

อิทธิพลของชนิดของลำพุ่งต่อความดันกระแทกของลำพุ่งความเร็วสูง Effect of different liquid jets on impact pressure of high-speed liquid jet

ปกรณ์ เห่งเกษ และ อนิรุตต์ มัทธจุจักร*

ห้องปฏิบัติการการประยุกต์ใช้ลำพุ่งและการเผาไหม้ (CJARL) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ตำบลเมืองศรีโค อำเภวารินชำราบ
จังหวัดอุบลราชธานี 34190

* E-mail: pakorn_ngaoket@hotmail.co.th, anirut.mat@gmail.com, A.Matthujak@ubu.ac.th. Tel: 0-4535-3309

บทคัดย่อ

การศึกษาลำพุ่งกระแทกความเร็วสูง (High speed impact jet) มีการศึกษามานาน ซึ่งการชนของเม็ดฝน (Rain impact) เมื่อเครื่องบินที่บินด้วยความเร็วสูงในเวลาที่เกิดฝนตกเป็นการวิจัยเริ่มแรกเกี่ยวกับลำพุ่งกระแทกความเร็วสูง (High speed impact jet) ต่อมาได้นำมาประยุกต์ใช้ในแง่มุมทางวิศวกรรมอื่นๆ เช่น เทคโนโลยีการตัดโดยลำพุ่ง (Jet cutting technology) การทำความสะอาดวัสดุโดยลำพุ่ง (Material cleaning by jets) การทำเหมืองแร่และการเจาะอุโมงค์โดยการกระแทกของลำพุ่งความเร็วสูง (Mining and tunneling by means of high-speed jet impingements) เป็นต้น และการชนของเม็ดฝนนี้เป็นที่มาของงานวิจัยทางด้านการกระแทกของลำพุ่งความเร็วสูง ดังนั้นในการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจวัดความดันกระแทกของลำพุ่งความเร็วสูงโดยใช้ Piezoelectric polyvinylidene fluoride (PVDF) film ซึ่งการผลิตลำพุ่งความเร็วสูงจะใช้หลักการที่เรียกว่า Impact driven method ในชุดทดลอง Horizontal Single Stage Gas Gun (HSSGG) เพื่อทำการศึกษาอิทธิพลของชนิดของลำพุ่งต่อความดันกระแทก ซึ่งชนิดของลำพุ่งที่ใช้ศึกษาคือ น้ำ, ดีเซล, น้ำมันก๊าด, น้ำมันเบนซิน และแอลกอฮอล์ นอกจากนี้ยังศึกษาอิทธิพลของระยะทางระหว่างหัวฉีดกับ PVDF ที่มีผลต่อความดันกระแทกอีกด้วย จากการตรวจวัดความดันกระแทกด้วย พบว่า เมื่อระยะทางของหัวฉีดกับ PVDF เพิ่มขึ้นความดันกระแทกจะมีค่าลดลงและพบว่าความดันกระแทกของ Water jet มีค่าสูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 720 MPa ที่ระยะ 1 cm

คำหลัก: ความดันกระแทก, ลำพุ่งความเร็วสูง, Impact driven method, PVDF

Abstract

Impact of high speed jet has been studied for a long time such as, the impact of rain (rain impact) on aircraft flying at high speeds in a rain, jet cutting technology, material cleaning by jets, mining and tunneling, etc. Therefore, this study is to measure the impact pressure of the high speed liquid jets at various stands-off distances from the nozzle exit. The high-speed liquid jets are generated by the impact of a projectile, which known as impact driven method, launched by horizontal single stage gas gun. The impact pressure of the jets was measured by the PVDF pressure sensor. The type of jets used in the experimental are water, diesel, gasoline, kerosene, and alcohol. From the measurement and calculation, it was found that the impact pressure of water jet calculated from water hammer equation decreases gradually, while it measured by the PVDF pressure sensor decreases exponentially as the stand-off

AME-2004

distance increases. The impact pressure of a water jet is the highest, being 720 MPa at a stand-off distance of 1 cm.

Keywords: Impact pressure, High speed jet, Impact driven method, PVDF

1. บทนำ

การชนของเม็ดฝนบนตัวเครื่องบินเป็นงานวิจัยเริ่มต้นของการศึกษาการกระแทกของของเหลว ซึ่งต่อมาได้นำมาประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมหลายด้าน เช่น เทคโนโลยีการตัด การทำความสะอาด งานชุดเจาะเหมืองแร่และอุโมงค์ [1-3] เป็นต้น ในปี ค.ศ. 1958 F.P.Bowden และ J.H.Brunton [4] ได้คิดค้นเทคนิคการผลิตลำพุ่งความเร็วสูงโดยกระแทกของกระสุนความเร็วสูง ความเร็วของลำพุ่งที่ผลิตได้สูงสุด 1200 m/s

ในปี ค.ศ. 1995 Hong-Hui Shi [5] ได้ศึกษาการกระแทกที่เกิดจากลำพุ่งน้ำที่มีความเร็วในระดับ subsonic ไปจนถึง hypersonic โดยใช้ PVDF ในการวัดและศึกษาความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำในลักษณะท่ามุ่มต่างๆ โดยใช้สมการค่อนน้ำในการคำนวณหาความดันของลำพุ่ง พบว่า ความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำที่ความเร็ว 270 m/s จะมีความดันที่ใกล้เคียงกันในช่วงระยะ 20 mm จากปลายหัวฉีด และจะเริ่มลดลงมากในช่วง 40 mm จากปลายหัวฉีด นอกจากนี้จะเห็นการเจาะที่เกิดขึ้นบนแผ่น PMMA เพียงเล็กน้อย และเมื่อความดันของลำพุ่งน้ำในระดับ hypersonic คือ 2000, 2500, 3000 และ 3750 m/s จะเห็นการเจาะที่เกิดขึ้นบนแผ่นทองแดงโดยลำพุ่งน้ำ ความเร็วของลำพุ่งน้ำที่ 3750 m/s จะมีรูขนาดกว้างที่สุด

ในปี พ.ศ. 2552 วุฒิชัย สิทธิวงษ์ และคณะ [6] ได้ศึกษาและเปรียบเทียบการวัดความกระแทกของลำพุ่งน้ำความเร็วสูงที่ระดับความเร็วเหนือเสียง โดยลำพุ่งความเร็วสูงจะใช้ยิงกระสุนความเร็วสูงเข้ากระแทกน้ำที่บรรจุอยู่ในชุดหัวฉีด ความเร็วของลำพุ่งที่ใช้ในการทดลองจะมีความเร็วอยู่ในช่วง 1,240 – 2,290 m/s โดยศึกษาอิทธิพลของหัวฉีด 3 แบบ โดยแต่ละแบบจะมีมุมภายใน 30°, 60° และแบบทรงกระบอก ที่มีขนาดรูหัวฉีด 0.7 mm ลำพุ่งความเร็วสูงของน้ำจะพุ่งเข้า

กระแทกแผ่นอะคริลิกและวัดแรงกระแทกของลำพุ่งโดยใช้ PVDF film โดยหัวฉีดที่มีมุมภายใน 30° จะมีความเร็วสูงสุดเท่ากับ 2,290 m/s และความดันสูงสุดเท่ากับ 3.57 GPa

ในปี 2553 ชัยเดช เกษมนิมิตรพร และคณะ [7] ได้ศึกษาการวัดแรงดันกระแทกของลำพุ่งน้ำในน้ำที่ระยะต่างๆจากปลายของหัวฉีดโดยใช้ Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Film พร้อมกับการถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูง (High speed camera) ร่วมกับเทคนิค Shadowgraph technique พบว่า จากภาพถ่ายจะเห็นกลไกการกระแทกของลำพุ่งในน้ำเนื่องมาจากลำพุ่งและ water vapor bubble ซึ่งสอดคล้องกับสัญญาณที่ได้จากการวัดแรงดันกระแทกโดยมีค่าเท่ากับ 17.33 GPa กับ 18.92 GPa ตามลำดับ จากการวัดการกระแทกของลำพุ่งในน้ำพบว่าความดันกระแทกมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างจากหัวฉีดเพิ่มขึ้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเพียงแรงดันกระแทกของลำพุ่งของน้ำ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาอิทธิพลของชนิดของลำพุ่งต่อความดันกระแทกของลำพุ่งความเร็วสูง โดยใช้ลำพุ่ง 5 ชนิดในงานวิจัย เช่น น้ำ, ดีเซล, น้ำมันก๊าด, น้ำมันเบนซิน และแอลกอฮอล์ และทำการตรวจวัดความดันกระแทกที่ระยะต่างๆ จากปลายหัวฉีด

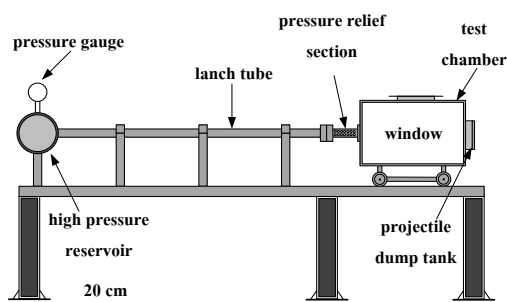
2. การทดลอง

2.1 ชุดทดลอง

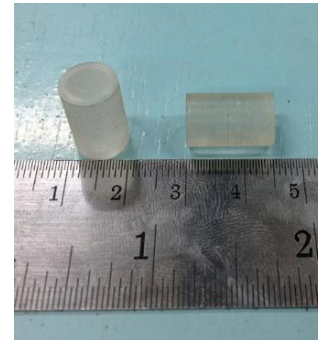
ในการศึกษานี้การผลิตลำพุ่งความเร็วสูง จะใช้เทคนิคพิเศษที่เรียกว่า Impact driven method [4,6,7] โดยเทคนิคนี้จะยิงกระสุนความเร็วสูง (High-speed projectile) เข้าไปกระแทกกับของเหลวที่บรรจุอยู่ในหัวฉีดด้วยความเร็วสูง หลังจากนั้นของเหลวก็จะฉีดออกมาจากหัวฉีดด้วยความเร็วสูง โดยใน

AME-2004

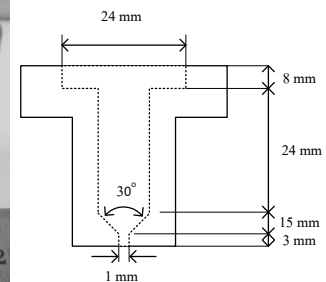
การศึกษานี้กระสุนความเร็วสูงจะถูกยิงออกมา จากชุดทดลองที่เรียกว่า “Horizontal Single-Stage Gas Gun (HSSGG)” ดังรูปที่ 1 ซึ่งส่วนประกอบหลักจะประกอบด้วย ถังเก็บอากาศความดันสูง (High pressure reservoir) ท่อส่งกระสุนปืน (Launch tube) ท่อระบายความดัน (Pressure relief section) ห้องทดสอบ (Test chamber) โดยถังเก็บอากาศความดันสูงจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 7.62 cm ยาว 21 cm และมีปริมาตร $9.58 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ ท่อส่งกระสุนปืนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 10 mm ยาว 1.1 m ท่อระบายความดันมีความยาว 15 cm ถูกออกแบบมาเพื่อลดแรงอัดด้านหน้าของลูกกระสุน ท่อระบายแรงดันนี้จะเจาะรูเพื่อระบายแรงดันทั้งหมด 3 แถว แต่ละแถวจะมี 4 รู ขนาดของรู 5 mm ห้องทดสอบจะมีรูปทรงสี่เหลี่ยมที่มีด้านกว้างขนาด 40x50 cm ยาวเท่ากับ 60 cm โดยหน้าต่างของห้องทดสอบจะใช้ Polymethyl Methacrylate (PMMA) เป็นวัสดุทั้งสองข้างเพื่อทำให้มองเห็นภายในห้องทดสอบ ลูกกระสุนที่ใช้ทำมาจาก Polymethyl Methacrylate (PMMA) ซึ่งจะมีรูปทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 9.5 mm ยาว 15 mm และมีมวลเท่ากับ 1.25 g ดังรูปที่ 2a ซึ่งชุดทดลอง (HSSGG) จะสามารถสร้างความเร็วของลูกกระสุนอยู่ระหว่าง 50 ถึง 350 m/s ในแต่ละแรงขับเคลื่อนส่วนของหัวฉีดจะอยู่ถัดมาจากท่อระบายแรงดันซึ่งหัวฉีดจะผลิตมาจากเหล็กอ่อนขนาดดังรูปที่ 2b โดยลูกกระสุนจะมีความเร็วประมาณ 220 m/s ถูกใช้ในการทดลองทั้งหมด และความเร็วของลูกกระสุนจะเกิดจากแรงขับเคลื่อน 8 bar



รูปที่ 1 Horizontal Single-stage Gas Gun (HSSGG)



(a)



(b)

รูปที่ 2 (a) ลูกกระสุน (Projectile) และ (b) รูปทรงของหัวฉีด (Nozzle geometry)

2.2 การวัดความดันของลำพุ่ง

ลำพุ่งความเร็วสูงจะถูกผลิตโดยชุด HSSGG ในการกระแทกของลำพุ่ง 1 ครั้งจะเกิดขึ้นในระยะเวลาอันสั้น และความดันที่เกิดขึ้นเป็นความดันแบบไดนามิกหรือความดันแบบค้อนน้ำ (water-hammer pressure) จากการกระแทกของลำพุ่ง โดยความดันแบบไดนามิกเป็นความดันสูงตั้งแต่ระดับ MPa ไปจนถึง GPa ดังนั้นจึงยากที่จะวัดโดยใช้วิธีและเครื่องมือวัดแบบทั่วไป

ในการวัดความดันสูงเหล่านี้เซนเซอร์ที่ใช้วัดความดันสูงได้ถูกออกแบบปรับเทียบ เซนเซอร์ความดันและถูกสร้างขึ้นโดยมีส่วนประกอบคือ เปียโซอิเล็กทริกฟิล์ม (Piezoelectric polyvinylidene fluoride (PVDF) film) โดยมี Polymethyl Methacrylate (PMMA) หนา 6 mm และยางหนา 8 mm เป็นตัวรองรับ การประกอบเซนเซอร์ความดัน ในความหนาของชุดเซนเซอร์ความดัน 8 mm นั้นจะอยู่ส่วนหน้าของชุดรองรับซึ่งชุดรองรับจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 75 mm ดังรูปที่ 3 PVDF film นี้มีองค์ประกอบที่ยึดหยุ่น

เทคนิคการวัดความดันกระแทกและความเร็วของ
ลำพุ่งได้ออกแบบมาเป็นพิเศษและได้รับการพัฒนา
สำหรับการศึกษานี้ ในการวัดความดันกระแทกและ
ความเร็วของลำพุ่งนี้ ได้ถูกนำมาใช้คำนวณในสมการ
ค้อนน้ำ (Water hammer) ในการทดลองหนึ่งครั้งจะ
สามารถคำนวณความดันของลำพุ่งจากสมการที่ (1)
ความเร็วของลำพุ่งจากสมการที่ (2) และความดัน

AME-2004

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของของเหลวที่ใช้ในกาทดลอง[8]

ชนิดของ ของเหลว	น้ำหนักโมเลกุล (g/mol)	ความหนาแน่น ที่ 20° (Kg/m ³)	ความหนืดจลน์ ที่ 20° (cSt)	ความตึงผิว ที่ 20° (N/m)	ความจุความร้อน ที่ 40° (J/g°C)	ความร้อนแฝง (KJ/Kg)
น้ำ	18	998	1.003	0.0728	4.19	2,257 (at 100°C)
น้ำมันดีเซล	198	840	1.8 – 4.0	0.0244	1.97	267.49 (at 170°C)
น้ำมันก๊าด	170	810	1.5 – 2.5	0.0235	2.02	314.01 (at 117.8°C)
น้ำมันแก๊สโซลีน	32	785.1	1.6	0.0220	2.3	896 (at 90°C)
แอลกอฮอล์	114	750	0.5	0.0200	2.1	318.66 (at 90°C)

ของลำพุงจากสมการค้อนน้ำ (Water hammer) ได้ในเวลาเดียวกัน ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบของการทดลองด้วยเทคนิคนี้ ดังนั้นค่าความดันกระแทกของลำพุงจากเซ็นเซอร์ความดัน PVDF มีความสอดคล้องกับค่าความดันที่ได้จากการคำนวณของสมการค้อนน้ำ

3 สมการค้อนน้ำ (Water hammer)

การศึกษากลไกการเสียรูปของผิววัสดุภายใต้แรงกระแทกของของไหลที่มีความเร็วสูงเป็นผลที่เกิดจากความดันกระแทกที่เกิดจากของไหลเคลื่อนที่แล้วหยุดอย่างฉับพลันจากสิ่งกีดขวาง โดยใช้สมการพื้นฐานของสมการค้อนน้ำ (Water Hammer) [3,5,7] สมการที่ใช้คือ

$$P = \rho CV \quad (3)$$

เมื่อ ρ เป็นความหนาแน่นของของไหล ความเร็วสูง (kg/m³), C เป็นความเร็วเสียงของของไหลความเร็วสูง (Sound of Speed, m/s) และ V เป็นความเร็วของของไหลความเร็วสูง (m/s)

สมการค้อนน้ำ (Water hammer) สามารถใช้คำนวณหาความดันสูงสุดของพุงได้จากความเร็วของลำพุง ความหนาแน่นของของเหลวที่ใช้ผลิตลำพุง และความเร็วเสียงของของไหลความเร็วสูงซึ่งข้อมูลทั้งหมดจะแสดงไว้ในตารางที่ 1

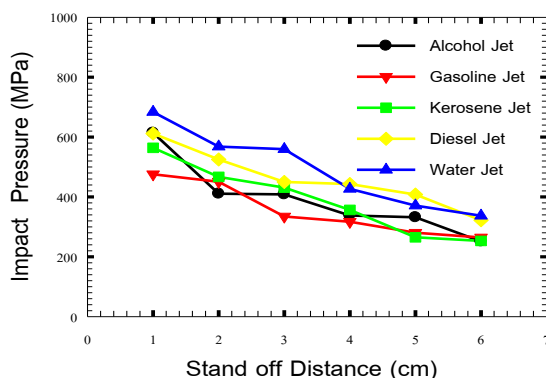
4. ผลการศึกษา

รูปที่ 5 แสดงอิทธิพลของชนิดลำพุงต่อความดันกระแทกที่ระยะจากปลายหัวฉีด 1, 2, 3, 4, 5, และ 6 cm ตามลำดับ ซึ่งได้จากการตรวจวัดโดย PVDF pressure sensor และจากการคำนวณด้วยสมการค้อนน้ำ โดยการทดลองแต่ละระยะจะทดลองซ้ำกันสามครั้งและหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้งหมด จากรูปที่ 5a พบว่า เมื่อระยะทางในการกระแทกเพิ่มขึ้นความดันกระแทกจะมีค่าลดลง โดยจะเกิดขึ้นในลักษณะเดียวกันทุกลำพุง เพราะเมื่อระยะทางจากปลายหัวฉีดเพิ่มขึ้นความเร็วของลำพุงจะมีค่าลดลงเนื่องจากผลของแรงต้านทางพลศาสตร์ (Aerodynamic drag) และเมื่อพิจารณาจากทุกระยะการกระแทกจะพบ ว่าลำพุงน้ำจะมีค่าสูงที่สุดเนื่องจากผลของความหนาแน่นของน้ำมีค่าสูงที่สุด และลำพุงน้ำมันแก๊สโซลีนจะมีค่าต่ำที่สุด เนื่องจากผลของน้ำหนักโมเลกุลของน้ำมันแก๊สโซลีนมีค่าต่ำที่สุด โดยลำพุงน้ำจะมีค่าความดันกระแทกสูงที่สุดเท่ากับ 683.8 MPa ที่ระยะ 1 cm จากปลายหัวฉีด และลำพุงน้ำมันแก๊สโซลีนจะมีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 264.7 MPa ที่ระยะ 6 cm จากปลาย เมื่อพิจารณาจากการวัดความดันกระแทกด้วย PVDF ในรูปที่ 5b พบว่าเมื่อระยะการกระแทกเพิ่มขึ้น ความดันกระแทกของลำพุงจะมีค่าต่ำลงด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับรูปที่ 5a โดยลำพุงน้ำจะมีค่าความดันกระแทกสูงที่สุดเท่ากับ 699.6 MPa ที่ระยะ 1 cm จากปลายหัวฉีด และลำพุงน้ำมันแก๊สโซลีนจะมีค่าต่ำ

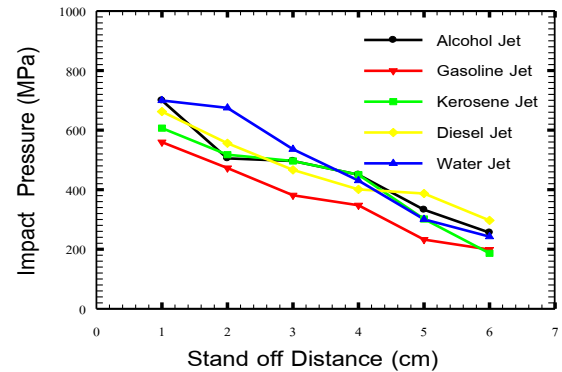
AME-2004

ที่สุดเท่ากับ 198.8 MPa ที่ระยะ 6 cm จากปลายหัวฉีด ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับรูปที่ 5a

รูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบการวัดความดันกระแทกจากการคำนวณของสมการค้อนน้ำ และ PVDF เซนเซอร์ ที่ระยะการวัดจากปลายหัวฉีดที่ระยะต่างๆ จะเห็นได้ว่าความดันของลำพ่นน้ำในการวัดของเซนเซอร์ความดัน PVDF จะสูงกว่าความดันที่ได้จากการคำนวณของสมการค้อนน้ำ ที่ระยะการตรวจวัดจากปลายหัวฉีด 1, 2 และ 3 cm หลังจากระยะ 3 cm ความดันกระแทกของลำพ่นที่วัดได้จาก PVDF จะต่ำกว่าค่าที่ได้จากสมการค้อนน้ำ เนื่องจากเมื่อลำพ่นเคลื่อนที่ไกลออกไปจากปลายหัวฉีดลำพ่นจะเกิดการแตกตัว (Atomization) และระเหยกลายเป็นไอ (Vaporization) จึงทำให้ที่ระยะทางเพิ่มขึ้นความดันที่วัดได้จาก PVDF จะมีค่าต่ำกว่าส่วนในการคำนวณจากสมการค้อนน้ำซึ่งจะไม่พิจารณาผลจากการแตกตัวและการระเหยกลายเป็นไอของลำพ่นดังกล่าว ในขณะที่การคำนวณด้วยสมการค้อนน้ำจะมีค่าต่ำกว่าที่ระยะทาง 1-3 cm อันเนื่องมาจากการคำนวณด้วยสมการค้อนน้ำจะใช้ความเร็วเฉลี่ยของลำพ่นซึ่งทำให้ผลการคำนวณความดันต่ำกว่าความดันชั่วขณะที่วัดได้โดย PVDF

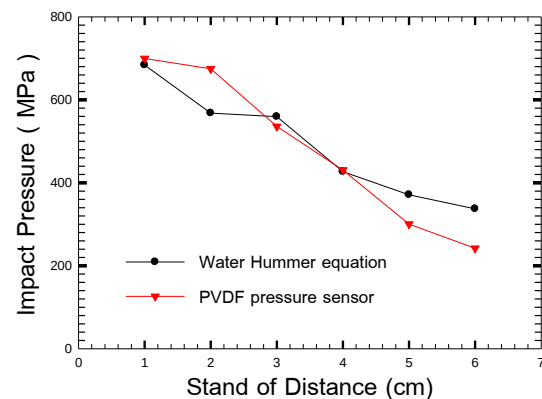


(a) สมการค้อนน้ำ (Water hammer)



(b) เซนเซอร์ความดัน PVDF

รูปที่ 5 อิทธิพลของชนิดของลำพ่นต่อความดันกระแทกที่ระยะทางต่างๆ



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบระหว่างสมการค้อนน้ำ (3) และเซนเซอร์ความดัน PVDF ที่ระยะต่างๆ จากปลายหัวฉีด

5. สรุปผลการศึกษา

ชุดทดลอง Horizontal Single-stage Gas Gun (HSSGG) ได้ถูกออกแบบและใช้ในการผลิตลำพ่นของเหลวความเร็วสูง ความดันกระแทกของลำพ่นชนิดต่างๆ ที่ฉีดในอากาศที่ 6 ระยะจากปลายหัวฉีดสามารถตรวจวัดค่าได้โดยเซนเซอร์ PVDF และยังสามารถวัดค่าความเร็วของลำพ่นทั้งหมดเพื่อนำไปคำนวณหาความดันกระแทกของลำพ่นโดยสมการค้อนน้ำ (Water hammer) ในเวลาเดียวกัน จากผลการทดลองพบว่า ความดันกระแทกของทุกลำพ่นจะ

AME-2004

ลดต่ำลงเมื่อระยะทางการกระแทกเพิ่มขึ้น โดยลำพุน้ำจะมีค่าสูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 699.6 MPa และ 683.8 MPa ที่ระยะ 1 cm และลำพุน้ำมันแก๊สโซลีนมีค่าต่ำที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 198.8 MPa และ 264.7 MPa ที่ระยะ 6 cm จากการวัดด้วย PVDF และสมการค้อนน้ำ ตามลำดับ ในการศึกษาการค้อนน้ำจะไม่ได้พิจารณาถึงปรากฏการณ์ปกติของลำพุน้ำ ดังนั้นค่าที่ได้จากสมการค้อนน้ำ และค่าที่ได้จากการวัดความดันของเซนเซอร์ความดัน PVDF จึงมีความแตกต่างของข้อมูล ดังนั้นการปรับปรุงสมการค้อนน้ำสำหรับการผลิตลำพุน้ำของเหลวความเร็วสูง และใช้เพื่อการคำนวณหาความดันของลำพุน้ำจะมีความศึกษาในครั้งต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีและสำนักงานวิจัยแห่งชาติ ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] King, R.B.: Rain erosion IV An assessment of various materials. *Wear* 4 (4), 328 (1961)
- [2] Springer, G.S.: *Erosion by liquid impact*, Wiley, New York (1976)
- [3] Obara T., Bourne N.K. and Field J.E. "Liquid-jet impact on liquid and solid surfaces" *Wear* 186-187, 388-394, 1995
- [4] F.P.Bowden, and J.H.Brunton.: Damage to solids by liquid impact at supersonics speeds. *Nature* 181, 873-875 (1958)
- [5] Hong-Hui Shi, Kazuyoshi Takayama, Nobuo Nagayasu, The measurement of impact pressure and solid surface response in liquidsolid impact up to hypersonic range ; *Wear* 186-187 (1995) 352-359
- [6] วุฒิชัย สิทธิวงษ์ , วิระพันธ์ สีหนาม, กุลเชษฐ์ เพียรทอง และ อนิรุตต์ มัทธูจักร.ความดันกระแทก

ของลำพุน้ำความเร็วสูง; การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23 ปี พ.ศ. 2552

[7] ชัยเดช เกษมนนิมิตรพร, อนิรุตต์ มัทธูจักร, วุฒิชัย สิทธิวงษ์, วิระพันธ์ สีหนาม และ กุลเชษฐ์ เพียรทอง.การวัดความดันกระแทกของลำพุน้ำความเร็วสูงในน้ำ; การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24 ปี พ.ศ. 2553

[8] A. Matthujak, C. Kasamnimitporn, W. Sitthinwong and K. Pianthong, "Effects of different liquid properties on the characteristics of impact-generated high speed liquid jets," *Applied Mechanics and Materials* 110-116 (Mechanical and Aerospace engineering), pp. 370-376, 2011.