

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

## การวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการต้านทานของการเจาะทะลุของกระสุนบนผิวเกราะอะลูมิเนียมด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

อนุชา สายเจริญ ปฏิภาณ ถิ่นพระบาท และ ประกอบ ชาติภักต์\*

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร  
1381 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กทม. 10800

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

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการต้านทานของการเจาะทะลุของกระสุนบนผิวเกราะด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการวิจัยนี้จะเปรียบเทียบผลลัพธ์กับการทดสอบยิงเกราะกันกระสุนจริงและการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ การสร้างรูปแบบของเกราะกันกระสุนและกระสุนใช้โปรแกรม SolidWorks ในการสร้างและการจำลองของรูปแบบการยิงเกราะนั้นใช้โปรแกรม ANSYS Explicit Dynamic ซึ่งการทดสอบความเสียหายนั้นใช้มาตรฐาน National Institute of Justice ระดับ 3 ด้วยกระสุนวัสดุของกระสุนคือทั้งสเตนคาร์ไบด์ (WC) ขนาด 7.62 มิลลิเมตร ความเร็ว  $847 \pm 9.1$  เมตรต่อวินาที วัสดุเกราะกันกระสุนที่ใช้จากการจำลองนี้มี 2 ชนิดคือ 1. SKD11 2. อะลูมิเนียม เกรด AL7075 โดยการจำลองจะแบ่งออกเป็นกรจำลองแผ่นเกราะแบบซ้อนขนาดของแผ่นเกราะนั้นมีขนาด 6, 8, และ 10 มิลลิเมตร โดยมุมมองของการยิงเกราะกันกระสุนนั้นมีมุมที่ 0, 30, และ 45 องศา ผลจากการจำลองนี้ขนาดความหนาของเกราะและมุมการยิงเป็นปัจจัยของการต้านทานเจาะทะลุ ซึ่งเมื่อมุมมองของกระสุนเอียงจะทำให้เกิดการหักเหของกระสุนลดแรงเสียดทานจากหน้าสัมผัสจากการกระทบ

**คำสำคัญ :** เกราะกันกระสุน; พารามิเตอร์; ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร. +66 2836 3000 ตอ 4138, [อีเมล prakorb.c@rmutp.ac.th](mailto:prakor.b.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 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 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 level 3 standards with material of the ammunition is 7.62 mm tungsten carbide (WC) and speed  $847 \pm 9.1$ m/s. 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. when the angle of the projectile is tilted, it will cause the projectile to deflect, reducing the frictional contact from the impact.

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

---

\* Corresponding Author. Tel.: +66 2836 3000 ext. 4138, E-mail Address: prakorb.c@rmutp.ac.th

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยี รวมถึงวัสดุขั้นสูง (Advanced Materials) เพื่อใช้ในการประยุกต์งานทางด้านวิศวกรรมต่างๆ รวมถึงทางด้านวิศวกรรมเครื่องกลมีความก้าวหน้าไปอย่างมาก โดยการพัฒนาในระดับโครงสร้างวัสดุให้มีความเฉพาะเจาะจง เสถียร แม่นยำและมีประสิทธิภาพ เพื่อการตอบสนองกับการแก้ไขปัญหาทางด้านวิศวกรรม โดยมีเทคโนโลยีในระดับที่สามารถจัดเรียงอะตอมและก้าวล้ำไปในระดับนาโนเทคโนโลยี ซึ่งส่งผลให้เกิดสมบัติของวัสดุที่พิเศษเพื่อการใช้งานทางด้านโดยเฉพาะ รวมถึงการผลิตยังต้องมีการควบคุมคุณภาพในกระบวนการผลิตด้วย ใน การวิจัยขั้นแนวหน้า (Frontier Research) ทางด้านวัสดุ ยกตัวอย่างเช่น อนุภาคผงระดับนาโน เส้นใยและวัสดุคอมโพสิต ไบโอฟอสิเมอร์ นาโนคอมโพสิต และวัสดุนาโนของคาร์บอน เป็นการพัฒนาวัสดุอย่างต่อเนื่องและต่อยอดอย่างไม่สิ้นสุด

สืบเนื่องจากสถานการณ์ การก่อการร้าย การวางระเบิด การวางเพลิง และการลอบยิงทำร้ายเจ้าหน้าที่จาก 3 จังหวัดชายแดนภาคใต้ ผู้วิจัยจึงสนใจพัฒนาการออกแบบเกราะกันกระสุน ให้มีประสิทธิภาพ ด้านทานต่อการเจาะทะลุ ป้องกันการทำลาย โจมตีเกราะกันกระสุนเพื่อลดการสูญเสียต่อชีวิตและทรัพย์สิน แผ่นเกราะกันกระสุนเป็นอีกหนึ่งนวัตกรรมที่ได้รับการพัฒนาโดยใช้องค์ความรู้ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ โดยเฉพาะด้านการออกแบบลักษณะรูปร่างของแผ่นเกราะกันกระสุน วัสดุที่นำมาใช้ร่วมในการผลิตกระบวนการผลิต การประกอบและการกำหนดตัวแปรที่ใช้การวิเคราะห์ และให้ได้มาซึ่งแผ่นเกราะกันกระสุนที่มีประสิทธิภาพ แผ่นเกราะกันกระสุนมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับปัจจัย ส่วนใหญ่จะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. แผ่นเกราะกันกระสุนมาตรฐาน NIJ 3 ที่นำมาใช้กับบุคคล ซึ่งมีน้ำหนักที่บุคคลยังสามารถรับน้ำหนักและสามารถเคลื่อนที่ได้ขณะใช้งาน

2. แผ่นเกราะที่ใช้กับยานพาหนะมาตรฐาน NIJ 4 ซึ่งมีน้ำหนักจำนวนมากไม่เหมาะสมกับการใช้งานกับบุคคล แต่สามารถใช้งานกับยานพาหนะ แม้จะมีน้ำหนักมากแต่ก็สามารถป้องกันการโจมตีจากกระสุนได้สูงสุด

กรณีที่แบ่งตามชนิดเกราะกันกระสุนของวัสดุสามารถแบ่งออกเป็น 4 ชนิด

1. แผ่นเกราะเซรามิกส์อาจต้องประกอบเข้ากับแผ่นเกราะที่มีเส้นใยร่วม

2. แผ่นเกราะโลหะกันกระสุน ที่สร้างจากโลหะหลายชนิดวางซ้อนกัน

3. แผ่นเกราะเส้นใยคอมโพสิต ทั้งที่เป็นเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์

4. แผ่นเกราะโปร่งแสง หรือกระจกกันกระสุน ส่วนประกอบของเสื้อเกราะกันกระสุนบุคคลจะประกอบด้วย 3 ส่วน

1. เสื้อชั้นนอก (Outside Shell Carrier) ส่วนที่ใช้สำหรับรับแรงกระแทกอาจจะมีส่วนที่ใช้แผ่นเหล็กหรือเซรามิก เพื่อเพิ่มความสามารถการรับแรงกระแทก

2. ส่วนยึดรั้ง (Fastening System) ใช้ยึดเสื้อเกราะกับร่างกายทำให้เกิดความกระชับ

3. แผ่นรับแรงกระแทก (Ballistic Panel) ลักษณะเป็นแผ่นสีเหลี่ยมหรือโค้งตามรูปเสื้อทอจากใยสังเคราะห์ เมื่อถูกแรงกระแทกจะเกิดการยืดตัวช่วยดูดซับพลังงานเพื่อลดความเร็วของกระสุนที่ยิงเข้ามา

ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) เพื่อคาดการณ์การเกิดความเสียหายที่เกิดจากการยิงกระสุนภายใต้การยิงกระสุนตามมาตรฐาน NIJ 3 ด้วยของวัสดุกระสุนคือทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) ขนาด 7.62 มิลลิเมตร ความเร็วของกระสุนที่  $847 \pm 9.1$  เมตรต่อวินาที เพื่อให้ลดขั้นตอน เวลาจากการทดสอบจริง อีกทั้งยังลดงบประมาณจากการทดสอบจริง การวิเคราะห์ของงานวิจัยนี้ประกอบด้วย

1. ประเภทของวัสดุเป็นเกราะกันกระสุนที่ทำมาจากอะลูมิเนียมที่มีความหนาขนาดต่างๆ แต่เนื่องจาก

แผ่นอะลูมิเนียมมีค่าความเหนียวและค่าความแข็งที่ต่ำกว่าโลหะชนิดอื่น ๆ โดยการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน NIJ 3 ดังนั้นอาจจะต้องมีการเสริมด้วยวัสดุชนิดอื่น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเกราะกันกระสุน

### ตารางที่ 1 มาตรฐาน National Institute of Justice [1]

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

2. ลักษณะรูปร่างของเกราะเป็นแบบแผ่นและขนาดความกว้าง x ความยาว x ความหนา ที่สามารถทนทานแรงกระแทกจากกระสุนได้

3. การจัดเรียงชั้นแผ่นอะลูมิเนียมที่มีระยะห่างต่างๆ

4. รูปแบบขนาดและวิธีการสร้างเมชที่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์ทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเลือกใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์และจำลองผลลัพธ์ ทั้งนี้การพิสูจน์ความถูกต้องจะใช้รูปแบบการ (Pre-processing) และ (Solve-Processing) เพื่อต่อยอดผลการออกแบบและวิเคราะห์ของงานวิจัยที่ผ่านมา โดยคาดหวังผลที่จะได้รับคือ องค์กรความรู้ที่จะสามารถนำไปใช้ในการออกแบบและสร้างแผ่นเกราะกันกระสุนที่สามารถใช้งานได้จริง

มาตรฐานการทดสอบแผ่นเกราะกันกระสุนเป็นมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับเรื่องวิธีทดสอบ เกณฑ์การทดสอบ ความสามารถหรือประสิทธิภาพการป้องกันกระสุนของเสื้อเกราะที่กำหนดโดยสถาบันความเที่ยงธรรมแห่งชาติ National Institute of Justice ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งประเทศไทยและอีกหลายประเทศทั่วโลกใช้มาตรฐานสำหรับการทดสอบเสื้อเกราะป้องกันกระสุนด้วยเช่นกัน โดยมาตรฐาน NIJ แบ่งระดับความสามารถในการป้องกันกระสุนของเสื้อเกราะไว้ 6 ระดับ ดังนี้

## 2. ระเบียบวิธีวิจัย

กระบวนการดำเนินงานวิจัยที่ประกอบไปด้วยวิธีการดำเนินงานวิจัย การออกแบบแผ่นเกราะที่ใช้วัสดุแตกต่างกันในการออกแบบ การวิเคราะห์ทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมรวมถึงการสร้างแบบจำลองการยิงชุดเกราะ และการกำหนดค่าสมบัติของวัสดุตามสมการความเสียหาย การสร้างรูปแบบเมช การวิเคราะห์แผ่นเกราะ

### 2.1 ขั้นตอนการวิจัย

ในส่วนของขั้นตอนการวิจัยนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท

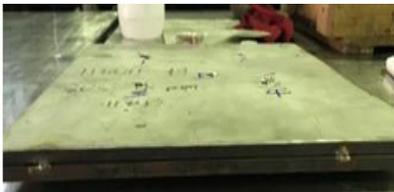
1. วิธีการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางกายภาพ

2. วิธีการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อนำผลลัพธ์จากการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบเพื่ออ้างอิงผลความเสียหาย ความแม่นยำ เที่ยงตรงของการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

**2.1.1 วิธีการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางกายภาพ**

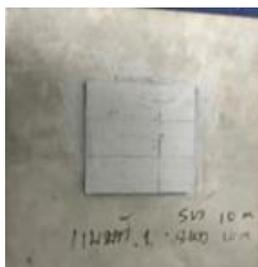
จำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นเพื่อเป็นการตรวจสอบความสามารถของโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์จึงได้สร้างแผ่นเกราะเพื่อใช้ในการทดสอบยิงจริง [5], [9], [13] เป็น 2 แบบ คือ

1. แผ่นเกราะซ้อนกัน 2 ชั้น แผ่นด้านหน้าความหนา 10 มิลลิเมตร และแผ่นด้านหลังความหนา 10 มิลลิเมตร ทำจากวัสดุสแตนเลส SUS304 ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผ่นด้านหน้า 10 มิลลิเมตร SUS304 แผ่นด้านหลัง 10 มิลลิเมตร SUS304 [1], [13]

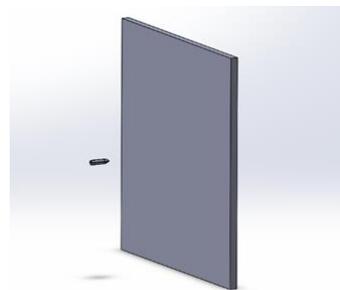
2. แผ่นเกราะซ้อนกัน 2 ชั้นโดยแผ่นเกราะด้านหน้าความหนา 10 มิลลิเมตร ขนาด 40 x 40 มิลลิเมตร จำนวน 9 แผ่นทำจากวัสดุ SKD11 นำมาติดลงบนแผ่นเกราะด้านหลังความหนา 10 มิลลิเมตร ทำจากสแตนเลส SUS304 เนื่องจากวัสดุ SKD11 มีราคาที่ย่อมเยาสูงจึงได้นำเป็นแผ่นเล็กมาติดตั้งเพื่อใช้ในการทดสอบยิงจริงด้วยมาตรฐาน NIJ 3



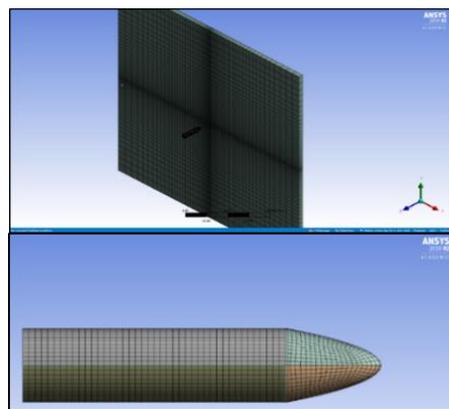
รูปที่ 2 แผ่นด้านหน้า 10 มิลลิเมตร SKD11 แผ่นด้านหลัง 10 มิลลิเมตร SUS304 [1], [13]

**2.1.2 วิธีการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์**

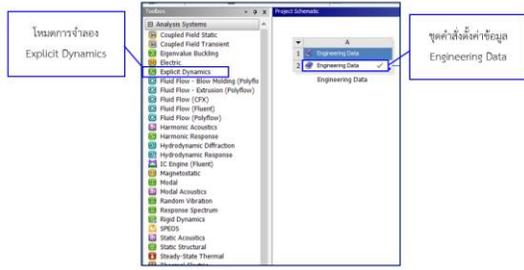
ในการจำลองเพื่อวิเคราะห์การกระแทกของลูกกระสุน ไปยังเกราะกันกระสุนด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น ต้องทำการสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม SolidWorks ในการสร้างแผ่นเกราะและลูกกระสุนให้ได้ตามขนาดที่ทำการทดสอบ แล้วกำหนดสมบัติของชิ้นส่วนต่างๆด้วยโปรแกรม ANSYS การตั้งค่ากำหนดคำสั่ง Explicit Dynamics ที่ทำการจำลองของวัสดุ ต้องการจำลอง [6] ทั้งกำหนด ความเร็ว ทิศทางของแรงที่กระแทกต่อเกราะกันกระสุนแล้วทำการวิเคราะห์ผลในแต่ละกรณี เพื่อนำผลลัพธ์มาทำการเปรียบเทียบความเสียหายระหว่างการทดสอบทางกายภาพจริงและการจำลองวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 3 การจำลองแบบแผ่นเกราะเดียวด้วยโปรแกรม SolidWorks



รูปที่ 4 ลักษณะของรูปแบบเมชที่แผ่นเกราะด้วยโปรแกรม ANSYS [4][10]



รูปที่ 5 โหมดการจำลอง Explicit Dynamics และ ชุดคำสั่ง Engineering Data [4]

Property	Value	Unit
Density (ρ)	7850	kg/m³
Modulus of elasticity (E)	208	GPa
Poisson ratio (ν)	0.3	
Bulk modulus	173	GPa
Shear modulus	80	GPa
Thermal conductivity	20.5	W/m.k (350 °C)
Thermal expansion	11	m/m.k
Specific heat	461	J/kg.°C

รูปที่ 6 กำหนดสมบัติวัสดุลงในโปรแกรม ANSYS [4]

ตารางที่ 2.1 ค่าสมบัติของวัสดุและค่าความเสียหายของโมเดล Johnson-Cook [1], [4]

ค่าสมบัติของวัสดุ SKD11	
Density ( ρ ,kg/m <sup>3</sup> )	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
ค่าความเสียหายของโมเดล Johnson-Cook	
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

## 2.2 ทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัย

### 2.2.1 โมเดลของ Johnson Holmquist [1], [2]

คำอธิบายแบบจำลอง Johnson Holmquist เป็นการจำลองส่วนประกอบที่เหมาะสมในการทำนายพฤติกรรมของวัสดุเปราะที่ต้องรับน้ำหนักมากคุณสมบัติหลักของสมการนี้ได้แก่ ความแข็งแรงขึ้นอยู่กับแรงกด ความเสียหายและการแตกหักความแข็งแรงที่สำคัญ หลังจากการแตกหักและผลกระทบจากอัตราความเครียด โดยภาพรวมทั่วไป Johnson Holmquist ในเงื่อนไขของความแข็งแรง แนวคิดเบื้องหลังแบบจำลองการกำหนดคือ วัสดุเริ่มอ่อนตัวลงเมื่อเกิดความเสียหายสะสม ซึ่งจะช่วยให้ค่อยๆอ่อนลงวัสดุภายใต้ความเครียดพลาสติกที่เพิ่มขึ้น ความแข็งแรงโดยทั่วไปเป็นฟังก์ชันที่แตกต่างกันอย่างราบรื่นของความแข็งแรงที่สมบูรณ์การแตกหักความแข็งแรงอัตราความเครียดและความเสียหาย

$$\sigma^* = \sigma_i^* - D(\sigma_i^* - \sigma_f^*) \tag{1}$$

เมื่อ  $\sigma_i^*$  และ  $\sigma_f^*$  เป็นค่าเทียบเท่าที่ไม่เสียหายและแตกหักตามปกติความเครียดตามลำดับ และ D คือความเสียหาย (0 < D < 1) จุดแข็งที่ไม่บอบสลายและแตกหักเป็นปกติตามลำดับให้โดย

$$\sigma^* = A(P^* + T^*)^N (1 + C \ln \dot{\epsilon}) \tag{2}$$

$$\sigma^* = B(P^*)^M (1 + C \ln \dot{\epsilon}) \tag{3}$$

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

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon_p}{\epsilon_f^p} \quad (4)$$

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

$$\epsilon_f^p = D_1(P^* + T^*)^{D_2} \quad (5)$$

$D_1$  และ  $D_2$  เป็นค่าคงที่ของวัสดุ ความเค้นไฮโดรสแตติกคือกำหนดในรูปของความดันที่กำหนดโดยสมการต่อไปนี้ของ (EOS)

$$P = K_1\mu + K_2\mu^2 + K_3\mu^3 \quad (6)$$

$K_1$  คือโมดูลัสจำนวนมาก  $K_2$  และ  $K_3$  เป็นค่าคงที่ของวัสดุ  $\mu$  คือปัจจัยการบีบอัดหลังจากความเสียหายเริ่มสะสม ( $D > 0$ ) ความดันที่เพิ่มขึ้นเพิ่มเติม  $\Delta P$  จะถูกเพิ่มเข้าไปดังนี้

$$P = K_1\mu + K_2\mu^2 + K_3\mu^3 + \Delta P \quad (7)$$

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

### 2.2.2 โมเดลของ Johnson-Cook [1], [3], [8]

เป็นแบบจำลองเชิงปรากฏการณ์ที่มักใช้ในการทำนายการตอบสนองของโลหะอาจได้รับผลกระทบและการเจาะเนื่องจากสามารถสร้างความเครียดได้การชูบแข็งผลกระทบจากอัตราความเครียดและการอ่อนตัวจากความร้อน คุณสมบัติเหล่านี้ควบคู่ไปในลักษณะทวีคูณโดยใช้สมการต่อไปนี้

$$\sigma_y = [C_1 + C_2(\epsilon_{eff}^p)^M] \left[ 1 + C_3 \ln \left( \frac{\dot{\epsilon}_{eff}^p}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_R}{T_M - T_R} \right)^M \right] \quad (8)$$

$T_M$  คืออุณหภูมิหลอมละลาย  $T_R$  คืออุณหภูมิอ้างอิงเมื่อกำหนด  $C_1, C_2, C_3, M$  และ  $N$  ;  $\dot{\epsilon}_0$  คืออัตราความเครียดอ้างอิง  $C_1, C_2, C_3, N$  และ  $M$  คือค่าคงที่ของวัสดุ การแตกหักในแบบจำลอง Johnson Cook ขึ้นอยู่กับผลของความเครียดพลาสติกที่เท่ากัน ความล้มเหลวคือสันนิษฐานว่าจะเกิดขึ้นเมื่อความเสียหายเกิน 1 ความเสียหายสะสมกำหนดโดย

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon_{eff}^p}{\epsilon^F} \quad (9)$$

## 3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

### 3.1 ผลการทดลองแบบจำลองทางกายภาพเปรียบเทียบกับผลการแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ [1]

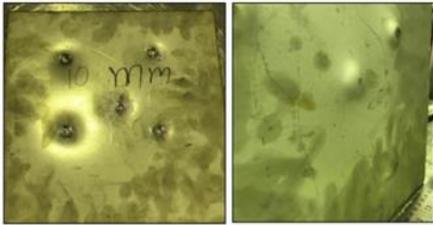
เพื่อการออกแบบที่เที่ยงตรงและแม่นยำ คณะผู้วิจัยจึงนำไปทดสอบการยิงกระสุนจริง[12]ที่โรงงานวัตถุระเบิดทหาร กรมการอุตสาหกรรมป้องกันประเทศและพลังงานจังหวัดนครสวรรค์ (Military Explosives Factory, Defence Industry and Energy Centre) ยิงตามมาตรฐาน NIJ 3 ด้วยกระสุนขนาด 7.62x51 มิลลิเมตร NATO FMJ 148 Gr. ที่มุม 0 องศา ความเร็ว 847±9.1 เมตรต่อวินาที



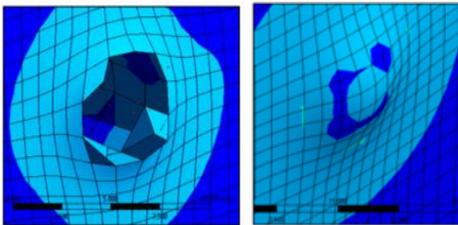
รูปที่ 7 การทดสอบยิงจริงตามมาตรฐาน NIJ3 [1], [11]

3.1.1 ผลการทดลองแบบจำลองทางกายภาพ

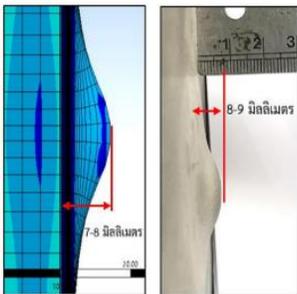
1. แผ่นด้านหน้า 10 มิลลิเมตร แผ่นด้านหลัง 10 มิลลิเมตร วัสดุ SUS304 ซึ่งผลที่ได้แผ่นเกราะแบบที่ 1 นั้นกระสุนได้เจาะทะลุแผ่นเกราะด้านหน้าอย่างสมบูรณ์ แต่แผ่นเกราะด้านหลังไม่ทะลุแต่เกิดผิวเป็นรอยนูนที่บริเวณด้านหลังแผ่นเกราะ



รูปที่ 8 ความเสียหายที่แผ่นเกราะสแตนเลส SUS304 ด้านหน้าและด้านหลัง [1]



รูปที่ 9 ความเสียหายที่แผ่นเกราะสแตนเลส SUS304 ด้านหน้าและด้านหลังด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [1], [17]

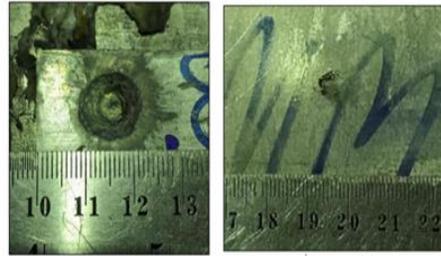


รูปที่ 10 รอยนูนที่แผ่นเกราะด้านหลังแบบจำลอง [1]

ซึ่งได้วัดรอยนูนของผิวที่แผ่นเกราะด้านหลังแล้วนำมาทำการเปรียบเทียบกับผลการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งค่าที่วัดจากผลการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ผิวด้านหลังแผ่นเกราะถึงผิวของรอยนูนอยู่ที่ 7-8

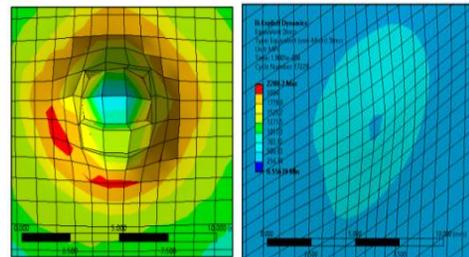
มิลลิเมตร วัดรอยนูนจากการทดสอบจริงซึ่งได้ 8-9 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่าผลจากการจำลองกับผลการทดสอบจริงมีความสอดคล้องกัน

2. แผ่นเกราะแผ่นด้านหน้าทำจากวัสดุ SKD11 ขนาด 10 มิลลิเมตร และแผ่นด้านหลังทำจากสแตนเลส SUS304 ขนาด 10 มิลลิเมตร ผลที่ได้คือแผ่นเกราะด้านหน้าและด้านหลังไม่เจาะทะลุ แต่แผ่นเกราะ



ด้านหน้าจะมีรอย

รูปที่ 11 ความเสียหายที่แผ่นเกราะ SKD11 ด้านหน้า และ SUS304 ด้านหลัง [1], [17]



รูปที่ 12 ความเสียหายที่แผ่นเกราะ SKD11 ด้านหน้า และ SUS304 ด้านหลังด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [1]

จากผลการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์แผ่นเกราะแบบที่ 2 พบว่าแผ่นเกราะด้านหน้าเป็นรอยเจาะและแผ่นเกราะด้านหลังเป็นรอยนูนซึ่งผลจากการจำลองรอยเจาะ[19] ของกระสุนที่แผ่นเกราะด้านหน้าวัดเส้นผ่าศูนย์กลางได้ 8-9 มิลลิเมตร ในส่วนการทดสอบจริงวัดเส้นผ่าศูนย์กลางได้ 10-11 มิลลิเมตร เนื่องจากผลการจำลองได้ใช้แกนของกระสุน ซึ่งมีขนาดของกระสุนที่เล็กกว่าจากกระสุนในการทดสอบจริง และจากการทดสอบจริงกระสุนจะมีปอกหุ้มแกนของกระสุน

ความหนาอยู่ที่ 0.5-1 มิลลิเมตร ดังนั้นผลจากการจำลองกับการทดสอบจริง มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย และมีความสอดคล้อง

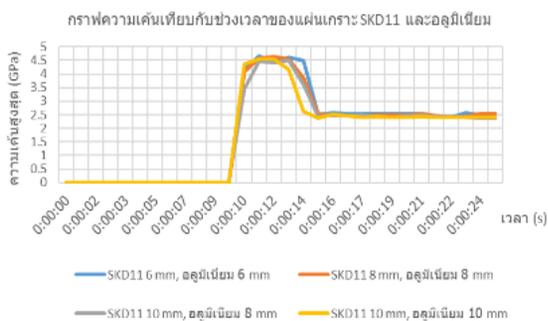
### 3.2 ผลการทดลองแบบผลการแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

แผ่นเกราะกันกระสุนด้านหน้าทำจาก SKD11 เป็นแบบแผ่นซ้อนและมีแผ่นอะลูมิเนียม [14]-[16] เป็นแผ่นเกราะด้านหลังที่มีขนาดความหนาของวัสดุที่ 6, 8 และ 10 มิลลิเมตร ที่การจำลองจะมีมุมกระแทกของกระสุนที่มุม 0, 30, และ 45 องศา

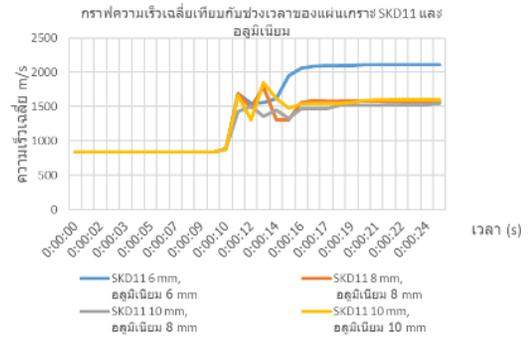
ตารางที่ 2 ผลการจำลองแผ่นเกราะแบบซ้อนของวัสดุ SKD11 กับวัสดุอะลูมิเนียมและมุมมองการยิงของกระสุนบนแผ่นเกราะ [7], [18]

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

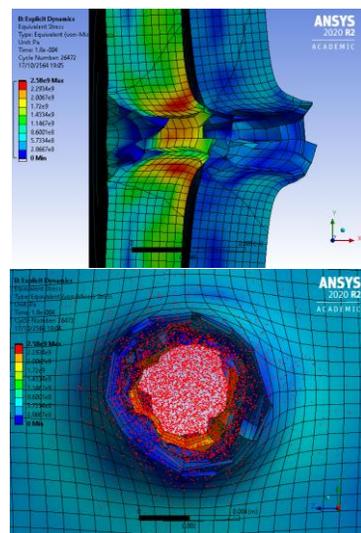
#### 3.2.1 การจำลองมุมกระแทกที่ 0 องศา โดยมีขนาดของความหนาของแผ่นซ้อนที่ 6, 8 และ 10 มิลลิเมตร



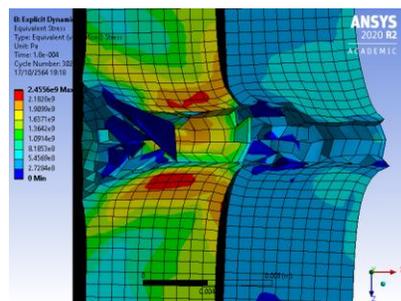
รูปที่ 13 กราฟแสดงความเค้นเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 และอะลูมิเนียมที่มุม 0 องศา



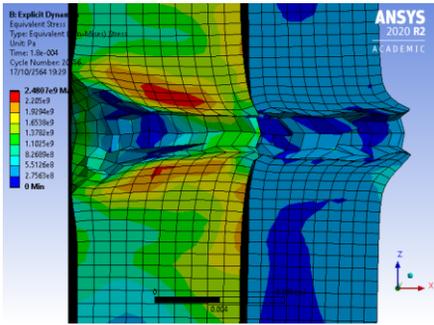
รูปที่ 14 กราฟแสดงความเร็วเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 และอะลูมิเนียมที่มุม 0 องศา



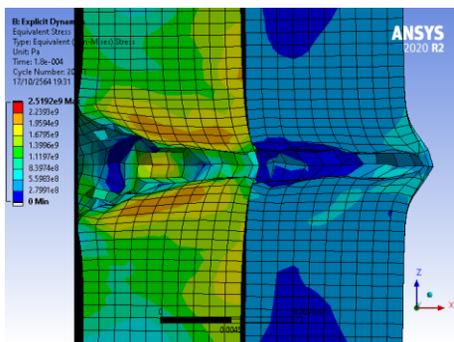
รูปที่ 15 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 6 มิลลิเมตร ด้านหน้าและแผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 6 มิลลิเมตร ด้านหลัง มุม 0 องศา



รูปที่ 16 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 8 มิลลิเมตร ด้านหน้าและแผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 8 มิลลิเมตร ด้านหลัง มุม 0 องศา



รูปที่ 17 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 10 มิลลิเมตร ด้านหน้าและแผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 8 มิลลิเมตร ด้านหลัง มุม 0 องศา



รูปที่ 18 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 10 มิลลิเมตร ด้านหน้าและแผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 10 มิลลิเมตร ด้านหลัง มุม 0 องศา

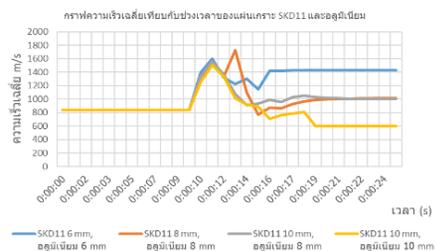
ผลการจำลองของแผ่นเกราะ SKD11 ซ้อนด้วยแผ่นเกราะอะลูมิเนียม ที่มุม 0 องศา โดยใช้ความเร็วในการจำลองของลูกกระสุนด้วยความเร็ว 847 เมตรต่อวินาที เห็นได้ว่าแผ่นเกราะซ้อนทุกขนาดความหนานั้นไม่สามารถต้านทานจากกระสุนต่อการเจาะทะลุได้ จากการพิจารณาของกราฟแสดงความเค้นเทียบกับช่วงเวลา นั้นพบได้ว่าที่ความหนาของแผ่นเกราะทุกขนาดนั้นมีความเค้นที่ไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งในส่วนของกราฟความเร็วเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลานั้นจะเห็นว่าที่ความหนาของแผ่นเกราะซ้อน SKD11 ขนาด 6 มิลลิเมตร อะลูมิเนียม 6 มิลลิเมตร นั้นความเร็วของกระสุนเจาะอย่างรวดเร็วในช่วงทะลุผ่านเกราะและจากรอยการ

ทำลายของกระสุนบริเวณการเจาะทะลุนั้นจะเห็นได้ว่าความหนาของเกราะ SKD11 ขนาด 6 มิลลิเมตร อะลูมิเนียม 6 มิลลิเมตร นั้นมีขนาดใหญ่กว่าเกราะอื่นๆ ที่มีขนาดของความหนามากกว่าอย่างเห็นได้ชัด จากผลการจำลองนี้นั้นสรุปได้ว่าทุกความหนาของแผ่นซ้อนที่ 0 องศาไม่สามารถต้านทานต่อการเจาะทะลุของกระสุนได้

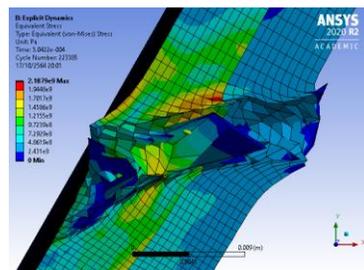
### 3.2.2 การจำลองมุมกระแทกที่ 30 องศา โดยมีขนาดของความหนาของแผ่นซ้อนที่ 6, 8 และ 10 มิลลิเมตร



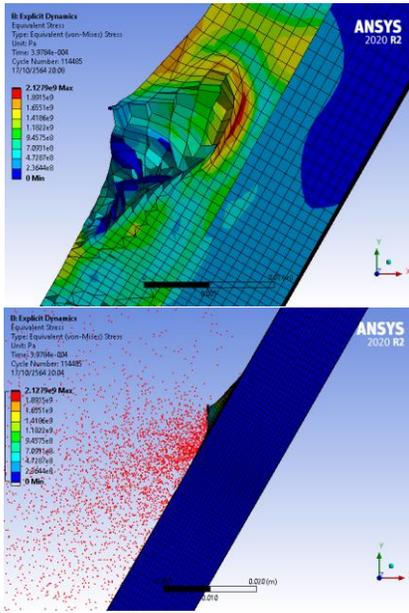
รูปที่ 19 กราฟแสดงความเค้นเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 และอะลูมิเนียมที่มุม 30 องศา



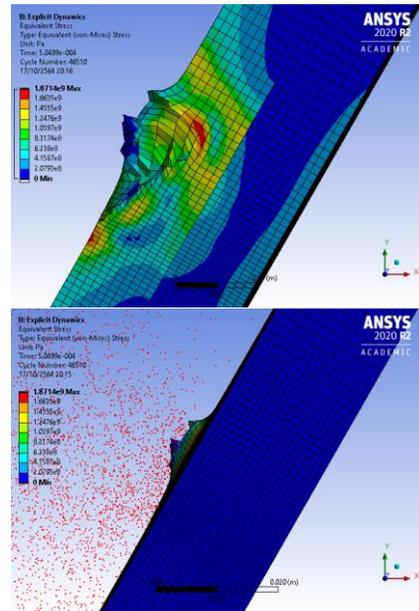
รูปที่ 20 กราฟแสดงความเร็วเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 และอะลูมิเนียมที่มุม 30 องศา



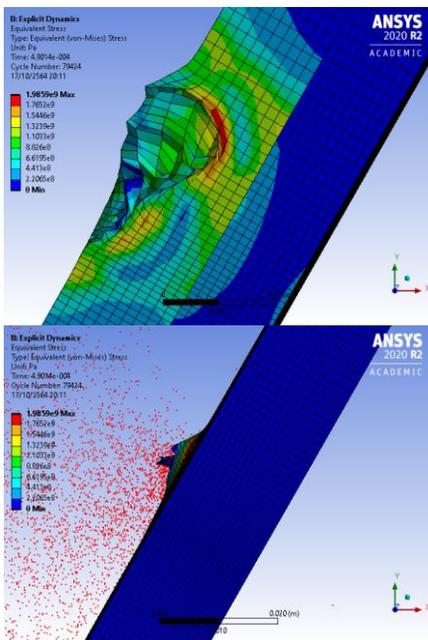
รูปที่ 21 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 6 มิลลิเมตร ด้านหน้าและแผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 6 มิลลิเมตร ด้านหลัง มุม 30 องศา



รูปที่ 22 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 8 มิลลิเมตร ด้านหน้าและแผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 8 มิลลิเมตร ด้านหลัง มุม 30 องศา



รูปที่ 24 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 10 มิลลิเมตร ด้านหน้าและแผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 10 มิลลิเมตร ด้านหลัง มุม 30 องศา

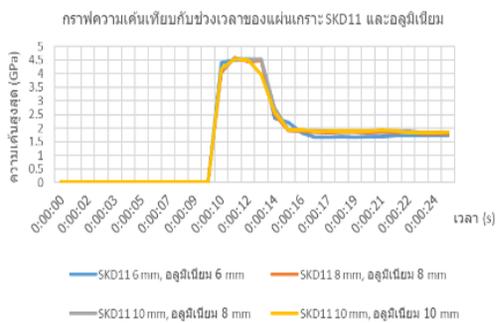


รูปที่ 23 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 10 มิลลิเมตร ด้านหน้าและแผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 8 มิลลิเมตร ด้านหลัง มุม 30 องศา

ผลการจำลองของแผ่นเกราะ SKD11 ซ้อนด้วยแผ่นเกราะอะลูมิเนียม ที่มุม 30 องศา โดยใช้ความเร็วในการจำลองของลูกกระสุนด้วยความเร็ว 847 เมตรต่อวินาที เห็นได้ว่าแผ่นเกราะซ้อน SKD11 ความหนา 6 มิลลิเมตร อะลูมิเนียมความหนา 6 มิลลิเมตรไม่สามารถต้านทานจากกระสุนต่อการเจาะทะลุได้ แต่ที่ความหนาของแผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 8 มิลลิเมตร อะลูมิเนียมความหนา 8 มิลลิเมตร, SKD11 ความหนา 10 มิลลิเมตร อะลูมิเนียมความหนา 8 มิลลิเมตร และ SKD11 ความหนา 10 มิลลิเมตร อะลูมิเนียมความหนา 10 มิลลิเมตร สามารถต้านทานจากกระสุนต่อการเจาะทะลุได้ จากการพิจารณาของกราฟแสดงความเค้นเทียบกับช่วงเวลานั้นพบได้เวลาที่ความหนาของแผ่นเกราะทุกขนาดนั้นมีความเค้นที่ไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งในส่วนของกราฟความเร็วเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลานั้นจะเห็นได้ว่าที่ความหนาของแผ่นเกราะซ้อน SKD11 ความหนา 10 มิลลิเมตร อะลูมิเนียมความหนา 10 มิลลิเมตร นั้นมี

ความเร็วหลังจากการเจาะทะลุต่ำสุด เนื่องจากการต้านทานของเกราะกันกระสุนที่มีความหนาที่สูงทำให้สามารถหยุดการกระจายของเศษกระสุนและจากรอยการทำลายของกระสุนบริเวณการเจาะทะลุนั้นจะเห็นว่าความหนาของเกราะชั้น SKD11 ความหนา 6 มิลลิเมตร อะลูมิเนียมความหนา 6 มิลลิเมตร มีรอยขนาดใหญ่หลังจากการเจาะทะลุแต่ในส่วนที่แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 8 มิลลิเมตร อะลูมิเนียมความหนา 8 มิลลิเมตร, SKD11 ความหนา 10 มิลลิเมตร อะลูมิเนียมความหนา 8 มิลลิเมตร และ SKD11 ความหนา 10 มิลลิเมตร อะลูมิเนียมความหนา 10 มิลลิเมตร เกราะชั้นนอกมีการเจาะทะลุแต่ไม่ถึงแผ่นชั้นใน จากผลการจำลองนั้นสรุปได้ว่าที่ 30 องศาของการจำลองยิงของกระสุนในไฟไนต์เอลิเมนต์ความหนาของแผ่นเกราะกันกระสุนเป็นผลต่อการต้านทานของการเจาะทะลุอย่างเห็นได้ชัดโดยการต้านทานของเกราะกันกระสุนนั้นเริ่มที่ความหนาของเกราะ SKD11 ชั้นนอกที่ 8 มิลลิเมตร แต่ในส่วนแผ่นเกราะ SKD11 ชั้นนอกที่ 6 มิลลิเมตร นั้นกระสุนสามารถเจาะทะลุได้อย่างสมบูรณ์

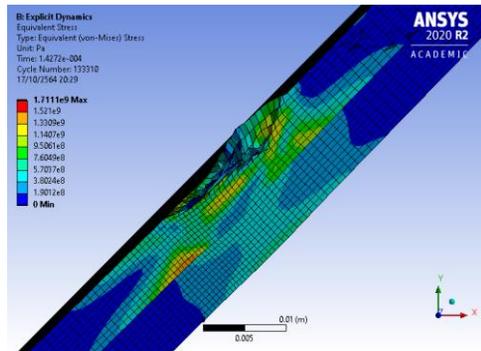
3.2.3 การจำลองมุมกระแทกที่ 45 องศา โดยมีขนาดของความหนาของแผ่นชั้นที่ 6, 8 และ 10 มิลลิเมตร



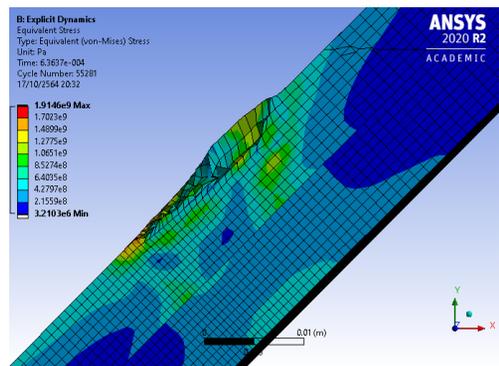
รูปที่ 25 กราฟแสดงความเร็วเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 และอลูมิเนียมที่มุม 45 องศา



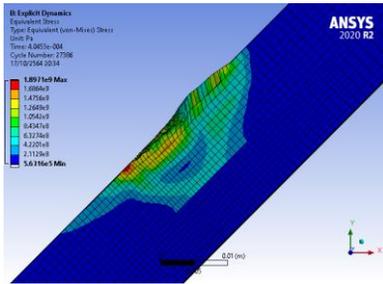
รูปที่ 26 กราฟแสดงความเร็วเฉลี่ยเทียบกับช่วงเวลาของแผ่น SKD11 และอลูมิเนียมที่มุม 45 องศา



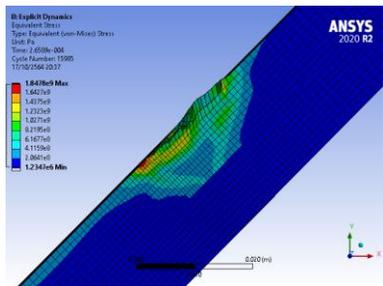
รูปที่ 27 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 6 มิลลิเมตร ด้านหน้าและแผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 6 มิลลิเมตร ด้านหลัง มุม 45 องศา



รูปที่ 28 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 8 มิลลิเมตร ด้านหน้าและแผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 8 มิลลิเมตร ด้านหลัง มุม 45 องศา



รูปที่ 29 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 10 มิลลิเมตร ด้านหน้าและแผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 8 มิลลิเมตร ด้านหลัง มุม 45 องศา



รูปที่ 30 แผ่นเกราะ SKD11 ความหนา 10 มิลลิเมตร ด้านหน้าและแผ่นเกราะอะลูมิเนียมความหนา 10 มิลลิเมตร ด้านหลัง มุม 45 องศา

#### 4. สรุป

สรุปผลการการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์รูปแบบความเสียหายและความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุของแผ่นเกราะอะลูมิเนียมเกรด AL7075 และเกราะ SKD11 ตามมาตรฐาน NIJ 3 ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นส่วนสำคัญทั้งความน่าเชื่อถือ ความถูกต้อง แม่นยำ จากการจำลองนี้โดยการเปรียบเทียบความสอดคล้องจากการทดลองจริงเพื่อยืนยันแนวคิดและทฤษฎีที่ใช้กับการจำลองนี้ โดยการนำผลการเสนอข้อมูลของผลการศึกษาและสมมติฐานการวิจัย จากการทำวิจัยนี้ผลการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์และผลการทดสอบจริงพบที่มีความเสียหายที่เกิดกับแผ่นเกราะนั้นมีความคลาดเคลื่อนของความเสียหายจากรอยบุบของเกราะกันกระสุนที่ 1 มิลลิเมตร ซึ่งความ

สอดคล้องกันซึ่งโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองความเสียหายของแผ่นเกราะกันกระสุนนั้นสามารถเชื่อถือได้ ดังนั้นจึงได้ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองความเสียหายของแผ่นเกราะที่สามารถต้านทานการเจาะทะลุของมาตรฐาน NIJ 3 ได้ตัวแปรที่มีผลต่อการวิเคราะห์แผ่นเกราะกันกระสุนในการจำลองนั้นนี้มี 5 องค์ประกอบหลักคือ

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

วัสดุเกราะกันกระสุนที่ใช้จากการจำลองนี้มี 2 ชนิดคือ 1.SKD11 2. อะลูมิเนียม เกรด AL7075 โดยการจำลองจะแบ่งออกเป็นจำลองแผ่นเกราะแบบซ้อน ขนาดของแผ่นเกราะนั้นมีขนาด 6, 8, และ 10 มิลลิเมตร โดยมุมมองของการยิงเกราะกันกระสุนนั้นมีมุมที่ 0, 30 และ 45 องศา ซึ่งวัสดุของกระสุนที่กำหนดคือทั้งสแตนคาร์ไบด์ โดยการจำลองแบบแผ่นซ้อนนั้น จะศึกษาพฤติกรรมของความเสียหายของแต่ละวัสดุว่าความเสียหายของผิวเกราะ ความแข็งแรงของวัสดุ ความเค้นสูงสุดที่ได้ซึ่งสามารถวิเคราะห์แสดงผลได้จากโปรแกรม ANSYS และจากความเสียหายของวัสดุโดยการอ้างอิงความเสียหายจากทฤษฎีความเสียหาย

Johnson Cook โดยการกำหนดเงื่อนไขของความเสียหายในโปรแกรม ANSYS ความเร็วหลังจากการกระจายตัวของกระสุนนั้นมีมากเพียงใด ความสอดคล้องกันจึงแสดงให้เห็นว่าการจำลองด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นสามารถคาดการณ์ความเสียหายของแผ่นเกราะกันกระสุนได้ เพื่อช่วยในการลดงบประมาณในการวิจัยและระยะเวลาในการวิจัยแผ่นเกราะกันกระสุน

ผลลัพธ์จากการจำลองทั้งหมด 12 กรณีมีทะลุทั้งหมด 5 กรณีและสามารถต้านทานการเจาะทะลุได้ 7 กรณีจากการวิเคราะห์มุมกระแทกของเสาเริ่มที่ 30 องศาขึ้นไปจะเห็นได้ว่าเกราะกันกระสุนจะสามารถต้านทานการเจาะทะลุได้ อันเนื่องจากมุมองศาของกระสุนเอียงจะทำให้เกิดการหักเหของกระสุนลดแรงเสียดทานจากหน้าสัมผัสจากการกระแทก แต่ในส่วนของความหนาที่แผ่นที่มีขนาดความหนาแผ่นซ้อนที่ 6 มิลลิเมตร ที่มุม 30 องศาทะลุ นั่น เนื่องจากความหนายังไม่เพียงพอสำหรับการต้านทานของความเร็วของกระสุนขนาด 7.62 มิลลิเมตร ความเร็ว 847 + 9.1 เมตรต่อวินาที ประโยชน์จากการทำวิจัยนี้เพื่อได้ต้นแบบการออกแบบเกราะกันกระสุนแล้วยังสามารถลดต้นทุนการออกแบบทดสอบเกราะกันกระสุน พร้อมยังสามารถพัฒนาต่อยอดการออกแบบเกราะกันกระสุนต่อไปอีกด้วย

## 5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่สนับสนุนทุนการวิจัยประจำปี พ.ศ. 2560 ตามสัญญาทุนวิจัยเลขที่ วช(อ)(กบง)/47/2561 และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่สนับสนุนเครื่องมือ สถานที่ และสิ่งอำนวยความสะดวกในการดำเนินการวิจัย

## 6. เอกสารอ้างอิง

[1] 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.

[2] 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.

[3] C. Chaiwat, and C. Prakorb, "Analysis of stress distribution for powder compression molding by finite element method," *Applied Mechanics and Materials.*, vol. 891, pp. 269-274, Jul. 2018.

[4] ANSYS Inc., "Lecture 2 : Introduction to Explicit Dynamic ." Document from CAD-IT Consultants (Asia), Apr. 2021.

[5] 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.

[6] V. Vijeesh, S. Hegdeb, and N.K. Guptab, "Deformation and ballistic performance of conical aluminum projectiles impacting thin aluminum targets: Influence of apex angle," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 110, pp. 39-46, May 2017.

[7] 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.
- [8] M. J. Pawar et al., “Comparison of ballistic performances of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and AlN ceramics,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 98, pp. 42–51, Dec. 2016.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] K. Namik, 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.