

การปรับเทียบชุดทดลองสำหรับการศึกษาระเบิดความเร็วสูง Calibration of High Speed Impact Test Rig

วุฒิชัย สิทธิวงษ์¹ วิระพันธ์ สีหานาม^{1*} กุลเชษฐ์ เพียรทอง¹ อนันต์ มัทธจักร¹ และ Eric Yeo²

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

²บริษัท Hi-Tech Resources จำกัด ประเทศไทย ถนนสุขุมวิท 21 แขวงคลองเตยเหนือ กรุงเทพฯ 10110

โทร 0-433-53380 โทรสาร 0-433-53333 อีเมล: wirapan_seehanam@yahoo.com

บทคัดย่อ

การศึกษาลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูง มีคุณประโยชน์ต่อการพัฒนาเทคโนโลยีการเผาไหม้ การตัด การเจาะ หรือแม้แต่ในทางการแพทย์ แต่การสร้างลำพุ่งให้มีความเร็วระดับเหนือเสียงเป็นอุปสรรคสำคัญต่อการศึกษาดังกล่าว ทำให้การวิจัยค้นคว้าในเรื่องดังกล่าวมีน้อยมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศไทย ด้วยเหตุนี้ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จึงได้สร้างชุดทดลองที่สามารถสร้างลำพุ่งของของเหลวให้มีความเร็วกว่าความเร็วเสียงในอากาศ โดยใช้หลักการ “ขับลำพุ่งด้วยการกระแทก (Impact Driven Method)” โดยยิงลูกปืนกระแทกของเหลวที่บรรจุในหัวฉีด ชุดทดลองมีองค์ประกอบหลัก 4 ส่วน ได้แก่ ชุดปล่อยลูกปืน (Launcher) ท่อส่งลูกปืน (Launch tube) ท่อระบายความดัน (Pressure Relief Section) และห้องทดสอบ (Test Chamber) ซึ่งชุดทดลองนี้สามารถสร้างความเร็วลูกปืนได้สูงกว่า 800 m/s และให้กำเนิดลำพุ่งของเหลวที่มีความเร็วระดับเหนือเสียง ได้อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์ดังกล่าวจำเป็นต้องทำการปรับเทียบการทดลอง สำหรับรองรับการศึกษาระเบิดความเร็วสูงในระดับต่อไป ดังนั้น งานวิจัยนี้ จึงได้เสนอการศึกษาความเร็วสูงสุดที่ลูกปืนและลำพุ่งของเหลวที่ชุดทดลองนี้สามารถทำได้ ปริมาณดินปืนกับความเร็วของลูกปืน โดยวัดความเร็วด้วยการจับสัญญาณของชุดรับส่งแสงเลเซอร์ (Time of Flight Method) เพื่อเป็นการตรวจสอบช่วงการทำงานของชุดทดลอง ซึ่งความเร็วสูงสุดของลูกปืนมีค่าประมาณ 1,100 m/s จากข้อมูลการทดลองระหว่างความเร็วลูกปืนกับปริมาณดินปืนสามารถสร้างสมการประมาณกำลังสอง เพื่อใช้ในการศึกษาในระดับต่อไป ความเร็วของลูกปืนนอกจากจะขึ้นกับปริมาณดินปืนแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง เช่น การเผาไหม้ของดินปืน ลักษณะการเคลื่อนที่ของลูกปืน และความสะอาดของชุดอุปกรณ์การทดลอง

Abstract

Investigations of high speed liquid jet characteristics benefit to many technology developments such as combustion, material cutting, drilling, or even medical engineering. Generation of high

speed liquid jet which has velocity over speed of sound is the barrier against the researcher from its study and development, resulting very few researches in these areas especially in Thailand. Therefore, high speed liquid jet test rig is constructed in the Department of Mechanical Engineering, Ubon Ratchatani University. The impact driving method is used for generating the liquid jet because the high velocity projectile will produce the impulsive liquid jet. There are four main components in this test rig; launcher, launch tube, pressure relief section and test chamber. In general, the launcher can generate the projectiles at velocity above 800 m/s averagely. Therefore, the liquid jet velocity from the projectile impact could be over the speed of sound. However calibration of the high speed impact test rig is necessary before experiments. This paper presents the maximum speed of projectile and liquid jet which apparatus can produce. In addition, relationship between the gun powder mass and projectile velocity was determined. The projectile velocity is measured by time of flight method and maximum velocity is 1100 m/s. Experimental data are plotted and fitted by the second order of polynomial curve. However, the uncertainty of projectile velocity is sometimes affected by many factors such as combustion in launcher, behavior of projectile movement and condition of apparatus, especially inside of the tube.

1. คำนำ

ลำพุ่งของเหลวความเร็วสูงถูกนำมาประยุกต์ใช้กับงานหลายประเภทในปัจจุบัน ได้แก่ อุตสาหกรรมขึ้นรูปวัสดุ การเผาไหม้ของเครื่องยนต์ หรือแม้แต่ในทางการแพทย์ ซึ่งแต่ละประเภทการใช้งานต้องการคุณลักษณะของลำพุ่งแตกต่างกันออกไป เช่น

การเจาะหรือการตัดวัสดุหิน ความดันสร้างลำพุ่งจะอยู่ในช่วง 50 – 500 MPa โดยมีความเร็ว 300 – 1,000 m/s [1 และ 2]

เทคโนโลยีการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ ประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับความเร็วของการฉีดน้ำมัน เชื่อว่าหากสามารถฉีดน้ำมันด้วยความเร็วสูงมากๆ ได้ ประสิทธิภาพการเผาไหม้ยิ่งดีและเป็นการลดมลภาวะจากการเผาไหม้ด้วย [3]

ทางการแพทย์ ยังนำเทคโนโลยีลำพุงของเหลวถูกศึกษาและพัฒนาเพื่อนำส่งยาเข้าสู่ร่างกายแทนเข็ม พบว่าความเร็วและความดันน้อยสุดในการเจาะผิวหนัง ประมาณ 150 m/s และ 140 MPa ตามลำดับ [4 และ 5] ซึ่งความเร็วของลำพุงจะต้องมากขึ้นตามเป้าหมายในการฉีด

นอกจากการประยุกต์ใช้งานดังที่กล่าวไว้ ลำพุงความเร็วสูงยังถูกไปใช้กับ อุตสาหกรรมเจาะน้ำมัน เจาะอุโมงค์ หรือแม้แต่การฉีดพ่นต่างๆ ด้วยเช่นกัน

จะเห็นได้ว่าเทคโนโลยีของลำพุงความเร็วสูงมีบทบาทต่อการพัฒนาในงานหลายประเภท ดังที่กล่าวไว้ ดังนั้นความเข้าใจคุณลักษณะของลำพุง จึงมีความสำคัญ และนอกจากนั้นแล้ว การเพิ่มความเร็วลำพุงให้สูงขึ้นมีความสำคัญต่อการพัฒนาเทคโนโลยีเหล่านั้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

การศึกษาเพื่อเพิ่มความเร็วของลำพุงให้สูงกว่าความเร็วเสียง (ระดับ Supersonic หรือ Hypersonic) F. P. Bowden และ J. H. Brunton [6] การศึกษาการกระแทกบนวัสดุของลำพุงความเร็วสูง ซึ่งใช้หลักการ “ขับลำพุงด้วยการกระแทก (impact driven method)” โดยลำพุงที่ได้มีความเร็วสูงถึง 1200 m/s จากนั้น ด้วยหลักการเดียวกัน K. Pianthong และคณะ [7-10] ศึกษาการฉีดเชื้อเพลิงที่ความเร็ว 1500 – 2,500 m/s เพื่อศึกษาคุณลักษณะของลำพุงกับการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากลำพุงความเร็วสูงถูกนำไปประยุกต์ใช้กับงานหลายประเภท จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาคุณลักษณะที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ในด้านอื่นๆ ด้วย

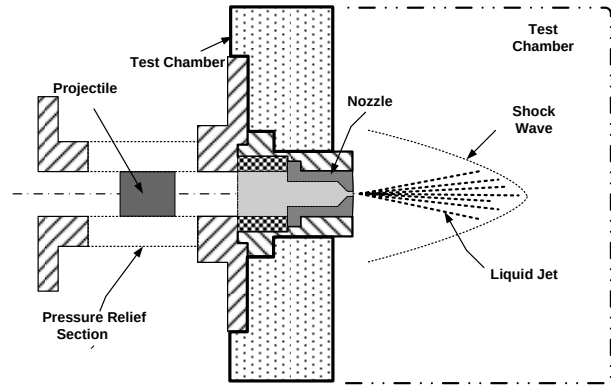
ด้วยเหตุนี้ที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จึงได้ทำการสร้างชุดทดลอง เพื่อสร้างลำพุงของเหลวความเร็วสูง จากการอาศัยหลักการ ขับลำพุงด้วยการกระแทก ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าว จำเป็นต้องทำการเปรียบเทียบ ก่อนนำไปใช้ทดสอบ

ดังนั้นการศึกษานี้จึงได้ทำการเปรียบเทียบอุปกรณ์การทดลองการฉีดลำพุงด้วยความเร็วสูง เพื่อเก็บข้อมูลเป็นพื้นฐานสำหรับอุปกรณ์การทดลอง โดยเปรียบเทียบความเร็วของลูกปืนกับดินปืน สำหรับการกำหนดความเร็วลูกปืนในการศึกษาลำพุงของเหลวในลำดับต่อไป

2. การทดลอง

2.1 หลักการขับลำพุงด้วยการกระแทก (impact driven method)

หลักการการขับลำพุงด้วยการกระแทกถูกใช้เป็นครั้งแรกโดย Bowden and Brunton [6] เพื่อสร้างลำพุงที่มีความเร็วสูง (ดังแสดงในรูปที่ 1) โดยหลักการนี้จะบรรจุของเหลวในหัวฉีด จากนั้นปล่อยลูกปืนด้วยความเร็วสูง กระแทกของเหลวภายในหัวฉีดให้เกิดความดันระดับ GPa และหัวฉีดจะปล่อยของเหลวออกมาด้วยความเร็วเหนือเสียงที่ความดันบรรยากาศเข้าสู่ห้องทดสอบ



รูปที่ 1 การขับลำพุงด้วยการกระแทก (Impact Driven Method)

2.2 อุปกรณ์ฉีดลำพุงด้วยความเร็วสูง

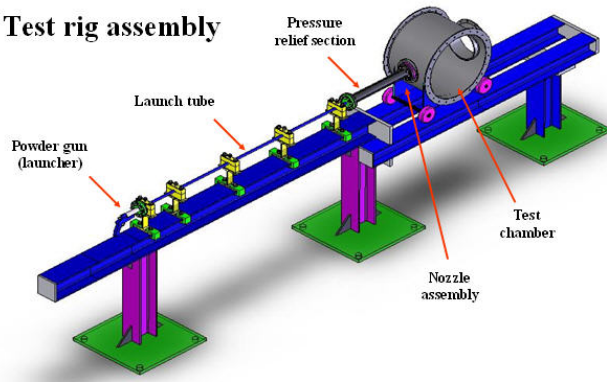
ชุดทดลองนี้มีองค์ประกอบหลัก 4 ส่วน ได้แก่ ชุดปล่อยลูกปืน (Launcher) ท่อส่งลูกปืน (Launch Tube) ท่อระบายความดัน (Pressure Relief Section) และห้องทดสอบ (Test Chamber) ดังแสดงในรูปที่ 2

ชุดปล่อยลูกปืนทำหน้าที่เป็นตัวขับ จากการจุดระเบิดของดินปืนในห้องเผาไหม้ และขับลูกปืนที่ทำจาก High Density Polyethylene (HDPE) หนัก 0.88 g ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.1 mm ยาว 15 mm สำหรับระบบการจุดระเบิด ดินปืนจะบรรจุในท่อบรรจุ (รูปที่ 3a) และลูกปืนจะอัดบนหัวท่อบรรจุ (รูปที่ 3b) ซึ่งทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 3 ในช่วงแรกเมื่อ จุดชนวนด้วยเข็มแทงชนวนทั่วไป พบว่าการจุดระเบิดดินปืนไม่แน่นอน เนื่องจากแรงกดของเข็มแทงชนวนไม่พอ จึงได้ทำการปรับปรุงระบบการจุดระเบิดใหม่โดยใช้หลักการของปืนปากกา ที่ใช้แรงอัดจากสปริง ดันให้เข็มแทงชนวน ซึ่งพบว่าให้ประสิทธิภาพมากกว่าแบบจุดด้วยเข็มแทงชนวนทั่วไป ที่ปากทางออกของชุดปล่อยลูกปืนจะต่อกับท่อส่งลูกปืนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm ยาว 1,500 mm สำหรับการปล่อยให้ลูกปืนเพิ่มความเร็วของลูกปืน ก่อนจะไปยังท่อระบายความดัน

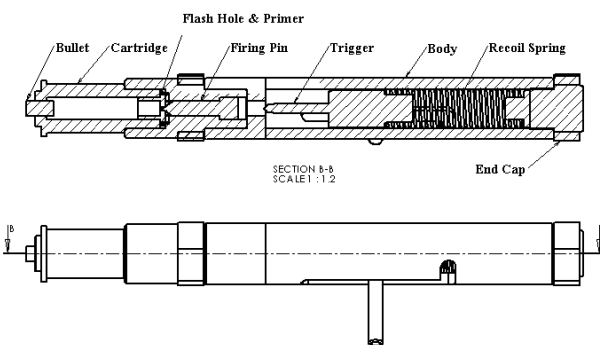
หน้าของท่อระบายความดันจะทำการระบายอากาศด้านหน้าลูกปืนที่ถูกอัดในท่อส่งออกสู่บรรยากาศ เพื่อป้องกันอากาศกระแทกบนหัวฉีด ก่อนลูกปืน ท่อระบายความดันมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm ผ่าสอง 4 ด้าน ขนาดกว้าง 4 mm ยาว 400 mm ปลายท่อต่อกับชุดประกอบหัวฉีด ซึ่งอยู่ระหว่างท่อระบายความดันกับห้องทดสอบ

ห้องทดสอบมีลักษณะเป็นทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 400 mm ด้านข้างทั้งสองประกบติดด้วยวัสดุใสทำจาก Polymethyl Methacrylate (PMMA) ด้านหลังห้องทดสอบต่อกับถังรับลูกปืนซึ่งจะทำหน้าที่คอยรับลูกปืนที่ถูกยิงออกมา ห้องทดสอบนี้ถูกออกแบบให้สามารถปรับความดันภายในได้ เพื่อรองรับการทดลองในขั้นต่อไป นอกจากนี้แล้วการวัดความเร็วของลูกปืนและลำพุงจะติดตั้งอุปกรณ์วัดไว้ในส่วนนี้ด้วย

Test rig assembly



รูปที่ 2 ชุดอุปกรณ์กำเนิดลำพุ่งความเร็วสูง



a) ชุดจุดระเบิดด้วยปืนปากกา



b) ท่อบรรจุดินปืนกับลูกปืน

รูปที่ 3 ระบบจุดระเบิดแบบปืนปากกาในชุดปล่อยลูกปืน

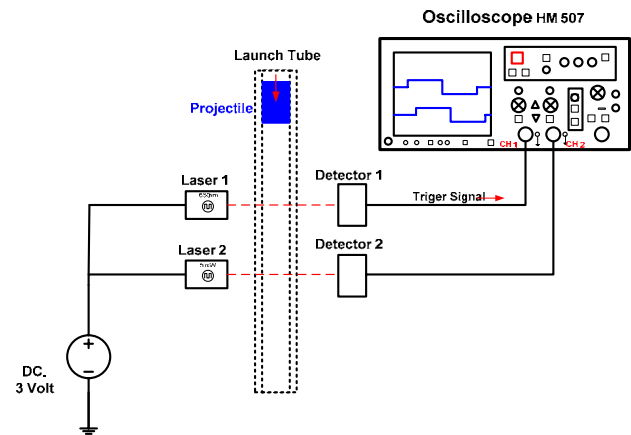
2.3 การวัดความเร็วของลูกปืนและลำพุ่งของเหลว

การวัดความเร็วของลูกปืนและลำพุ่งของเหลวใช้หลักการ “การตัดแสงเลเซอร์ของวัตถุ (laser beam interrupt method)” หรือ “Time of Flight Method” ติดตั้งตัวกำเนิดแสงเลเซอร์และตัวรับแสงเลเซอร์มีกำลัง 5 mW ความยาวคลื่นประมาณ 850 nm วางตัวกำเนิดห่างจากผนังด้านชุดประกอบหัวฉีด 12 mm และห่างกัน 33 mm ภายในห้องทดสอบ ตัวรับแสงจะต่อสัญญาณเข้ากับ Oscilloscope เพื่ออ่านสัญญาณไฟฟ้าจากตัวรับแสงและแสดงบนหน้าจอ ดังไดอะแกรมรูปที่ 4

การวัดความเร็วของลูกปืนนั้นจะวัดจากเวลาที่ลูกปืนใช้ในการวิ่งตัดแสงเลเซอร์ตัวที่หนึ่งกับแสงเลเซอร์ตัวที่สอง แล้วจึงแปลงมาเป็นความเร็วเฉลี่ยของลูกปืนดังสมการ

$$v_p = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

โดยที่ Δx คือระยะห่างระหว่างแสงเลเซอร์ทั้งสองเท่ากับ 33 mm และ Δt ได้จากผลที่แสดงใน Oscilloscope ของเส้นสัญญาณจากตัวรับแสงเลเซอร์ทั้งสอง ซึ่งแสดงผลดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 ไดอะแกรมวงจรของการวัดความเร็วของลูกปืน



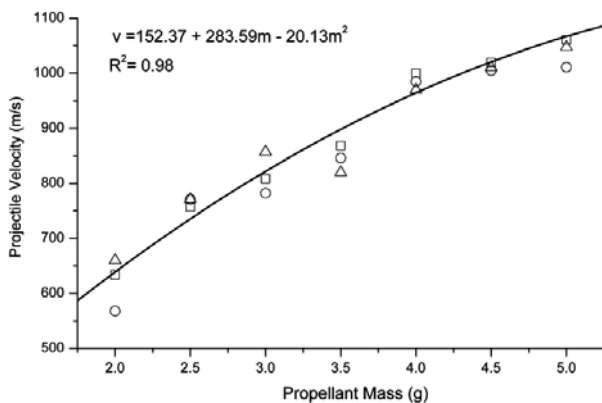
รูปที่ 5 ระบบวัดความเร็วแสงด้วยแสงเลเซอร์และความเข้มแสงที่ตกไปเมื่อวัตถุวิ่งผ่าน

นอกจากนี้ยังได้ถ่ายภาพการเคลื่อนที่ของลูกปืนด้วย กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง (High Speed Video Camera) ของบริษัท Photron รุ่น FASTCAM SA3 ซึ่งสามารถถ่ายภาพด้วยความเร็วได้สูงสุดถึง 60,000 fps เพื่อศึกษาพฤติกรรมและวัดความเร็วของลูกปืนและลำพุ่งขณะเคลื่อนที่ในห้องทดสอบ

3. ผลการศึกษา

3.1 ปริมาณดินปืนกับความเร็วของลูกปืน

เมื่อทำการเก็บข้อมูล โดยวัดความเร็วของลูกปืนที่เปลี่ยนไปกับน้ำหนักของดินปืนที่เติมแต่ละครั้งในการยิง (ทำซ้ำ 3 ครั้ง) พบว่า ดินปืนจะสามารถทำการขับเคลื่อนลูกปืนได้ต้องใช้ ดินปืนประมาณ 2 g ขึ้นไปหากน้อยกว่านั้น ไม่สามารถขับเคลื่อนลูกปืนได้ ทั้งนี้ห่อบรรจุดินปืนสามารถบรรจุดินปืนได้สูงสุด 5 g ในช่วงที่ทำการศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่าเมื่อดินปืนมีปริมาณเพิ่มขึ้นความเร็วของลูกปืนก็จะเพิ่มขึ้นด้วย แต่อย่างไรก็ตามมีข้อสังเกตว่า ที่ช่วง 4 – 5 g ความเร็วของลูกปืนเริ่มมีค่าใกล้เคียงกัน อยู่ช่วง 950 – 1050 m/s

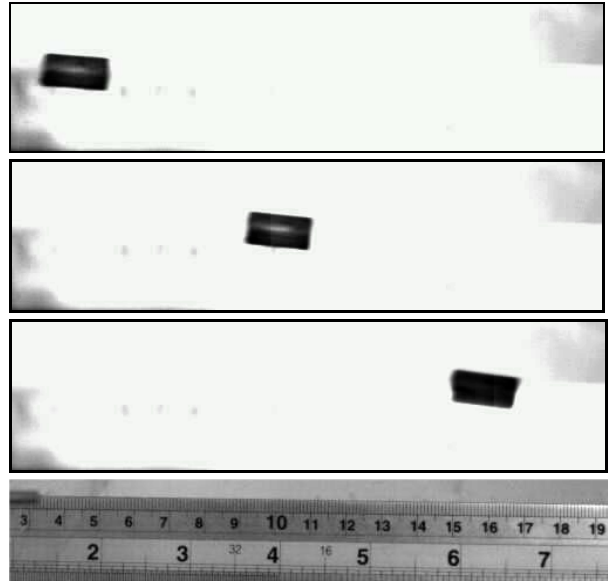


รูปที่ 6 ผลของปริมาณดินปืนที่มีต่อความเร็วของลูกปืน

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณดินปืนกับความเร็วลูกปืนที่ได้จากการทดลอง สามารถนำข้อมูลมาสร้างสมการประมาณการได้ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6 สมการนี้สามารถนำมาคำนวณหาความเร็วของลูกปืน (v) จากปริมาณดินปืน (m) ที่ใช้และเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้ศึกษาในระดับต่อไป

3.2 การเคลื่อนที่ของลูกปืน

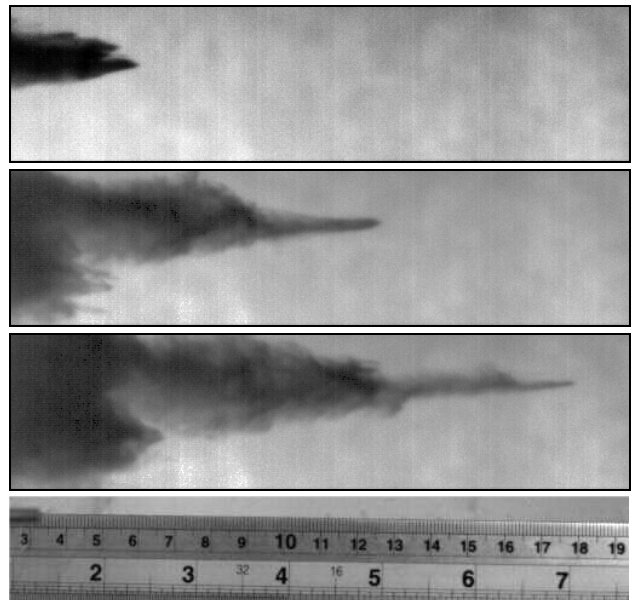
เมื่อทำการถ่ายภาพด้วยกล้องความเร็วสูง ที่ความเร็ว 15,000 fps พบการเคลื่อนที่ของลูกปืน ดังแสดงในรูปที่ 7 จากรูปสามารถวัดความเร็วของลูกปืน โดยเวลาของแต่ละภาพใช้ห่างกัน 66.7 micro-sec. ระยะห่างของลูกปืนวัดได้ตามภาพโดยเทียบกับความยาวไม้บรรทัด ที่ติดตั้งก่อนทำการถ่าย ซึ่งจากรูปทำการคำนวณพบว่าความเร็วเฉลี่ยของลูกปืนประมาณ 833 m/s ทั้งนี้ความเร็วลูกปืนในช่วงรูปแรกกับรูปสอง มีค่าน้อยกว่าความเร็วในช่วงรูปสองกับรูปสาม นั้นหมายความว่าลูกปืนยังเร่งความเร็วได้ไม่สูงสุด จากปลายกระบอกปืนแต่จะยังมีความเร็วเพิ่มขึ้นอีกซึ่งในการศึกษานี้ไม่สามารถระบุได้เนื่องจากข้อจำกัดของความกว้างของห้องทดสอบและเครื่องมือวัด



รูปที่ 7 ภาพถ่ายการเคลื่อนที่ของลูกปืน จากกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง 66.67 micro-sec ต่อภาพ, ดินปืนชนิดดินดำ,หนัก 3 g

3.3 การเคลื่อนที่ของลำฟุ้ง

เมื่อทำการถ่ายภาพลำฟุ้งด้วยกล้องความเร็วสูงที่ 20,000 fps ได้ผลแสดงดังรูปที่ 8 โดยใช้ลูกปืนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.1 mm ยาว 15 mm หนัก 0.88 กรัม กระแทกบนหัวฉีดแบบรูปเดียว มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 mm ของเครื่องยนต์ดีเซล พบว่าความเร็วเฉลี่ยของลำฟุ้งประมาณ 1,350 m/s จากความเร็วลูกปืนที่วัดได้ในตอนต้น 833 m/s



รูปที่ 8 การเคลื่อนที่ของลำฟุ้งหลังจากการกระแทกของลูกปืน

4. อภิปรายผลการศึกษา

การทดสอบเบื้องต้นของเครื่องมือสร้างลำพุ่งความเร็วสูง เพื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลสำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลูกปืนกับปริมาณดินปืน ให้ผลตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา ตามรูปที่ 6 แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าชุดข้อมูลนี้ ยังกระจายและเบี่ยงเบนอยู่ ปัจจัยที่ทำให้การยิงลูกปืนแต่ละครั้งที่ดินปืนปริมาณเท่ากันแต่ให้ความเร็วคลาดเคลื่อนกัน ได้แก่ การเผาไหม้ของดินปืนไม่เป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งขึ้นอยู่กับห้องเผาไหม้หรือท่อบรรจุดินปืน ชนิดและคุณภาพของดินปืน ความสะอาดของอุปกรณ์การทดสอบโดยเฉพาะในท่อส่งลูกปืน และห้องเผาไหม้ ก็มีผลเช่นเดียวกัน เพราะเศษวัสดุ หรือฝุ่นในท่อที่ลูกปืนเคลื่อนที่มีผลเพิ่มแรงเสียดทานได้เช่นกัน

นอกจากนี้แล้วจากภาพถ่ายความเร็วสูง เห็นได้ว่าการเคลื่อนที่ออกมาในห้องทดสอบของลูกปืนจะไม่ขนานกับแนวระนาบ และไม่เหมือนกันในการทดสอบแต่ละครั้ง ทำให้แรงต้านจากอากาศต่อการเคลื่อนที่มีค่าไม่เท่ากัน ความเร็วของลูกปืนที่วัดได้จึงไม่เท่ากันด้วย แต่อย่างไรก็ตามพฤติกรรม การเคลื่อนที่ของลูกปืนในห้องทดสอบไม่มีผลต่อการศึกษาลำพุ่งของของเหลว เพราะว่าลูกปืนจะหยุดที่ชุดประกอบหัวฉีด หลังจากการฉีดลำพุ่งของเหลว

ปัจจัยที่มีผลต่อความเร็วลูกปืนเหล่านี้ยังจำเป็นต้องทำการการศึกษาเพื่อพัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพของชุดทดลองให้ดียิ่งขึ้น

5. สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้แสดงชุดทดสอบสำหรับกำเนิดลำพุ่งความเร็วสูง พร้อมเครื่องมือวัดความเร็วลูกปืนและลำพุ่ง ทำการเปรียบเทียบอุปกรณ์ โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างดินปืนและความเร็วของลูกปืน พร้อมทั้งเสนอสมการประมาณความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองเพื่อเป็นข้อมูลในการศึกษาในระดับต่อไป

จากการศึกษานี้พบว่าความเร็วของลูกปืนที่ได้จากการวัดแต่ละครั้งมีค่าไม่เท่ากันทุกครั้ง เนื่องจาก การเผาไหม้ไม่สม่ำเสมอ ลักษณะการเคลื่อนที่ของลูกปืนไม่แน่นอน และความสะอาดของอุปกรณ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ภายในท่อส่งลูกปืน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

เอกสารอ้างอิง

1. Leach, S. J., Walker, G. L., Smith, A. V., Farmer, I. W and Geoffrey Taylor, 1966. Some Aspects of Rock Cutting by High Speed Water Jets. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 260, No. 1110, pp 295 – 310.
2. Harris, H. D. and Malcolm Mellor. Cutting Rock with Water Jets. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 11, pp. 343 – 358.

3. Milton, B.E. and Pianthong, K., 2005. Pulsed, Supersonic Fuel Jet – A Review of Their Characteristics and Potential for Fuel Injection. International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 25, pp. 656-671.
4. Shergold, O. A., Fleck, N. A., and King, T. S., 2006. The Penetration of a Soft Solid by a Liquid Jet, with Application to the Administration of a Needle-Free Injection. Journal of Biomechanics Vol. 39, pp. 2593–2602.
5. Baxter, J. and Mitragotri, S., 2004. Needle-Free Jet Injections: Dependence of Jet Penetration and Dispersion in the Skin on Jet Power. Journal of controlled release. Vol. 97, pp. 517-535.
6. Bowden, F. P. and Brunton J. H. 1961. The Deformation of Solids by Liquid Impact at Supersonic Speeds. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 263, No. 1315, pp. 433-450.
7. Pianthong., K. Zakrzewski, S. Behnia., M. and Milton., B.E. 2003. Characteristics of Impact Driven Supersonic Liquid Jets. Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 27 (5), pp. 589-598.
8. Pianthong, K., Takayama, K., Milton, B.E. and Behnia, M. 2005. Multiple Pulsed Hypersonic Liquid Diesel Fuel Jets Driven by Projectile Impact, Shock Waves Journal, Vol. 14, pp. 73 -82.
9. Pianthong, K., Matthujak, A., Takayama, K., Milton, B.E. and Behnia, M. 2006 .Fundamental Studies on Effects of Nozzle Geometries and Fuel Properties on the Characteristics of Supersonic Fuel Jets. Shock Waves Journal.
10. วีระพันธ์ สีหนาม วุฒิชัย สิทธิวงษ์ กุลเชษฐ์ เพียรทอง และ อนิรุทธ์ มัทธจักร, 2550. การจำลองคุณลักษณะเบื้องต้นของลำพุ่งเชื้อเพลิงความเร็วสูง, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21, 17-19 ตุลาคม จังหวัดชลบุรี