

การจำลองสถานการณ์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของการกระแทกจากกระสุนปืน: กรณีศึกษา กระสุน 9 มม. Parabellum กับ AISI1008, AA1100 และ AA5083

ทัศนชัย หองผาย¹ และ ทวีภัทร์ บุรณนิตติ^{2,*}

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

รับเมื่อ 9 ตุลาคม 2550 ตอรับเมื่อ 11 สิงหาคม 2551

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อจำลองสถานการณ์การกระแทกจากกระสุนปืนด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้นขึ้นมา เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมการถ่ายโอนพลังงานจากพลังงานจลน์ของลูกกระสุนปืนไปยังเป้าและการเปลี่ยนรูปของเป้าเมื่อถูกกระแทก วัสดุเนื้อเดียว 3 ชนิดที่นำมาเป็นเป้าทดสอบ คือ เหล็กกล้าเกรด AISI1008 อะลูมิเนียมเกรด AA1100 ความหนา 2, 4 และ 6 มม. และอะลูมิเนียมเกรด AA5083 ความหนา 4 และ 6 มม. การทดสอบทางกายภาพใช้ปืน Glock 19 และกระสุนปืนชนิด 9 มม. Parabellum ผลการทดสอบทางกายภาพพบว่าแผ่น AA1100 ที่ทุกๆ ความหนาจะทะลุทั้งหมด ส่วนแผ่น AISI1008 และ AA5083 เกิดการเปลี่ยนรูปแต่ไม่ทะลุ และแผ่น AISI1008 ที่ความหนา 6 มม. แสดงประสิทธิภาพในการต้านทานการเจาะทะลุและมีความสามารถในการสะท้อนพลังงานที่มาจากกระแทกของกระสุนได้ดีที่สุดในการทดสอบนี้ ในการทดสอบนี้ได้จำลองแบบจำลองลูกกระสุนปืนออกเป็น 2 กรณี คือ ลูกกระสุนแบบแข็งเกร็งและลูกกระสุนแบบเปลี่ยนรูปได้ ในการจำลองสถานการณ์ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ความเร็วเริ่มต้นระหว่าง 100-200 ม./วินาที ผลการจำลองสถานการณ์นี้พบว่าความเร็วเริ่มต้นของลูกกระสุนในแบบจำลองมีอิทธิพลต่อความแม่นยำของการพยากรณ์อย่างมีนัยสำคัญ และการสร้างแบบจำลองลูกกระสุนให้เป็นแบบเปลี่ยนรูปได้ให้ผลการพยากรณ์ที่ดีกว่าแบบจำลองวัตถุแข็งเกร็ง

คำสำคัญ : การกระแทกจากกระสุนปืน / การเปลี่ยนรูป / แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่เชิงเส้น / การจำลองสถานการณ์ / การทดลองเสมือน

* Corresponding Author E-mail: thaweepat.bur@kmutt.ac.th

¹ นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา หลักสูตรการออกแบบและผลิตแบบบูรณาการ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

Finite Element Simulation of Ballistic Impact from Small Arm Bullet: A Case Study of 9 mm Parabellum Bullets on AISI1008, AA1100 and AA5083

Thutchai Phongphay¹ and Thaweepat Buranathiti^{2,*}

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Toongkru, Bangkok 10140

Received 9 October 2007 ; accepted 11 August 2008

Abstract

This research work creates computer models to simulate ballistic impacts of a small arm bullet via non-linear finite element methods. This work studies the kinetic transformation behavior of the bullet to the target and their deformation right after the impact. The target materials in this work consisted of 3 homogeneous materials: AISI1008 and AA1100 with the thickness of 2, 4 and 6 mm, and AA5083 with the thickness of 4 and 6 mm. In the physical test, a Glock 19 handgun and 9 mm Parabellum bullets were used. The experimental results showed that AA1100 targets were completely penetrated at every thickness while AISI1008 and AA5083 were not completely penetrated by the bullets. And, AISI1008 at the 6 mm thickness indicated the best performance on the penetration resistance and the energy reflection from the bullet impact in this study. In the model tests, the bullet was modeled in 2 cases: rigid bullets and deformable bullets. The initial velocities in this study ranged between 100-200 m/s. The simulation results showed that the initial velocity of the bullet in the model has a significant impact to the prediction accuracy and the bullet model as a deformable body provides a much better prediction than that as a rigid body.

Keywords : Ballistic Impact / Deformation / Non-linear Finite Element Model / Simulation / Virtual Experiment

* Corresponding Author E-mail: thaweepat.bur@kmutt.ac.th

¹ Graduated Student, Program of Integrated Product Design and Manufacturing, School of Energy, Environment and Materials.

² Assistant Professor, Division of Materials Technology, School of Energy, Environment and Materials.

1. บทนำ

การป้องกันภัยคุกคามทางด้านความมั่นคงของประเทศถือว่าเป็นยุทธศาสตร์ที่สำคัญนับตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน อุปกรณ์ที่ใช้ในการป้องกันอันตรายระหว่างการต่อสู้ในการรักษาความมั่นคงและการป้องกันอันตรายอันหนึ่งที่มีความสำคัญ คือ เสื้อเกราะ (Armor) ซึ่งนับวันจะยิ่งมีความต้องการเป็นจำนวนมาก อันเนื่องมาจากจำนวนเจ้าหน้าที่และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการรักษาความมั่นคงซึ่งเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอตามจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้น แต่ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้งานของเสื้อเกราะนั้นจำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่มีค่าใช้จ่ายสูงมากสำหรับการทดลองแต่ละครั้ง และยังมีข้อจำกัดในบางด้านหรือบางตัวแปรนั้นยากมากที่จะทำการวัดได้หรือไม่เลย ดังนั้นการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ขึ้นมาเพื่อศึกษาถึงผลกระทบของกระสุนเป็นที่มีต่อวัสดุ โดยเฉพาะวัสดุกันกระสุนจึงมีความสำคัญมากเพราะจะเป็นการช่วยลดค่าใช้จ่ายในการพัฒนา นอกจากนี้การออกแบบรูปทรงของหัวกระสุนปืนก็มีความสำคัญเช่นเดียวกันเพราะจะทำให้ประสิทธิภาพในการต่อสู้เพิ่มสูงขึ้น

การปะทะของกระสุนปืนโดยส่วนใหญ่แล้วเป็นการกระแทกของวัตถุที่มีมวลต่ำแต่มีความเร็วสูง การวิเคราะห์การปะทะของกระสุนปืน (Ballistic Impact) สามารถทำได้โดยพิจารณา พลังงานการกระแทกจะถูกแปรเปลี่ยนไปเป็นพลังงานศักย์ของเป่ากระทบ พลังงานความเครียดของเป่าและกระสุน พลังงานการเปลี่ยนรูปและพลังงานที่สูญเสียจากแรงเสียดทาน เป็นต้น ความต้านทานการทะลุทะลวงของเกราะกันกระสุนนั้นขึ้นอยู่กับความสามารถในการดูดซับพลังงานบริเวณที่เกิดการปะทะและความสามารถในการกระจายพลังงานให้ได้เร็วที่สุดในบริเวณดังกล่าว วัสดุที่ใช้ทำเสื้อเกราะอ่อนมักทำมาจากวัสดุประกอบไฟเบอร์ (Fiber Composite) ที่มีความแข็งแรงสูง เช่น วัสดุจำพวก Aramid (เช่น Kevlar, Twaron, Technora), พลาสติก Polyethylene (เช่น Spectra, Dyneema) และ Polybenzoxazole (เช่น Zylon) เป็นต้น วิธีการวิเคราะห์ที่อาจแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ การทำการทดลองทางกายภาพ และการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การทดลองทางกายภาพ (Physical Experiment) มีข้อดีตรงที่ว่า ไม่จำเป็นต้องสร้างข้อสมมุติฐานและเป็นการแสดงผลที่เกิดขึ้นจริง อย่างไรก็ตามวิธีนี้ก็ยังมีข้อเสียอยู่มาก โดยเฉพาะค่าใช้จ่ายในการจัดตั้งการทดลองแต่ละครั้ง นอกจากนี้การชั่งน้ำหนักก็เกินไปด้วยความยากลำบาก จำเป็นต้องมีตัววัด (Sensor) ที่มีประสิทธิภาพสูง และตัวแปรหรือตัวชี้วัดบางตัว เช่น ความเค้น (Stress) ก็ไม่สามารถทำการวัดได้โดยตรง เป็นต้น นอกจากนี้การควบคุมความผันแปร (Variation) ของการทดลองเพื่อให้ผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือ (Reliability) และมั่นคง (Robust) ก็เป็นสิ่งที่ทำได้ยาก

ดังนั้นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) จึงมีบทบาทช่วยลดต้นทุน ทั้งยังทำให้วิเคราะห์ตัวแปรบางตัวได้อีกด้วย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถแบ่งออกได้เป็นแบบจำลองเชิงวิเคราะห์ (Analytical Model) และแบบจำลองเชิงตัวเลข (Numerical Models) เช่น แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Models หรือ FEM) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ยอมรับและใช้อย่างกว้างขวางในปัจจุบัน

แบบจำลองเชิงวิเคราะห์ก็ยังคงมีความสำคัญในปัจจุบัน โดยแบบจำลองประเภทนี้สามารถกระตุ้นให้วิศวกรมีความเข้าใจในตัวระบบมากยิ่งขึ้น สามารถกระตุ้นให้หาคำตอบใหม่ๆ และเป็นการสร้างแนวทางในการวิจัยทั้งทางด้านทฤษฎีและการทดลองต่อไป Ben-Dor et al. [1] ได้นำเสนองานการทบทวนเอกสารและงานวิจัยด้านแบบจำลองเชิงวิเคราะห์เกี่ยวกับการชน โดยแบ่งวิธีการวิเคราะห์เป็น 3 ประเภทหลักๆ คือ Localized Interaction Approach, Cavity Expansion Approximations และ Lambert-Jonas Approximation ซึ่งแต่ละวิธีมีความเหมาะสมกับวัสดุแตกต่างกัน

ในปัจจุบัน FEM ได้พัฒนาและแบ่งแยกออกมาเป็นชนิดต่างๆ จำนวนมาก เช่น Lagrangian FE, Eulerian FE, Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE), Meshfree (หรือ Meshless) Method, Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH), Boundary Element Method (BEM) เป็นต้น โดย Anghileri et al. [2] ได้ทำการสำรวจวิธีการสร้างแบบจำลองของการชนของลูกเห็บต่อ

โครงสร้างเครื่องยนต์ของเครื่องบินโดยพิจารณาที่ความเร็ว 192 ม./วินาที พบว่าแบบจำลองเชิงตัวเลขของ Lagrangian FE, ALE และ SPH สามารถให้ผลการคำนวณเป็นที่น่าพอใจ โดย SPH ใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุด

Cheeseman and Bogetti [3] ได้นำเสนอผลงานการศึกษาผลกระทบของสมบัติของเส้นใย โครงสร้างของเส้นใย เรขาคณิตและความเร็วของการตกกระทบ ค่าขอบเขตของระบบ และแรงเสียดทาน ที่มีผลต่อการต่อต้านการชนหรือทะลุทะลวงต่อแผ่นวัสดุประกอบ (Composite Laminates) ซึ่งผลที่ได้ยังไม่พบความสัมพันธ์ของสมบัติวัสดุต่อความสามารถในการทะลุทะลวงอย่างชัดเจน

Duan et al. [4] ได้ใช้โปรแกรม LS-DYNA ซึ่งเป็น Explicit finite element code ในการสร้างแบบจำลองการกระแทกของกระสุนปืนที่มีลักษณะเป็นทรงกลมบนแผ่นผ้าสี่เหลี่ยม แบบจำลองนี้สมมติให้ลูกกระสุนเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid) กระแทกบนแผ่นผ้าที่มีการถักแบบพื้นฐาน (Plain Woven) โดยมีการศึกษาปัญหาค่าขอบในรูปแบบต่างๆ เพื่อศึกษาผลกระทบต่อความสามารถในการต่อต้านกระสุนปืน โดยแบบจำลองแรงเสียดทานเป็นแบบ Coulomb ซึ่งพบว่าแรงเสียดทานเป็นตัวสำคัญในการลดความเสียหายต่อวัตถุกันกระสุนแบบผืนผ้านี้ Duan et al. [5] นำเสนอผลงานด้านการใช้ FEM มาจำลองการชนของกระสุนต่อผ้ากันกระสุน (Ballistic Fabric) โดยใช้โปรแกรม LS-DYNA ในการสร้างแบบจำลองการตกกระทบบนผ้าเคฟล่า (Kevlar) ที่มีการถักแบบธรรมดาชั้นเดียว ซึ่งแบบจำลองนี้ได้ใช้กระสุนเป็นรูปทรงกระบอกและสมมติว่าเป็นวัตถุแข็งเกร็ง สำหรับแผ่นผ้านั้นก็ยังคงให้เป็นเอลิเมนต์ต่อเนื่อง (Continuum Elements) นอกจากนี้ทั้ง Vahedi and Khazraiyan [6] และ Deka et al. [7] ต่างสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขของการตกกระทบโดยแบ่งวัตถุโดยโปรแกรม LS-DYNA พบว่าให้ผลการพยากรณ์ที่น่าพอใจ

นอกจากโปรแกรม LS-DYNA แล้ว Silva et al. [8] ได้ศึกษาการกระแทกของกระสุนปืนบน Composite laminated plate ชนิดบางที่ทำมาจาก Kevlar 29 โดยแบบจำลองนี้สร้างมาจากโปรแกรม AUTODYN โดยใช้ Con-

tinuum elements สำหรับวัตถุที่มีลักษณะ Anisotropic ส่วนที่เหลือของบทความนี้จะได้นำเสนอการวิเคราะห์ปัญหาการกระแทกและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น ตามด้วยการทดสอบทางกายภาพและการทดสอบเสมือน ผลการวิจัยจากการทดสอบทางกายภาพและจาก FEM และปิดท้ายด้วยสรุปของงานวิจัยนี้

2. การวิเคราะห์ปัญหาการกระแทกและไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น

ในระบบที่มีการเคลื่อนตัวของคลื่นกระแทก (Shock Wave Propagation) นั้น การใช้เอลิเมนต์ที่มีอันดับสูงๆ จะไม่เกิดผลดีนักแต่กลับจะทำให้เกิดตัวรบกวนมากขึ้น ดังนั้นการเลือกใช้รูปแบบของแบบจำลองจึงมีความสำคัญมาก ซึ่งในการวิเคราะห์ปัญหาแบบไม่เป็นเชิงเส้นนั้น ปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดลักษณะที่ไม่เชิงเส้นสำหรับระบบหนึ่งๆ มีดังต่อไปนี้

(1) ความไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิต (Geometrical Nonlinearities) เกิดขึ้นจากผลของการขจัดสูงๆ (Large Displacements) ของเนื้อวัสดุทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างสำคัญทางเรขาคณิต คือ เกิดการเปลี่ยนรูปซึ่งสามารถทำให้แบบจำลองเชิงเส้นมีความคลาดเคลื่อนสูง

(2) ความไม่เชิงเส้นของวัสดุ (Material Nonlinearities) มาจากความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้นระหว่างความเค้นและความเครียดซึ่งรู้จักกันดีในหลากหลายสมบัติเกี่ยวกับวัสดุ ปัจจัยทั้งหลายเหล่านี้เป็นเหตุให้วัสดุอาจมีสมบัติไม่เชิงเส้น ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุที่ปรากฏในปัญหาการเปลี่ยนรูปแบบถาวร (Plasticity)

(3) ความไม่เชิงเส้นของการสัมผัสกัน (Contact or Boundary Nonlinearities) ในสภาพขอบเขตของโครงสร้างที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ในช่วงระหว่างที่มีการเคลื่อนไหวสถานการณ์เช่นนี้พบในการวิเคราะห์ปัญหาที่มีการสัมผัสกันในการจำลองสถานการณ์การกระแทกนั้น มักนิยมใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Finite Element Models หรือ NFEM) ซึ่งใช้วิธี Explicit direct integration โดยมีพื้นฐานมาจากวิธี Central difference โดยที่หาเวลาและความเร่งได้ดังนี้ [9]

$$\ddot{D}_n = M^{-1} \cdot (R_n^{ext} - CD_n - KD_n) \quad (1)$$

ที่เวลา $t_{n+1/2}$ หาความเร็วได้ดังนี้

$$\dot{D}_{n+1/2} = \dot{D}_{n-1/2} + \ddot{D}_n \cdot \Delta t_n \quad (2)$$

และที่เวลา t_{n+1} หาระยะขจัดได้ดังนี้

$$D_{n+1} = D_n + \dot{D}_{n+1/2} \cdot \Delta t_{n+1/2} \quad (3)$$

โดยที่

$$\Delta t_{n+1/2} = \frac{(\Delta t_n + \Delta t_{n+1})}{2} \quad (4)$$

ซึ่ง Critical time step จะมีผลต่อเสถียรภาพ (Stability) ของการคำนวณของวิธี Explicit direct integration กล่าวคือ Time step นั้นจะต้องมีค่าที่น้อยกว่า Critical time step อย่างมากโดย Critical time step สำหรับเอลิเมนต์ต่อเนื่อง 3 มิติ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\Delta t_c = \frac{L_e}{Q + \sqrt{Q^2 + c^2}} \quad (5)$$

โดย L_e เป็นขนาดของอีลิเมนต์ c เป็นความเร็วเสียงของวัสดุ และ Q เป็นฟังก์ชันของ bulk viscosity ความเร็วเสียงของวัสดุสามารถหาได้จาก

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho \cdot (1 - \nu^2)}} \quad (6)$$

โดย E เป็นค่ามอดูลัสยืดหยุ่น ρ เป็นค่าความหนาแน่น และ ν เป็นอัตราส่วนปัวซองส์

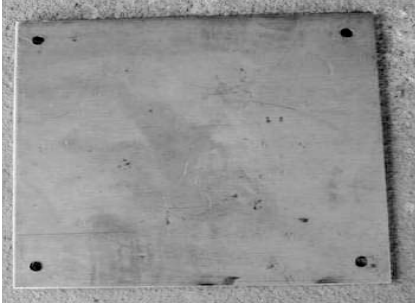
3. การทดสอบทางกายภาพและทดสอบเสมือน

ในงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์การกระแทกของกระสุนปืนไปยังเป้าทดสอบโดยแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ การวิเคราะห์โดยการทดลองทางกายภาพจะดูลักษณะรูปร่างการเปลี่ยนรูปของเป้าหลังทดลอง และการวิเคราะห์ด้วย FEM จะเป็นการสร้างแบบจำลองของการกระแทกของกระสุนปืนไปยังเป้าทดสอบแล้วดูผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นโดยพิจารณาพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ทั้งพลังงานจลน์ของเป้าและพลังงานความเครียดในแต่ละช่วงเวลา

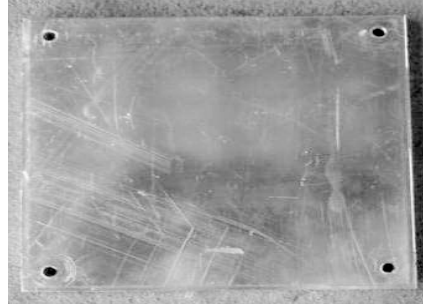
3.1 วิธีการวิเคราะห์โดยการทดลองทางกายภาพ

ในการวิเคราะห์โดยการทดลองทางกายภาพจะประกอบไปด้วยเครื่องมือและอุปกรณ์ดังนี้

1. แผ่นเป้าทดสอบโดยใช้วัสดุเนื้อเดียว 3 ชนิด คือ เหล็กกล้าเกรด AISI1008 อะลูมิเนียมเกรด AA1100 ที่มีความหนาต่างๆ คือ 2, 4 และ 6 มม. และอะลูมิเนียมเกรด AA5083 ที่มีความหนา 4 และ 6 มม. ขนาดกว้าง 140 มม. และยาว 140 มม. ตามรูปที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ
2. ปืนรุ่น Glock 19 และกระสุนชนิด 9 มม. Parabellum ดังรูปที่ 4
3. ตัวจับยึดแผ่นเป้าทดสอบซึ่งเมื่อประกอบเข้ากับแผ่นเป้าทดสอบแล้วตามรูปที่ 5



รูปที่ 1 แผ่นเหล็กกล้าเกรด AISI1008



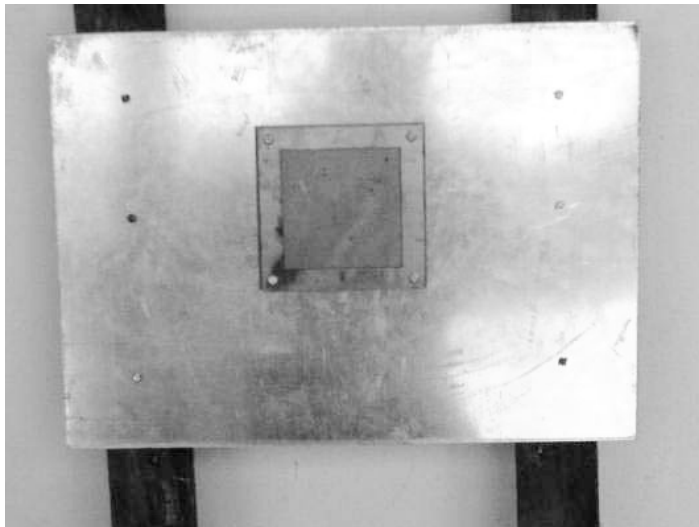
รูปที่ 2 แผ่นอะลูมิเนียมเกรด AA1100



รูปที่ 3 แผ่นอะลูมิเนียมเกรด AA5083



รูปที่ 4 ปืน Glock 19 และกระสุน 9 มม. Parabellum



รูปที่ 5 แผ่นเป่าทดสอบประกอบกับตัวจับยึด

ในการทดลองนั้นจะทำการยิงทดสอบที่สนามยิงปืน ตำรวจภูธรภาค 4 โดยมีขั้นตอนดังนี้คือ

1. นำแผ่นวัสดุทดสอบมาประกอบเข้ากับตัวจับยึดแผ่นเป้าทดสอบทีละแผ่น
2. หลังจากนั้นก็นำชุดแผ่นเป้าทดสอบที่มีการประกอบแล้วไปทำการยิงทีละแผ่นโดยใช้กระสุนชนิด 9 มม. Parabellum โดยมีระยะยิงทดสอบที่ 5 ม.
3. หลังจากยิงเสร็จแล้วนำแผ่นเป้าทดสอบของวัสดุแต่ละชนิดที่ความหนาต่างๆ กัน มาเปรียบเทียบรูปร่างและลักษณะของการเปลี่ยนรูปกับการทดลองเสมือนด้วยแบบจำลอง

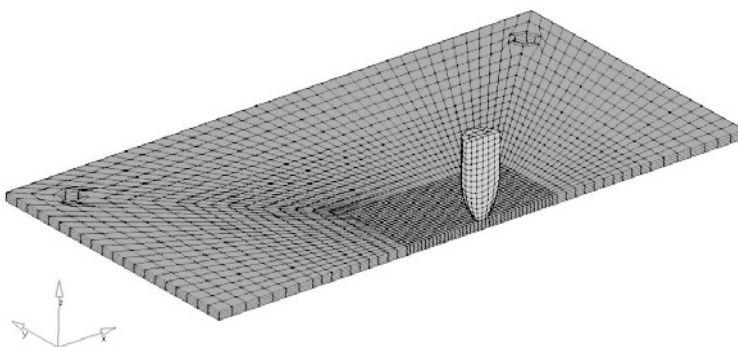
3.2 วิธีวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการวิเคราะห์การกระแทกของกระสุนปืนไปยังเป้าด้วย FEM จะทำโดยการสร้างแบบจำลอง CAD แล้วกำหนดสมบัติวัสดุให้กับวัสดุแต่ละชนิด กำหนดสมบัติที่ผิวสัมผัสระหว่างกระสุนปืนกับเป้าทดสอบ จากนั้นกำหนดสภาวะเงื่อนไขเริ่มต้นและการกำหนดสภาวะเงื่อนไขขอบให้มีความสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของระบบจริง แล้วทำการวิเคราะห์ในแต่ละสภาวะเงื่อนไขที่กำหนดไว้เพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบเทียบรูปร่างลักษณะของการเปลี่ยนรูปกับการทดลองทางกายภาพเพื่อนำไปทำการปรับปรุงแบบจำลองให้สอดคล้องกับการ

ทดลองจริงให้มากที่สุด หลังจากนั้นจะนำแบบจำลองที่ได้จากการปรับปรุงไปทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการต้านทานและความสามารถในการดูดซับพลังงานของเป้าทดสอบที่ความหนาต่างๆ และวัสดุที่ต่างชนิดกัน เมื่อเกิดการกระแทกจากกระสุนปืน

3.2.1 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการสร้าง FEM ของการกระแทกจากกระสุนปืนจะทำการสร้างเป็นแบบจำลองแบบ 3 มิติ เนื่องจากผลลัพธ์ที่ได้นั้นสามารถนำไปเปรียบเทียบกับทดลองทางกายภาพได้ครอบคลุมกว่าแบบ 2 มิติ โดยเฉพาะรูปร่างลักษณะการเปลี่ยนรูปของเป้า ทำการสร้างแบบจำลองเพียงครึ่งหนึ่งของแบบจำลองเต็มเนื่องจากความสมมาตรของระบบ สำหรับทั้งแผ่นเป้าและลูกกระสุนปืนนั้นจะใช้เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ทรง 6 หน้าทั้งหมด โดยในการแบ่งขนาดเอลิเมนต์ของแผ่นเป้าจะทำการแบ่งให้ละเอียดบริเวณที่สัมผัสกับกระสุนปืนโดยใช้ขนาดเอลิเมนต์กว้าง 1 มม. ยาว 1 มม. และแต่ละชั้นหนา 0.5 มม. สำหรับบริเวณอื่นๆ ก็แบ่งให้มีขนาดใหญ่ขึ้นคือตั้งแต่ 2.5 มม. ถึง 3.5 มม. เพื่อเป็นการประหยัดเวลาในการคำนวณซึ่งจำนวนเอลิเมนต์ของแผ่นเป้าที่มีความหนา 2, 4 และ 6 มม. คือ 8,672, 17,344 และ 26,016 เอลิเมนต์ ตามลำดับ ส่วนลูกกระสุนปืนประกอบด้วย 240 เอลิเมนต์ ซึ่ง FEM ของการกระแทกจากกระสุนปืนไปยังเป้า แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 แบบจำลองการกระแทกจากกระสุนปืนไปยังเป้าที่มีความหนา 2 มม.

3.2.2 การกำหนดสมบัติวัสดุ

สมบัติของวัสดุสามารถถูกแบ่งออกได้เป็นดังนี้ คือ สำหรับลูกกระสุนปืนจะกำหนดเป็น 2 ลักษณะเพื่อทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้คือแบบแรกกำหนดให้ลูกกระสุนปืนเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Body) และแบบที่สองกำหนดให้สามารถเปลี่ยนรูปได้ (Deformable Body) แบบ

จำลองวัสดุเป็นแบบ Plastic kinematic ในส่วนของแผ่นเป้าทดสอบนั้นจะใช้วัสดุ 3 ชนิดคือเหล็กกล้าเกรด AISI1008 อะลูมิเนียมเกรด AA1100 และเกรด AA5083 ซึ่งกำหนดให้สามารถเปลี่ยนรูปได้ แบบจำลองวัสดุเป็นแบบ Plastic kinematic โดยใช้สมบัติทางกลของวัสดุซึ่งสามารถได้จากตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย [10]

สมบัติ	AISI1008	AA1100	AA5083	Lead
Density (g/cm ³)	7.872	2.71	2.66	11.3
Tensile Strength, Ultimate (MPa)	303 - 358	89.6	290	18
Tensile Strength, Yield (MPa)	180 - 240	34.5	145	8
Tangent Modulus (MPa)	0	0	0	15
Elongation at Break (%)	42 - 48	35	22	-
Modulus of Elasticity (GPa)	200	68.9	70.3	14
Bulk Modulus (GPa)	140	-	-	-
Poisson's Ratio	0.29	0.33	0.33	0.42
Machining inability (%)	55	10	30	-
Shear Modulus (GPa)	80	26	26.4	-

3.2.3 การกำหนดชนิดของผิวสัมผัส

ในการกำหนดชนิดของผิวสัมผัสกันของลูกกระสุนปืนกับแผ่นเป้าในงานวิจัยนี้จะใช้เป็นแบบ Eroding Surface to Surface ซึ่งจะมีข้อดีคือเมื่อเอลิเมนต์ของแผ่นเป้าเกิดการเปลี่ยนรูปจนเลยค่า Failure Strain โปรแกรมจะทำการลบเอลิเมนต์ที่เกิดการเปลี่ยนรูปเลยค่านั้นออกไป ซึ่งจะทำให้แบบจำลองที่ได้มีความใกล้เคียงกับความเป็นจริง

3.2.4 การกำหนดเงื่อนไขขอบ

ในการกำหนดเงื่อนไขขอบ (Boundary Conditions) ของแผ่นเป้าจะทำการจับยึดบริเวณซึ่งจะไม่สามารถเคลื่อนที่และหมุนได้ในทุกแนวแกน ส่วนในด้านขอบที่แบ่งจำลองครึ่งเดียวของทั้งแผ่นเป้าและลูกกระสุนปืนจะกำหนดให้ไม่สามารถเคลื่อนที่ในแนวแกน Y และไม่สามารถหมุนได้ในแนวแกน X และแกน Z ซึ่งจะช่วยให้ใช้เวลาในการคำนวณลดลงเนื่องจากการคำนวณปัญหาในลักษณะนี้จะใช้พื้นที่ในหน่วยความจำของระบบคอมพิวเตอร์

สูงมาก โดยเงื่อนไขขอบในลักษณะนี้จะถูกใช้กับวัสดุทุกชนิดและที่ความหนาต่างๆ

3.2.5 การกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น

การกำหนดเงื่อนไขความเร็วเริ่มต้นของลูกกระสุนปืนแบ่งเป็นขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดความเร็วเริ่มต้นของลูกกระสุนปืนให้มีความเร็ว 100 และ 200 ม./วินาที ทั้งในส่วน of แบบจำลองที่กำหนดให้ลูกกระสุนปืนเป็นวัตถุแข็งเกร็ง และแบบเปลี่ยนรูปได้ เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทั้ง 2 รวมทั้งที่ความเร็ว 100 และ 200 ม./วินาที กับการทดลองทางกายภาพโดยใช้ลักษณะการเปลี่ยนรูปของเป้าเป็นตัวเปรียบเทียบ

ขั้นตอนที่ 2 จากผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ในขั้นตอนแรก เมื่อนำมาเปรียบเทียบรูปร่างลักษณะการเปลี่ยนรูปของเป้าในการทดลองทางกายภาพแล้ว จึงทำการปรับปรุงแบบจำลองโดยนำแบบจำลองที่กำหนดให้ลูกกระสุนปืนแบบเปลี่ยนรูปได้ ซึ่งจะมีรูปร่างลักษณะของ

การเปลี่ยนรูปใกล้เคียงกับผลการทดลองทางกายภาพมากกว่าแบบจำลองที่กำหนดให้ลูกกระสุนปืนเป็นวัตถุแข็งเกร็ง โดยนำมาปรับความเร็วเริ่มต้นของลูกกระสุนปืนเป็น 120 ม./วินาที เพื่อมาเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นกับการเปลี่ยนรูปของเป้า แล้วนำแบบจำลองที่ได้มาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของวัสดุแต่ละชนิดในการรองรับการกระแทกจากกระสุนปืน ซึ่งจะนำไปเป็นแนวทางในการพิจารณาเลือกใช้วัสดุให้เหมาะสมต่อไป

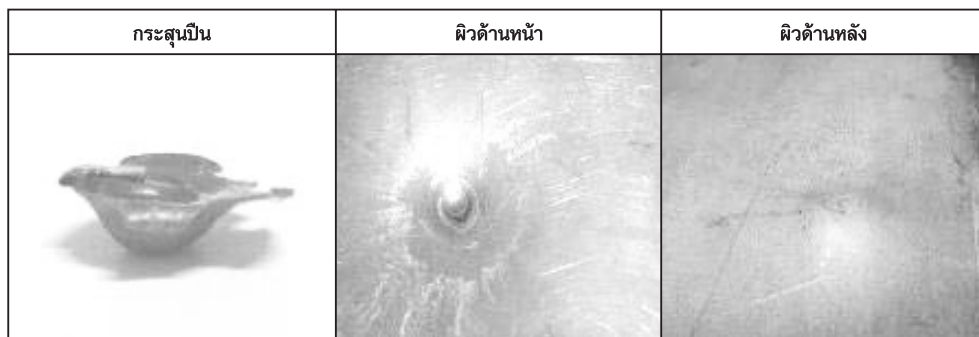
4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการวิจัยโดยการทดลองทางกายภาพ

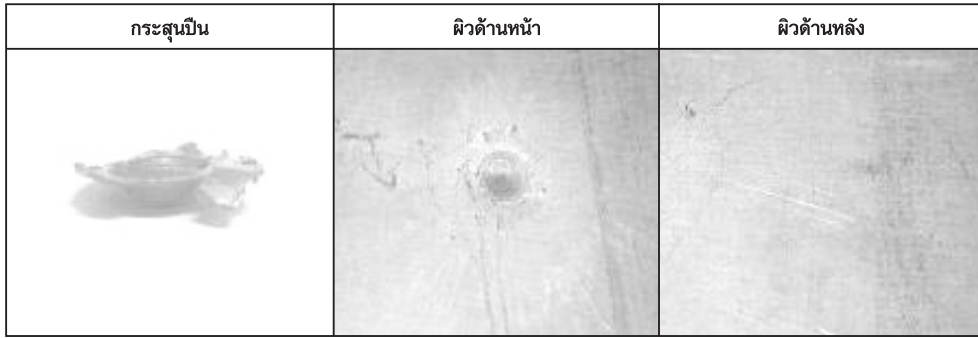
ผลการทดลองทางกายภาพในการยิงทดสอบวัสดุเนื้อเดียว 3 ชนิด ซึ่งจะแสดงลักษณะการเปลี่ยนรูปของกระสุนปืนและแผ่นวัสดุทดสอบ สำหรับกรณีแผ่นเหล็กกล้าเกรด AISI1008 แสดงในรูปแบบที่ 7, 8 และ 9 ที่ความหนา 2, 4 และ 6 มม. ตามลำดับ



รูปที่ 7 ลักษณะการเปลี่ยนรูปของกระสุนปืนและแผ่นเหล็กกล้าเกรด AISI1008 ที่ความหนา 2 มม.



รูปที่ 8 ลักษณะการเปลี่ยนรูปของกระสุนปืนและแผ่นเหล็กกล้าเกรด AISI1008 ที่ความหนา 4 มม.



รูปที่ 9 ลักษณะการเปลี่ยนรูปของกระสุนปืนและแผ่นเหล็กกล้าเกรด AISI1008 ที่ความหนา 6 มม.

จากในรูปที่ 7, 8 และ 9 จะเห็นว่าแผ่น AISI1008 ที่ความหนา 2 มม. จะเกิดการเปลี่ยนรูปมากที่สุดโดยมีลักษณะเป็นรูปโค่นกดลึกลงจากผิวด้านหน้าที่ถูกกระแทกจากกระสุนปืนไปยังผิวด้านหลังแต่ยังไม่ทะลุ ส่วนที่ความหนา 4 มม. ก็จะมีการรอยกดหรือรอยบุ๋มลึกลงไปแต่ไม่ลึกมากนักและมีการเปลี่ยนรูปน้อยกว่าที่ความหนา 2 มม. และ

สำหรับที่ความหนา 6 มม. จะพบว่ามีการเปลี่ยนรูปน้อยมากโดยมีรอยกดลึกลงไปเล็กน้อยจากผิวด้านหน้า ส่วนผิวด้านหลัง ถ้าสังเกตจะพบว่าแทบมองไม่เห็นรอยกดลึกลงไปทำนองเดียวกันในกรณี AA1100 ลักษณะการเปลี่ยนรูปของกระสุนปืนและแผ่นทดสอบที่ความหนา 2, 4 และ 6 มม. แสดงในรูปที่ 10, 11 และ 12 ตามลำดับ



รูปที่ 10 ลักษณะการเปลี่ยนรูปของกระสุนปืนและแผ่นอะลูมิเนียมเกรด AA1100 ที่ความหนา 2 มม.



รูปที่ 11 ลักษณะการเปลี่ยนรูปของกระสุนปืนและแผ่นอะลูมิเนียมเกรด AA1100 ที่ความหนา 4 มม.



รูปที่ 12 ลักษณะการเปลี่ยนรูปของกระสุนปืนและแผ่นอะลูมิเนียมเกรด AA1100 ที่ความหนา 6 มม.

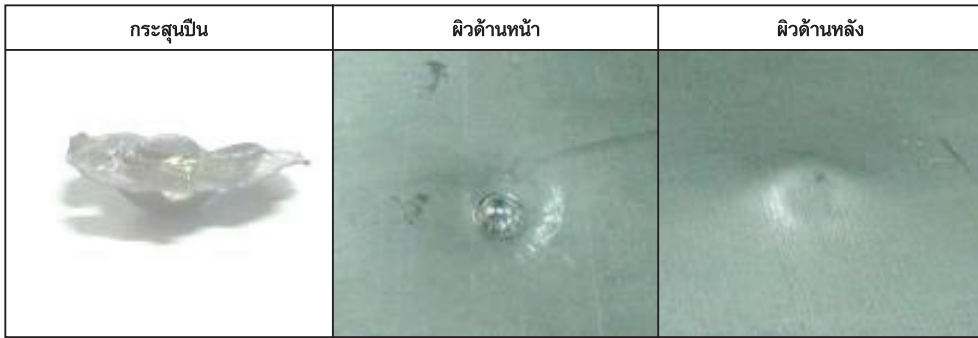
ในรูปที่ 10, 11 และ 12 แสดงให้เห็นว่าแผ่น AA1100 ที่ทุกๆ ความหนาเมื่อถูกกระแทกจากกระสุนปืนจะทะลุทั้งหมดโดยที่ความหนา 2 มม. จะเกิดรอยกดลงไปบริเวณขอบที่มีการทะลุของผิวด้านหน้าจะเกิดเป็นวงแคบๆ และผิวด้านหลังก็จะมีการเปลี่ยนรูปมีลักษณะรูปร่างเป็นโคนยื่นออกไปด้านหลังของแผ่นอะลูมิเนียมนอกจากนี้ที่ความหนา 4 มม. และ 6 มม. เกิดการเปลี่ยนรูปในลักษณะเดียวกันที่ผิวด้านหลัง ส่วนผิวด้านหน้าที่ความหนา 4 มม. บริเวณใกล้เคียง ขอบที่มีการทะลุของผิวด้านหน้าจะเกิดรอยกดลงไป

ส่วนที่ขอบจะมีเนื้อวัสดุยื่นออกมาเล็กน้อย และสำหรับที่ความหนา 6 มม. ผิวด้านหน้าจะมีเนื้อวัสดุยื่นขึ้นมาบริเวณขอบที่มีการทะลุโดยจะเปลี่ยนรูปมากกว่าที่ความหนา 4 มม.

และในทำนองเดียวกัน ในกรณีสุดท้าย AA5083 ผลการยิงทดสอบที่ความหนา 4 มม. และ 6 มม. แสดงในรูปที่ 13 และ 14 ตามลำดับ โดยที่ความหนา 2 มม. ไม่มีการทดสอบเนื่องจากมีข้อจำกัดในการจัดซื้อวัสดุทดสอบ



รูปที่ 13 ลักษณะการเปลี่ยนรูปของกระสุนปืนและแผ่นอะลูมิเนียมเกรด AA5083 ที่ความหนา 4 มม.



รูปที่ 14 ลักษณะการเปลี่ยนรูปของกระสุนปืนและแผ่นอะลูมิเนียมเกรด AA5083 ที่ความหนา 6 มม.

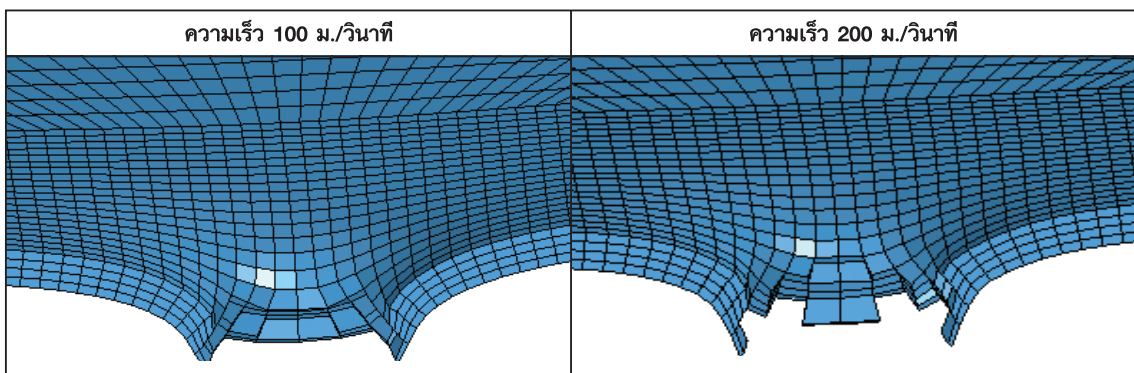
สำหรับในรูปที่ 13 และ 14 จะเห็นว่าแผ่น AA5083 จะสามารถทนรับแรงจากการกระแทกของกระสุนปืนได้ ทั้งความหนา 4 มม. และ 6 มม. ไม่มีการทะลุ โดยที่ความหนา 4 มม. จะเกิดรอยกดลงไปเป็นรูปโคนโดยมีการเปลี่ยนรูปคล้ายของแผ่นเหล็กเกรด AISI1008 ซึ่งที่ผิวด้านหลังจะเริ่มมีรอยปริบริเวณรอบๆ รอยกดที่ผิวด้านหลัง และที่ความหนา 6 มม. เกิดการเปลี่ยนรูปในลักษณะเดียวกันกับที่ความหนา 4 มม. แต่จะเกิดน้อยกว่า

4.2 ผลการวิจัยจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ การวิเคราะห์ด้วย FEM โดยปรับเปลี่ยนสภาวะ

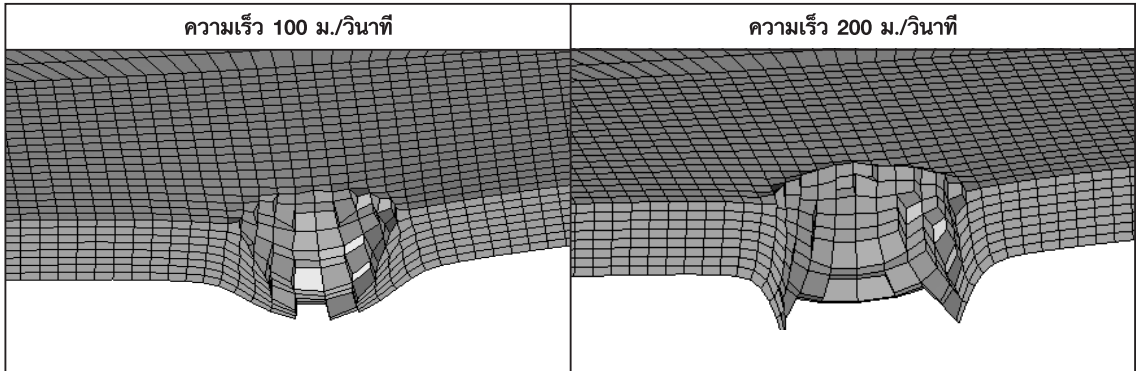
เงื่อนไขต่างๆ (ใช้ LS-DYNA) ทั้งแบบจำลองวัสดุของลูกกระสุนปืน ความเร็วเริ่มต้น วัสดุที่ใช้ และความหนาต่างๆ จะได้ผลลัพธ์ดังนี้

4.2.1 แบบจำลองแบบแข็งเกร็งและแบบเปลี่ยนรูปได้ที่ความเร็วเริ่มต้น 100 และ 200 ม./วินาที

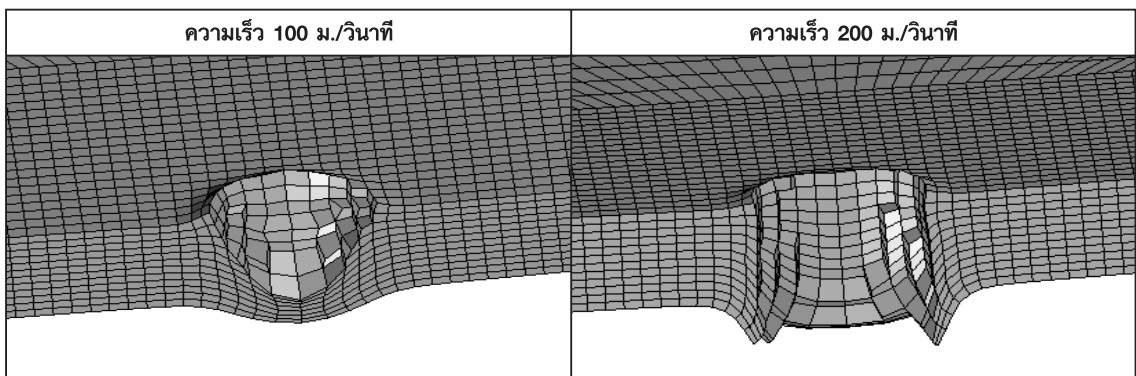
ผลการวิเคราะห์แบบจำลองกรณี AISI1008 ที่ให้ลูกกระสุนปืนเป็นวัตถุแข็งเกร็ง มีความเร็วเริ่มต้น (v_0) 100 และ 200 ม./วินาที แสดงการเปลี่ยนรูปที่ความหนา 2, 4 และ 6 มม. ตามรูปที่ 15, 16 และ 17 ตามลำดับ



รูปที่ 15 การเปลี่ยนรูปของแผ่น AISI1008 หนา 2 มม. กระสุนปืนแข็งเกร็ง $v_0 = 100$ และ 200 ม./วินาที



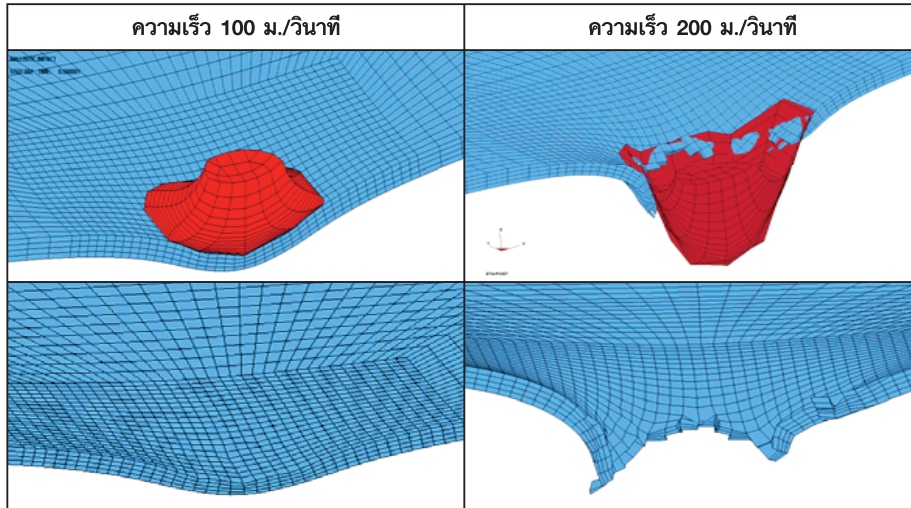
รูปที่ 16 การเปลี่ยนรูปของแผ่น AISI1008 ทหนา 4 มม. กระสุนปืนแข็งเกร็ง $v_0 = 100$ และ 200 ม./วินาที



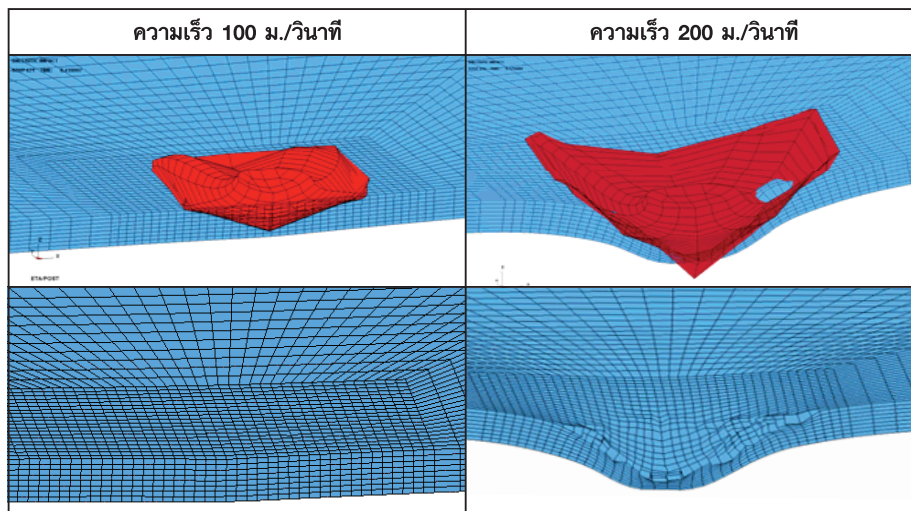
รูปที่ 17 การเปลี่ยนรูปของแผ่น AISI1008 ทหนา 6 มม. กระสุนปืนแข็งเกร็ง $v_0 = 100$ และ 200 ม./วินาที

ผลการวิเคราะห์แบบจำลองของแผ่นเหล็กกล้าเกรด AISI1008 ที่กำหนดให้ลูกกระสุนปืนเปลี่ยนรูปได้ มีความเร็วเริ่มต้น (v_0) 100 และ 200 ม./วินาที แสดงการ

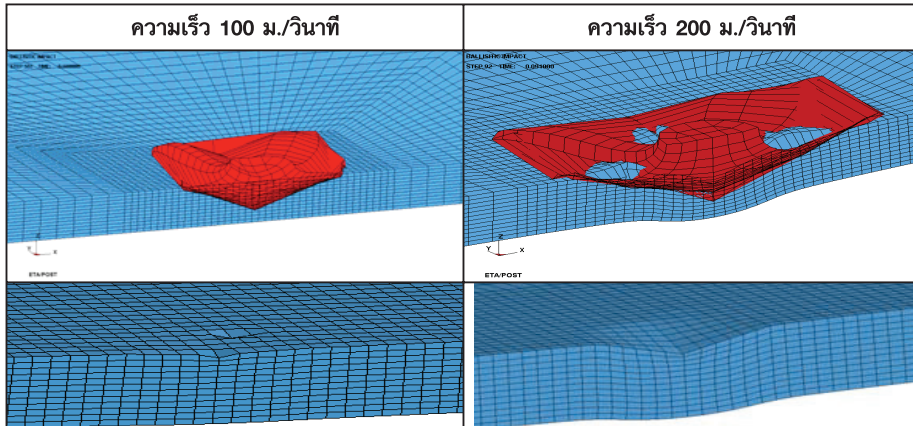
เปลี่ยนรูปที่ความหนา 2, 4 และ 6 มม. ตามรูปที่ 18, 19 และ 20 ตามลำดับ



รูปที่ 18 การเปลี่ยนรูปของแผ่น AISI1008 ทหนา 2 มม. กระสุนปืนเปลี่ยนรูปได้ $v_0 = 100$ และ 200 ม./วินาที



รูปที่ 19 การเปลี่ยนรูปของแผ่น AISI1008 ทหนา 4 มม. กระสุนปืนเปลี่ยนรูปได้ $v_0 = 100$ และ 200 ม./วินาที



รูปที่ 20 การเปลี่ยนรูปของแผ่น AISI1008 ทหนา 6 มม. กระสุนปืนเปลี่ยนรูปได้ $v_0 = 100$ และ 200 ม./วินาที

กรณีแผ่น AISI1008 โดยการกำหนดให้กระสุนปืนเป็นวัตถุแข็งเกร็ง จะพบว่าที่ความเร็วเริ่มต้น 100 ม./วินาที ที่ความหนา 2 มม. แผ่น AISI1008 จะทะลุ ส่วนที่ความหนา 4 และ 6 มม. เกือบจะทะลุ และที่ความเร็วเริ่มต้น 200 ม./วินาที จะทะลุทุกๆ ความหนา ขณะที่ถ้ากำหนดให้ลูกกระสุนปืนเปลี่ยนรูปได้ จะพบว่าความเร็วเริ่มต้น 100 ม./วินาที แผ่น AISI1008 จะไม่ทะลุทุกๆ ความหนา และความเร็วเริ่มต้น 200 ม./วินาที ที่ความหนา 2 มม. จะทะลุ

ส่วนความหนา 4 มม. เกือบทะลุ และความหนา 6 มม. จะเปลี่ยนรูปเล็กน้อย

ด้วยการทดสอบเสมือนทำนองเดียวกัน เพื่อให้การนำเสนอเป็นไปอย่างกระชับจึงได้สรุปผลการวิเคราะห์แบบจำลองโดยกำหนดให้ลูกกระสุนปืนเป็นวัตถุแข็งเกร็ง และแบบเปลี่ยนรูปได้ ที่ความเร็วเริ่มต้น 100 และ 200 ม./วินาที และเปรียบเทียบกับกรยิงทดสอบทางกายภาพตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองแบบแข็งเกร็งและแบบเปลี่ยนรูปได้ ที่ความเร็วเริ่มต้น 100 และ 200 ม./วินาที เปรียบเทียบกับการทดสอบทางกายภาพ

ชนิดวัสดุ	วัตถุแข็งเกร็ง		วัตถุเปลี่ยนรูปได้		การทดสอบทางกายภาพ
	100 ม./วินาที	200 ม./วินาที	100 ม./วินาที	200 ม./วินาที	
AISI1008 2 มม.	ทะลุ	ทะลุ	ไม่ทะลุ	ทะลุ	ไม่ทะลุ
AISI1008 4 มม.	ไม่ทะลุ	ทะลุ	ไม่ทะลุ	ไม่ทะลุ	ไม่ทะลุ
AISI1008 6 มม.	ไม่ทะลุ	ทะลุ	ไม่ทะลุ	ไม่ทะลุ	ไม่ทะลุ
AA1100 2 มม.	ทะลุ	ทะลุ	ทะลุ	ทะลุ	ทะลุ
AA1100 4 มม.	ทะลุ	ทะลุ	ทะลุ	ทะลุ	ทะลุ
AA1100 6 มม.	ทะลุ	ทะลุ	ไม่ทะลุ	ทะลุ	ทะลุ
AA5083 4 มม.	ทะลุ	ทะลุ	ไม่ทะลุ	ไม่ทะลุ	ไม่ทะลุ
AA5083 6 มม.	ไม่ทะลุ	ทะลุ	ไม่ทะลุ	ไม่ทะลุ	ไม่ทะลุ

4.2.2 แบบจำลองแบบเปลี่ยนรูปได้ ที่ความเร็วเริ่มต้น 120 ม./วินาที

จากการทดสอบด้วย FEM ในรูปแบบเดียวกัน โดยให้กระสุนปืนเป็นแบบเปลี่ยนรูปได้ ที่ความเร็วเริ่มต้น 120 ม./วินาที และเปรียบเทียบกับกรวยทดสอบทางกายภาพ เพื่อให้การนำเสนอเป็นไปอย่างกระชับจึงสามารถสรุปผลวิเคราะห์ได้ตามตารางที่ 3

จากผลการวิเคราะห์ทำให้ทราบว่าแบบจำลองกระสุนปืนแบบเปลี่ยนรูปได้ ที่ความเร็วเริ่มต้น 120 ม./วินาที มีความสอดคล้องกับผลการทดลองทางกายภาพมากที่สุด ดังนั้นจึงจะใช้สภาวะเงื่อนไขในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการต้านทานและความสามารถในการดูดซับพลังงานของเป้าทดสอบที่ความหนาต่างๆ และวัสดุที่ต่างชนิดกัน

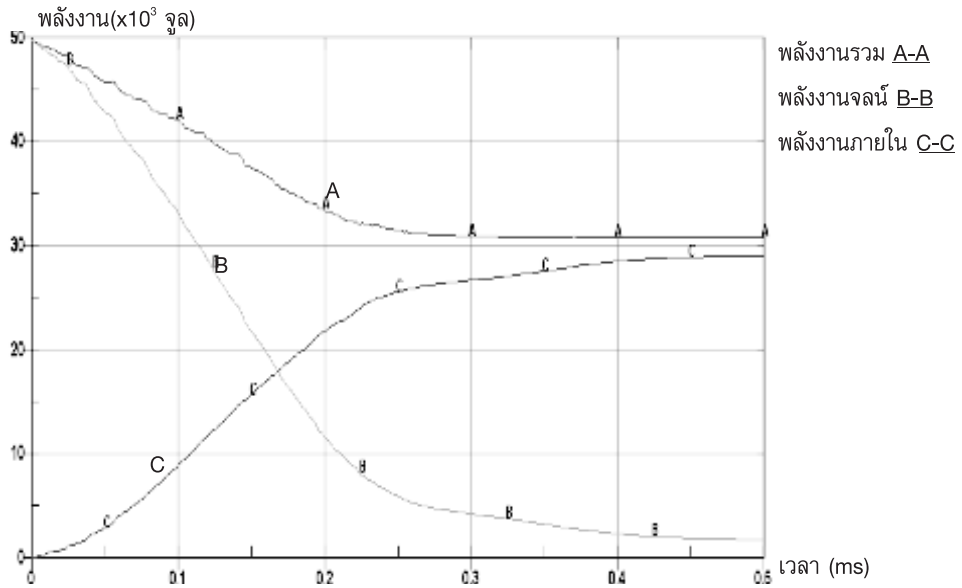
ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองแบบเปลี่ยนรูปได้ ที่ความเร็วเริ่มต้น 120 ม./วินาที เปรียบเทียบกับการยิงทดสอบทางกายภาพ

ชนิดวัสดุ	120 ม./วินาที	ทดสอบทางกายภาพ
AISI1008 2 มม.	ไม่ทะลุ	ไม่ทะลุ
AISI1008 4 มม.	ไม่ทะลุ	ไม่ทะลุ
AISI1008 6 มม.	ไม่ทะลุ	ไม่ทะลุ
AA1100 2 มม.	ทะลุ	ทะลุ
AA1100 4 มม.	ทะลุ	ทะลุ
AA1100 6 มม.	ทะลุ	ทะลุ
AA5083 4 มม.	ไม่ทะลุ	ไม่ทะลุ
AA5083 6 มม.	ไม่ทะลุ	ไม่ทะลุ

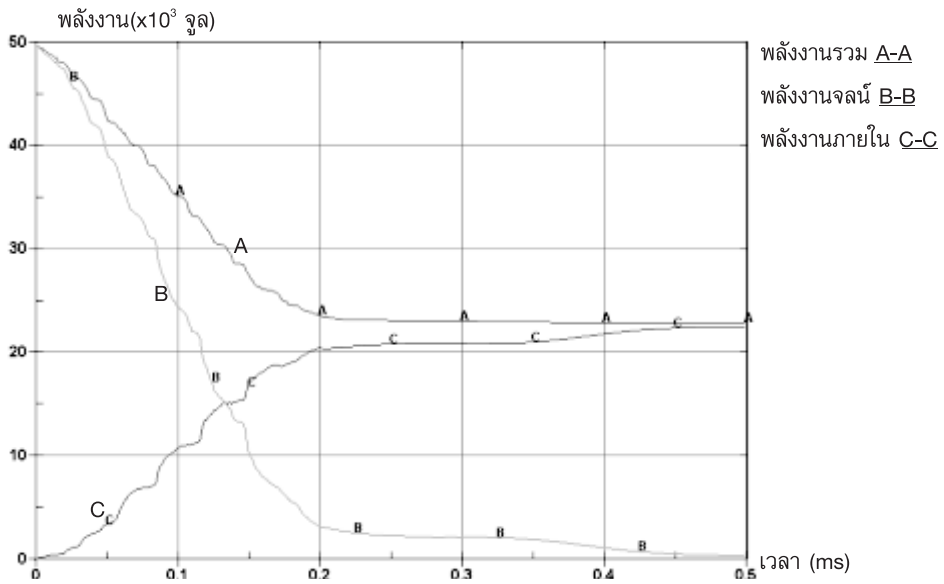
4.2.3 ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลง พลังงานในแบบจำลอง

ในการศึกษานี้ใช้ความเร็วเริ่มต้น 120 ม./วินาที และแบบจำลองกระสุนปืนแบบเปลี่ยนรูปได้ โดยรูปที่ 21,

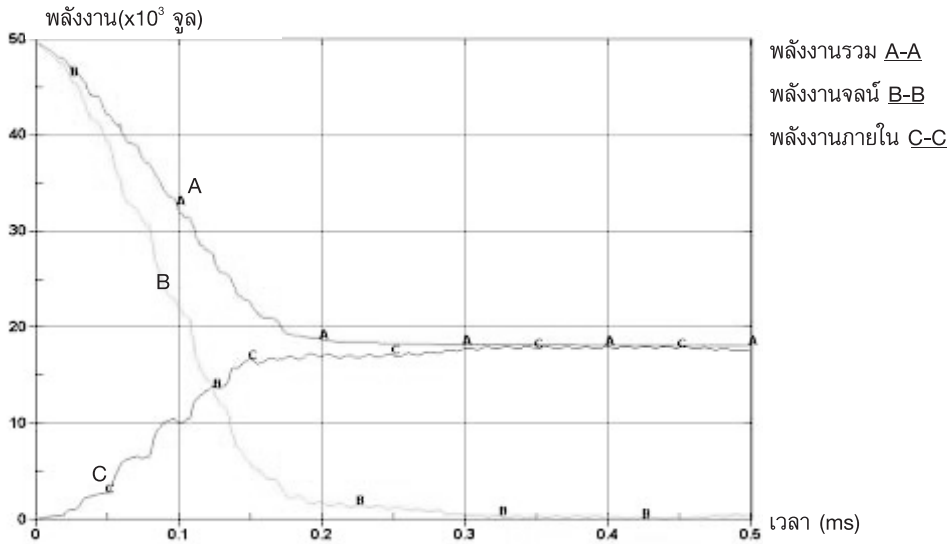
22 และ 23 แสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงพลังงานในแบบจำลองกรณีแผ่น AISI1008 ที่ความหนา 2, 4 และ 6 มม. ตามลำดับ



รูปที่ 21 ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงพลังงานกรณีแผ่น AISI1008 ความหนา 2 มม.



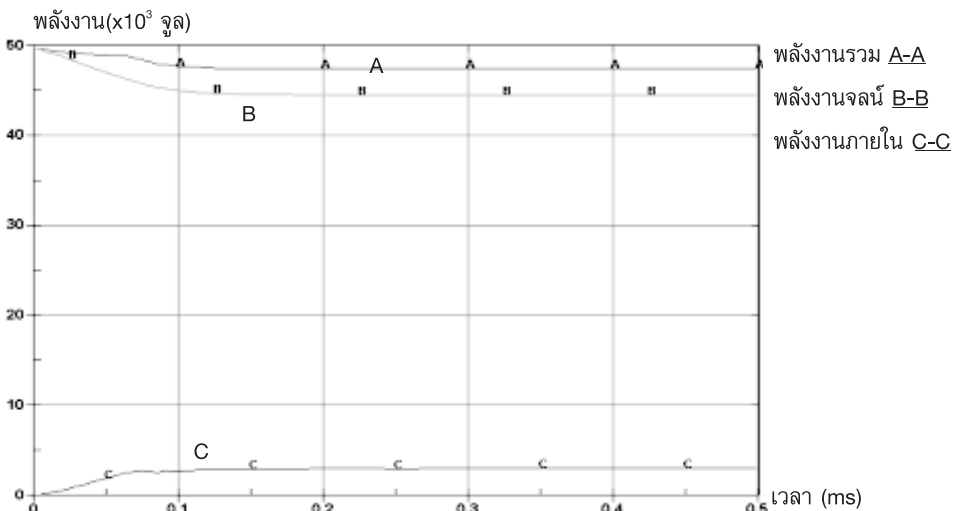
รูปที่ 22 ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงพลังงานกรณีแผ่น AISI1008 ความหนา 4 มม.



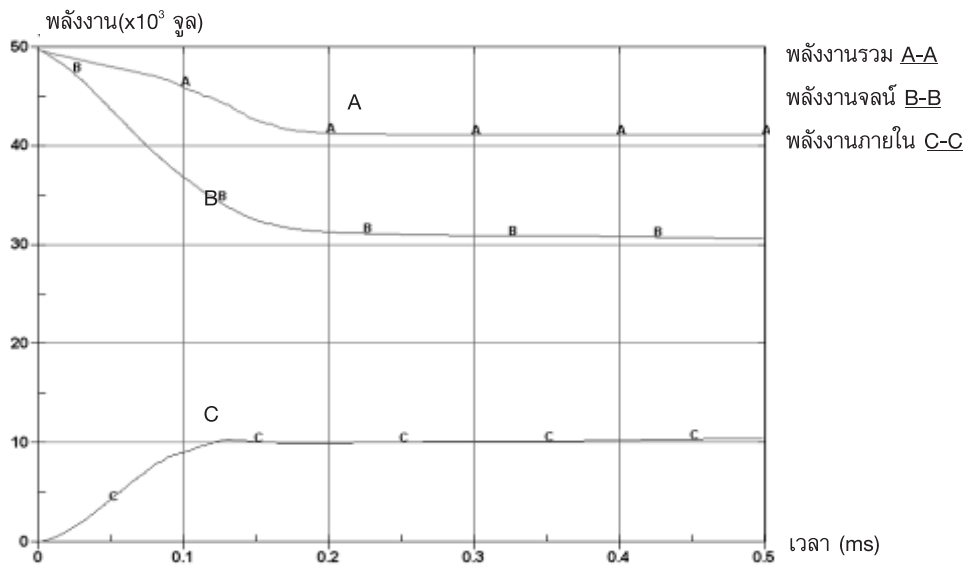
รูปที่ 23 ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงพลังงานกรณีแผ่น AISI1008 ความหนา 6 มม.

สำหรับกรณี AISI1008 ที่ความหนา 2 มม. พลังงานจลน์ (Kinetic Energy) จะมีการเปลี่ยนเป็นพลังงานภายใน (Internal Energy) ของแบบจำลอง โดยมีค่าที่สูงกว่าที่ความหนา 4 มม. เล็กน้อยแต่เมื่อเทียบกับที่ความหนา 6 มม. แล้วจะมีค่าที่สูงกว่าพอสมควร ซึ่งทำให้ที่ความหนา 2 มม. จะมีการเปลี่ยนรูปมากกว่าที่ความหนา 4 และ 6 มม.

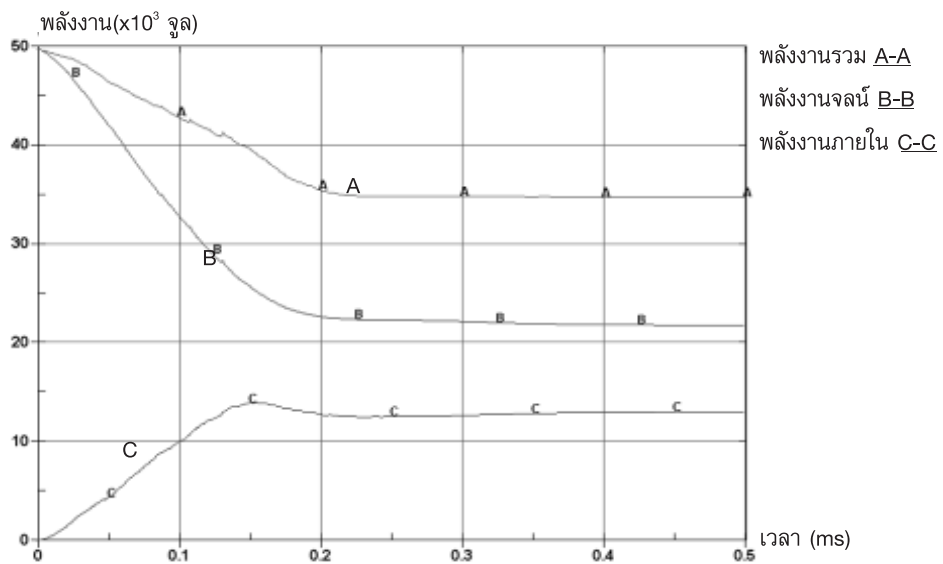
โดยพลังงานส่วนหนึ่งจะสูญเสียไปกับการหายไปของเอลิเมนต์เนื่องจากเปลี่ยนรูปของกระสุนปืนและแผ่นเป้าทดสอบ รูปที่ 24, 25 และ 26 แสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงพลังงานกรณีแผ่น AA1100 ที่ความหนา 2, 4 และ 6 มม. ตามลำดับ



รูปที่ 24 ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงพลังงานกรณีแผ่น AA1100 ความหนา 2 มม.



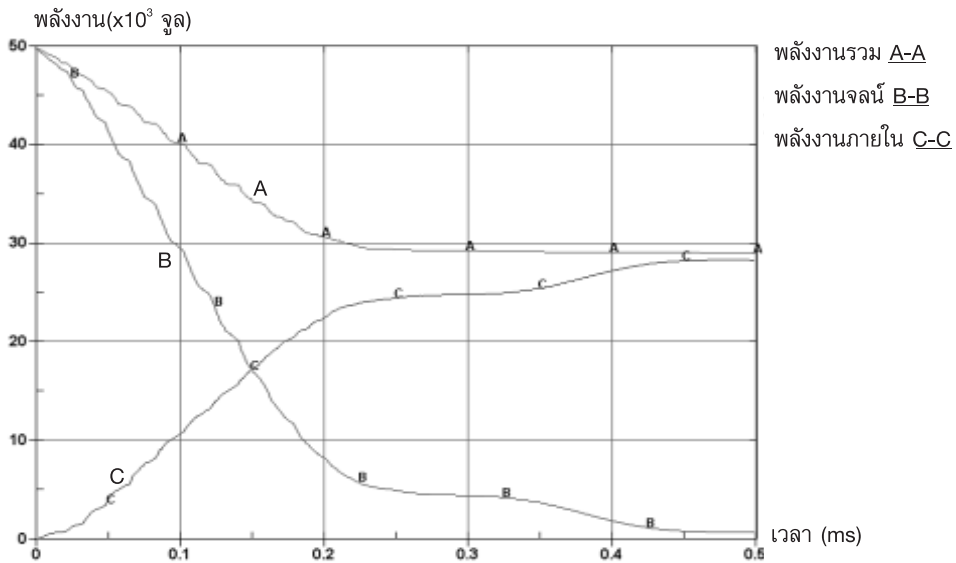
รูปที่ 25 ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงพลังงานกรณีแผ่น AA1100 ความหนา 4 มม.



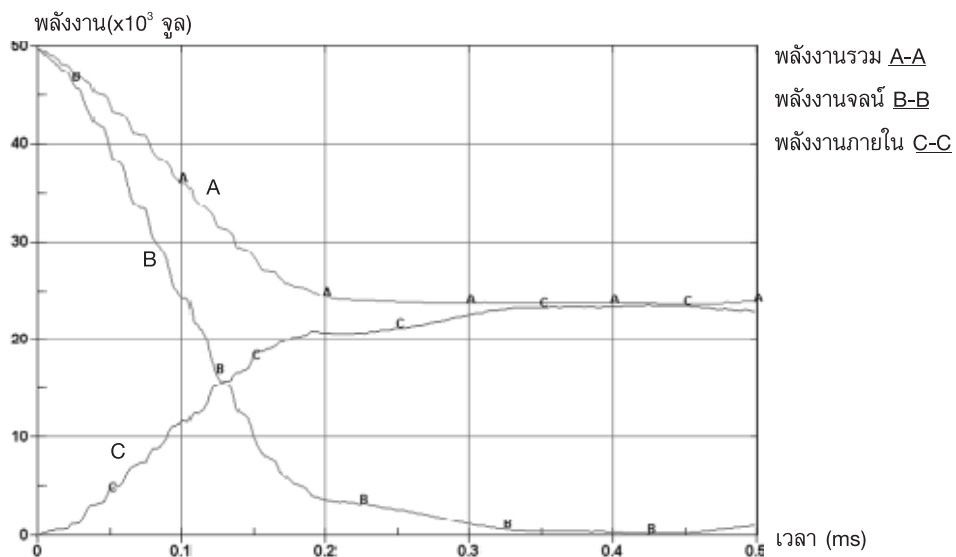
รูปที่ 26 ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงพลังงานกรณีแผ่น AA1100 ความหนา 6 มม.

สำหรับกรณี AA1100 พบว่าที่ทุกความหนา พลังงานจลน์จะมีการเปลี่ยนเป็นพลังงานภายในของแบบจำลองอย่างรวดเร็วจากนั้นก็คงที่ โดยที่ความหนา 2 มม. จะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด และจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความหนาที่เพิ่มขึ้นโดยที่ความหนา 6 มม. มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่าที่ความหนา 2 มม. จะมีการเปลี่ยนรูปร่างอย่างรวดเร็วก่อนจะทะลุ เช่น

เดียวกับที่ความหนา 4 และ 6 มม. ก็จะเปลี่ยนรูปก่อนทะลุเช่นเดียวกัน แต่จะมีความสามารถในการดูดซับพลังงานได้มากกว่า โดยที่ความหนา 6 มม. จะมีความสามารถในการดูดซับพลังงานมากที่สุดเพราะมีมวลมากที่สุด รูปที่ 27 และ 28 แสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงพลังงานในแบบจำลองกรณีแผ่น AA5083 ที่ความหนา 4 และ 6 มม. ตามลำดับ



รูปที่ 27 ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงพลังงานกรณีแผ่น AA5083 ความหนา 4 มม.



รูปที่ 28 ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงพลังงานกรณีแผ่น AA5083 ความหนา 6 มม.

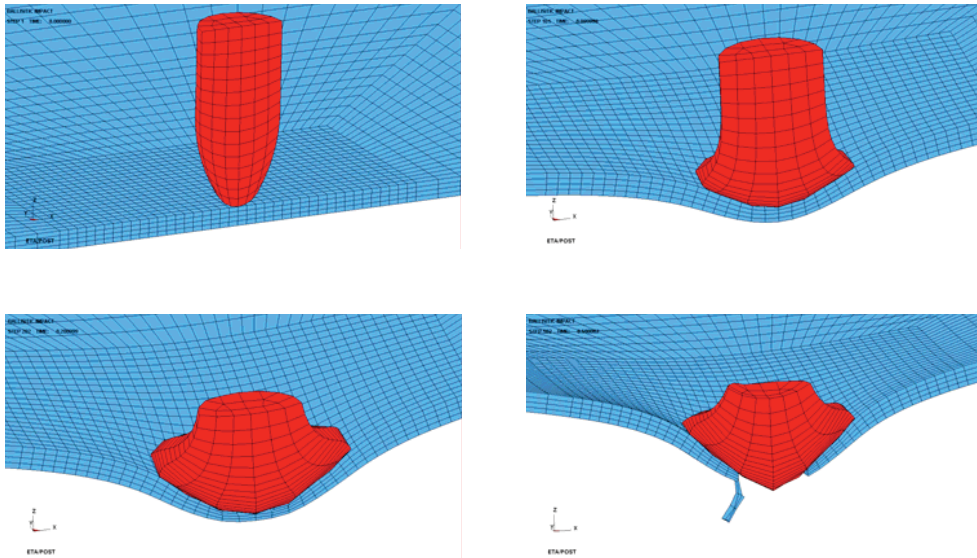
สำหรับกรณี AA5083 พบว่าที่ความหนา 4 มม. พลังงานจลน์จะมีการเปลี่ยนเป็นพลังงานภายใน โดยมีค่าที่สูงกว่าที่ความหนา 6 มม. ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่าที่ความหนา 4 มม. จะมีการเปลี่ยนรูปโดยรวมมากกว่าที่ความหนา 6 มม.

จากผลการวิเคราะห์ทั้งหมดข้างต้นพบว่าประสิทธิภาพในการต้านทานและความสามารถในการดูดซับพลังงานของเป่าทดสอบที่ความหนาต่างๆและวัสดุที่ต่างชนิดกันนั้นแผ่น AISI1008 ความหนา 6 มม. จะมีประสิทธิภาพในการต้านทานและสามารถดูดซับพลังงานที่เกิดจากการกระแทกของกระสุนปืนมากที่สุดเนื่องจากเกิดการเปลี่ยนรูปน้อยที่สุด ส่วนแผ่น AA1100 ที่ความหนา 2 มม. นั้นจะมีประสิทธิภาพในการต้านทานและสามารถ

ดูดซับพลังงานที่เกิดจากการกระแทกของกระสุนปืนน้อยที่สุดเนื่องจากเกิดการทะลุและเปลี่ยนรูปเร็วที่สุด

4.2.4 การพยากรณ์กรณีแผ่นอะลูมิเนียมเกรด AA5083 ที่ความหนา 2 มม.

กรณีหนึ่งซึ่งไม่ได้ทดสอบทางกายภาพคือแผ่น AA5083 ที่ความหนา 2 มม. ซึ่งในการทดลองจริงที่ความหนา 4 มม. นั้นให้ผลทดลองว่าใกล้จะทะลุ ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์ที่ใช้ FEM เพื่อทำการพยากรณ์กรณีแผ่น AA5083 ที่ความหนา 2 มม. ที่กำหนดให้กระสุนปืนเปลี่ยนรูปได้ มีความเร็วเริ่มต้น 120 ม./วินาที โดยแสดงผลการพยากรณ์การเปลี่ยนรูปในรูปที่ 29 พยากรณ์ว่า AA5083 ที่ความหนา 2 มม. จะทะลุ



รูปที่ 29 การเปลี่ยนรูปของแผ่น AA5083 ที่ความหนา 2 มม.

5. สรุป

ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองทางกายภาพและจากการวิเคราะห์ด้วย FEM ในงานวิจัยนี้สามารถสรุปเป็นข้อใหญ่ๆ ได้ดังนี้

1. กรณี AISI1008 พบว่าที่ความหนา 2 มม. พลังงานจลน์จะมีการเปลี่ยนเป็นพลังงานภายใน โดยมีค่าที่สูงกว่าที่ความหนา 4 และ 6 มม. ซึ่งเป็นการแสดง

ให้เห็นว่าที่ความหนา 2 มม. จะมีการเปลี่ยนรูปมากกว่าที่ความหนา 4 และ 6 มม. แม้ว่าค่าพลังงานภายในที่แสดงนี้เป็นผลรวมทั้งหมด เนื่องจากลูกกระสุนปืนเปลี่ยนรูปมากที่ความหนา 4 และ 6 มม. ตามลำดับ ทั้งนี้แผ่นเป่าทั้ง 3 ความหนาสามารถทนการกระแทกของกระสุนปืนโดยไม่ทะลุได้

2. กรณี AA1100 พบว่าที่ทุกความหนาจะมีการ

เปลี่ยนแปลงพลังงานภายในระบบของแบบจำลองอย่างรวดเร็วจากนั้นก็คงที่ โดยที่ความหนา 2 มม. จะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยสุด และที่ความหนา 6 มม. มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่าที่ความหนา 2 มม. จะมีการเปลี่ยนรูปร่างอย่างรวดเร็วก่อนจะทะลุ และที่ความหนา 4 และ 6 มม. ก็จะเปลี่ยนรูปร่างก่อนทะลุเช่นเดียวกัน แต่จะมีความต้านทานการทะลุมากกว่า โดยที่ความหนา 6 มม. จะมีความต้านทานการทะลุมากที่สุด ทั้งนี้สามารถสังเกตเห็นว่าพลังงานจลน์ของระบบยังมีค่าสูงอยู่ แสดงให้เห็นว่ากระสุนยังคงมีความเร็วอยู่ หรือแสดงว่ากระสุนได้ทะลุผ่านเป้าหมาย

3. กรณี AA5083 พบว่าที่ความหนา 4 มม. พลังงานจลน์มีการเปลี่ยนเป็นพลังงานภายใน โดยมีค่าสูงกว่าความหนา 6 มม. แสดงให้เห็นว่าที่ความหนา 4 มม. จะมีการเปลี่ยนรูปร่างมากกว่าที่ความหนา 6 มม. สามารถสรุปได้คล้ายกับกรณีของ AISI1008 แม้ว่าจะไม่มีการทดสอบกับ AA5083 ที่ความหนา 2 มม. แต่จากการสังเกตกรณี 4 มม. พบว่าแผ่นเป้าหมายจะทะลุแล้ว จึงได้มีการทดสอบโดยใช้ FEM พยากรณ์ได้ว่าที่ความหนา 2 มม. กระสุนจะสามารถทะลุผ่านได้

4. จากผลการวิเคราะห์ทั้งหมดข้างต้นพบว่าประสิทธิภาพในการต้านทานและความสามารถในการดูดซับพลังงานของเป้าหมายที่ความหนาต่างๆ และวัสดุที่ต่างชนิดกันนั้นแผ่นเหล็กกล้าเกรด AISI1008 ความหนา 6 มม. จะมีประสิทธิภาพในการต้านทานพลังงานที่เกิดจากการกระแทกของกระสุนปืนมากที่สุดเนื่องจากเกิดการเปลี่ยนรูปร่างน้อยที่สุด หรืออาจกล่าวได้ว่าสามารถสะท้อนพลังงานกลับไปสู่ผู้กระสุนแทน ส่วนแผ่นอะลูมิเนียมเกรด AA1100 ที่ความหนา 2 มม. นั้นจะมีประสิทธิภาพในการต้านทานและสามารถดูดซับพลังงานที่เกิดจากการกระแทกของกระสุนปืนน้อยที่สุด เนื่องจากเกิดการทะลุและเปลี่ยนรูปร่างเร็วที่สุด นอกจากนี้ถ้าแผ่นเหล็กกล้าเกรด AISI1008 ความหนา 4 มม. มาเทียบประสิทธิภาพในการต้านทานและสามารถดูดซับพลังงานกับแผ่นอะลูมิเนียมเกรด AA5083 ที่ความหนา 6 มม. แล้วพบว่าแผ่นเหล็กกล้าเกรด AISI1008 ความหนา 4 มม. จะมีประสิทธิภาพดีกว่า

5. ค่าพลังงานรวมของระบบที่หายไปดังแสดงในรูปที่ 21-28 นั้นสาเหตุมาจากที่ว่าแบบจำลองจะทำการลบเอลิเมนต์ที่มีการเปลี่ยนรูปร่างมากออก ทำให้พลังงานรวมของระบบลดลง

6. ในการจำลองสถานการณ์การกระแทกของกระสุนปืนพบว่าแบบจำลองกระสุนปืนแบบเปลี่ยนรูปร่างได้ให้การพยากรณ์ที่ดีกว่าแบบจำลองแบบแข็งเกร็ง ทั้งนี้การพยากรณ์กรณีแข็งเกร็งอาจจะพิจารณาว่าเป็นขอบเขตบน (Upper Limit) หรือกรณีเลวร้ายที่สุดก็ได้

7. แบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถอธิบายสถานการณ์การกระแทกของกระสุนปืนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ในระดับหนึ่ง ถึงแม้ว่าสมบัติของวัสดุที่ใส่เข้ามาในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จะเป็นเพียงข้อมูลเฉพาะ Flow curve ของวัสดุซึ่งมาจากการทดลองภายใต้สภาวะกึ่งสถิตย์ (Quasi-static) การทำ Model Validation ของการจำลองสถานการณ์ที่สมจริงขึ้นจำเป็นจะต้องศึกษาความไม่แน่นอนของระบบเหมือนงานที่นำเสนอใน Buranathiti et al. [11] ซึ่งนำเอาความไม่แน่นอนเข้ามาวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของแบบจำลองประกอบการทดลองทางกายภาพ

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ภายใต้โครงการทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สัญญาเลขที่ MRG495S042 ทั้งนี้ความเห็นในรายงานผลการวิจัยเป็นผู้รับทุน สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

7. เอกสารอ้างอิง

1. Ben-Dor, G., Dubinsky, A., and Elperin, T., 2005, "Ballistic Impact: Recent Advances in Analytical Modeling of Plate Penetration Dynamics-A Review", *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 58, pp. 355-371.
2. Anghileri, M., Castelletti, L.M.L., Invernizzi, F., and Masheroni, M., 2005, "A Survey of Numerical

cal Models for Hail Impact Analysis using Explicit Finite Element Codes”, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 31, pp. 929-944.

3. Cheeseman, B.A. and Bogetti, T.A., 2003, “Ballistic Impact into Fabric and Compliant Composite Laminates”, *Composite Structures*, Vol. 61, No. 1-2, pp. 161-173.

4. Duan, Y., Keefe, M., Bogetti, T.A., and Cheeseman, B.A., 2005, “Modeling the Role of Friction during Ballistic Impact of a High-strength Plain-weave Fabric”, *Composite Structures*, Vol. 68, pp. 331-337.

5. Duan, Y., Keefe, M., Bogetti, T.A., and Powers, B., 2006, “Finite Element Modeling of Transverse Impact on a Ballistic Fabric”, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 48, No.1, pp. 33-43.

6. Vahedi, K. and Khazraiyen, N., 2004, “Numerical Modeling of Ballistic Penetration of Long Rods into Ceramic/Metal Armors”, *Proceedings of the 8th International LS-DYNA Users Conference*, Dearborn, MI.

7. Deka, L.J., Bartus S.D., and Vaidya U.K., 2006, “Damage Evaluation and Energy Absorption of FRP Plates Subjected to Ballistic Impact Using a Numerical Model”, *Proceedings of the 9th International LS-DYNA Users Conference*, Dearborn, MI.

8. Silva, M.A.G., Cismasiu, C., and Ghiorean, C.G., 2005, “Numerical Simulation of Ballistic Impact on Composite Laminates”, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 31, pp. 289-306.

9. Hallquist, J.O., 2006, *LS-DYNA Theory Manual*.

10. Matweb, *Material Type Search*, Available:<http://www.matweb.com/search/SearchSubcat.asp> [2007, May 15].

11. Buranathiti, T., J. Cao, W. Chen, L. Baghdasaryan, and Z.C. Xia., 2006, “Approaches for Model Validation: Methodology and Illustration on a Sheet Metal Flanging Process”, *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 128 No. 2, pp. 588-597.