การศึกษาผลของความหนาไลเนอร์ของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงด้วยการจำลองเชิงตัวเลข

ทัศนีย์ ทับเจริญ [1*] ธนัช ขันทอง [1] และ วีระชาติ กุลศิริเกษม [1]

วันที่รับ 5 สิงหาคม 2567 วันที่แก้ไข 13 ธันวาคม 2567 วันตอบรับ 8 มกราคม 2568

บทคัดย่อ

เมื่อหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงเกิดการจุดระเบิด การปฏิกิริยาเคมีในวัตถุระเบิดแรงสูงทำให้เกิดแก๊สและความดันอย่างยิ่งยวด ความดันที่เกิดขึ้นนั้นส่งผลให้โครงสร้างภายในหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น ปลอกหุ้มเกิดสะเก็ดและเคลื่อนที่ไปตามแรงระเบิดที่เกิดขึ้นทุกทิศทาง ไลเนอร์เกิดการเสียรูปจนเกิดเจท เป็นต้น ทั้งนี้ หากการศึกษากระบวนการระเบิดของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงด้วยวิธีทดสอบทดลอง มีค่าใช้จ่ายที่สูงและอันตรายเมื่อเทียบกับการจำลองทางคอมพิวเตอร์ การจำลองเชิงตัวเลขของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงจึงได้รับความนิยมแพร่หลายมากขึ้น ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงจำลองเชิงตัวเลขของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงขนาด 36 มม. ด้วยการจำลองเชิงตัวเลขแบบ 3 มิติ โดยใช้วิธีสมูทพาร์ทิเคิลไฮโดรไดนามิกส์เพื่อศึกษาผลของความหนาไลเนอร์ต่อกระบวนการเกิดเจทและความสามารถในการเจาะเป้าหมายของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรง จากอัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัตถุระเบิดต่อน้ำหนักของทองแดงแตกต่างกัน ส่งผลให้ไลเนอร์มีความหนา 0.5, 1.0 และ 2.3 มม. และกำหนดระยะห่างระหว่างหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงและเป้าหมายไว้ที่ 108 มม. จากการศึกษาพบว่า การเปลี่ยนแปลงความดันเพิ่มขึ้นหลังจากการจุดระเบิดและเคลื่อนตัวถึงไลเนอร์ในเวลาที่ 4 ไมโครวินาที หลังจากนั้นไลเนอร์เริ่มเกิดการเสียรูปและเกิดเจท ความเร็วสูงสุดของเจทมีค่า 10,780 9,070 และ 6,520 เมตรต่อวินาที สำหรับไลเนอร์หนา 0.5, 1.0 และ 2.3 มม. ตามลำดับ เมื่อไลเนอร์มีความหนาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเร็วสูงสุดเจทและความยาวเจทมีค่าลดลง นอกจากนี้ สลักมีขนาดเพิ่มขึ้นตามความหนาไลเนอร์ และไลเนอร์เริ่มเจาะเป้าหมาย เกิดขึ้นหลังจากเวลาที่ 30 ไมโครวินาที เมื่อไลเนอร์เริ่มเจาะเป้าหมาย เป้าหมายเกิดการเสียรูปและยืดตัวตามทิศทางการระเบิดอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งฉีกขาด จากผลการจำลองพบว่า ไลเนอร์ทั้ง 3 ความหนาสามารถเจาะเป้าหมายที่มีความหนา 10 มม. ได้สำเร็จ แต่เมื่อเพิ่มความหนาของเป้าหมาย พบว่า หัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงที่ไลเนอร์หนา 0.5, 1.0 และ 2.3 มม. สามารถเจาะเป้าหมายได้ 7, 10 และ 50 มม. ดังนั้น หัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงมีความสามารถในการเจาะเป้าหมายเพิ่มขึ้นตามความหนาของไลเนอร์ เนื่องจากสมดุลโมเมนตัมและพลังงานจลน์ที่เพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้าม ขนาดของรูเล็กลงตามความหนาไลเนอร์ที่เพิ่มขึ้น

คำสำคัญ : หัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรง, ไลเนอร์, การจำลองเชิงตัวเลข, การเจาะ, วัตถุระเบิดแรงสูง

---

[1] ส่วนงานวิศวกรรมวัตถุระเบิดและนิวเคลียร์ ชีวะ เคมี, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

[*] ผู้แต่ง, อีเมล: tassanee.t@dti.or.th

3D Numerical Simulation of the Effect of Shaped Charge Liner Thickness on Penetration into a Steel Target

Tassanee Tubchareon [1*] Thanach Khantong [1] and Weerachart Kulsirikasem [1]

Received 5 August 2024, Revised 13 December 2024, Accepted 8 January 2025

Abstract

The explosion of a high-explosive charge in a shaped charge warhead rapidly converts the explosive material into gaseous products with extremely high pressure through a chemical reaction. This high pressure can damage the shaped charge warhead's structure, causing natural fragmentation of the casing and collapse of the liner, which leads to the formation of a jet. Generally, experimental testing of shaped charge detonation processes is more expensive and dangerous than computer simulations. This work presents three-dimensional (3D) numerical simulations of shaped charges based on the Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method. The effect of liner thickness on jet formation and penetration depth into a steel target was investigated. The charge had a diameter of 36 mm (CD), and the stand-off distance was set to 3CD. The copper liners had uniform wall thicknesses of 0.5, 1.0, and 2.3 mm, based on the explosive-to-copper weight ratio, with a cone angle of 45°. The results showed that pressure increased after detonation and reached the liner within 4 microseconds. The maximum jet velocities observed were 10,780, 9,070, and 6,520 m/s for liner thicknesses of 0.5, 1.0, and 2.3 mm, respectively. Increasing the liner's thickness resulted in a decrease in the maximum jet tip velocity and jet length. Additionally, the slug size increased with liner thickness. Regarding the penetration performance of the shaped charge, all liner thicknesses successfully penetrated a 10 mm thick steel target. The effect of increasing the target thickness was also investigated. The liner thicknesses of 0.5, 1.0, and 2.3 mm were able to penetrate steel targets up to 7 mm, 10 mm, and 50 mm, respectively. The results demonstrated that the ability to penetrate the target increased with liner thickness due to the increased momentum balance and kinetic energy. However, as liner thickness increased, the borehole size decreased.

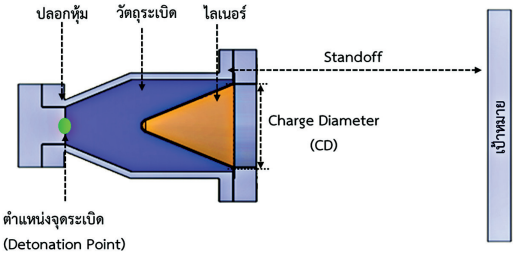
Keywords : Shaped charge, Liner, Numerical simulation, Penetration, High explosive

[1] NBC and Explosive Engineering Division, Defence Technology Institute

[*] Corresponding author, E-mail: tassanee.t@dti.or.th

1. บทนำ

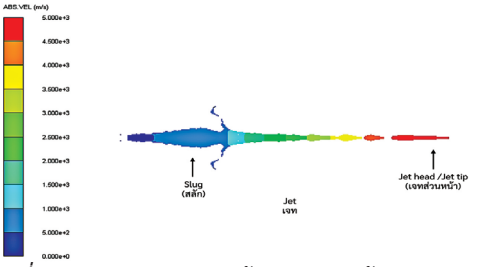
หัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรง (Shaped Charge) คือ หัวรบระเบิดแรงสูง มีลักษณะเป็นโพรงภายในมีไลเนอร์ (Liner) ทางทหารนิยมใช้หัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงในจรวดต่อสู้รถถัง (Anti-Tank Missiles) [1] หรืออาวุธที่ใช้ทำลายยานรบ ยานลำเลียงหรือที่กำบัง [2] - [3] เป็นต้น โดยทั่วไปส่วนประกอบหลักของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงประกอบด้วยปลอกหุ้ม (Casing) ไลเนอร์ (Liner) วัตถุระเบิดแรงสูง (Explosive Charge) และ ตัวจุดวัตถุระเบิด (Detonator) แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 *องค์ประกอบพื้นฐานของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรง (Shaped Charge)*

หลักการทำงานของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงนั้น เมื่อตัวจุดวัตถุระเบิดเกิดการจุดระเบิด คลื่นการระเบิดที่เกิดขึ้นส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมี คุณสมบัติกายภาพ และคุณสมบัติทางกลของวัสดุภายในหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรง เกิดการยุบตัว (Collapse) ของไลเนอร์ เมื่อการยุบตัวดังกล่าวดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง ไลเนอร์ที่ยุบตัวเนื่องจากแรงอัดจะยืดตัวออกด้วยความเร็วสูง เรียกว่า เจท แสดงดังรูปที่ 2 มีส่วนด้านหน้าที่เรียกว่าเจทส่วนหน้า (Jet) ส่วนด้านหลังที่เรียกว่า สลัก (Slug) โดยปกติเจทส่วนหน้ามีความเร็วสูงกว่าสลัก [4] เมื่อเจทยืดตัวจนถึงเป้าหมาย (Target) ด้วยพลังงานและความเร็วที่สูงของเจท ทำให้สามารถเจาะเป้าหมายได้สำเร็จ [5] - [6]

M. G. Vigil [7] ทำการศึกษาออกแบบหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงโดยใช้ Shaped Charge



รูปที่ 2 *ลักษณะเจทประกอบด้วยเจทส่วนหน้าและสลัก*

Analysis Program (SCAP) มีการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรง โดยทำการศึกษาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกรวย (Conical Liner Inside Diameter-D) ในห้วง 1.75 – 23.18 ซม. ชนิดของไลเนอร์ทั้งทองแดงและเหล็ก และวัตถุระเบิดแรงสูงชนิดต่าง ๆ เช่น Octol, Composition B, และ PBX-9501 จากการศึกษาดังกล่าว มีการกำหนดค่าที่เหมาะสมในการออกแบบหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรง (Optimized Conical Shaped Charge Configuration) ดังนั้น มุมไลเนอร์ของกรวยควรมีขนาด 45 องศา ความหนาไลเนอร์มีค่า 0.01 ของเส้นผ่านศูนย์กลางกรวย (D) ระยะห่างระหว่างหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงและเป้าหมาย (Stand-off) อยู่ในห้วง 2D – 6D โดยไลเนอร์ที่ทำจากทองแดงมีความสามารถเจาะเป้าหมายได้มากกว่าเหล็ก วัตถุระเบิด PBX-9501 ให้ความเร็วของเจท (Jet Tip Velocity) สูงถึง 8,120 เมตรต่อวินาที

ส่วนมากนักวิจัยจึงนิยมการศึกษาความสามารถในการเจาะเกราะของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรง โดยทั่วไปแบ่งการศึกษาวิจัยความสามารถในการเจาะเกราะของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงออกเป็น 3 วิธี คือ วิธีเชิงวิเคราะห์ (Analytical Methods) การทดสอบทดลอง (Experimental Tests) และวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Simulations) [8] เมื่อเปรียบเทียบวิธีการดังกล่าวนั้น จะเห็นได้ว่าการจำลองเชิงตัวเลขมีข้อดีกว่าวิธีการอื่น ๆ ทั้งด้านต้นทุน ระยะเวลา และความปลอดภัย [3] นอกจากนี้ การศึกษาหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงด้วยวิธีการจำลองเชิงตัวเลขแบบ 3 มิติ มีผลสอดคล้องกับผลการทดสอบทดลองทั้งในด้าน

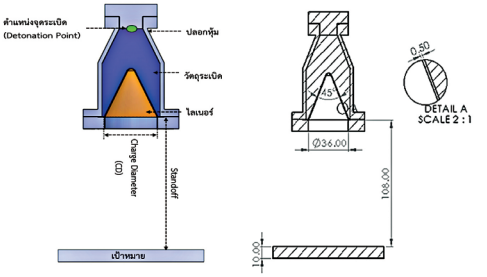
ความเป็นไปได้ (Feasibility) และประสิทธิผล (Effectiveness) [9] ยิ่งไปกว่านั้นสามารถอธิบายการศึกษากระบวนการเกิดเจท [10] - [11] และการเจาะเป้าหมายของเจท [11] ได้เป็นอย่างดี

ก่อนหน้านี้การจำลองหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงนิยมจำลองเชิงตัวเลขโดยการใช้โครงร่างตาข่ายด้วยเทคนิคลากรานจ์ (Lagrange Mesh) และเทคนิคออยเลอร์ (Euler Mesh) ทั้ง 2 เทคนิคนี้มีข้อจำกัดทางด้านการบิดเบี้ยวของโครงร่างตาข่าย (Disordered Mesh) อันเนื่องจากการเสียรูปขนาดใหญ่ (Large Deformations) การเคลื่อนที่ของพื้นผิววัสดุ (Moving Material Interfaces) การเปลี่ยนรูปร่างของขอบเขต (Deformable Boundaries) และพื้นผิวอิสระ (Free Surface) [11] - [12] ด้วยเทคโนโลยีที่พัฒนาอย่างรวดเร็วและคอมพิวเตอร์มีสมรรถนะสูง ทำให้การจำลองหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงโดยใช้วิธีสมูทพาร์ทิเคิลไฮโดรไดนามิกส์ (Smoothed Particle Hydrodynamics : SPH) ได้รับความนิยมมากขึ้น วิธีการนี้สามารถลดข้อจำกัดข้างต้นได้ดี ดังนั้น วิธีการดังกล่าวจึงเหมาะสมกับการจำลองวัตถุระเบิดแรงสูง [12] - [15]

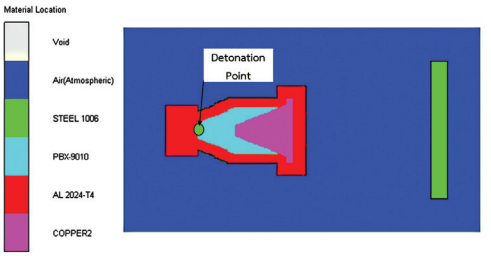
คณะผู้วิจัยจึงนำข้อดีของการจำลองเชิงตัวเลขโดยใช้วิธีสมูทพาร์ทิเคิลไฮโดรไดนามิกส์มาประยุกต์ใช้ในการศึกษาการออกแบบหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงตามค่าที่เหมาะสมในการออกแบบหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงของ M. G. Vigil [7] ในลำดับแรก คณะผู้วิจัยจึงทำการศึกษาผลของความหนาไลเนอร์ของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงขนาด 36 มม. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเกิดเจทและความสามารถในการเจาะเป้าหมายของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรง และนำองค์ความรู้ไปต่อยอดพัฒนาสู่การสร้างต้นแบบหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงและการทดสอบทดลองในอนาคตสืบต่อไป

2. วิธีดำเนินงานวิจัย

ลักษณะทางมิติของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงดังแสดงในรูปที่ 3 จากภาพตัดขวางของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวัตถุระเบิด (Charge Diameter – CD) 36 มม. มุมไลเนอร์ของกรวยขนาด 45 องศา (Liner Angle of Cone) และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัตถุระเบิดต่อน้ำหนักของทองแดง เท่ากับ 6.80, 3.40 และ 1.77 ส่งผลให้ไลเนอร์มีความหนา 0.5 1.0 และ 2.3 มม. ตามลำดับ นอกจากนี้มีการกำหนดระยะห่างระหว่างหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงและเป้าหมาย (Stand-off) ไว้ที่ 108 มม. (3CD) และกำหนดพิกัดจุดของการจุดระเบิด (Detonation Point) ที่ (x, y, z) เท่ากับ (0, 71.7, 0) มม. สำหรับภาพตัดขวางการจำลองเชิงตัวเลขของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงด้วยการจำลองเชิงตัวเลขแบบ 3 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 3 ภาพตัดขวางของแผนภาพหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรง



รูปที่ 4 ภาพตัดขวางของการจำลองเชิงตัวเลขของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรง

การจำลองเชิงตัวเลขแบบ 3 มิติ โดยใช้วิธีสมูทพาร์ทิเคิลไฮโดรไดนามิกส์นี้ ดำเนินการแบ่งการจำลองออกเป็นอนุภาคขนาดเล็ก ๆ จำนวนมากและมีฟังก์ชันเคอร์เนล (Kernel Function) กำหนดปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาค การกำหนดคุณลักษณะทางวัสดุและสมการต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัตถุระเบิดต่อน้ำหนักของทองแดงและจำนวน

ตารางที่ 1 คุณสมบัติและวัสดุของการจำลองเชิงตัวเลขของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรง

ชิ้นส่วน	วัสดุ	ความหนาแน่น (Density) Kg/m3	สมการ (Equation of State)	สมการทางวัสดุ (Material Model)
ไลเนอร์ (Liner)	ทองแดง (Copper2)	8930	Shock	None
วัตถุระเบิด (Explosive)	PBX-9010	1787	JWL	-
ปลอกหุ้ม (Casing)	อะลูมิเนียม (Al 2024-T4)	2785	Shock	Steinberg Guinean
เป้าหมาย (Targets)	เหล็ก (Steel 1006)	7896	Shock	Johnson-Cook

ตารางที่ 2 น้ำหนักและจำนวนอนุภาคของการจำลองเชิงตัวเลขของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรง

ความหนา Liner (มม.)	น้ำหนัก (กรัม)					จำนวนอนุภาค (Number of particles)			
	ทองแดง	PBX-9010	อะลูมิเนียม	เหล็ก	PBX-9010/ ทองแดง	ทองแดง	PBX-9010	อะลูมิเนียม	เหล็ก
0.5	14.7	100	215	950	6.80	13126	55683	80872	10800
1.0	29.4				3.40	26120			
2.3	56.4				1.77	50349			

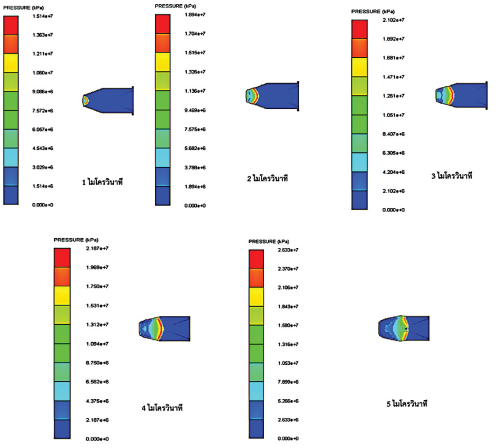
อนุภาคของการจำลองเชิงตัวเลขของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรง ดังแสดงในตารางที่ 2

3. ผลการจำลองเชิงตัวเลขและอภิปรายผล

3.1 การศึกษาพฤติกรรมการเกิดเจท

หลังจากจุดระเบิด คลื่นการระเบิด (Detonation Wave) เริ่มเคลื่อนตัวจากจากจุดเริ่มต้นการจุดระเบิด (Point Detonation) ผ่านวัตถุระเบิดแรงสูง (High Explosive – PBX9010) และไลเนอร์ ตามลำดับ ณ เวลา 1 ไมโครวินาที ความดันสูงสุดภายในวัตถุระเบิดแรงสูงมีค่า 1.51 x 107 กิโลปาสคาล (kPa) ความดันเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนมีค่า 2.19 x 107 กิโลปาสคาล และเคลื่อนที่ไปถึงไลเนอร์ ณ เวลา 4 ไมโครวินาที แสดงดังรูปที่ 5

การเปลี่ยนแปลงความดันและอุณหภูมิอย่างยิ่งยวดส่งผลให้ไลเนอร์เริ่มเกิดการเสียรูป (Deformation)



รูปที่ 5 *การเปลี่ยนแปลงความดันของวัตถุระเบิดภายในหัวรบเจาะเกราะแบบดินโพรงโดยไลเนอร์หนา 0.5 มม. ณ เวลาต่าง ๆ*

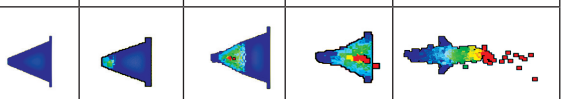
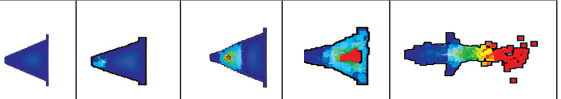
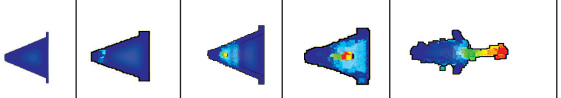
การเสียรูปของไลเนอร์นั้น ทำให้เกิดการยุบตัวและ/หรือการบีบตัวของไลเนอร์ โดยไลเนอร์มีพฤติกรรมคล้ายของไหลพลาสติก (Plastic Fluid) เมื่อการยุบตัวและ/หรือการบีบตัวดังกล่าวดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง ไลเนอร์ที่ยุบตัวเนื่องจากแรงอัดจะยืดตัวออกด้วยความเร็วสูงเรียกว่า เจท สำหรับการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการเกิดเจทแสดงดังตารางที่ 3

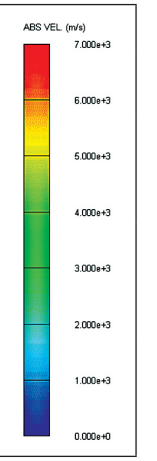
เมื่อพิจารณาที่เวลา 20 ไมโครวินาที ก่อนที่ไลเนอร์เจทเจาะเป้าหมาย พบว่า เมื่อความหนาไลเนอร์เพิ่มขึ้น ความเร็วเจทสูงสุด (Maximum Absolute Velocity of Jet Tip) มีค่าลดลง [16] - [17] เช่น ไลเนอร์หนา 0.5, 1.0 และ 2.3 มม. มีความเร็วสูงสุดของเจท 10,780 9,070 และ 6,520 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ (แสดงดังตารางที่ 4) นอกจากนี้ ความยาวเจท (Jet Length) มีค่าลดลงเมื่อความหนาของไลเนอร์เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม สลักมีขนาดเพิ่มขึ้นตามความหนาไลเนอร์ ซึ่งโดยส่วนใหญ่ประสิทธิภาพของการเจาะเกราะนั้น ขึ้นอยู่กับเจทส่วนหน้า (Jet Head หรือ Jet Tip) [10]

3.2 การศึกษาความสามารถในการเจาะเป้าหมายของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรง

หัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงไลเนอร์ทั้ง 3 ความหนา มีภาพรวมของการจำลองเชิงตัวเลขของกระบวนการเจาะเป้าหมายในลักษณะเดียวกัน กล่าวคือ ณ เวลา 10 ไมโครวินาที เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็ว (Absolute velocity) ของไลเนอร์และสะสมจนเกิดเจท หลังจากนั้น ณ เวลา 20 ไมโครวินาที ความดันที่เกิดขึ้นส่งผลให้ปลอกหุ้ม (Casing) เริ่มฉีกขาด (Cracking) และเกิดสะเก็ด (Fragmentation) ตามลำดับ ณ เวลา

ตารางที่ 3 การเกิดเจทของไลเนอร์ที่ความหนา 0.5, 1.0 และ 2.3 มม. ณ เวลาต่าง ๆ

ความหนาไลเนอร์ (มม.)	เวลา (ไมโครวินาที)				
	4	5	7	10	20
0.5					
1.0					
2.3					



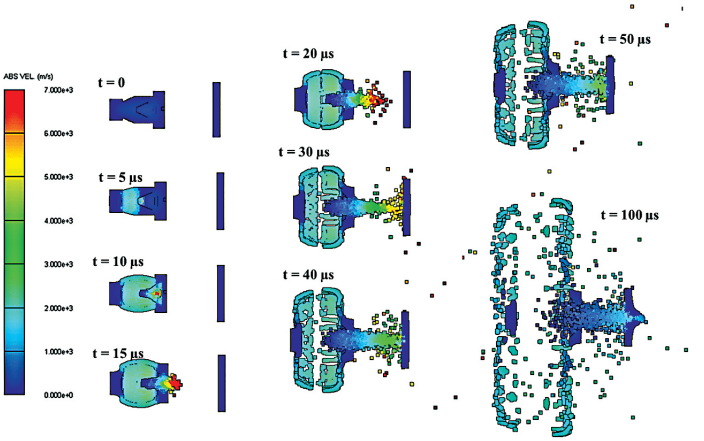
ตารางที่ 4 ความเร็วสูงสุดของเจท ความลึกของการเจาะ และเส้นผ่านศูนย์กลางขาเข้าของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรง

ความหนาไลเนอร์ (มม.)	ความเร็วสูงสุดของเจท (เมตรต่อวินาที)	ความลึกของการเจาะเป้าหมาย (Target Penetration) (มม.)	เส้นผ่านศูนย์กลางขาเข้า (Opening Inlet Diameter) (มม.)
0.5	10,780	7	41
1.0	9,070	10	30
2.3	6,520	50	23

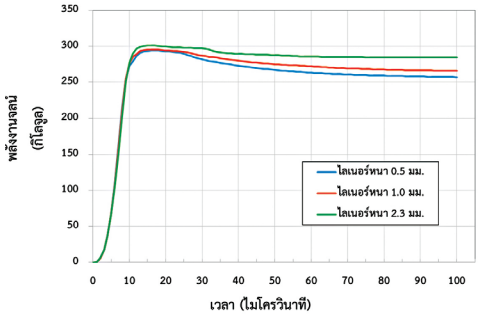
30 ไมโครวินาที เจทที่เกิดขึ้นเริ่มเจาะเป้าหมาย (Pit Opening Stage) [18] หลังจากนั้นเกิดการเจาะอย่างต่อเนื่องและคงที่ (Quasi Steady Penetration Stage) และสุดท้ายสามารถเจาะเป้าหมายได้ทะลุ (Termination Penetration Stage) แสดงดังรูปที่ 6

อย่างไรก็ตาม แม้ไลเนอร์ทั้ง 3 ความหนามีกระบวนการการเจาะเป้าหมายเหมือนกัน แต่ความหนาของไลเนอร์ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) ของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงดังแสดงในรูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในห้วง 10 ไมโครวินาทีแรก เมื่อเจทเริ่มเจาะเป้าหมาย พลังงานจลน์ลดลงเล็กน้อย จนกระทั่งพลังงานจลน์เริ่มคงที่ [13] จากการศึกษาพบว่าพลังงานจลน์เพิ่มขึ้นตามความหนาของไลเนอร์

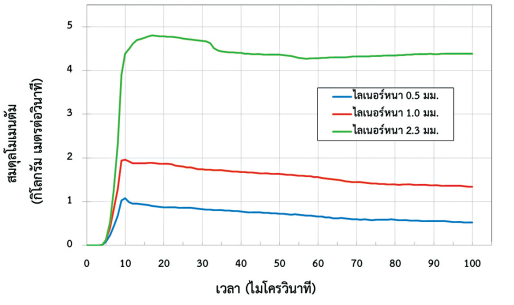
เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงสมดุลโมเมนตัม (Momentum Balance) สำหรับหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงแสดงดังรูปที่ 8 พบว่า ความหนาของไลเนอร์ส่งผลอย่างมากกับสมดุลโมเมนตัม โดยที่สมดุลโมเมนตัมเพิ่มขึ้นตามความหนาของไลเนอร์ การเพิ่มขึ้นของสมดุลโมเมนตัมส่งผลให้มวล (Mass) และความเร็ว (Velocity) เพิ่มขึ้น ดังนั้น เมื่อพิจารณาผลการเจาะเป้าหมายความหนา 10 มม. สำหรับหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงที่ไลเนอร์มีความหนาต่างกัน ที่เวลา 100 ไมโครวินาที แสดงดังรูปที่ 9 พบว่า ความหนาไลเนอร์ทั้ง 0.5, 1.0 และ 2.3 มม. สามารถเจาะทะลุเป้าหมายได้สำเร็จ อย่างไรก็ตาม ความหนาของไลเนอร์ส่งผลต่อการเสียรูปของเป้าหมาย เป้าหมายเกิดการยืดตามทิศทางการระเบิดอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งฉีกขาด



รูปที่ 6 *ภาพตัดขวางหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงไลเนอร์หนา 0.5 มม. สำหรับเจาะเป้าหมายความหนา 10 มม. ณ เวลาต่าง ๆ*



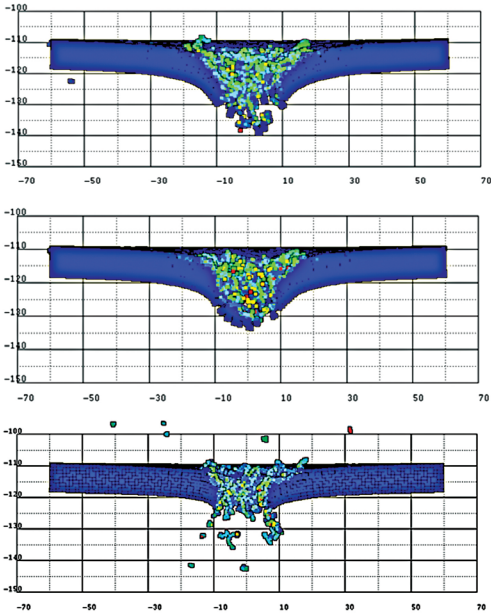
รูปที่ 7 *การเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์สำหรับหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงที่ไลเนอร์มีความหนาต่าง ๆ*



รูปที่ 8 *การเปลี่ยนแปลงสมดุลโมเมนตัมสำหรับหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงที่ไลเนอร์มีความหนาต่าง ๆ*

จะเห็นได้ว่า ไลเนอร์ที่มีความหนาน้อยส่งผลให้เป้าหมายเกิดการยืดตัวได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับไลเนอร์ที่มีความหนามาก อันเนื่องมาจากสมดุลโมเมนตัมและพลังงานจลน์

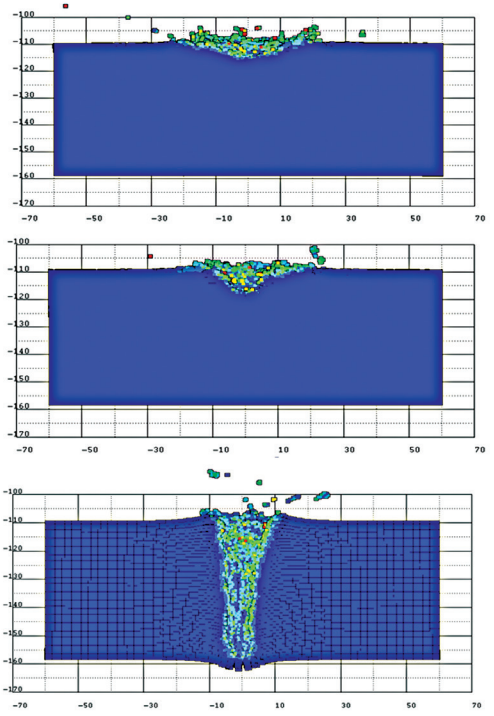
นอกจากนี้ ได้ศึกษาความหนาของเป้าหมายจาก 10 มม. เป็น 50 มม. แสดงดังรูปที่ 10 จากรูปพบว่าความสามารถในการเจาะเป้าหมายเพิ่มขึ้นตามความหนาไลเนอร์ หัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงไลเนอร์หนา 0.5, 1.0 และ 2.3 มม. มีความสามารถในการเจาะ



รูปที่ 9 *ภาพตัดขวางแสดงการเปรียบเทียบการเจาะเป้าหมายความหนา 10 มม. สำหรับหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงที่ไลเนอร์มีความหนา (บน) 0.5 (กลาง) 1.0 และ (ล่าง) 2.3 มม. ณ เวลา 100 ไมโครวินาที*

เป้าหมายเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาลักษณะของรูเจาะ (Borehole) ที่เกิดขึ้น พบว่า รู (Hole Size) มีขนาดเล็กลงตามความหนาไลเนอร์ที่เพิ่มขึ้น โดยที่หัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงที่ไลเนอร์หนา 2.3 มม. สามารถเจาะทะลุเป้าหมายได้ 50 มม. โดยลักษณะรูเจาะคล้ายรูปแตร (Trumpet Shape) เมื่อเจทกระทบเป้าหมาย ความเร็วของเจทจะลดลงอย่างรวดเร็ว เจทบางส่วนเกิดการการกัดกร่อน (Jet Erosion) ส่งผลให้พลังงานจลน์และความร้อนของเจทลดลง จากเหตุผลดังกล่าวทำให้เป้าหมายบางส่วนหลอมละลาย อันเนื่องมาจากแรงเสียดทาน (Friction) และการบีบอัด (Compression) ทำให้รูเจาะเปลี่ยนรูปร่าง [18] - [19]

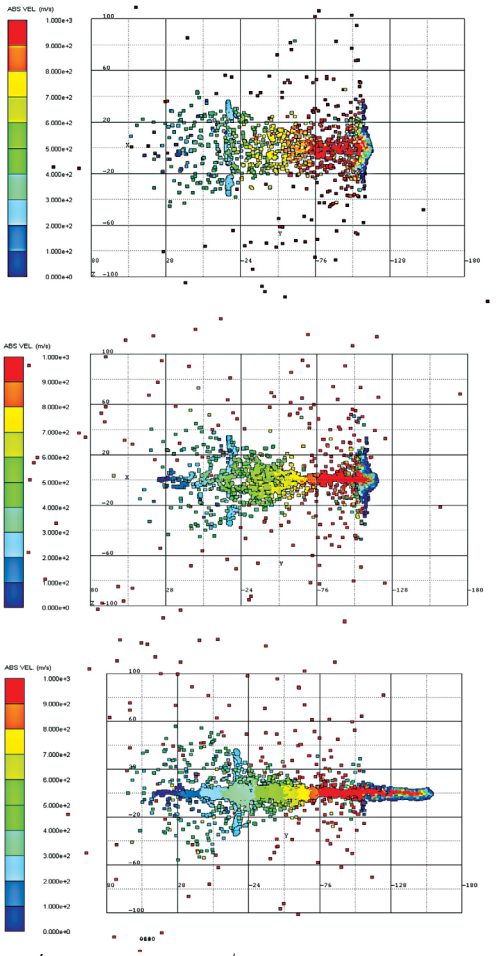
เมื่อพิจารณาความเร็วเจทจากรูปที่ 11 พบว่า ณ เวลา 100 ไมโครวินาที ความเร็วเจทส่วนหน้า (Jet Tip Velocity) มีค่าประมาณ 500 เมตรต่อวินาที สำหรับการเจาะเกราะทั่วไปนั้น ความเร็วเจทส่วนหน้าควรมีความเร็วมากกว่า 3000 เมตรต่อวินาที ถือเป็นส่วนที่มีประสิทธิภาพของเจ็ทและใช้อ้างอิงสำหรับความเร็วเจาะทะลุวิกฤติ (Critical Penetration) [15]



รูปที่ 10 *ภาพตัดขวางการเปรียบเทียบการเจาะเป้าหมายความหนา 50 มม. สำหรับหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงที่ไลเนอร์มีความหนา (บน) 0.5 (กลาง) 1.0 และ (ล่าง) 2.3 มม. ณ เวลา 100 ไมโครวินาที*

4. สรุปผลการจำลองเชิงตัวเลข

การจำลองเชิงตัวเลขแบบ 3 มิติ ของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงขนาด 36 มม. เมื่อกำหนดระยะห่างระหว่างหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงและเป้าหมายไว้ที่ 108 มม. สามารถศึกษาพฤติกรรมการเกิดเจทและความสามารถในการเจาะเกราะของหัวรบ



รูปที่ 11 *ความเร็วเจท เมื่อเจาะเป้าหมายหนา 50 มม. สำหรับหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงที่ความหนาไลเนอร์ (บน) 0.5 (กลาง) 1.0 และ (ล่าง) 2.3 มม.*

เจาะเกราะดินระเบิดโพรงได้เป็นอย่างดี จากการศึกษาพบว่า ความหนาของไลน์เนอร์ต่างกัน มีผลต่อความเร็วสูงสุดของเจทและความยาวของเจท กล่าวคือ เมื่อไลเนอร์มีความหนาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเร็วสูงสุดของเจทและความยาวของเจทมีค่าลดลง นอกจากนี้ สลักมีขนาดเพิ่มขึ้นตามความหนาของไลเนอร์

เมื่อไลเนอร์เสียรูปและยืดตัวตามทิศทางการระเบิดอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเริ่มเจาะเป้าหมายด้วยความเร็วเจทที่สูงเกิดการเจาะอย่างต่อเนื่องและคงที่สุดท้ายสามารถเจาะเป้าหมายได้สำเร็จ จากการศึกษาพบว่า หัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงที่ความหนาไลเนอร์ทั้ง 0.5, 1.0 และ 2.3 มม. สามารถเจาะเป้าหมาย พบว่า หัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงสามารถเจาะเป้าหมายเพิ่มขึ้นตามความหนาของไลเนอร์ เนื่องจากสมดุลโมเมนตัมและพลังงานจลน์ที่เพิ่มขึ้น ตรงกันข้ามขนาดของรูเล็กลงตามความหนาไลเนอร์ นอกจากนี้ที่เวลา 100 ไมโครวินาที หัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงที่ไลเนอร์หนา 2.3 มม. สามารถเจาะเป้าหมายได้ 50 มม.

จากผลการศึกษาส่งผลให้คณะผู้วิจัยทราบถึงความสำคัญของความหนาไลเนอร์ต่อพฤติกรรมการเกิดเจทและความสามารถในการเจาะเกราะของหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรง เพื่อต่อยอดการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลในการออกแบบหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรง เช่น รูปร่างของไลเนอร์ ระยะห่างระหว่างหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรงและเป้าหมาย (Stand-off) ชนิดของวัตถุระเบิด และปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องนำไปสู่การพัฒนาสร้างต้นแบบหัวรบเจาะเกราะดินระเบิดโพรง การทดสอบทดลอง และผลิตสู่อุตสาหกรรมป้องกันประเทศในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้อยู่ภายใต้โครงการวิจัยพื้นฐานของสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ประจำปีงบประมาณ 2567 ได้รับการสนับสนุนและความร่วมมือจากนักวิจัยส่วนงานวิศวกรรมวัตถุระเบิดและนิวเคลียร์ ชีวะ เคมี ตลอดจนเจ้าหน้าที่สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Y. Du, G. He, Y. Liu, Z. Guo, and Z. Qiao, “Study on Penetration Performance of Rear Shaped Charge Warhead,” *Materials*, vol. 14, no. 21, 2021, doi: 10.3390/ma14216526.

[2] P. Zochowski and R. Warchoł, “Experimental and Numerical Study on The Influence of Shaped Charge Liner Cavity Filing on Jet Penetration Characteristics in Steel Targets,” *Def. Technol.*, vol. 23, pp. 60 - 74, 2023, doi: 10.1016/j.dt.2022.09.007.

[3] L. - Y. Xu, Y. Tian, X. - B. Liu, and S. - P. Wang, “Numerical Investigation on Jet Penetration Capacity of Hypervelocity Shaped Charge in Underwater Explosion,” *Ocean Eng.*, vol. 281, p. 114668, 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.114668.

[4] T. Elshenawy, “Criteria of Design Improvement of Shaped Charges used as Oil Well Perforators,” Ph.D. dissertation, Dept. Eng. Phys. Sci., Univ.

Manchester, Manchester, UK, 2012. [Online]. Available: https://pure.manchester.ac.uk/ws/portalfiles/portal/54527511/FULL_TEXT.PDF

[5] H. Shekhar, "Theoretical Modelling of Shaped Charges in the Last Two Decades (1990-2010): A Review," *Cent. Eur. J. Energ. Mater.*, vol. 9, no. 2, pp. 155 – 185, Jan. 2012.

[6] C. Poole, "Penetration of a Shaped Charge," Ph.D. dissertation, Dept. Philos., Corpus Christi College, Univ. Oxford, Oxford, UK, 2005.

[7] M. G. Vigil, "Optimized Conical Shaped Charge Design using The SCAP Code," Sandia Nat. Lab., Albuquerque, NM, USA, Tech. Rep. SAND 88-1790, Sep. 1988.

[8] A. Catovic, "Research of Influence of Different Shaped Charge Liner Materials on Penetration Depth using Numerical Simulations," *Period. Eng. Nat. Sci. (PEN)*, vol. 11, no. 4, pp. 1 - 26, Jul. 2023, doi: 10.21533/pen.v11i4.3500.g1307.

[9] Z. Zhifan, W. Longkan, and V. V. Silberschmidt, "Damage Response of Steel Plate to Underwater Explosion: Effect of Shaped Charge Liner," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 103, pp. 38 - 49, 2017, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2017.01.008.

[10] J. Yi, Z. Wang, J. Yin, and Z. Zhang, "Simulation Study on Expansive Jet Formation Characteristics of Polymer Liner," *Materials*, vol. 12, no. 5, 2019, doi: 10.3390/ma12050744.

[11] Z. Zhang, L. Wang, V. V. Silberschmidt, and S. Wang, "SPH-FEM Simulation of Shaped -charge Jet Penetration into Double Hull: A Comparison Study for Steel and SPS," *Compos. Struct.*, vol. 155, pp. 135 - 144, 2016, doi: 10.1016/j.compstruct.2016.08.002.

[12] M. B. Liu and G. R. Liu, "Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH): an Overview and Recent Developments," *Arch. Comput. Methods Eng.*, vol. 17, no. 1, pp. 25 - 76, Mar. 2010, doi: 10.1007/s11831-010-9040-7.

[13] D. L. Feng, M. B. Liu, H. Q. Li, and G. R. Liu, "Smoothed Particle Hydrodynamics Modeling of Linear Shaped Charge with Jet Formation and Penetration Effects," *Comput. Fluids*, vol. 86, pp. 77 - 85, 2013, doi: 10.1016/j.compfluid.2013.06.033.

[14] Z. Zhang, L. Wang, F. Ming, V. V. Silberschmidt, and H. Chen, "Application of Smoothed Particle Hydrodynamics in Analysis of Shaped-charge Jet Penetration Caused by Underwater Explosion," *Ocean Eng.*, vol. 145, pp. 177 - 187, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.oceaneng.2017.08.057.

[15] J.-Y. Chen, D.-L. Feng, S.-X. Deng, C. Peng, and F.-S. Lien, "GPU-accelerated Smoothed Particle Hydrodynamics Modeling of Jet Formation and Penetration Capability of Shaped Charges," *J. Fluids Struct.*, vol. 99, p. 103171, 2020, doi: 10.1016/j.jfluidstructs.2020.103171.

[16] Y. Gu, J. Wang, H. Li, K. Tang, and L. Liu, "Formation Characteristics and Penetration Performance of an Underwater Shaped Charge Jet," *Ocean Eng.*, vol. 258, p. 111695, 2022, doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.111695.

[17] T. Elshenawy, E. Ezzat, A. M. Riad, and M. A. Elkader, "Influence of Liner Wall Thickness on the Penetration Performance of PETN-HTPB PBX-based Shaped Charges into Steel Targets," *Cent. Eur. J. Energ. Mater.*, vol. 19, no. 1, pp. 63 - 90, 2022, doi: 10.22211/cejem/147682.

[18] Y. Han *et al.*, "Study on the Penetration Performance of Micro-shaped Charge with Different Liner Materials," *J. Phys.: C*onf. Ser., vol. 1855, no. 1, p. 012013, Mar. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1855/1/012013.

[19] B. Hong, W. Li, Y. Li, Z. Guo, and B. Yan, "Jet Formation and Penetration Performance of a Double-layer Charge Liner with Chemically -deposited Tungsten as The Inner Liner," *Def. Technol.*, vol. 33, pp. 374 - 385, 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.dt.2023.08.016.