

<http://journal.rmutp.ac.th/>

## การวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการต้านทานของการเจาะทะลุของกระสุนบนผิวเกราะอะลูมิเนียมด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

อนุชา สายเจริญ ปฏิภาณ ถิ่นพระบาท และ ประกอบ ชาติภักต์\*

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร  
1381 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

รับบทความ 17 กันยายน 2564 แก้ไขบทความ 17 ตุลาคม 2564 ตอรับบทความ 19 ตุลาคม 2564

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการต้านทานของการเจาะทะลุของกระสุนบนผิวเกราะด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบผลลัพธ์กับการทดสอบยิงเกราะกันกระสุนจริงและการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โปรแกรม SolidWorks ถูกเลือกใช้เป็นเครื่องมือในการสร้างโมเดลของกระสุนและเกราะกันกระสุน การจำลองรูปแบบการยิงแผ่นเกราะกันกระสุนได้เลือกใช้โปรแกรม ANSYS Explicit Dynamic การทดสอบการยิงกระสุนอ้างอิงตามมาตรฐาน NIJ 3 วัสดุของกระสุนที่ใช้ในการจำลองคือทั้งสแตนคาร์ไบด์ ขนาด 7.62 มิลลิเมตร ความเร็วกระสุน  $847 \pm 9.1$  เมตรต่อวินาที วัสดุแผ่นเกราะกันกระสุนมี 2 ชนิด คือ SKD11 และ อะลูมิเนียม AL-7075 T6 โดยการจำลองได้แบ่งออกเป็นการจำลองแผ่นเกราะแบบซ้อนด้วยขนาดความหนาของแผ่นเกราะเท่ากับ 6, 8, และ 10 มิลลิเมตร มุมองศาของการยิงเกราะกันกระสุนคือ 0, 30 และ 45 องศา ผลจากการจำลองแสดงให้เห็นว่า ความหนาของแผ่นเกราะกันกระสุนที่เพิ่มขึ้นและมุมในการยิงที่มากขึ้นเป็นปัจจัยที่ส่งผลให้แผ่นเกราะสามารถต้านทานการเจาะทะลุได้อย่างมาก

**คำสำคัญ :** เกราะกันกระสุน; เกราะอะลูมิเนียม; ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร. +66 2836 3000 ต่อ 4138, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ prakorb.c@rmutp.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

## Parameter Analysis that Affects the Ability to Resistance Penetration of Ammunition on the Aluminum Armor Surface Using Finite Element Method

Anucha Saicharoen Padipan Tinprabath and Prakorb Chartpuk\*

Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon

1381 Pracharat 1 Road, Wong Sawang Subdistrict, Bang Sue District, Bangkok 10800

---

*Received 17 September 2021; Revised 17 October 2021; Accepted 19 October 2021*

### Abstract

This research investigated the factors influencing the penetrating resistance of the armor surface using the finite element method. In this study, firing tests on actual bulletproof armor and finite element simulation modeling of bulletproof armor using the SolidWorks program were compared. The pattern model of firing onto armor was created and simulated using the ANSYS Explicit Dynamic program. The damage test was conducted in accordance with the National Institute of Justice Level 3 standards. The bullet material used in the model was 7.62 mm tungsten carbide (WC) moved at speed of  $847 \pm 9.1$  m/s. In this simulation, two different kinds of bulletproof armor were used: SKD1 and Aluminum AL7075. According to the simulations, the armor plates were stacked with thicknesses of 6, 8, and 10 mm, and the angles of firing of bulletproof armor were at 0, 30, and 45 degrees. The simulation findings showed that factors influencing the considerable resistance of the armor plates to bullet penetration are increases in firing angle and armor thickness.

**Keywords :** Bulletproof Armor; Aluminum Armor; Finite Element Method

---

\* *Corresponding Author. Tel.: +669 8279 5855, E-mail Address: prakorb.c@rmutp.ac.th*

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยี รวมถึงวัสดุขั้นสูง (Advanced Materials) เพื่อใช้ในการประยุกต์งานทางด้านวิศวกรรมต่างๆ รวมถึงทางด้านวิศวกรรมเครื่องกลมีความก้าวหน้าไปอย่างมาก โดยการพัฒนาในระดับโครงสร้างวัสดุให้มีความเฉพาะเจาะจง เสถียร แม่นยำและมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้เกิดสมบัติของวัสดุที่พิเศษเพื่อการใช้งานเฉพาะด้าน ที่ผ่านมาการพัฒนาวัสดุเกรดได้มุ่งเน้นไปที่การลดน้ำหนักของวัสดุเกรดที่มีอยู่ เพราะน้ำหนักที่ลดลงจะช่วยในการประหยัดพลังงานตลอดจนการเพิ่มความคล่องตัว ในอดีตเหล็กถูกนำมาใช้เป็นเกรดเนื่องจากมีความแข็งแรงสูงของพวกเขารวมที่มีความเหนียวที่ดีและต้นทุนต่ำ นำไปสู่การค้นหาเทคนิคการผลิตที่แตกต่างกัน เช่น การรักษาความร้อน การรีดเย็น ฯลฯ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งของเหล็ก ซึ่งในจะช่วยในการลดน้ำหนักของชุดเกรด การศึกษาก่อนหน้านี้มีอย่างกว้างขวาง การศึกษาผลกระทบของการรักษาความร้อนในการปรับปรุงคุณสมบัติของเกรดเหล็ก [1]-[8]

มีการศึกษาเกี่ยวกับทิศทางของเกรนที่วิ่งเข้ามาปะทะกับแผ่นเกรด ซึ่งให้เห็นว่ามุมวิ่งเข้าปะทะกับแผ่นเกรดที่ 30 องศา จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงโดยประมาณ 30% ในขณะที่ประสิทธิภาพการป้องกันเพิ่มขึ้นเป็น 21% [9] นั่นคือทุกครั้งที่ทำกรทดสอบต้องทดสอบที่มุมปะทะ 0 องศา เพื่อให้ครอบคลุมการโจมตีของเกรน อะลูมิเนียมเป็นวัสดุหนึ่งที่มีความน่าสนใจ เนื่องจากมีความหนาแน่นต่ำ ทำให้เบา จนถูกนำมาเสนอการใช้งานเป็นเกรดน้ำหนักเบา มีการอ้างอิงที่มีอยู่ในวารสารการวิจัยระดับนานาชาติจำนวนมากเกี่ยวกับพฤติกรรมของโลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีความแข็งแรงสูง [9]-[14] Namik Kiliç & Bülent Ekici [15] ได้นำเสนอการต้านทานชิปนาวูรของเหล็กเกรดความแข็งสูงต่อเกรนเจาะเกรด 7.62 mm ใช้การจำลองอุทกพลศาสตร์ของอนุภาคการองจ์และวิธี SPH ได้

ดำเนินการโดยใช้แบบจำลอง 3 มิติของเกรนและแผ่นเกรดที่ความหนา 9 และ 20 มม. เพื่อตรวจสอบวิธีการจำลอง นอกจากนี้ยังมีการทดสอบวัสดุสำหรับเกรดเหล็กและแกนเหล็กชุบแข็งของเกรนเพื่อพัฒนาความสัมพันธ์เชิงโครงสร้างของ Johnson-Cook Constitutive Relations สำหรับทั้งแบบจำลองความแข็งแรงและความล้มเหลว สุดท้ายผลลัพธ์จากการจำลองเชิงตัวเลข 3 มิติพร้อมแบบจำลองรายละเอียดของเกรนและแผ่นเกรดถูกนำไปเปรียบเทียบกับกรทดลอง M. Rodriguez-Millan et al. [16] นำเสนอกลไกการเจาะของแผ่นเกรดอะลูมิเนียม 2024 ที่ถูกกระแทกโดยปลายเกรนที่มีรูปร่างต่างกัน ใช้วิธีการแปลง FEM-SPH ซึ่งให้การทำนายพฤติกรรมทางกลของ AA 2024-T351 ที่แม่นยำ การจำลองช่วยให้เข้าใจปรากฏการณ์การกระแทกและการกระจายพลังงานที่สูญเสียไปตามแผ่นอะลูมิเนียม ไม่พบความแตกต่างที่มีนัยสำคัญในการต้านทานเกรนที่มีรูปร่างต่างกันส่วนปลาย อย่างไรก็ตาม ความแปรผันที่เกี่ยวข้องของความเร็วตกค้างถูกบันทึกเมื่อความเร็วกระแทกเพิ่มขึ้น งานวิจัยที่ผ่านมามีการผสมผสานโลหะผสมและโลหะพื้นฐาน เพื่อปรับปรุงวัสดุเกรด และใช้ในการก่อสร้างยานพาหนะ [17]-[20] N.K. Gupta et al. [21] ทำกรทดลองและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Abaqus สำหรับแผ่นเกรดแผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยด์ 1100-H12 ที่ได้รับผลกระทบจากเกรนด้วยความหนาแผ่นเกรดที่หลากหลายอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสมมีความแข็งแรงและความเหนียวสูง มีจุดหลอมเหลวต่ำและมีอัตราความเครียดสูง เหมาะที่จะนำมาประยุกต์เป็นวัสดุเกรด เป้าหมายในการนำมาใช้งานคือการสร้างให้มีขึ้นหลาย ด้วยการใช้วัสดุหลายชนิดร่วมกัน เป็นวิธีการที่จะเพิ่มประสิทธิภาพต่อการปรับปรุงความต้านทานการเจาะเกรด และปรับปรุงให้มีค่าความแข็งที่ผิวให้สูงขึ้น และต้องออกแบบให้เกิดการเลี้ยวเบนของเกรนเมื่อเข้ามาปะทะ เป็นหลักการการสลายพลังงานจลน์

ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อคาดการณ์การเกิดความเสียหายที่เกิดจากการยิงกระสุนภายใต้การยิงกระสุนตามมาตรฐาน NIJ 3 ด้วยของวัสดุกระสุนคือทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC) ขนาด 7.62 มิลลิเมตร ความเร็วของกระสุนที่  $847 \pm 9.1$  m/s เพื่อให้ลดขั้นตอน เวลาจากการทดสอบจริง อีกทั้งยังลดงบประมาณจากการทดสอบจริง

## 2. ระเบียบวิธีวิจัย

กระบวนการดำเนินงานวิจัยที่ประกอบไปด้วยวิธีการดำเนินงานวิจัย การออกแบบแผ่นเกราะที่ใช้วัสดุแตกต่างกันในการออกแบบ การวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมรวมถึงการสร้างแบบจำลองการยิงชุดเกราะ และการกำหนดค่าสมบัติของวัสดุตามสมการความเสียหาย การแบ่งเอลิเมนต์ การวิเคราะห์แผ่นเกราะด้วยโปรแกรม Ansys Explicit Dynamics

### 2.1 ขั้นตอนการวิจัย

ขั้นตอนวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ประกอบด้วย การทดสอบการยิงแผ่นเกราะจริง และการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อนำผลลัพธ์จากการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบกับกรทดลอง เพื่อตรวจสอบขีดความสามารถของโปรแกรมและสร้างไฟไนต์เอลิเมนต์โมเดลที่ถูกต้องในกระบวนการ Pre-processing ที่อ้างอิงผลความเสียหาย ความแม่นยำ เทียงตรงของการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มาตรฐานการทดสอบแผ่นเกราะกันกระสุนเป็นมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับเรื่องวิธีทดสอบ เกณฑ์การทดสอบ ความสามารถหรือประสิทธิภาพการป้องกันกระสุนโดย National Institute of Justice ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งประเทศไทยและอีกหลายประเทศทั่วโลกใช้มาตรฐานนี้ โดยมาตรฐาน NIJ แบ่งออกเป็น 6 ระดับ ซึ่ง NIJ ระดับ 3 หมายถึงแผ่นเกราะสามารถป้องกันกระสุนขนาด  $7.62 \times 51$  mm NATO M80 ball ด้วยน้ำหนักกระสุน 9.6 g มีความเร็วกระสุน  $847 \pm 9.1$  m/s ( $2780 \pm 30$

ft/s) และ NIJ ระดับ 4 หมายถึงแผ่นเกราะสามารถป้องกันกระสุนขนาด .30-06 Springfield M2 น้ำหนัก 10.8 g มีความเร็ว  $878 \pm 9.1$  m/s ( $2880 \pm 30$  ft/s)

### 2.2 กำหนดสมมติฐานในการวิเคราะห์

สมมติฐานของวัสดุที่ใช้สำหรับกระสุน แผ่นเกราะอะลูมิเนียมอัลลอยด์และ SKD11 กำหนดให้เป็นวัสดุที่มีเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) และมีสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทาง (Isotropic Materials) ความเสียหายที่เกิดขึ้นพิจารณาตั้งแต่ช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นไปจนถึงช่วงพลาสติก ความเสียหายที่เกิดขึ้นอยู่ในระดับที่มีอัตราความเครียดสูง

### 2.3 กระบวนการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

2.3.1 ขั้นตอนการเตรียมการ (Pre-processing) เป็นการสร้างไฟไนต์เอลิเมนต์โมเดล การสร้างโมเดลสามมิติของแผ่นเกราะกันกระสุนและหัวกระสุน ด้วยโปรแกรม SolidWorks วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม ANSYS Explicit Dynamic กำหนดวัสดุให้กับชิ้นส่วนต่างๆ ซึ่งมีทฤษฎีโมเดลวัสดุในส่วน Explicit Materials ประกอบด้วย Johnson-Holmquist Strength Continuous, Steinberg Guinan Strength, Equation of State, Johnson-Cook Failure เป็นต้น การกำหนดคู่สัมผัสเป็นการกำหนดชนิดของหน้าสัมผัสที่สัมผัสกันเช่น กระสุนที่สร้างขึ้นจะมี 8 ชิ้นส่วนจะต้องกำหนดให้ทุกหน้าสัมผัสเป็นแบบ Bonded การกำหนดความเร็วของกระสุน การกำหนดจุดรองรับหรือจุดจับยึด และการกำหนดชนิดเอลิเมนต์ การควบคุมขนาดเอลิเมนต์

2.3.2 กระบวนการประมวลผล (Solve-processing) เป็นขั้นตอนการวิเคราะห์แบบ Explicit Dynamics ต้องเลือกใช้กับแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น การเสีรูบขนาดใหญ่ และมีอัตราความเครียดสูง

2.3.3 กระบวนการแสดงผลลัพธ์ (Post-processing) เป็นขั้นตอนการแสดงผลหลังจากการวิเคราะห์ โดยค่าที่แสดงจะมีลักษณะเป็นค่าตัวเลขที่โหนด (Node Value)

การแสดงผลเพื่อพิจารณา ประกอบด้วย การเสียรูป ทิศทางการเสียรูป ความเร็วของวัตถุ ทิศทางของความเร็ว ความเค้นและความเครียดต่างๆ

## 2.4 ทฤษฎีและสมบัติของวัสดุ

### 2.4.1 โมเดลของ Johnson Holmquist Failure

Johnson Holmquist แบบจำลองที่เหมาะสมในการทำนายพฤติกรรมของวัสดุเปราะที่ต้องรับน้ำหนักมากคุณสมบัติหลักของโมเดลนี้ ได้แก่ ค่าความแข็งแรงขึ้นอยู่กับแรงกด ความเสียหาย และการแตกหัก ความแข็งแรงที่สำคัญหลังจากการแตกหักและผลกระทบจากอัตราความเครียดสูง สำหรับกระสุนทังสเตนคาร์ไบด์ (Tungsten Carbide Bullet) ซึ่งเป็นกระสุนเจาะเกราะที่มีส่วนของหัวกระสุนอยู่ในปลอกทองเหลืองทำจากทังสเตนคาร์ไบด์ มีขนาด 7.62 mm ดังนั้นโมเดลรูปแบบความเสียหายของ Johnson-Holmquist Failure Model จึงถูกนำมาใช้กับกระสุนดังกล่าวที่มีความแข็งแรงเปราะอยู่ภายใต้แรงดันขนาดใหญ่และอัตราความเครียดสูง รูปแบบจะพยายามรวมปรากฏการณ์ที่พบเมื่อวัสดุที่เปราะบางถูกแรงกระทำและเกิดความเสียหาย ซึ่งเป็นหนึ่งในแบบจำลองที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดเมื่อต้องรองรับกับผลกระทบจากชิปนาวอร์ (Ballistic) กำหนดให้  $\sigma$  คือความเค้นคราก (Yield Stress) เป็นไปตามสมการที่ (1) [22]

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

$$\text{เมื่อ } T^* = \frac{T}{T_{HEL}} \text{ และ } P^* = \frac{P}{P_{HEL}} \quad (2)$$

โดยที่  $A, B, C, M, N$  เป็นค่าคงที่ของวัสดุ ความดันปกติคือ  $P^* = P/P_{HEL}$  โดยที่  $P$  คือความดันไฮโดรสแตติกที่แท้จริง และค่า  $P_{HEL}$  คือค่าความดันไฮโดรสแตติกที่  $HEL$  (Hugoniot Elastic Limit) ความดันไฮโดรสแตติกแรงดึงสูงสุดที่ปรับให้เป็นมาตรฐานคือ  $T^* = T/T_{HEL}$

โดยที่  $T$  คือ แรงดันไฟฟ้าสถิตสูงสุดที่วัสดุสามารถทนได้  $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$  คืออัตราความเครียดไร้มิติ โดยที่  $\dot{\epsilon}$  คืออัตราความเครียดที่เทียบเท่าจริง และ  $\dot{\epsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$  จากสมการที่ (1) กรณีความแข็งแรงตามปกติไม่เสียหาย (The Normalized Intact Strength) จะได้รูปแบบสมการที่ (3) และจากสมการที่ (1) กรณีความแข็งแรงตามปกติเสียหาย (The Normalized Fracture Strength) จะได้รูปแบบสมการที่ (4) [22]

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

$$\sigma_f^* = B(P^*)^M .(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \leq SFMAX \quad (4)$$

### 2.4.2 โมเดลของ Johnson-Cook

Johnson-Cook Model คือแบบจำลองเชิงปรากฏการณ์ที่มักใช้ในการทำนายการตอบสนองของโลหะอาจได้รับผลกระทบและการเจาะเนื่องจากสามารถสร้างความเครียดได้การชุบแข็งผลกระทบจากอัตราความเครียดและการอ่อนตัวจากความร้อน คุณสมบัติเหล่านี้ควบคู่ไปในลักษณะทวีคูณโดยใช้สมการต่อไปนี้ [23]

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

โดยที่  $\sigma$  คือ ความเค้นเทียบเท่า (Equivalent Stress) และค่า  $\epsilon$  คือ ความเครียดพลาสติกที่เท่าเทียมกัน (Equivalent Plastic Strain)  $A, B, C, m$  และ  $n$  คือ ค่าคงที่ของวัสดุ โดยที่  $A$  คือ ค่าคงที่ภายใต้เงื่อนไขอ้างอิงความเค้นของวัสดุ  $B$  คือ ค่าคงที่การแข็งตัวของความเครียด  $n$  คือ สัมประสิทธิ์การแข็งตัวของความเครียด  $C$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การเสริมความแข็งแรงของอัตราความเครียด (A Strain Rate Hardening Factor) และ  $m$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การอ่อนตัวด้วยความร้อน (Thermal-softening Factor)  $\dot{\epsilon}^*$  คือ อัตราความเครียดไร้มิติที่อ้างอิงจากอัตราความเครียดต่อเวลาที่  $1/s$ ,  $T^*$  คือ อุณหภูมิไร้มิติ

(Nondimensional Temperature) กำหนดตัวแปร  $T^*$  ได้ด้วยสมการที่ (6) [23]

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

โดยที่  $T_r$  คือ อุณหภูมิห้อง (298 K) และ  $T_m$  คือ อุณหภูมิหลอมละลายของวัสดุ โดยค่าสมบัติของวัสดุ และพารามิเตอร์ของกระสุน 7.62x51 มิลลิเมตร เป็น วัสดุทังสเทนคาร์ไบด์ (Tungsten Carbide) ที่ใช้ในการ จำลองแสดงในตารางที่ 1 สำหรับแผ่นเกราะกันกระสุน SKD 11 แสดงดังตารางที่ 2 สมบัติของแผ่นเกราะกัน กระสุนด้วยวัสดุ AL-7075 T6 แสดงดังตารางที่ 3 และ สมบัติของแผ่นเกราะกันกระสุน SUS 304 แสดงดัง ตารางที่ 4

**ตารางที่ 1** สมบัติของ Tungsten Carbide [24], [25]

Properties	Tungsten carbide
Density ( $\rho$ , g/cm <sup>3</sup> )	14.56
Young's modulus (E, GPa)	539
Poisson ratio ( $\nu$ )	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
Maximum fracture strength ratio	1000
Damage constant (D1)	1
Damage constant (D2)	0
Hydrodynamic tensile limit (GPa)	-4

**ตารางที่ 2** สมบัติของ SKD 11 [25], [26]

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

**ตารางที่ 3** สมบัติของ AL-7075 T6 [27]

Properties	AL-7075 T6
Density ( $\rho$ , g/cm <sup>3</sup> )	2.804
Specific heat (J/kg °C)	848
Steinberg-Guinan Strength	
Initial yield stress (Y, MPa)	420
Max. yield stress (Ymax, MPa)	810
Shear modulus (GPa)	80
Hardening constant (B)	965
Hardening exponent (n)	0.1
Derivative (dG/dP, G'P)	1.74
Derivative (dG/dT, G'T), MPa/°C	-16.4
Derivative (dY/dP, Y'P)	0.02738
Melting temperature ( $T_{melt}$ , °C)	946.85
Shear modulus (GPa)	26.7
EOS	
Gruneisen coefficient	2.2
Parameter (C1, m/s)	5200
Parameter (S1)	1.36
Parameter quadratic (S2)	0

ตารางที่ 4 สมบัติของ SUS 304 [In ANSYS Program]

Properties	SUS304
Density ( $\rho$ , g/cm <sup>3</sup> )	7.9
Specific heat (J/kg °C)	423
Initial yield stress (Y, MPa)	340
Max. yield stress (Ymax, MPa)	2,500
Shear modulus (GPa)	77
Hardening constant (B)	43
Hardening exponent (n)	0.35
Derivative (dG/dP, G'P)	1.74
Derivative (dG/dT, G'T), MPa/°C	-35.04
Derivative (dY/dP, Y'P)	0.007684
Melting temperature (T <sub>melt</sub> , °C)	2,106.9
Shear modulus (GPa)	77
EOS	
Gruneisen coefficient	1.93
Parameter (C1, m/s)	4,570
Parameter (S1)	1.49
Parameter quadratic (S2, s/m)	0

### 2.5 โมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์

สร้างโมเดลแผ่นเกราะกันกระสุนให้มีขนาดพื้นที่ 300x300 mm กำหนดให้แผ่นเกราะมีเอลิเมนต์ชนิดเฮกซะฮีดรอล (Hexahedral) และหัวกระสุนส่วนที่แหลมเป็นเอลิเมนต์ชนิดเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) กำหนดหน้าสัมผัสด้วย Contacts Bodies เป็นแบบ Bonded ทั้งหมดของกระสุนจำนวน 12 หน้าสัมผัสควบคุมขนาดเอลิเมนต์โดยการปรับขนาดเอลิเมนต์จากขอบของแผ่นเกราะที่มีขนาดเอลิเมนต์ใหญ่ลู่เข้าไปยังกลางแผ่นเกราะที่มีขนาดเอลิเมนต์ที่เล็กลง ด้วยการกำหนด Bias Type และ Bias Factor เท่ากับ 12 ใช้เทคนิคการเพิ่มชั้นเอลิเมนต์ตลอดความหนาด้วยการกำหนด Number of Divisions เท่ากับ 3 กำหนดที่ผิวขอบของแผ่นเกราะทั้ง 4 ด้านเป็นแบบยึดแน่น (Fixed Support) กระสุนพุ่งเข้าแผ่นเกราะด้วยความเร็วตามมาตรฐาน NIJ 3 ที่ 847 m/s ทำมุมปะทะกับแผ่นเกราะที่ 0 องศา กำหนดชุดคำนวณเป็น AUTODYN ตั้งค่าการ

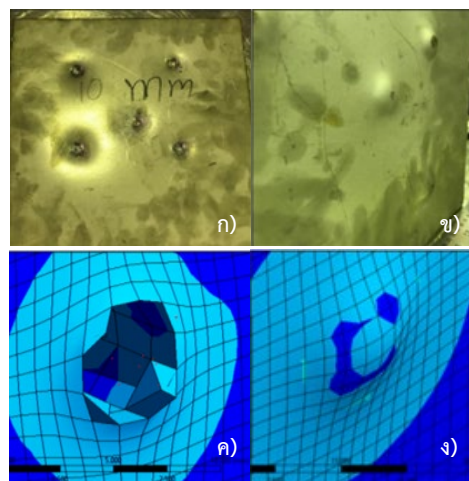
วิเคราะห์ด้วย End Time เท่ากับ 0.001 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วย Equivalent (Von-Mises) Stress

### 3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

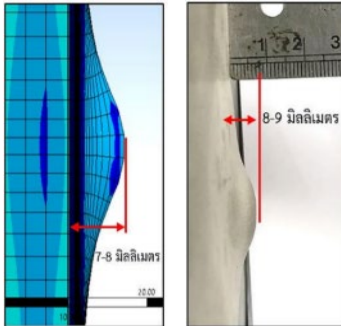
#### 3.1 เปรียบเทียบผลระหว่าง EXP กับ FEA

จากการทดสอบการยิงแผ่นเกราะที่โรงงานวัตถุระเบิดทหาร กรมการอุตสาหกรรมป้องกันประเทศและพลังงาน จ.นครสวรรค์ (Military Explosives Factory, Defence Industry Department, Defence Industry and Energy Centre) ตามมาตรฐาน NIJ 3 ด้วยกระสุนขนาด 7.62x51 mm NATO FMJ 148 Gr. ที่มุม 0 องศา ความเร็ว 847±9.1 m/s มีผลการทดสอบทั้งสองวิธีเปรียบเทียบกันเป็น 2 กรณีดังนี้

กรณีที่ 1 แผ่นเกราะด้านหน้าและด้านหลังมีความหนาแผ่นละ 10 mm ไม่มีระยะห่างระหว่างแผ่นทำด้วยวัสดุ SUS304 ผลลัพธ์คือกระสุนได้เจาะทะลุแผ่นเกราะด้านหน้าอย่างสมบูรณ์แต่แผ่นเกราะด้านหลังไม่ทะลุ เกิดเป็นรอยย่นที่บริเวณด้านหลังแผ่นเกราะ ดังรูปที่ 1 และมีระยะย่นเปรียบเทียบทั้งสองวิธีดังรูปที่ 2 และแสดงให้เห็นว่าผลจากการจำลองกับผลการทดสอบจริงมีความสอดคล้องกัน

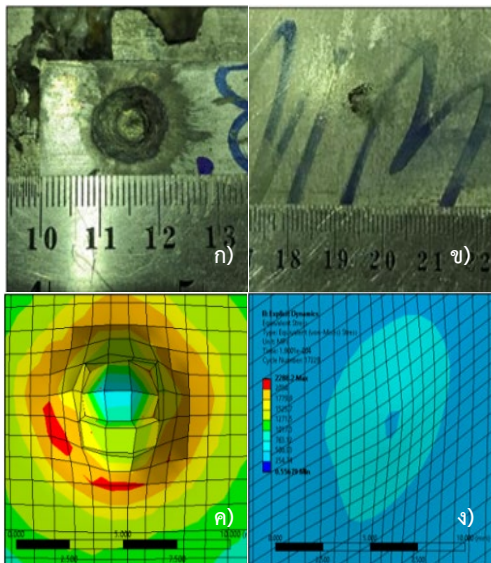


รูปที่ 1 ความเสียหายที่แผ่นเกราะสแตนเลส SUS304 ก) EXP. แผ่นด้านหน้า ข) EXP. แผ่นด้านหลัง ค) FEA แผ่นด้านหน้า และ ง) FEA แผ่นด้านหลัง [25]



รูปที่ 2 เปรียบเทียบระยะย่นของแผ่นเกราะด้านหลัง ด้วยวิธี EXP และ FEA [25]

กรณีที่ 2 แผ่นเกราะแผ่นด้านหน้าทำจากวัสดุ SKD11 มีความหนา 10 mm และแผ่นเกราะด้านหลังทำจาก SUS304 มีความหนา 10 mm ไม่มีระยะห่างระหว่างแผ่น ผลที่ได้คือแผ่นเกราะด้านหน้าและด้านหลังไม่เจาะทะลุ วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางได้ประมาณ 9 mm แต่แผ่นเกราะด้านหน้าจะมีรอยย่นดังรูปที่ 3 ดังนั้นผลจากการจำลองกับการทดสอบจริง มีความแตกต่างกันน้อยกว่าร้อยละ 10 แสดงให้เห็นว่ามีความสอดคล้อง



รูปที่ 3 ความเสียหายที่แผ่นเกราะสแตนเลส SKD11 ก) EXP. แผ่นด้านหน้า ข) EXP. แผ่นด้านหลัง ค) FEA แผ่นด้านหน้า และ ง) FEA แผ่นด้านหลัง [25]

### 3.2 ผลการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

แผ่นเกราะกันกระสุนด้านหน้าทำจาก SKD11 เป็นแบบแผ่นซ้อนและมีแผ่นอะลูมิเนียมเป็นแผ่นเกราะด้านหลังที่มีขนาดความหนาของวัสดุที่ 6, 8 และ 10 mm ที่การจำลองจะมีมุมกระแทกของกระสุนที่มุม 0, 30, และ 45 องศา โดยทำการปรับค่าความหนาของแผ่นเกราะที่ทำจาก SKD11 และ AL-7075 T6 ปรับค่าความหนาเริ่มตั้งแต่ 4 mm ไปจนถึง 10 mm และพบว่ามุ่มยังมีผลต่อความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุ ได้ผลการจำลองดังตารางที่ 2

ตารางที่ 5 ผลการจำลองแผ่นเกราะแบบซ้อนของวัสดุ SKD11 กับวัสดุ AL-7075 T6 และมุมมองการยิงของกระสุนบนแผ่นเกราะ

ความหนาแผ่นเกราะ (mm)		มุมกระแทก (องศา)		
แผ่นหน้า	แผ่นหลัง	0	30	45
SKD11	AL-7075 T6			
4	4	ทะลุ	ทะลุ	ทะลุ
5	5	ทะลุ	ทะลุ	ทะลุ
6	6	ทะลุ	ทะลุ	ไม่ทะลุ
8	8	ทะลุ	ไม่ทะลุ	ไม่ทะลุ
10	8	ทะลุ	ไม่ทะลุ	ไม่ทะลุ
10	10	ทะลุ	ไม่ทะลุ	ไม่ทะลุ

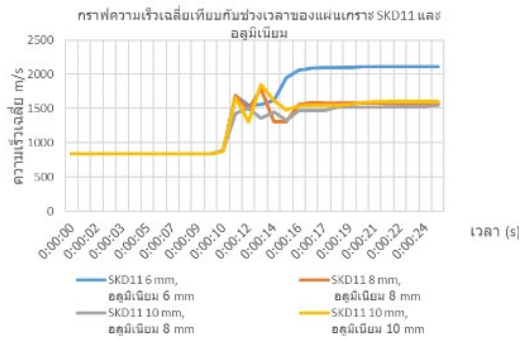
#### 3.2.1 การจำลองมุมกระแทกที่ 0 องศา ด้วยความหนาของแผ่นซ้อนที่ 6, 8 และ 10 mm

เปรียบเทียบความเค้นและความเร็วกระสุนที่วิเคราะห์ได้ด้วยรูปที่ 4-5 โดยปรับค่าความหนาของ SKD11 และ AL-7075 T6 ตั้งแต่ 6, 8 และ 10 mm

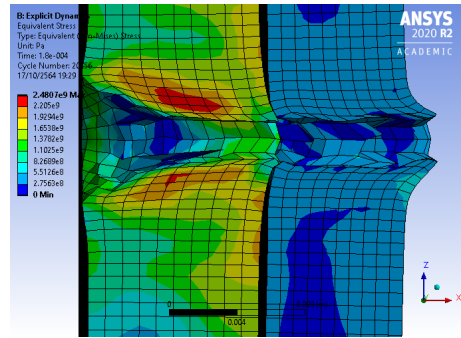


รูปที่ 4 ความเค้นเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 และ AL-7075 T6 ที่มุมยิง 0 องศา

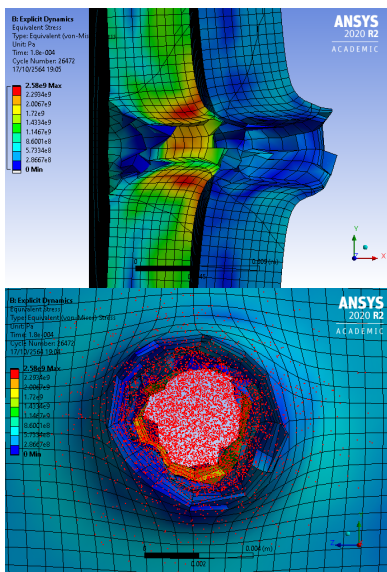




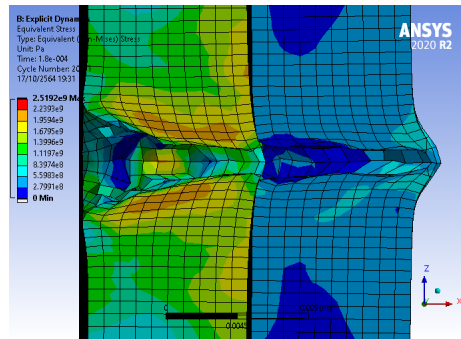
รูปที่ 5 ความเร็วเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 และ AL-7075 T6 ที่มีมุมยิง 0 องศา



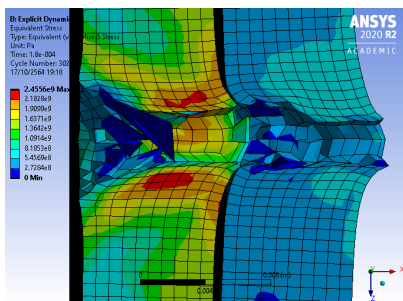
รูปที่ 8 แผ่นเกราะ SKD11 อยู่ด้านหน้ามีความหนา 10 mm และแผ่นเกราะ AL-7075 T6 อยู่ด้านหลังมีความหนา 8 mm มุมยิง 0 องศา



รูปที่ 6 แผ่นเกราะ SKD11 อยู่ด้านหน้ามีความหนา 6 mm และแผ่นเกราะ AL-7075 T6 อยู่ด้านหลังมีความหนา 6 mm มุมยิง 0 องศา



รูปที่ 9 แผ่นเกราะ SKD11 อยู่ด้านหน้ามีความหนา 10 mm และแผ่นเกราะ AL-7075 T6 อยู่ด้านหลังมีความหนา 10 mm มุมยิง 0 องศา



รูปที่ 7 แผ่นเกราะ SKD11 อยู่ด้านหน้ามีความหนา 8 mm และแผ่นเกราะ AL-7075 T6 อยู่ด้านหลังมีความหนา 8 mm มุมยิง 0 องศา

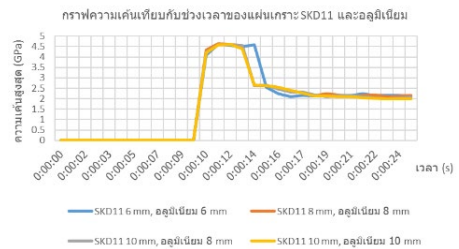
ผลการจำลองของแผ่นเกราะ SKD11 ซ้อนด้วยแผ่นเกราะอะลูมิเนียม ที่มุม 0 องศา โดยใช้ความเร็วในการจำลองของลูกกระสุนด้วยความเร็ว 847 m/s เห็นได้ว่าแผ่นเกราะซ้อนทุกขนาดความหนานั้นไม่สามารถต้านทานจากกระสุนต่อการเจาะทะลุได้ จากการพิจารณาของกราฟแสดงความเค้นเทียบกับช่วงเวลานั้นพบว่าที่ความหนาของแผ่นเกราะทุกขนาดนั้นมีความเค้นที่ไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งในส่วนของกราฟความเร็วเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลานั้นจะเห็นได้ว่าที่ความหนาของแผ่นเกราะซ้อน SKD11 ขนาด 6 mm อะลูมิเนียม 6 mm นั้นความเร็วของกระสุนจะอย่างรวดเร็วในช่วงทะลุผ่านเกราะและจากรอยการทำลายของกระสุนบริเวณการเจาะทะลุนั้นจะเห็นได้ว่าความหนาของ

เกราะ SKD11 6 mm อะลูมิเนียม 6 mm นั้นมีขนาดใหญ่กว่าเกราะอื่นๆ ที่มีขนาดของความหนามากกว่าอย่างเห็นได้ชัด จากผลการจำลองนี้นั้นสรุปได้ว่าความหนาของแผ่นชั้นที่ 0 องศา ไม่สามารถต้านทานต่อการเจาะทะลุของกระสุนได้

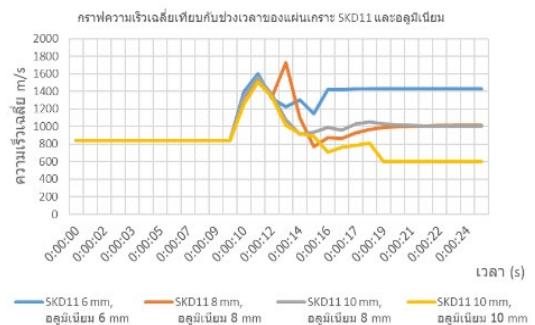
### 3.2.2 การจำลองมุมกระแทกที่ 30 องศา ด้วยความหนาของแผ่นชั้นที่ 6, 8 และ 10 mm

ผลการจำลองของแผ่นเกราะ SKD11 ชั้นด้วยแผ่นเกราะอะลูมิเนียม ที่มุม 30 องศา โดยใช้ความเร็วในการจำลองของลูกกระสุนด้วยความเร็ว 847 m/s จากรูปที่ 10-15 เห็นได้ว่าแผ่นเกราะชั้น 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 จากการพิจารณาของกราฟแสดงความเค้นเทียบกับช่วงเวลานั้น พบได้ว่าที่ความหนาของแผ่นเกราะทุกขนาดนั้นมีความเค้นที่ไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งในส่วนของกราฟความเร็วเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลานั้นจะเห็นว่าที่ความหนาของแผ่นเกราะชั้น SKD11 ความหนา 10 mm อะลูมิเนียมความหนา 10 mm นั้นมีความเร็วหลังจากการเจาะทะลุต่ำสุด เนื่องจากการต้านทานของเกราะกันกระสุนที่มีความหนาที่สูงทำให้สามารถหยุดการกระจายของเศษกระสุนและจากรอยการทำลายของกระสุนบริเวณการเจาะทะลุนั้นจะเห็นได้ว่าความหนาของเกราะชั้น 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 เกราะชั้นนอกมีการเจาะ

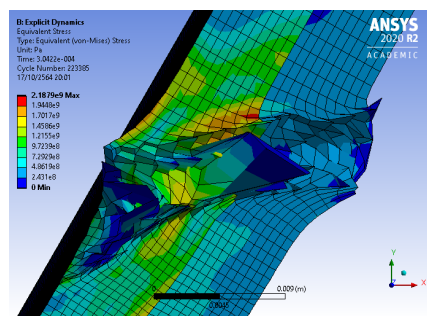
ทะลุแต่ไม่ถึงแผ่นชั้นชั้นใน จากผลการจำลองนี้นั้นสรุปได้ว่าที่ 30 องศา ของการจำลองยิงของกระสุนในไฟไนต์เอลิเมนต์ความหนาของแผ่นเกราะกันกระสุนเป็นผลต่อการต้านทานของการเจาะทะลุอย่างเห็นได้ชัดโดยการต้านทานของเกราะกันกระสุนนั้นเริ่มที่ความหนาของเกราะ SKD11 ชั้นนอกที่ 8 mm แต่ในส่วนแผ่นเกราะ SKD11 ชั้นนอกที่ 6 mm นั้นกระสุนสามารถเจาะทะลุได้อย่างสมบูรณ์



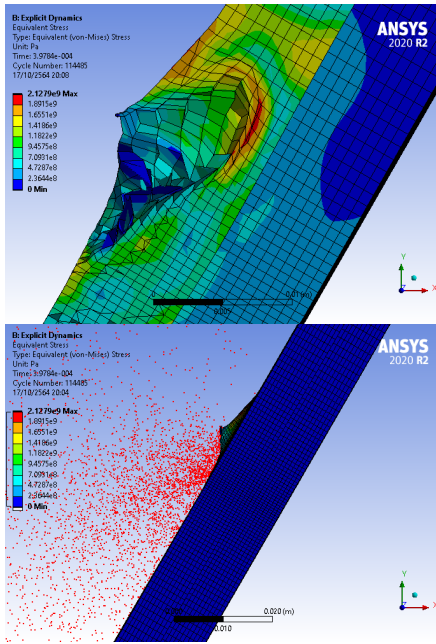
รูปที่ 10 ความเค้นเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 และ AL-7075 T6 ที่มุมยิง 30 องศา



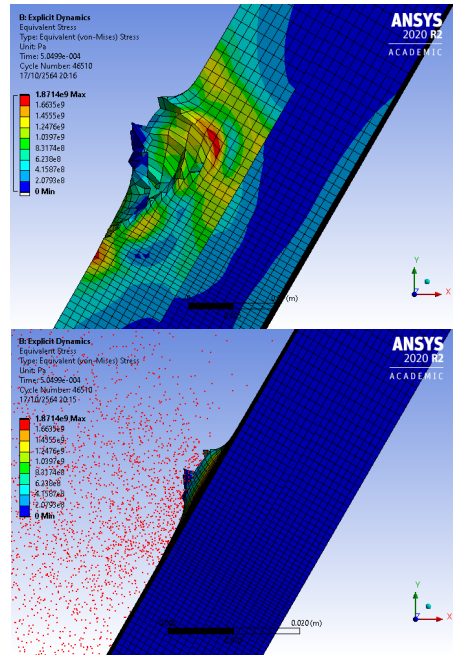
รูปที่ 11 ความเร็วเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 และ AL-7075 T6 ที่มุมยิง 30 องศา



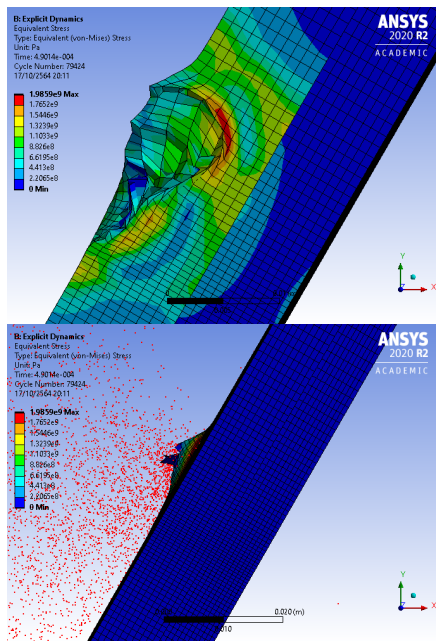
รูปที่ 12 แผ่นเกราะ SKD11 อยู่ด้านหน้ามีความหนา 6 mm และแผ่นเกราะ AL-7075 T6 อยู่ด้านหลังมีความหนา 6 mm มุมยิง 30 องศา



รูปที่ 13 แผ่นเกราะ SKD11 อยู่ด้านหน้ามีความหนา 8 mm และแผ่นเกราะ AL-7075 T6 อยู่ด้านหลังมีความหนา 8 mm มุมยิง 30 องศา



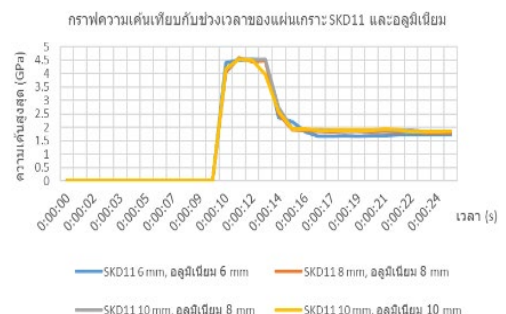
รูปที่ 15 แผ่นเกราะ SKD11 อยู่ด้านหน้ามีความหนา 10 mm และแผ่นเกราะ AL-7075 T6 อยู่ด้านหลังมีความหนา 10 mm มุมยิง 30 องศา



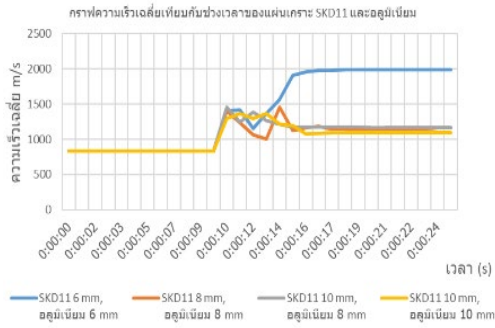
รูปที่ 14 แผ่นเกราะ SKD11 อยู่ด้านหน้ามีความหนา 10 mm และแผ่นเกราะ AL-7075 T6 อยู่ด้านหลังมีความหนา 8 mm มุมยิง 30 องศา

### 3.2.3 การจำลองมุมกระแทกที่ 45 องศา ด้วยความหนาของแผ่นชั้นที่ 6, 8 และ 10 mm

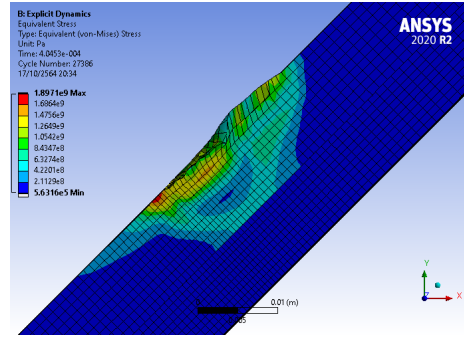
ผลการจำลองแสดงให้เห็นมุมยิงที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความหนาเดิมนี้กลับไม่สามารถต้านทานการเจาะทะลุได้ ดังนั้นจึงเป็นแนวทางในการออกแบบแผ่นเกราะที่มีหน้าเรียบเป็นแผ่นเกราะที่มีหน้าไม่เรียบ เพื่อสร้างมุมยิงให้เกิดขึ้น มีผลดังรูปที่ 16-21



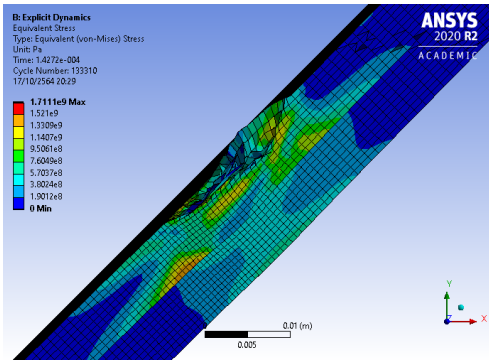
รูปที่ 16 ความเค้นเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 และ AL-7075 T6 ที่มีมุมยิง 45 องศา



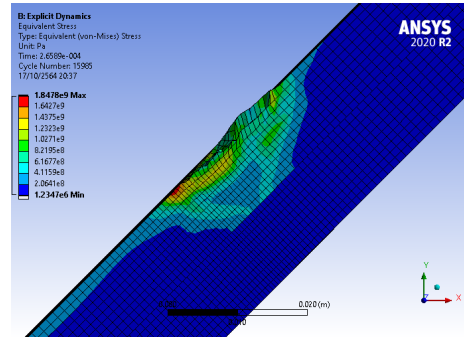
รูปที่ 17 ความเร็วเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 และ AL-7075 T6 ที่มุมยิง 45 องศา



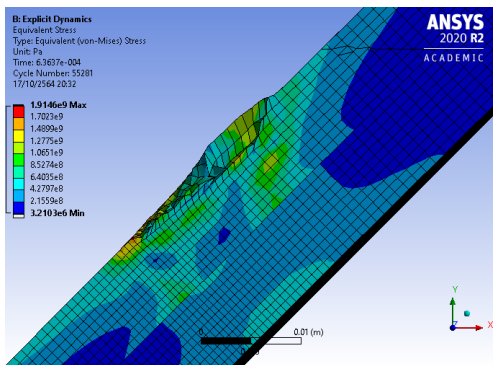
รูปที่ 20 แผ่นเกราะ SKD11 อยู่ด้านหน้ามีความหนา 10 mm และแผ่นเกราะ AL-7075 T6 อยู่ด้านหลังมีความหนา 8 mm มุมยิง 45 องศา



รูปที่ 18 แผ่นเกราะ SKD11 อยู่ด้านหน้ามีความหนา 6 mm และแผ่นเกราะ AL-7075 T6 อยู่ด้านหลังมีความหนา 6 mm มุมยิง 45 องศา



รูปที่ 21 แผ่นเกราะ SKD11 อยู่ด้านหน้ามีความหนา 10 mm และแผ่นเกราะ AL-7075 T6 อยู่ด้านหลังมีความหนา 10 mm มุมยิง 45 องศา



รูปที่ 19 แผ่นเกราะ SKD11 อยู่ด้านหน้ามีความหนา 8 mm และแผ่นเกราะ AL-7075 T6 อยู่ด้านหลังมีความหนา 8 mm มุมยิง 45 องศา

#### 4. สรุป

สรุปผลการการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์รูปแบบความเสียหายและความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุของแผ่นเกราะ SKD11 และเกราะ AL-7075 T6 ตามมาตรฐาน NIJ 3 ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากการจำลองนี้ได้เปรียบเทียบความสอดคล้องกับการทดลองจริง เพื่อยืนยันผลการจำลอง โดยการนำการเสนอข้อมูลของผลการศึกษาและสมมติฐานการวิจัย พบว่าสอดคล้องกันโดยพิจารณาความเสียหายที่เกิดกับแผ่นเกราะด้วยรอยร้าวของเกราะกันกระสุนที่ต่างกัน 1 mm (น้อยกว่าร้อยละ 10) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ ดังนั้นจึงได้ใช้โปรแกรม

ไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS Explicit Dynamic ในจำลองความเสียหายของแผ่นเกราะที่สามารถต้านทานการเจาะทะลุของมาตรฐาน NIJ 3 ได้ตัวแปรที่มีผลต่อการวิเคราะห์แผ่นเกราะกันกระสุนในการจำลองนี้จะมี 5 องค์ประกอบหลักคือ

1. ชนิดของวัสดุสำหรับสร้างแผ่นเกราะกันกระสุนและชนิดวัสดุที่นำมาทำกระสุน คือปัจจัยหลักของการป้องกันและการทำลายเกราะ
2. ความเร็วของกระสุนเป็นปัจจัยหลักที่ใช้ในการจำลอง ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน NIJ
3. มุมกระแทกของกระสุนที่มีแนวกระสุนกระทำเข้าที่เจาะแผ่นเกราะกันกระสุนเป็นปัจจัยหลักเมื่อมุมของกระสุนเอียงจะทำให้หน้าสัมผัสของกระสุนลดลง และยังช่วยให้กระสุนเปลี่ยนทิศทางการกระแทกอีกด้วย
4. ความหนาของแผ่นเกราะกันกระสุนเป็นปัจจัยหลักของความต้านทาน
5. ขนาดของเมชที่ใช้การในการวิเคราะห์เป็นปัจจัยร่วมบ่งบอกถึงความละเอียดจากความเสียหายเมื่อขนาดเมชเล็กจะส่งผลถึงความละเอียดและการใช้เวลาในการจำลองยาวนาน

วัสดุเกราะกันกระสุนที่ใช้จากการจำลองนี้มี 2 ชนิดคือ 1.SKD11 2. อะลูมิเนียม AL-7075 โดยการจำลองจะแบ่งออกเป็นจำลองแผ่นเกราะแบบซ้อนขนาดของแผ่นเกราะนั้นมีขนาด 6, 8, และ 10 มิลลิเมตร โดยมุมมองของการยิงเกราะกันกระสุนนั้นมีมุมที่ 0, 30 และ 45 องศา ซึ่งวัสดุของกระสุนที่กำหนดคือทั้งสแตนคาร์ไบต์ โดยการจำลองแบบแผ่นซ้อนนั้นได้ศึกษาพฤติกรรมของความเสียหายของแต่ละวัสดุว่าความเสียหายของผิวเกราะ ความแข็งแรงของวัสดุ ความเค้นสูงสุดที่ได้ซึ่งสามารถวิเคราะห์แสดงผลได้จากโปรแกรม ANSYS และจากความเสียหายของวัสดุโดยการอ้างอิงความเสียหายจากทฤษฎีความเสียหาย Johnson Cook โดยการกำหนดเงื่อนไขของความเสียหายในโปรแกรม ANSYS Explicit Dynamic ในความเร็วหลังจากการ

กระจายตัวของกระสุนนั้นมีมากเพียงใด ความสอดคล้องกันจึงแสดงให้เห็นว่าการจำลองด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นสามารถคาดการณ์ความเสียหายของแผ่นเกราะกันกระสุนได้ เพื่อช่วยในการลดงบประมาณในการวิจัยและระยะเวลาในการวิจัยแผ่นเกราะกันกระสุน

กรณีจากการวิเคราะห์มุมกระแทกของศาเริ่มที่ 30 องศาขึ้นไปจะเห็นได้ว่าเกราะกันกระสุนจะสามารถต้านทานการเจาะทะลุได้ อันเนื่องมาจากมุมมองของกระสุนเอียงจะทำให้เกิดการหักเหของกระสุน เป็นการเพิ่มระยะทางในการหยุดกระสุน แต่ในส่วนของความหนาที่แผ่นที่มีขนาดความหนาแผ่นซ้อนที่ 6 mm ที่มุม 30 องศาทะลุนั้น เนื่องจากความหนายังไม่เพียงพอสำหรับการต้านทานกระสุนขนาด 7.62 mm ความเร็ว  $847 \pm 9.1$  m/s ประโยชน์จากการทำวิจัยนี้จะเป็นข้อมูลและแนวทางเพื่อได้ต้นแบบการออกแบบเกราะกันกระสุนและยังสามารถลดต้นทุนการออกแบบทดสอบออกแบบเกราะกันกระสุนต่อไปอีกด้วย

## 5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณสำนักงานวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่สนับสนุนทุนการวิจัยประจำปี พ.ศ. 2560 ตามสัญญาทุนวิจัยเลขที่ วช(อ)(กบ)/47/2561 โดยบทความวิจัยนี้เป็นผลจากการทำวิจัยต่อยอดจากทุนที่ได้รับและขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่สนับสนุนเครื่องมือ สถานที่ และสิ่งอำนวยความสะดวกในการดำเนินการวิจัย

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] W.S. Lee and T.T. Su, "Mechanical properties and microstructural features of AISI 4340 high strength alloy steel under quenched and tempered conditions," *J. Mat. Process Technol*, vol. 87, pp. 198–206, 1999.

- [2] A.K. Srivastava, G. Jha, N. Gope and S.B. Singh, “Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of cold rolled C–Mn–Si Trip aided steel,” *Mat Charact*, vol. 57, pp. 127–135, 2006.
- [3] P.K. Ray, R.I. Ganguly and A.K. Panda, “Optimization of mechanical properties of an HSLA-100 steel through control of heat treatment variables,” *Mater Sci Eng A*, vol. 346, pp. 122–131, 2003.
- [4] S.K. Dhua, A. Ray and D.S. Sarma “Effect of tempering temperatures on the mechanical properties and microstructures of HSLA–100 type copper bearing steels,” *Mater Sci Eng A*, vol. 318, pp. 197–210, 2001.
- [5] P.K. Jena, K. Sivakumar and T. B. Bhat “Effect of heat treatment on mechanical and ballistic properties of ultra- high strength DMR- 7 0 0 steel,” *Met Mater Process*, vol. 19, no. 1–4, pp. 339–346, 2007.
- [6] P.K. Jena, K. Ramanjeneyulu, K. Sivakumar and T.B. Bhat, “Ballistic studies on layered structures,” *Mater Des*, vol. 30, no. 6, pp. 1922–1931, 2009.
- [7] T. Demir, M. Übeyli and R.O. Yıldırım, “Investigation on the ballistic impact behavior of various alloys against 7.62 mm armor piercing projectile,” *Mater Des*, vol. 29, pp. 2009–2016, 2008.
- [8] P.K. Jena, B. Mishra, M. Ramesh Babu, A. Babu, A. K. Singh, K. Sivakumar and T. BalakrishnaBhat, “Effect of heat treatment on mechanical and ballistic properties of a high strength armour steel,” *Int J Impact Eng*, vol. 37, pp. 242–249, 2010.
- [9] N.K. Gupta, M.A. Iqbal and G.S. Sekhon, “Experimental and numerical studies on the behavior of thin aluminum plates subjected to impact by blunt – and hemispherical- nosed projectiles,” *Int J Impact Eng*, vol. 32, pp. 1921–1944, 2006.
- [10] J.C.F. Millet, N.K. Bourne and M.R. Edwards, “The effect of heat treatment on the shock induced mechanical properties of aluminium alloy-7017,” *Scripta Mater*, vol. 51, pp. 967–971, 2004.
- [11] Y.B. Lee, D.H. Shin, K.T. Park and W.J. Nam, “Effect of annealing temperature on microstructures and mechanical properties of a 5083 Al alloy deformed at cryogenic temperature,” *Scripta Mater*, vol. 51, pp. 355–359, 2004.
- [12] L. D. Oosterkamp, A. Ivankovic and G. Venizelos, “High strain rate properties of selected aluminium alloys,” *Mater Sci Eng A*, vol. 278, pp. 225–235, 2000.
- [13] T. Borvik, A.H. Clausen, O.S. Hopperstad and M. Langseth, “Perforation of AA5083-H116 aluminium plates with conical-nose steel projectiles experimental study,” *Int J Impact Eng*, vol. 30, pp. 367–384, 2004.
- [14] K. Siva kumar, Singh Dinesh and T.B. Bhat, “Studies on aluminium armour plates impacted by deformable and non-deformable projectile,” *Mater Sci Forum*, vol. 465–466, pp. 79–84, 2004.

- [15] Ozs\_ahin Evren and Tolun Suleyman, "On the comparison of the ballistic response of coated aluminum plates," *Mater Des*, vol. 31, pp. 3188-3193, 2010.
- [16] E. Ozs\_ahin and S. Tolun, "Influence of layer sequencing on ballistic resistance of polyethylene supported AA 7075 T651 plates," *J Istanbul Technol Univ*, vol. 8, no. 2, pp. 72-80, 2009.
- [17] M. Balakrishnan, V. Balasubramanian and G. Madhusudhan Reddy, "Effect of PTA hardfaced interlayer thickness on ballistic performance of shielded metal arc welded armor steel welds," *J Mater Eng Perform*, vol. 22, no. 3, pp. 806, Mar. 2013.
- [18] M. Balakrishnan, V. Balasubramanian and G. Madhusudhan Reddy, "Effect of hardfaced interlayer thickness on ballistic performance of armour steel weldsm," *Mater Des*, vol. 44, pp. 59-68, 2013.
- [19] M. Balakrishnan, V. Balasubramanian and G. Madhusudhan Reddy, "Effect of joint design on ballistic performance of quenched and tempered steel welded joint," *Mater Des*, vol. 54, pp. 616-623, 2014.
- [20] S. Babu, V. Balasubramanian, G. Madhusudhan Reddy and TS. Balasubramanian, "Improving the ballistic immunity of armour steel weldments by plasma transferred arc (PTA) hardfacing," *Mater Des*, vol. 31, pp. 2664-2669, 2010.
- [21] M. Balakrishnan, V. Balasubramanian, G. Madhusuhan Reddy and K. Sivakumar, "Effect of buttering and hardfacing on ballistic performance of shielded metal arc welded armour steel joints," *Mater Des*, vol. 32, pp. 469-479, 2011.
- [22] J. Wang, Y. Yin and C. Luo, "Johnson-Holmquist-II (JH-2) Constitutive Model for Rock Materials: Parameter Determination and Application in Tunnel Smooth Blasting," *Appl. Sci.*, vol. 8, pp. 1675, 2018.
- [23] W. Hubert, Jr. Meyer and D. S. Kleponis, "An Analysis of Parameters for the Johnson-Cook Strength Model for 2-in-Thick Rolled Homogeneous Armor," Army Research Laboratory, Jun. 2001.
- [24] F. M. John, T. Jan Arild, S. Stian, B. Svien Morten, S.-E. Lasse and F. Haakon, "Development of material models for semi-brittle materials like tungsten carbide," *Norwegian Defence Research Establishment (EFI)*, pp. 1-51, Nov. 2010.
- [25] K. Navapon and C. Prakorb, "Parameter analysis of SKD11 and SUS304 bulletproof plate that resistance penetration of bullet 7.62 mm according to standard NIJ 4 by finite element method," *International Journal of Mechanical Engineer and Technology.*, vol. 10, pp. 207-221, Sep. 2019.
- [26] J. L. Li, L. L. Jing and M. Chen, "An FEM study on residual stresses induced by high-speed end-milling of hardened steel SKD11," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 209, no. 9, pp. 4515-4520, May 2009.
- [27] Steinberg D.J. LLNL, "Equation of State and Strength Properties of Selected Materials", Feb. 1991.