

## การจำลองเชิงตัวเลขเพื่อการออกแบบขอบแผ่นเกราะเซรามิก/โลหะ Numerical Simulation on Edge Design of Ceramic/Metallic Armor Plate

อรพรรณ เจริญวงศ์\* และ ชัยณรงค์ ศรีกุลวงศ์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800  
\*E-mail:ch.orapan@gmail.com, เบอร์โทรศัพท์: 084 3394 008

### บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากลไกการเจาะทะลุของกระสุนปืนกับเกราะเซรามิก-โลหะโดยใช้เทคนิคจำลองความเสียหายแบบ Smooth particle hydrodynamics (SPH) ของการปะทะของกระสุนกับแผ่นเกราะที่ความเร็วสูงโดยใช้ซอฟต์แวร์ ANSYS-AUTODYN ทั้งนี้เพื่อศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อการออกแบบขอบของแผ่นเกราะ เมื่อถูกกระสุนปะทะด้วยแรงอัด โดยที่การเลือกวัสดุในการทำแผ่นเกราะมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อกลไกการทำลายกระสุน ซึ่งแผ่นเกราะประกอบด้วยเกราะแผ่นหน้าใช้เซรามิก เนื่องจากเซรามิกมีความแข็งแรงต้านทานแรงกดสูง และมีคุณสมบัติในการทำลายหัวกระสุน เกราะแผ่นหลังใช้แผ่นโลหะ ทำหน้าที่ในการดูดซับพลังงานจลน์ของกระสุน

การจำลองการออกแบบขอบแผ่นเกราะขนาด 100 ตารางเซนติเมตร จะทำการจำลองการปะทะบริเวณรอยต่อและใกล้ขอบของแผ่นเกราะ พบว่าการหุ้มขอบแบบปิดขอบเซรามิก สามารถช่วยป้องกันสะเก็ดที่ปรีออกทางด้านข้างและมีส่วนในการยึดรั้งแผ่นเกราะ ด้านทานการปะทะของกระสุนทำให้ระยะยุบตัวของแผ่นเกราะยุบตัวลดลง และผลการจำลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) ต่อรอยยุบตัวของแผ่นเกราะด้านหลัง สามารถสรุปได้ว่ารูปแบบของการจับยึดและการออกแบบขอบมีผลต่อขนาดของรอยยุบตัว ในกรณีแผ่นเกราะขนาดเล็ก

**คำหลัก:** แผ่นเกราะ, การวิเคราะห์แบบ SPH, เกราะเซรามิก/โลหะ

### Abstract

In the paper, the study of the impact and penetration mechanism of projectiles into the ceramic tile/metallic plate is presented. The simulation of failure mechanism was conducted with the smooth particle hydrodynamic (SPH) scheme. The finite element analysis code ANSYS-AUTODYN is used for study the influence of edge design on the failure of armor. It was found that the armor material selection and plate layer configuration played an important role on the ballistic defeat mechanism. Ceramic plate was placed in strike-face position due to high compressive strength and fracture toughness properties having a capability on ballistic deterioration. The metallic plate was placed as a second layer to prevent penetration of the projectile.

The area of the baseline specimen is  $100 \text{ cm}^2$ . The simulation feature was focused on the butt joint of ceramic tiles and edge enforcement of the armor plate. The edges of ceramic plates were protected by the metallic sheet in order to maintain the ceramic debris broken from the armor. The edge protection can improve ballistic performance, as well as lower the plate indentation. It was revealed that the joint configuration played a role on plate indentation. It can be concluded that edge encasement has a role on the indentation for small size armor plate.

**Keywords:** Armor plate, Smooth particle hydrodynamic scheme, Ceramic/metallic armor

## 1. บทนำ

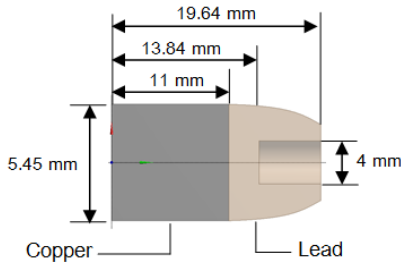
เกราะกันกระสุนได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการป้องกันของเสื้อเกราะ วัสดุที่ใช้ทำแผ่นเกราะมีตั้งแต่ ผ้า วัสดุคอมโพสิต โพลีเมอร์ เซรามิก พลาสติก เคพลาร์ พิล์ม โลหะ แต่เนื่องด้วยขีดจำกัดทางด้านอายุการใช้งาน ราคา กรรมวิธีการผลิต น้ำหนักของวัสดุแต่ละชนิด เป็นสาเหตุให้ผู้ผลิตและผู้ออกแบบต้องคำนึงถึงการผลิตเสื้อเกราะ ทำให้วัสดุเซรามิกและโลหะ เป็นหนึ่งในวัสดุพื้นฐานที่ถูกนำมาใช้ออกแบบแผ่นเกราะเนื่องจากเซรามิกมีความแข็งแรงต้านทานแรงกดสูง และมีคุณสมบัติในการทำลายหัวกระสุน และแผ่นโลหะ ทำหน้าที่ในการดูดซับพลังงานจลน์ของกระสุนดังเช่น Shokrieh และคณะ [1] ได้อธิบายถึงแบบจำลองรูปแบบการเสียหายของเกราะเซรามิก เซรามิกจะเกิดรูปแบบความเสียหายแบบทรงกรวย (Conoid fracture) ช่วยกระจายแรงอัดไปยังแผ่นเกราะรองหลัง

ดังนั้นเพื่อทำการศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น จึงมีการนำเครื่องมือทางคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการจำลองและออกแบบเสื้อเกราะ อีกทั้งยังช่วยในการศึกษากลไกการปะทะกันระหว่างกระสุนปืนและแผ่นเกราะ ซึ่งการวิเคราะห์ปัญหาความเสียหายการปะทะกันเป็นแบบพลศาสตร์ (Dynamic failure) จึงต้องมีซอฟต์แวร์ที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปัญหา Sharma และคณะ [2] ได้กล่าวถึงการใช้ซอฟต์แวร์ในการจำลองการปะทะกันระหว่างลูกเหล็ก SS304 กับแผ่นเหล็กเกรด ARMCO โดยใช้ซอฟต์แวร์ LS-Dyna 3D และซอฟต์แวร์ AUTODYN 2D สำหรับการวิเคราะห์

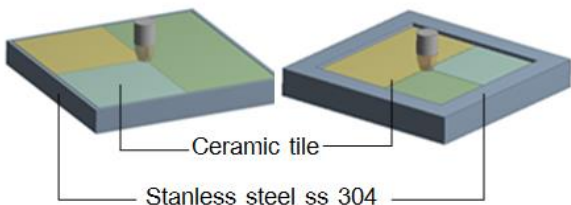
ปัญหา Shah และ Abakr [3] ทำการทดสอบยิงจริงเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยโปรแกรม LS-DYNA จำลองพฤติกรรมของแผ่นเกราะพอลิคาร์บอนเนตรูปร่างวงกลม เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ  $115 \text{ mm}$  ยิงด้วยกระสุนโลหะทรงกลมที่ความเร็ว  $138 \text{ m/s}$  พบว่าเมื่อยิงบริเวณใกล้ๆ ขอบที่มีการจับยึดแผ่นเกราะ เนื้อวัสดุแผ่นเกราะจะถูกอัดได้ง่าย ส่งผลให้ระยะยุบตัวของแผ่นเกราะที่บริเวณกึ่งกลางแผ่นเกราะมีรอยยุบตัวน้อยกว่าที่บริเวณใกล้ขอบที่มีการจับยึด และ Portillabullido [4] ทำการวิจัยเกี่ยวกับวัสดุคอมโพสิตที่ใช้สำหรับอากาศยานได้กล่าวถึงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาการปะทะ โดยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ ยิงกระสุนใส่แผ่น Dyneema HB 25 และกำหนดการจับยึดชิ้นงานที่ขอบทั้ง 4 ด้านและ 2 ด้านนำผลมาพล็อตกราฟความเร็วหลงเหลือของกระสุน (Residual velocity) พบว่าลักษณะของกราฟมีลักษณะคล้ายคลึงกัน ดังนั้นการจับยึดที่ขอบ 4 ด้าน และ 2 ด้านให้ผลลัพธ์ขนาดความลึกรอยยุบตัวเท่ากัน กรณีที่แผ่นเกราะมีลักษณะสมมาตรหรือเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

งานวิจัยนี้จะใช้การจำลองเชิงตัวเลขโดยใช้ซอฟต์แวร์ AUTODYN 3D วิเคราะห์ความเสียหายแบบ Smooth particle hydrodynamics (SPH) และลากรางจ์ (Lagrangian) เนื่องจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SPH หรือ ลากรางจ์ เหมาะสำหรับการจำลองปัญหาที่มีความสัมพันธ์อัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูง (High-rate deformation) และการวิบัติของวัสดุ (Failure of material) เพื่อจำลองการออกแบบขอบ

แผ่นเกราะสำหรับการเก็บสะเก็ดที่ปรืออกบริเวณด้านข้าง โดยแบ่งการจำลองออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีแรกทำการพับขอบขึ้นมาจากโลหะแผ่นด้านหลังเท่าความหนาของเซรามิกมีลักษณะคล้ายกับถาด กรณีที่สองพับขอบโลหะชนิดเดียวกับเกราะแผ่นหลังขึ้นมาปิดขอบของเซรามิก และรวมไปถึงการจำลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) ที่ส่งผลต่อรอยยุบตัวของแผ่นเกราะด้านหลัง โดยการจำลองยิงด้วยกระสุนปืนชนิด .44 นิ้ว (NIJ level IIIA) ด้วยความเร็ว 450 เมตร/วินาที รูปร่างของกระสุนและแผ่นเกราะแสดงดังรูปที่ 1



(ก) ขนาดของกระสุนชนิด .44 นิ้ว



(ข) รูปร่างแผ่นเกราะออกแบบพับขอบ

รูปที่ 1 แบบจำลองรูปร่างของกระสุนและแผ่นเกราะขึ้นงาน

2. ระเบียบวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

2.1 ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง

สำหรับการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยซอฟต์แวร์ ANSYS-AUTODYN ใช้กับการวิเคราะห์ปัญหาพลศาสตร์แบบไม่เป็นเชิงเส้นตรง (Non-linear dynamics) เป็นโปรแกรมประเภท "Hydrocode" เหมาะสำหรับการคำนวณรูปร่างที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรง และวัสดุที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นตรง อาทิ Plasticity, Failure, Strain-hardening and softening,

Multiphase equation of state โดยการคำนวณประกอบไปด้วย สมการกฎทรงมวล การอนุรักษ์โมเมนตัม และการอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งเป็นการคำนวณในแบบของ SPH และ ลากรานจ์

2.1.1 วัฏจักรการคำนวณของลากรานจ์

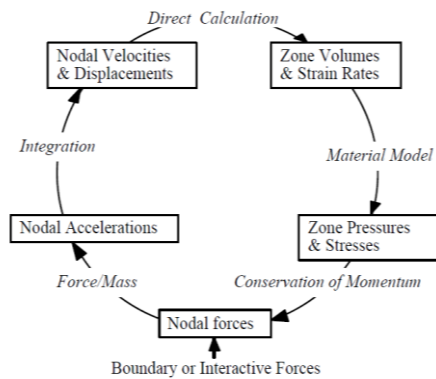
วัฏจักรการคำนวณของลากรานจ์ [5] เริ่มต้นจากการปรับแรงกิริยาหรือแรงกระทำที่ขอบเขตทำให้เกิดค่าความเร่งที่โหนด หลังจากนั้นไปคำนวณหาความเร็วหรือระยะขจัดที่โหนด โดยการอินทิเกรตค่าความเร่ง ผลที่ได้จากการคำนวณจะได้ ปริมาตรและอัตราความเครียดซึ่งถูกนำมาใช้ในสมการความเสียหายของวัสดุหลังจากนั้นก็จะมีค่าคำนวณเพื่อจะปรับความเค้น ความเค้นที่ได้ก็จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณหาแรงกระทำที่โหนด โดยผ่านสมการ การอนุรักษ์โมเมนตัม วัฏจักรก็จะครบรอบและทำการ Update ข้อมูลลักษณะนี้ต่อไปเรื่อยๆดังรูปที่ 2ก

2.1.2 วัฏจักรการคำนวณของ SPH

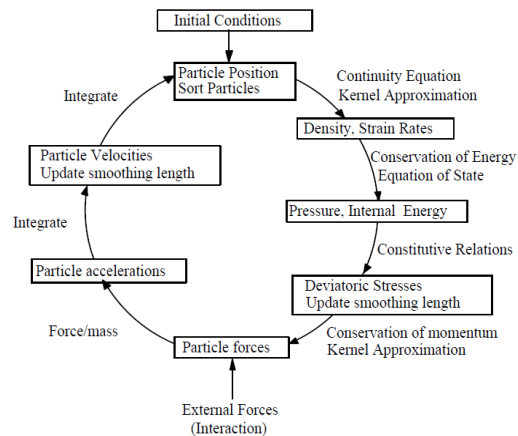
SPH computation cycle [5] คือ สร้างเอลิเมนต์แบบ Mesh free หรือเรียกว่า Meshless เป็นเทคนิคที่ใช้แก้ปัญหาการคำนวณพลศาสตร์ต่อเนื่องเหมาะสมที่สุดสำหรับการอธิบายการเคลื่อนที่แบบจุดมวลต่างๆ ใน SPH มีความเหมาะสมในการอธิบายรูปแบบความเสียหายของเซรามิก มีรูปแบบการคำนวณขั้นต้นคล้ายกับลากรานจ์ ส่วนที่แตกต่างคือส่วนของการประมาณค่า เรียกว่า "การประมาณค่าของเคอร์เนล" (Kernel approximation) จะใช้การคำนวณอัตราความเครียดและระยะของอนุภาค โดย SPH จะจัดเรียงลำดับของอนุภาคโดยรอบทุกครั้งของการคำนวณหนึ่งรอบไซเคิลเพื่อหาค่าแรงและน้ำหนักปัจจุบันของอนุภาคที่จะคำนวณในลำดับช่วงเวลาต่อไปดังรูปที่ 2ข

2.2 แบบจำลองพฤติกรรมของวัสดุ

เนื่องจากแผ่นเกราะประกอบด้วยวัสดุ 2 ชนิดคือแผ่นเซรามิกขนาด 50x50x10 มม. และแผ่นโลหะขนาด 100x100x2 มม. ดังนั้นจึงต้องมีแบบจำลองพฤติกรรมการเสียหายของวัสดุที่แตกต่างกัน ดังนี้



(ก) วัฏจักรการคำนวณของลากรางจ์



(ข) วัฏจักรการคำนวณของ SPH

รูปที่ 2 วัฏจักรการคำนวณของลากรางจ์ และวัฏจักรการคำนวณของ SPH

2.2.1 แบบจำลองพฤติกรรมวัสดุประเภทโลหะ

(Material models for metals)

2.2.1.1 Steinberg-Guinan model

Steinberg-Guinan model [5] ใช้จำลองวัสดุหัวกระสุนปืนคือ ตะกั่ว ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ใช้สำหรับพฤติกรรมโลหะเหนียว ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความเครียดมาก (Large strain), อัตราความเครียดสูง (High strain rates), ความดันสูง (high pressure) และอุณหภูมิสูง (High temperature) เป็นต้น จากงานวิจัยพบว่า การเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุ จะขึ้นอยู่กับ การเพิ่มขึ้นของความดันและจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งเขียนอยู่ในรูปความสัมพันธ์ความเค้นได้ดังนี้

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

$$G = G_0 \left\{ 1 + \left( \frac{G'_p}{G_0} \right) \frac{P}{\eta^{\frac{1}{3}}} + \left( \frac{G'_T}{G_0} \right) (T - 300) \right\} \quad (2)$$

$Y_0$  คือ the initial yield stress

$Y$  คือ the yield stress

$G_0$  คือ the initial shear modulus

$G$  คือ the shear modulus

$P$  คือ the pressure

$T$  คือ the absolute temperature

$n$  คือ the hardening exponent

$\beta$  คือ the hardening constant

$\varepsilon$  คือ the effective plastic strain

$\eta$  คือ the compression ratio

2.2.1.2 Johnson-Cook model (JC)

Johnson-Cook model ใช้สำหรับจำลองวัสดุ กระสุนที่เป็นทองแดง และสำหรับแผ่นเกราะรองหลัง ซึ่งในงานวิจัยของ Bürger และคณะ [6] กล่าวว่า โมเดลวัสดุ JC เหมาะสมกับปัญหาพลศาสตร์ที่มีอัตราความเครียดสูง (High-stain rate) และอุณหภูมิสูง (High temperature) โดยโมเดลนี้กำหนดค่าความสัมพันธ์ของความเค้นครากในฟังก์ชันของความเครียดถาวร, อัตราความเครียดและอุณหภูมิ ดังนี้

$$\sigma_y = \left[ A + B \bar{\varepsilon}_p^n \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (3)$$

$A$  คือ the initial yield stress

$B$  คือ the strain hardening coefficient

$n$  คือ the strain hardening exponent

$\dot{\varepsilon}_p$  คือ the effective plastic strain rate

$\dot{\varepsilon}_0$  คือ the reference strain rate

$C$  คือ the strain rate coefficient

$m$  คือ the temperature softening exponent

$T, T_r, T_m$  คือ the absolute temperature, the absolute room temperature และ the absolute melting temperature

กำหนดให้  $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}_p / \dot{\varepsilon}_0$  คือ the dimensional plastic strain rate ( $\dot{\varepsilon}_0 = 1.0 \text{ s}^{-1}$ ) และ  $T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r}$  คือ the

homologous temperature

### 2.2.1.3 Johnson-Holmquist model

Johnson-Holmquist [7] โมเดลวัสดุที่ใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับอธิบายความเสียหายของเซรามิก โดยแบ่งช่วงความเสียหายออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงแรก Intact surface ( $D=0$ ) คือ ช่วงเริ่มแรกเมื่อวัสดุได้รับภาระแล้วยังไม่เกิดความเสียหายขึ้น โมเดลวัสดุ ช่วงที่สอง Damage ( $0<D<1$ ) เป็นช่วงที่วัสดุเริ่มมีการเกิดความเสียหาย ช่วงที่สาม คือ Fracture ( $D = 1$ ) คือ ช่วงที่วัสดุพังเสียหายแล้ว ดังนี้

Intact surface ( $D=0$ )

$$\sigma_i^* = A(P^* + T^*)^N (1 - C \ln|\dot{\epsilon}^*|) \quad (4)$$

Damaged ( $0<D<1$ )

$$\sigma_D^* = \sigma_i^* - D(\sigma_i^* - \sigma_f^*) \quad (5)$$

Fractured ( $D = 1$ )

$$\sigma_f^* = \text{MIN}[B(P^*)^m (1 - C \ln|\dot{\epsilon}^*|) \sigma_f^{Max}] \quad (6)$$

$\sigma_i^*$  คือ the stress description with no damage

$\sigma_D^*$  คือ the stress at initial damage

$\sigma_f^*$  คือ the stress at fracture

$\sigma_f^{Max}$  คือ the maximum stress at fracture

$A$  คือ the intact strength constant

$B$  คือ the fracture strength constant

$C$  คือ the strain rate constant

$P^*$  คือ the normalized pressure

$T^*$  คือ the hydrodynamic tensile limit

### 2.3 การกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขต

#### ขอบเขต

เงื่อนไขขอบเขตเริ่มต้น (Initial condition) ได้แก่ ความเร็วปะทะเท่ากับ 450 เมตร/วินาที (NIJ level IIIA) มุมปะทะแผ่นเกราะเท่ากับ  $0^\circ$  เงื่อนไขขอบเขตและการจับยึด (Boundary condition) แบ่งออกเป็น 3 กรณี ได้แก่

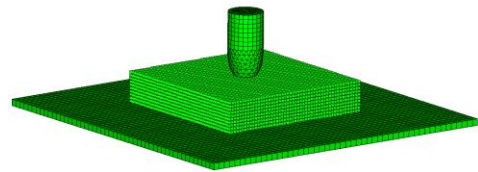
กรณีที่ 1 จับยึดมุมขอบแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม

กรณีที่ 2 จับยึดผิวขอบแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม

กรณีที่ 3 จับยึดแบบแนวเส้นขอบแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม

### 2.4 ขนาดของเอลิเมนต์ (Elements size)

จากงานวิจัยของ วิษณุพงศ์ ตะเคียน และคณะ [8] ได้ทำการจำลองการปะทะกันของกระสุนปืนชนิด .44 นิ้ว กับแผ่นเกราะเซรามิกควมกลมเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 50 มม.หนา 10 มม. และแผ่นเกราะรองหลังทำจากโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม SS304 ขนาด 250x250x2 มม. พบว่าขนาดของเอลิเมนต์ที่เหมาะสมเท่ากับ 2 มม. ใช้ระยะเวลาในการจำลอง (Simulation time) เท่ากับ 6 ชั่วโมง และเป็นขนาดเอลิเมนต์ที่ให้ผลการคำนวณที่ดีที่สุด ดังนั้นในงานวิจัยการจำลองรอยต่อของแผ่นเกราะเซรามิกจะใช้ขนาดของเอลิเมนต์เท่ากับ 2 มม. เช่นกัน



รูปที่ 3 การแบ่งขนาดของเอลิเมนต์ของกระสุนปืนและแผ่นเกราะ 2 ชั้น

## 3. ผลการจำลอง

### 3.1 ผลกระทบของขอบ

ในการจำลองการออกแบบขอบขอบแผ่นเกราะแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ตามที่กล่าวในข้างต้น จากการจำลองพบว่า เมื่อกระสุนปะทะแผ่นเกราะทำให้แผ่นเกราะเกิดการเสียรูป ขอบของแผ่นเกราะเกิดการโค้งงอเข้าทั้งสี่ด้าน มีลักษณะคล้ายกับการเกิดโมเมนต์ดัดซึ่งจะเห็นชัดในกรณีที่ 3 และ 4 ซึ่งการจำลองในข้างต้นเป็นการยิงที่บริเวณรอยต่อและใกล้ขอบของแผ่นเกราะ การหุ้มขอบแบบปิดขอบเซรามิกจะช่วยป้องกันสะเก็ดที่ปรือออกทางด้านข้างและมีส่วนในการยึดรั้งแผ่นเกราะ ในการต้านทานกระสุนทำให้ระยะยุบตัวของแผ่นเกราะลดลง

### 3.2 ผลกระทบของรอยต่อ

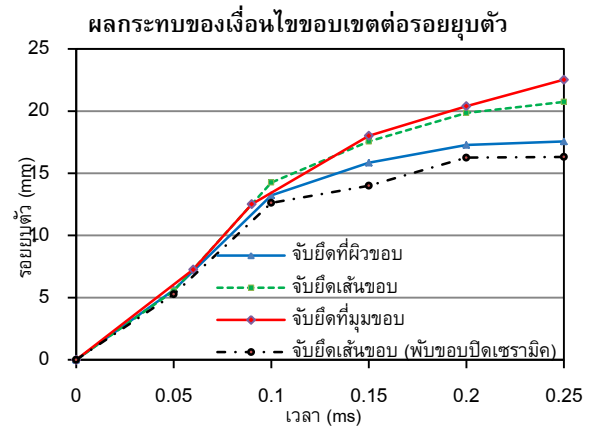
เมื่อกระสุนปะทะบริเวณรอยต่อของแผ่นเกราะแบบ 3 รอยต่อ พบว่ารอยยุบตัวของแผ่นโลหะด้านหลังยุบตัวเพิ่มมากขึ้น และการปะทะบริเวณรอยต่อของเซรามิก ทำให้ทราบถึงความสำคัญ และความอันตราย เนื่องจากที่บริเวณ

รอยต่อ เป็นจุดหนึ่งซึ่งเป็นจุดอ่อนแอของเสื่อเกราะที่ด้านปะทะทำจากวัสดุเซรามิก

**3.3 ผลกระทบของเงื่อนไขขอบเขต**

สำหรับผลกระทบของรูปแบบการจับยึดแผ่นเกราะในแต่ละกรณีส่งผลต่อระยะยุบตัวของแผ่นเกราะโดยผลการจำลองผลกระทบของรูปแบบการจับยึดที่ขอบสรุปได้ดังตารางที่ 1 โดยจากกรณีที่ 1 จับยึดที่มุมขอบของแผ่นโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม จะมีระยะยุบตัวมากที่สุด ซึ่งอาจเป็นผลมาจากตีกริความเป็นอิสระ ในการจับยึดน้อยกว่า หรือยึดไม่แน่นพอเกิดการเคลื่อนตัวได้ง่าย กรณีที่ 2 จับยึดที่ผิวขอบคล้ายคลึงกับกรณีต้นแบบ ซึ่งผลของระยะยุบตัวมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากทั้งสองกรณีนี้มีการจับยึดแน่นมาก กรณีที่ 3 และ 4 จับยึดเส้นขอบของแผ่นโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม พบว่าระยะยุบตัวของกรณีที่ 4 น้อยกว่ากรณีที่ 3 เนื่องจากในกรณีที่ 4 การเกิดโมเมนต์ดัดน้อยกว่า และการพิบขอบแผ่นโลหะขึ้นมาปิดขอบเซรามิก เป็นการเพิ่มค่าโมเมนต์ของความเฉื่อยของภาคตัด ต้านทานการดัดของแผ่นเกราะที่เกิดจากบริเวณขอบที่พิบขึ้นมา

ทำให้ระยะยุบตัวของแผ่นเกราะลดลงถึง 4.58 มม. จากตารางที่ 1 สามารถสรุปเป็นกราฟผลกระทบจากการจับยึดที่ส่งผลต่อรอยยุบตัว ณ ที่เวลาต่างๆ (ดังรูปที่ 4) เมื่อพิจารณากรณีที่ 1-3 ที่มีรูปร่างแผ่นเกราะเหมือนกันแต่ลักษณะการจับยึดต่างกัน พบว่าการจับยึดที่ผิวขอบของแผ่นเกราะให้ขนาดรอยยุบตัวน้อยที่สุด แต่การเลือกใช้เงื่อนไขขอบเขตต้องเหมาะสมและมีข้อกำหนดใกล้เคียงกับการจับยึดการยิงทดสอบแผ่นเกราะจริง



รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระยะยุบตัว/เวลา ที่เงื่อนไขการจับยึดขอบแผ่นเกราะต่างๆ

ตารางที่ 1 การจำลองผลกระทบการจับยึดที่ขอบที่มีผลต่อการยุบตัวสูงสุด

รูปแบบรอยต่อของแผ่นเซรามิก	รูปแบบการจับยึดที่ขอบ	รอยยุบตัว (มม.)
แบบ 3 รอยต่อ	ต้นแบบ : จับยึดที่ขอบของแผ่นเกราะ	17.46 มม.
	1. จับยึดที่มุมขอบแผ่นเกราะ	25.76 มม.
	2. จับยึดที่ผิวขอบแผ่นเกราะ	17.56 มม.
	3. จับยึดที่เส้นขอบแผ่นเกราะ	20.90 มม.
	4. จับยึดที่เส้นขอบแผ่นเกราะ	16.32 มม.

**4. อภิปรายผล**

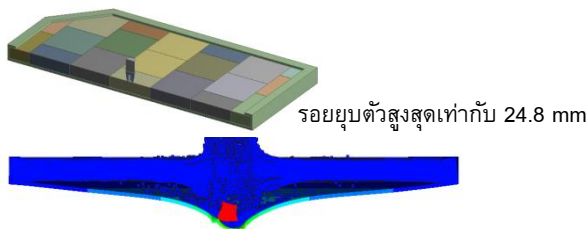
1. การพับขอบแผ่นเกราะถึงแม้การพับขอบจะช่วยลดระยะยุบของแผ่นเกราะ แต่จะส่งผลต่อน้ำหนักของแผ่นเกราะที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาตารางที่ 2 เปรียบเทียบน้ำหนักแผ่นเกราะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่พบว่า เมื่อมีการพับขอบน้ำหนักของแผ่นเกราะจะเพิ่มขึ้นสำหรับกรณีพับขอบลักษณะคล้ายถาดและพับขอบโลหะปิดบริเวณขอบเซรามิกเป็น 15.27 และ 29.20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ตารางที่ 2 น้ำหนักแผ่นเกราะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

(Areal density : กรัม/ตร.ซม.)

กรณี	น้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (กรัม/ตร.ซม.)	น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (เปอร์เซ็นต์)
ต้นแบบ	5.24	-
พับขอบ	6.04	15.27
พับขอบปิดเซรามิก	6.77	29.20

อย่างไรก็ตามสำหรับแผ่นเกราะขนาดใหญ่การจับยึดมีส่วนช่วยลดการยุบตัวในระดับหนึ่งเท่านั้น หากบริเวณปะทะอยู่ห่างจากขอบ ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ผลกระทบของการพับขอบของแผ่นเกราะขนาดใหญ่ต่อรอยยุบตัว

2. ประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานของแผ่นเกราะจากรูปที่ 6 จะพบว่ากระสุนมีความเร็วเป็นศูนย์ที่เวลา 0.25 มิลลิวินาที และเมื่อพิจารณารูปที่ 6 ข พลังงานจลน์ของกระสุนที่สูญเสียจะมีค่าประมาณผลรวมของพลังงานภายใน แสดงในรูปที่ 6 ค ที่เกิดขึ้นกับแผ่นเกราะเซรามิกและแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งสรุปได้ว่า พลังงานที่แผ่นเกราะดูดซับจากพลังงานจลน์กระสุนเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน

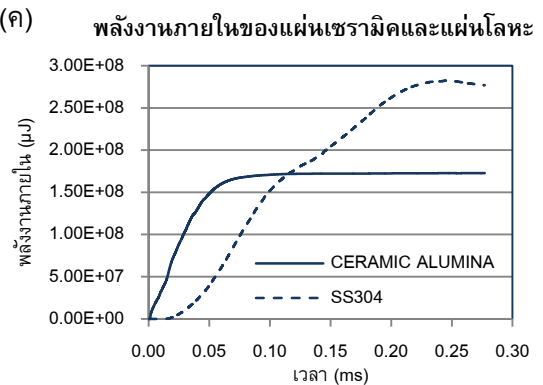
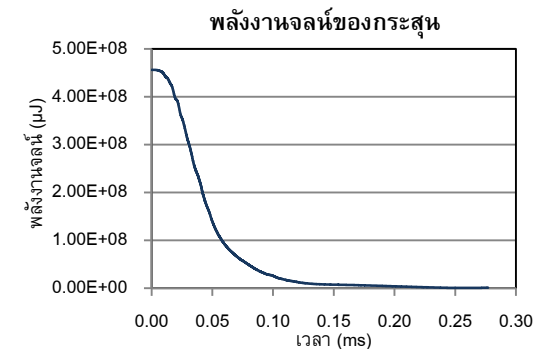
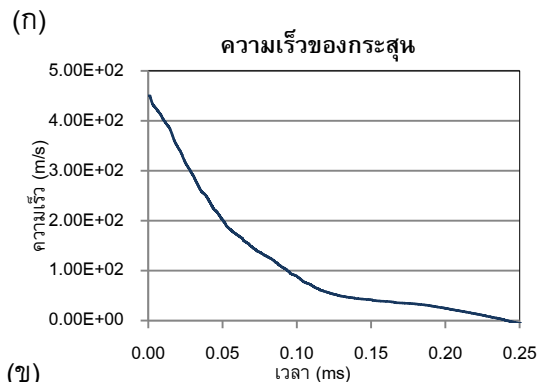
$$E_k \cong E_{i,ceramic} + E_{i,SS304} \tag{7}$$

$E_k$  คือ พลังงานจลน์ของกระสุนที่สูญเสีย

$E_{i,ceramic}$  คือ พลังงานภายใน หรือ พลังงานจลน์ที่แผ่นเซรามิกดูดซับ

$E_{i,SS304}$  คือ พลังงานภายใน หรือ พลังงานจลน์ที่แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมดูดซับ

จากรูปที่ 6 ข กระสุนมีพลังงานสูญเสียเท่ากับ 455 จูลล์ และรูปที่ 6 ค แผ่นเกราะเซรามิกดูดซับพลังงานจลน์เท่ากับ 173 จูลล์ และ แผ่นเกราะโลหะดูดซับพลังงานจลน์เท่ากับ 282 จูลล์ ดังนั้นพลังงานภายในของแผ่นเกราะเซรามิกกับแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมรวมกันเท่ากับ 455 จูลล์ จะพบว่ามีค่าเท่ากับพลังงานสูญเสียของกระสุนซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ (7)



รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ของพลังงานระหว่างกระสุนและแผ่นเกราะ (ก) กราฟความเร็วกับเวลาของกระสุน

(ข) กราฟพลังงานจลน์ที่สูญเสียของกระสุน (ค) พลังงานภายในที่เกิดขึ้นกับแผ่นเกราะเซรามิกและแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SS304) กรณีพับขอบโลหะปิดขอบเซรามิก

### 5. สรุปผล

1. การใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขมีส่วนช่วยในการศึกษาผลกระทบของรูปแบบการจับยึดต่อการยุบตัวของแผ่นเกราะ นอกจากรูปแบบการจับยึดจะส่งผลต่อรอยยุบตัวของแผ่นเกราะด้านหลังแล้วนั้นยังส่งผลต่อระยะเวลาในการจำลอง โดยเฉพาะรูปร่างของแบบจำลองที่ใช้มีขนาดใหญ่ เช่น การจำลองตัวเส้นเกราะที่มีขนาดจริง

2. หากชิ้นงานมีขนาดเล็ก การพับขอบจะมีส่วนช่วยลดการยุบตัว ซึ่งการพับขอบแบบปิดขอบเซรามิกจะช่วยป้องกันสะเก็ดที่ปรือออกทางด้านข้างและมีส่วนในการยึดตรึงแผ่นเกราะและลดระยะยุบตัวของแผ่นเกราะได้

### 6. กิตติกรรมประกาศ

คณะนักวิจัยต้องขอขอบคุณสำนักวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้ทุนวิจัยประเภททุนนักวิจัยทั่วไปประจำปีงบประมาณ 2555 แก่โครงการนี้ (สัญญาเลขที่ KMUTNB-GEN-55-02)

### 7. เอกสารอ้างอิง

[1] Shokrieh, M.M., Javadpour, G.H. (2008). Penetration analysis of a projectile in ceramic composite armor, *Composite Structures*, vol.82, pp. 269–276.

[2] Sharma, A.C., Bhupinder, S., Manjit, S. (2008). Simulation of Impact and Penetration with Hydrocodes, paper presented in *the Proceedings of the 2008 Spring Simulation Multiconference*, San Diego, USA.

[3] Shah, Q. H., Abakr, Y. A. (2008). Effect of distance from the support on the penetration mechanism of clamped circular polycarbonate armor plates, *International Journal of Impact Engineering*, vol.35, pp. 1244–1250.

[4] Portillabullido, A. (2011). Numerical analysis of impact behaviour on aeronautical composite protections. Departamento de mecánica de medioscontinuos y teoría de estructuras.

[5] Theory Manual and SPH, ANSYS – Explicit 13.

[6] Bürger, D., de Faria, A., de Almeida, S.F.M., de Melo, F.C.L., Donadon, M.V. (2012). Ballistic impact simulation of an armor-piercing projectile on hybrid ceramic/fiber reinforced composite armors, *International Journal of Impact Engineering*, vol.43, pp. 63-77.

[7] Lamberts, A.P.T.M.J. Numerical simulation of ballistic impacts on ceramic material, *Master's thesis*, Eindhoven University of Technology, The Netherlands, 2007.

[8] วิชาญพงศ์ ตะเคียน และชัยณรงค์ ศรีกุลวงศ์ (2554). การจำลองเชิงตัวเลขการปะทะกันของกระสุนปืนกับแผ่นเกราะเซรามิก/โลหะ, *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 25, จังหวัดกระบี่*