกันกระสุนที่ใช้จากการจำลองนี้มี 2 ชนิดคือ 1) SKD11 2) อะลูมิเนียม AL7075 โดยการจำลองจะแบ่งออกเป็นจำลองแผ่นเกราะแบบซ้อน ขนาดของแผ่นเกราะนั้นมีขนาด 6, 8, และ 10 mm โดยมุมมองของการยิงเกราะกันกระสุนนั้นมีมุม 0, 30, และ 45 องศา ผลจากการจำลองนี้ขนาดความหนาของเกราะและมุมการยิงเป็นปัจจัยของการต้านทานเจาะทะลุ

คำสำคัญ : เกราะกันกระสุน, พารามิเตอร์, ระเบิดวิถีไฟไนต์เอลิเมนต์

Thesis title	Parameter Analysis that Affects the Ability to Resist Penetration of Metal-Based Ammunition Aluminum armor using Finite Element Method
Author	Mr.Anucha Saicharoen
Degree	Master of Engineering (Mechanical Engineering)
Major program	Mechanical Engineering, Faculty of Engineering
Academic Year	2021

ABSTRACT

This research analyzes the parameters affecting the penetrating resistance of shells on the armor surface by the finite element method. In this study, the results were compared with real bulletproof armor firing tests and finite element simulations. modeling of bulletproof and bulletproof armor using Solid Works program. Creating and simulating armor firing pattern using ANSYS Explicit Dynamic program. damage test is based on National Institute of Justice (NIJ) level 3 standards with bullets the material of the ammunition is 7.62 mm tungsten carbide (WC). there are two types of bulletproof armor used in this simulation 1) SKD11 2) Aluminum AL7075. The simulations is into 1 category Simulation of stacked armor plates. The sizes of the armor plates are 6, 8, and 10 mm, and the angles of firing of bulletproof armor are 0, 30 and 45 degrees. result of this simulation, armor thickness and firing angle are factors of penetration resistance.

Keywords : Bulletproof armor, Parameter, Finite Element Method

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดีจากความอนุเคราะห์ ความกรุณาเมตตาและความช่วยเหลือในทุกด้านจาก ดร.ประกอบ ชาตฤกษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร. ปฏิภาณ ถิ่นพระบาท อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ซึ่งเป็นกรรมการคุมสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งกรุณามอบความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ การแก้ปัญหาต่าง ๆ ตลอดจนตรวจสอบวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงยิ่งไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำนาจ ผู้ซึ่งกรุณาเป็นประธาน กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ วิโรจน์ชีวิน ที่ให้ความอนุเคราะห์ เป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งทั้งสองท่านให้ความรู้และการถ่ายทอดประสบการณ์ ตลอดจนตรวจสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำ ความรู้และความแนวความคิดในด้านต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อผู้เขียนอย่างมาก

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ คุณครูทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ อบรมสั่งสอน แนะนำตักเตือนผู้เขียนจนมีวันนี้

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร รวมถึงเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัยครั้งนี้ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา สมาชิกในครอบครัว ที่คอยให้การส่งเสริม สนับสนุนด้านทุนทรัพย์และกำลังใจเป็นแรงผลักดันผู้เขียนทั้งในด้านการเรียน การดำเนินชีวิตมาโดยตลอด

ท้ายที่สุด ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้คงจะมีประโยชน์สำหรับผู้อ่านไม่มากนัก
น้อยต่อไป

อนุชา สายเจริญ

สารบัญ

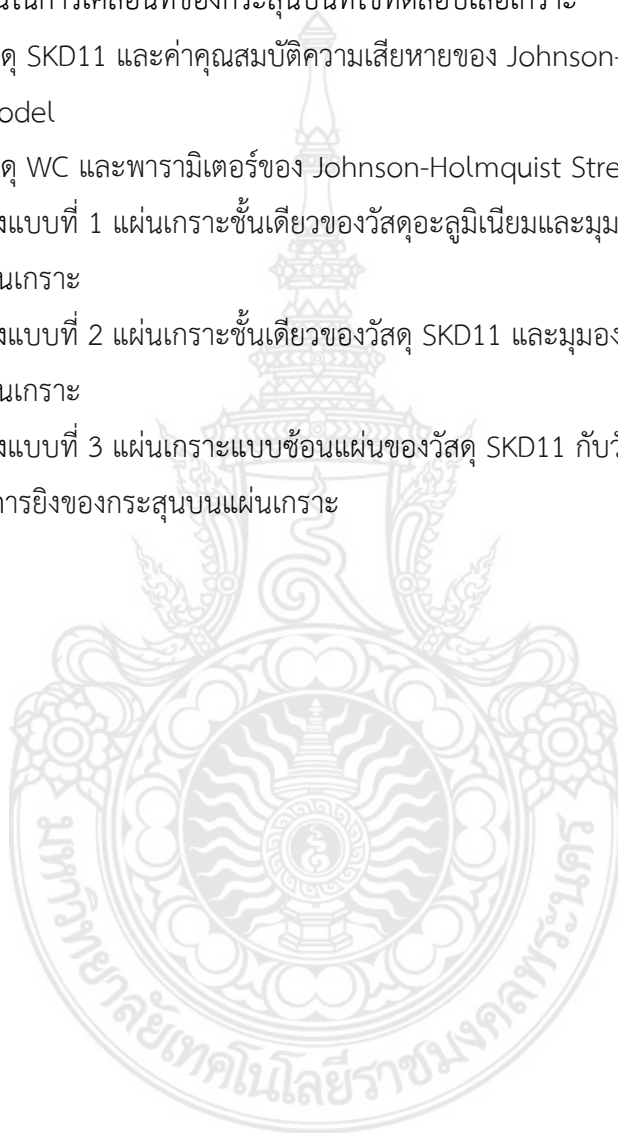
	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	๗
1. บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
2. ทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรม	
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1.1 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	4
2.1.2 แผ่นเกราะโลหะ	11
2.1.3 มาตรฐานการทดสอบแผ่นเกราะกันกระสุน	13
2.1.4 Program ANSYS software	14
2.1.5 การใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Software)	15
2.1.6 พฤติกรรมของวัสดุ	16
2.2 กรอบการวิจัย	23
2.3 ระเบียบวิธีวิจัย	23
2.4 การทบทวนวรรณกรรม	24
3. การดำเนินงานวิจัย	
3.1 วิธีดำเนินการวิจัย	45
3.2 วิธีการออกแบบจำลองด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์	47
3.2.1 การออกแบบแผ่นเกราะกันกระสุนและลูกกระสุน	47
3.2.2 การกำหนดคุณสมบัติตั้งค่าของการจำลองด้วย Program ANSYS	48
3.2.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Solve-processing)	58

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4. ผลการดำเนินงานและวิเคราะห์	
4.1 ผลการเปรียบเทียบของผลการจำลองและการทดลองจริงเพื่อแสดงความน่าเชื่อถือของโปรแกรม ANSYS	64
4.2 ผลการจำลองแผ่นเกราะกันกระสุนที่สามารถต้านทานการเจาะทะลุตามมาตรฐาน NIJ 3 ด้วยโปรแกรมไฟไนเอลิเมนต์	68
4.3 ผลการจำลองแผ่นเกราะกันกระสุนจาก Aluminum แบบจำลองที่ 1	69
4.3.1 การทดลองมุมกระแทกที่ 0 องศา ความหนาที่ 6, 8 และ 10 mm	69
4.3.2 การทดลองมุมกระแทกที่ 15 องศา ความหนาที่ 6, 8 และ 10 mm	71
4.3.3 การทดลองมุมกระแทกที่ 30 องศา ความหนาที่ 6, 8 และ 10 mm	72
4.3.4 การทดลองมุมกระแทกที่ 45 องศา ความหนาที่ 6, 8 และ 10 mm	74
4.4 ผลการจำลองแผ่นเกราะกันกระสุนจาก SKD11 แบบจำลองที่ 2	76
4.4.1 การทดลองมุมกระแทกที่ 0 องศา ความหนาที่ 6, 8 และ 10 mm	76
4.4.2 การทดลองมุมกระแทกที่ 15 องศา ความหนาที่ 6, 8 และ 10 mm	78
4.4.3 การทดลองมุมกระแทกที่ 30 องศา ความหนาที่ 6, 8 และ 10 mm	80
4.4.4 การทดลองมุมกระแทกที่ 45 องศา ความหนาที่ 6, 8 และ 10 mm	82
4.5 ผลการจำลองแผ่นเกราะกันกระสุนแบบแผ่นซ้อนจาก SKD11 และอะลูมิเนียมจำลองที่ 3	83
4.5.1 การทดลองมุมกระแทกที่ 0 องศาความหนาแผ่นซ้อน 6, 8 และ 10 mm	83
4.5.2 การทดลองมุมกระแทกที่ 15 องศาความหนาแผ่นซ้อน 6, 8 และ 10 mm	86
4.5.3 การทดลองมุมกระแทกที่ 30 องศาความหนาแผ่นซ้อน 6, 8 และ 10 mm	88
4.5.4 การทดลองมุมกระแทกที่ 45 องศาความหนาแผ่นซ้อน 6, 8 และ 10 mm	91
5.อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ	
5.1 การอภิปรายผล	93
5.2 ข้อเสนอแนะ	94
บรรณานุกรม	95
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ใบรับรองการทดลองยิงแผ่นเกราะตามมาตรฐาน NIJ	101
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	105

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 มาตรฐาน NIJ (National Institute of Justice)	13
2.2 แสดงผลงานในการเคลื่อนที่ของกระสุนปืนที่ใช้ทดสอบเสื้อเกราะ	14
3.1 สมบัติของวัสดุ SKD11 และค่าคุณสมบัติความเสียหายของ Johnson-Cook Strength Model	49
3.2 สมบัติของวัสดุ WC และพารามิเตอร์ของ Johnson-Holmquist Strength	50
4.1 ผลการจำลองแบบที่ 1 แผ่นเกราะชั้นเดียวของวัสดุอะลูมิเนียมและมุมมองศากการยิงของกระสุนบนแผ่นเกราะ	68
4.2 ผลการจำลองแบบที่ 2 แผ่นเกราะชั้นเดียวของวัสดุ SKD11 และมุมมองศากการยิงของกระสุนบนแผ่นเกราะ	68
4.3 ผลการจำลองแบบที่ 3 แผ่นเกราะแบบซ้อนแผ่นของวัสดุ SKD11 กับวัสดุอะลูมิเนียมและมุมมองศากการยิงของกระสุนบนแผ่นเกราะ	68



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ลักษณะสี่เหลี่ยมกระสุน	2
2.1 ลักษณะความเค้นใน 3 มิติ	5
2.2 เอลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า	7
2.3 การผลิตอลูมิเนียม	12
2.4 กรอบงานวิจัย	23
2.5 ความเสียหายของ WC ความหนา 10mm มุมเอียง 15 องศา	24
2.6 ความเสียหายของการยิงเจาะทะลุแผ่นลามิเนตโพลีเมอร์และอะลูมิเนียม	25
2.7 การทดสอบการเจาะทะลุของคอนกรีต	26
2.8 การออกแบบมุมของหัวกระสุนของโพรเจกไทล์อลูมิเนียมทรงกรวย	27
2.9 การทดสอบคอมโพสิตที่ใช้เส้นใย UHMWPE	28
2.10 กราฟการจำลองการต่อต้านการเจาะทะลุของเกราะกันกระสุน	29
2.11 การจำลองทดสอบการยิงเกราะกันกระสุนโลหะ	29
2.12 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการจำลอง	30
2.13 การทดสอบการยิงของกระสุน 7.62 mm	31
2.14 รายละเอียดตาข่ายของฐานและแผ่นเกราะเจาะรู	32
2.15 แบบจำลองตาข่าย FE ของ (a) แผ่นเกราะที่ไม่มีรูพรุนและ (b) ชั้นเกราะมีรูพรุน	33
2.16 แผนภาพหลักการทำงานของกระสุนปืนเกลียว	33
2.17 การจำลองยิงกระสุนจากเกราะโปร่งใสล้มเหลวที่อุณหภูมิ +55 °C	34
2.18 มุมมองของรูปแบบพื้นที่เสียหายตรงกลางที่ผนังด้านหลัง	35
2.19 แสดงเกราะโล่ยึดด้วยแผ่นไม้สน	35
2.20 แสดงลำดับภาพความเร็วสูงของเป้าหมายที่ได้รับผลกระทบที่ความเร็ว 499 m/s	36
2.21 การทดสอบการยิงเป้าหมายคอมโพสิตเซรามิกด้วยความเร็วกระแทก 1,000 m/s	37
2.22 รอยจากทดสอบการยิง	39
2.23 แบบออกแบบกระสุนจำลองเป้าหมาย	40
2.24 การเจาะทะลุแผ่นเหล็กด้วยกระสุนซีปนาวุธ	41
2.25 การเปลี่ยนแปลงของโปรไฟล์เนื่องจากการเปลี่ยนรูปด้วยความเร็วกระแทก	42
2.26 ความเสียหายของกระสุนซีปนาวุธที่ทำการทดสอบ	43
2.27 ลักษณะการเปลี่ยนรูปของกระสุนและแผ่นเหล็ก AISI1008 ที่ความหนา 2 mm	43
3.1 ขั้นตอนกระบวนการวิจัย	46

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.2 ขนาดของกระสุน 7.62 mm	47
3.3 การจำลองแบบแผ่นเกราะเดี่ยวด้วย Program SolidWorks	47
3.4 การจำลองแบบแผ่นเกราะซ้อนด้วย Program SolidWorks	48
3.5 หน้าต่าง Workbench	48
3.6 โหมดการจำลอง Explicit Dynamics และชุดคำสั่ง Engineering Data	49
3.7 การตั้งค่าคุณสมบัติของวัสดุ SKD11	50
3.8 การตั้งค่าคุณสมบัติของวัสดุ WC ทั้งสแตนคาร์ไบด์	51
3.9 การเรียกไฟล์จำลองเข้าสู่ Program ANSYS	52
3.10 การประมวลแบบจำลอง	52
3.11 การตั้งค่าการรวมวัตถุของแบบจำลองลูกกระสุนปืน	53
3.12 การตรวจสอบการนำแบบจำลองเข้าอย่างสมบูรณ์แล้ว	53
3.13 ลักษณะหน้าต่างชุดคำสั่ง Model	53
3.14 การกำหนดลักษณะและวัสดุให้กับแบบจำลอง	54
3.15 การกำหนดผิวของแผ่นเกราะซ้อน 2 ชั้น	54
3.16 การตั้งค่าขนาด Element Size และรูปแบบ Mesh บริเวณหัวกระสุน	55
3.17 การกำหนด Element บริเวณของแผ่นเกราะ	55
3.18 ลักษณะของรูปแบบเมชที่แผ่นเกราะ	56
3.19 คำสั่งการกำหนดของค่าความเร็วและทิศทาง	56
3.20 ค่าของ “End Time” และ “Result Number of Points”	57
3.21 การยึดชิ้นงานแบบ Fixed Support	57
3.22 คำสั่งแสดงผลการวิเคราะห์	58
3.23 แสดงผลการประมวลผลของ Solver Output	59
3.24 การแสดงผลการประมวลผลที่ผิดปกติ	59
3.25 ลักษณะกราฟแสดงสถานะปกติ	59
3.26 ลักษณะกราฟแสดงสถานะมีความผิดปกติ	60
3.27 แสดงถึงเส้นกราฟ Energy Error แสดงสถานะปกติ	60
3.28 กราฟ Impulse แกน Z แสดงผลที่เป็นปกติ	61
3.29 กราฟ Hourglass Energy แสดงผลที่เป็นปกติ	61
4.1 แผ่นด้านหน้า 10 mm (SUS304) แผ่นด้านหลัง 10 mm (SUS304)	63

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 แผ่นด้านหน้า 10 mm (SKD11) แผ่นด้านหลัง 10 mm (SUS304)	63
4.3 การทดสอบยิงจริงตามมาตรฐาน NIJ	64
4.4 ความเสียหายที่แผ่นเกราะสแตนเลส (SUS304) ด้านหน้า	64
4.5 ความเสียหายที่แผ่นเกราะสแตนเลส (SUS304) ด้านหลัง	65
4.6 ผลการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์	65
4.7 รอยนูนที่แผ่นเกราะด้านหลังแบบจำลอง	66
4.8 ผลการทดสอบยิงจริง	66
4.9 ผลการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์	67
4.10 (ก) กราฟแสดงความเค้นเทียบกับช่วงเวลาของแผ่นอะลูมิเนียมที่มุม 0 องศา (ข) กราฟแสดงความเร็วกระสุนเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลาของแผ่นอะลูมิเนียมที่มุม 0 องศา	69
4.11 แผ่นเกราะอะลูมิเนียม ความหนา 6 mm มุม 0 องศา	69
4.12 แผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 8 mm มุม 0 องศา	70
4.13 แผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 10 mm มุม 0 องศา	70
4.14 (ก) กราฟแสดงความเค้นเทียบกับช่วงเวลาของแผ่นอะลูมิเนียมที่มุม 15 องศา (ข) กราฟแสดงความเร็วกระสุนเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลาของแผ่นอะลูมิเนียมที่มุม 15 องศา	71
4.15 แผ่นเกราะอะลูมิเนียม ความหนา 6 mm มุม 15 องศา	71
4.16 แผ่นเกราะอะลูมิเนียม ความหนา 8 mm มุม 15 องศา	71
4.17 แผ่นเกราะอะลูมิเนียม ความหนา 10 mm มุม 15 องศา	72
4.18 (ก) กราฟแสดงความเค้นเทียบกับช่วงเวลาของแผ่นอะลูมิเนียมที่มุม 30 องศา (ข) กราฟแสดงความเร็วกระสุนเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลาของแผ่นอะลูมิเนียมที่มุม 30 องศา	72
4.19 แผ่นเกราะอะลูมิเนียม ความหนา 6 mm มุม 30 องศา	73
4.20 แผ่นเกราะอะลูมิเนียม ความหนา 8 mm มุม 30 องศา	73
4.21 แผ่นเกราะอะลูมิเนียม ความหนา 10 mm มุม 30 องศา	73
4.22 (ก) กราฟแสดงความเค้นเทียบกับช่วงเวลาของแผ่นอะลูมิเนียมที่มุม 45 องศา (ข) กราฟแสดงความเร็วกระสุนเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลาของแผ่นอะลูมิเนียมที่มุม 45 องศา	74
4.23 แผ่นเกราะอะลูมิเนียม ความหนา 6 mm มุม 45 องศา	75
4.24 แผ่นเกราะอะลูมิเนียม ความหนา 8 mm มุม 45 องศา	75
4.25 แผ่นเกราะอะลูมิเนียม ความหนา 10 mm มุม 45 องศา	75

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.26 (ก) กราฟแสดงความเค้นเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 ที่มุ่ม 0 องศา	76
(ข) กราฟแสดงความเร็วกระสุนเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 ที่มุ่ม 0 องศา	
4.27 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 6 mm มุ่ม 0 องศา	77
4.28 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 8 mm มุ่ม 0 องศา	77
4.29 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 10 mm มุ่ม 0 องศา	77
4.30 (ก) กราฟแสดงความเค้นเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 ที่มุ่ม 15 องศา	78
(ข) กราฟแสดงความเร็วเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 ที่มุ่ม 15 องศา	
4.31 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 6 mm มุ่ม 15 องศา	78
4.32 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 8 mm มุ่ม 15 องศา	79
4.33 แผ่นเกราะ SKD 11 ความหนา 10 mm มุ่ม 15 องศา	79
4.34 (ก) กราฟแสดงความเค้นเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 ที่มุ่ม 30 องศา	80
(ข) กราฟแสดงความเร็วกระสุนเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 ที่มุ่ม 30 องศา	
4.35 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 6 mm มุ่ม 30 องศา	80
4.36 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 8 mm มุ่ม 30 องศา	81
4.37 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 10 mm มุ่ม 30 องศา	81
4.38 (ก) กราฟแสดงความเค้นเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 ที่มุ่ม 45 องศา	82
(ข) กราฟแสดงความเร็วกระสุนเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 ที่มุ่ม 45 องศา	
4.39 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 6 mm มุ่ม 45 องศา	82
4.40 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 8 mm มุ่ม 45 องศา	82
4.41 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 10 mm มุ่ม 45 องศา	83
4.42 (ก) กราฟแสดงความเค้นเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 และอะลูมิเนียมที่มุ่ม 0 องศา	84
(ข) กราฟแสดงความเร็วกระสุนเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 และอะลูมิเนียมที่มุ่ม 0 องศา	
4.43 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 6 mm ด้านหน้าและแผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 6 mm ด้านหลัง มุ่ม 0 องศา	84
4.44 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 8 mm ด้านหน้าและแผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 8 mm ด้านหลัง มุ่ม 0 องศา	84
4.45 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 10 mm ด้านหน้าและแผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 8 mm ด้านหลัง มุ่ม 0 องศา	85

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.46 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 10 mm ด้านหน้าและแผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 10 mm ด้านหลัง มุม 0 องศา	85
4.47 (ก) กราฟแสดงความเค้นเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 และอะลูมิเนียมที่มุม 15 องศา (ข) กราฟแสดงความเร็วกระสุนเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 และอะลูมิเนียมที่มุม 15 องศา	86
4.48 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 6 mm ด้านหน้าและแผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 6 mm ด้านหลัง มุม 15 องศา	86
4.49 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 8 mm ด้านหน้าและแผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 8 mm ด้านหลัง มุม 15 องศา	87
4.50 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 10 mm ด้านหน้าและแผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 8 mm ด้านหลัง มุม 15 องศา	87
4.51 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 10 mm ด้านหน้าและแผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 10 mm ด้านหลัง มุม 15 องศา	87
4.52 (ก) กราฟแสดงความเค้นเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 และอะลูมิเนียมที่มุม 30 องศา (ข) กราฟแสดงความเร็วกระสุนเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 และอะลูมิเนียมที่มุม 30 องศา	88
4.53 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 6 mm ด้านหน้าและแผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 6 mm ด้านหลัง มุม 30 องศา	89
4.54 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 8 mm ด้านหน้าและแผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 8 mm ด้านหลัง มุม 30 องศา	89
4.55 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 10 mm ด้านหน้าและแผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 8 mm ด้านหลัง มุม 30 องศา	89
4.56 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 10 mm ด้านหน้าและแผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 10 mm ด้านหลัง มุม 30 องศา	90
4.57 (ก) กราฟแสดงความเค้นเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 และอะลูมิเนียมที่มุม 45 องศา (ข) กราฟแสดงความเร็วกระสุนเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 และอะลูมิเนียมที่มุม 45 องศา	91
4.58 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 6 mm ด้านหน้าและแผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 6 mm ด้านหลัง มุม 45 องศา	91

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.59 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 8 mm ด้านหน้าและแผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 8 mm ด้านหลัง มุม 45 องศา	91
4.60 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 10 mm ด้านหน้าและแผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 8 mm ด้านหลัง มุม 45 องศา	92
4.61 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 10 mm ด้านหน้าและแผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 10 mm ด้านหลัง มุม 45 องศา	92



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
E	มอดูลัสความยืดหยุ่น	GPa
V	ปริมาตร	mm ³
m	มวล	g
F	แรง	N
σ	ความเค้น	MPa
ε	ความเครียด	-
τ	ความเค้นเฉือน	MPa
ρ	ความหนาแน่น	kg/m ³
v	ความเร็ว	m/s
σ_y	ความเค้นคราก	MPa
ν	อัตราส่วนค่าปัวซอง	-
G	มอดูลัสความแข็งเกร็ง	GPa
T	อุณหภูมิ	^o C, K
ε_p	ความเครียดช่วงการเสียรูปถาวร	-

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีรวมถึงวัสดุขั้นสูง (Advanced Materials) เพื่อใช้ในการประยุกต์งานทางด้านวิศวกรรมต่างๆ รวมถึงทางด้านวิศวกรรมเครื่องกลมีความก้าวหน้าไปอย่างมาก โดยการพัฒนาในระดับโครงสร้างวัสดุให้มีความเฉพาะเจาะจง เสถียร แม่นยำและมีประสิทธิภาพ เพื่อการตอบสนองกับการแก้ไขปัญหาทางด้านวิศวกรรม โดยมีเทคโนโลยีในระดับที่สามารถจัดเรียงอะตอมและก้าวล้ำไปในระดับนาโนเทคโนโลยี ซึ่งส่งผลให้เกิดคุณสมบัติของวัสดุที่พิเศษเพื่อการใช้งานทางด้านโดยเฉพาะ รวมถึงการผลิตยังต้องมีการควบคุมคุณภาพในกระบวนการผลิตด้วย ในการศึกษาขั้นแนวหน้า (Frontier Research) ทางด้านวัสดุ ยกตัวอย่างเช่น อนุภาคผงระดับนาโน เส้นใยและวัสดุคอมโพสิต ไบโอบอลิเมอร์ นาโนคอมโพสิต และ วัสดุนาโนของคาร์บอน เป็นการพัฒนาวัสดุอย่างต่อเนื่องและต่อยอดอย่างไม่สิ้นสุด

สืบเนื่องจากสถานการณ์ การก่อการร้าย การวางระเบิด การวางเพลิง และการลอบยิงทำร้ายเจ้าหน้าที่จาก 3 จังหวัดชายแดนภาคใต้ ผู้วิจัยจึงสนใจพัฒนาการออกแบบเกราะกันกระสุน ให้มีประสิทธิภาพต้านทานต่อการเจาะทะลุ ป้องกันการทำลาย โจมตีเกราะกันกระสุนเพื่อลดการสูญเสียต่อชีวิตและทรัพย์สิน แผ่นเกราะกันกระสุนเป็นอีกหนึ่งนวัตกรรมที่ได้รับการพัฒนาโดยใช้องค์ความรู้ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ โดยเฉพาะด้านการออกแบบลักษณะรูปร่างของแผ่นเกราะกันกระสุน วัสดุที่นำมาใช้ร่วมในการผลิต กระบวนการผลิต การประกอบและการกำหนดตัวแปรที่ใช้การวิเคราะห์ และให้ได้มาซึ่งแผ่นเกราะกันกระสุนที่มีประสิทธิภาพ แผ่นเกราะกันกระสุนมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับปัจจัยส่วนใหญ่จะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ 1) แผ่นเกราะกันกระสุนมาตรฐาน NIJ 3 ที่นำมาใช้กับบุคคล ซึ่งมีน้ำหนักที่บุคคลยังสามารถรับน้ำหนักและสามารถเคลื่อนที่ได้ขณะใช้งาน 2) แผ่นเกราะที่ใช้กับยานพาหนะมาตรฐาน NIJ 4 ซึ่งมีน้ำหนักจำนวนมากไม่เหมาะสมกับการใช้งานกับบุคคล แต่สามารถใช้งานกับยานพาหนะ แม้จะมีน้ำหนักมากแต่ก็สามารถป้องกันการโจมตีจากกระสุนได้สูงสุด ในกรณีที่แบ่งตามชนิดเกราะกันกระสุนของวัสดุ สามารถแบ่งออกเป็น 1) แผ่นเกราะเซรามิกส์อาจต้องประกอบเข้ากับแผ่นเกราะที่มีเส้นใยร่วม 2) แผ่นเกราะโลหะกันกระสุน ที่สร้างจากโลหะหลายชนิดวางซ้อนกัน 3) แผ่นเกราะเส้นใยคอมโพสิต ทั้งที่เป็นเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์ 4) แผ่นเกราะโปร่งแสง หรือที่เรียกว่ากระจกกันกระสุน และ [1] ส่วนประกอบของเสื้อเกราะกันกระสุนบุคคลจะประกอบด้วย 3 ส่วน 1) เสื้อชั้นนอก (Outside Shell Carrier) ส่วนที่ใช้สำหรับรับแรงกระแทก อาจจะมีส่วนที่ใช้แผ่นเหล็กหรือเซรามิก เพื่อเพิ่มความสามารถการรับแรงกระแทก 2) ส่วนยึดรั้ง

(Fastening System) ใช้ยึดเสื้อเกราะกับร่างกายทำให้เกิดความกระชับ 3) แผ่นรับแรงกระแทก (Ballistic Panel) ลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมหรือโค้งตามรูปเสื้อทอจากใยสังเคราะห์ เมื่อถูกแรงกระแทกจะเกิดการยืดตัวช่วยดูดซับพลังงานเพื่อลดความเร็วของกระสุนที่ยิงเข้ามา ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ลักษณะเสื้อเกราะกันกระสุน [1]

ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) เพื่อคาดการณ์การเกิดความเสียหายที่เกิดจากการยิงกระสุนภายใต้การยิงกระสุนตามมาตรฐาน National Institute of Justice (NIJ) ระดับ 3 ด้วยกระสุน วัสดุของกระสุนคือทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) ขนาด 7.62 mm ความเร็วของกระสุนที่ 847 ± 9.1 m/s เพื่อให้ลดขั้นตอน เวลาจากการทดสอบจริง อีกทั้งยังลดงบประมาณจากการทดสอบจริง การวิเคราะห์ของงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย 1) ประเภทของวัสดุเป็นเกราะกันกระสุนที่ทำมาจากอะลูมิเนียมที่มีความหนาขนาดต่างๆ แต่เนื่องจากแผ่นอะลูมิเนียมมีค่าความเหนียวและค่าความแข็งที่ต่ำกว่าโลหะชนิดอื่น ๆ โดยการวิเคราะห์ตามมาตรฐานระดับ NIJ 3 ดังนั้นอาจจะต้องมีการเสริมด้วยวัสดุชนิดอื่นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ 2) ลักษณะรูปร่างของเกราะเป็นแบบแผ่นและขนาดความกว้าง x ความยาว x ความหนา ที่สามารถทนทานแรงกระแทกจากกระสุนได้ 3) การจัดเรียงชั้นแผ่นอะลูมิเนียมที่มีระยะห่างต่างๆ 4) รูปแบบขนาดและวิธีการสร้าง Mesh ที่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์ทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเลือกใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์และจำลองผลลัพธ์ ทั้งนี้การพิสูจน์ความถูกต้องจะใช้รูปแบบการ Pre-processing และ Solve- Processing เพื่อต่อยอดผลการออกแบบและวิเคราะห์ของงานวิจัยที่ผ่านมา โดยคาดหวังผลที่จะได้รับคือ องค์กรความรู้ที่จะสามารถนำไปใช้ในการออกแบบและสร้างแผ่นเกราะกันกระสุนที่สามารถใช้งานได้จริง

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1. เพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อแผ่นเกราะกันกระสุน NIJ ระดับ 3

1.2.2. เพื่อวิเคราะห์รูปแบบความเสียหายและความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุของแผ่นเกราะอะลูมิเนียม AL7075 และเกราะ SKD11 ตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1.3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์เบื้องต้นคืออะลูมิเนียม AL7075และอาจจะใช้แผ่นวัสดุชนิดอื่นร่วมด้วย
- 1.3.2 วิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์(FEM) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปAnsys/Explicit Dynamic
- 1.3.3 การจัดวางแผ่นเป็นแบบซ้อนแผ่นอย่างน้อย 1 แผ่น
- 1.3.4 พารามิเตอร์ที่สำคัญคือ ความหนาของแผ่นอะลูมิเนียม AL7075 จำนวนแผ่นซ้อนที่ต้องปรับเปลี่ยน ระยะห่างระหว่างชั้น รวมทั้งแผ่นเกราะเสริมด้วยโลหะชนิดอื่น
- 1.3.5 โมเดลสำหรับกระสุนปืนทำจาก Tungsten Carbide ขนาด 7.62x51 mm
- 1.3.6 การวิเคราะห์ทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์อ้างอิงข้อมูล ความเร็วของกระสุน และรูปแบบกระสุนตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3
- 1.3.7 การกำหนด constraints จะดำเนินการยึดขอบทั้ง 4 ด้านของแผ่นเกราะเป็นแบบ Fixed เท่านั้น
- 1.3.8 แผ่นเกราะที่ใช้ในการจำลองมีขนาด 300x300 mm
- 1.3.9 คอมพิวเตอร์ประสิทธิภาพสูงที่ใช้ในวิเคราะห์ กำหนดข้อมูลจำเพาะ
 - 1.3.9.1 หน่วยประมวลผล (CPU) AMD Ryzen Threadripper 2990WX
 - 1.3.9.2 ระบบปฏิบัติการ (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 Samsung
 - 1.3.9.4 กราฟิก (Graphics) NVIDIA Quadro RTX 4000

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.4.1 ได้องค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานการเจาะของกระสุน
- 1.4.2 ได้ต้นแบบโมเดล 3 มิติ ของแผ่นเกราะโลหะกันกระสุนชนิดแผ่นซ้อนสำหรับแผ่นเกราะอะลูมิเนียมและเกราะโลหะชนิดอื่นที่ผ่านมาตรฐานสากล NIJ ระดับ 3
- 1.4.3 ได้รูปแบบความเสียหายของแผ่นเกราะและความสามารถในการต้านทานทานของการเจาะทะลุของแผ่นเกราะอะลูมิเนียมและเกราะโลหะ
- 1.4.4 สามารถนำไปใช้ในการออกแบบและผลิตแผ่นเกราะโลหะกันกระสุนแบบแผ่นซ้อนได้
- 1.4.5 ได้ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการหรือวารสารวิจัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรม

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [2][12]

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) เป็นวิธีทางตัวเลข เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรม ไม่ว่าจะเป็นการวิเคราะห์ทางโครงสร้าง (Structural) หรืออื่นๆ โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะสามารถประมาณค่าผลเฉลยโดยการแก้สมการเชิงพีชคณิตแทนการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ โดยในการแก้ปัญหาดังกล่าวโครงสร้างหรือชิ้นงานจะถูกแบ่งออกเป็นชิ้นส่วนเล็กๆ (Element) ในจำนวนที่จำกัด (Finite) และผลเฉลยที่ได้จะเป็นคำตอบที่จุดต่อระหว่างเอลิเมนต์ (โหนด: Node) โดยที่แต่ละเอลิเมนต์จะมีผลเฉลยที่สามารถหาได้ง่าย และเมื่อนำมารวมกันจะสามารถหาค่าผลเฉลยของทั้งโครงสร้างได้ โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะสามารถให้ผลเฉลยของค่าการเสียรูปและแรงที่กระทำ ณ จุดหรือโหนดๆ และค่าความเค้นและความเครียดที่แต่ละเอลิเมนต์ได้ ความเครียดกับการเสียรูปและความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นสิ่งจำเป็นในการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ตัวอย่างปัญหาใน 1 มิติ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเสียรูปกับความเครียดดังนี้

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

ซึ่งเป็นสมการสำหรับปัญหาที่มีการเสียรูปน้อย (Small Displacement) และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจะมีค่าเท่ากับ

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

โดยที่ σ_x คือค่าความเค้นในแนวแกน x และ E คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ

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

เมื่อ $[D]$ คือ เมทริกซ์คุณสมบัติของวัสดุ

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

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

เมื่อนำเอาหลักการของสปริงตามสมการที่ (2.4) มาประยุกต์ใช้กับหลักการไฟไนต์เอลิเมนต์จะสามารถเขียนสมการที่ (2.5) ใหม่ในลักษณะของเมทริกซ์ได้เป็น

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

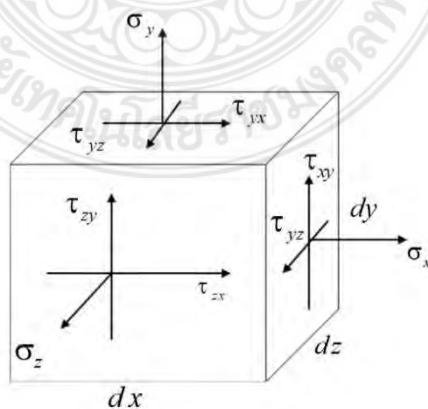
โดยที่ f' คือ เมทริกซ์ของแรงที่กระทำกับสปริง

k' คือ สทิงเฟสเมทริกซ์ของสปริง และ

d' คือ เมทริกซ์ของระยะยืด/หดตัวของสปริง

ในการวิเคราะห์วิเคราะห์เอลิเมนต์ในระบบ 3 มิตินั้น เอลิเมนต์ประเภทนี้จะให้คำตอบมากกว่าเอลิเมนต์แบบ 2 มิติ หรือแบบแกนสมมาตร เอลิเมนต์แบบทรงสี่หน้า (Tetrahedron) เป็นเอลิเมนต์เบื้องต้นสำหรับ 3 มิติ ในส่วนของนี้จะยกตัวอย่างจากหนังสือไฟไนต์เอลิเมนต์เบื้องต้น ผู้แต่ง รศ.ดร. ธงชัย ฟองสมุทร หน้า 175-180

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



รูปที่ 2.1 ลักษณะความเค้นใน 3 มิติ [2][12]

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

ดังนั้นจะมีความเค้นเฉือนแค่ 3 ตัวเท่ากันที่ต้องพิจารณารวมกับความเค้นตั้งฉากจะได้เป็น

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

และความเค้นที่เกิดขึ้นในเอลิเมนต์จะมีดังนี้

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

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

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

และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเท่ากับ

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

โดยที่

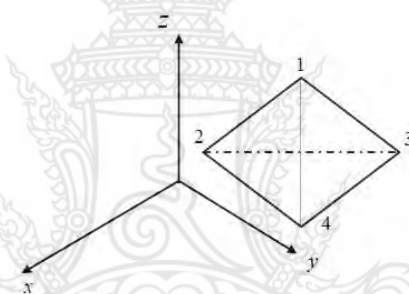
$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ & & & & & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

การหาสทิงเฟนสเมทริกซ์สำหรับเอลิเมนต์แบบทรงสี่หน้า

ขั้นตอนที่ 1 เลือกประเภทของเอลิเมนต์

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

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



รูปที่ 2.2 เอลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า [2][12]

ขั้นตอนที่ 2 เลือกฟังก์ชันของการเสียรูป

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

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

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

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

โดยที่

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

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

และ

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

และ

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

และ

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

สามารถที่จะเขียนรูปของเมทริกซ์สำหรับฟังก์ชันการเสีรูปเท่ากับ

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

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 ระบุความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการเสียรูป และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดกับการเสียรูป ได้ว่า

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

หรือ

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

โดยที่

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

และ

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

และสำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

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

และ

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

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

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

ในกรณีที่เป็นเอลิเมนต์แบบทรงสี่หน้า (Tetrahedron) จะมีค่าคงที่ ดังนี้

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

ผลจากน้ำหนัก (Body Force)

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

โดยที่

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

ผลจากแรงที่ผิว (Surface Force)

จาก

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

โดยที่

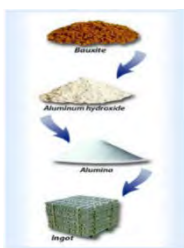
$$\{T\} = \begin{Bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{Bmatrix} \quad (2.33)$$

2.1.2 แผ่นเกราะโลหะ

เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงเพื่อทำลายหัวกระสุนเมื่อหัวกระสุนทำการกระทบกับเกราะกันกระสุน แผ่นเกราะโลหะมีหลายวัสดุขึ้นอยู่กับการออกแบบให้เหมาะสมกับงานเฉพาะเจาะจง

วัสดุแรกที่ใช้ในการกำหนดหัวกระสุนคือทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) [3] เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่มีส่วนทั้งสแตนและอะตอมของคาร์บอนเท่ากัน ทังสเตนซีเมนต์คาร์ไบด์สามารถรีดและขึ้นรูปเป็นผงสีเทาละเอียดซึ่งถือได้ว่าเป็นรูปแบบพื้นฐานที่สุดทั้งสแตนแผ่นเหล็กหนาประมาณสามเท่าเหล็กแข็งมีค่าโมดูลัสของ Young ประมาณ 550 GPa และหนาแน่นกว่าเหล็กหรือไททาเนียม เปรียบได้กับคอร์รันดัมหรือโพลินด้วยความแข็งแรงและสามารถขัดและขัดผิวได้ด้วยวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงเช่นโบรอนไนไตรด์และเพชรอื่น ๆ ในรูปของผงลั่วและสารประกอบ ทังสเตนซีเมนต์คาร์ไบด์ เป็นวัสดุที่ต้องการสำหรับชิ้นส่วนที่ต้องทนต่อการสึกหรอทุกรูปแบบ รวมถึงการขัดถูการกัดกร่อนการสึกหรอและการกัดกร่อนของโลหะกับโลหะ และมีความเหนียวสูง มีความสามารถในการบีบอัดสูงทนต่อการโก่งและรักษาความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงคุณสมบัติทางกายภาพที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการใช้งานตัดโลหะ คุณสมบัติหลัก ความแข็งที่ยืดหยุ่น 86 ~ 93 HRA ซึ่งเท่ากับ 68 ~ 81HRC ประสิทธิภาพการทำงานที่ยืดหยุ่น ความแข็งอาจอยู่ที่ 60 HRC ต่ำกว่า 900 ~ 1000 HRC ความต้านทาน บางเกรดสามารถหลอมเหล็กได้ดีกว่า 100 เท่าการกัดกร่อนความต้านทาน: เกรดที่มีตัวยึดนิเกิลและโครเมียมมีความทนทานต่อสารละลายที่เป็นกรดความทนต่อแรงกระทบ เมื่อพิจารณาจากความกระด้างสูงแถบคาร์ไบด์ทั้งหมดที่เราจัดหาให้มีคุณสมบัติทั้งหมดนี้เหมาะสำหรับการตัดเครื่องมือ สมบัติทางกายภาพทังสเตนคาร์ไบด์มีจุดหลอมเหลวสูงที่ 2,870 ° C จุดเดือด 6,000 ° C เมื่ออยู่ภายใต้แรงดันเท่ากับ 760 mm/ha ค่าการนำความร้อน 84.02 W · m⁻¹ · K⁻¹ และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของ 5.8 μm · m⁻¹ · K⁻¹ ทังสเตนคาร์ไบด์เป็นสิ่งที่ยากมากอันดับที่ 9 ในระดับ Mohs และมีจำนวนวิกเกอร์จำนวน 1700-2400 มีโมดูลัสของ Young ที่ประมาณ 550 GPa โมดูลัสของ Young ของ 439 GPa และโมดูลัสเฉือนของ 270 GPa มีความสามารถในการทนต่อแรงกระทบสูงมากถึง 6800 MPa แต่มีค่าความต้านทานแรงดึงที่ต่ำสุดเพียง 35 MPa. คุณสมบัติทางเคมีสารประกอบของทังสเตนและคาร์บอน, WC และทังสเตนซีมิคาร์ไซด์, W2C มีอยู่ 2 ชนิด สารประกอบทั้งสองอาจมีอยู่ในสารเคลือบผิวและสัดส่วนขึ้นอยู่กับวิธีการเคลือบผิว ที่อุณหภูมิสูง WC สลายตัวไปเป็นทังสเตนและคาร์บอนและสิ่งนี้สามารถเกิดขึ้นได้ในระหว่างการพ่นด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงเช่นในเชื้อเพลิงที่มีออกซิเจนสูงและวิธีพลาสมาพลังงานสูง ออกซิเดชันเริ่มต้นที่ 500-600 ° C มันทนต่อกรดและถูกทำร้ายเฉพาะโดยการผสมกรดไฮโดรฟลูออริก / กรดไนตริกเหนืออุณหภูมิห้อง มันทำปฏิกิริยากับก๊าซฟลูออรีนที่อุณหภูมิห้องและคลอรีนเหนือ 400 ° C และไม่มีปฏิกิริยากับการทำให้แห้ง H₂ ถึงจุดหลอมเหลวของมันละลายได้ง่ายในไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เจือจาง

วัสดุที่สองคืออะลูมิเนียม (Aluminium) [4] เป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบาเหมาะแก่การนำมาพัฒนากระแฉกกระสุนและยังถือเป็นโลหะที่ถูกลำเอียงนำมาใช้ประโยชน์มากทั้งในภาคอุตสาหกรรม และภาคครัวเรือน สำหรับภาคอุตสาหกรรมใช้ในการผลิตอะลูมิเนียมผสม และผลิตภัณฑ์อะลูมิเนียม ส่วนภาคครัวเรือนมีใช้มากในการก่อสร้าง และตกแต่งบ้าน ทดแทนไม้ และเหล็ก เนื่องจากเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติคงทนต่อการหัก ความร้อน การกัดกร่อน น้ำหนักเบา และมีความสามารถในการสะท้อนแสง และความร้อนได้ดี มักใช้ในงานก่อสร้าง งานตกแต่ง เช่น การทำประตู หน้าต่าง ฝ้า รวากัน และโครงสร้างต่างๆ คุณสมบัติอะลูมิเนียมมีจุดหลอมละลายที่ 660°C เป็นโลหะที่มีความหนาแน่นน้อย น้ำหนักเบา รับภาระน้ำหนักได้สูง สามารถขึ้นรูปได้ง่าย ไม่เสียงตอระยราว และการแตกหัก ไม่เป็นสนิม ทนต่อการกัดกร่อน และไม่เปื้อนพิษต่อมนุษย์ โดยเฉพาะการนำมาผสมกับโลหะอื่นๆแล้วจะทำให้คุณสมบัติต่างๆเพิ่มมากขึ้น เช่น จุดหลอมเหลวของอะลูมิเนียมผสมจะอยู่ที่ $1140-1205^{\circ}\text{C}$ จึงนิยมนำมาผลิตเป็นชิ้นส่วนต่างๆ รวมถึงวัสดุหรือภาชนะที่เกี่ยวข้องกับอาหาร นอกจากนี้ ยังมีคุณสมบัติทางเคมีของอะลูมิเนียมในลักษณะต่างๆ ได้แก่ เมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนจะทำให้เกิดชั้นฟิล์มบางๆ เรียกว่า อะลูมิเนียมออกไซด์ เคลือบบนชั้นผิวอะลูมิเนียมป้องกันการเกิดปฏิกิริยาอื่นๆได้ดีการทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนจะทำให้เกิดไนไตรด์ที่อุณหภูมิสูง ไม่ทำปฏิกิริยากับกำมะถัน เมื่อทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจน ไฮโดรเจนจะแทรกซึมเข้าสู่ชั้นในของอะลูมิเนียม จึงจำเป็นต้องกำจัดออก สามารถทนต่อกรดอินทรีย์เข้มข้นได้ปานกลาง ทนต่อปฏิกิริยาของด่างได้เล็กน้อย สามารถละลายได้ในสภาวะที่เป็นด่างเข้มข้น เกิดปฏิกิริยากับเกลือได้ ทำให้เกิดการกัดกร่อน การผลิตอะลูมิเนียมเริ่มต้นจากอุตสาหกรรมต้นน้ำในเหมืองแร่ผลิตแร่บอกไซต์ ซึ่งมีลักษณะเป็นก้อนแข็ง อัดตัวแน่น มีสีเหลืองออกสีน้ำตาลจนถึงน้ำตาลแดง แต่อาจพบในลักษณะสีอื่น เช่น สีขาว สีน้ำตาล ซึ่งมีการผลิตในต่างประเทศด้วยการนำแร่บอกไซต์มาถลุงจนได้อะลูมินาบริสุทธิ์ และนำอะลูมินาเข้าหลอมเป็นแท่งจนได้แท่งอะลูมิเนียมบริสุทธิ์กลายเป็นวัตถุดิบในการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ สำหรับเศษอะลูมิเนียมเก่าสามารถนำมาหลอมเป็นแท่งอะลูมิเนียมนำกลับมาใช้เป็นวัตถุดิบใหม่ได้การผลิตอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ด้วยการแยกสกัดออกจากอะลูมินาจะใช้กระบวนการถลุงด้วยไฟฟ้าในเตาหลอมไฟฟ้าขนาดใหญ่ โดยโลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์จะแยกตัวออกจากอะลูมินาลงสู่ด้านล่างของเตาหลอม และไหลออกจากเตาหลอมด้วยวิธีการกลั่นน้ำ สำหรับในประเทศไทยจะไม่มีการผลิตอะลูมิเนียมจากแหล่งแร่ต้นน้ำ แต่จะมีเพียงการผลิตอะลูมิเนียมบริสุทธิ์จากการหลอมเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่



รูปที่ 2.3 การผลิตอะลูมิเนียม [4]

วัสดุที่สามคือ SKD11 [5] เป็นเหล็กกล้ากลุ่มเครื่องมือกลุ่มงานเย็นที่มีส่วนผสมของคาร์บอนและโครเมียมในปริมาณสูง จัดเป็นเหล็กกล้าในกลุ่ม 12 % เลเดบไครติกโครเมียมสตีลซึ่งมีความต้านทานต่อการเสียดสีมาก นอกจากนี้ยังมีการผสมธาตุโมลิบดีนัมเพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการชุบแข็งเพื่อให้มีความเหนียวแกร่งและยังมีการผสมธาตุวาเนเดียมสูงถึง 1 % เพื่อช่วยรักษาคมตัดให้มีความแข็งแรงและมีอายุการใช้งานที่ยาวนานช่วยให้ทนต่อการเสียดสีและต่อต้านต่อการสึกหรอได้สูง SKD11 ยังมีคุณสมบัติเด่นทางด้าน การต่อต้านต่อการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเหนือกว่าเหล็กกล้าในกลุ่ม 12 % เลเดบไครติกโครเมียมสตีลเกรดอื่นจึงสามารถทำไนไตรดิงได้ดี นิยมใช้ทำพิมพ์สำหรับปั๊มงาน ตัดงาน เพรส งานอัดขึ้นรูปเย็น ลูกรีด ใบมีดตัดโลหะ งานที่ต้องทนกับการเสียดสีสูงๆ และแม่พิมพ์พลาสติกที่ต้องการความต้านทานต่อการสึกหรอมากๆ เช่น แม่พิมพ์ขึ้นรูปไฟเบอร์กลาส

วัสดุที่สี่คือเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS304) [6] หรือเหล็กสแตนเลส เป็นเหล็กกล้าผสมชนิดพิเศษมีการใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เหล็กกล้าไร้สนิมมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่สูงมาก จึงมีราคาสูงกว่าเหล็กคาร์บอนและความแข็งทำให้เครื่องมือตัดเนื้อเหล็กไม่ค่อยเข้า เหล็กไร้สนิมที่ผสมโครเมียมในปริมาณสูงรวมทั้งมีนิกเกิลผสมอยู่ด้วย เพื่อความแข็งแรงยังคงอยู่ ต้องใช้กระบวนการขึ้นรูปเย็นเท่านั้น การขึ้นรูปเย็นจะเกิดสภาพเป็นเหล็กน้อย ส่วนผสมในเหล็กกล้าไร้สนิมยังมีมากก็ยิ่งเพิ่มความเหนียวให้แก่เหล็ก ปริมาณโครเมียมที่เพิ่มขึ้นทำให้ทนทานต่อการกัดกร่อน

2.1.3 มาตรฐานการทดสอบแผ่นเกราะกันกระสุน [7][12]

มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับเรื่องวิธีทดสอบ เกณฑ์การทดสอบ ความสามารถหรือประสิทธิภาพการป้องกันกระสุนของเสื้อเกราะที่กำหนดโดยสถาบันความเที่ยงธรรมแห่งชาติ (National Institute of Justice, NIJ) ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งประเทศไทยและอีกหลายประเทศทั่วโลกใช้มาตรฐานสำหรับการทดสอบเสื้อเกราะป้องกันกระสุนด้วยเช่นกัน โดยมาตรฐาน NIJ แบ่งระดับความสามารถในการป้องกันกระสุนของเสื้อเกราะไว้ 6 ระดับ และพลังงานการเคลื่อนที่ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และ 2.2 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 มาตรฐาน NIJ (National Institute of Justice) [7][12]

การป้องกัน	ประสิทธิภาพ
ระดับ I (.22 LR; .380 ACP)	เกราะสามารถป้องกันกระสุน .22 Long Rifle น้ำหนัก 2.6 g มีความเร็ว $329 \pm 9.1 \text{ m/s}$ ($1080 \pm 30 \text{ ft/s}$) และกระสุน .380 ACP น้ำหนัก 6.2 g มีความเร็ว $322 \pm 9.1 \text{ m/s}$ ($1055 \pm 30 \text{ ft/s}$) แต่ปัจจุบัน NIJ ได้ยกเลิกการใช้มาตรฐานการป้องกันระดับ I เนื่องจากไม่เพียงพอที่จะป้องกันกระสุนปืน
ระดับ IIA (9 mm; .40 S&W)	เกราะสามารถป้องกันกระสุน 9 mm น้ำหนัก 8 g มีความเร็ว $373 \pm 9.1 \text{ m/s}$ ($1225 \pm 30 \text{ ft/s}$) และกระสุน .40 S&W น้ำหนัก 11.7 g มีความเร็ว $352 \pm 9.1 \text{ m/s}$ ($1155 \pm 30 \text{ ft/s}$) เสื้อเกราะป้องกันกระสุนปืนระดับ I ได้

ระดับ II (9 mm; .357 Magnum)	เกราะสามารถป้องกันกระสุน 9 mm น้ำหนัก 8 g มีความเร็ว $398 \pm 9.1\text{m/s}$ ($1305 \pm 30\text{ ft/s}$) และกระสุน .357 Magnum น้ำหนัก 10.2 g มีความเร็ว $436 \pm 9.1\text{m/s}$ ($1430 \pm 30\text{ ft/s}$) เสื้อเกราะป้องกันกระสุนปืนระดับ I และ IIA ได้ด้วย
ระดับ IIIA (.357 Sig; .44 Magnum)	เกราะสามารถป้องกันกระสุนขนาด .357 SIG น้ำหนัก 8.1 g มีความเร็ว $448 \pm 9.1\text{m/s}$ ($1470 \pm 30\text{ ฟุต/วินาที}$) และกระสุนขนาด .44 Magnum น้ำหนัก 15.6 g มีความเร็ว $436 \pm 9.1\text{ m/s}$ ($1430 \pm 30\text{ ft/s}$) เสื้อเกราะป้องกันกระสุนปืนระดับ I, IIA และ II ได้ด้วย
ระดับ III (Rifles)	เกราะสามารถป้องกันกระสุนขนาด 7.62 x 51 mm NATO M80 ball และน้ำหนัก 9.6 g มีความเร็ว $847 \pm 9.1\text{m/s}$ ($2780 \pm 30\text{ ft/s}$) เสื้อเกราะป้องกันกระสุนปืนระดับ I, IIA, II และ IIIA ได้ด้วย
ระดับ IV (Armor Piercing Rifle)	เกราะสามารถป้องกันกระสุนขนาด .30-06 Springfield M2 น้ำหนัก 10.8 g มีความเร็ว $878 \pm 9.1\text{ m/s}$ ($2880 \pm 30\text{ ft/s}$) เสื้อเกราะป้องกันกระสุนปืนระดับ I, IIA, II, IIIA และ III ได้ด้วย

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงพลังงานในการเคลื่อนที่ของกระสุนปืนที่ใช้ทดสอบเสื้อเกราะ [7]

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

ดังนั้นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพจึงต้องพิจารณาจากพลังงานในการเคลื่อนที่ของกระสุนซึ่งสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการทางฟิสิกส์

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

E = พลังงาน (J)

m = มวลวัตถุ (kg)

v = ความเร็ววัตถุ (m/s)

2.1.4 Program ANSYS software [8][12]

โปรแกรม ANSYS เป็นโปรแกรมสากลที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องตลอด 30 ปีที่ผ่านมาสามารถใช้วิเคราะห์พฤติกรรมทางฟิสิกส์ที่หลากหลาย เรียกโปรแกรมกลุ่มนี้ว่า โปรแกรมมัลติฟิสิกส์

(Multiphysic Program) และค่อนข้างนิยมใน CAE คืองานวิศวกรรมที่ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (CAE, Computer-Aided Engineering) อาศัยทั้งหลักการคำนวณวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) และไฟไนต์โวลุ่ม (Finite Volume Method, FVM) โปรแกรม ANSYS สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น การแก้ปัญหาในระบบสามมิติของกลศาสตร์ของแข็งสามารถประยุกต์ใช้กับโครงสร้างที่มีลักษณะพื้นฐาน (Stationary geometrically) และระบบที่มีโครงสร้างซับซ้อน (Non-stationary geometrically) ได้ ปรากฏการณ์ของก๊าซและของไหล กลศาสตร์ของไหล การแผ่รังสีความร้อนและการถ่ายเทความร้อน ปรากฏการณ์ด้านไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ปรากฏการณ์ของคลื่นเสียงเป็นปรากฏการณ์ที่สามารถจำลองได้บนโปรแกรม เพื่อใช้ในการจำลองและการวิเคราะห์กระบวนการในอุตสาหกรรม หลีกเลี่ยงค่าใช้จ่ายที่สูงและลดระยะเวลาในการออกแบบ

2.1.5 การใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Software) [47]

การใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Software) ในการวิเคราะห์โดยปกติทั่วไปจะประกอบด้วย 3 หลักการที่สามารถจัดเรียงลำดับขั้นตอนได้ดังนี้

2.1.5.1 ขั้นตอนการเตรียมกระบวนการ (Pre Processing) โดยทั่วไปใช้สำหรับการสร้างแบบจำลองของส่วนที่จะทำการวิเคราะห์ ซึ่งแบ่งรูปทรงเรขาคณิตออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ เรียกว่า เอลิเมนต์ โดยที่เอลิเมนต์แต่ละเอลิเมนต์จะเชื่อมต่อกันด้วยจุดโหนด แนนอนที่สุดโหนดนี้จะถูกกำหนดการเคลื่อนที่ และนอกเหนือจากนี้จะต้องทำการกำหนดแรง หรือ ภาระที่มากระทำกับชิ้นงานที่ต้องวิเคราะห์ ในขั้นตอนเตรียมการ การเตรียมแบบจำลองนี้จะต้องใช้เวลาในการเตรียมเป็นจำนวนมาก และนอกจากนี้ขั้นตอนเตรียมการบางกระบวนการสามารถรวมกับขั้นตอนออกแบบโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบได้

2.1.5.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ (Analysis) ข้อมูลต่างๆ เช่นแบบจำลอง เอลิเมนต์ เงื่อนไขต่างๆ ที่ได้ถูกเตรียมการจากขั้นตอนการเตรียมกระบวนการจะถูกนำมาใช้ป้อนเข้าสู่ระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ตามหลักการของระเบียบการเองที่สร้างและแก้ไขปัญหาแบบเชิงเส้น (Linear) หรือ ไม่เชิงเส้น (Nonlinear) ด้วยสมการทางพีชคณิต ดังแสดงในสมการที่

$$kd=f \quad (2.35)$$

เมื่อ k = เมทริกซ์ความแข็งแรง (Stiffness Matrix)

f = ค่าแรงที่มากระทำต่อเอลิเมนต์

d = ความเคลื่อนที่อิสระของโหนด เอลิเมนต์ (DOF)

2.1.5.3 ขั้นตอนการนำเสนอกระบวนการ (Post Processing) ก่อนหน้าการวิเคราะห์ ผู้ใช้จะต้องพึงเอาใจใส่แถวของตัวเลขที่ถูกสร้างขึ้นโดยรหัส(Code) การลงรายละเอียดของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และความเค้นลงบนแบบจำลองให้มีความแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง ด้วยวิธีนี้ทำให้พบข้อผิดพลาดได้ง่าย และจุดอันตราย อีกทั้งรหัสที่ทันสมัยจะใช้ภาพกราฟฟิกส์แสดงเพื่อให้ง่ายต่อการเห็นผลลัพธ์ ซึ่งรูปแบบของการนำเสนอทางกราฟฟิกส์จะแสดงเป็นระดับชั้นสีของความเค้นจนเต็มบนแบบจำลอง

2.1.6 พฤติกรรมของวัสดุ

2.1.6.1 โมเดล Mie-Gruneisen พฤติกรรมของวัสดุอุทกพลศาสตร์ [24] ที่ผลกระทบถูกรวมไว้ในแบบจำลองวัสดุโดยกำหนดสมการ Mie-Gruneisen ของสถานะสำหรับแผ่นเกราะและกระสุนปืน Mie-Gruneisen equation of state ให้ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความเร็วช็อคและความเร็วของอนุภาค รูปแบบทั่วไปของ Mie-Gruneisen equation สมการของสถานะกำหนดโดย

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

โดยที่ P = ความดัน,

ρ = ความหนาแน่น,

I = พลังงานภายในที่เฉพาะเจาะจง

T = พารามิเตอร์ Gruneisen T ถือเป็นฟังก์ชันของปริมาณเท่านั้น ความพอดีกับข้อมูล Hugoniot สามารถหาได้จากการพล็อตไฟล์ข้อมูลการทดลองในระนาบของแรงกระแทกและความเร็วของอนุภาคมีการกำหนดสมการเชิงเส้นที่แสดงถึงความพอดีกับข้อมูลการทดลองโดย

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

ค่ากำหนดสามารถกำหนดได้จาก

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

2.1.6.2 โมเดลของ Johnson Holmquist [48]

คำอธิบายของแบบจำลอง Johnson Holmquist เป็นแบบจำลองส่วนประกอบที่เหมาะสม

ในการทำนายพฤติกรรมของวัสดุเปราะที่ต้องรับน้ำหนักมากคุณสมบัติหลักของรูนี้ ได้แก่ความแข็งแรงขึ้นอยู่กับแรงกดความเสียหายและการแตกหักความแข็งแรงที่สำคัญหลังจากการแตกหักและผลกระทบจากอัตราความเครียด ภาพรวมทั่วไปของ Johnson Holmquist ในเงื่อนไขของความแข็งแรง แนวคิดเบื้องหลังแบบจำลองการกำหนดคือวัสดุเริ่มอ่อนตัวลงเมื่อเกิดความเสียหายเริ่มสะสม ($D > 0$) ซึ่งจะช่วยให้อ่อนลงวัสดุภายใต้ความเครียดพลาสติกที่เพิ่มขึ้น ความแข็งแรงโดยทั่วไปเป็นฟังก์ชันที่แตกต่างกันอย่างราบรื่นของความแข็งแรงที่สมบูรณ์การแตกหักความแข็งแรงอัตราความเครียดและความเสียหาย

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

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

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

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

ค่าคงที่ของวัสดุคือ A, B, C, M และ N, P^* และ T^* คือความดันปกติและความเค้นไฮโดรสแตติกแรงดึงสูงสุดอัตราความเครียดแบบไร้มิติคือ $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0$ โดยที่ $\dot{\epsilon}$ คือความเครียดจริงอัตรา และ $\dot{\epsilon}_0$ คืออัตราความเครียดอ้างอิง ความเสียหายสำหรับการแตกหักคือสะสมในลักษณะเดียวกับที่ใช้ใน Johnson Cook แบบจำลองการแตกหักและแสดงเป็น

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

โดยที่ $\Delta \epsilon_p$ คือการเพิ่มขึ้นของความเครียดพลาสติกที่เทียบเท่ากันระหว่างรอบของการรวม และ $\epsilon_f^p = f(P)$ คือสายพันธุ์พลาสติกที่จะแตกหักภายใต้ความดันคงที่ สำหรับ ϵ_f^p จะได้รับดังต่อไปนี้

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

D_1 และ D_2 เป็นค่าคงที่ของวัสดุ ความเค้นไฮโดรสแตติกคือกำหนดในรูปของความดันที่กำหนดโดยสมการต่อไปนี้ของ (EOS)

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

K_1 คือโมดูลัสจำนวนมาก K_2 และ K_3 เป็นค่าคงที่ของวัสดุ μ คือปัจจัยการบีบอัดหลังจากความเสียหายเริ่มสะสม ($D > 0$) อาจเกิดการพองพองได้ตอนนี้ความดันที่เพิ่มขึ้นเพิ่มเติม ΔP จะถูกเพิ่มเข้าไปเช่น

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

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

2.1.6.3 การใช้งานเชิงตัวเลข [48]

โมเดล Johnson Cook ถูกนำไปใช้ใน Explicit ตามสูตร Lagrangian ที่อัปเดตซึ่งใช้ในร่วมกับโครงการรวมเวลาความแตกต่างส่วนกลางสำหรับการรวมชุดผลลัพธ์ของสมการพลวัตที่ไม่ใช่เชิงเส้นวิธีการถือว่าการแก้ไขเชิงเส้นสำหรับความเร็วระหว่างสองขั้นตอนในเวลาต่อมาและไม่มีผลกระทบของเมทริกซ์ความแข็งคือจำเป็นในระหว่างการวิเคราะห์ ข้อเสียเปรียบของวิธีการที่ชัดเจนคือมีเสถียรภาพตามเงื่อนไขสำหรับปัญหาไดนามิกที่ไม่ใช่เชิงเส้นและความเสถียรสำหรับตัวดำเนินการที่ชัดเจนขึ้นอยู่กับค่าวิกฤตของการเพิ่มเวลาที่น้อยที่สุดสำหรับคลื่นการขยายตัวเพื่อข้ามใด ๆ องค์ประกอบในตาข่าย คำอธิบายโดยละเอียดเกี่ยวกับการนำแบบจำลองไปใช้กับแบบจำลองวัสดุที่กำหนดโดย

1) ขึ้นอยู่กับความเครียดในการคำนวณขั้นตอนเวลาปัจจุบันการเพิ่มขึ้นของความเครียดและการอัปเดตความเครียดและความเครียดในการทดลอง 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 $\{\Delta\varepsilon\}^T = \{\Delta\varepsilon_{xx} \Delta\varepsilon_{yy} \Delta\varepsilon_{zz} \Delta\varepsilon_{xy} \Delta\varepsilon_{yz} \Delta\varepsilon_{zx}\}$ อยู่เมทริกซ์ความแข็งของวัสดุ และเวกเตอร์การเพิ่มความเครียดตามลำดับ ด้วย n และ $n+1$ อ้างถึงก่อนหน้าและปัจจุบันเวลาตามลำดับ

2) คำนวณการทดลองเบี่ยงเบนในปัจจุบันเน้นการทดลองใช้ ${}^{trial}\{S\}^{n+1}$ เกี่ยวกับการสลายตัวของ การทดลองทั้งหมดเน้นการทดลองใช้ ${}^{trial}\{\sigma\}^{n+1}$ เป็นเบี่ยงเบน ${}^{trial}\{S\}^{n+1}$ และไฮโดรสแตติก σ_H^{n+1}

เน้นความเครียด

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

โดยที่ \dot{o}_{ij} คือฟังก์ชันเดลต้า

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

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

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

4) การคำนวณความเครียดเทียบเท่าปัจจุบัน

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

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

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

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

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

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

6) ตรวจสอบการให้ผลผลิต ณ เวลาปัจจุบัน $n+1$

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

ถ้า $F^{n+1}(\bar{\sigma}) > 0$, ส่งคืนความเค้นเบี่ยงเบนไปที่พื้นผิวผลผลิตโดยใช้อัลกอริทึมการส่งคืนแบบปริศมี

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

และคำนวณ $\Delta \varepsilon_p$, การเพิ่มขึ้นของความเครียดพลาสติกที่เท่ากันปัจจุบันสายพันธุ์พลาสติกสู่ความล้มเหลว $(\varepsilon_f^p)^{n+1}$ และอัปเดตตัวแปรความเสียหาย D^{n+1}

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

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

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

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

7) คำนวณปัจจัยการบีบอัด μ^{n+1} ตามกระแสดความเครียดเชิงปริมาตร ε_v^{n+1}

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

8) อัปเดตความดันโดยใช้ EOS

$$p^{n+1} = \{ K_1 \mu^{n+1} + K_2 (\mu^{n+1})^2 + K_3 (\mu^{n+1})^3 \} / K_1 \mu^{n+1} \quad (2.61)$$

ถ้า $\mu^{n+1} > 0$

หาก $D^{n+1} > 0$ การสูญเสียพลังงานในการคำนวณเนื่องจากความเสียหาย ΔU และยอดรวมการอัปเดตความดัน P^{n+1} โดยใช้การเพิ่มความดันเพิ่มเติม ΔP^{n+1}

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

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

เมื่อ $\Delta P^{n+1} = 0$

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

9) อัปเดตความเครียดทั้งหมด

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

10) สิ้นสุดวงจรการรวมทางตรง

11) คำนวณการเพิ่มเวลาที่คงที่ Δt และการเพิ่มขึ้นของความเครียด $\Delta \varepsilon$ โดยใช้รูปแบบการรวมวิธีการแตกต่างกันกลาง

2.1.6.4 โมเดล Johnson-Cook [48]

เป็นแบบจำลองเชิงปรากฏการณ์ที่มักใช้ในการทำนายการตอบสนองของโลหะอาจได้รับผลกระทบและการเจาะเนื่องจากสามารถสร้างความเครียดได้ การชุบแข็งผลกระทบจากอัตราความเครียดและการอ่อนตัวจากความร้อน คุณสมบัติเหล่านี้ควบคู่ไปในลักษณะที่คูณโดยใช้สิ่งต่อไปนี้

$$\sigma_y = \left[C_1 + C_2 (\varepsilon_{eff}^p)^N \right] \left(1 + C_3 \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{eff}^p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) \left[1 - \left(\frac{T - T_R}{T_M - T_R} \right)^M \right] \quad (2.65)$$

ที่ ε_{eff}^p คือสายพันธุ์พลาสติกที่มีประสิทธิภาพ T_M คืออุณหภูมิหลอมละลาย T_R คืออุณหภูมิอ้างอิงเมื่อกำหนด C_1, C_2, C_3, M และ N ; $\dot{\varepsilon}_0$ คืออัตราความเครียดอ้างอิง C_1, C_2, C_3, N และ M คือค่าคงที่ของวัสดุ การแตกหักในแบบจำลอง Johnson Cook ขึ้นอยู่กับมูลค่าของความเครียดพลาสติกที่เท่ากัน ความล้มเหลวคือสันนิษฐานว่าจะเกิดขึ้นเมื่อความเสียหายเกิน 1 ความเสียหายสะสม

ให้โดย

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_{eff}^p}{\varepsilon^F} \quad (2.66)$$

กับ

$$\varepsilon^F = \left[D_1 + D_2 \exp\left(D_3 \frac{P}{\sigma_{eff}}\right) \right] \left[1 + D_4 \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}_{eff}^p}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \right] \times \left[1 + D_5 \left(\frac{T - T_R}{T_M - T_R}\right)^M \right] \quad (2.67)$$

โดยที่ P คือความดัน σ_{eff} คือความเครียดของ Mises D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 คือพารามิเตอร์ ความล้มเหลว แบบจำลองของ Johnson-Cook ที่ใช้ในงานนี้คือขณะนี้มียู่ในไลบรารีแบบจำลอง วัสดุที่ชัดเจนของสำหรับองค์ประกอบทั้งเปลือกและของแข็ง

2.1.6.4 การกำหนด Formulation [48]

พฤติกรรมของวัสดุเชื่อมต่อกำหนดในรูปแบบของการยึดเกาะและการกระจัดแบบสัมพัทธ์ ระหว่างส่วนบนและส่วนล่างพื้นผิวของอินเทอร์เฟซ เวกเตอร์การกระจัดสัมพัทธ์คือประกอบด้วย การกำหนดส่วนประกอบปกติและการเลื่อนที่เป็นผลลัพธ์โดยการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างพื้นผิวด้านบน และด้านล่างขององค์ประกอบการติดต่อสำหรับ hexahedron จุดรวมจุดเดียวองค์ประกอบที่เป็น ของแข็งเวกเตอร์การกระจัดสัมพัทธ์สามารถเขียนได้เงื่อนไขของความเครียดปกติที่ผ่านความหนาและ แรงเฉือนนอกระนาบดังนี้

$$\{\tilde{0}\}^T = \{uvw\}^T = \{h^* \gamma_{xz} \ h^* \gamma_{yz} \ h^* \varepsilon_{zz}\}^T \quad (2.68)$$

โดยที่ $u = u_T - u_b$, $v = v_T - v_b$, และ $w = w_T - w_b h^*$ คือองค์ประกอบความหนาของ รูปทรงเรขาคณิตที่ปรับปรุงแล้วปฏิบัติตามมาตรฐานการกำหนดองค์ประกอบของอินเทอร์เฟซ, ความ ยึดหยุ่นเชิงเส้น องค์ประกอบโดยไม่มีผลกระทบของเมมเบรนสำหรับการสัมผัสองค์ประกอบสามารถ เขียนได้ดังนี้

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

โดยที่ σ_I , σ_{II} และ σ_{III} คือความเค้นระหว่างส่วนบนและพื้นผิวด้านล่างที่เกี่ยวข้องกับการ หลุดของโหนด I , II และโหนด III ตามลำดับ

2.2 กรอบการวิจัย

กรอบงานวิจัยเป็นการวางแผนการดำเนินงานของงานวิจัย เป็นการวางแผนความคิดของการทำวิจัย เพื่อบ่งชี้ถึงตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทำวิจัยจะต้องมีความสัมพันธ์กันและสอดคล้องกับระเบียบวิธีวิจัยบนพื้นฐานตามทฤษฎีต่างๆ ของระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความแม่นยำเที่ยงตรง สามารถตรวจสอบความถูกต้องของกระบวนการทำวิจัยได้ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กรอบงานวิจัย

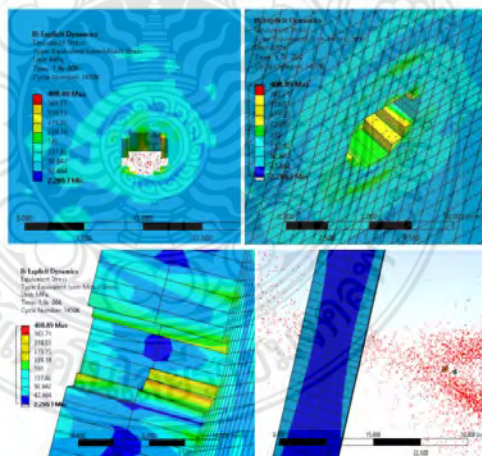
2.3 ระเบียบวิธีวิจัย

การวิจัยนี้มุ่งเน้นด้านการออกแบบพัฒนาเกราะกันกระสุนจากวัสดุจากอะลูมิเนียมเป็นหลักและวัสดุอื่นร่วม เพื่อหาพารามิเตอร์ที่สามารถต้านทานการเจาะทะลุของเกราะกันกระสุนโดยผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 โดยการออกแบบเกราะกันกระสุนใช้ SolidWorks และวิเคราะห์ด้วย ANSYS Explicit Dynamic ให้การวิเคราะห์หามีค่าความเสถียร เที่ยงตรง แม่นยำ จึงใช้คอมพิวเตอร์ประสิทธิภาพสูง เพื่อเป็นการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่ต้านทานเกราะกันกระสุนได้ ยังลดต้นทุนการทดสอบยิ่งจริง สามารถลดเวลาในการทดสอบ และสามารถนำการออกแบบการจำลองไปผลิตงานได้จริง

2.4 การทบทวนวรรณกรรม

สืบเนื่องจากการทบทวนวรรณกรรม ได้มีการวิเคราะห์เกราะกันกระสุน หลายวัสดุทั้งโลหะ อโลหะ และวัสดุผสม โดยการจำลองโดยผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน การจำลองออกแบบของเกราะ รูปร่างต่างๆ และการออกแบบโดยใช้โปรแกรม เป็นต้นจึงสรุปจากการทบทวนวรรณกรรมได้ดังนี้

นพพล กลางทัพ [12] ได้ศึกษาการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนบนโลหะด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการออกแบบด้วย Program Solidwork แล้วใช้การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ANSYS Explicit Dynamic โดยการทดสอบผ่านมาตรฐานการทดสอบ NIJ ระดับ 4 ด้วยกระสุนขนาด 7.62 mm ความเร็วกระสุน 878 ± 9.1 เมตรต่อวินาที ทำการวัสดุทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC) ส่วนวัสดุที่ทำเกราะกันกระสุนมี 3 ชนิด 1.SKD11 2.ทังสแตนคาร์ไบค์ (WC) 3.สแตนเลส (SUS304) การออกแบบการจำลองมีทั้งแบบเกราะชั้นเดียว และชั้นสองชั้น มุมกระแทกของกระสุนที่แผ่นเกราะกันกระสุน 0, 15, 30, 45 และ 60 องศา รวมทั้งมีตัวแปรคือความหนาของแผ่นเกราะกันกระสุน โดยการจำลองนี้ใช้ทฤษฎีความเสียหายของ Johnson-Holmquist, Johnson-Cook และ Steinberg Guinan Strength model ซึ่งจากการจำลองด้วย Program และการทดสอบจริงผลคล้ายคลึงกัน สรุปได้ว่าวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นสามารถคาดการณ์ความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ ก่อนผลิตงานจริง ลดเวลา อีกทั้งต้นทุนผลิตอีกด้วย ดังรูปที่ 2.5

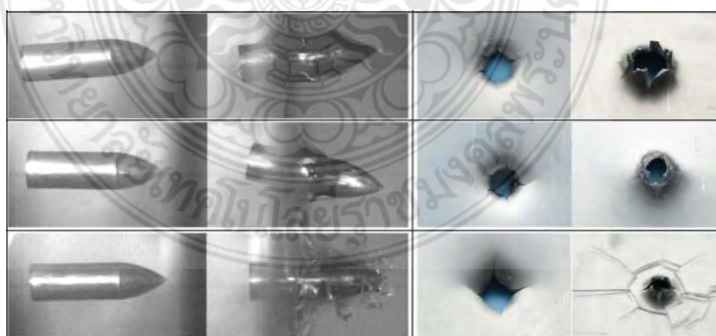


รูปที่ 2.5 ความเสียหายของ WC ความหนา 10 mm มุมเอียง 15 องศา [12]

ธรรม์ณชาติ วันแต่ง [13] ได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพความแข็งแรงของแผ่นเหล็กในเสื้อเกราะกันกระสุนโดยทำการเคลือบผิวฟิล์มแข็ง โดยจุดประสงค์มุ่งเน้นไปเพื่อให้มีน้ำหนักเบา มีประสิทธิภาพสูง และสามารถต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนได้ โดยการทดสอบนี้ยังด้วยกระสุนจริงตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 2 ด้วยขนาดของกระสุน 9 mm วัสดุของกระสุนคือตะกั่วหุ้มโลหะแข็ง

วัสดุที่ใช้ทำเกราะกันกระสุนมี 3 วัสดุ คือ 1. แผ่นเหล็กกล้า S50C หนา 3 mm ขนาด 220 X 250 mm ชุบแข็งด้วยเปลวไฟ 2.เคลือบผิวฟิล์มแข็ง Tic ความหนา 10 μm ขนาด 150 X 150 mm 3. เคลือบผิวฟิล์มแข็ง TicN ความหนา 10 μm ขนาด 150 X 150 mm สรุปผลการทดลองนี้ Tic และ TicN ไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพความแข็งแรงให้แก่เหล็กกล้าได้ แต่เกราะสามารถหยุดการทะลุได้ เนื่องจากจากชุบแข็งด้วยเปลวไฟของแผ่นเหล็กกล้า S50C

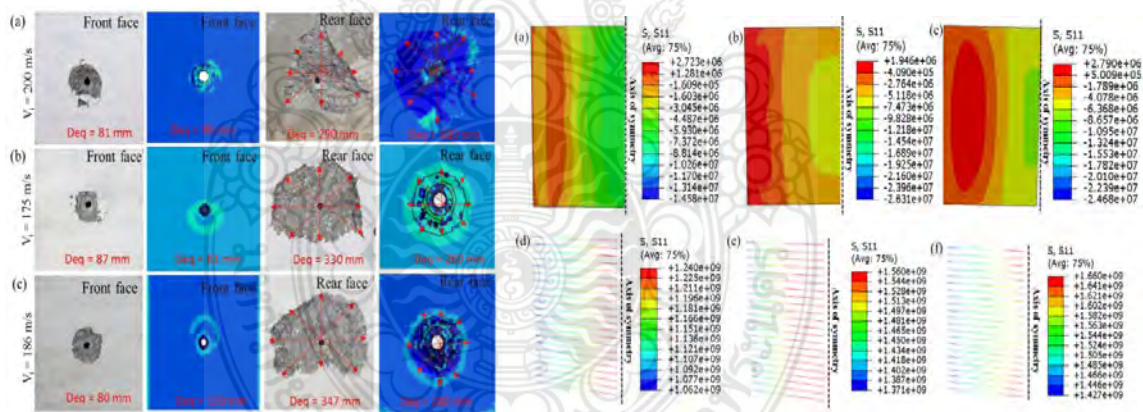
Wei Zhang และคณะ [14] ได้ศึกษาการทดลองเกี่ยวกับแผ่นลามิเนตโพลีเมอร์ อะลูมิเนียมสี่ชนิดที่ได้รับผลกระทบจากซีปนาวุธปลายแหลม ชั้นโพลีคาร์บอเนต PC 2 mm และชั้นโพลีเมธิลเมทาคริเลต PMMA 2 mm ถูกนำมาใช้เพื่อสร้างด้วยชั้น AA2024-T4 2 mm ซึ่งประกอบด้วยแผ่นลามิเนตโพลีเมอร์ - อะลูมิเนียมสองชั้นเหล่านี้ โดยไม่ยึด เพื่อให้เข้าใจถึงความแตกต่างของความแข็งแรงและความเหนียวระหว่างวัสดุเหล่านี้ได้ดีขึ้นจึงได้ทำการทดสอบแรงดึงกึ่งสถิตสำหรับพวกเขา การทดสอบแรงกระแทกของชั้น AA2024-T4 3 mm ซึ่งมีความหนาแน่นใกล้เคียงกับแผ่นสองชั้นถูกเปรียบเทียบในความต้านทานซีปนาวุธ ในการทดสอบแรงกระแทกแต่ละครั้งกระสุนปืนถูกขับเคลื่อนด้วยปืนที่ขับเคลื่อนด้วยแก๊สด้วยความเร็วกระแทกเหนือและต่ำกว่าความเร็ว จำกัด ซีปนาวุธของแผ่นเป้าหมายโดยส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 60–150 m/s และความเร็วเริ่มต้นและความเร็วคงเหลือที่ส่งผลกระทบต่อเป้าหมายถูกวัดโดยกล้องความเร็วสูง Photron FASTCAM SA5 จากผลลัพธ์นี้ได้รับความเร็ว จำกัด ซีปนาวุธของโครงสร้าง 7 ชนิด รวมถึงชั้นอะลูมิเนียมที่มีความหนาต่างกันสามชนิด และหลังจากการทดสอบแรงกระแทกแล้วจะมีการวัดความผิดปกติของพลาสติกของโลหะผสมอะลูมิเนียมในโครงสร้างสองชั้นแต่ละชั้นแสดงให้เห็นว่าลำดับชั้นโพลีเมอร์รูปร่างและพฤติกรรมเชิงกลของโพลีเมอร์มีผลต่อประสิทธิภาพของแผ่นลามิเนตโพลีเมอร์ - อะลูมิเนียม ในแผ่นสองชั้นในแง่ของการปรับปรุงความต้านทานซีปนาวุธของ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ความเสียหายของการยิงเจาะทะลุแผ่นลามิเนตโพลีเมอร์และอะลูมิเนียม [14]

M.A.Iqbal และคณะ [15] ได้มีการศึกษาการกระจายพลังงานในชิ้นงานคอนกรีตอัดแรงเทียบกับผลกระทบของโปรเจกไทล์เหล็กแท่งยาว ได้มีการทดลองโดยที่แผ่นคอนกรีตอัดแรงที่มีความหนา 60, 80 และ 100 mm ได้รับผลกระทบจากโปรเจกไทล์เหล็ก 1 kg ที่ความเร็วปกติใกล้เคียงกับ

ขีด จำกัดของซีปนาวุธ แรงอัดเริ่มต้น 10 และ 20% ของกำลังอัดที่ไม่ได้ กำหนด 40 MPa ได้รับการเหนี่ยวนำในชิ้นงานผ่านการปรับความตึงล่วงหน้าด้วย ความแข็งแรงสูงเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 mm (1646 MPa) สายเหล็กนอกจากนี้ยังมีการจัดเตรียมการเสริมแรงไว้ในชิ้นงานคอนกรีตอัดแรงเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพโดยตรงกับชิ้นงานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เทียบเท่ากันได้ พบว่าการอัดแรงอัดในคอนกรีตมีประสิทธิภาพในการทำให้เกิดความเสียหายโดยทั่วและช่วยเพิ่มความต้านทานซีปนาวุธ อิทธิพลของแรงอัดมีความโดดเด่นมากขึ้นเมื่อมีความหนาของเป้าหมายเพิ่มขึ้นและความเร็วของกระสุนปืนลดลง การค้นพบการทดลองได้รับการทำซ้ำโดยการจำลององค์ประกอบบนไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อทำความเข้าใจลักษณะเฉพาะของลวดอัดแรงเหล็กเสริมและคอนกรีต แรงกดอัดได้รับการถ่ายโอนในเชิงตัวเลขในคอนกรีตโดยการแนะนำความเค้นเริ่มต้นในเส้นแล้วทำการจำลองเสมือนสถิตต่อมาได้มีการจำลองการเจาะทะลุด้วยโพรเจกไทล์โดยใช้แบบจำลอง Johnson-Holmquist และ Johnson Cook สำหรับคอนกรีตและแบบจำลอง Johnson-Cook elasto-viscoplastic model สำหรับการเสริมแรง การจำลององค์ประกอบ ผลการคอนกรีตอัดแรงที่แตกต่างกันและคอนกรีตอัดแรงไม่ถูกนำมาเปรียบเทียบและคอนกรีตที่มีความเค้นเหนี่ยวนำ 20% ให้ขีดจำกัด ซีปนาวุธสูงสุดและความเสียหายต่ำสุด ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การทดสอบการเจาะทะลุของคอนกรีต[15]

G. Yubo และคณะ [16] ได้ศึกษาอิทธิพลของชั้นกาวที่ใช้ในการยึดกระเบื้องเซรามิกและแผ่นหลังต่อประสิทธิภาพการกระแทกความเร็วสูงของเกราะคอมโพสิตเซรามิก / โลหะได้รับการศึกษาโดยการศึกษาเชิงทดลองและเชิงตัวเลข มีการพิจารณาชิ้นงานสองประเภทคือโครงสร้างเซรามิกเสาหินและโครงสร้างเซรามิกเคลือบที่ได้รับการสนับสนุนจากโลหะผสมอะลูมิเนียมโดยมีความหนาของชั้นกาวที่ต่างกัน (0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm และ 2.0 mm) ผลการศึกษาพบว่าขนาดของเซรามิกที่แตกร่วงลดลงตามความหนาของกาวที่เพิ่มขึ้น และขนาดของชิ้นส่วนในโครงสร้างเซรามิก อะลูมิเนียมเคลือบด้วยกาวมีขนาดเล็กกว่าชิ้นส่วนในโครงสร้างเซรามิก อะลูมิเนียมเสาหิน

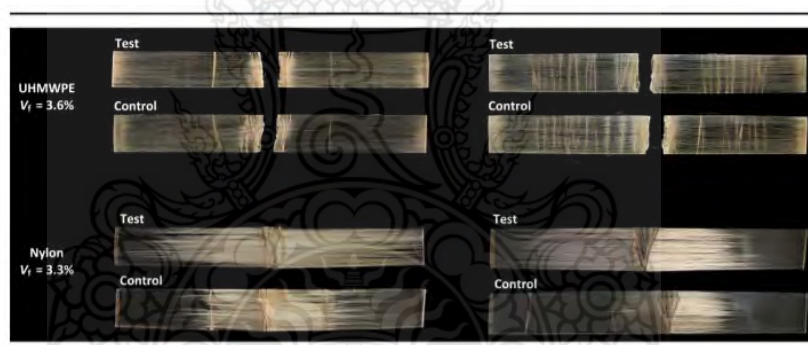
พบการเปลี่ยนแปลงวิธีการแตกร้าที่ส่วนต่อประสานชั้นเซรามิก กาวของเกราะคอมโพสิตเซรามิก เคลือบ แสดงให้เห็นว่าความสามารถในการดูดซับพลังงานจะดีขึ้นในทิศทางด้านข้างและความ ล้มเหลวของแผ่นเซรามิกที่สองจะล่าช้าจากการเปลี่ยนแปลง ความลึกของการเจาะทะลุของโครงสร้าง เซรามิกเสาหิน อะลูมิเนียมที่เชื่อมด้วยอีพอกซีเรซินพบว่ามากกว่าเกราะที่ไม่มีกาว แต่การเพิ่มชั้นกาว ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการรับแรงกระแทกสำหรับโครงสร้างเซรามิก อะลูมิเนียมลามิเนต นอกจากนี้ ความลึกของการเจาะยังลดลงด้วยการเพิ่มความหนาของกาวสำหรับเกราะคอมโพสิตทั้งสองรูปแบบ จากนั้นผลการจำลองพบว่าความหนาของกาวมีผลเพียงเล็กน้อยต่อการแพร่กระจายคลื่นความเค้น ของชั้นกาวด้านใน เนื่องจากความแตกต่างของอิมพีแดนซ์ยืดหยุ่นระหว่างแผ่นเป้าหมายทำให้แอมพลิจูดของความดันในแผ่นต่างๆลดลงโดยการเพิ่มชั้นกาว โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับโครงสร้างเซรามิก อะลูมิเนียมเคลือบ ประการสุดท้ายความเค้นเฉือนและอัตราความเค้นเฉือนของชั้นกาวลดลงตามการ เพิ่มขึ้นของความหนาของกาวซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการรับแรงกระแทกของเกราะคอมโพสิต เคลือบลามิเนต

V. Vijeesh และคณะ [17] ได้ศึกษาการเปลี่ยนรูปและประสิทธิภาพของซีปนาวุธของ โพรเจกไทล์อะลูมิเนียมทรงกรวยที่กระทบกับชิ้นงานอะลูมิเนียมแบบบาง อิทธิพลของมุมเอพิคซ์ กลไกของการทำลายของกระสุนปืนและการต้านทานซีปนาวุธของเป้าหมายแบบบางที่ได้รับ ผลกระทบจากโพรเจกไทล์ทรงกรวยปลายหักได้รับการกล่าวถึงในบริบทของอิทธิพลของมุมปลายของ โพรเจกไทล์ การเปลี่ยนในโหมดความล้มเหลวภายในเป้าหมายเกิดขึ้นเนื่องจากมุมยอดของโพรเจก ไทล์ถูกเปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ยังมีการกล่าวถึงผลกระทบต่อการเปลี่ยนรูปแบบโพรเจกไทล์และ คุณสมบัติของซีปนาวุธ มีการเกี่ยวกับกลไกการเปลี่ยนรูปแบบโพรเจกไทล์และความทำลายของ กระสุนปืนที่อยู่ใกล้ความเร็ว จำกัดของซีปนาวุธพร้อมหลักฐานการทดลองที่สนับสนุน การจำลองเชิง ตัวเลขโดยใช้ ABAQUS / Explicit สามารถทำนายการเปลี่ยนรูปแบบโพรเจกไทล์และพฤติกรรม เป้าหมายที่เกี่ยวข้องได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังรูปที่ 2.8



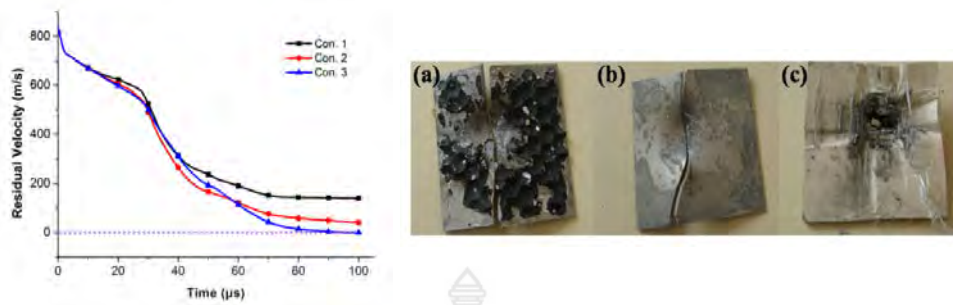
รูปที่ 2.8 การออกแบบมุมของหัวกระสุนของโพรเจกไทล์อะลูมิเนียมทรงกรวย [17]

F. Adnan และคณะ [18] ได้ศึกษาวัสดุผสมที่ใช้เส้นใย UHMWPE การเพิ่มคุณสมบัติการกระแทกที่เกิดจากแรงกดจากการตรวจสอบคุณสมบัติการรับแรงกระแทกของคอมโพสิตโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมเส้นใย UHMWPE แบบทิศทางเดียวอย่างต่อเนื่องเพื่ออธิบายผลกระทบของแรงกดที่มีต่อลักษณะการดูดซับพลังงาน Prestress ภายในตัวอย่างคอมโพสิตถูกผลิตขึ้นโดยนำเส้นใย UHMWPE ไปที่การกระดืบซึ่งจะถูกปล่อยออกมาก่อนการขึ้นรูป จากการทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปตัวอย่างที่ผ่านการบีบอัดด้วยแรงหนีตเหล่านี้จะดูดซับพลังงานมากกว่าที่ควบคุม (ไม่ได้รับแรงกด) ถึง 20% โดยมีบางกลุ่มถึง 30–40% โดยทั่วไปไม่ว่าจะสร้างแรงกดด้วยวิธียืดหยุ่นหรือความหนืด การตีบอนด์แบบไฟเบอร์ - เมทริกซ์ถือได้ว่าเป็นกลไกการดูดซับพลังงานที่สำคัญในคอมโพสิตประเภทนี้ แต่สิ่งนี้ไม่ปรากฏชัดเจนในการศึกษาในปัจจุบัน แต่กลับพบหลักฐานการหักล้างที่อินเทอร์เฟซสกินคอร์ภายในเส้นใย UHMWPE บริเวณผิวหนังที่มีความแข็งแรงลดลงและมีกิจกรรมความหนืดในระยะยาว การขัดผิวด้วยแกนกลางดูเหมือนจะมีบทบาทในการดูดซับพลังงานอย่างมีนัยสำคัญภายในตัวอย่างอัดแรงและเราเชื่อมั่นเป็นกลไกที่ไม่รู้จักมาก่อน ดังรูปที่ 2.9



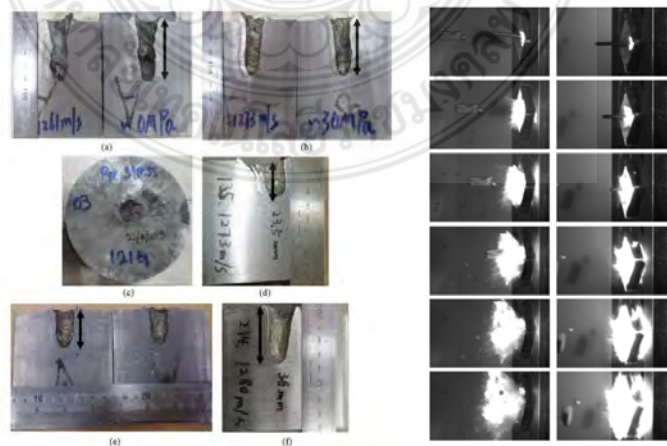
รูปที่ 2.9 การทดสอบคอมโพสิตที่ใช้เส้นใย UHMWPE [18]

L.Weilan และคณะ [19] ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของชั้นลามิเนตด้านหลังที่แตกต่างกันต่อประสิทธิภาพขีปนาวุธของเกราะคอมโพสิตเซรามิก บทความนี้รายงานส่วนใหญ่เกี่ยวกับเกราะคอมโพสิตเซรามิกชนิดใหม่ที่มีลามิเนตด้านหลังของ Ti6Al4V / UHMWPE / Ti6Al4V เทียบกับ กระสุนปืนเจาะเกราะ 12.7 mm ที่ความเร็ว 818 m/s กลไกของเกราะคอมโพสิตเซรามิกทั้งหมดกับกระสุนปืนและการทำงานของแต่ละชั้นในลามิเนตด้านหลังได้รับการตรวจสอบอย่างเป็นระบบเกี่ยวกับการทดลองและการจำลองเชิงตัวเลข ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าชั้น Ti6Al4V ชั้นนอกสุดให้การสนับสนุนชั้น UHMWPE ซึ่งนำไปสู่ชั้น UHMWPE ที่แสดงประสิทธิภาพของบัพเฟออร์ที่สูงมากในระหว่างกระบวนการกระแทก ในขณะที่ชั้น UHMWPE ตรงกลางยังมีฟังก์ชันสมดุลพลังงานระหว่างชั้น Ti6Al4V แรกและชั้นนอกสุดเพื่อทำให้เกิดความเสียหายเล็กน้อยในชั้นลามิเนตด้านหลัง ดังนั้นการกำหนดค่านี้จึงมีส่วนในการดูดซับหรือกระจายพลังงานของกระสุนปืนผลกระทบมากขึ้นป้องกันการทะลุของกระสุนปืนได้สำเร็จ ดังรูปที่ 2.10



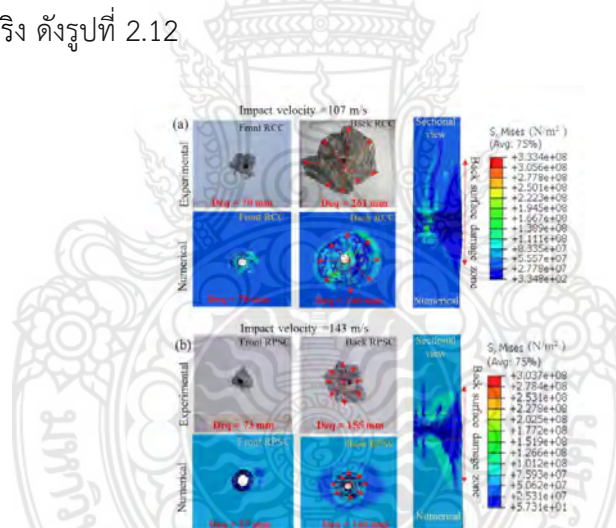
รูปที่ 2.10 กราฟและความเสียหายการจำลองการต่อต้านการเจาะทะลุของเกราะกันกระสุน [19]

S. Ahmad และคณะ [20] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงขีด จำกัด ชีปนาวุธของเกราะโลหะ เซรามิกสองชั้น บทความนี้จะศึกษาวิธีการทดลองและเชิงตัวเลขเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพชีปนาวุธของ เกราะเซรามิก ในขั้นต้นจะสาธิตการตั้งค่าการทดลองเพื่อกำหนดความเค้นล่วงหน้าให้กับเกราะสอง ชั้นเซรามิกโลหะและศึกษาความลึกของการเจาะเพื่อวัดประสิทธิภาพของชีปนาวุธซึ่งเป็นฟังก์ชันของ ความเข้มของความเค้นก่อนการตรวจสอบความถูกต้องของการศึกษาเชิงตัวเลขก่อนหน้าที่เกี่ยวกับ ผลกระทบของก่อน ความเครียดกับขีดจำกัด ชีปนาวุธของเกราะเซรามิก ประการที่สองโมดูลได้รับการ ออกแบบและทดสอบเพื่อให้บรรลุความทำลายของอินเตอร์เฟซในชุดเกราะเซรามิกที่มีหลายชั้น อินเตอร์เฟซ ประการสุดท้ายอิทธิพลของความหนาของแผ่นปิดเหล็ก (CP) ต่อสมรรถนะชีปนาวุธของ เซรามิก SiC ได้รับการศึกษาผ่าน AUTODYN การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับปกติและเฉียง (NATO 60 °) เทียบกับโพรงเจาะทะลุแกว่งยาว (LRP) ด้วยปลายทรงกรวย LRP และ CP ถูกสร้าง แบบจำลองโดยใช้อนุภาคไฮโดรไดนามิก (SPH) ของอนุภาคที่ราบรื่นและส่วนที่เหลือของ ส่วนประกอบถูกสร้างแบบจำลองโดยใช้โดเมน Lagrangian การวิเคราะห์เชิงตัวเลขของโมดูลเกราะ จะเปรียบเทียบผ่านความลึกของการเจาะ (DOP) และความยาวคงเหลือของ LRP สำหรับความหนา ของแผ่นปิดที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การจำลองทดสอบการยิงเกราะกันกระสุนโลหะ [20]

Abhishek Rajput และคณะ [21] การทดสอบการ ballistic ของชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็ก และคอนกรีตอัดแรงรับแรงอัดได้ 48 MPa ต่อกระสุนเหล็กแข็ง 0.5 kg ได้ทำการศึกษาโดยการทดลองยิงและการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม ABAQUS เป้าหมายสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 450 mm x 450 mm ที่ความหนา 60 และ 100 mm ได้รับผลกระทบตามปกติโดยใช้กระสุนเหล็กชุบแข็งชนิดแข็งขนาด 0.5 kg ขนาดของแกนโต 19 mm และยาว 225 mm ความเค้นเริ่มต้นประมาณ 4-5 MPa กระทำด้วยความเร็วในช่วง 100-255 m/s พบว่าคอนกรีตคอนกรีตอัดแรงมีความสามารถในการกักร่อนที่แท้จริงสูงกว่าเหล็กเสริมคอนกรีตร้อยละ 12.1 และร้อยละ 6.4 และสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาประมาณร้อยละ 16.8 และร้อยละ 22 ความต้านทานต่อกระสุนสำหรับความหนาและชนิดของคอนกรีตด้วยดังนั้นความต้านทานต่อกระสุนที่เกิดจากการลดลงของความเร็วกระสุนปืนเกิดขึ้นมากที่สุดในการรับแรงตามด้วยคอนกรีตเสริมใยเหล็กและคอนกรีตธรรมดาตามลำดับ ซึ่งผลการคำนวณได้อย่างแม่นยำความเร็วที่เหลือกระสุนปืนและยังเห็นความต้านทาน ballistic สูงสุดที่คอนกรีตรับแรงกับผลที่เกิดขึ้นจริง การจำลองของคอนกรีตแต่ละชิ้นมีค่าเบี่ยงเบนประมาณร้อยละ 8 จากผลที่เกิดขึ้นจริง ดังรูปที่ 2.12

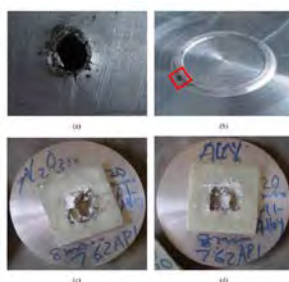


รูปที่ 2.12 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการจำลอง[21]

G. Tiwari และคณะ [22] การศึกษาสมรรถนะของเส้นผ่านศูนย์กลางช่วงและการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของโลกรการต้านทานการชีปนาวุธและการดุดกลืนพลังงานในการเปลี่ยนรูปแผ่นพลาสติกด้วยแผ่นอะลูมิเนียมขนาด 1100-H12 ที่ความหนา 1 mm ต่อแรงกระแทกที่เกิดจากการเจาะทะลุ การทดลองดำเนินการผ่านปืนแรงดันในขณะที่ใช้การจำลองเชิงตัวเลข ABAQUS / Explicit finite element emulation เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นงานแตกต่างกันไปตามช่วง 68, 100, 150, 200, 255, 350, 450, 550, 650 และ 750 mm ส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm แตกต่างกันไปตามรูปแบบเสาหินชั้นที่สัมผัส 2 x 0.5 mm และระยะเว้นระยะห่างระหว่างระยะห่างระหว่างสองชั้นของความหนา 0.5 mm มีค่าแตกต่างกันคือ 4.5, 10, 20, 30, 40, 50 และ

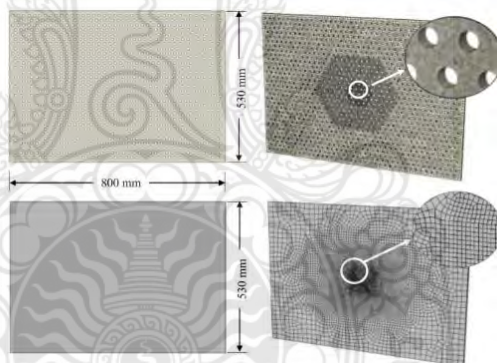
60 mm นอกจากนี้การดุดกลืนพลังงานในการเปลี่ยนรูปพลาสติกได้จากผลการจำลองเชิงตัวเลขผ่านโปรแกรม เป้าหมายของ Ballistic และความผิดปกติเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเส้นผ่าศูนย์กลางของเป้าหมายเพิ่มขึ้นร้อยละ 43.2 เมื่อเส้นผ่าศูนย์กลางของแผ่นเป้าหมายเพิ่มขึ้นจาก 68 เป็น 750 mm ความผิดปกติสูงสุดยังเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขึ้นไปถึงขีดจำกัด 255 mm ซึ่งต่อมามีลดลงเล็กน้อยสำหรับเส้นผ่าศูนย์กลางช่วงที่สูงขึ้น

M.J. Pawar และคณะ [23] การวิเคราะห์องค์ประกอบไฟไนต์เอลิเมนต์จากผลกระทบของกระสุน 7.62 mm AP บนการผสมเซรามิก / อะลูมิเนียมแบบสองชั้นได้ดำเนินการโดยใช้ AUTODYN hydro-code แบบจำลอง Johnson-Cook ใช้สำหรับโลหะและแบบจำลอง Johnson-Holmquist ใช้สำหรับเซรามิก โมเดลได้รับการตรวจสอบกับการทดลองที่ทำจากวัสดุผสมสองชั้น Al_2O_3 / Al 5083 และ AlN / Al 5083 ได้รับการสังเกตว่าเครื่องเซรามิกมีสมรรถนะหรือประสิทธิภาพในการเอาชนะกระสุนเมื่อเปรียบเทียบกับเซรามิก Al_2O_3 การพิจารณาความผิดปกติของแผ่นรองพื้นและค่าความเครียดของพลาสติกจะพิจารณาในการศึกษานี้เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของการทดสอบ ผลลัพธ์จะช่วยให้สามารถออกแบบวัสดุสำหรับการพัฒนาโครงสร้างเพื่อป้องกันผลกระทบจากกระสุน 7.62 mm ที่ความเร็วของอาวุธยุทธโปกรณ์ พื้นผิวโค้งของแผ่นหลังโลหะเป็นข้อจำกัด การเคลื่อนที่ไปในทิศทางใดๆ โดยใช้ความเร็วของกระสุนปืนที่สัมผัสกับเป้าหมายครั้งแรกคือ 840 m/s ซึ่งจะลดลงเมื่อมีการกระจายตัวของพลังงานจลน์ในระหว่างการเจาะในส่วนของความแข็งแรงของกระสุนปืน (เกรดเหล็ก 4340) และแผ่นโลหะด้านหลัง (Al5083H116) เป็นแบบจำลองโดยใช้ความแข็งแรงและแบบจำลองความเสียหาย Johnson-Cook (JC) แบบจำลองนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่ออธิบายรูปแบบการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของปรากฏการณ์สำหรับโลหะโดยพิจารณาจากความเค้น, ความเครียดและอุณหภูมิ ความเค้น (von Mises) ในรูปแบบ JC การศึกษาในครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนรูปแผ่นรองพื้นในเซรามิก / Al-5083 ทั้งสองชั้นจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเซรามิก AlN ดีกว่า Al_2O_3 ในการสร้างแผ่นรอง พลังงานความเครียดจากพลาสติกของแผ่นรองจะน้อยกว่ามากเมื่อ AlN เป็นชั้นด้านหน้าของคอมโพสิตแสดงประสิทธิภาพที่เหนือกว่าของ Al_2O_3 ความเค้นเฉือนที่สูงขึ้นของ AlN มากกว่า Al_2O_3 ที่ใช้ในการยับยั้งการเกิดรอยร้าวของปีกภายใต้แรงอัดทำให้เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ AlN มีค่ามากกว่า Al_2O_3 ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การทดสอบการยิงของกระสุน 7.62 mm [23]

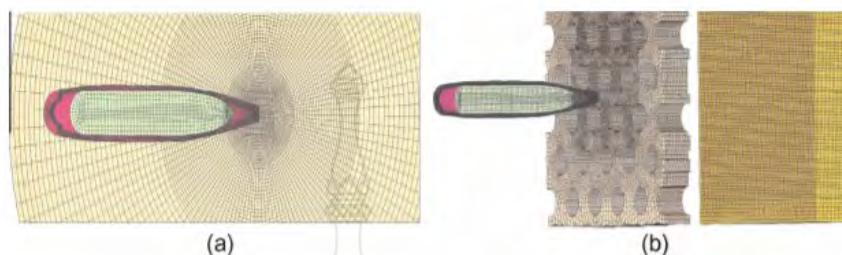
M. Wasif และคณะ [24] ได้ศึกษาการตรวจสอบเชิงทดลองและเชิงตัวเลขเกี่ยวกับการตอบสนองของซีปนาวุธของเกราะหลายระดับต่อซีปนาวุธเจาะเกราะงานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการตรวจสอบการทดลองและตัวเลขของการป้องกันซีปนาวุธให้บริการโดยการรวมกันของพรุนและฐานแผ่นเกราะ ใช้กระสุนปืน เจาะเกราะ 7.62 mm ในระหว่างการทดลองเพื่อตรวจสอบการตอบสนองของซีปนาวุธของแผ่นเกราะฐานอะลูมิเนียมและการผสมผสานระหว่างเหล็กเจาะรูและแผ่นเกราะฐานอะลูมิเนียม ซีปนาวุธเจาะเกราะสามารถเจาะแผ่นเกราะพื้นฐานได้ในขณะที่การรวมกันของแผ่นเกราะเจาะรูและฐานสามารถหยุดการเจาะของกระสุนปืนเจาะเกราะได้ วิธีการองค์ประกอบ จำกัดตามรูปแบบตัวเลขที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อตรวจสอบปรากฏการณ์ของการเอาชนะรูพรุนและการรวมกันแผ่นฐานเกราะ การแตกหักที่เปราะเกิดจากการโค้งงอของแกนกระสุนปืนเนื่องจากคาดการณ์ผลกระทบที่ไม่สมมาตรและชิ้นส่วนที่เป็นผลของกระสุนปืนไม่สามารถทะลุผ่านแผ่นเกราะฐานได้ หลุมอุกกาบาตเกิดขึ้นบนพื้นผิวของแผ่นเกราะฐานจากผลกระทบของชิ้นส่วนกระสุนปืน แบบจำลองเชิงตัวเลขสามารถทำนายการเติบโตของรูและการเจาะของกระสุนปืนได้เมื่อมีเพียงแผ่นเกราะพื้นฐานเท่านั้นที่ได้รับผลกระทบจากกระสุนปืน ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 รายละเอียดภาพถ่ายของฐานและแผ่นเกราะเจาะรู [24]

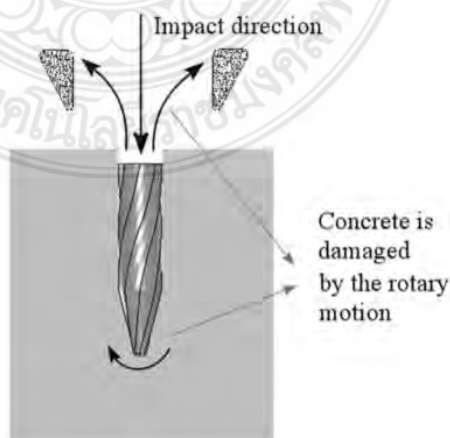
K. Namik และคณะ [25] ได้ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมซีปนาวุธของแผ่นเกราะเจาะรูที่มีความแข็งสูงต่อกระสุนปืน เจาะเกราะ 7.62 mm ในบทความนี้มีการตรวจสอบกลไกการเอาชนะที่สำคัญบางประการของแผ่นเจาะรูที่มีความแข็งสูงเทียบกับกระสุนเจาะเกราะ 7.62 × 54 mm ผลการทดลองและตัวเลขระบุกลไกการทำลายสามอย่างที่มีประสิทธิภาพบนแผ่นเกราะที่มีรูพรุนซึ่งเป็นกองกำลังที่ไม่สมมาตรเบี่ยงเบนกระสุนจากวิถีของมันการแตกหักของแกนกระสุนและการสึกกร่อนของแกนกระสุน การทดสอบเบื้องต้นดำเนินการกับแผ่นเกราะเสาหินขนาด 9 และ 20 mm ความหนาเพื่อตรวจสอบความเที่ยงตรงของพารามิเตอร์การจำลองและแบบจำลองวัสดุ ลักษณะสุ่มของการทดสอบซีปนาวุธบนแผ่นเกราะเจาะรูได้รับการวิเคราะห์โดยพิจารณาจากเขตผลกระทบของกระสุนที่เกี่ยวข้องรู สถานการณ์ต่างๆรวมถึงแบบจำลองความล้มเหลวของกระสุนถูกตรวจสอบเพิ่มเติมเพื่อกำหนดกลไกของความล้มเหลวของกระสุน ข้อตกลงระหว่างตัวเลขและผลการทดลองเพิ่มขึ้นอย่างมี

นัยสำคัญโดยรวมถึงเกณฑ์ความล้มเหลวของกระสุนและเกณฑ์การสึกกร่อนของหัวกระสุนในการจำลอง ดังที่แสดงในผลการทดสอบสามารถบรรลุข้อตกลงที่ตีระหว่างการจำลอง Ls-Dyna และข้อมูลการทดลองและกลไกการทำลายของแผ่นปรุได้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจน ดังรูปที่ 2.15



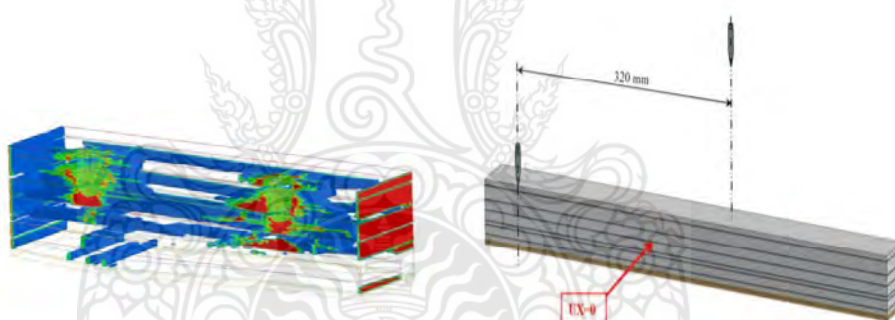
รูปที่ 2.15 แบบจำลองตาข่าย FE ของ (a) แผ่นเกราะที่ไม่มีรูพรุนและ (b) ชั้นเกราะมีรูพรุน [25]

W. Jun และคณะ [26] ได้ศึกษาการออกแบบโครงสร้างหัวรบแบบเกลียวใหม่ซึ่งการหมุนตัวเองทำให้คอนกรีตล้มเหลวและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเจาะของกระสุนปืน ประสิทธิภาพการเจาะทะลุของกระสุนปืนเกลียวที่นำเสนอและกระสุนปืนวงรีแบบดั้งเดิมได้ถูกจำลองขึ้นภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน ผลการศึกษาเชิงตัวเลขแสดงให้เห็นว่าความเร็วคงเหลือของโพรเจกไทล์และสัดส่วนที่เหลือของพลังงานจลน์สูงกว่ากระสุนปืนวงรีโดยมากที่สุด 28.2% และ 28.7% ตามลำดับ งานนี้แนะนำกฎเฉพาะระหว่างมุมการหมุนที่แตกต่างกันและความเร็วคงเหลือเมื่อขึ้นงานคอนกรีตได้รับผลกระทบจากหัวรบเกลียวตั้งแต่ 700 m/s , 1,000 m /s นอกจากนี้ยังให้ความเร็วเชิงมุมในการหมุนเทียบกับเส้นโค้งเวลาที่แตกต่างกัน ความเร็วเริ่มต้นและมุมการหมุน นอกจากนี้เพื่อตรวจสอบวิธีการสร้างแบบจำลองและพารามิเตอร์วัสดุที่เลือกการตอบสนองแบบไดนามิกของโครงสร้างและพฤติกรรมความล้มเหลวของคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับผลกระทบจากโพรเจกไทล์รูปวงรีที่ความเร็วต่างกันจะถูกศึกษาเป็นตัวเลขด้วยซอฟต์แวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์ LS-DYNA ผลลัพธ์ที่เป็นตัวเลขสอดคล้องกับปรากฏการณ์การทดลองและข้อมูลที่ได้รับจาก Hanchak, SJ et al. ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แผนภาพหลักการทำงานของกระสุนปืนเกลียว [26]

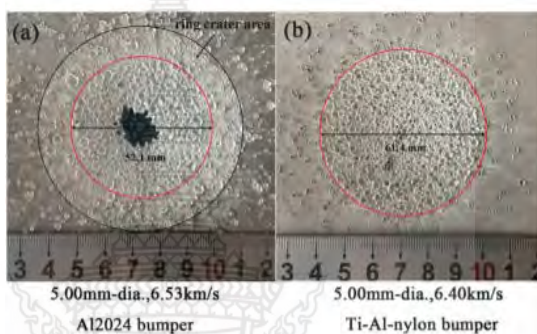
B. Tomáš และคณะ [27] ในผลของโครงการวิจัยที่ใช้การจำลองเชิงตัวเลขของการโต้ตอบแบบโพรงเจกไทล์กับกระจกเกราะโปร่งใสสำหรับวัตถุที่ได้รับการป้องกัน เช่น ธนาคาร บ้านของบุคคลสำคัญหรือยานพาหนะวีไอพี และแกนในระบบต่อต้านการก่อการร้ายเพื่อการคุ้มครองประชากรพลเรือน (เช่นกำแพงกันรอบหอไอเฟล) ตาม STANAG 4569 AEP-55 เล่ม 1 จะนำเสนอ การวิจัยเกี่ยวข้องกับผลกระทบของปฏิสัมพันธ์แบบโพรงเจกไทล์ที่มีต่อวงจรชีวิตของแก้วเกราะใส การศึกษาได้ศึกษาขอบเขตความเสียหายการแยกชั้นของกระจกเกราะใสแต่ละชั้นและความลึกของการเจาะกระสุนปืนที่ระดับการป้องกัน 2 [PARTIAL] (7.62 mm x 39 API BZ) และระดับ 3 กระสุนปืน 7.62 mm x 54R B32 API เท่านั้น ที่อุณหภูมิ -32°C , 20°C และ 55°C ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ซึ่งเป็นแบบจำลองกระจกเกราะโปร่งใสถูกสร้างขึ้นสำหรับการยิงหลายจุดโดยกระสุนสองลูกในระยะที่กำหนดไว้ล่วงหน้า เพื่อจุดประสงค์ในการคำนวณ LS-Dyna Explicit Solver ถูกนำมาใช้เพื่อให้สามารถประเมินความน่าเชื่อถือของแบบจำลองเชิงตัวเลขเชิงทฤษฎีสำหรับการใช้งานเฉพาะของผลกระทบแบบโพรงเจกไทล์ (คลื่นความดัน) ในชุดประกอบที่ประกอบด้วยวัสดุหลายชนิด ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การจำลองยิงกระจกเกราะโปร่งใสล้มเหลวที่อุณหภูมิ $+55^{\circ}\text{C}$ [27]

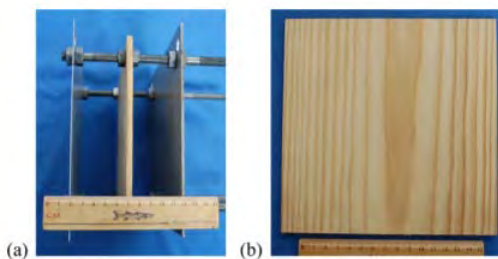
P. Zhang และคณะ [28] การศึกษาประสิทธิภาพการป้องกันของ Whipple shield ที่ได้รับการปรับปรุงโดยวัสดุที่ให้เกรดความต้านทานของ Ti-Al-nylon โครงสร้างป้องกันอวกาศ / เศษซากที่ปรับปรุงใหม่สำหรับยานอวกาศถูกนำเสนอโดยใช้กันชนที่สร้างจากวัสดุที่มีความต้านทานประสิทธิภาพในการส่งผลกระทบต่อความเร็วสูงของโล่ที่ได้รับการปรับปรุงโดยวัสดุเกรดอิมพีแดนซ์ Ti-Al-nylon และอะลูมิเนียมวิปเปิลซิลด์ได้รับการตรวจสอบโดยใช้ปืนแก๊สขนาดเบาสองชั้นตอนที่มีความเร็ว 3.50 และ 6.50 km/s มีการศึกษาลักษณะการกระแทกรวมถึงเศษเมฆกระจายในกันชนและรูปแบบความเสียหายที่ผนังด้านหลัง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าความสามารถในการป้องกันของ Ti-Al-nylon shield นั้นมากกว่าของอะลูมิเนียมวิปเปิลซิลด์ที่กันชนมีความหนาแน่นเท่ากัน มีการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีและการจำลองเชิงตัวเลขเพื่อสำรวจว่าเหตุใดซิลด์ในลอน Ti-Al-nylon จึงมีประสิทธิภาพในการป้องกันที่ดีขึ้น ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าบัมเปอร์ในลอน Ti-Al-nylon สามารถสร้าง

แรงกดกระแทกที่สูงขึ้นและทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นซึ่งจะมีประสิทธิภาพมากขึ้นสำหรับการแยกชิ้นส่วน กระสุนปืน นอกจากนี้ยังกล่าวถึงการแพร่กระจายคลื่นในกระสุนปืนและกันชน พบว่าการแพร่กระจายของคลื่นกระแทกได้รับผลกระทบจากความต้านทานแรงกระแทกที่ไม่ตรงกันในกันชนวัสดุที่มีการจัดระดับความต้านทานเพื่อให้เอฟเฟกต์ความร้อนจากการกระแทกและมุมการขยายตัวของเศษเพิ่มขึ้น วัสดุที่มีอุณหภูมิการหลอมเหลวและการกลายเป็นไอต่ำกว่าจะเป็นประโยชน์ในการปรับปรุงประสิทธิภาพของโล่ในลอน Ti-Al-nylon ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความสามารถในการป้องกันสำหรับการป้องกันอวกาศ / เศษ ดังรูปที่ 2.18



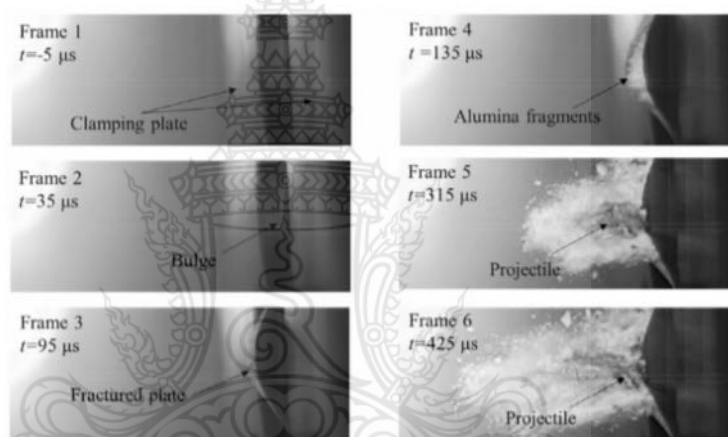
รูปที่ 2.18 มุมมองของรูปแบบพื้นที่เสียหายตรงกลางที่ผนังด้านหลัง [28]

W. Xue-zhong และคณะ [29] การศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับประสิทธิภาพการป้องกันของโล่ ยัดไส้ไม้ ความพยายามที่จะหาโล่ที่เบาสำหรับป้องกันการกระแทก จึงเสนอโล่ยัดไส้ไม้ในบทความนี้โดยพิจารณาจากคุณสมบัติของไม้เช่นความหนาแน่นต่ำต้นทุนต่ำความแข็งแรงให้ผลผลิตสูงเมื่ออัตราความเร็วสูง การทดสอบแรงกระแทก Hypervelocity (5.0 mm ~ 8.0 mm, $V = 4.79$ Km/s ~ 7.24 Km/s) ได้ดำเนินการเพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการป้องกันของโล่ยัดไส้ไม้พ่นวูดโล่สามผนังอะลูมิเนียมและผ้า Nextel / Kevlar ยัดไส้ด้วยความหนาแน่นของพื้นที่เท่ากัน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าด้วยความหนาแน่นที่เท่ากันความสามารถในการป้องกันของโล่ยัดไส้ไม้้นมากกว่าของโล่ผนังสามชั้นอะลูมิเนียมและคล้ายกับโล่ยัดไส้ผ้า Nextel / Kevlar ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลาย ในการสำรวจสาเหตุที่ความสามารถในการป้องกันของโล่ยัดไส้ไม้มีประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับโล่สามผนังอะลูมิเนียมจึงได้ทำการจำลอง SPH (อุทกพลศาสตร์ของอนุภาคแบบเรียบ) ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แสดงเกราะโล่ยัดด้วยแผ่นไม้สน [29]

Z. Rui และคณะ [30] ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของแรงอัดต่อสมรรถนะซีปนาวุธของชุดเกราะผสมเซรามิกสองชั้นการทดลองและการจำลองของแรงกดต่อสมรรถนะซีปนาวุธของชุดเกราะคอมโพสิตเซรามิกสองชั้นทั้งในเชิงทดลองและเชิงตัวเลข แผ่นเป้าหมายสามประเภทที่มีระดับแรงดันแตกต่างกันได้รับการเตรียมโดยใช้วิธีการหดพืดและทดสอบด้วยการทดลองซีปนาวุธ ความเร็วคงเหลือและความยาวของกระสุนปืนถูกบันทึกและตรวจสอบโหมดความล้มเหลวของแต่ละเป้าหมาย นอกจากนี้ยังมีการเสนอเทคนิคเชิงตัวเลขเพื่อสำรวจกระบวนการเจาะของโพรงโผล่และกลไกการเพิ่มประสิทธิภาพของแรงอัดด้วยประสิทธิภาพของผลการจำลองที่ตรวจสอบโดยการวัดทดลอง การอัดเซรามิกทำให้เกิดพลังงานจลน์มากขึ้นจากการเสียรูปของพลาสติกและการสีก่อนของกระสุนปืนทำให้ขีดจำกัดซีปนาวุธเพิ่มขึ้นมากกว่า 25% ดังรูปที่ 2.20

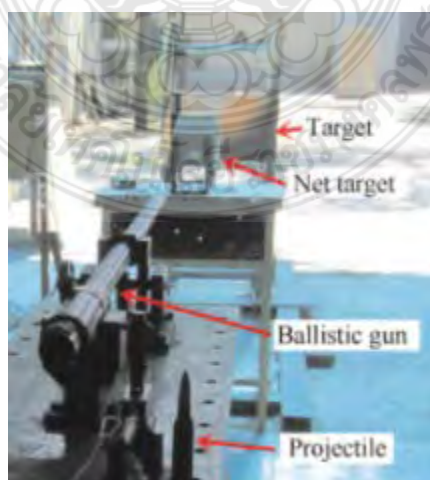


รูปที่ 2.20 แสดงลำดับภาพความเร็วสูงของเป้าหมายที่ได้รับผลกระทบที่ความเร็ว 499 m/s [30]

W.M. Gao และคณะ [31] การจำลองรอยขีดข่วนของวัสดุพอลิเมอร์เป็นงานที่ท้าทาย ต้องใช้แบบจำลองที่เป็นส่วนประกอบของวัสดุที่สามารถแสดงการตอบสนองของวัสดุที่ซับซ้อนในสายพันธุ์ขนาดใหญ่และวิธีการสร้างแบบจำลองที่สามารถแก้ไขปัญหาทางฟิสิกส์หลายประการได้อย่างครอบคลุมเช่นไดรฟ์โพลีการเปลี่ยนรูปและความเสียหายของวัสดุศาสตร์ของหัวกดและพลศาสตร์ บทความนี้กล่าวถึงการใช้วิธีการจำลององค์ประกอบ จำกัดสองวิธี 1. Abaqus / Explicit Arbitrary Lagrangian- Eulerian (ALE) adaptive meshing และ 2. Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) ในการสร้างแบบจำลองรอยขีดข่วนของโพลีพรพีลีนที่เติมแบ่งโดยใช้ พลาสติกยืดหยุ่นพร้อมการชุบแข็งแบบไอโซโทรปิกแบบจำลองวัสดุและแบบจำลอง hyperelastic-viscoelastic แบบจำลองได้รับการประเมินด้วยการทดลองแบบชุดและพบข้อตกลงที่ดีระหว่างการจำลองและการทดลอง ความท้าทายทางเทคนิคต่างๆในการสร้างแบบจำลองรอยขีดข่วนของวัสดุพอลิเมอร์ได้รับการหารือและแก้ไขในระหว่างการพัฒนาทั้งวิธีการที่ประสบความสำเร็จรวมถึงข้อดีและข้อเสีย

Z. Xuhong และคณะ [32] ได้ศึกษาการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบไฟไนต์ของความเค้นตกค้าง จากความร้อนในคานหล่อ วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้คือการตรวจสอบความเค้นตกค้างในคานที่มีการสร้างแบบคาสเทลในเชิงตัวเลข กระบวนการผลิตด้วยการตัดและการเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญจะ เปลี่ยนความเครียดตกค้างของคานป้อมปรากการเมื่อเทียบ เอเชียิม ความเค้นตกค้างเหล่านี้มีผลกระทบ อย่างมีนัยสำคัญต่อความต้านทานการโก่งงอด้านข้างของคานที่มีการบิดงอ อย่างไรก็ตามเนื่องจาก ความซับซ้อนของปัญหาการจึงยังไม่สมบูรณ์ ในการศึกษานี้ได้พัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สาม มิติเพื่อจำลองความเค้นตกค้างจากความร้อนในคานหล่อเนื่องจากกระบวนการตัดและเชื่อม พิลด์ อุณหภูมิและความเค้นตกค้างที่เกิดจากการตัดและที่เกิดจากการเชื่อมจะถูกตรวจสอบเป็นตัวเลข นอกจากนี้ความเค้นตกค้างจากความร้อนที่คาดการณ์ไว้จะได้รับการตรวจสอบความถูกต้องกับผลการ ทดลองในเอกสาร ด้วยแบบจำลองที่ผ่านการตรวจสอบแล้วการศึกษาพาราเมตริกจะดำเนินการเพื่อ ตรวจสอบผลของพารามิเตอร์ส่วนต่อความเค้นตกค้างจากความร้อนรวมถึงความหนาของหน้าแปลน (tf) ความกว้างของหน้าแปลน (bf) และความหนาของเว็บ (tw) เป็นต้นจากนั้นอิทธิพลของ tf, bf และ tw เกี่ยวกับความเค้นตกค้างจากความร้อนที่ปลายแปลนจะถูกเปรียบเทียบ ในที่สุดจะกล่าวถึง การพัฒนาศักยภาพของการกระจายความเค้นตกค้างในคานแบบคาสเทล

Y. Rong-cheng และคณะ [33] เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของกระสุนปืนคอมโพสิตเซรามิกที่ เจาะเข้าไปในชิ้นงานเซรามิกคอมโพสิตได้ทำการทดสอบความคมชัดและการจำลองเชิงตัวเลขของการ ทะลุของโพรงโผล่มาตรฐานและโพรงโผล่เซรามิกผสมลงในชิ้นงานเซรามิกคอมโพสิต ผลการวิจัย แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการเจาะของโพรงโผล่เซรามิกคอมโพสิตนั้นเหนือกว่ากระสุนปืน มาตรฐานสำหรับชิ้นงานเซรามิกคอมโพสิตอย่างเห็นได้ชัด ปลายเซรามิกของกระสุนปืนคอมโพสิต เซรามิกทำลายแผงเซรามิกที่อยู่ด้านหน้าของลำตัวกระสุนเจาะกระาะต่อไปนี้อย่างเต็มที่ดังนั้นจึงยังคง รักษาความสามารถในการเจาะทะลุของลำตัวกระสุนปืนเจาะกระาะ ดังรูปที่ 2.21



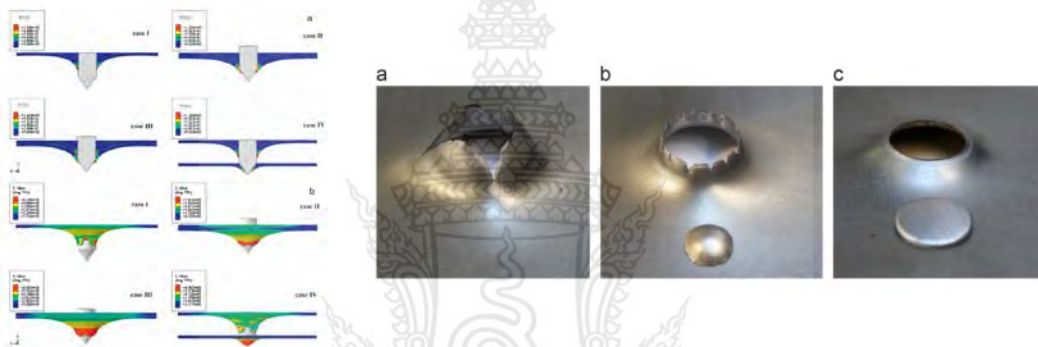
รูปที่ 2.21 การทดสอบการยิงเป้าหมายคอมโพสิตเซรามิกด้วยความเร็วกระแทก 1,000 m/s [33]

E.A. Flores-Johnson และคณะ [34] ได้ศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพซีปนาวุธของแผ่นโลหะหลายชั้นที่ได้รับผลกระทบจากกระสุนปืน APM2 ขนาด 7.62 mm บทความนี้นำเสนอการตรวจสอบเชิงตัวเลขเกี่ยวกับประสิทธิภาพของซีปนาวุธของแผ่นโลหะเสาหินสองชั้นและสามชั้นที่ทำจากเหล็กหรืออะลูมิเนียมหรือวัสดุเหล่านี้รวมกันซึ่งได้รับผลกระทบจากกระสุนปืน APM2 ขนาด 7.62 mm ในช่วงความเร็ว 775–950 m/s แบบจำลองตัวเลขได้รับการพัฒนาโดยใช้รหัสสองค้ประกอบจำกัดอย่างชัดเจน LS-DYNA พบว่าแผ่นเสาหินมีประสิทธิภาพในการยิงซีปนาวุธได้ดีกว่าแผ่นหลายชั้นที่ทำจากวัสดุชนิดเดียวกัน ผลกระทบนี้จะลดลงตามความเร็วในการกระแทก นอกจากนี้ยังพบว่าแผ่นสองชั้นที่มีแผ่นอะลูมิเนียมด้านหน้าบางและแผ่นเหล็กด้านหลังหนา มีความต้านทานมากกว่าแผ่นเหล็กหลายชั้นที่มีความหนาแน่นใกล้เคียงกัน

M.A. Iqbal และคณะ [35] ได้ศึกษาผลกระทบของช่วงเป้าหมายและการกำหนดค่าขีดจำกัดซีปนาวุธการจำลองเชิงตัวเลขสามมิติได้ดำเนินการด้วยองค์ประกอบจำกัด ABAQUS / Explicit เพื่อศึกษาอิทธิพลของช่วงเป้าหมายและการกำหนดค่าต่อขีดจำกัดของซีปนาวุธเป้าหมายอะลูมิเนียม 1100-H12 หนา 1 mm. ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางและส่วนกำหนดค่าต่างกันได้รับผลกระทบจากโพรงเจกไทล์และ มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 mm ผลของช่วงเป้าหมายได้รับการศึกษาโดยการเปลี่ยนเส้นผ่านศูนย์กลางของช่วงของชิ้นงานเสาหินหนา 1 mm เป็น 50 mm, 100 mm, 204 mm, 255 mm และ 500 mm ผลของโครงสร้างได้รับการศึกษาโดยใช้เสาหินสองชั้นในหน้าสัมผัสและชิ้นงานที่มีระยะห่างสองชั้นที่มีความหนาเทียบเท่า 1 mm และเส้นผ่านศูนย์กลางช่วง 255 mm. ระยะห่างระหว่างชั้นแตกต่างกันเป็น 2, 5, 10, 20, และ 30 mm ในแต่ละกรณีเป้าหมายได้รับผลกระทบตามปกติโดยกระสุนปืน เพื่อให้ได้ขีดจำกัดซีปนาวุธพบขีดจำกัดซีปนาวุธสูงสุดสำหรับเป้าหมายเสาหินตามด้วยชั้นในการติดและระยะห่างตามลำดับ ความแตกต่างของระยะห่างระหว่างชั้นไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อขีดจำกัดของซีปนาวุธในกรณีของกระสุนปืน แต่มีผลกระทบบางอย่างในกรณีของกระสุนปืน พบว่าขีดจำกัดของซีปนาวุธเพิ่มขึ้นตามของเส้นผ่านศูนย์กลางช่วงเป้าหมายสำหรับทั้งกระสุนและพบว่าสูงกว่าสำหรับกระสุนปืนเมื่อเทียบกับกระสุนปืน ogive nosed สำหรับทุกช่วงที่พิจารณา ยกเว้นในกรณีของช่วง 50 mm สำหรับซึ่งสูงกว่าสำหรับกระสุนปืน ogive nosed พบขีดจำกัดซีปนาวุธสูงสุดสำหรับเป้าหมายเสาหินตามด้วยชั้นในการติดต่อและระยะห่างตามลำดับ ความแปรผันของระยะห่างระหว่างชั้นไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อขีดจำกัดของซีปนาวุธในกรณีของกระสุนปืน ogive แต่มีผลกระทบบางอย่างในกรณีของกระสุนปืนพบว่าขีดจำกัดของซีปนาวุธเพิ่มขึ้นตามของเส้นผ่านศูนย์กลางช่วงเป้าหมายสำหรับทั้งกระสุนและพบว่าสูงกว่าสำหรับกระสุนปืนเมื่อเทียบกับกระสุนปืน ogive nosed

T. Jankowiak และคณะ [36] ได้ศึกษาเกี่ยวกับความเร็วกระสุนเชิงตัวเลขของพฤติกรรมพลวัตของเหล็กแผ่นที่เจาะรูโดยกระสุนปืนทรงกรวยภายใต้สภาวะซีปนาวุธ บทความนี้อธิบายถึงการศึกษาเชิง

ตัวเลขเกี่ยวกับการเจาะเหล็กแผ่นโดยกระสุนปืนภายใต้ความเร็วกระแทกสูงเพื่อทำนายพฤติกรรมชิปนาวูร์และโดยเฉพาะอย่างยิ่งขีดจำกัดของชิปนาวูร์ การศึกษาพาราเมตริกจะดำเนินการกับตัวแปรที่สำคัญหลายตัวในแบบจำลองตัวเลขโดยใช้รหัสองค์ประกอบจำกัดของ Abaqus / Explicit และรายงานผลกระทบในเอกสารตัวแปรที่พิจารณา ได้แก่ โครงร่างเป้าหมาย ความหนา แบบจำลองวัสดุที่เป็นส่วนประกอบของเป้าหมายมวลของโพรเจกไทล์แรงเสียดทานระหว่างโพรเจกไทล์กับเป้าหมายและรูปร่างของโพรเจกไทล์ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาผลของพฤติกรรมของวัสดุผ่านการใช้ความสัมพันธ์เชิงองค์ประกอบสองแบบและเพื่อสรุปว่าเส้นโค้งชิปนาวูร์ถูกคำนวณสำหรับวัสดุเป้าหมายที่แตกต่างกันโดยใช้ข้อมูลจากวรรณกรรม ดังรูปที่ 2.22

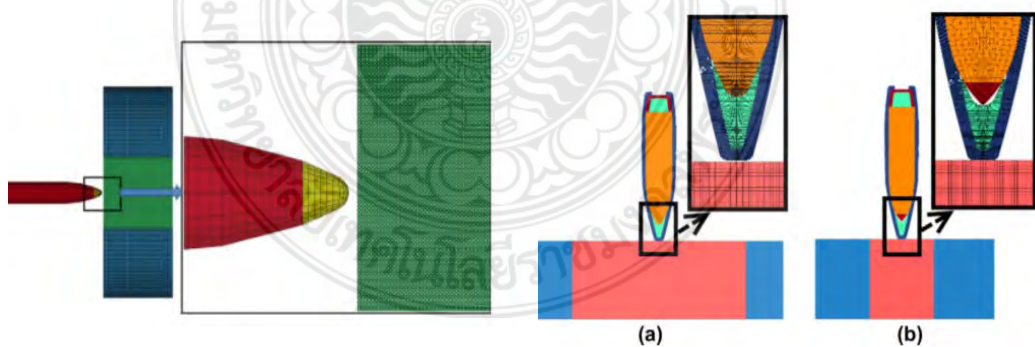


รูปที่ 2.22 รอยจากทดสอบการยิง [36]

K. Senthil และคณะ [37] ได้ศึกษาเกี่ยวกับความต้านทานชิปนาวูร์ของแผ่นอะลูมิเนียมปี 2024 ต่อชิปนาวูร์ครึ่งวงกลมทรงกลมและจุมกที่ถือ การตรวจสอบเชิงตัวเลขได้ดำเนินการกับเป้าหมายแผ่นอะลูมิเนียมปี 2024 เทียบกับโพรเจกไทล์ เหล็กชุบแข็งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 mm ความต้านทานชิปนาวูร์ของเป้าหมายที่มีความหนา 1.27 mm ได้รับการศึกษากับลูกบอลทรงกลมเช่นเดียวกับโพรเจกไทล์ทรงกระบอกครึ่งวงกลมและจุมกที่ถือ การจำลองได้ดำเนินการบนรหัสเอลิเมนต์ จำกัด ของ ABAQUS / Explicit โดยการสร้างแบบจำลองเป้าหมายที่เปลี่ยนรูปได้และโพรเจกไทล์เป็นพื้นผิวสามมิติที่แข็ง แบบจำลองวัสดุอูอิสโต - วิสโคพลาสติกของ Johnson-Cook (JC) ถูกนำมาใช้เพื่อทำนายพฤติกรรมการไหลและการแตกหัก ของเป้าหมาย วัตถุประสงค์ของการศึกษาคือเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของแบบจำลอง JC ในการสร้างตัวเลขการเบี่ยงเบนเป้าหมายสูงสุดและแรงกระแทกสูงสุดที่เกิดจากโพรเจกไทล์ที่มีรูปร่างแตกต่างกันสามแบบในระหว่างการเจาะเป้าหมายพาราเมเตอร์ JC สามชุดที่แตกต่างกันซึ่งได้รับการปรับเทียบโดยผู้เขียนที่แตกต่างกัน สำหรับอะลูมิเนียมอัลลอยด์ในปี 2567 ได้รับการพิจารณาเพื่อจำลองประสิทธิภาพของเป้าหมายเทียบกับกระสุนปืนแต่ละอันและผลลัพธ์ที่ได้จึงถูกเปรียบเทียบและตรวจสอบผ่านการทดลองที่มีอยู่ โหมตความล้มเหลวการโก่งตัวและแรงกระแทกที่ได้รับได้รับการสังเกตว่ามีอิทธิพลอย่างมากต่อแบบจำลองวัสดุขีดจำกัด ของชิปนาวูร์ เป้าหมายที่มีความหนา 1.27 mm คำนวณเป็นตัวเลขเทียบกับกระสุนปืน

ทั้งสามและผ่านการตรวจสอบผ่านแบบจำลอง Recht-Ipson ช่วงที่มีประสิทธิภาพและความหนาของชิ้นงานยังแตกต่างกันไปเพื่อตรวจสอบอิทธิพลต่อการโค้งตัวสูงสุดและแรงกระแทกสูงสุด

K. Namik และคณะ [38] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการต้านทานชิปนาวูธของเหล็กเกราะที่มีความแข็งสูงต่อกระสุนเจาะเกราะ 7.62 mm ชุดเกราะที่ใช้วัสดุผสมน้ำหนักเบาชั้นสูง แต่เหล็กกล้าที่มีความแข็งสูงในรถทหารมักถูกนำมาใช้เพื่อให้การป้องกันชิปนาวูธด้วยต้นทุนที่ค่อนข้างต่ำและเป็นวัสดุที่น่าสนใจเนื่องจากมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในโครงสร้างยานพาหนะ ในการศึกษาที่กำหนดขีดจำกัด ชิปนาวูธของ เหล็กเกราะ 500 HB เทียบกับ กระสุนแกนเหล็กชุบแข็งขนาด 7.62 mm 54R B32 API Lagrange และการจำลองอุทกพลศาสตร์อนุภาคเรียบ (SPH) ดำเนินการโดยใช้แบบจำลอง 3 มิติของกระสุนและเป้าหมายเกราะความแข็งสูง การทดสอบการเจาะที่เกราะความหนา 9 และ 20 mm ถูกดำเนินการเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของวิธีการจำลอง นอกจากนี้ยังมีการทดสอบวัสดุสำหรับเหล็กเกราะและแกนเหล็กชุบแข็งสำหรับกระสุนเพื่อพัฒนาความสัมพันธ์ที่เป็นส่วนประกอบของจอห์นสัน - คูกสำหรับทั้งแบบจำลองความแข็งแรงและความล้มเหลว สุดท้ายผลลัพธ์จากการจำลองเชิงตัวเลข 3 มิติพร้อมแบบจำลองของสัญลักษณ์แสดงหัวข้อย่อยและเป้าหมายโดยละเอียดถูกเปรียบเทียบกับผลการทดลอง การศึกษาชี้ให้เห็นว่าขีดจำกัดของชิปนาวูธสามารถทำนายได้ดีในเชิงปริมาณโดยไม่ขึ้นอยู่กับวิธีการจำลองที่เลือกไว้ แต่ในเชิงคุณภาพจะเห็นความแตกต่างบางอย่างในระหว่างการเจาะและการแยกส่วน ดังที่แสดงในผลลัพธ์ข้อตกลงที่ดีระหว่างการจำลอง Ls-Dyna และข้อมูลการทดลองทำได้โดยการกำหนดสูตร Lagrange กับแบบจำลองสัญลักษณ์แสดงหัวข้อย่อยแบบเต็ม ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 แบบออกแบบกระสุนจำลองเป้าหมาย [38]

M. Rodriguez และคณะ [39] ได้ศึกษาเกี่ยวกับกลไกการเจาะของแผ่นป้องกันอะลูมิเนียม 2024 ซึ่งได้รับผลกระทบจากรูปทรงที่แตกต่างกัน บทความนี้มุ่งเน้นไปที่พฤติกรรมเชิงกลของอะลูมิเนียมอัลลอย 2024-T351 ภายใต้การรับแรงกระแทก การศึกษานี้ดำเนินการโดยผสมผสานเทคนิคการทดลองและตัวเลขเข้าด้วยกัน ประการแรกการทดสอบผลกระทบเชิงทดลองได้ดำเนินการ

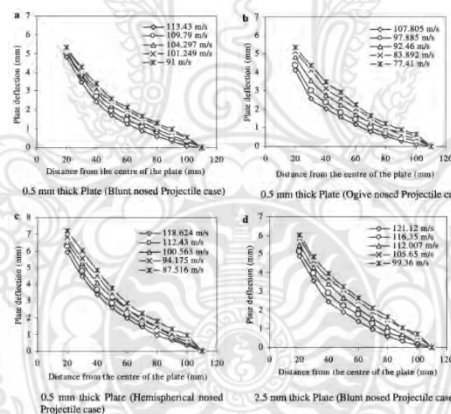
บนเพลตที่มีความหนา 4 mm ครอบคลุมความเร็วในการกระแทกตั้งแต่ 50 m/s ถึง 200 m/s และเปลี่ยนสถานะความเค้นผ่านรูปทรงจุ่มแบบโพเรจกไทล์: ทรงกรวยครึ่งวงกลมและทื่อ กลไกที่อยู่เบื้องหลังกระบวนการเจาะทะลุได้รับการศึกษาขึ้นอยู่กับโครงร่างแบบโพเรจกไทล์ที่ใช้โดยการวิเคราะห์โหมตความล้มเหลวที่เกี่ยวข้องและการโก่งตัว ประการที่สองได้ทำการศึกษาเชิงตัวเลขเกี่ยวกับพฤติกรรมเชิงกลของอะลูมิเนียมอัลลอย 2024-T351 ภายใต้การรับแรงกระแทก ด้วยเหตุนี้แบบจำลองสามมิติจึงได้รับการพัฒนาในตัวแก้ไฟไนต์เอลิเมนต์ ABAQUS / Explicit รุ่นนี้รวมองค์ประกอบ Lagrangian กับองค์ประกอบ Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) ได้รับความสัมพันธ์ที่ระหว่างผลการทดลองที่เป็นตัวเลขและการทดลองในแง่ของความเร็วจำกัดที่เหลื่อและซีปนาวุธ

K.M. Kpenyigba และคณะ [40] ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของรูปร่างโพเรจกไทล์ต่อพฤติกรรมไดนามิกของเหล็กแผ่นที่ได้รับผลกระทบและการเจาะทะลุ บทความนี้อธิบายถึงงานที่เน้นกระบวนการเจาะเหล็กแผ่น มีการดำเนินการตรวจสอบเชิงทดลองวิเคราะห์และเชิงตัวเลขเพื่อวิเคราะห์ในรายละเอียดของกระบวนการเจาะ จากวิธีการเหล่านี้ได้มีการศึกษาคุณสมบัติของซีปนาวุธของวัสดุและโหมตความล้มเหลวซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างของจุ่มแบบโพเรจกไทล์ (ทรงกรวยทื่อหรือครึ่งซีก) มีการสังเกตโหมตความล้มเหลวที่แตกต่างกันซึ่งรวมถึงการบีบอัดและการคอเส้นรอบวง มีการศึกษาพิเศษเกี่ยวกับจำนวนกลีบสำหรับจุ่มที่แตกต่างกันโดยใช้โพเรจกไทล์รูปทรงกรวยสมดุลงานที่สมบูรณ์นอกจากนี้ยังมีรายงานและพลังงานดูดซึมโดยแผ่นเหล็กได้รับโดยการวัดครั้งแรกและที่เหลื่อความเร็วกระสุน ความเร็วในการกระแทกที่หลากหลายตั้งแต่ 35 ถึง 180 m / s ได้รับการคุ้มครองในระหว่างการทดสอบ ซีปนาวุธทั้งหมดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 mm และแผ่นหนา 1 mm ยิ่งไปกว่านั้นอัตราส่วนมวล (มวลโพเรจกไทล์ / มวลแผ่นเหล็ก) และอัตราส่วนระหว่างช่วงของเหล็กแผ่นกับเส้นผ่านศูนย์กลางของโพเรจกไทล์จะคงที่เท่ากับ 0.38 และ 3.85 ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 การเจาะทะลุแผ่นเหล็กด้วยกระสุนซีปนาวุธ [40]

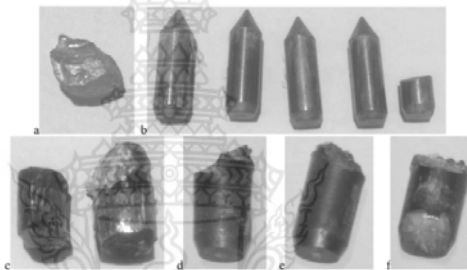
N.K. Gupta และคณะ [41] ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของรูปร่างของรูปทรงจุมกแบบโพเรเจกไทล์ความเร็วในการกระแทกและความหนาของชิ้นงานต่อพฤติกรรมการเสียรูปของแผ่นอะลูมิเนียม การศึกษาในปัจจุบันเกี่ยวข้องกับ การตรวจสอบเชิงทดลองและเชิงตัวเลขของแผ่นเป้าหมายอะลูมิเนียมที่ได้รับผลกระทบจากกระสุนปืนเหล็กจุมกทุ่และครึ่งซีก โดยปกติชิปนาวูจะกระทบกับแผ่นเป้าหมายที่มีความหนา 0.5, 0.71, 1, 1.5, 2, 2.5 และ 3 mm ที่ความเร็วต่างกันด้วยความช่วยเหลือของปืนลม ได้ทำการศึกษาผลของรูปร่างจุมกแบบโพเรเจกไทล์ความเร็วในการกระแทกและความหนาของแผ่นต่อการเปลี่ยนรูปของแผ่นเป้าหมาย กระสุนปืนครึ่งซีกทำให้เกิดการเสียรูป (dishing) ของแผ่นเป้าหมายสูงสุดทั่วโลกพบว่าชิปนาวูจุมก Ogive เป็นเครื่องเจาะที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับกรณีของเพลตที่มีความหนา 0.5, 0.71, 1.0 และ 1.5 mm สำหรับกรณีของแผ่นความหนา 2.0, 2.5 และ 3.0 mm อย่างไรก็ตามชิปนาวูจุมกที่ต้องใช้พลังงานน้อยที่สุดในการเจาะแผ่นเป้าหมาย พบว่าความเร็วจำกัด ชิปนาวูของโพเรเจกไทล์จุมกครึ่งวงกลมนั้นสูงที่สุดเมื่อเทียบกับโพเรเจกไทล์อีกสองตัว การวิเคราะห์องค์ประกอบจำกัดของปัญหาดำเนินการโดยใช้รหัสไฟไนต์เอลิเมนต์ของ ABAQUS ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเปรียบเทียบกับ การทดลองและพบความสัมพันธ์ที่ติระหว่างทั้งสอง ดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 การเปลี่ยนแปลงของโปรไฟล์เนื่องจากการเปลี่ยนรูปด้วยความเร็วกระแทก [41]

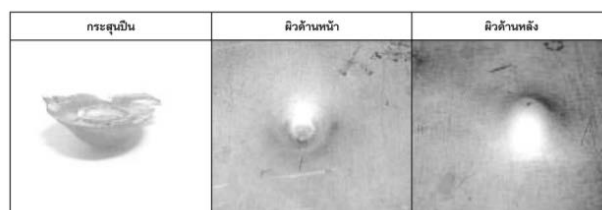
J. Li และคณะ [42] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการทดลองและการจำลองแท่งโลหะผสมทั้งสแตนที่เจาะเข้าไปในอะลูมินาเซรามิก 603 เป้าหมายเหล็กผสมเกราะ ได้ทำการทดลองและการจำลองเชิงตัวเลขของแท่งโลหะผสมทั้งสแตนที่เจาะเข้าไปในอะลูมินาเซรามิก ชิ้นงานประกอบเหล็กเกราะ 603 ชิ้น ทั้งการทดลองและการจำลองเชิงตัวเลขทำให้เกิดการวัดความลึกของการเจาะที่เหลือในแผ่นหลังเหล็ก การจำลองตัวเลขยังแสดงให้เห็นการกระจายความเสียหายระหว่างกระบวนการเจาะ การศึกษานี้สรุปได้ว่าความลึกของการเจาะที่เหลือจะลดลงในเชิงเส้นตามการเพิ่มความหนาของเซรามิก ดังนั้นทั้งปัจจัยประสิทธิภาพมวลและปัจจัยประสิทธิภาพเชิงอนุพันธ์จะเพิ่มขึ้นตามความหนาของเซรามิกที่เพิ่มขึ้น เซรามิกถูกสับเปลี่ยนอย่างจริงจังในบริเวณที่เกิดผลกระทบและแยกออกเป็นชิ้นส่วนขนาดเล็กมากซึ่งขนาดขึ้นอยู่กับระยะห่างจากจุดที่เกิดผลกระทบ

B. Giovanni Di และคณะ [43] ได้ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการกระแทกและประสิทธิภาพของซีปนาวุธของกระสุนปืนเจาะเกราะด้วยแกนเหล็กเครื่องมือ โดยทั่วไปแล้วซีปนาวุธเจาะเกราะ (AP) จะมีแกนแข็งอยู่ในแจ็กเก็ตทองแดง เมื่อกระทบกับเป้าหมายที่แข็งกล่องทองแดงจะถูกถอดออก ในขณะที่แกนทะลุเป้าหมาย แกนของซีปนาวุธ AP ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดสร้างขึ้นด้วยโลหะผสมทั้งสแตนหรือยูเรเนียมที่หมดแล้ว แต่เหล็กกล้าอัลลอยด์ก็มักใช้เช่นกันเนื่องจากมีราคาไม่แพงและก่อมลพิษน้อยกว่าแม้ว่าจะมีประสิทธิภาพน้อยกว่ามากก็ตาม มีการตรวจสอบการเสีรูปและพฤติกรรมการแตกหักของกระสุนเจาะเกราะที่ประดิษฐ์ด้วยแกนเหล็กเครื่องมือสามแกนที่แตกต่างกันและประสิทธิภาพของซีปนาวุธที่เป็นผลลัพธ์เพื่อให้เข้าใจคุณสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมของวัสดุเจาะเกราะได้ดีขึ้นและเพื่ออธิบายกลไกการแตกหักของผล เหล็กกล้าเครื่องมือทดสอบ ดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 ความเสียหายของกระสุนซีปนาวุธที่ทำการทดสอบ [43]

ทัศน์ชัย ผองผาย และคณะ [44] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการจำลองสถานการณ์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของการกระแทกจากกระสุนปืน กรณีศึกษา กระสุน 9 mm Parabellum กับ AISI1008, AA1100 และ AA5083 งานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างแบบจำลองเพื่อจำลองสถานการณ์ของกระสุนปืนด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้นขึ้นมา เพื่อการศึกษาทางด้านพฤติกรรมการถ่ายโอนของพลังงานจากลูกกระสุนปืนไปยังเป้าหมาย โดยมีการทดลองวัสดุเนื้อเดียวกับ 3 ชนิดที่ทำการทดสอบ คือ เหล็กกล้า AISI1008, AA1100 และ AA5083 โดยมีขนาดความหนาของวัสดุที่ 2, 4, และ 6 mm และวัสดุที่นำมาทดสอบด้วยคือ อะลูมิเนียม AA5083 ขนาดความหนา 4 และ 6 mm โดยใช้ปืน Glock 19 และกระสุนปืนชนิด 9 mm Parabellum ผลการทดสอบทางกายภาพพบที่แผ่นทดสอบ AA1100 ทุกความหนาจะทะลุทั้งหมด ส่วนแผ่น AISI1008 และ AA50083 เกิดการเปลี่ยนรูปแต่ไม่ทะลุและแผ่น AISI1008 ที่ขนาดความหนา 6 mm มีความต้านทานมากที่สุด ดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 ลักษณะการเปลี่ยนรูปของกระสุนและแผ่นเหล็ก AISI1008 ที่ความหนา 2 mm [44]

R. Abhishek และคณะ [45] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการแสดงชีพनावุธของเป้าหมายคอนกรีตที่ได้รับผลกระทบจากกระสุนปืนระยะยาว คอนกรีตเป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการก่อสร้างโครงสร้างเชิงกลยุทธ์และที่สำคัญเช่น บรรจุนิวเคลียร์สะพานโครงสร้างจัดเก็บและบังเกอร์ทางทหาร ในการศึกษาปัจจุบันการทดลองเจาะรูและการจำลองรหัสไฟไนต์เอลิเมนต์ ABAQUS / Explicit ได้ดำเนินการเพื่อทำความเข้าใจพฤติกรรมของคอนกรีตต่อผลกระทบของกระสุนปืน การทดสอบการเจาะได้ดำเนินการบนชิ้นงานสี่เหลี่ยมจัตุรัส 450 mm x 450 mm ของคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีกำลังอัดที่กำหนด 48 MPa เพื่อตรวจสอบผลกระทบของการเสริมแรงตะแกรงเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm ถูกรวมไว้ที่กึ่งกลางของความหนาของชิ้นงาน เป้าหมายได้รับผลกระทบปกติ 0.5 และ 1 kg ogival nosed เหล็กชุบแข็งโพรเจกไทล์ของหัวรัศมีลำกล้อง (CRH) 3 และอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (l / d) 23.7 และ 11.8 ตามลำดับ ระบบความเร็วของโพรเจกไทล์อยู่ในช่วง 43–178 m/s ผลลัพธ์ที่ได้จึงถูกนำเสนอและมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของชีพनावุธเนื่องจากความแปรผันของอัตราส่วน l / d ของโพรเจกไทล์ได้รับการกล่าวถึง เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดาพบว่าขีดจำกัดชีพनावุธของชิ้นงานคอนกรีตเสริมเหล็กเพิ่มขึ้น 14% พบข้อตกลงที่เป็นธรรมชาติระหว่างความเร็วคงเหลือจริงและคาดการณ์ที่ได้รับในการศึกษาในปัจจุบัน ขีดจำกัดชีพनावุธจริงและจำลองต่อ 0.5 kg กระสุนปืนแตกต่างกัน 10.8% และ 5.1% สำหรับเป้าหมายธรรมดาและคอนกรีตเสริมเหล็กตามลำดับ พบว่าค่าเบี่ยงเบนนี้เป็น 16.1% และ 6.7% ตามลำดับเมื่อเทียบกับ กระสุนปืน 1 kg

B. Tore และคณะ [46] ผลกระทบแบบปกติและแบบเฉียงของกระสุนขนาดเล็กบนแผ่นป้องกันอะลูมิเนียม AA6082-T4 ผลกระทบแบบปกติและแบบเฉียงบน แผ่นอะลูมิเนียม AA6082-T4 หนา 20 mm. ได้รับการศึกษาทั้งในเชิงทดลองและเชิงตัวเลข ใช้กระสุนอาวุธขนาดเล็กสองประเภทในการทดสอบชีพनावุธ ได้แก่ ลูกปืน 7.62 x 63 mm พร้อมแกนตะกั่วอ่อนและ APM2 ขนาด 7.62 x 63 mm ปืนไรเฟิลเมาเซอร์ เป้าหมายถูกกระแทกมุมองศา 0, 15, 30, 45 และ 60 องศา ความเร็วในการกระแทกประมาณ 830 m / s ในการทดสอบทั้งหมด ในระหว่างการทดสอบความเร็ว กระสุนเริ่มต้นและที่เหลือถูกวัดโดยอุปกรณ์ออปติคอลที่ใช้เลเซอร์หลายชนิดและใช้กล้องวิดีโอความเร็วสูงในการถ่ายภาพกระบวนการเจาะ สิ่งที่น่าสนใจเป็นพิเศษคือมุมเฉียงวิกฤตที่กระบวนการเจาะเปลี่ยนจากการเจาะเป็นการฝังหรือการแฉก ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่ามุมเฉียงวิกฤตน้อยกว่ามุม 60 องศาสำหรับสัญลักษณ์แสดงหัวข้อย่อยทั้งสองประเภท นอกจากนี้ยังมีการจัดทำโปรแกรมทดสอบวัสดุสำหรับงาน AA6082-T4 เพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ที่เป็นส่วนประกอบของ Johnson-Cook ที่แก้ไขแล้วและเกณฑ์ความล้มเหลวของ Cockcroft – Latham

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

กระบวนการดำเนินงานวิจัยที่ประกอบไปด้วยวิธีการดำเนินงานวิจัย การออกแบบแผ่นเกราะที่ใช้วัสดุแตกต่างกันในการออกแบบ การวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมรวมถึงการสร้างแบบจำลองการยิงชุดเกราะ และการกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุตามสมการความเสียหาย การสร้างรูปแบบ Mesh การวิเคราะห์แผ่นเกราะ โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1.1 ศึกษาข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ข้อมูลการทดสอบตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 รูปแบบการวิเคราะห์ความเสียหายของวัสดุ สมบัติของวัสดุแต่ละชนิดจากกรทบทวนวรรณกรรม

3.1.2 ศึกษาการทดสอบของการจำลองยิงเกราะกันกระสุนและตามมาตรฐาน NIJ

3.1.3 ศึกษาข้อมูลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Ansys/Explicit Dynamics การตั้งค่าสมบัติของวัสดุตามสมการความเสียหายและชุดคำสั่งในโปรแกรม

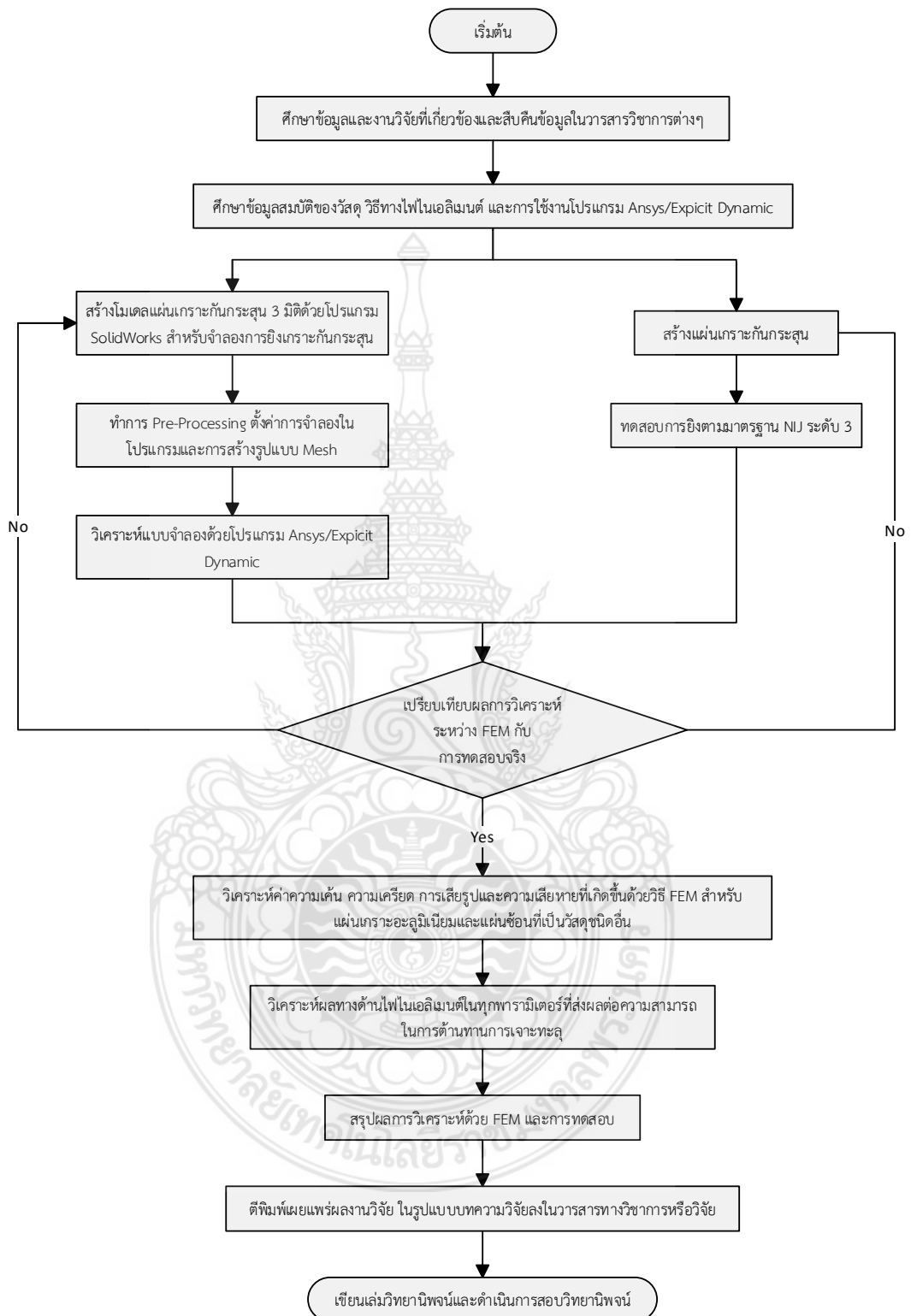
3.1.4 ออกแบบและสร้างแบบจำลองเกราะกันกระสุนแบบ 3 มิติ ด้วยโปรแกรม SolidWorks เป็น 2 แบบ แบบที่หนึ่งแผ่นเกราะ 1 ชั้น แบบที่สองแผ่นเกราะ 2 ชั้น มีขนาดความกว้าง 300 mm x 300 mm วัสดุ 2 ชนิด คือ SKD11 ความหนา 6, 8, 10 mm และ อะลูมิเนียม ความหนา 6, 8, 10 mm

3.1.5 ตั้งค่าสมบัติของวัสดุตามรูปแบบความเสียหายของวัสดุในโปรแกรม Ansys / Engineering Data ดังนี้ SKD11 รูปแบบความเสียหายของ Johnson-Cook Strength, รูปแบบความเสียหายของ Johnson-Holmquist (JH-2), รูปแบบความเสียหายของ Steinburg-Guinan-Strength สร้าง Mesh ที่ใช้จำลองเป็นแบบ Hexahedral โดยกระสุนมีขนาด 0.5 mm และแผ่นเกราะค่าความเร็วกระสุนตาม NIJ ระดับ 3

3.1.6 ทำการวิเคราะห์ของแผ่นเกราะกันกระสุน โดยใช้คอมพิวเตอร์สมรรถนะสูงวิเคราะห์การคลาดเคลื่อน (Error) ของโปรแกรมจำลองด้วยกราฟ Energy Conservation, Energy Summary และ Time Increment ผลลัพธ์การจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์แบบ Equivalent (Von Misses) Stress

3.1.7 สรุปผลการทดสอบและการวิเคราะห์การจำลองแผ่นเกราะทั้ง 2 รูปแบบนำมาเปรียบเทียบผลการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ความเสียหายที่เกิดขึ้นและเขียนเล่มวิทยานิพนธ์

3.1.8 เผยแพร่ผลงานวิจัยด้วยการตีพิมพ์เผยแพร่ลงในวารสารทางวิชาการ



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนกระบวนการวิจัย

3.2 วิธีการออกแบบจำลองด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการจำลองเพื่อวิเคราะห์การกระแทกของลูกกระสุน ไปยังเกราะกันกระสุนด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น ต้องทำการสร้างแบบจำลองด้วยใช้ Program SolidWorks แล้วกำหนดคุณสมบัติของชิ้นส่วนต่างๆด้วย Program ANSYS ที่ทำการจำลองด้วยวัสดุตั้งที่ต้องการทดลอง ทั้งกำหนดความเร็ว ทิศทางของแรงที่กระแทกต่อเกราะกันกระสุน แล้วทำการวิเคราะห์ผลในแต่ละกรณี เพื่อนำผลลัพธ์มาทำการเปรียบเทียบความเสียหายระหว่างการทดลองทางกายภาพจริงและด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

3.2.1 การออกแบบแผ่นเกราะกันกระสุนและลูกกระสุน

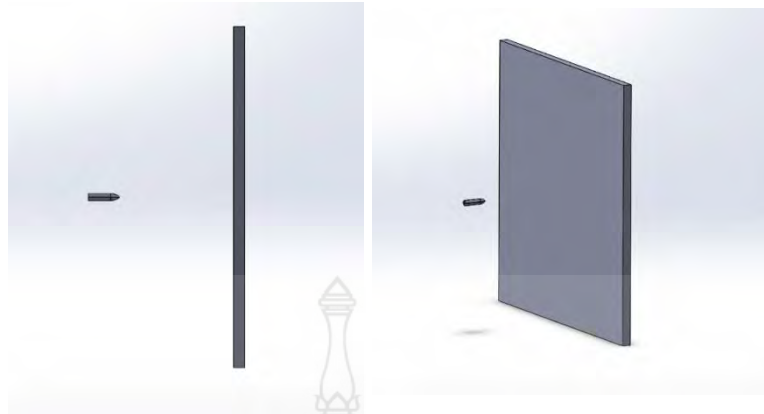
การออกแบบแผ่นเกราะกันกระสุนด้วย Program SolidWorks เป็นการออกแบบแผ่นเกราะที่มีชั้นเดียว และแผ่นเกราะชั้นซ้อน ขนาดของแผ่นเกราะกันกระสุนขนาด 300 mm x 300 mm โดยมีขนาดความหนาของแผ่นเกราะกันกระสุนที่ 6, 8 และ 10 mm มุมองศาที่ทำการทดสอบมี 0, 15, 30 และ 45 องศา ในส่วนของลูกกระสุนที่ใช้ในการจำลองเป็นกระสุนที่มีขนาด 7.62 mm วัสดุทำจากทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) ในการจำลองนี้ใช้ความเร็วมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 ดังรูปที่ 3.2, 3.3, และ 3.4



รูปที่ 3.2 ขนาดของกระสุน 7.62 mm [12]



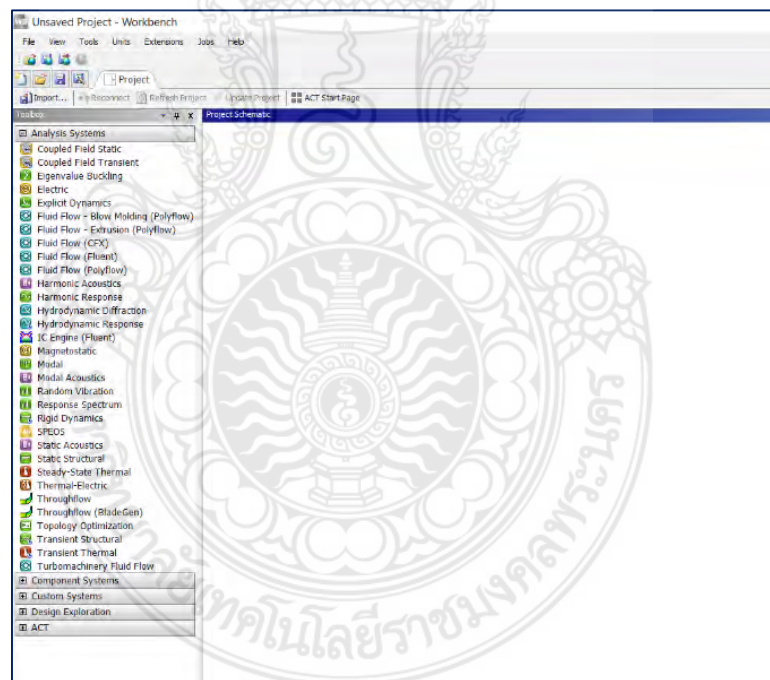
รูปที่ 3.3 การจำลองแบบแผ่นเกราะเดียวด้วย Program SolidWorks [12]



รูปที่ 3.4 การจำลองแบบแผ่นเกราะซ้อนด้วย Program SolidWorks

3.3.2 การกำหนดคุณสมบัติตั้งค่าของการจำลองด้วย Program ANSYS [12]

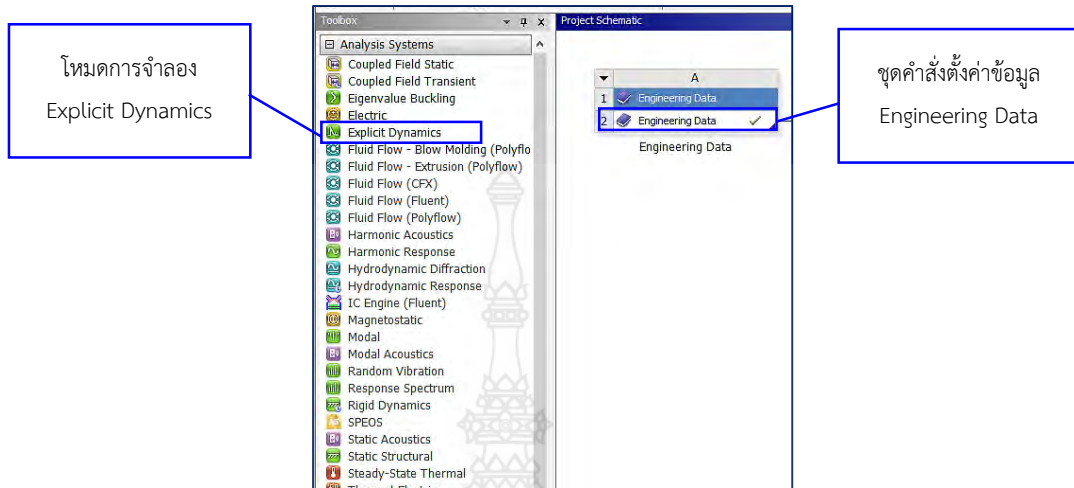
ในการขั้นตอนการสร้างแบบจำลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ 1. การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ 2. การสร้างเมชของวัสดุ (Mesh) 3. การตั้งกำหนดค่าคำสั่ง Explicit Dynamics ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 หน้าต่าง Workbench [12]

3.3.2.1 เริ่มต้นที่คำสั่ง Workbench ซึ่งเปรียบเสมือนการเตรียมชิ้นงานที่เป็นตัวเริ่มการทำงานของ Program ANSYS และการกำหนดตั้งค่าของ Explicit Dynamics จะมีชุดคำสั่งอยู่ตามคำสั่ง “Engineering Data” เป็นการตั้งค่าสมบัติของวัสดุ 3 ชนิด คือ SKD11, อะลูมิเนียม และ

ทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC) อยู่ใน Program ANSYS ถ้าไม่มีค่าข้อมูลของวัสดุให้ทำการกำหนดวัสดุชิ้นใหม่ของการจำลองนั้นๆ ดังรูปที่ 3.6



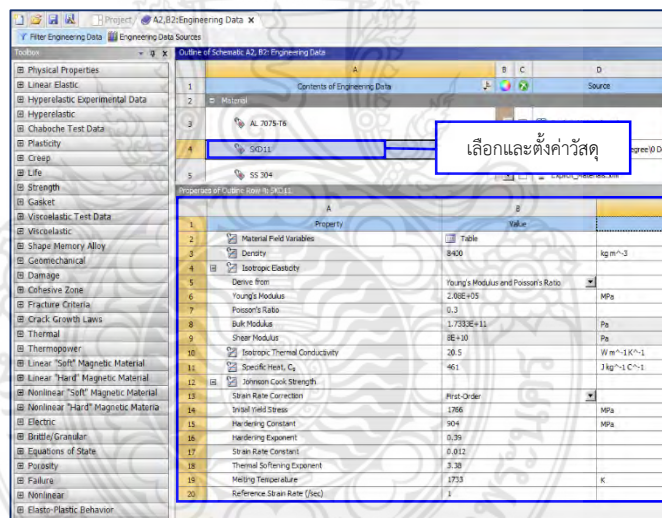
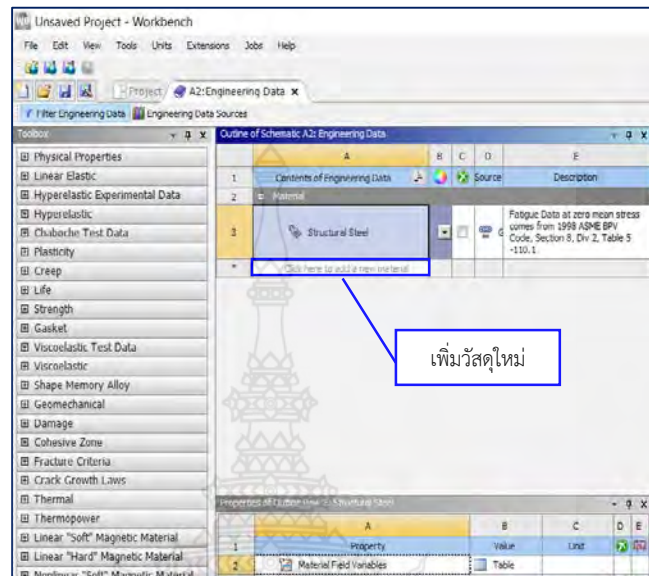
รูปที่ 3.6 โหมดการจำลอง Explicit Dynamics และชุดคำสั่ง Engineering Data [12]

การเพิ่มวัสดุใหม่ใน Program ANSYS สืบเนื่องจาก SKD11 และทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC) เป็นวัสดุที่ได้จากการทบทวนวรรณกรรมโดยการใช้ทฤษฎีในการจำลองวิเคราะห์ความเสียหาย Johnson-Cook Strength Model และค่าคุณสมบัติดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าคุณสมบัติของวัสดุ SKD11 และค่าคุณสมบัติความเสียหายของ Johnson-Cook Strength Model [12]

ค่าคุณสมบัติของวัสดุ SKD11	
Density (ρ , kg/m ³)	8400
Modulus of elasticity (E, GPa)	208
Poisson ratio (ν)	0.3
Bulk modulus (GPa)	173
Shear modulus (GPa)	80
Thermal conductivity (W/m.k)	20.5 (350 °C)
Thermal expansion (m/m.k)	11
Specific heat (J/kg.°C)	461
ทฤษฎีความเสียหาย Johnson-cook strength	
Initial yield stress (A, MPa)	1766
Hardening constant (B, MPa)	904
Hardening exponent (n)	0.39
Strain rate constant (C)	0.012
Thermal softening exponent	3.38
Melting temperature (K)	1733

วิธีการเพิ่มวัสดุใหม่ในส่วนของ Engineering Data มีการกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุ SKD11 นั้นโดยมีวิธีการดังรูปที่ 3.7 [12]



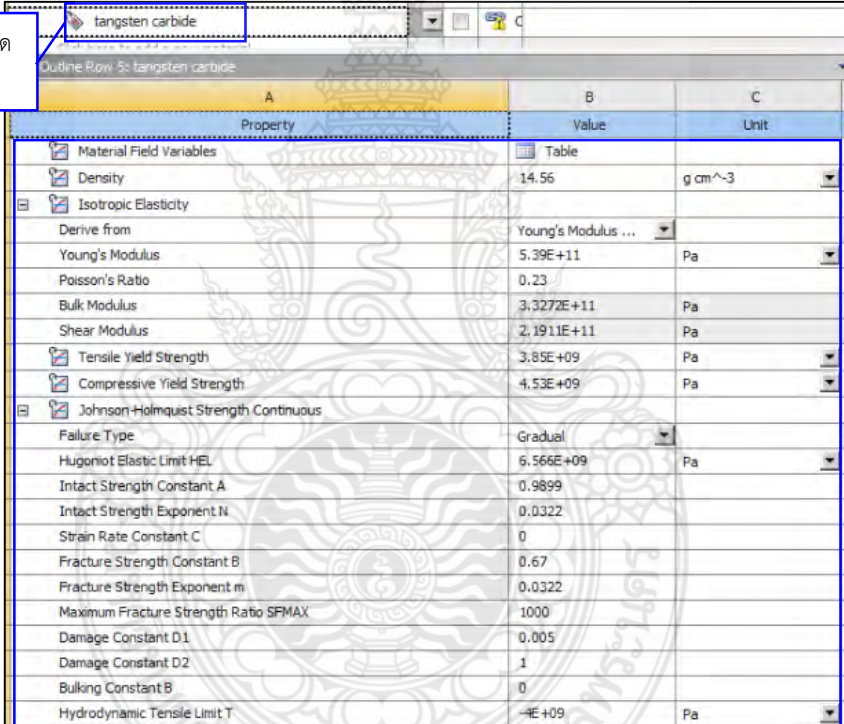
รูปที่ 3.7 การตั้งค่าคุณสมบัติของวัสดุ SKD11 [12]

เมื่อเพิ่มวัสดุที่ต้องการแล้วใช้ทฤษฎีในการจำลองความเสียหายของ Johnson-Holmquist Strength Model (JH-2) โดยที่ค่าคุณสมบัติของวัสดุและพารามิเตอร์ดังตามตารางที่ 3.2 ตารางที่ 3.2 สมบัติของวัสดุ WC และพารามิเตอร์ของ Johnson-Holmquist Strength [12]

ค่าคุณสมบัติของวัสดุ WC ทั้งสแตนคาร์ไบด์	
Density (ρ , kg/m ³)	14.56
Young's modulus (E, GPa)	539
Poisson ratio (ν)	0.23
Bulk modulus (GPa)	332

Shear modulus (GPa)	219
Tensile yield strength (GPa)	3.85
Compressive yield strength (GPa)	4.53
Johnson-Holmquist Strength (Continuous JH-2)	
Damage type	Gradual (JH2)
Hugoniot elastic limit (HEL, GPa)	656
Intact strength constant (A)	0.9899
Intact strength exponent (n)	0.0322
Strain rate constant (C)	0
Fracture strength constant (B)	0.67
Fracture strength exponent (m)	0.0322

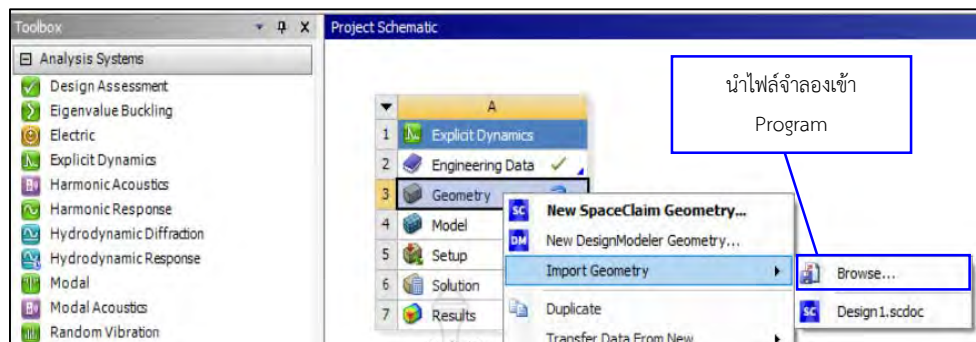
วัสดุที่ทำการกำหนด
ขึ้นมาใหม่



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

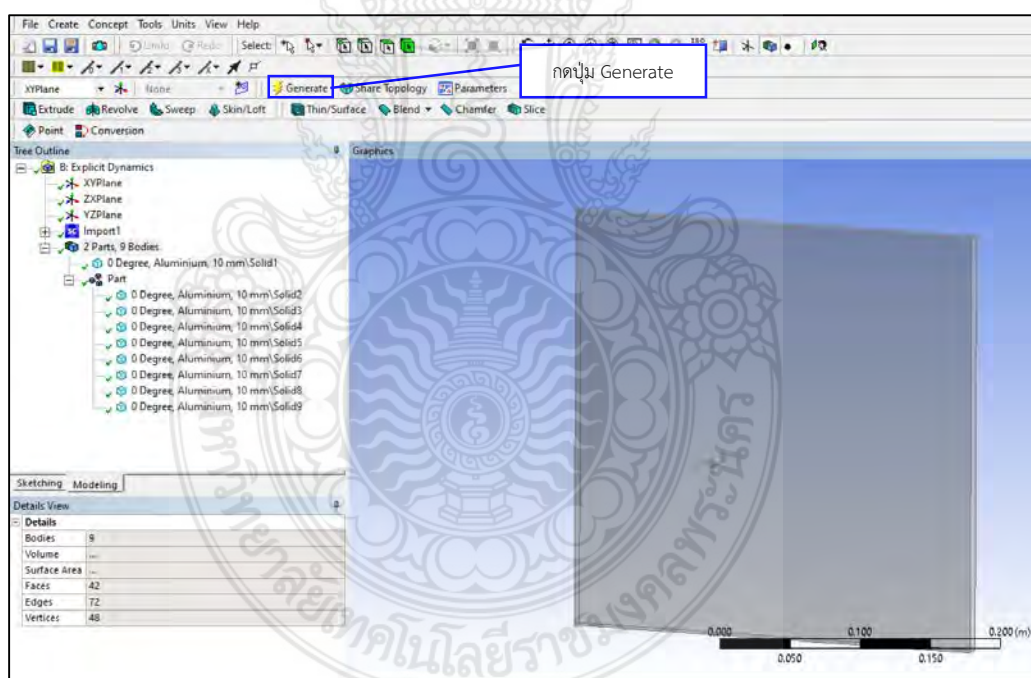
รูปที่ 3.8 การตั้งค่าคุณสมบัติของวัสดุ WC ทังสเตนคาร์ไบด์ [12]

3.3.2.2 การสร้างเมช (Mesh) การสร้างรูปจำลอง FEM โดยทั่วไปมักใช้กันอยู่ 2 แบบคือ 1. Hexahedral และ 2. Tetrahedral ซึ่งเมชที่ใช้ในการจำลองนั้นจะใช้เป็นแบบ Hexahedral เพื่อลดจำนวนของเซลล์ในการประมวลผล, การคลาดเคลื่อนของผลวิเคราะห์แบบจำลองและลดระยะเวลาในการประมวลโปรแกรมคอมพิวเตอร์ [12] ดังนั้นจะนำแบบจำลองการยิงที่ได้ทำการออกแบบจำลองไว้เข้าโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์โดยจะใช้ชุดคำสั่ง “Geometry” เพื่อนำแบบจำลองเข้ามาทำการตั้งค่าคุณสมบัติก่อน ดังรูปที่ 3.9



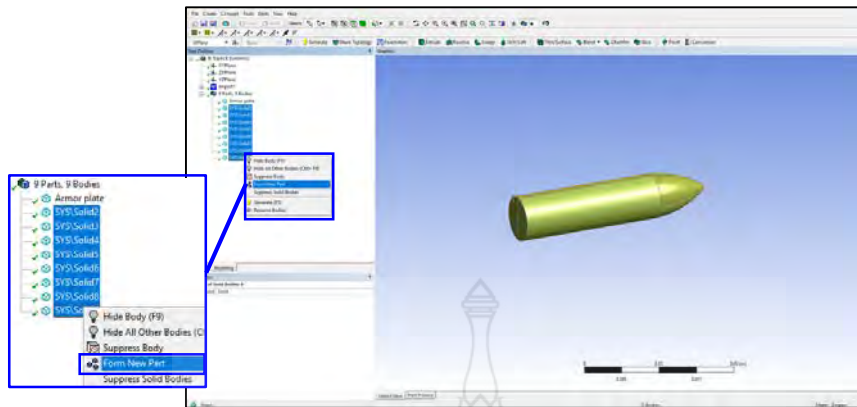
รูปที่ 3.9 การเรียกไฟล์จำลองเข้าสู่ Program ANSYS [12]

เมื่อได้นำแบบจำลองเข้ามาแล้วลักษณะของของชุดคำสั่ง “Geometry” จะเปลี่ยนหน้าตาและในการตั้งค่าแบบจำลองนั้นจะใช้คำสั่ง “Design Modeler Geometry” เมื่ออยู่ในหน้าตาของคำสั่ง Design Modeler Geometry แล้วให้เลือก “Generate” เพื่อแบบจำลองเข้าโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังรูปที่ 3.10



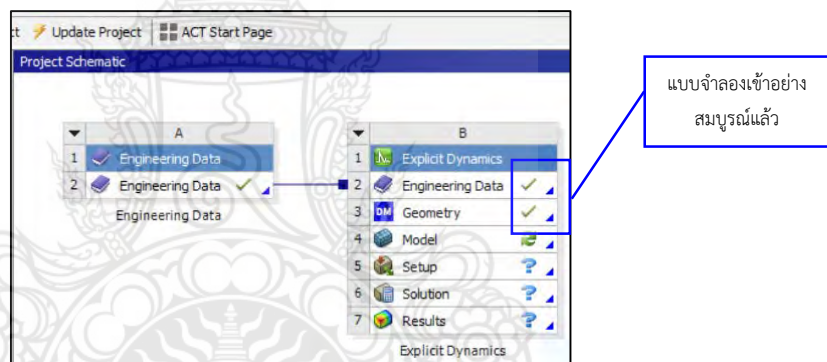
รูปที่ 3.10 การประมวลแบบจำลอง

ในการตั้งค่าของลูกกระสุนปืนที่ใช้ในแบบจำลองนั้นได้มีออกแบบมาเป็นชิ้นงานแยกตัวจากกันจำนวน 8 ส่วน [12] เพื่อให้สามารถให้ง่ายต่อสร้างรูปแบบเมช ดังนั้นจะต้องทำให้แบบจำลองของกระสุนเป็นรวมเป็นชิ้นงานตัวเดียวกันหรือรวมตัวเป็นไว้วัตถุเดียวกันก่อนซึ่งจะใช้คำสั่ง “Form New Part” ชิ้นงานของลูกกระสุนปืนก็จะรวมเป็นวัตถุเดียวกัน ดังรูปที่ 3.11



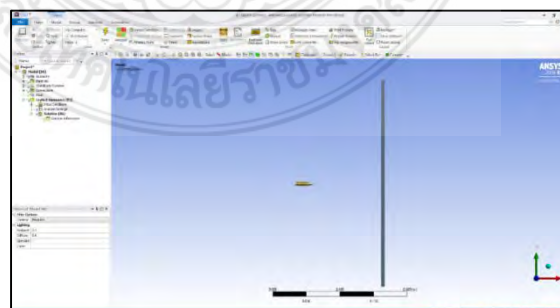
รูปที่ 3.11 การตั้งค่าการรวมวัตถุของแบบจำลองลูกกระสุนปืน [12]

ในขั้นตอนถัดไปในการการสร้างเมชให้กับชิ้นงานจำลองโดยใช้ชุดคำสั่ง “Model” และจากการที่ได้ตั้งค่าของชิ้นงานแล้วจะเห็นได้ว่าในตัวโปรแกรมนั้นจะมีเครื่องหมายถูกขึ้นที่ด้านขวาของชุดคำสั่ง ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การตรวจสอบการนำแบบจำลองเข้าอย่างสมบูรณ์แล้ว

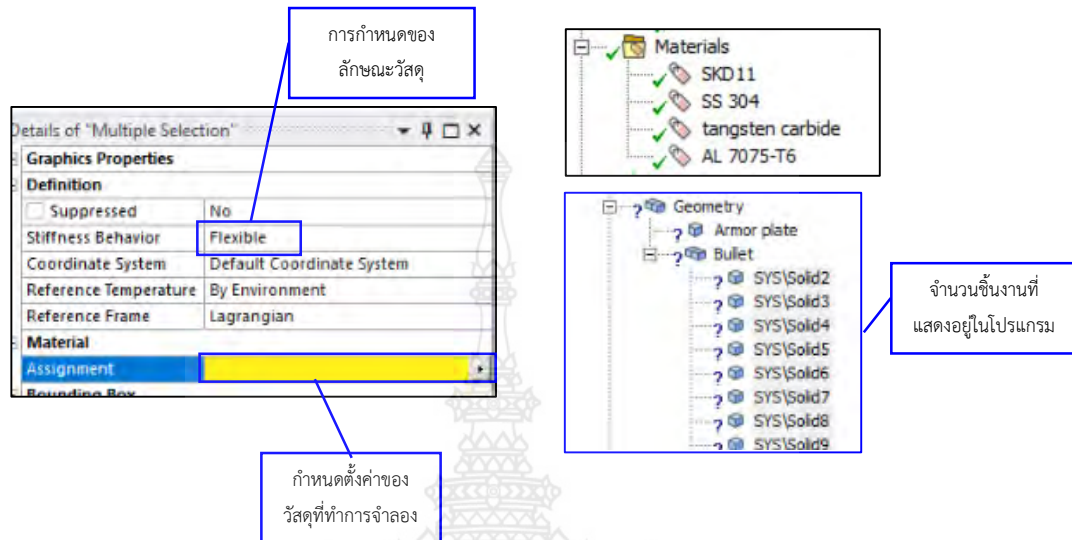
ถัดไปหน้าต่างของชุดคำสั่ง Model นั้นจะมีแถบเครื่องมือของการตั้งค่าต่าง ๆ ที่มีผลต่อการจำลองดังนั้นการตั้งค่าจึงต้องกำหนดค่าต่าง ๆ ให้กับแบบจำลองเบื้องต้นจึงจะต้องกำหนดในส่วนของวัสดุให้กับแบบจำลองชิ้นงานและจุดยึดสัมผัสในส่วนของผิวชิ้นงาน [12] ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ลักษณะหน้าต่างชุดคำสั่ง Model [12]

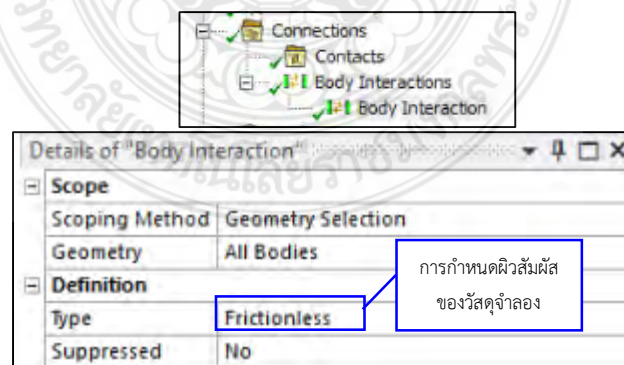
ในแถบของเครื่องมือ “Geometry” จะแสดงของจำนวนชิ้นส่วนของแบบจำลองที่ใช้ในการจำลองดังนั้นในส่วนนี้จะต้องมีการกำหนดของลักษณะวัสดุซึ่งเป็นแบบลักษณะ “Flexible” ทั้งลูก

กระสุนปืนและแผ่นเกราะกันกระสุน โดยกำหนดของวัสดุให้กับชิ้นส่วนแบบจำลองซึ่งกระสุนเป็นวัสดุ ทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) แผ่นเกราะเป็นวัสดุ 2 ชนิด คือ 1. SKD11 2. อะลูมิเนียม ดังรูปที่ 3.14



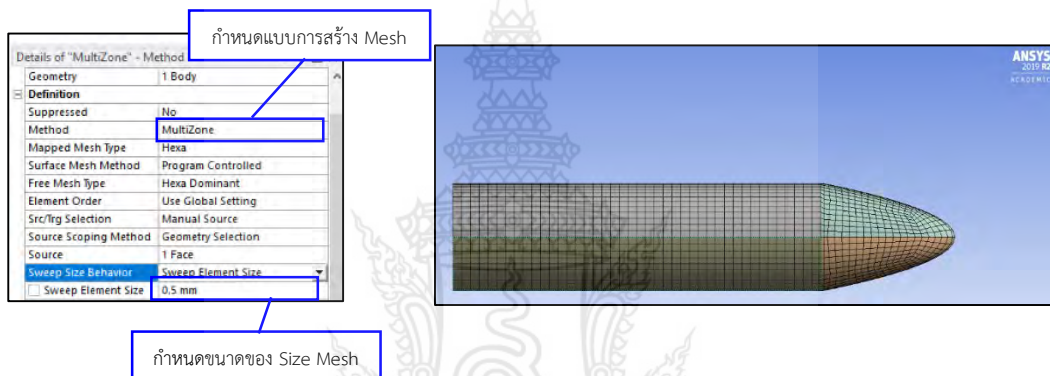
รูปที่ 3.14 การกำหนดลักษณะและวัสดุให้กับแบบจำลอง [12]

เมื่อได้ทำการกำหนดของคุณสมบัติวัสดุแล้ว [12] แผ่นเกราะจุดบริเวณสัมผัสของแบบจำลอง ในการจำลองแบบที่ 2 คือ แผ่นเกราะกระสุนที่ซ้อนกันเป็นแผ่น 2 ชั้น ซึ่งในการติดกันของแผ่นเกราะ นั้นเป็นแบบผิวสัมผัสกันซึ่งในการจำลองนั้นโดยจะไม่คิดค่าแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสที่แถบของ เครื่องมือ “Connections” ได้กำหนดที่ “Body Interaction” เป็นแบบ “Frictionless” ซึ่ง ตัวกำหนดให้ชิ้นงานนั้นติดกันแต่ไม่คิดค่าความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของแผ่นเกราะทั้ง 2 แผ่น ดังรูปที่ 3.15



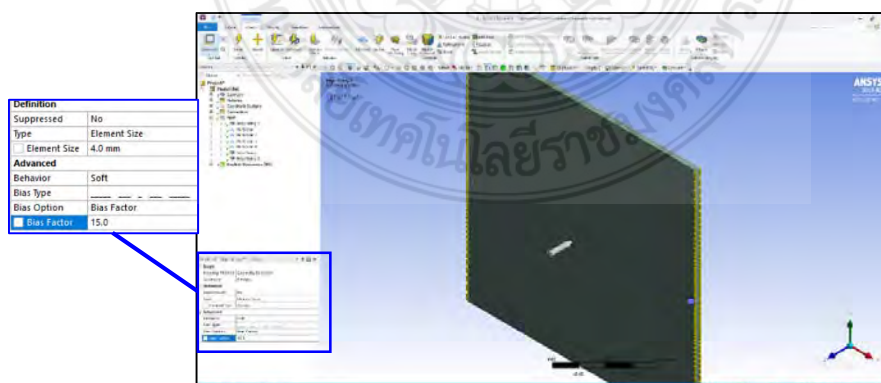
รูปที่ 3.15 การกำหนดผิวของแผ่นเกราะซ้อน 2 ชั้น [12]

ในการใช้แถบเครื่องมือของการสร้างรูปแบบเมช “Mesh” ซึ่งจะต้องกำหนดรูปแบบวิธีในการสร้าง Mesh ซึ่งในแต่ละส่วนของชิ้นงานการจำลอง การกำหนดตั้งค่าขนาดของ Element Size ในแต่ละส่วนเพื่อความเหมาะสมของชิ้นงานจำลองและการคำนวณของโปรแกรมให้ได้ผลการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีประสิทธิภาพแม่นยำ ถูกต้องดังนั้นการสร้างเมชที่ชิ้นงานให้เป็นแบบ Hexahedral ที่บริเวณหัวกระสุนเลือกแถบเครื่องมือ “Mesh Method” แล้วเลือกแบบ “MultiZone” แล้วเลือกเป็น “Manual Source” กำหนดให้ Element Size ที่บริเวณของหัวกระสุนมีขนาด 0.5 mm และที่บริเวณลำตัวใช้แถบเครื่องมือ “Sizing” กำหนดให้ Element Size เท่ากับ 0.5 mm ดังรูปที่ 3.16

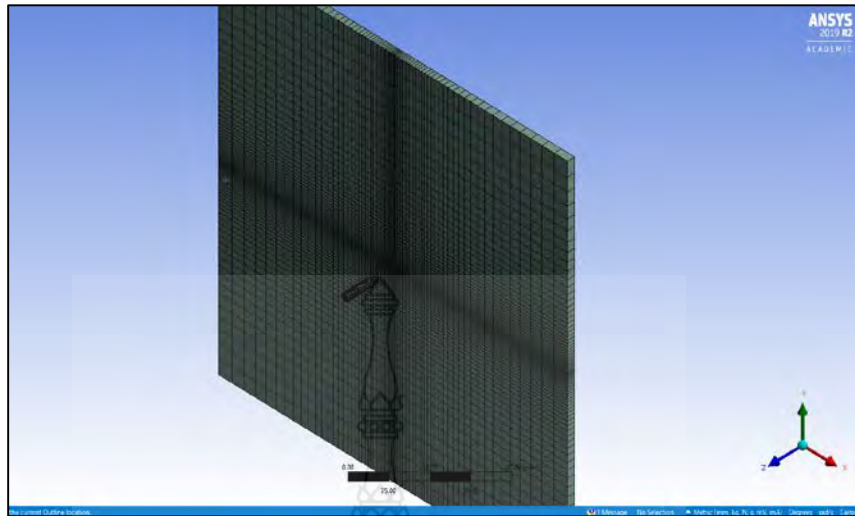


รูปที่ 3.16 การตั้งค่าขนาด Element Size และรูปแบบ Mesh บริเวณหัวกระสุน [12]

ในส่วนของการแบบแผ่นเกราะ 1 แผ่นนั้นของแถบเครื่องมือ “Sizing” เลือกตัว Cursor เป็นแบบ “Edge” เลือกที่บริเวณในส่วนของการขอบแบบจำลองชิ้นงานเพื่อกำหนดให้ “Element Size” เท่ากับ 4 mm แล้วเลือกของ “Bias Type” เพื่อให้มีความละเอียดบริเวณตรงกลางแบบจำลอง กำหนดอัตราของความละเอียดด้วยคำสั่ง “Bias Factor” เป็น 15 เท่า ของขนาด Element Size ดังรูปที่ 3.17 และ 3.18



รูปที่ 3.17 การกำหนด Element บริเวณของแผ่นเกราะ [12]



รูปที่ 3.18 ลักษณะของรูปแบบเมชที่แผ่นเกราะ [12]

3.3.2.3 การตั้งค่าชุดคำสั่ง Explicit Dynamics [12]

การตั้งค่าของชุดคำสั่ง “Explicit Dynamics” จะแถบเครื่องมือเพื่อกำหนดค่าเริ่มต้นโดยการจำลองการยิงจะเป็นความเร็วซึ่งมีความเร็ว 847 ± 9.1 m/s [7] เป็นค่าตามมาตรฐานการทดสอบ NIJ ระดับ 3 โดยใช้แถบเครื่องมือ “Initial Condition” เลือกเป็น “Velocity” เลือกชิ้นงานจำลองที่เคลื่อนด้วยความเร็วกระสุนปืนใส่ค่าความเร็วให้กับกระสุนปืนและทิศทางในการเคลื่อนที่ของกระสุนตามทิศทางของกระสุนเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามกับแกน Z ค่าความเร็วจึงต้องใส่เครื่องหมาย “-” เพื่อให้เคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามกับแกน ดังรูปที่ 3.19

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

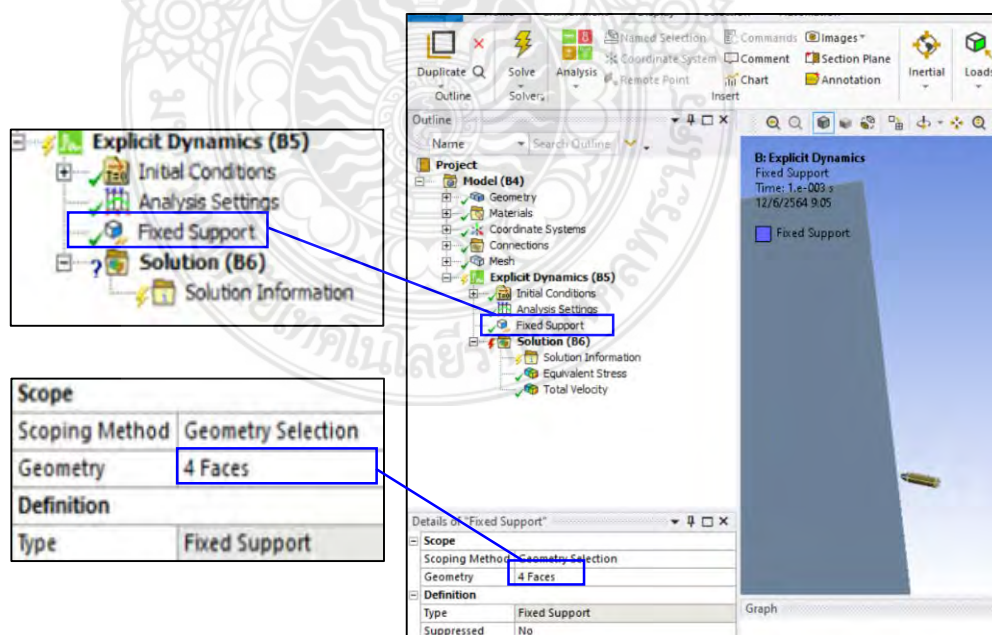
รูปที่ 3.19 คำสั่งการกำหนดของค่าความเร็วและทิศทาง

เมื่อทำการตั้งค่า “Initial Condition” แล้วในชุดคำสั่งแถบเครื่องมือของ “Analysis Settings” เป็นการตั้งค่ากำหนดของโปรแกรมในการคำนวณประมวลผลการจำลองและผลการวิเคราะห์ของการจำลองโดยเลือกที่คำสั่ง “End Time” เป็นการกำหนดให้ชิ้นงานเคลื่อนที่ไปในระยะเวลาที่ 0.001 วินาที เนื่องจากกระสุนปืนมีความเร็วที่ $847 \pm 9.1\text{m/s}$ ซึ่งมีความรวดเร็วมากจึงต้องกำหนดเวลาของ “End Time” ที่น้อยมากเพื่อให้สามารถวิเคราะห์การชนของกระสุนปืนที่แผ่นเกราะจากการมองเห็นได้และที่แถบเครื่องมือ “Output Controls” ที่ชุดคำสั่ง “Result Number of Points” เป็นคำสั่งในการบันทึกข้อมูลการวิเคราะห์เมื่อจำนวนค่าที่ใส่เข้าไปเพิ่มขึ้นความเสถียรของผลการวิเคราะห์จะมีการคลาดเคลื่อน (Error) ที่น้อยลงดังนั้นในการใส่ค่าเข้าไปควรใส่ที่ 50-100 จุด ดังรูปที่ 3.20

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

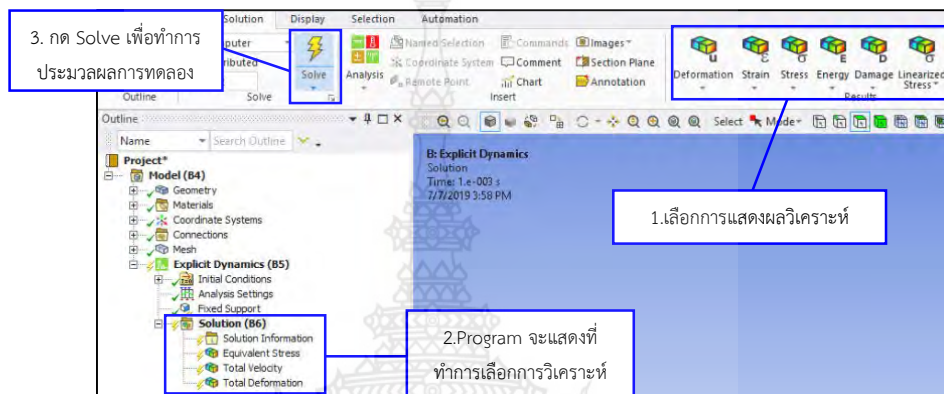
รูปที่ 3.20 ค่าของ “End Time” และ “Result Number of Points”

ในการยึดงานของแบบจำลองเกราะกันกระสุนทั้ง 4 ด้านจะใช้คำสั่งของ “Analysis Settings” จะใช้แถบเครื่องมือ “Fixed Support” สีน้ำเงินที่แสดงทั้ง 4 ด้าน บ่งบอกถึงการจับยึดชิ้นงานเป็นที่เรียบร้อยเมื่อกำหนดค่าต่าง ๆ เรียบร้อย ดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 การยึดชิ้นงานแบบ Fixed Support

ที่แถบชุดคำสั่งของการวิเคราะห์ “Solution” สามารถเลือกผลการวิเคราะห์ได้เช่น ความเค้น ความเครียด ความเร็ว การยุบตัว เป็นต้น ดังนั้นได้เลือกแถบเครื่องมือ “Equivalent Stress, Total Velocity และ Total Deformation” เพื่อให้แสดงผลของการวิเคราะห์ค่าความเค้น ความเร็ว และการยุบตัวของชิ้นงานการจำลองที่ได้จากการคำนวณและเมื่อเลือกแถบเครื่องมือแสดงผลวิเคราะห์จากนั้นเลือกคำสั่ง “Solve” เพื่อให้โปรแกรมได้เริ่มประมวลผลการจำลอง ดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 คำสั่งแสดงผลการวิเคราะห์

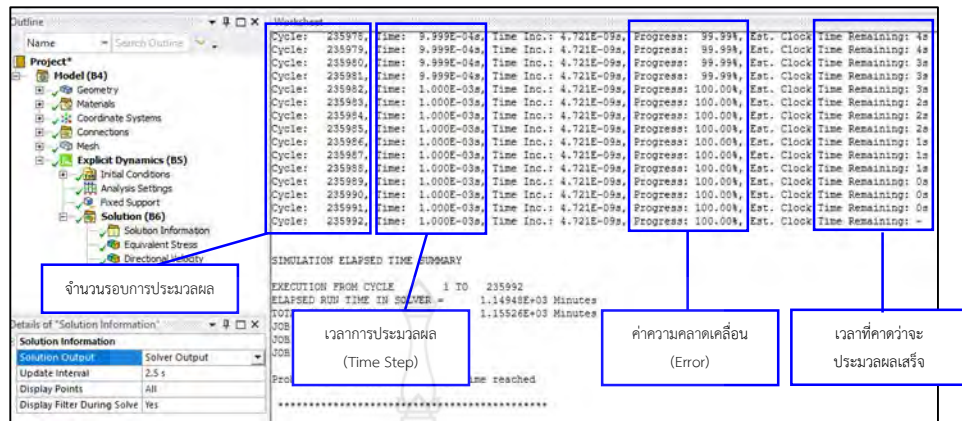
3.3.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Solve-processing) [12]

ในขั้นตอนการประมวลผลจากการปฏิบัติการจากของ Program เป็นการวิเคราะห์ค่าในขั้นตอนการเตรียมค่าที่กำหนดนั้น ซึ่งจะมีส่วนประกอบหลักในการคำนวณอยู่ 2 อย่างคือ 1. ผลการคลาดเคลื่อน (Error) ของ Program 2. สมรรถนะของคอมพิวเตอร์ในการประมวลผล ซึ่งส่วนประกอบหลักทั้ง 2 อย่างนี้จะเป็นตัวช่วยในการวิเคราะห์ผลจากการคำนวณ เช่น การคลาดเคลื่อน (Error) ซึ่งค่าที่ยอมรับได้จากโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีค่าไม่เกินร้อยละ 5-10 ซึ่งสามารถตรวจสอบผลได้จากกราฟหลังจาก “Solve” ในโปรแกรม

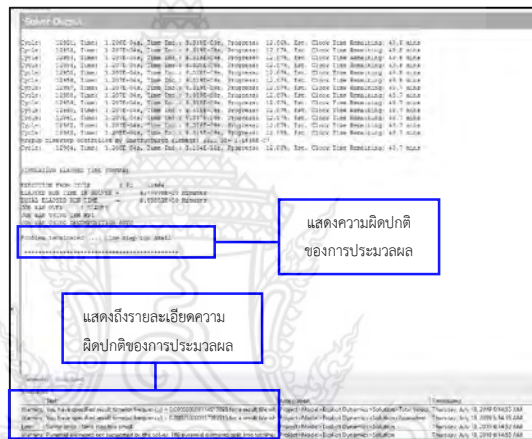
3.3.3.1 การตรวจสอบของผลการคลาดเคลื่อน (Error)

การตรวจสอบผลจากการคลาดเคลื่อนที่ชุดคำสั่ง “Solution Information” โดยจะมีคำสั่ง “Solution Output” ซึ่งโดยมีตัวเลือกของแถบอยู่ 5 แบบคือ 1. Solver Output 2. Time Increment 3. Energy Conservation 4. Momentum Summary 5. Energy Summary โดยสามารถใช้ในการตรวจสอบการคลาดเคลื่อนในระหว่างการประมวลผลได้

1. Solver Output นั้นจะบอกถึงจำนวนรอบการทำงาน, เวลาของการปฏิบัติแต่ละขั้นตอน Time Step, จำนวนร้อยละของการคำนวณและเวลาในการประมวลผลที่แล้วเสร็จ ซึ่งในแถบเครื่องมือนี้ถ้าเกิดข้อผิดพลาดจากการคำนวณโปรแกรมจะหยุดการประมวลผลทันทีและจะแสดงสถานะของจุดที่เกิดความผิดพลาดในขั้นตอน ดังรูปที่ 3.23 และ 3.24

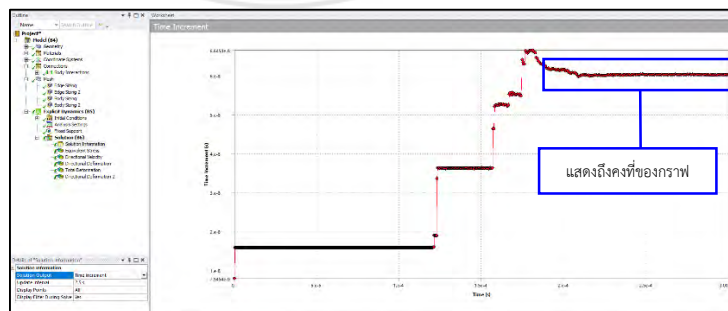


รูปที่ 3.23 แสดงผลการประมวลผลของ Solver Output

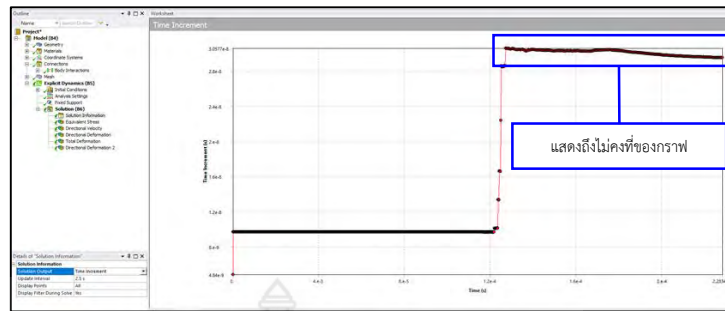


รูปที่ 3.24 การแสดงผลการประมวลผลที่ผิดปกติ

2. Time Increment คือกราฟของการแสดงเวลาของ Time Step ในการประมวลผลของการทำงานเมื่อเกิดการกระแทกของการจำลองและกราฟจะเกิดการเปลี่ยนแปลงในช่วงของ Time Increment ที่สูงหลังจากที่เกิดการกระแทกเรียบร้อยกราฟจะลดลงที่จนครบ Time Step ของการทำงานซึ่งจะบอกสถานะของการประมวลผลที่ปกติไม่เกิดการคลาดเคลื่อนที่มากกว่าร้อยละ 5-10 ถ้าการประมวลผลมีความผิดปกติโปรแกรมจะยังทำการประมวลผลต่อไปแต่หลังจากหลังวัตถุกระทบแล้วกราฟจะมีลักษณะลดลงตาม Time Step ของการประมวลผลซึ่งจะไม่คงที่จะบอกถึงความผิดปกติ ดังรูปที่ 3.25 และ 3.26

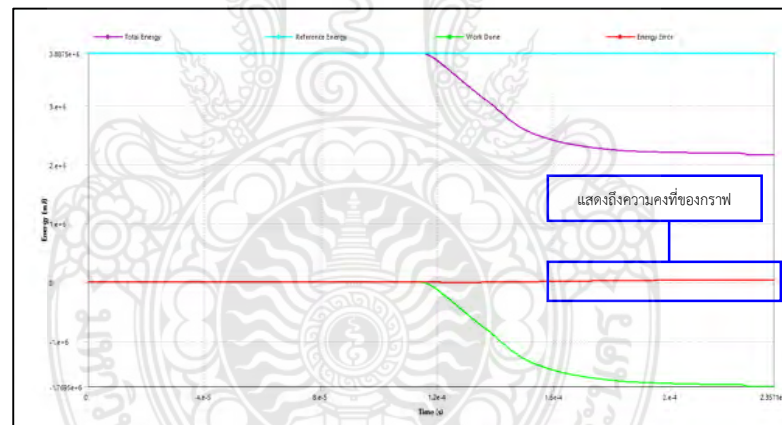


รูปที่ 3.25 ลักษณะกราฟแสดงสถานะปกติ



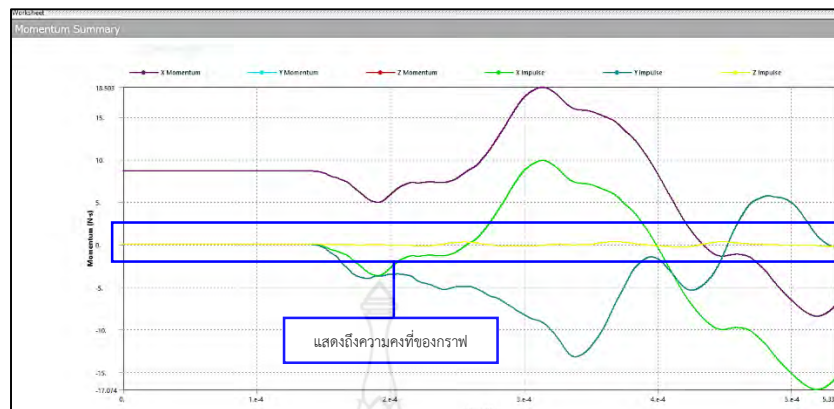
รูปที่ 3.26 ลักษณะกราฟแสดงสถานะมีความผิดปกติ

3. Energy Conservation โดยลักษณะกราฟจะแสดงถึงค่าหน่วยของพลังงาน (Energy) ซึ่งโดยพลังงานที่เกิดขึ้นนั้นจากการประมวลผลเมื่อวัตถุเคลื่อนที่กระทบ จะแสดงถึงพลังงานที่เกิดขึ้นเทียบกับ Time Step ของการประมวลจะแสดงค่าของพลังงานดังนี้ Total Energy, Reference Energy, Work Done และ Energy Error ซึ่งในส่วนนี้การจำลองนี้จะสังเกตที่เส้นกราฟของ Energy Error เป็นเส้นสีแดงจะแสดงลักษณะหลังจากเกิดการกระทบของลูกกระสุนจากการจำลองแล้วเส้นกราฟจะมีลักษณะคงที่ซึ่งจะบอกถึงความปกติของการประมวลผลแต่ถ้ากราฟมีลักษณะที่เพิ่มขึ้นเป็นการแสดงถึงความผิดปกติในการประมวลผล ดังรูปที่ 3.27



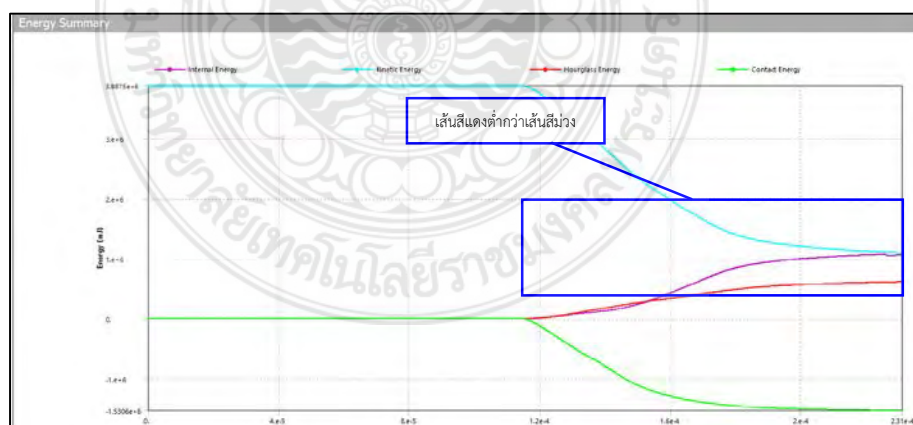
รูปที่ 3.27 แสดงถึงเส้นกราฟ Energy Error แสดงสถานะปกติ

4. Momentum Summary คือกราฟที่จะแสดงผลค่าของ Momentum ในแต่ละแกนที่เกิดความเสียหายเทียบกับ Time Step ในของการทำงานจะแสดงค่าของ Impulse ในแต่ละแนวแกนซึ่งจะสามารถตรวจสอบการคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากแนวแกนจากหลังวัตถุเกิดการกระทบของการจำลองแล้วเมื่อมี Momentum และ Impulse จะแสดงผลซึ่งมีความสอดคล้องกับการจำลองที่กระทบถือว่าปกติ ซึ่งในการจำลองนี้จากด้านข้างของชิ้นงานอยู่ในแนวแกน Z ซึ่งในเส้นสีเหลืองจะเป็นค่าของ Impulse ในแนวแกน Z เส้นกราฟจะมีลักษณะเป็นคงที่และเส้นสีแดงจะแสดงค่าของ Momentum ในแนวแกน Z ดังนั้นจะไม่แสดงผลในกราฟดังนั้นถ้าวัตถุกระทบแล้วไม่สอดคล้องกันถือว่ามีความผิดปกติของการจำลองนี้ ดังรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 กราฟ Impulse แกน Z แสดงผลที่เป็นปกติ

5. Energy Summary คือกราฟที่จะแสดงผลของพลังงานที่เกิดขึ้นจากการที่วัตถุเกิดการกระแทกซึ่งโดยมีพลังงานที่เกี่ยวข้องดังนี้ Internal Energy, Kinetic Energy, Hourglass Energy, Contact Energy ซึ่งการตรวจสอบของการคลาดเคลื่อนนั้นจะสังเกตที่เส้นกราฟของ Hourglass Energy เนื่องจากจะมีผลที่เกิดจากการสร้างเมช (Mesh) แบบ Hexahedral โดยเฉพาะค่าของ Element ทั้ง 4 จุด มีขนาดที่เท่ากันดังนั้นจะทำให้ค่าของความเครียด (Strain) เป็นศูนย์หรือเรียกว่า “Hourglass Effect” ค่าที่แสดงผลของกราฟ Hourglass Energy จะแสดงผลเป็นเส้นสีแดงซึ่งจะต้องมีค่าน้อยกว่าเส้นสีม่วงซึ่งแสดงค่าเป็น Internal Energy ซึ่งถือว่าปกติตามแต่เมื่อถ้าเส้นสีแดง Hourglass Energy มีค่ามากกว่าเส้นสีม่วง Internal Energy จะมีความผิดปกติเกิดขึ้นจากการประมวลผล ที่มีสาเหตุอันเนื่องมาจากการสร้างรูปแบบเมช (Mesh)จากการกำหนดที่มาจากค่าตั้งค่า ดังรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.29 กราฟ Hourglass Energy แสดงผลที่เป็นปกติ

3.3.3.2 สมรรถนะของคอมพิวเตอร์ในการประมวลผล [12]

จากการตรวจสอบค่าคลาดเคลื่อน (Error) จากการประมวลผลแต่มีอีกหนึ่งปัจจัยในการประมวลผลสำคัญอีกประการ เนื่องจากการประมวลผลจากโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ในสร้าง

ขนาดของเมช (Mesh) ที่แบบจำลองที่มีขนาดเล็ก เป็นปัจจัยหลักของเวลาเป็นตัวแปรมาเกี่ยวข้องนั้น ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ของวัตถุ (Dynamics) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงในการประมวลผล เพื่อความเที่ยงตรงของการจำลองเหมือนจริงทั้งทางด้านของความเสียหาย ด้านการพลังงานจากวัตถุอุปกรณ์ของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์มีดังนี้

- CPU – Intel I7-9700K 3.6 GHz 8 Core 8 Thread
- Mainboard – Asus Prime Z390-A
- RAM – Consair 64 GB DDR4/3200 MHz
- VGA – Asus Strix GTX1050Ti 4 GB GDDR5
- M.2 – WD Black SN750 500 GB
- Power Supply – Thermaltake 750 watt 80+ GOLD

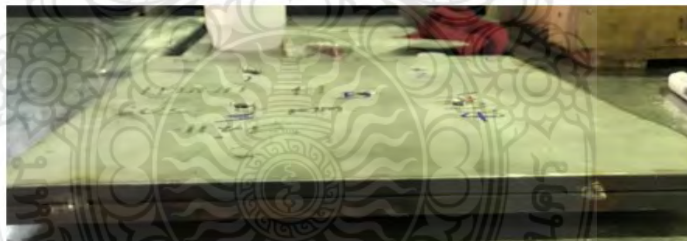


บทที่ 4

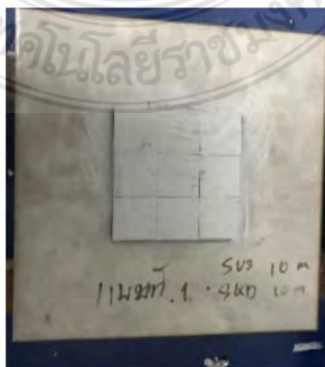
ผลการดำเนินงานและวิเคราะห์

4.1 ผลการเปรียบเทียบของผลการจำลองและการทดลองจริงเพื่อแสดงความน่าเชื่อถือของโปรแกรม ANSYS

ในการจำลองนี้ผู้แต่งได้คัดลอกเนื้อหามาจากเล่มวิทยานิพนธ์ของ นวพล กลางทัพ เรื่อง“การวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนบนโลหะด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์” [12] จำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นเพื่อเป็นการตรวจสอบความสามารถของโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ จึงได้สร้างแผ่นเกราะเพื่อใช้ในการทดลองจริงเป็น 2 แบบ คือ แบบที่ 1 แผ่นเกราะซ้อนกัน 2 ชั้น แผ่นด้านหน้าความหนา 10 mm และแผ่นด้านหลังความหนา 10 mm ทำจากวัสดุสแตนเลส SUS304 แบบที่ 2 แผ่นเกราะซ้อนกัน 2 ชั้น โดยแผ่นเกราะด้านหน้าความหนา 10 mm ขนาด 40 x 40 mm จำนวน 9 แผ่น ทำจากวัสดุ SKD11 นำมาติดตั้งบนแผ่นเกราะด้านหลังความหนา 10 mm ทำจากสแตนเลส SUS304 เนื่องจากวัสดุ SKD11 มีราคาที่สูงจึงได้นำเป็นแผ่นเล็กมาติดตั้งเพื่อใช้ในการทดลองจริงด้วยมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2

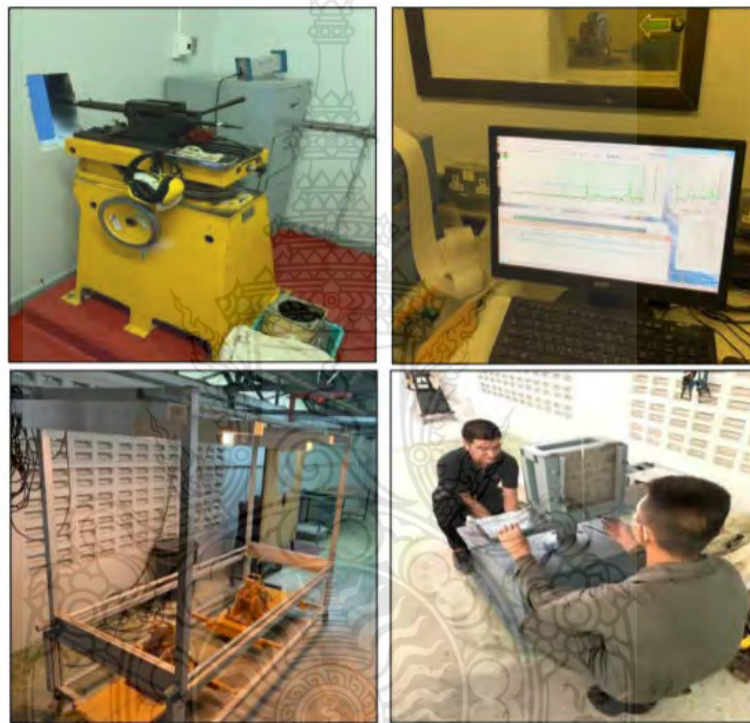


รูปที่ 4.1 แผ่นด้านหน้า 10 mm SUS304 แผ่นด้านหลัง 10 mm SUS304



รูปที่ 4.2 แผ่นด้านหน้า 10 mm SKD11 แผ่นด้านหลัง 10 mm SUS304

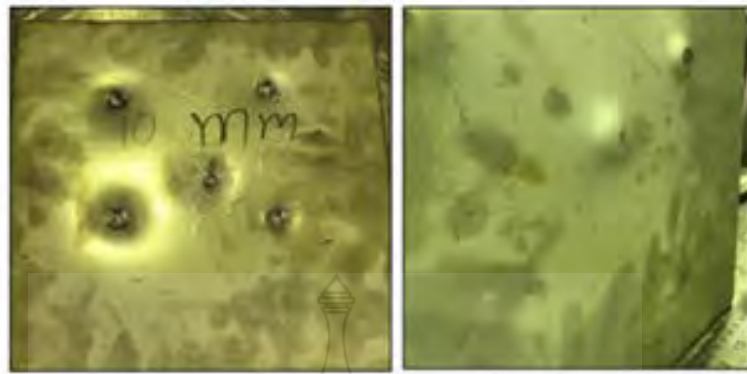
จึงนำไปทดสอบการยิงกระสุนจริงที่ โรงงานวัตถุระเบิดทหาร กรมการอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ และพลังงาน จังหวัด นครสวรรค์ (Military Explosives Factory, Defence Industry Department, Defence Industry and Energy Centre) ยิงตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 ด้วย กระสุนขนาด 7.62 x 51 mm NATO FMJ 148 Gr. ที่มุม 0 องศา ความเร็ว 847 ± 9.1 m/s ซึ่งผลที่ได้แผ่นเกราะแบบที่ 1 นั้นกระสุนได้เจาะทะลุแผ่นเกราะด้านหน้าอย่างสมบูรณ์แต่แผ่นเกราะด้านหลังไม่ทะลุแต่เกิดผิวเป็นรอยนูนที่บริเวณด้านหลังแผ่นเกราะ ดังรูปที่ 4.3, 4.4 และ 4.5



รูปที่ 4.3 การทดสอบยิงจริงตามมาตรฐาน NIJ

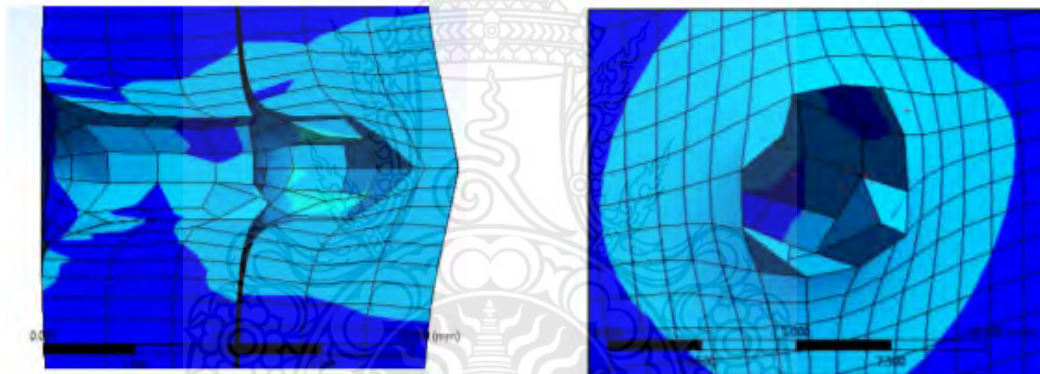


รูปที่ 4.4 ความเสียหายที่แผ่นเกราะสแตนเลส SUS304 ด้านหน้า



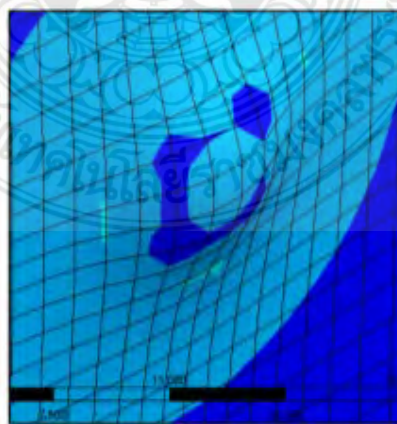
รูปที่ 4.5 ความเสียหายที่แผ่นเกราะสแตนเลส SUS304 ด้านหลัง

เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า ความเสียหายที่เกิดจากการจำลองที่แผ่นเกราะด้านหน้าเกิดการเจาะทะลุและที่แผ่นเกราะด้านหลังไม่ทะลุแต่เกิดเป็นรอยนูนที่บริเวณผิวด้านหลังแผ่นเกราะ ดังรูปที่ 4.6



(ก) การเจาะทะลุของแผ่นเกราะ

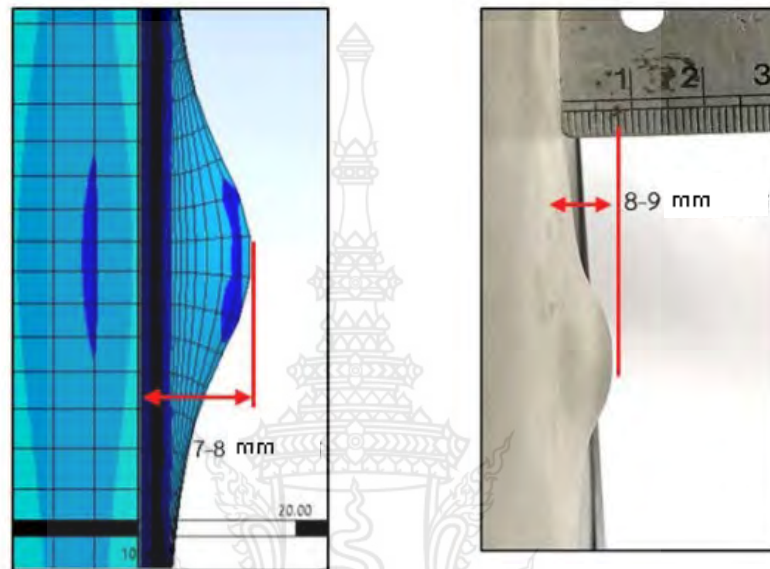
(ข) รอยเจาะทะลุที่แผ่นเกราะด้านหน้า



(ค) รอยนูนที่แผ่นเกราะด้านหลัง

รูปที่ 4.6 ผลการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

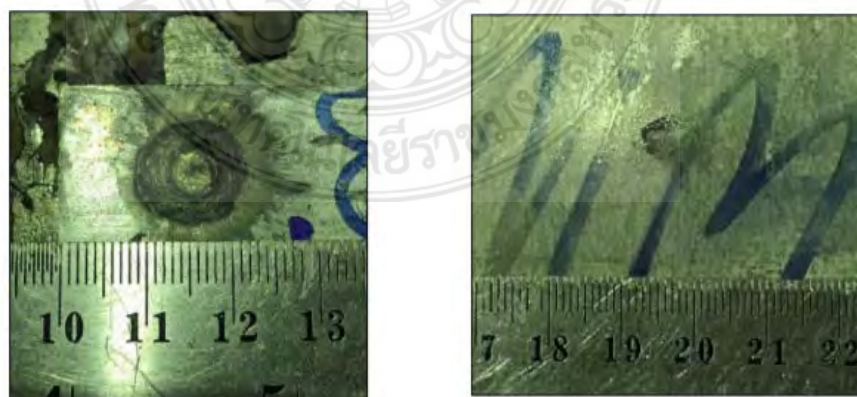
ซึ่งได้วัดรอยนูนของผิวที่แผ่นเกราะด้านหลังแล้วนำมาทำการเปรียบเทียบกับผลการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งค่าที่วัดจากผลการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ผิวด้านหลังแผ่นเกราะถึงผิวของรอยนูนอยู่ที่ 7-8 mm วัดรอยนูนจากการทดลองจริงซึ่งได้ 8-9 mm แสดงให้เห็นว่าผลจากการจำลองกับผลการทดสอบจริงมีความสอดคล้องกัน ดังรูปที่ 4.7



(ก) รอยนูนของแผ่นเกราะจากการจำลอง (ข) รอยนูนของแผ่นเกราะจากการทดลองจริง

รูปที่ 4.7 รอยนูนที่แผ่นเกราะด้านหลังแบบจำลอง

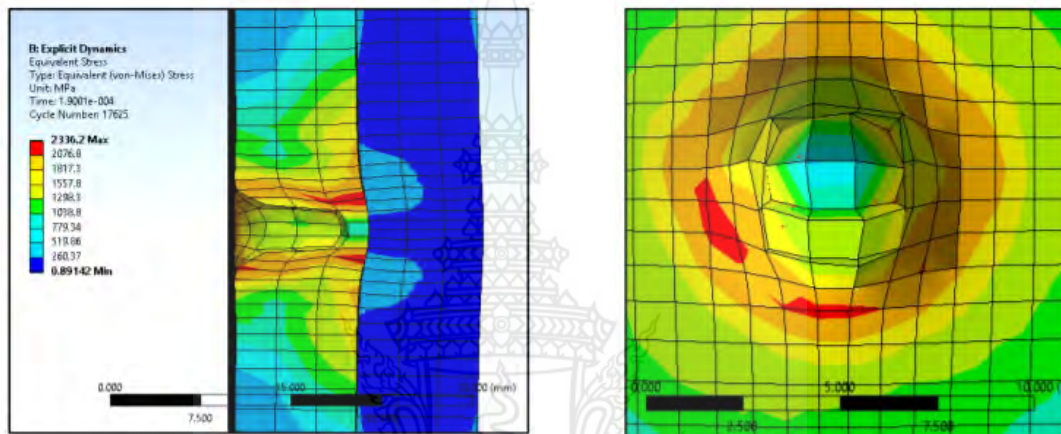
แผ่นเกราะแบบที่ 2 แผ่นด้านหน้าทำจากวัสดุ SKD11 และแผ่นด้านหลังทำจากสแตนเลส (SUS304) ผลที่ได้คือ แผ่นเกราะด้านหน้าและด้านหลังไม่เจาะทะลุ แต่แผ่นเกราะด้านหน้าจะมีรอยเจาะของหัวกระสุนและแผ่นเกราะด้านหลังจะเป็นรอยนูนออกมาเพียงเล็กน้อย ดังรูปที่ 4.8



(ก) รอยเจาะของหัวกระสุนที่แผ่นเกราะด้านหน้า (ข) รอยนูนที่แผ่นเกราะด้านหลัง

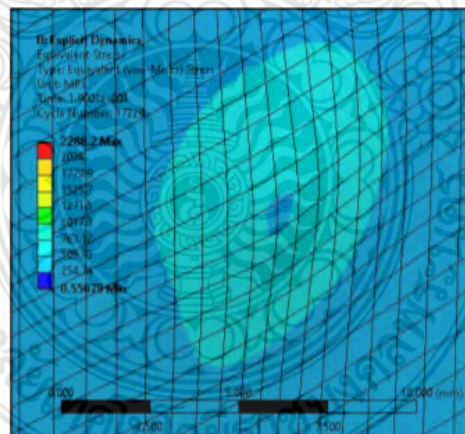
รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบยิงจริง

จากผลการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์แผ่นเกราะแบบที่ 2 พบว่าแผ่นเกราะด้านหน้าเป็นรอยเจาะและแผ่นเกราะด้านหลังเป็นรอยนูน ซึ่งผลจากการจำลองรอยเจาะของกระสุนที่แผ่นเกราะด้านหน้าวัดเส้นผ่าศูนย์กลางได้ 8-9 mm ในส่วนการทดลองจริงวัดเส้นผ่าศูนย์กลางได้ 10-11 mm เนื่องจากผลจากการจำลองได้ใช้แกนของกระสุน ซึ่งมีขนาดกระสุนที่เล็กกว่าจากกระสุนในการทดสอบ จริงเนื่องจากการทดสอบจริงกระสุนจะมีปอกหุ้มแกนของกระสุนความหนาอยู่ที่ 0.5-1 mm ดังนั้นผลจากการจำลองมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยซึ่งยังมีความสอดคล้องกัน ดังรูปที่ 4.9



(ก) รอยเจาะของกระสุน

(ข) รอยเจาะที่แผ่นเกราะด้านหน้า



(ค) รอยนูนที่แผ่นเกราะด้านหลัง

รูปที่ 4.9 ผลการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

จากผลการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์และผลการทดสอบจริงพบว่ามี ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับแผ่นเกราะนั้นมีความสอดคล้องกัน ซึ่งโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองความเสียหายของแผ่นเกราะกันกระสุนนั้นสามารถเชื่อถือได้ ดังนั้นจึงได้ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองความเสียหายของแผ่นเกราะที่สามารถต้านทานการเจาะทะลุของมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 ได้

4.2 ผลการจำลองแผ่นเกราะกันกระสุนที่สามารถต้านทานการเจาะทะลุตามมาตรฐาน NIJ 3 ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลการจำลองจากด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์มีข้อสรุป ดังตารางที่ 4.1, 4.2 และ 4.3

ตารางที่ 4.1 ผลการจำลองแบบที่ 1 แผ่นเกราะชั้นเดียวของวัสดุอะลูมิเนียมและมุมมองการยิงของกระสุนบนแผ่นเกราะ

วัสดุ	ความหนา (mm)	มุมกระแทก(องศา)			
		0	15	30	45
SKD11	6	ทะลุ	ทะลุ	ทะลุ	ไม่ทะลุ
	8	ทะลุ	ทะลุ	ทะลุ	ไม่ทะลุ
	10	ทะลุ	ทะลุ	ไม่ทะลุ	ไม่ทะลุ

ตารางที่ 4.2 ผลการจำลองแบบที่ 2 แผ่นเกราะชั้นเดียวของวัสดุ SKD11 และมุมมองการยิงของกระสุนบนแผ่นเกราะ

วัสดุ	ความหนา (mm)	มุมกระแทก(องศา)			
		0	15	30	45
AL7075	6	ทะลุ	ทะลุ	ทะลุ	ทะลุ
	8	ทะลุ	ทะลุ	ทะลุ	ทะลุ
	10	ทะลุ	ทะลุ	ทะลุ	ทะลุ

ตารางที่ 4.3 ผลการจำลองแบบที่ 3 แผ่นเกราะแบบซ้อนแผ่นของวัสดุ SKD11 กับวัสดุอะลูมิเนียม และมุมมองการยิงของกระสุนบนแผ่นเกราะ

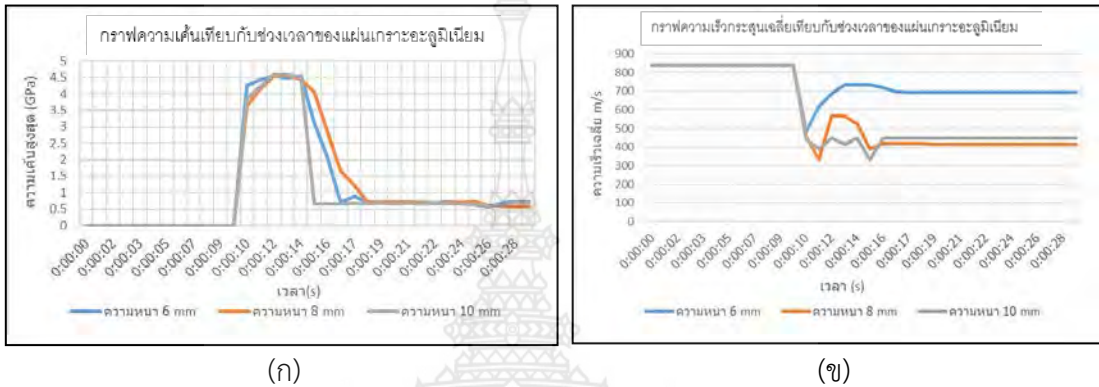
ความหนาแผ่น (mm)		มุมกระแทก (องศา)			
วัสดุ	วัสดุ				
แผ่นหน้า	แผ่นหลัง	0	15	30	45
SKD11	AL7075				
6	6	ทะลุ	ทะลุ	ทะลุ	ไม่ทะลุ
8	8	ทะลุ	ทะลุ	ไม่ทะลุ	ไม่ทะลุ
10	8	ทะลุ	ไม่ทะลุ	ไม่ทะลุ	ไม่ทะลุ
10	10	ทะลุ	ไม่ทะลุ	ไม่ทะลุ	ไม่ทะลุ

ผลการทดลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์บน Program ANSYS แสดงดังตาราง ในการจำลองนี้ แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนของเรื่องวัสดุความหนา และมุมมองการกระแทกของกระสุนที่มีผลต่อแผ่นเกราะกันสุนซึ่งเป็นปัจจัยในการต้านทานของแผ่นเกราะกันกระสุน

4.3 ผลการจำลองแผ่นเกราะกันกระสุนจากอะลูมิเนียมแบบจำลองที่ 1

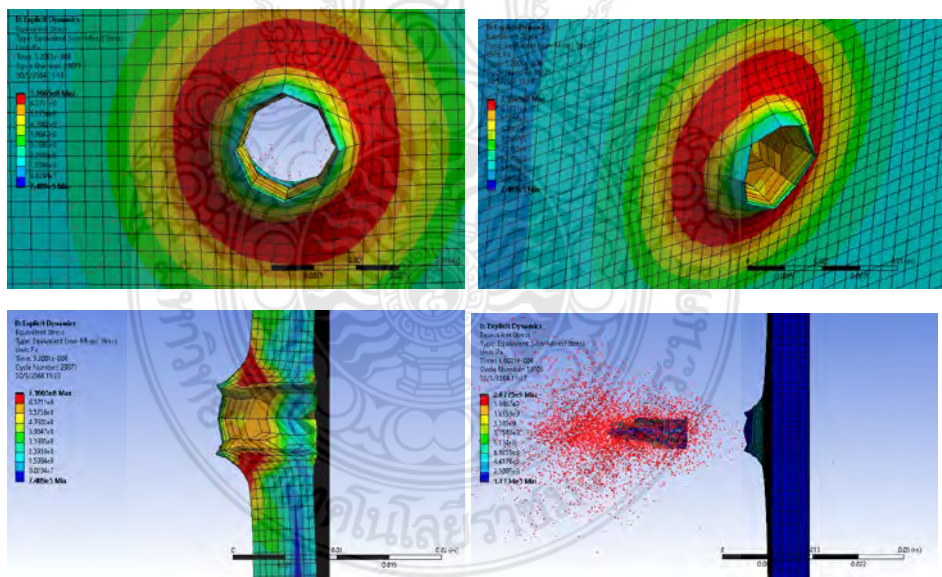
แผ่นเกราะกันกระสุนทำจากอะลูมิเนียมเป็นแบบแผ่นเดียวที่มีขนาดความหนาของวัสดุที่ 6, 8 และ 10 mm ที่การทดลองจะมีมุมกระแทกของกระสุนที่มุม 0, 15, 30 และ 45 องศา

4.3.1 การทดลองมุมกระแทกที่ 0 องศา ความหนาที่ 6, 8 และ 10 mm ดังรูปที่ 4.10 , 4.11, 4.12 และ 4.13

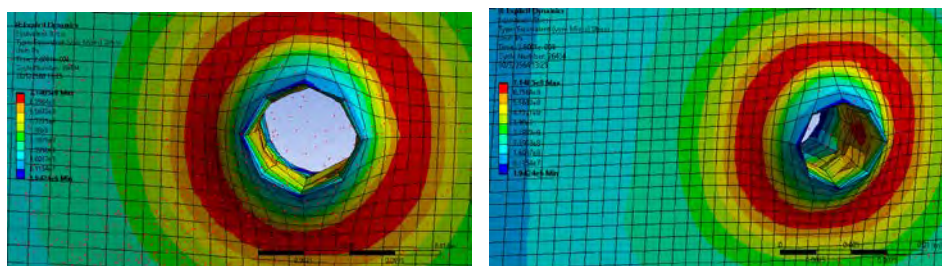


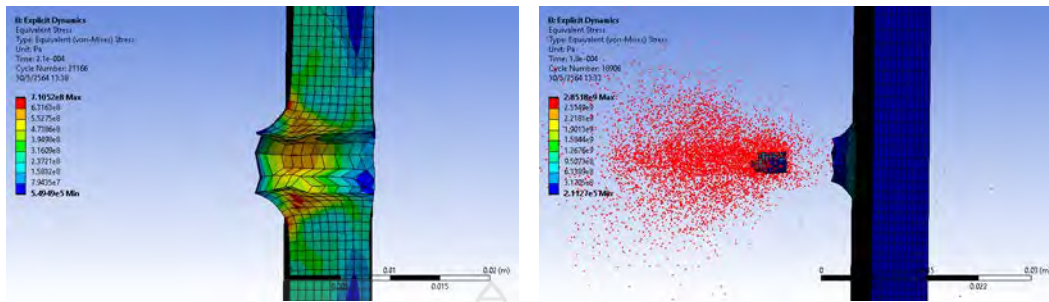
รูปที่ 4.10 (ก) กราฟแสดงความเค้นเทียบกับช่วงเวลาของแผ่นอะลูมิเนียมที่มุม 0 องศา

(ข) กราฟแสดงความเร็วกระสุนเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลาของแผ่นอะลูมิเนียมที่มุม 0 องศา

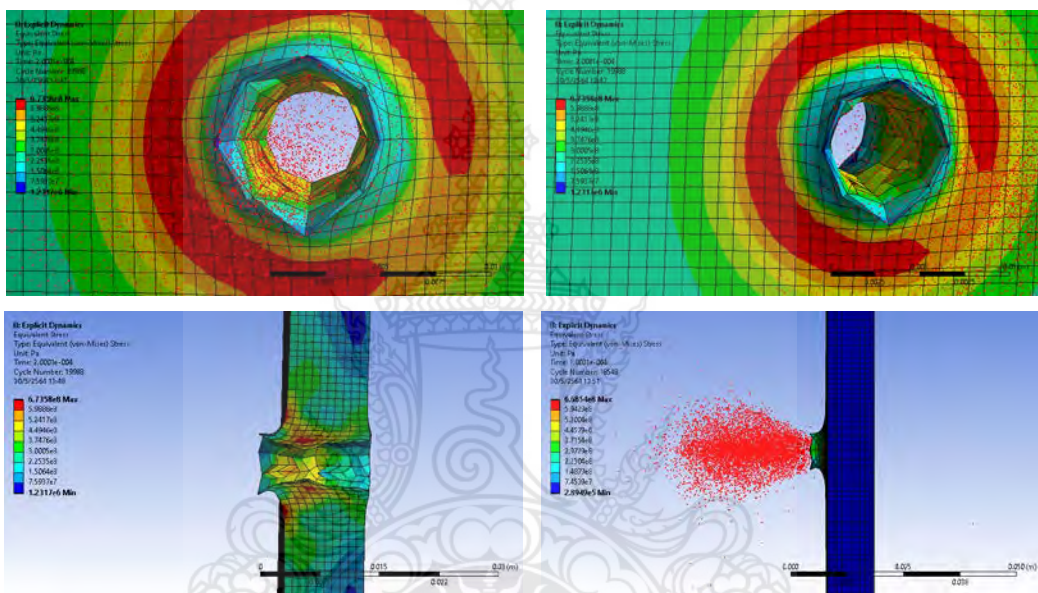


รูปที่ 4.11 แผ่นเกราะอะลูมิเนียม ความหนา 6 mm มุม 0 องศา





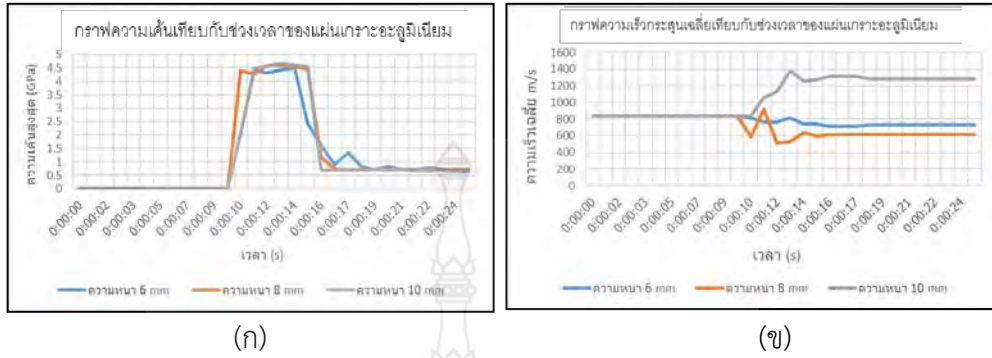
รูปที่ 4.12 แผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 8 mm มุม 0 องศา



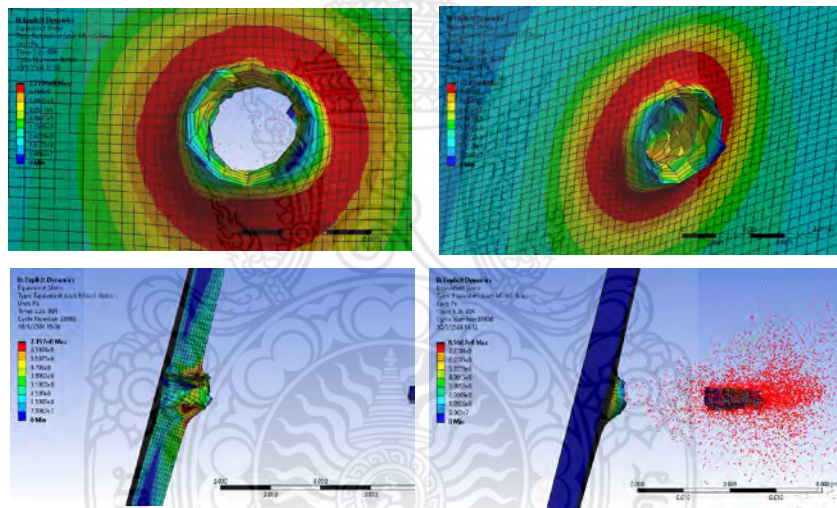
รูปที่ 4.13 แผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 10 mm มุม 0 องศา

ผลการจำลองของแผ่นเกราะอะลูมิเนียมที่มุม 0 องศา โดยใช้ความเร็วในการจำลองของลูกกระสุนด้วยความเร็ว 847 m/s เห็นได้ว่าแผ่นเกราะขนาด 6, 8, และ 10 mm นั้นไม่สามารถต้านทานต่อการเจาะทะลุได้ จากการพิจารณาของกราฟแสดงความเค้นเทียบกับช่วงเวลานั้นพบได้ว่าที่ความหนาของแผ่นเกราะ 6 mm นั้นมีความเค้นสูงสุดเนื่องจากขนาดความหนาของแผ่นเกราะที่น้อยที่สุดของแผ่นเกราะอะลูมิเนียมมีผลต่อการเจาะทะลุแผ่นเกราะตามลำดับของความหนา ซึ่งในส่วนของกราฟความเร็วเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลานั้นจะเห็นได้ว่าที่ความหนาของแผ่นเกราะที่ 6 mm มีความเร็วของลูกกระสุนหลังจากการชนของแผ่นเกราะสูงสุด อันเนื่องจากความต้านทานการทำลายของแผ่นเกราะกันกระสุนนั้นมีขนาดความหนาที่ต้านทานได้น้อยกว่า 8, 10 mm และจากรอยการทำลายของกระสุนบริเวณการเจาะทะลุนั้น จะเห็นได้ว่าที่ความหนาของ 6 mm กระสุนสามารถทะลุแผ่นเกราะกันกระสุนได้อย่างสมบูรณ์ เมื่อเทียบกับความหนาของ 8, 10 mm จากผลการจำลองนั้นสรุปได้ว่าความหนาของแผ่นเกราะอะลูมิเนียมมีผลต่อความต้านทานของกระสุนทั้งในเรื่องความเค้นและความเร็วหลังจากการเจาะทะลุของกระสุน

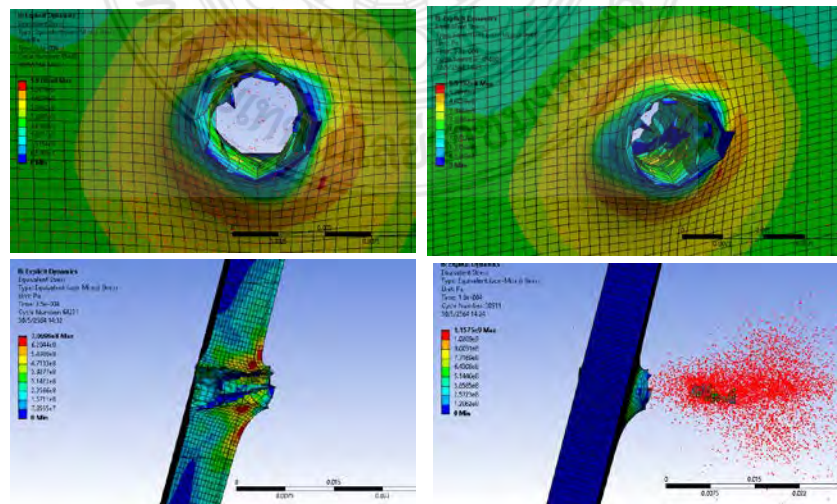
4.3.2 การทดลองมุมกระแทกที่ 15 องศา ความหนาที่ 6, 8 และ 10 mm ดังรูปที่ 4.14 , 4.15, 4.16 และ 4.17



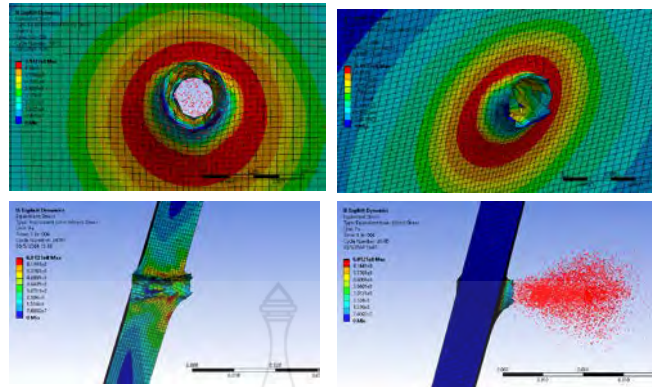
รูปที่ 4.14 (ก) กราฟแสดงความเค้นเทียบกับช่วงเวลาของแผ่นอะลูมิเนียมที่มุม 15 องศา (ข) กราฟแสดงความเร็วกระสุนเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลาของแผ่นอะลูมิเนียมที่มุม 15 องศา



รูปที่ 4.15 แผ่นเกราะอะลูมิเนียม ความหนา 6 mm มุม 15 องศา



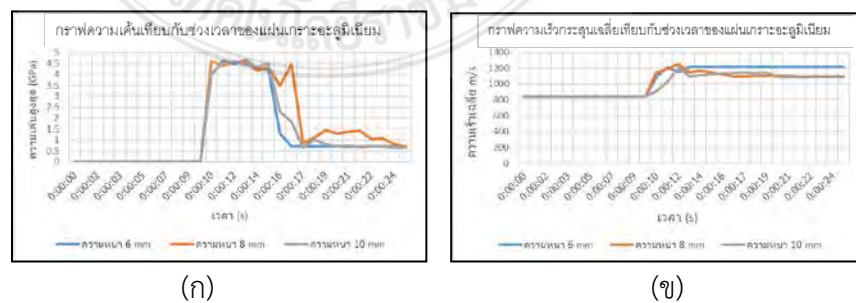
รูปที่ 4.16 แผ่นเกราะอะลูมิเนียม ความหนา 8 mm มุม 15 องศา



รูปที่ 4.17 แผ่นเกราะอะลูมิเนียม ความหนา 10 mm มุม 15 องศา

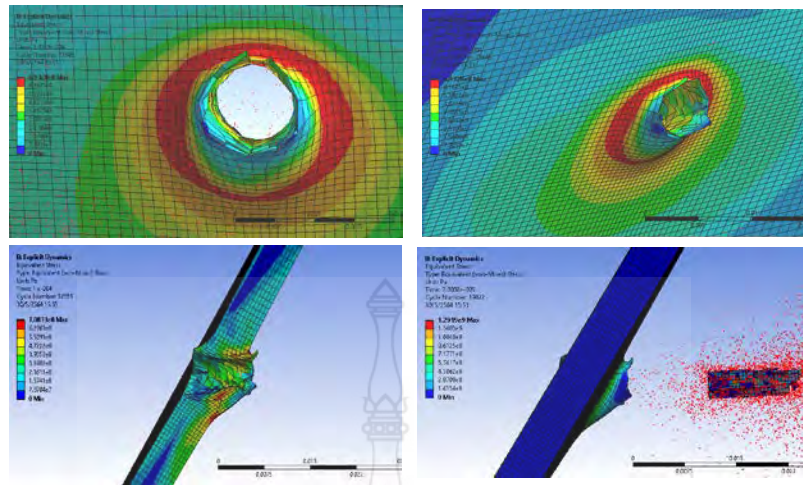
ผลการจำลองของแผ่นเกราะอะลูมิเนียมที่มุม 15 องศา โดยใช้ความเร็วในการจำลองของลูกกระสุนด้วยความเร็ว 847 m/s เห็นได้ว่าแผ่นเกราะขนาด 6, 8, และ 10 mm นั้นไม่สามารถต้านทานต่อการเจาะทะลุได้ จากการพิจารณาของกราฟแสดงความเค้นเทียบกับช่วงเวลานั้นพบได้ว่าที่ความหนาของแผ่นเกราะทุกขนาดนั้นมีความเค้นที่ไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งในส่วนของกราฟความเร็วเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลานั้นจะเห็นได้ว่าที่ความหนาของแผ่นเกราะที่ 6 mm มีความเร็วของลูกกระสุนหลังจากการชนของแผ่นเกราะคงที่ แต่ในส่วนของเกราะกันกระสุนที่มีความหนา 8 mm นั้นมีความเร็วของกระสุนที่ลดลงและในส่วนของเกราะกันกระสุนที่มีความหนา 10 mm มีความเร็วของการแตกกระจายกระสุนที่มีเพิ่มมากขึ้น และจากรอยการทำลายของกระสุนบริเวณรอยเจาะทะลุนั้นจะเห็นได้ว่าที่ความหนาของ 6 mm กระสุนสามารถทะลุแผ่นเกราะกันกระสุนได้อย่างสมบูรณ์ เมื่อเทียบกับความหนาของ 8, 10 mm จากผลการจำลองนี้นั้นสรุปได้ว่าความหนาของแผ่นเกราะอะลูมิเนียมมีผลต่อการต้านทานของกระสุนการเจาะทะลุและมุมการยิงที่ 15 องศา มีผลต่อการทำลายของกระสุนส่งผลให้กระสุนนั้นเป็นเศษขนาดเล็ก ซึ่งความหนาของแผ่นเกราะกันกระสุน 8 mm ยังเหลือเศษกระสุน แต่แผ่นเกราะขนาด 10 mm สามารถทำลายกระสุนให้เป็นเศษละเอียดขนาดเล็ก

4.3.3 การทดลองมุมกระแทกที่ 30 องศาความหนาที่ 6, 8 และ 10 mm ดังรูปที่ 4.18 , 4.19, 4.20 และ 4.21

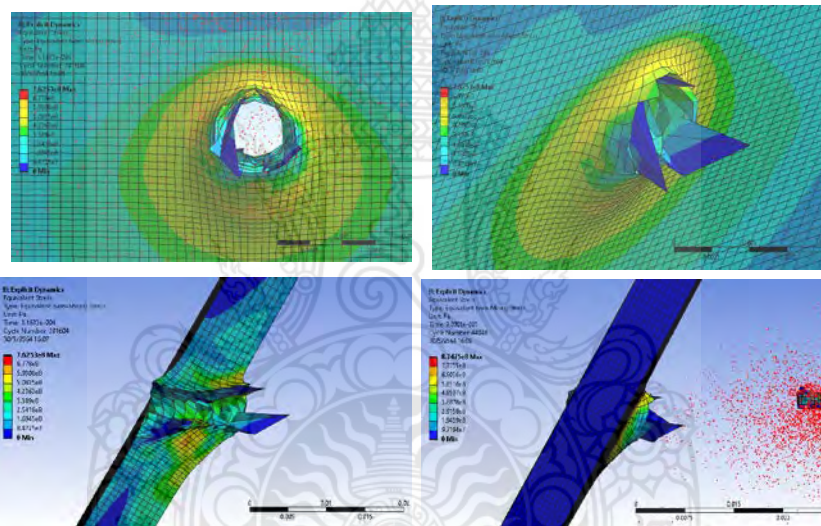


รูปที่ 4.18 (ก) กราฟแสดงความเค้นเทียบกับช่วงเวลาของแผ่นอะลูมิเนียมที่มุม 30 องศา

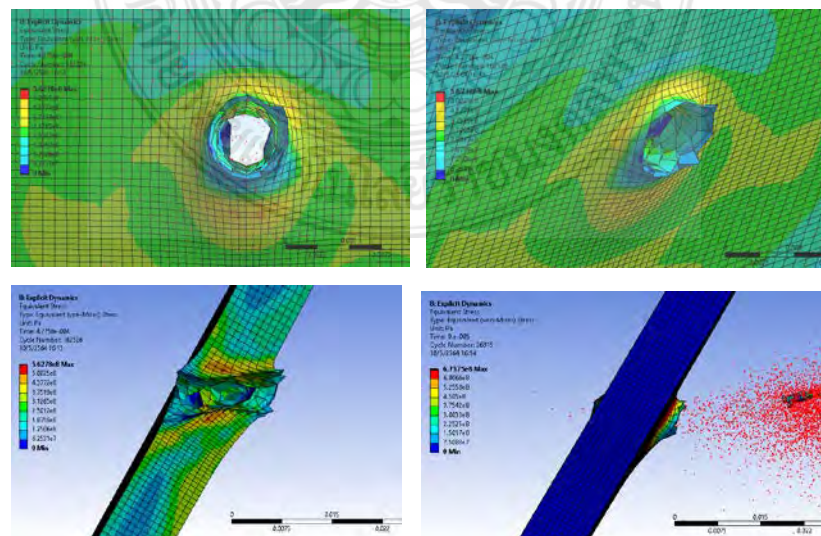
(ข) กราฟแสดงความเร็วกระสุนเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลาของแผ่นอะลูมิเนียมที่มุม 30 องศา



รูปที่ 4.19 แผ่นเกราะอะลูมิเนียม ความหนา 6 mm มุม 30 องศา



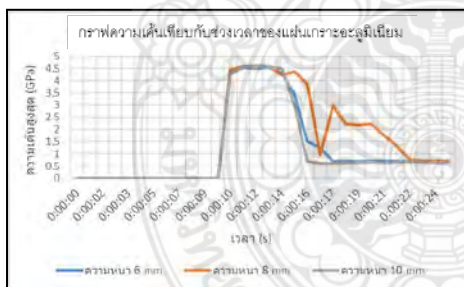
รูปที่ 4.20 แผ่นเกราะอะลูมิเนียม ความหนา 8 mm มุม 30 องศา



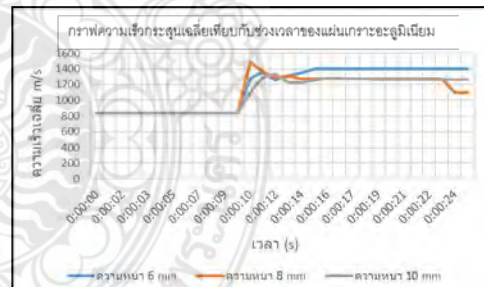
รูปที่ 4.21 แผ่นเกราะอะลูมิเนียม ความหนา 10 mm มุม 30 องศา

ผลการจำลองของแผ่นเกราะอะลูมิเนียมที่มุม 30 องศา โดยใช้ความเร็วในการจำลองของลูกกระสุนด้วยความเร็ว 847 m/s เห็นได้ว่าแผ่นเกราะขนาด 6, 8, และ 10 mm นั้นไม่สามารถต้านทานต่อการเจาะทะลุได้ จากการพิจารณาของกราฟแสดงความเค้นเทียบกับช่วงเวลานั้นพบได้ว่าที่ความหนาของแผ่นเกราะทุกขนาดนั้นมีความเค้นที่ไม่แตกต่างกันมาก แต่ในแผ่นเกราะความหนา 8 mm ช่วงเวลาปลายมีค่าความเค้นที่สูงขึ้นเนื่องจากการเฉือนของกระสุนที่ทำลายเกราะและขนาดของแผ่นเกราะที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งในส่วนของกราฟความเร็วเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลานั้นจะเห็นได้ว่าที่ความหนาของแผ่นเกราะที่ 10 mm มีความเร็วของลูกกระสุนหลังจากการชนของแผ่นเกราะน้อยที่สุดเนื่องจากสามารถลดความเร็วของกระสุนได้ในตอนเริ่มกระแทกเกราะกันกระสุน แต่ในส่วนของเกราะกันกระสุนที่มีความหนา 6 และ 8 mm นั้นมีความเร็วของกระสุนลดลงเช่นกันตามขนาดของความหนาแผ่นเกราะ และจากรอยการทำลายของกระสุนบริเวณการเจาะทะลุนั้น จะเห็นได้ว่าที่ความหนาของ 6 mm กระสุนสามารถทะลุแผ่นเกราะกันกระสุนได้อย่างสมบูรณ์ เมื่อเทียบกับความหนาของ 8, 10 mm จากผลการจำลองนั้นสรุปได้ว่าความหนาของแผ่นเกราะอะลูมิเนียมมีผลต่อความต้านทานการเจาะทะลุและมุมที่ 30 องศา มีผลต่อการทำลายของกระสุนส่งผลให้กระสุนนั้นเป็นเศษขนาดเล็ก ซึ่งความหนาของแผ่นเกราะกันกระสุน 8 mm จากผลการจำลองนั้นยังเหลือเศษกระสุน แต่ในความหนาของแผ่นเกราะกันกระสุน 10 mm สามารถทำลายกระสุนให้เป็นเศษละเอียดขนาดเล็ก

4.3.4 การทดลองมุมกระแทกที่ 45 องศาความหนาที่ 6, 8 และ 10 mm ดังรูปที่ 4.22, 4.23, 4.24 และ 4.25

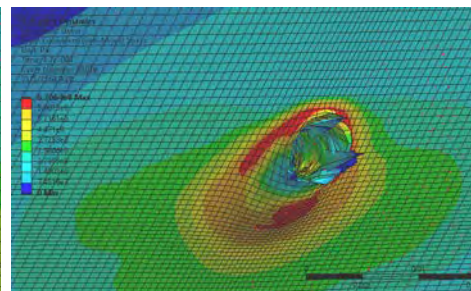
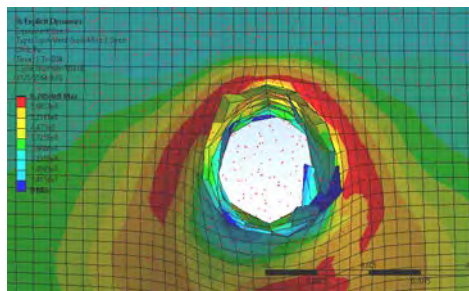


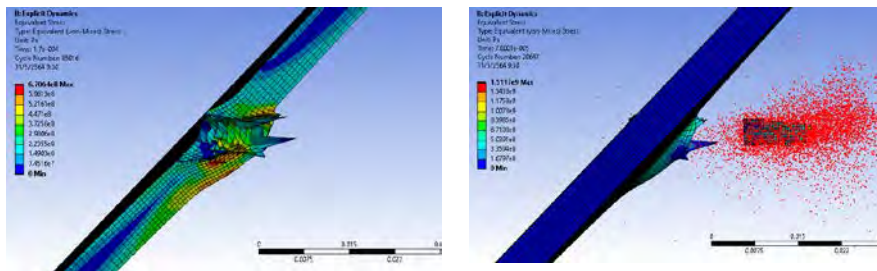
(ก)



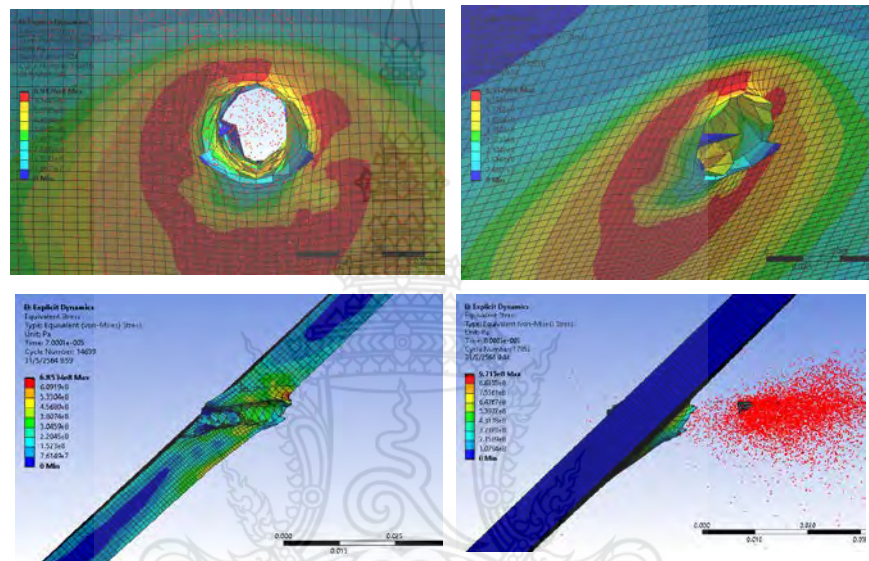
(ข)

รูปที่ 4.22 (ก) กราฟแสดงความเค้นเทียบกับช่วงเวลาของแผ่นอะลูมิเนียมที่มุม 45 องศา
(ข) กราฟแสดงความเร็วกระสุนเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลาของแผ่นอะลูมิเนียมที่มุม 45 องศา

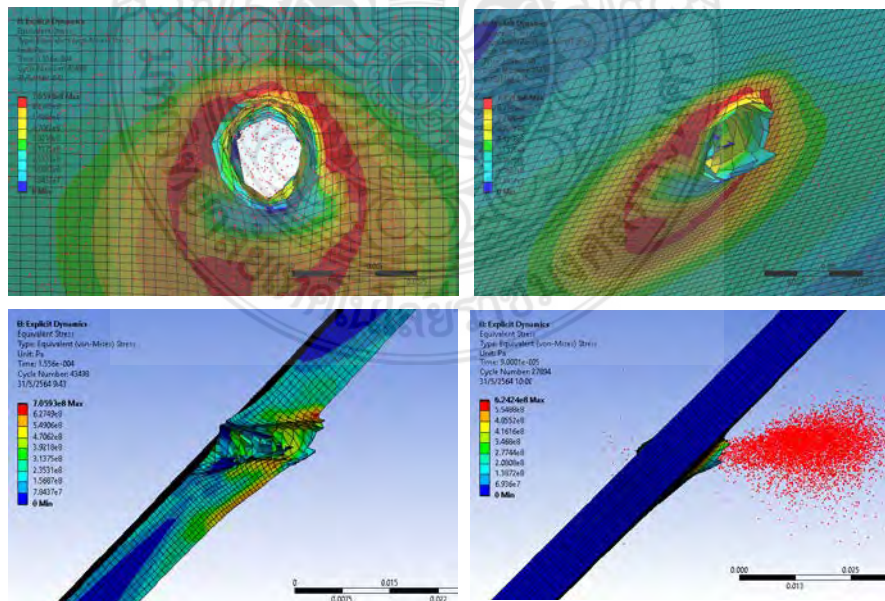




รูปที่ 4.23 แผ่นเกราะอะลูมิเนียม ความหนา 6 mm มุม 45 องศา



รูปที่ 4.24 แผ่นเกราะอะลูมิเนียม ความหนา 8 mm มุม 45 องศา



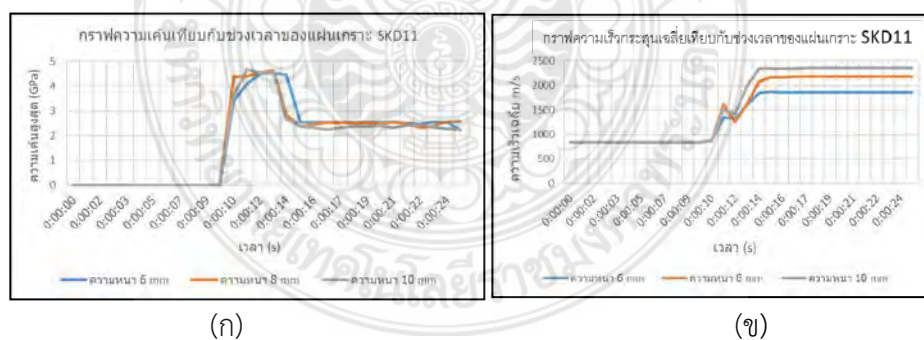
รูปที่ 4.25 แผ่นเกราะอะลูมิเนียม ความหนา 10 mm มุม 45 องศา

ผลการจำลองของแผ่นเกราะอะลูมิเนียมที่มุม 45 องศา โดยใช้ความเร็วในการจำลองของลูกกระสุนด้วยความเร็ว 847 m/s เห็นได้ว่าแผ่นเกราะขนาด 6, 8, และ 10 mm นั้นไม่สามารถต้านทานต่อการเจาะทะลุได้ จากการพิจารณาของกราฟแสดงความเค้นเทียบกับช่วงเวลานั้นพบได้ว่าที่ความหนาของแผ่นเกราะทุกขนาดนั้นมีความเค้นที่ไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งในส่วนของกราฟความเร็วเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลานั้นจะเห็นได้ว่าที่ความหนาของแผ่นเกราะที่ 6 mm มีความเร็วของลูกกระสุนหลังจากการชนของแผ่นเกราะมากที่สุดเนื่องจากความหนาที่ต้านทานของเกราะน้อยที่สุดจากการจำลอง แต่ในส่วนองเกราะกันกระสุนที่มีความหนา 8 และ 10 mm นั้นมีความเร็วของกระสุนลดลงเช่นกันตามขนาดของความหนาแผ่นเกราะและจากรอยการทำลายของกระสุนบริเวณการเจาะทะลุ นั้น จะเห็นได้ว่าที่ความหนาของ 6 mm กระสุนสามารถทะลุแผ่นเกราะกันกระสุนได้อย่างสมบูรณ์เมื่อเทียบกับความหนาของ 8, 10 mm จากผลการจำลองนี้นั้นสรุปได้ว่าความหนาของแผ่นเกราะอะลูมิเนียมมีผลต่อการต้านทานของกระสุนการเจาะทะลุและมุมเอียงของแผ่นเกราะ 45 องศา มีผลต่อการทำลายของกระสุนส่งผลให้กระสุนนั้นเป็นเศษขนาดเล็กซึ่งความหนาของแผ่นเกราะกันกระสุน 8 mm จากผลการจำลองนั้นยังเหลือเศษกระสุน แต่ในความหนาของแผ่นเกราะกันกระสุน 10 mm สามารถทำลายกระสุนให้เป็นเศษละเอียดขนาดเล็ก

4.4 ผลการจำลองแผ่นเกราะกันกระสุนจาก SKD11 แบบจำลองที่ 2

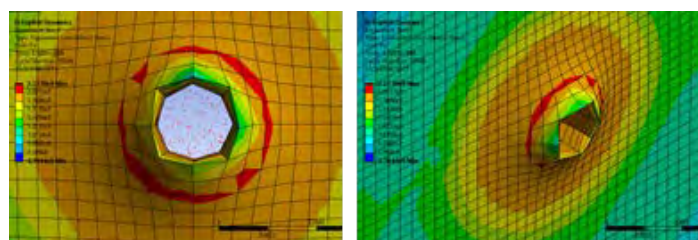
แผ่นเกราะกันกระสุนทำจาก SKD11 เป็นแบบแผ่นเดียวที่มีขนาดความหนาของวัสดุที่ 6, 8 และ 10 mm ที่การทดลองจะมีมุมกระแทกของกระสุนที่มุม 0, 15, 30 และ 45 องศา

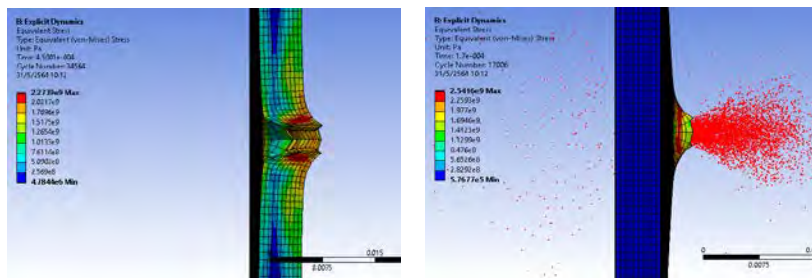
4.4.1 การทดลองมุมกระแทกที่ 0 องศาความหนาที่ 6, 8 และ 10 mm ดังรูปที่ 4.26 , 4.27, 4.28 และ 4.29



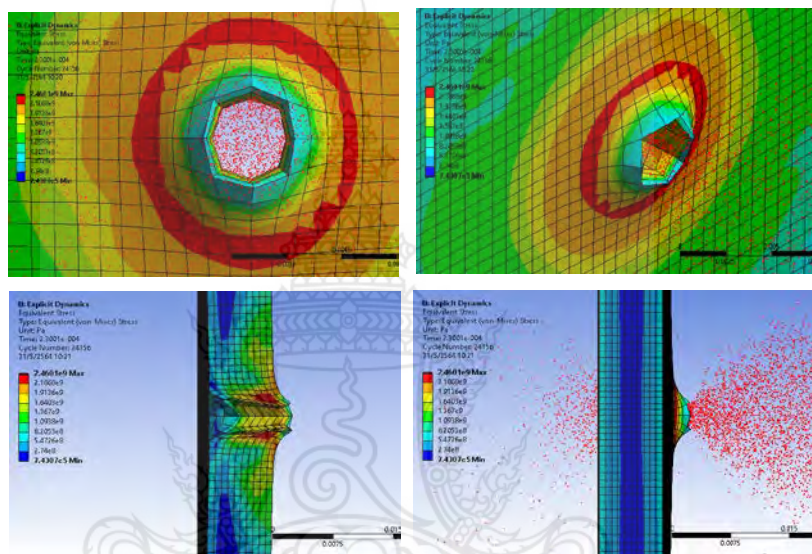
รูปที่ 4.26 (ก) กราฟแสดงความเค้นเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 ที่มุม 0 องศา

(ข) กราฟแสดงความเร็วกระสุนเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 ที่มุม 0 องศา

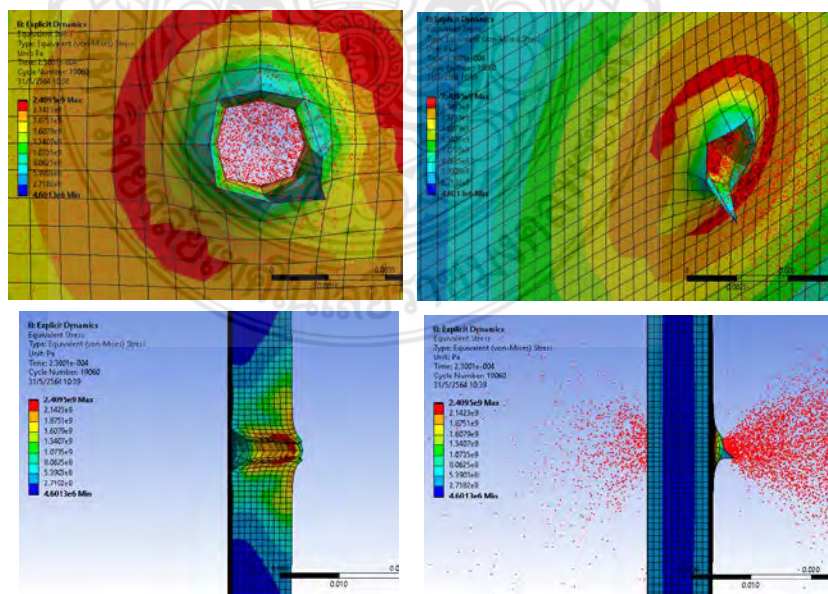




รูปที่ 4.27 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 6 mm มุม 0 องศา



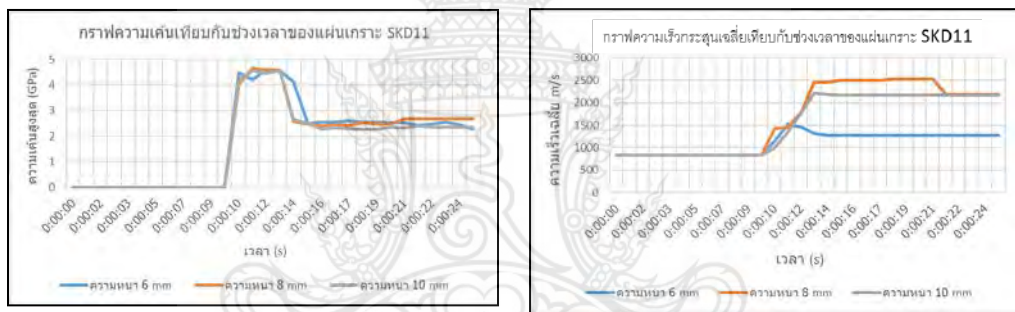
รูปที่ 4.28 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 8 mm มุม 0 องศา



รูปที่ 4.29 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 10 mm มุม 0 องศา

ผลการจำลองของแผ่นเกราะSKD11 ที่มุม 0 องศา โดยใช้ความเร็วในการจำลองของลูกกระสุนด้วยความเร็ว 847 m/s เห็นได้ว่าแผ่นเกราะขนาด 6, 8, และ 10 mm นั้นไม่สามารถต้านทานต่อการเจาะทะลุได้ จากการพิจารณาของกราฟแสดงความเค้นเทียบกับช่วงเวลานั้นพบได้ว่าที่ความหนาของแผ่นเกราะทุกขนาดนั้นมีความเค้นที่ไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งในส่วนของกราฟความเร็วเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลานั้นจะเห็นได้ว่าที่ความหนาของแผ่นเกราะที่ 10 mm มีความเร็วของลูกกระสุนหลังจากการชนของแผ่นเกราะสูงสุดเนื่องจากการกระจายของเศษแตกของลูกกระสุนและจากรอยการทำลายของกระสุนบริเวณการเจาะทะลุนั้น จะเห็นได้ว่าที่ความหนาของ 6 mm กระสุนสามารถทะลุแผ่นเกราะกันกระสุนได้อย่างสมบูรณ์ เมื่อเทียบกับความหนาของ 8 และ 10 mm จากผลการจำลองนี้นั้นสรุปได้ว่าความหนาของแผ่นเกราะ SKD11 มีผลต่อการต้านทานของกระสุน

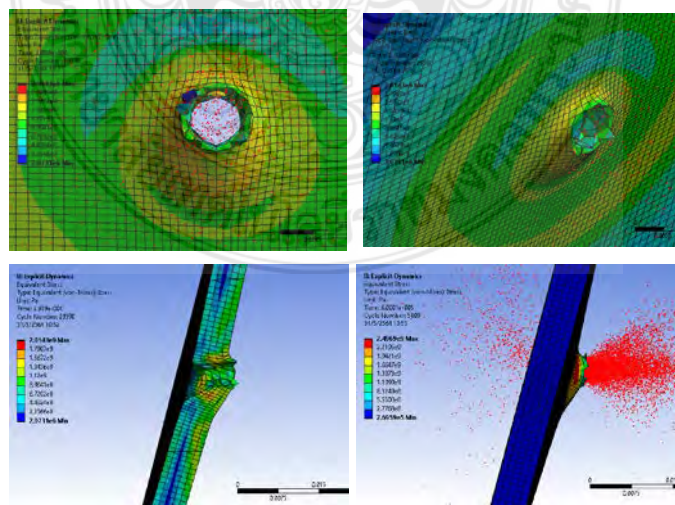
4.2.2 การทดลองมุมกระแทกที่ 15 องศาความหนาที่ 6, 8 และ 10 mm ดังรูปที่ 4.30, 4.31, 4.32 และ 4.33



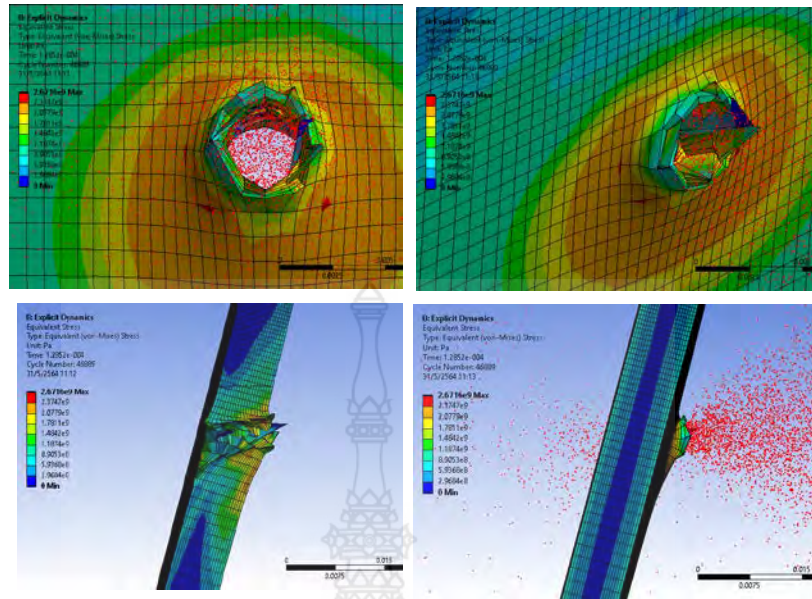
(ก)

(ข)

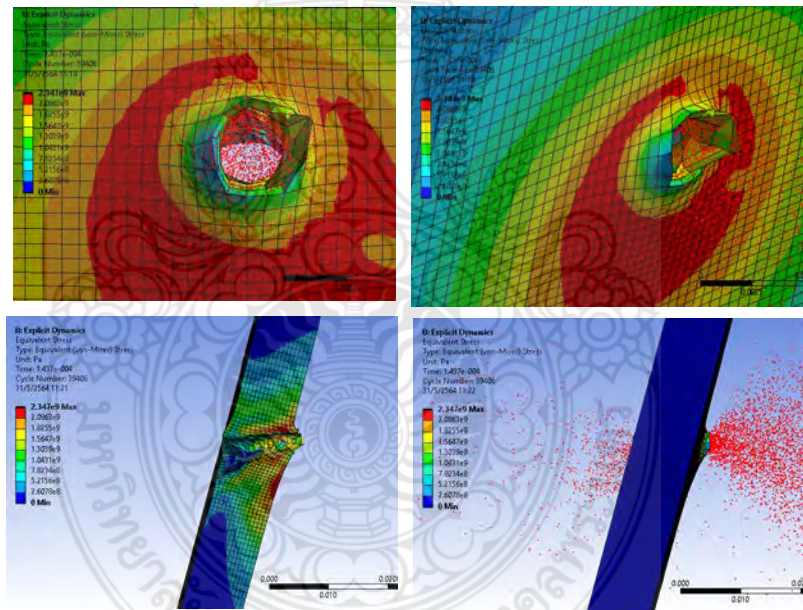
รูปที่ 4.30 (ก) กราฟแสดงความเค้นเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 ที่มุม 15 องศา
(ข) กราฟแสดงความเร็วเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 ที่มุม 15 องศา



รูปที่ 4.31 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 6 mm มุม 15 องศา



รูปที่ 4.32 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 8 mm มุม 15 องศา

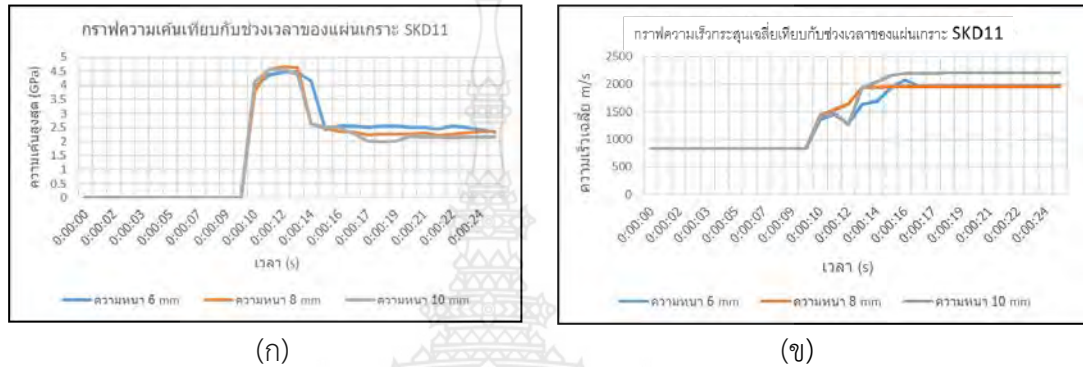


รูปที่ 4.33 แผ่นเกราะ SKD 11 ความหนา 10 mm มุม 15 องศา

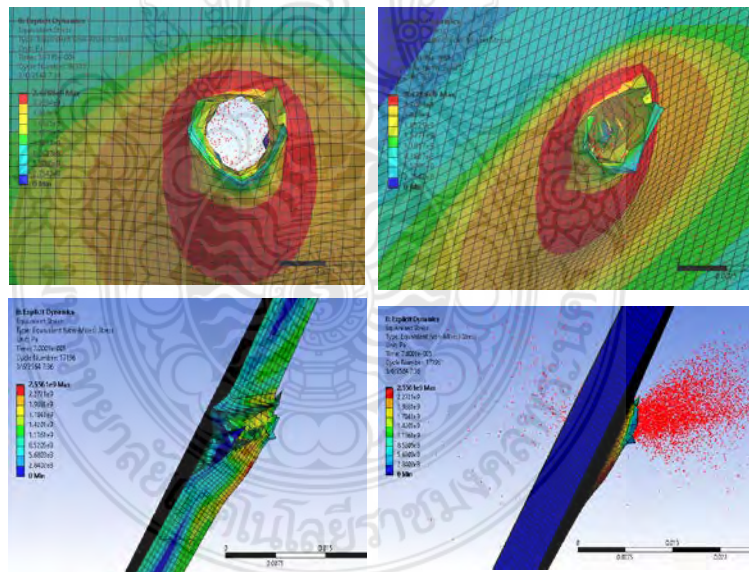
ผลการจำลองของแผ่นเกราะSKD11 ที่มุม 15 องศา โดยใช้ความเร็วในการจำลองของลูกกระสุนด้วยความเร็ว 847 m/s เห็นได้ว่าแผ่นเกราะขนาด 6, 8, และ 10 mm นั้นไม่สามารถต้านทานต่อการเจาะทะลุได้ จากการพิจารณาของกราฟแสดงความเค้นเทียบกับช่วงเวลานั้นพบได้ว่าที่ความหนาของแผ่นเกราะทุกขนาดนั้นมีความเค้นที่ไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งในส่วนของกราฟความเร็วเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลานั้นจะเห็นได้ว่าที่ความหนาของแผ่นเกราะที่ 8 mm มีความเร็วของลูกกระสุนหลังจากการชนของแผ่นเกราะสูงสุดเนื่องจากการกระจายของเศษแตกของลูกกระสุนและจากรอย

การทำลายของกระสุนบริเวณการเจาะทะลุนั้น จะเห็นได้ว่าที่ความหนาของ 6 mm กระสุนสามารถทะลุแผ่นเกราะกันกระสุนได้อย่างสมบูรณ์ เมื่อเทียบกับความหนาของ 8, 10 mm จากผลการจำลองนี้นั้นสรุปได้ว่าความหนาของแผ่นเกราะ SKD11 มีผลต่อการต้านทานของกระสุน

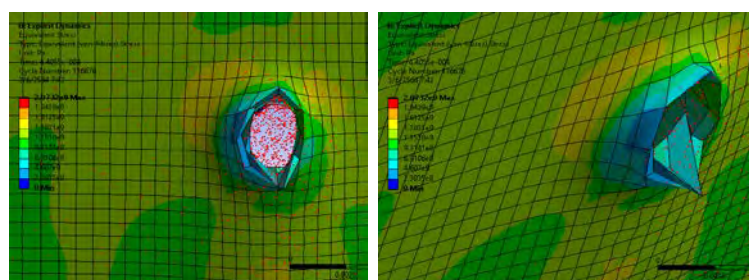
4.4.3 การทดลองมุมกระแทกที่ 30 องศาความหนาที่ 6, 8 และ 10 mm ดังรูปที่ 4.34, 4.35, 4.36 และ 4.37

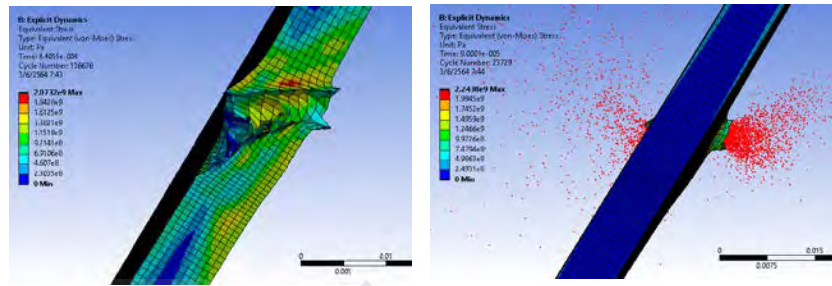


รูปที่ 4.34 (ก) กราฟแสดงความเค้นเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 ที่มุม 30 องศา
(ข) กราฟแสดงความเร็วกระสุนเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 ที่มุม 30 องศา

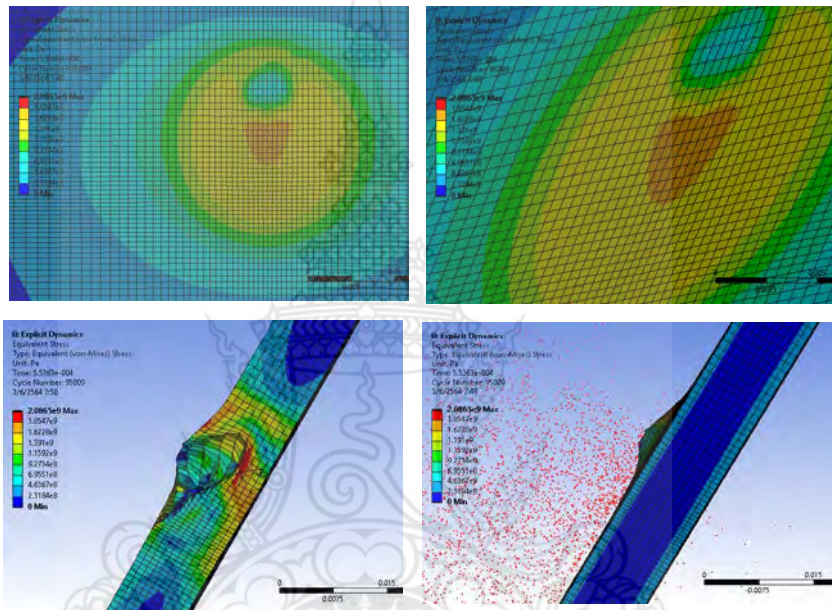


รูปที่ 4.35 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 6 mm มุม 30 องศา





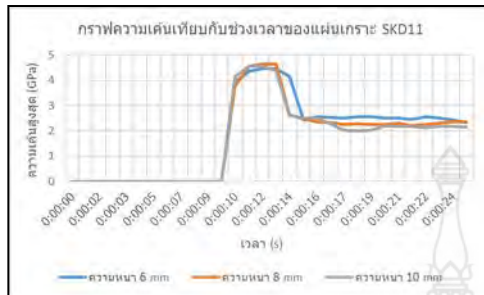
รูปที่ 4.36 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 8 mm มุม 30 องศา



รูปที่ 4.37 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 10 mm มุม 30 องศา

ผลการจำลองของแผ่นเกราะSKD11 ที่มุม 30 องศา โดยใช้ความเร็วในการจำลองของลูกกระสุนด้วยความเร็ว 847 m/s เห็นได้ว่าแผ่นเกราะขนาด 6 mm และ 8 mm นั้นไม่สามารถต้านทานต่อการเจาะทะลุได้แต่ส่วนแผ่นเกราะขนาด 10 mm สามารถต้านทานของการเจาะทะลุได้จากการพิจารณาของกราฟแสดงความเค้นเทียบกับช่วงเวลานั้นพบว่าที่ความหนาของแผ่นเกราะทุกขนาดนั้นมีความเค้นที่ไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งในส่วนของกราฟความเร็วเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลานั้นจะเห็นได้ว่าที่ความหนาของแผ่นเกราะทุกขนาดความหนาามีความเร็วของลูกกระสุนเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเนื่องมาจากการกระแทกของกระสุนที่แตกละเอียดแล้วยังกระจายตัวอย่างรวดเร็วและจากรอยการทำลายของกระสุนบริเวณการเจาะทะลุนั้น จะเห็นได้ว่าที่ความหนาของแผ่นเกราะ 6 mm และ 8 mm กระสุนสามารถทะลุแผ่นเกราะกันกระสุนได้แต่ลักษณะขนาดของรูบิปลึกกล เมื่อเทียบกับความหนาของแผ่นเกราะ 10 mm รูของแผ่นเกราะมีการเจาะแต่ไม่ทะลุจากผลการจำลองนี้นั้นสรุปได้ว่าความหนาของแผ่นเกราะ SKD11 และมุมของการจำลองที่ 30 องศา มีผลต่อการต้านทานของกระสุน

4.4.4 การทดลองมุมกระแทกที่ 45 องศาความหนาที่ 6, 8 และ 10 mm ดังรูปที่ 4.38, 4.39, 4.40 และ 4.41

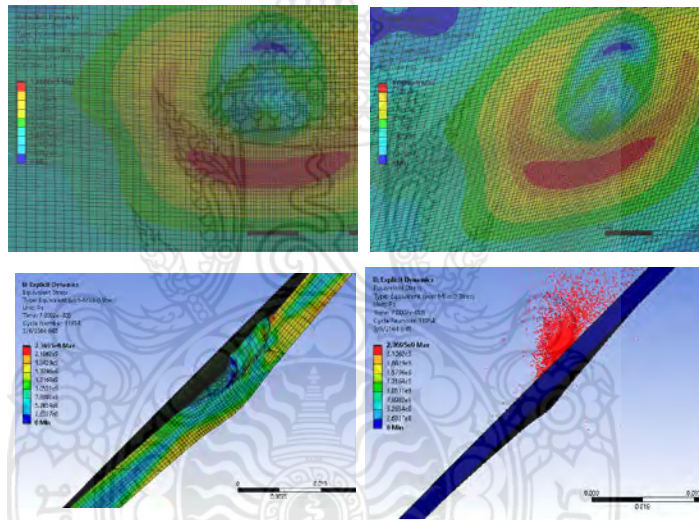


(ก)

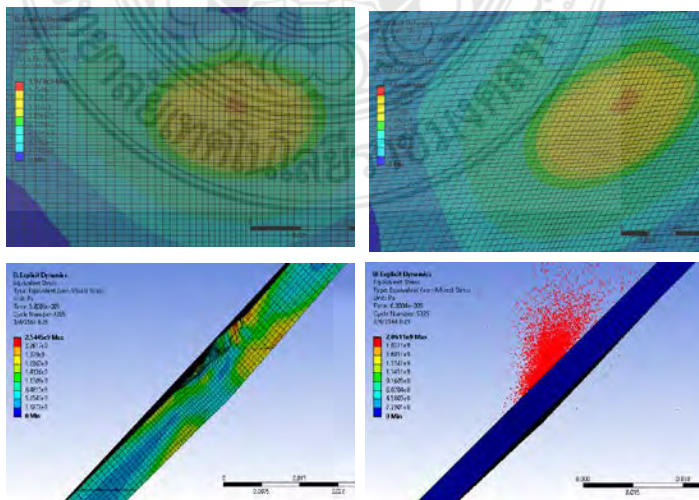


(ข)

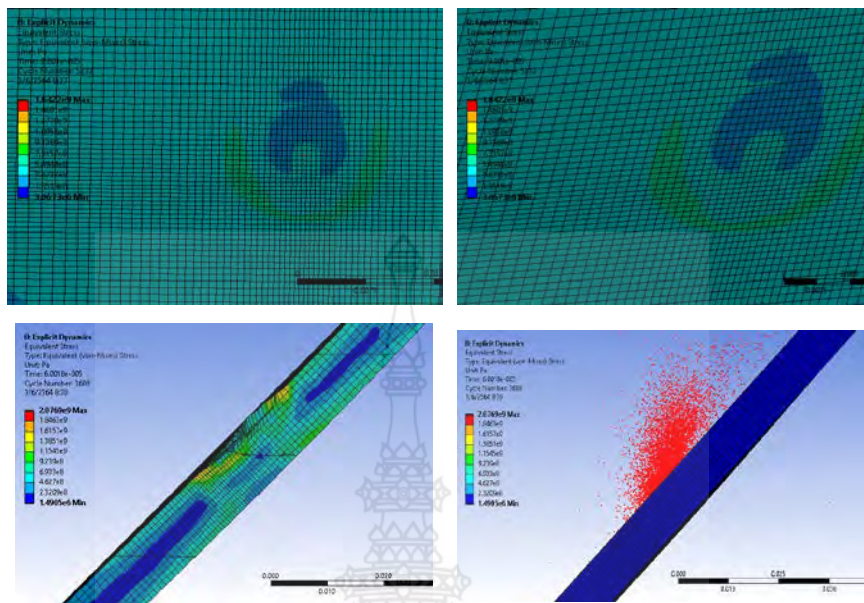
รูปที่ 4.38 (ก) กราฟแสดงความเค้นเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 ที่มุม 45 องศา
(ข) กราฟแสดงความเร็วกระสุนเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 ที่มุม 45 องศา



รูปที่ 4.39 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 6 mm มุม 45 องศา



รูปที่ 4.40 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 8 mm มุม 45 องศา



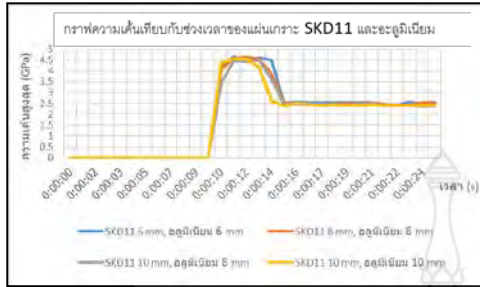
รูปที่ 4.41 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 10 mm มุม 45 องศา

ผลการจำลองของแผ่นเกราะSKD11 ที่มุม 45 องศา โดยใช้ความเร็วในการจำลองของลูกกระสุนด้วยความเร็ว 847 m/s เห็นได้ว่าแผ่นเกราะขนาด 6, 8 และ 10 mm นั้นสามารถต้านทานจากกระสุนต่อการเจาะทะลุได้ จากการพิจารณาของกราฟแสดงความเค้นเทียบกับช่วงเวลานั้นพบว่าที่ความหนาของแผ่นเกราะทุกขนาดนั้นมีความเค้นที่ไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งในส่วนของกราฟความเร็วเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลานั้นจะเห็นว่าที่ความหนาของแผ่นเกราะ 10 mm มีความเร็วหลังจากการกระแทกสูงสุดเนื่องจากการแตกกระจายของลูกกระสุนอย่างรวดเร็วโดยลักษณะเป็นเศษละเอียดเล็ก เนื่องด้วยจากความหนาของแผ่นเกราะที่สูงกว่าและจากรอยการทำลายของกระสุนบริเวณการเจาะทะลุนั้น จะเห็นได้ว่าที่ความหนาของแผ่นเกราะ 6 mm และ 8 mm จะมีรอยจากการเจาะทะลุของกระสุนอย่างเห็นได้ชัดเจน แต่ในส่วนของเกราะที่มีความหนาขนาด 10 mm นั้นจะมีรอยที่เล็กน้อยกว่าจากผลการจำลองนี้นั้นสรุปได้ว่า ความหนาของแผ่นเกราะ SKD11 ที่มีขนาดของความหนา 6, 8, และ 10 mm ที่มุมของการจำลองที่ 45 องศาสามารถต้านทานต่อการเจาะทะลุของกระสุนได้

4.5 ผลการจำลองแผ่นเกราะกันกระสุนแบบแผ่นซ้อนจาก SKD11 และ อะลูมิเนียม จำลองที่ 3

แผ่นเกราะกันกระสุนด้านหน้าทำจาก SKD11 เป็นแบบแผ่นซ้อนและมีแผ่นอะลูมิเนียมเป็นแผ่นเกราะด้านหลังที่มีขนาดความหนาของวัสดุที่ 6, 8 และ 10 mm ที่การทดลองจะมีมุมกระแทกของกระสุนที่มุม 0, 15, 30 และ 45 องศา

4.5.1 การทดลองมุมกระแทกที่ 0 องศาความหนาแผ่นซ้อน 6, 8 และ 10 mm ดังรูปที่ 4.42, 4.43, 4.44, 4.46 และ 4.47

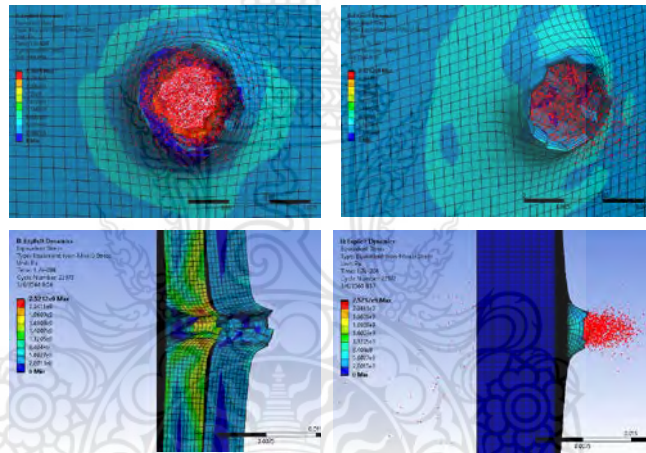


(ก)

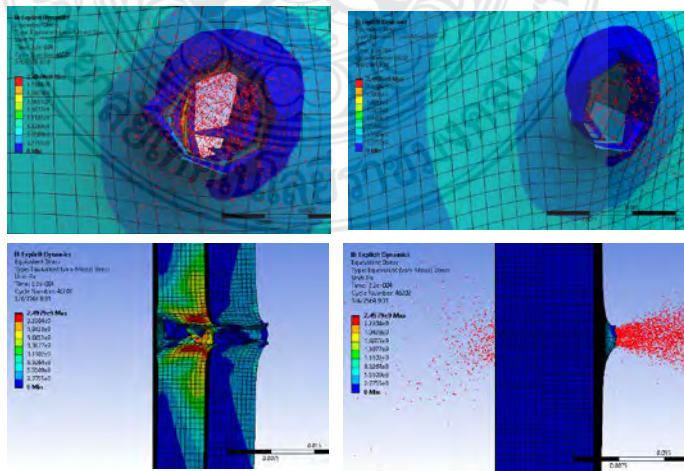


(ข)

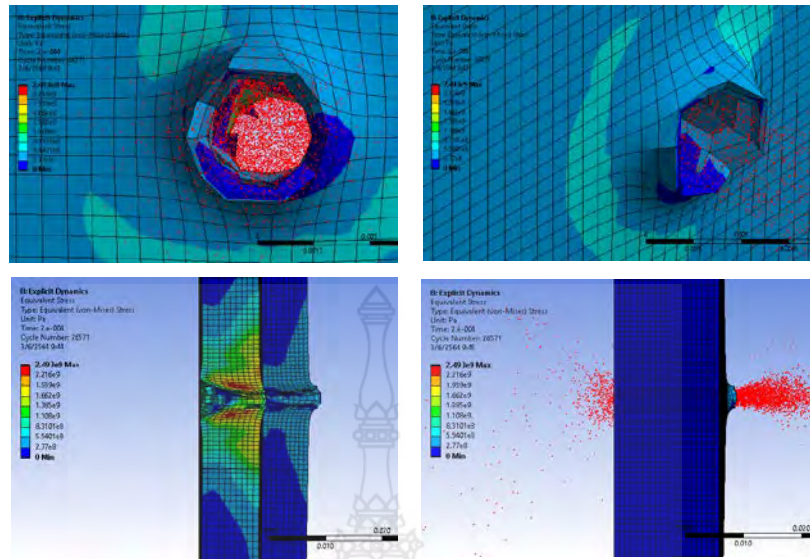
รูปที่ 4.42 (ก) กราฟแสดงความเค้นเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 และอะลูมิเนียมที่มุม 0 องศา (ข) กราฟแสดงความเร็วกระสุนเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 และอะลูมิเนียมที่มุม 0 องศา



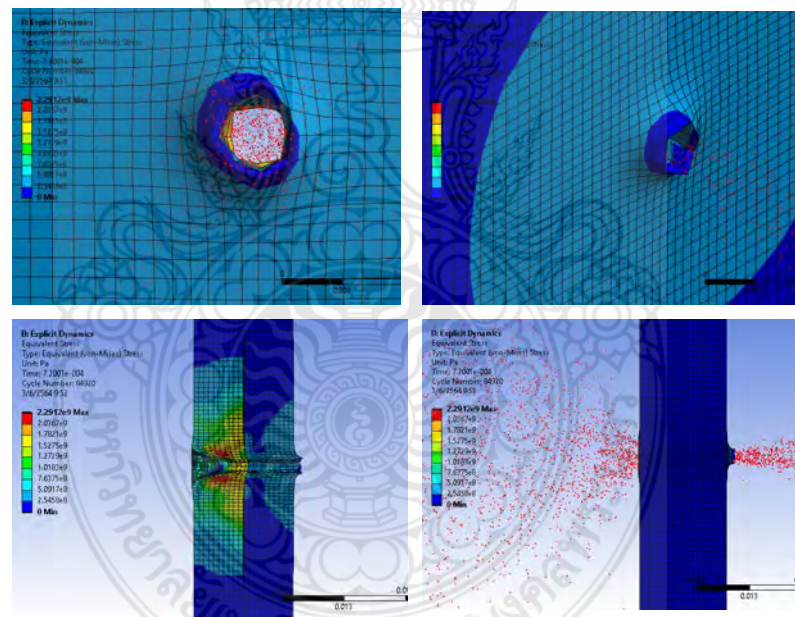
รูปที่ 4.43 แผ่นกระาะ SKD11 ความหนา 6 mm ด้านหน้าและแผ่นกระาะอะลูมิเนียมความหนา 6 mm ด้านหลัง มุม 0 องศา



รูปที่ 4.44 แผ่นกระาะ SKD11 ความหนา 8 mm ด้านหน้าและแผ่นกระาะอะลูมิเนียมความหนา 8 mm ด้านหลัง มุม 0 องศา



รูปที่ 4.45 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 10 mm ด้านหน้าและ
แผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 8 mm ด้านหลัง มุม 0 องศา

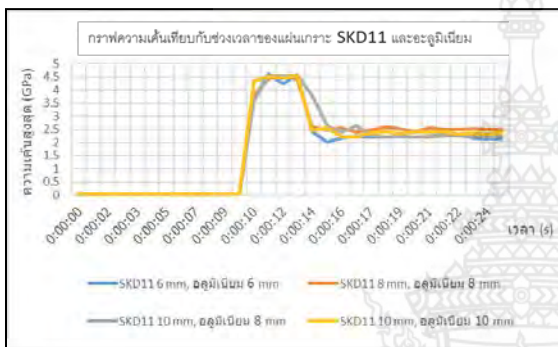


รูปที่ 4.46 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 10 mm ด้านหน้าและ
แผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 10 mm ด้านหลัง มุม 0 องศา

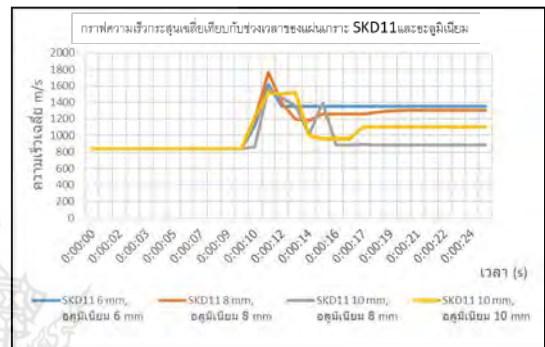
ผลการจำลองของแผ่นเกราะ SKD11 ซ้อนด้วยแผ่นเกราะอะลูมิเนียม ที่มุม 0 องศา โดยใช้ความเร็วในการจำลองของลูกกระสุนด้วยความเร็ว 847 m/s เห็นได้ว่าแผ่นเกราะซ้อนทุกขนาดความหนานั้นไม่สามารถต้านทานจากกระสุนต่อการเจาะทะลุได้ จากการพิจารณาของกราฟแสดงความเค้นเทียบกับช่วงเวลานั้นพบว่าที่ความหนาของแผ่นเกราะทุกขนาดนั้นมีความเค้นที่ไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งในส่วนของกราฟความเร็วเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลานั้นจะเห็นว่าที่ความหนาของแผ่นเกราะซ้อน

SKD11 6 mm อะลูมิเนียม 6 mm นั้นความเร็วของกระสุนเจาะอย่างรวดเร็วในช่วงทะลุผ่านเกราะ และจากรอยการทำลายของกระสุนบริเวณการเจาะทะลุนั้นจะเห็นได้ว่าความหนาของเกราะ SKD11 6 mm อะลูมิเนียม 6 mm นั้นมีขนาดใหญ่กว่าเกราะอื่น ๆ ที่มีขนาดของความหนามากกว่าอย่างเห็นได้ชัด จากผลการจำลองนี้นั้นสรุปได้ว่าทุกความหนาของแผ่นซ้อนที่ 0 องศาไม่สามารถต้านทานต่อการเจาะทะลุของกระสุนได้

4.5.2 การทดลองมุมกระแทกที่ 15 องศาความหนาแผ่นซ้อน 6, 8 และ 10 mm ดังรูปที่ 4.47, 4.48, 4.49, 4.50 และ 4.51

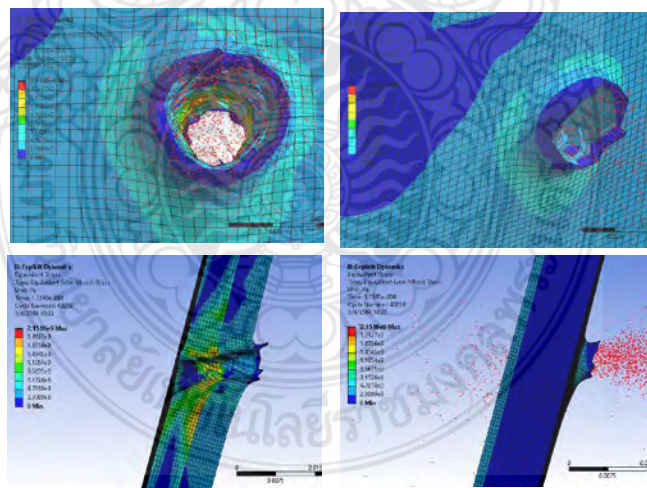


(ก)

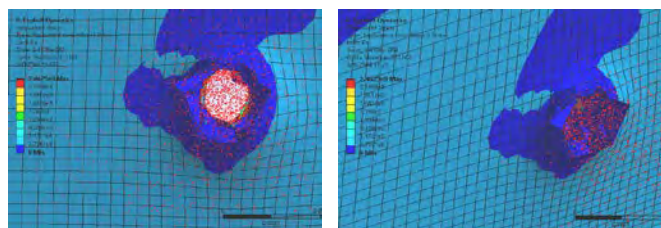


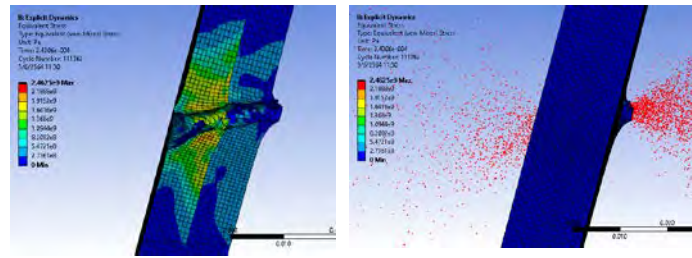
(ข)

รูปที่ 4.47 (ก)กราฟแสดงความเค้นเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 และอะลูมิเนียมที่มุม 15 องศา (ข) กราฟแสดงความเร็วกระสุนเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 และอะลูมิเนียมที่มุม 15 องศา

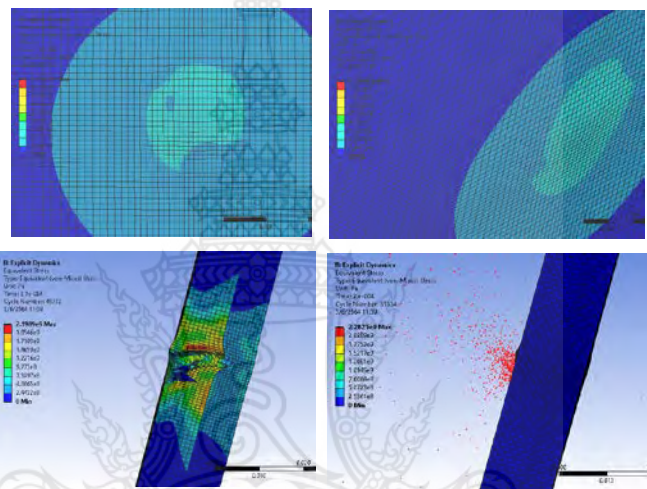


รูปที่ 4.48 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 6 mm ด้านหน้าและแผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 6 mm ด้านหลัง มุม 15 องศา

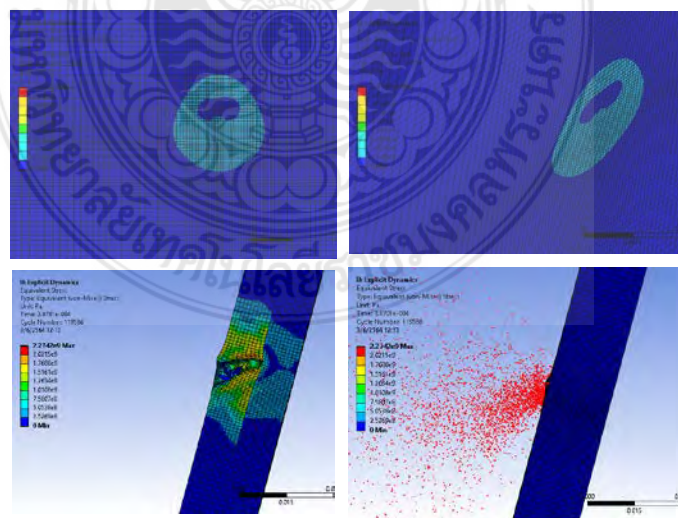




รูปที่ 4.49 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 8 mm ด้านหน้าและแผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 8 mm ด้านหลัง มุม 15 องศา



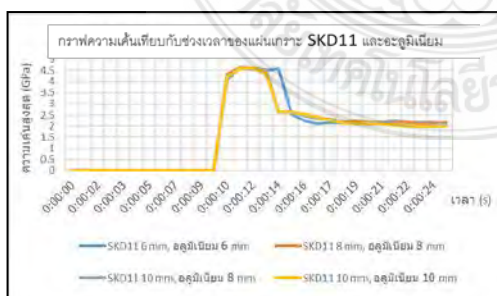
รูปที่ 4.50 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 10 mm ด้านหน้าและแผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 8 mm ด้านหลัง มุม 15 องศา



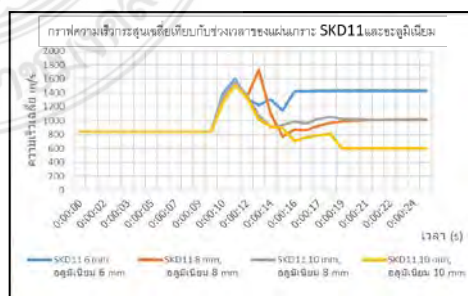
รูปที่ 4.51 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 10 mm ด้านหน้าและแผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 10 mm ด้านหลัง มุม 15 องศา

ผลการจำลองของแผ่นเกราะ SKD11 ซ้อนด้วยแผ่นเกราะอะลูมิเนียม ที่มุม 15 องศา โดยใช้ความเร็วในการจำลองของลูกกระสุนด้วยความเร็ว 847 m/s เห็นได้ว่าแผ่นเกราะซ้อน SKD11 ความหนา 6 mm อะลูมิเนียมความหนา 6 mm และแผ่นเกราะซ้อน SKD11 ความหนา 8 mm อะลูมิเนียมความหนา 8 mm ไม่สามารถต้านทานจากกระสุนต่อการเจาะทะลุได้แต่ที่ความหนาของแผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 10 mm อะลูมิเนียมความหนา 8 mm และ SKD11 ความหนา 10 mm อะลูมิเนียมความหนา 10 mm สามารถต้านทานจากกระสุนต่อการเจาะทะลุได้ จากการพิจารณาของกราฟแสดงความเค้นเทียบกับช่วงเวลานั้นพบได้ว่าที่ความหนาของแผ่นเกราะทุกขนาดนั้นมีความเค้นที่ไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งในส่วนของกราฟความเร็วเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลานั้นจะเห็นว่าที่ความหนาของแผ่นเกราะซ้อนแผ่นเกราะซ้อน SKD11 ความหนา 6 mm อะลูมิเนียมความหนา 6 mm และแผ่นเกราะซ้อน SKD11 ความหนา 8 mm อะลูมิเนียมความหนา 8 mm มีความเร็วสูงหลังจากการเจาะทะลุเกราะ และจากรอยการทำลายของกระสุนบริเวณการเจาะทะลุนั้นจะเห็นได้ว่าความหนาของเกราะซ้อน SKD11 ความหนา 6 mm อะลูมิเนียมความหนา 6 mm มีรอยขนาดใหญ่หลังจากการเจาะทะลุ แต่ในส่วนที่แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 10 mm อะลูมิเนียมความหนา 8 mm และ SKD11 ความหนา 10 mm อะลูมิเนียมความหนา 10 mm นั้นเกราะชั้นนอกกระสุนทะลุผ่านแต่หยุดระหว่างแผ่นซ้อน จากผลการจำลองนี้นั้นสรุปได้ว่าที่ 15 องศาของการจำลองยิงของกระสุนในไฟไนต์เอลิเมนต์ความหนาของแผ่นเกราะกันกระสุนเป็นผลต่อความต้านทานของการเจาะทะลุอย่างเห็นได้ชัด โดยความต้านทานของเกราะกันกระสุนนั้นเริ่มที่ความหนาของเกราะ SKD11 ชั้นนอกที่ 10 mm แต่ในส่วนแผ่นเกราะ SKD11 ชั้นนอกที่ 6 mm และ 8 mm นั้นกระสุนสามารถเจาะทะลุได้อย่างสมบูรณ์

4.5.3 การทดลองมุมกระแทกที่ 30 องศา ความหนาแผ่นซ้อน 6, 8 และ 10 mm ดังรูปที่ 4.52, 4.53, 4.54, 4.55 และ 4.56

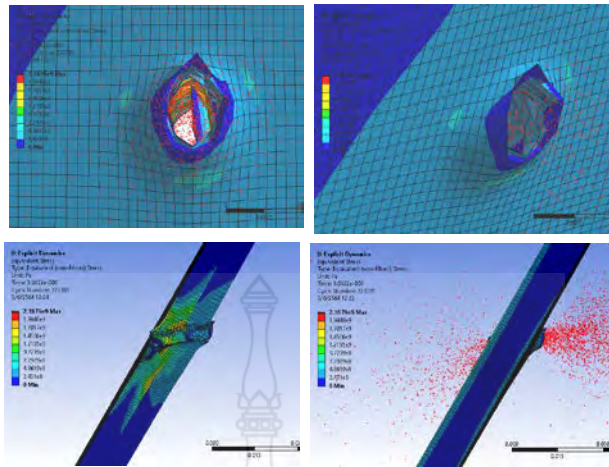


(ก)

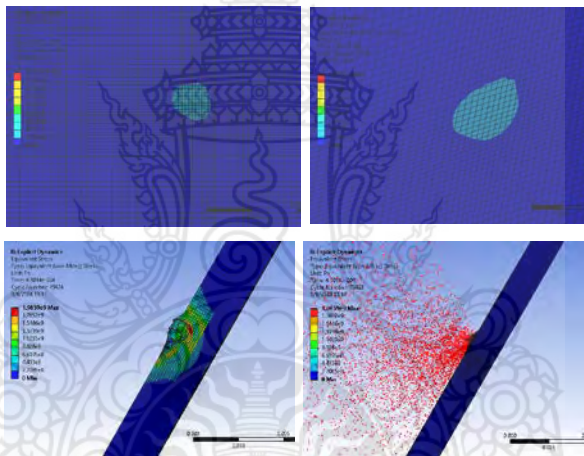


(ข)

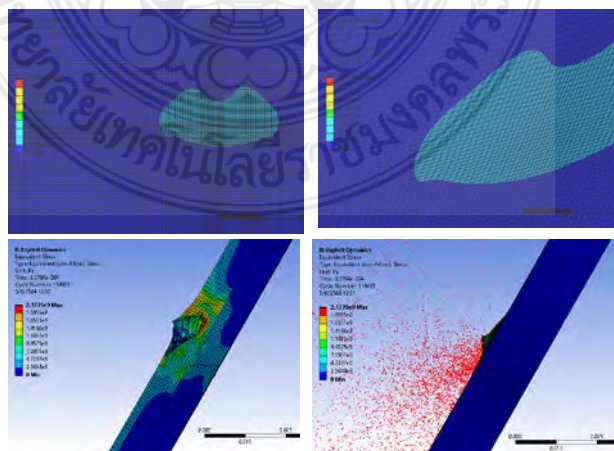
รูปที่ 4.52 (ก)กราฟแสดงความเค้นเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 และอะลูมิเนียมที่มุม30 องศา
(ข) กราฟแสดงความเร็วกระสุนเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 และอะลูมิเนียมที่มุม30องศา



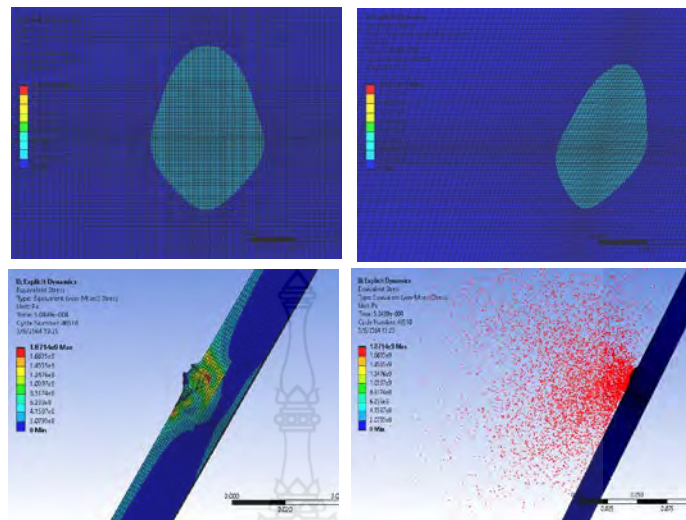
รูปที่ 4.53 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 6 mm ด้านหน้าและแผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 6 mm ด้านหลัง มุม 30 องศา



รูปที่ 4.54 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 8 mm ด้านหน้าและแผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 8 mm ด้านหลัง มุม 30 องศา



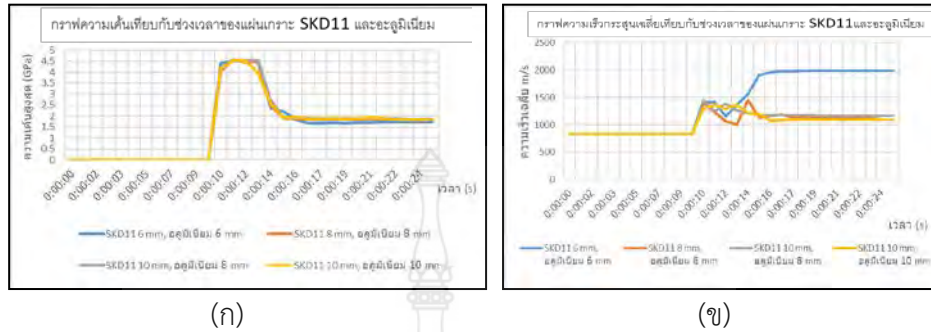
รูปที่ 4.55 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 10 mm ด้านหน้าและแผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 8 mm ด้านหลัง มุม 30 องศา



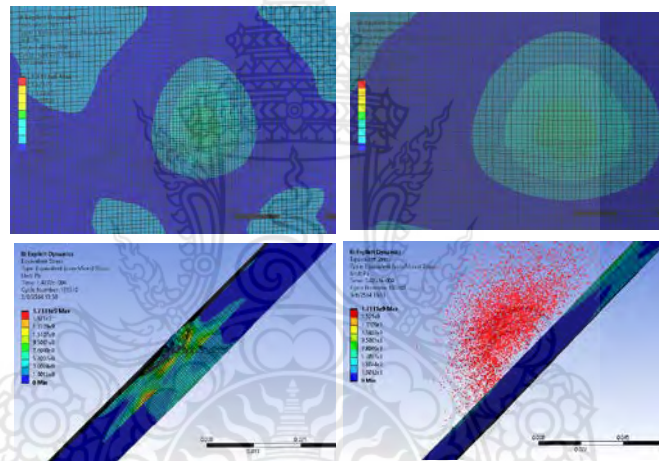
รูปที่ 4.56 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 10 mm ด้านหน้าและ
แผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 10 mm ด้านหลัง มุม 30 องศา

ผลการจำลองของแผ่นเกราะ SKD11 ช้อนด้วยแผ่นเกราะอะลูมิเนียม ที่มุม 30 องศา โดยใช้ความเร็วในการจำลองของลูกกระสุนด้วยความเร็ว 847 m/s เห็นได้ว่าแผ่นเกราะช้อน SKD11 ความหนา 6 mm อะลูมิเนียมความหนา 6 mm ไม่สามารถต้านทานจากกระสุนต่อการเจาะทะลุได้ แต่ที่ความหนาของแผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 8 mm อะลูมิเนียมความหนา 8 mm, SKD11 ความหนา 10 mm อะลูมิเนียมความหนา 8 mm และ SKD11 ความหนา 10 mm อะลูมิเนียมความหนา 10 mm สามารถต้านทานจากกระสุนต่อการเจาะทะลุได้ จากการพิจารณาของกราฟแสดงความเค้นเทียบกับช่วงเวลานั้นพบได้ว่าที่ความหนาของแผ่นเกราะทุกขนาดนั้นมีความเค้นที่ไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งในส่วนของกราฟความเร็วเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลานั้นจะเห็นได้ว่าที่ความหนาของแผ่นเกราะช้อนแผ่นเกราะช้อน SKD11 ความหนา 10 mm อะลูมิเนียมความหนา 10 mm นั้นมีความเร็วหลังจากการเจาะทะลุต่ำสุด เนื่องจากการต้านทานของเกราะกันกระสุนที่มีความหนาที่สูงทำให้สามารถหยุดการกระจายของเศษกระสุนและจากรอยการทำลายของกระสุนบริเวณการเจาะทะลุนั้นจะเห็นได้ว่า ความหนาของเกราะช้อน SKD11 ความหนา 6 mm อะลูมิเนียมความหนา 6 mm มีรอยขนาดใหญ่หลังจากการเจาะทะลุแต่ในส่วนที่แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 8 mm อะลูมิเนียมความหนา 8 mm, SKD11 ความหนา 10 mm อะลูมิเนียมความหนา 8 mm และ SKD11 ความหนา 10 mm อะลูมิเนียมความหนา 10 mm เกราะชั้นนอกมีการเจาะทะลุแต่ไม่ถึงแผ่นช้อนชั้นใน จากผลการจำลองนั้นสรุปได้ว่าที่ 30 องศาของการจำลองยิงของกระสุนในไฟไนต์เอลิเมนต์ความหนาของแผ่นเกราะกันกระสุนเป็นผลต่อการต้านทานของการเจาะทะลุอย่างเห็นได้ชัดโดยการต้านทานของเกราะกันกระสุนนั้นเริ่มที่ความหนาของเกราะ SKD11 ชั้นนอกที่ 8 mm แต่ในส่วนแผ่นเกราะ SKD11 ชั้นนอกที่ 6 mm นั้นกระสุนสามารถเจาะทะลุได้อย่างสมบูรณ์

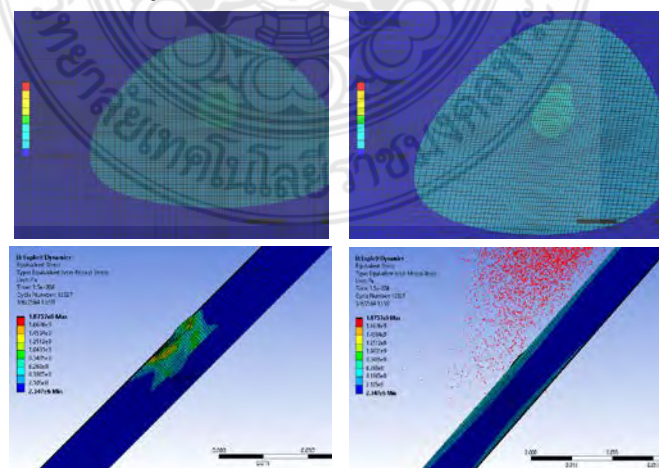
4.5.4 การทดลองมุมกระแทกที่ 45 องศา ความหนาแผ่นชั้น 6, 8 และ 10 mm ดังรูปที่ 4.57, 4.58, 4.59, 4.60 และ 4.61



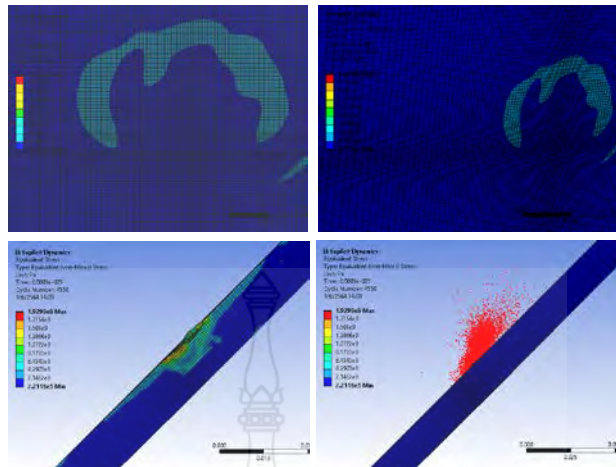
รูปที่ 4.57 (ก) กราฟแสดงความเค้นเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 และอะลูมิเนียมที่มุม 45 องศา (ข) กราฟแสดงความเร็วกระสุนเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 และอะลูมิเนียมที่มุม 45 องศา



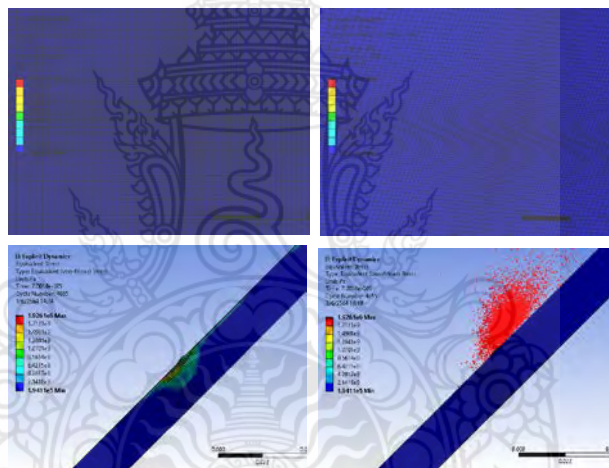
รูปที่ 4.58 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 6 mm ด้านหน้าและแผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 6 mm ด้านหลัง มุม 45 องศา



รูปที่ 4.59 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 8 mm ด้านหน้าและแผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 8 mm ด้านหลัง มุม 45 องศา



รูปที่ 4.60 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 10 mm ด้านหน้าและ
แผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 8 mm ด้านหลัง มุม 45 องศา



รูปที่ 4.61 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 10 mm ด้านหน้าและ
แผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 10 mm ด้านหลัง มุม 45 องศา

ผลการจำลองของแผ่นเกราะ SKD11 ซ้อนด้วยแผ่นเกราะอะลูมิเนียม ที่มุม 45 องศา โดยใช้ความเร็วในการจำลองของลูกกระสุนด้วยความเร็ว 847 m/s เห็นได้ว่าแผ่นเกราะซ้อนทุกความหนาของการจำลองนี้สามารถต้านทานการเจาะทะลุได้ทั้งหมด จากการพิจารณาของกราฟแสดงความเค้นเทียบกับช่วงเวลานั้นพบได้ว่าที่ความหนาของแผ่นเกราะทุกขนาดนั้นมีความเค้นที่ไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งในส่วนของกราฟความเร็วเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลานั้นจะเห็นได้ว่าที่ความหนาของแผ่นเกราะซ้อนแผ่นเกราะซ้อน SKD11 ความหนา 6 mm อะลูมิเนียมความหนา 6 mm มีความเร็วสูงจากการเจาะหลังจากการกระแทกของกระสุนจนเกิดให้เป็นเศษละเอียดและจากรอยการทำลายของกระสุนบริเวณการเจาะทะลุนั้นจะเห็นได้ว่าทุกความหนาของเกราะซ้อนนั้นจะมีรอยจากการกระแทกของกระสุนแต่ไม่สามารถทะลุจากผลการจำลองนี้นั้นสรุปได้ว่าที่ 45 องศาของการจำลองยิงของกระสุนไนไฟไนต์เอลิเมนต์ความหนาของแผ่นเกราะกันกระสุนมีผลต่อความต้านทานของการเจาะทะลุอย่างเห็นได้ชัด

บทที่ 5

อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

5.1 การอภิปรายผล

สรุปผลการการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์รูปแบบความเสียหายและความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุของแผ่นเกราะอะลูมิเนียม AL7075 และเกราะ SKD11 ตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นส่วนสำคัญทั้งความน่าเชื่อถือ ความถูกต้อง แม่นยำ จากการจำลองนี้โดยการเปรียบเทียบความสอดคล้องจากการทดลองจริง เพื่อยืนยันแนวคิดและทฤษฎีที่ใช้กับการจำลองนี้ โดยการนำการเสนอข้อมูลของผลการศึกษาและสมมติฐานการวิจัย โดยมีเนื้อหาใจความสรุปและอภิปรายผลได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 จากการทำวิจัยนี้ผลการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์และผลการทดสอบจริงพบว่ามี ความเสียหายที่เกิดกับแผ่นเกราะนั้นมีความสอดคล้องกันซึ่งโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลอง ความเสียหายของแผ่นเกราะกันกระสุนนั้นสามารถเชื่อถือได้ ดังนั้นจึงได้ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ในจำลองความเสียหายของแผ่นเกราะที่สามารถต้านทานการเจาะทะลุของมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 ได้

5.1.2 วิธีการที่ใช้ในการจำลองโดยใช้การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นเป็น การจำลองที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลายจากการศึกษาและการทบทวนวรรณกรรม ซึ่งการจำลองนี้ใช้ โปรแกรม “Ansys/Explicit Dynamics” โดยการเคลื่อนที่ของวัตถุด้วยความเร็วสูงมากกว่า 100 m/s และการจำลองนี้ใช้ทฤษฎีความเสียหาย Johnson Cook Strength Model (JC), Johnson-Holmquist Strength Model (JH-2) และ Steinberg Guinan Strength Model ในการกำหนด รูปแบบความเสียหายของแผ่นเกราะกันกระสุน

5.1.3 การตั้งค่ารูปแบบการจำลองตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 ความเร็วกระสุน 847 m/s โดย ไม่คิดแรงเสียดทานอากาศและการซ้อนแผ่นเกราะสองชั้นซึ่งติดกันแบบไม่คิดแรงเสียดทาน ระหว่างผิว ซึ่งการสร้างรูปแบบของเมชในการจำลองนี้ใช้แบบ Hexahedral ขนาด 0.5 mm ที่ กระสุนเพื่อลดระยะเวลาการประมวลผลของคอมพิวเตอร์และค่าการคลาดเคลื่อน

5.1.4 ตัวแปรที่มีผลต่อการวิเคราะห์แผ่นเกราะกันกระสุนในการจำลองนี้จะมี 5 องค์ประกอบ หลักคือ 1) ชนิดของวัสดุของแผ่นเกราะกันกระสุนและชนิดวัสดุของกระสุน 2) ความเร็วของกระสุน ที่ใช้ในการจำลอง 3) มุมกระแทกของกระสุนเข้าที่เจาะแผ่นเกราะกันกระสุน 4) ความหนาของแผ่น เกราะกันกระสุน 5) ขนาดของเมชที่ใช้ในการวิเคราะห์บ่งบอกถึงความละเอียดจากความเสียหาย

5.1.5 วัสดุเกราะกันกระสุนที่ใช้จากการจำลองนี้มี 2 ชนิดคือ 1) SKD11 2) อะลูมิเนียม AL7075 โดยการจำลองจะแบ่งออกเป็นประเภท 1) การจำลองของแผ่นเกราะชั้นเดียว 2) การจำลองแผ่นเกราะแบบซ้อน ขนาดของแผ่นเกราะนั้นมีขนาด 6, 8, และ 10 mm โดยมุมมองของการยิงเกราะกันกระสุนนั้นมีมุมที่ 0, 15, 30, และ 45 องศา ซึ่งวัสดุของกระสุนที่กำหนดคือทั้งสแตนคาร์ไบด์ โดยการจำลองแบบแผ่นเดียวและแผ่นซ้อนนั้น จะศึกษาพฤติกรรมของความเสียหายของแต่ละวัสดุว่า ความเสียหายของผิวเกราะ ความแข็งแรงของวัสดุ ความเค้น ความเร็วหลังจากการกระจายตัวของกระสุนนั้นมีมากเพียงใด ความสอดคล้องกันจึงแสดงให้เห็นว่าการจำลองด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นสามารถคาดการณ์ความเสียหายของแผ่นเกราะกันกระสุนได้ เพื่อช่วยในการลดงบประมาณในการวิจัยและระยะเวลาในการวิจัยแผ่นเกราะกันกระสุน

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองพบว่าการกำหนดตัววัสดุ คุณสมบัติ บางชนิดยังไม่มีเพียงพอในตัวของ “Program Ansys” ผู้วิจัยจึงต้องค้นคว้าหาของคุณสมบัติเพิ่มเติมทั้งการกำหนดเกี่ยวกับทฤษฎีของวัสดุที่เกี่ยวข้องเพื่อความถูกต้อง แม่นยำ จากการวิเคราะห์โดยใช้จำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์และอีกประการของการจำลองนี้คือการกำหนดขนาดของเมชทางการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ให้เหมาะสมเป็นส่วนที่สำคัญอย่างมากจากการทดลองพบว่าเมื่อกำหนดขนาดของเมชน้อยกว่า 0.5 mm นั้น โปรแกรมจะประมวลผลใช้เวลานานเนื่องจากความละเอียดของความเสียหายนั้นค่อนข้างสูง จึงมีผลต่อการวิเคราะห์เมื่อทำหลายๆกรณีการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- [1] สุรวรรณ ลิมส์พันธ์, *เสื่อเกราะกันกระสุน พื้ทักซ์ซีวิต ลดการสูญเสีย*, เติลินิวส์, 2548.
- [2] ชัยวัฒน์ ไชยมหาพฤกษ์, “แผ่นเกราะเซรามิกส์กันกระสุนด้วยวัสดุเชิงประกอบ,” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตพระนคร, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, 2561.
- [3] “Tungsten-carbide.” [Online]. Available: <http://www.tungsten-carbide.com.cn/Thai/index.html>. [Accessed: 13-Apr-2021]
- [4] “อลูมิเนียม (Aluminium) ชนิดและประโยชน์ สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย.” [Online]. Available: <https://www.fti.or.th/-aluminium> [Accessed: 13-Apr-2021]
- [5] “Cold Work Steel 2379.” [Online]. Available: <https://www.thyssenkruppmaterials.co.th/2379.pdf>. [Accessed: 13-Apr-2021]
- [6] “Writer-36 เหล็กไร้สนิม, เหล็กกล้าสปริง, เหล็กกล้าผสมพิเศษ.” [Online]. Available: https://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?bookID=1818&pageid=36&read=true&count=true. [Accessed: 13-Apr-2021]
- [7] Admin, “สารน่ารู้ : การพัฒนาเสื่อเกราะกันกระสุนแบบเกราะแข็ง. ” [Online]. Available: <http://treatise.16mb.com/viewtopic.php?t=9055>. [Accessed: 13-Apr-2021]
- [8] วริญดา จิรัญญาวารัญญ, “การจำลองผิวหน้ารอยแตกของคอมพอสิตโดยใช้โปรแกรม ANSYS,” มหาวิทยาลัยศิลปากร, สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์, 2555.
- [9] F. M. John, T. Jan Arild, S. Stian, B. Svien Morten, S.-E. Lasse, and F. Haakon, “Development of material model for semi-brittle materials like tungsten carbide,” 09-Nov-2010.
- [10] “Dynamic.” [Online]. Available: <http://www.rmutphysics.com/charud/scibook/dynamic/index1.html>. [Accessed: 13-Apr-2021]
- [11] ANSYS Inc., “Lecture 2 : Introduction to Explicit Dynamic .” Document from CAD-IT Consultants (Asia), 13-Apr-2021

- [12] นวพล กลางทัพ, “การวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนบนโลหะด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์,” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตพระนคร, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, 2562.
- [13] ธรรม์ณชาติ วันแต่ง, “การเพิ่มประสิทธิภาพความแข็งแรงของแผ่นเหล็กในลึ้อเกราะกันกระสุน โดยทำการเคลือบผิวฟิล์มแข็ง,” มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์, คณะเทคโนโลยีการเกษตร, สาขาวิชาเทคโนโลยีการเกษตร, 2552.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] V. Vijeesh, S. Hegde, 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.
- [18] 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.
- [19] 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.

- [20] 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.
- [21] A. Rajput and M. A. Iqbal, "Impact behavior of plain, reinforced and prestressed concrete targets," *Mater. Des.*, vol. 114, pp. 459-474, Jan. 2017
- [22] G. Tiwari, M. A. Iqbal, and P. K. Gupta, "Energy absorption characteristics of thin aluminium plate against hemispherical nosed projectile impact," *Thin-Walled Struct.*, vol. 126, pp. 246-257, May 2018.
- [23] M. J. Pawar et al., "Comparison of ballistic performances of Al₂O₃ and AlN ceramics," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 98, pp. 42-51, Dec. 2016.
- [24] 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.
- [25] K. Namik, B. Said, E. Atıl, E. Bülent, T. Alper, and G. Mustafa, "Ballistic behavior of high hardness perforated armor plates against 7.62 mm armor piercing projectile," *Mater. Des.*, vol. 63, pp. 427-438, Jun. 2014.
- [26] W. Jun, N. Jianguo, and M. Tianbao, "The dynamic response and failure behavior of concrete subjected to new spiral projectile impacts," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 79, pp. 547-564, May. 2017.
- [27] B. Tomáš, S. Jirí, V. Petr, K. Tomáš, R. Stanislav, and D. Aleš, "The comparison of numerical simulation of projectile interaction with transparent armour glass for buildings and vehicles," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 92, pp. 121-139, May. 2018.
- [28] 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.

- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] W.M. Gao, L. Wang, J.K. Coffey, and F. Daver, "Finite element simulation of scratch on polypropylene panels," *Meter. Des.*, vol. 140, pp. 400–408, Feb. 2018.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] M.A. Iqbal, P.K. Gupta, V.S. Deorea, S.K. Taka, G. Tiwaria, and N.K. Guptab, "Effect of target span and configuration on the ballistic limit," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 42, pp. 11–24, Apr. 2012.
- [36] 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.
- [37] 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.

- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] ทศน์ชัย ผองผาย, ทวีภัทร์ บูรณฉิติ, “การจำลองสถานการณ์ไฟฟไนต์เอลิเมนต์ของการกระแทกจากกระสุนปืน: กรณีศึกษา กระสุน 9 มม. Parabellum กับ AISI1008, AA1100 และ AA5083,” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ, 2551.
- [45] 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.
- [46] 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.

- [47] เสน่ห์ กลิ่นขุนนาค, ปพน สมประสงค์, และ นายสัญญา คำจริง “การศึกษาอิทธิพลในการตัดเฉือนเพื่อลดครีบ โดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์,” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์, 2555.
- [48] 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





ภาคผนวก ก

ใบรับรองการทดลองยิงแผ่นเกราะตามมาตรฐาน NIJ



รหัสเอกสาร FM 5 - 2064

โรงงานวัตถุระเบิดทหาร
กรมการอุตสาหกรรมทหาร ศูนย์การอุตสาหกรรมป้องกันประเทศและพลังงานทหาร

ผลการทดสอบแผ่นเกราะ ระดับ 3

ชื่อ - หมายเลขงาน... แผ่นเกราะ SS10521008.....

บริษัทผู้ผลิต... มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร..... วันที่ทดสอบ... 20 ก.ย. 62.....

กระสุนขนาด 7.62 x 51 mm. NATO FMJ 148 Gr.		ความเร็วกระสุน 847 ± 9.1 เมตร/วินาที	ผลการทดสอบ		หมายเหตุ
นัดที่	มุมยิง	ความเร็ว (เมตร/วินาที)	ทะลุ	ไม่ทะลุ	
			1	0°	838.3

นาวาอากาศโท *น. อ. ๒*
(พชรพล อัจฉาพันธุ์)

หัวหน้าแผนกทดสอบทางซีปนวิธื

กองควบคุมมาตรฐานการผลิต โรงงานวัตถุระเบิดทหาร

กรมการอุตสาหกรรมทหาร ศูนย์การอุตสาหกรรม

ป้องกันประเทศและพลังงานทหาร

๒๕ กันยายน 2562

พลตรี *สุชาติ เตரியุมพร*
(สุชาติ เตரியุมพร)

ผู้อำนวยการโรงงานวัตถุระเบิดทหาร

กรมการอุตสาหกรรมทหาร ศูนย์การอุตสาหกรรม

ป้องกันประเทศและพลังงานทหาร

๒๖ กันยายน 2562



รหัสเอกสาร FM 5 - 2065

โรงงานวัตถุระเบิดทหาร
กรมการอุตสาหกรรมทหาร ศูนย์การอุตสาหกรรมป้องกันประเทศและพลังงานทหาร

ผลการทดสอบแผ่นเกราะ ระดับ 4

ชื่อ - หมายเลขงาน...แผ่นเกราะ SS63PLATEGAB3521008.....

บริษัทผู้ผลิต...มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร..... วันที่ทดสอบ... 24 ก.ย. 62.....

กระสุนขนาด .30 caliber M2 AP 166 Gr.			ความเร็วกระสุน 878 ± 9.1 เมตร/วินาที		หมายเหตุ
นัดที่	มุมยิง	ความเร็ว (เมตร/วินาที)	ผลการทดสอบ		
			ทะลุ	ไม่ทะลุ	
1	0°	901.7		✓	- ความเร็วสูงกว่าเกณฑ์ 14.6 m/s

ชื่อ - หมายเลขงาน...แผ่นเกราะ SS12.....

บริษัทผู้ผลิต...มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร..... วันที่ทดสอบ... 24 ก.ย. 62.....

กระสุนขนาด .30 caliber M2 AP 166 Gr.			ความเร็วกระสุน 847 ± 9.1 เมตร/วินาที		หมายเหตุ
นัดที่	มุมยิง	ความเร็ว (เมตร/วินาที)	ผลการทดสอบ		
			ทะลุ	ไม่ทะลุ	
1	0°	929.5	✓		- ความเร็วสูงกว่าเกณฑ์ 42.4 m/s
2	0°	932.8	✓		- ความเร็วสูงกว่าเกณฑ์ 45.7 m/s
3	0°	847.1		✓	- ความเร็วต่ำกว่าเกณฑ์ 21.8 m/s
4	0°	886.4	✓		

นาวาอากาศโท *น ออ*
(พชรพล อัจฉาพันธ์)

หัวหน้าแผนกทดสอบทางซีปนวิธิ

กองควบคุมมาตรฐานการผลิต โรงงานวัตถุระเบิดทหาร
กรมการอุตสาหกรรมทหาร ศูนย์การอุตสาหกรรม
ป้องกันประเทศและพลังงานทหาร

๒๕ กันยายน 2562

พลตรี

(สุชาติ เจริญชุมพร)

ผู้อำนวยการโรงงานวัตถุระเบิดทหาร
กรมการอุตสาหกรรมทหาร ศูนย์การอุตสาหกรรม
ป้องกันประเทศและพลังงานทหาร

๒๕ กันยายน 2562



รหัสเอกสาร FM 5 - 2064

โรงงานวัตถุระเบิดทหาร
กรมการอุตสาหกรรมทหาร ศูนย์การอุตสาหกรรมป้องกันประเทศและพลังงานทหาร

ผลการทดสอบแผ่นเกราะ ระดับ 3

ชื่อ - หมายเลขงาน...แผ่นเกราะ SS82PLATENOGAB.....

บริษัทผู้ผลิต...มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร..... วันที่ทดสอบ... 20 ก.ย. 62.....

กระสุนขนาด 7.62 x 51 mm. NATO FMJ 148 Gr.			ความเร็วกระสุน 847 ± 9.1 เมตร/วินาที		หมายเหตุ
ลำดับที่	มุมยิง	ความเร็ว (เมตร/วินาที)	ผลการทดสอบ		
			ทะลุ	ไม่ทะลุ	
1	0°	846.4		✓	
2	0°	841.3		✓	
3	0°	839.1		✓	
4	0°	838.2		✓	
5	0°	845.3		✓	

นาวาอากาศโท *พ. อ. 2*
(พชรพล อัจฉาพันธุ์)

หัวหน้าแผนกทดสอบทางซิปนวิธิ

กองควบคุมมาตรฐานการผลิต โรงงานวัตถุระเบิดทหาร

กรมการอุตสาหกรรมทหาร ศูนย์การอุตสาหกรรม

ป้องกันประเทศและพลังงานทหาร

๒๕ กันยายน 2562

พลตรี

สุชาติ เตரியมขุมพร

(สุชาติ เตரியมขุมพร)

ผู้อำนวยการโรงงานวัตถุระเบิดทหาร

กรมการอุตสาหกรรมทหาร ศูนย์การอุตสาหกรรม

ป้องกันประเทศและพลังงานทหาร

๒๖ กันยายน 2562

ประวัติการศึกษาและการทำงาน



ชื่อ นามสกุล นายอนุชา สายเจริญ
 วัน เดือน ปีเกิด 23 สิงหาคม 2538
 ภูมิลำเนา 65/179 แขวงสายไหม เขตสายไหม กรุงเทพมหานคร 10220

ประวัติการศึกษา

วุฒิการศึกษา	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ	โรงเรียนกองทัพบกอุปถัมภ์ช่างกลขส.ทบ	2556
ปริญญาตรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2560

ตำแหน่งและสถานที่ทำงานปัจจุบัน

- 2564-ปัจจุบัน Process Engineering บริษัท Fabrinet จำกัด
 5/6 หมู่ 6 ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120
- 2563-2564 Process Engineering บริษัท SVI จำกัด (มหาชน)
 141-142 หมู่ 5 ถนนติวานนท์ ตำบลบางกะดี อำเภอเมืองปทุมธานี จังหวัดปทุมธานี 12000
- 2561-2563 Process Engineering บริษัท โรม อินทีเกรเต็ด ซีเอสเต็มส์ (ประเทศไทย) จำกัด
 101/94, 102 นิคมอุตสาหกรรมนวนคร ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120
- 2560-2561 Maintenance Engineering บริษัท Gintech (Thailand) จำกัด
 101/32-33 ม.20 นิคมอุตสาหกรรมนวนคร ถ.พหลโยธินตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 1212