

## อิทธิพลของชนิดของลำพู่ต่อความดันกระแทกของลำพู่ความเร็วสูงในน้ำ

### Effect of different liquid jets on impact pressure of high-speed liquid jet in water

ปกรณ์ เห่งเกษ และ อนิรุทธ์ มัทธจักษ์\*

ห้องปฏิบัติการการประยุกต์ใช้ลำพู่และการเผาไหม้ (CJARL)

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ตำบลเมืองศรีไค อำเภวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190

\* E-mail: Anirut.Mat@gmail.com, A.Matthujak@ubu.ac.th. Tel: 0-4535-3309

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณลักษณะการกระแทกของลำพู่ความเร็วสูงในน้ำ โดยศึกษาอิทธิพลของชนิดของลำพู่ต่อความดันกระแทกที่เกิดขึ้นในน้ำ ซึ่งการผลิตลำพู่ความเร็วสูงนี้จะใช้เทคนิคที่เรียกว่า การขับลำพู่ด้วยการกระแทก (Impact driven method) ในชุดทดลองที่เรียกว่า Horizontal single-stage gas gun (HSSGG) โดยการทดลองนี้จะใช้ของเหลวทั้งหมด 4 ชนิดในการผลิตลำพู่ ได้แก่ น้ำ น้ำมันดีเซล น้ำมันแก๊สโซลีน และน้ำมันก๊าซ ซึ่งการวัดความดันกระแทกของลำพู่ทั้งหมดจะใช้ชุดวัดความดันที่ประกอบด้วยเปียโซอิเล็กทริกฟิล์ม (Piezoelectric polyvinylidene fluoride film, PVDF) โดยทำการวัดความดันกระแทกของลำพู่ที่ระยะต่างๆ จากการทดลองพบว่า เมื่อระยะทางของหัวฉีดกับ PVDF เพิ่มขึ้นความดันกระแทกจะมีค่าลดลงยกเว้นที่ระยะ 1 cm จะมีค่าต่ำกว่า 2 cm เนื่องจากลำพู่จำเป็นต้องใช้ระยะทางในการเร่งความเร็วเพื่อให้เกิดความเร็วสูงสุด ในที่นี้คือระยะ 2 cm และพบว่าความดันกระแทกของลำพู่ที่มีค่าสูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 361 MPa ที่ระยะ 2 cm ซึ่งคุณสมบัติทางกายภาพของของเหลวที่มีผลต่อความดันกระแทกคือ ความหนาแน่น ความตึงผิว และความเร็วเสียง และที่ทุกระยะห่างจากหัวฉีดพบว่าเกิดความดันกระแทกของ water vapor bubble และลำพู่ทุกการทดลอง โดยความดันกระแทกของ bubble จะมีค่าสูงกว่าความดันกระแทกของลำพู่

**คำหลัก:** ความดันกระแทก, ลำพู่ความเร็วสูง, Impact driven method, PVDF

#### Abstract

This research is to study the effect of the impact pressure of high speed liquid jets in water at various stand-off distances from the nozzle exit. The high-speed liquid jets were generated by the impact of a projectile, which know as impact driven method, launched by horizontal single stage gas gun (HSSGG). The types of jets used in the experiment are water, diesel, kerosene and gasoline. The impact pressures of the jets were measured by the PVDF pressure sensor. This study is to measure the impact pressure of the jets at various stands-off distances from the nozzle exit. From the measurement, the impact pressure of all jets decreased when the stand-off distance increased but the pressures at 1 cm stand-off distance are lower than that of 2 cm stand-off distance because the jets need further distance to accelerate itself to the maximum speed. The impact pressure of a water jet is the highest, being 361 MPa

## AME-144

at a stand-off distance of 2 cm. The significantly physical properties are density, surface tension and sound speed. Moreover, it was found that the impact pressures of water vapor bubble and jets took place all experiments. The impact pressures of water vapor bubble are higher than that of jet at all stand-off distance.

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

### 1. บทนำ

การชนของเม็ดฝน (Rain impact) เมื่อเครื่องบินที่บินด้วยความเร็วสูงในเวลาที่ไม่ตกเป็นกรณีวิจัยเริ่มแรกเกี่ยวกับการกระแทกของลำพุ่งความเร็วสูง (High speed impact jet) ต่อมาได้นำมาประยุกต์ใช้ในแง่มุมทางวิศวกรรมอื่นๆ [1-5] เช่น เทคโนโลยีการตัดโดยลำพุ่ง (Jet cutting technology) การทำความสะอาดวัสดุโดยลำพุ่ง (Material cleaning by jets) การทำเหมืองแร่และการเจาะอุโมงค์โดยการกระแทกของลำพุ่งความเร็วสูง (Mining and tunneling by means of high-speed jet impingements) ในปี ค.ศ.1958 F.P.Bowden และ J.H.Brunton [6] ได้คิดค้นเทคนิคการผลิตลำพุ่งความเร็วสูงโดยการกระแทกของกระสุนความเร็วสูง ซึ่งเรียกว่า Impact driven method โดยสามารถผลิตลำพุ่งความเร็วสูงสุดเท่ากับ 1,200 m/s

ในปี ค.ศ. 1995 H. H. Shi และคณะ [7] ได้ศึกษาการกระแทกที่เกิดจากลำพุ่งน้ำที่มีความเร็วในระดับ subsonic ไปจนถึง hypersonic โดยใช้ PV ใช้ Piezoelectric polyvinylidene fluoride film (PVDF) ในการวัดความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำและทำการเปรียบเทียบกับค่าความดันด้วยสมการค้อนน้ำ (Water hammer) ซึ่งพบว่า ที่ระยะ 20 mm จากปลายหัวฉีด ความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำที่ความเร็ว 270 m/s จะมีความดันที่ใกล้เคียงกัน และจะเริ่มลดลงมากที่ระยะ 40 mm จากปลายหัวฉีด นอกจากนี้ยังพบการเสียหายที่เกิดขึ้นบนแผ่น PMMA อีกด้วย

ต่อมาในปี พ.ศ. 2552 วุฒิชัย สิทธิวงษ์ และคณะ [8] ได้ศึกษาและเปรียบเทียบการวัดความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำความเร็วสูงที่ระดับความเร็วเหนือเสียง และ

ผลิตลำพุ่งด้วยเทคนิค Impact driven method ที่ความเร็ว 1,240 – 2,290 m/s โดยศึกษาอิทธิพลของหัวฉีด 3 แบบ ซึ่งแต่ละแบบจะมีมุมภายใน 30°, 60° และแบบทรงกระบอก และมีขนาดรูหัวฉีด 0.7 mm โดยทำการวัดความดันกระแทกของลำพุ่งความเร็วสูงของน้ำด้วย PVDF film จากการทดลองพบว่า หัวฉีดที่มีมุมภายใน 30° จะมีความเร็วสูงสุดเท่ากับ 2,290 m/s และใช้ความดันสูงสุดเท่ากับ 3.57 GPa

ในปี พ.ศ. 2556 ปกรณ์ เห่งเกษ และ อนิรุตต์ มัทธจักร์ [9] ได้ศึกษาอิทธิพลของชนิดของลำพุ่งต่อความดันกระแทกของลำพุ่งความเร็วสูง โดยการตรวจวัดความดันกระแทกของลำพุ่งความเร็วสูงด้วย PVDF และผลิตลำพุ่งความเร็วสูงด้วยเทคนิค Impact driven method ในชุดทดลอง Horizontal Single Stage Gas Gun (HSSGG) ซึ่งชนิดของลำพุ่งที่ใช้ศึกษาคือ น้ำ ดีเซล น้ำมันก๊าด น้ำมันเบนซิน และ แอลกอฮอล์ นอกจากนี้ยังศึกษาอิทธิพลของระยะทางระหว่างหัวฉีดกับ PVDF ต่อความดันกระแทกอีกด้วย จากการตรวจวัดความดันกระแทก พบว่า เมื่อระยะทางของหัวฉีดกับ PVDF เพิ่มขึ้นความดันกระแทกจะมีค่าลดลงและความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำจะมีค่าสูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 720 MPa ที่ระยะ 1 cm

ปัจจุบันได้มีการศึกษาเพื่อประยุกต์ใช้ความดันกระแทกของลำพุ่งในอุตสาหกรรมได้สมุท [10] เช่น การตัดโครงสร้างใต้ทะเล (Cutting underwater structures) และการเจาะใต้ทะเล (Drilling underwater) เป็นต้น ดังนั้นในปี 1996 H. Soyama และคณะ [11] ได้ทำการศึกษาคูณลักษณะของลำพุ่งน้ำในน้ำโดยผลิตลำพุ่งจากปัมที่ความดันสูงสุดที่ 70

## AME-144

MPa และอัตราการไหล 22 l/min จากการถ่ายภาพลำฟุ้งด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph พบการเกิด bubble รอบๆ ลำฟุ้งในลักษณะเดียวกันกับการเกิด cavitation นอกจากนี้ยังศึกษาการกระแทกของลำฟุ้งความเร็วสูงบนผิววัสดุ เพื่อศึกษาลักษณะความเสียหายและทำการวัดความดันกระแทกโดยใช้ PVDF นอกจากนี้ยังศึกษาอิทธิพลของหัวฉีดต่อคุณลักษณะความดันกระแทก ซึ่งพบว่าลำฟุ้งที่ฉีดออกมาจากหัวฉีดแบบทรงกรวยให้ความดันสูงที่สุดเท่ากับ 275 MPa โดยมีค่าสูงเพียงพอต่อการตัดเจาะโลหะ

ในปี ค.ศ. 2009 K. Otani และคณะ [12] ได้ศึกษาคุณลักษณะของลำฟุ้งในน้ำโดยผลิตลำฟุ้งจาก Ho: YAG Laser โดยศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการเจาะหินใต้น้ำ ด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph จากภาพที่ได้พบว่า ความเร็วของลำฟุ้งมีค่าประมาณ 40 m/s นอกจากนี้ยังวัดความดันกระแทกที่เกิดขึ้น โดยใช้ PVDF needle hydrophone พบว่า ความดันของ shock wave มีค่าประมาณ 22.7 MPa และพบการยุบตัวของ water vapor bubble ที่ทำให้เกิด shock wave นอกจากนี้ยังพบว่าลำฟุ้งที่ผลิตได้สามารถเจาะแผ่นหินทรายใต้น้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ต่อมาในปี พ.ศ. 2553 ชัยเดช เกษมนิมิตรพร และคณะ [13] ได้ศึกษาการวัดแรงดันกระแทกของลำฟุ้งน้ำในน้ำที่ระยะต่างๆ จากปลายของหัวฉีดโดยใช้ PVDF พร้อมกับการถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูง (High speed camera) ร่วมกับเทคนิค Shadowgraph จากการศึกษา พบว่า จากภาพถ่ายจะเห็นกลไกการกระแทกของลำฟุ้งในน้ำเนื่องมาจากลำฟุ้งและ water vapor bubble ซึ่งสอดคล้องกับสัญญาณที่ได้จากการวัดแรงดันกระแทกโดยมีค่าเท่ากับ 17.33 GPa กับ 18.92 GPa ตามลำดับ จากการศึกษาการวัดการกระแทกของลำฟุ้งในน้ำพบว่าความดันกระแทกมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างจากหัวฉีดเพิ่มขึ้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า มีการศึกษาเพียงการวัดความดันกระแทกของลำฟุ้งน้ำในน้ำเท่านั้น ในขณะที่

ที่ลำฟุ้งของเหลวชนิดอื่นซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกันรวมถึงแตกต่างจากน้ำยังไม่มีการศึกษาหรือรายงานมาก่อนเลย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาอิทธิพลของชนิดของลำฟุ้งต่อความดันกระแทกของลำฟุ้งความเร็วสูงในน้ำ โดยใช้ลำฟุ้ง 4 ชนิด คือ น้ำ ดีเซล น้ำมันก๊าด และน้ำมันเบนซิน ซึ่งทำการตรวจวัดความดันกระแทกโดย PVDF นอกจากนี้ยังศึกษาถึงอิทธิพลของระยะห่างจากปลายหัวฉีดต่อความดันกระแทกในน้ำอีกด้วย

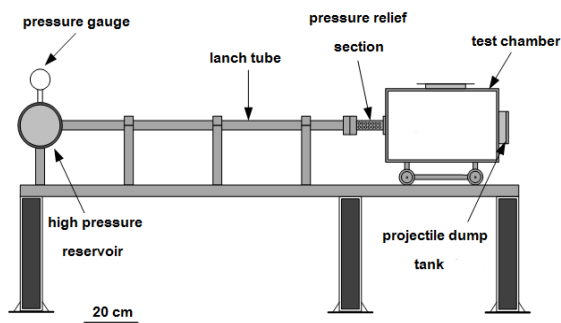
## 2. การทดลอง

### 2.1 ชุดทดลอง

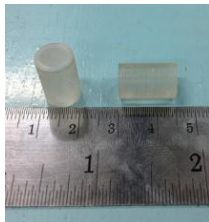
ในการศึกษานี้ การผลิตลำฟุ้งความเร็วสูงจะใช้เทคนิค Impact driven method [6,7] โดยเทคนิคนี้จะยิงกระสุนความเร็วสูง (High-speed projectile) เข้าไปกระแทกกับของเหลวที่บรรจุอยู่ในหัวฉีดด้วยความเร็วสูง จากนั้นของเหลวก็จะฉีดออกมาจากหัวฉีดด้วยความเร็วสูง โดยกระสุนความเร็วสูงในการศึกษานี้จะถูกยิงโดยชุดทดลองที่เรียกว่า Horizontal single-stage gas gun (HSSGG) ดังรูปที่ 1 ซึ่งมีส่วนประกอบหลักคือ ถังเก็บก๊าซความดันสูง (High pressure reservoir) ท่อส่งกระสุนความเร็วสูง (Lunch tube) ท่อระบายความดัน (Pressure relief section) ห้องทดสอบ (Test chamber) โดยถังเก็บความดันสูงจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 7.62 cm ยาว 21 cm และมีปริมาตร  $9.58 \times 10^{-4} \text{ m}^3$  ท่อส่งกระสุนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 10 mm ยาว 1.1 m ท่อระบายความดันมีความยาว 15 cm ถูกออกแบบมาเพื่อลดแรงอัดด้านหน้าของกระสุน ท่อระบายแรงดันจะเจาะรูเพื่อระบายแรงดันทั้งหมด 3 แถว แต่ละแถวจะมี 4 รู ขนาดของรู 5 mm ห้องทดสอบจะมีรูปทรงสี่เหลี่ยมที่มีด้านกว้างขนาด 40 x 50 cm ยาวเท่ากับ 60 cm โดยหน้าต่างของห้องทดสอบจะใช้ Polymethyl Methacrylate (PMMA) เป็นวัสดุทั้งสองข้างเพื่อให้มองเห็นภายในห้องทดสอบ กระสุนที่ใช้ทำมาจาก Polymethyl Methacrylate (PMMA) ซึ่งมีรูปทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 9.5 mm ยาว 15 mm และมี

## AME-144

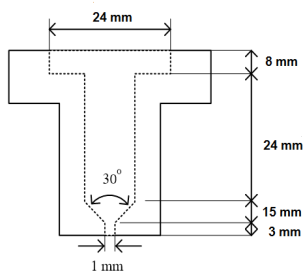
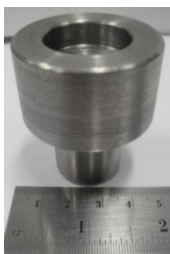
มวลเท่ากับ 1.25 g ดังรูปที่ 2a ซึ่งชุดทดลอง (HGGSS) จะสามารถสร้างความเร็วของกระสุนอยู่ระหว่าง 50 ถึง 350 m/s ในแต่ละความดันขับเคลื่อน (Driving pressure) ส่วนของหัวฉีดจะอยู่ถัดมาจากท่อระบายแรงดันซึ่งหัวฉีดจะผลิตมาจากเหล็กอ่อนขนาดดังรูปที่ 2b โดยกระสุนจะมีความเร็วประมาณ 220 m/s ถูกใช้ในการทดลองทั้งหมด และความเร็วของกระสุนจะเกิดจากความดันขับเคลื่อนของอากาศ 5 bar ที่อยู่ในถังเก็บก๊าซความดันสูง (High pressure reservoir)



รูปที่ 1 Horizontal single-stage gas gun (HSSGG)



(a)



(b)

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

## 3 การวัดความดันของลำพุ่ง

ลำพุ่งความเร็วสูงที่ถูกผลิตโดย HSSGG จะเป็นลำพุ่งแบบ Impulsive jet โดยทันทีที่ลำพุ่งกระทบกับพื้นผิวของแข็งใดๆ ความดันกระแทกของลำพุ่งจะมีค่าสูงในเวลาอันสั้น ซึ่งความดันที่เกิดขึ้นเป็นความดันแบบไดนามิก (Dynamic pressure) หรือความดันค้อนน้ำ (water-hammer pressure) ซึ่งจะมีค่าสูงในระดับหลาย MPa ไปจนถึง GPa ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะวัดความดันดังกล่าวโดยใช้วิธีหรือเครื่องมือวัดแบบทั่วไป

ในการศึกษานี้จึงได้ทำการออกแบบและสอบเทียบชุดวัดความดันกระแทกโดยมีส่วนประกอบคือ Piezoelectric polyvinylidene fluoride film (PVDF) และ Polymethyl Methacrylate (PMMA) หนา 6 mm และยางหนา 8 mm เป็นตัวรองรับ การประกอบชุดวัดความดัน ในความหนาของชุดเซนเซอร์ความดัน 8 mm นั้นจะอยู่ส่วนหน้าของชุดรองรับซึ่งชุดรองรับจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 75 mm ดังรูปที่ 3 PVDF นี้มีองค์ประกอบที่ยึดหยุ่นความหนาของ PVDF film หนา 28  $\mu\text{m}$  ซึ่งโพลีเมอร์ของ piezoelectric film ด้านหน้าจะฉาบด้วยน้ำหมึกของเงิน (Ag-ink) เป็นขั้วไฟฟ้า

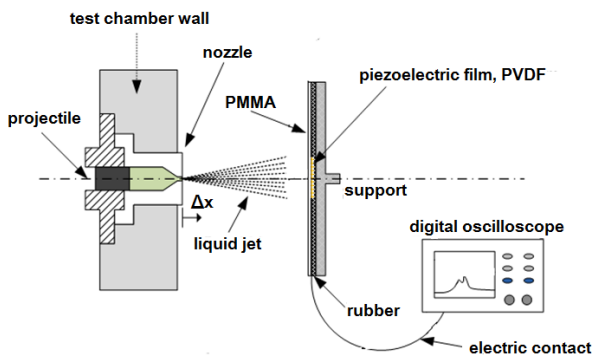
การติดตั้งชุดทดลองสำหรับการวัดความดันกระแทกของของเหลวโดย PVDF แสดงดังรูปที่ 3 เมื่อลำพุ่งของเหลวกระทบกับผิวของ PMMA จากนั้น PVDF จะตอบสนองต่อความดันกระแทกของลำพุ่งโดยจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสัญญาณไฟฟ้าซึ่งถูกบันทึกไว้โดยออสซิลโลสโคปแสดงดังรูปที่ 4 ในการทดลองนี้จะปรับเปลี่ยนระยะการวัดความดันกระแทกระหว่างปลายของหัวฉีดกับชุดวัดความดันทำได้โดยการเปลี่ยนที่ยึดชุดวัดความดันเพื่อเพิ่มหรือลดระยะทางในการกระแทก

จากรูปที่ 4 แสดงตัวอย่างสัญญาณการกระแทกของลำพุ่งน้ำในน้ำที่ระยะ 2 cm จากปลายหัวฉีดที่ถูกบันทึกโดยออสซิลโลสโคป ซึ่งสัญญาณที่ได้จะเป็นแรงดันไฟฟ้า (Voltage) จากนั้นนำมาคำนวณในสมการที่ (1) ซึ่งสมการดังกล่าวนี้ถูกสอบเทียบและนำเสนอโดย วุฒิชัย สิทธิวงษ์ และคณะ [14]

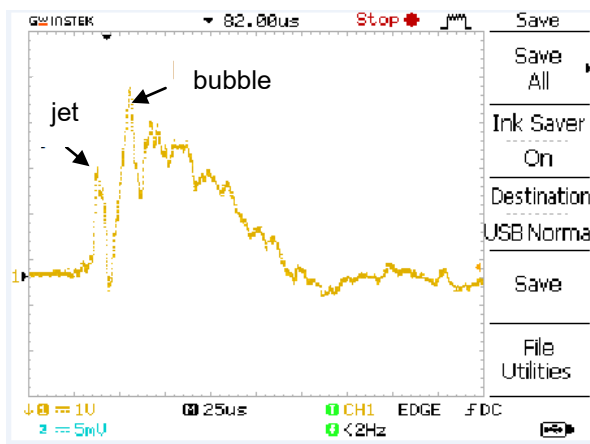
## AME-144

$$P = (17,975V - 2614.4) \times (6.894757 \times 10^{-3}) \quad (1)$$

เมื่อ P คือ ความดันกระแทกของลำพุ่ง (MPa)  
V คือ แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จาก PVDF (V)



รูปที่ 3 การติดตั้งชุดวัดความดันกระแทก



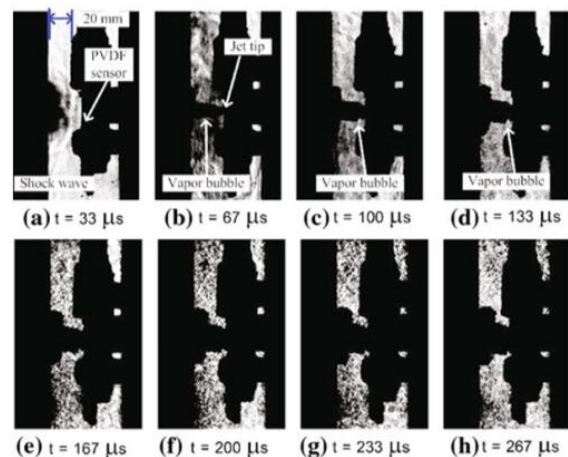
รูปที่ 4 ตัวอย่างสัญญาณการกระแทกของลำพุ่งน้ำในน้ำที่ระยะ 2 cm จากปลายหัวฉีดที่ถูกบันทึกโดยออสซิลโลสโคป

### 4. ผลการศึกษา

รูปที่ 5 แสดงการกระแทกของลำพุ่งและฟองอากาศบนชุดวัดความดัน PVDF กับปลายหัวฉีดที่ระยะ 20 mm ในงานวิจัยของ A. Matthujak และคณะ [15] โดยมีประเด็นที่สำคัญคือ ไม่เพียงแต่จะมีการกระแทกของลำพุ่งความเร็วสูงที่กระทำกับชุดวัดความดันที่ทำให้เกิดความดันกระแทกเท่านั้น ความ

ดันกระแทกยังเกิดจาก water vapor bubble ที่เกิดขึ้นบริเวณโดยรอบของลำพุ่งอีกด้วย โดยรายละเอียดของพฤติกรรมดังกล่าวได้ถูกอธิบายไว้อย่างละเอียดแล้วในบทความของ A. Matthujak และคณะ [15] ดังนั้นความดันกระแทกที่เกิดขึ้นและถูกบันทึกไว้โดยออสซิลโลสโคปจะมีทั้งความดันกระแทกที่เกิดจากลำพุ่งและเกิดจาก water vapor bubble ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งจะเป็นลักษณะเช่นนี้ในทุกๆ การทดลอง

รูปที่ 6 แสดงอิทธิพลของชนิดของลำพุ่งต่อความดันกระแทกที่ระยะจากปลายหัวฉีด 1, 2, 3, 4 และ 5 cm ตามลำดับ ซึ่งได้จากการตรวจวัดโดยชุดวัดความดัน โดยการทดลองแต่ละระยะจะทดลองซ้ำสามครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ยของข้อมูล ซึ่งผลของการทดลองจะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานไม่เกินร้อยละ 5 จากรูปพบว่าเมื่อระยะห่างจากหัวฉีดเพิ่มขึ้นความดันกระแทกจะมีค่าลดลง โดยจะเกิดขึ้นในลักษณะเดียวกันทุกลำพุ่งเนื่องจากแรงต้านการเคลื่อนที่ในน้ำ (Hydrodynamic drag) ซึ่งเป็นพฤติกรรมปกติของลำพุ่ง ยกเว้นที่ระยะ 1 cm จะมีค่าต่ำกว่าที่ระยะ 2 cm เนื่องจากลำพุ่งอาจต้องใช้ระยะเวลาหรือระยะทางในการเร่งความเร็วให้มีความเร็วสูงสุด โดยในการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าความเร็วสูงสุดของลำพุ่งเมื่อฉีดในน้ำคือจะเกิดขึ้นที่ระยะระยะ 2 cm ห่างจากหัวฉีด



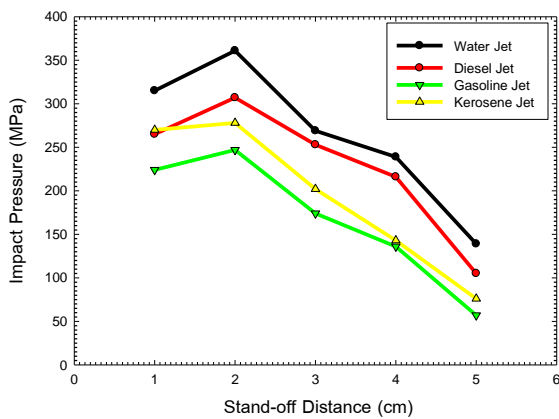
รูปที่ 5 การกระแทกของลำพุ่งและฟองอากาศบนชุดวัดความดัน PVDF กับปลายหัวฉีดที่ระยะ 20 mm ในงานวิจัยของ A. Matthujak และคณะ [15]



AME-144

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของของเหลวที่ใช้ในการทดลอง [15]

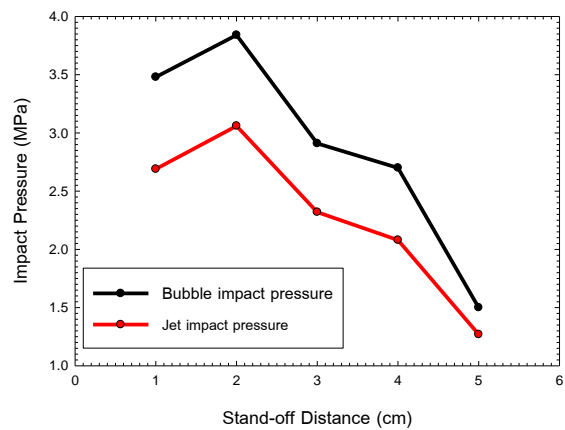
ชนิดของ ของเหลว	น้ำหนัก โมเลกุล (g/mol)	ความ หนาแน่น ที่ 20° (Kg/m <sup>3</sup> )	ความหนืด จลน์ ที่ 20° (cSt)	ความตึงผิว ที่ 20° (N/m)	ความจุ ความร้อน ที่ 40° (J/g°C)	ความร้อนแฝง (KJ/Kg)	ความเร็วเสียง ที่ 25° (m/s)
น้ำ	18	998	1.003	0.0728	4.19	2,257 (at 100°C)	1483
น้ำมันดีเซล	198	840	1.8 – 4.0	0.0244	1.97	267.49 (at 170°C)	1350
น้ำมันก๊าด	170	810	1.5 – 2.5	0.0235	2.02	314.01(at117.8°C)	1324
น้ำมันแก๊สโซลีน	32	750	1.6	0.0220	2.3	896 (at 90°C)	1250



รูปที่ 6 อิทธิพลของชนิดของลำพุ่งต่อความดันกระแทกที่ระยะต่างๆ

เมื่อพิจารณาที่ทุกระยะห่างจากหัวฉีด พบว่าความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำมีค่าสูงที่สุดรองลงมาคือน้ำมันดีเซล น้ำมันก๊าด และน้ำมันแก๊สโซลีนตามลำดับ โดยมีค่าเท่ากับ 361, 307, 278 และ 247 MPa ที่ระยะ 2 cm และจากการพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพของของเหลวในตารางที่ 1 พบว่าคุณลักษณะของของเหลวที่มีผลต่อความดันกระแทกคือ ความหนาแน่น ความตึงผิวและความเร็วเสียง ซึ่งมีความสอดคล้องกับสมการ water hammer กรณีฉีดในอากาศ ( $P = \rho CV_j$  เมื่อ  $P$  คือความดันกระแทก (Pa)  $\rho$  คือ ความหนาแน่น ( $\text{kg/m}^3$ )  $C$  คือ ความเร็วเสียง (m/s) and  $V_j$  คือ ความเร็วของลำพุ่ง (m/s)) นั้น แสดงว่า ความดันกระแทกของลำพุ่งก็ยังมี ความสัมพันธ์กับสมการ water hammer ถึงแม้ว่าจะเป็นกรณีฉีดในน้ำก็ตาม แต่อย่างไรก็ตาม สมการ water hammer ไม่สามารถใช้ในการคำนวณความดัน

กระแทกในกรณีฉีดในน้ำได้ ซึ่งอาจจำเป็นต้องมีการพัฒนาสมการ water hammer เพิ่มเติมในการศึกษาต่อไป



รูปที่ 7 ความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำกับ water vapor bubble ที่ระยะต่างๆ

รูปที่ 7 แสดงความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำกับ water vapor bubble ที่ระยะต่างๆ พบว่า ความดันกระแทกที่เกิดจาก water vapor bubble มีค่ามากกว่าลำพุ่งทุกระยะการกระแทก เนื่องจากเมื่อลำพุ่งเริ่มเคลื่อนที่ออกจากหัวฉีดลำพุ่งจะเกิดกระบวนการแตกตัว (Break-up) การแตกเป็นฝอยละเอียด (Atomization) และเกิดการระเหยกลายเป็นไอ (Vaporization) ทำให้เกิดฟองไอน้ำขึ้นซึ่งเป็นพฤติกรรมคล้ายกับการเกิด cavitation จึงทำให้ความดันกระแทกของ water vapor bubble มีค่าสูงกว่าความดันที่เกิดจากลำพุ่ง นอกจากนี้ยังพบอีกว่า เมื่อระยะห่างจากหัวฉีดมากขึ้นความดันกระแทกของลำ

## AME-144

ฟุ้งและ bubble จะมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น อาจเนื่องมาจากความเร็วของการขยายตัวของ bubble มีค่าใกล้เคียงกับความเร็วของลำฟุ้งมากขึ้นเมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อความเร็วใกล้เคียงกันนั้นแสดงว่า ความดันกระแทกก็มีค่าใกล้เคียงกันด้วยเนื่องจากความดันจะมีความสัมพันธ์กับความเร็ว

### 5. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาอิทธิพลของชนิดลำฟุ้งต่อความดันกระแทกของลำฟุ้งความเร็วสูงในน้ำ โดยการวัดความดันกระแทกด้วยชุดวัดความดันที่ได้ทำการออกแบบสร้างและสอบเทียบ พบว่า ความดันกระแทกของลำฟุ้งน้ำมีค่าสูงที่สุดรองลงมาคือ น้ำมันดีเซล น้ำมันก๊าด และน้ำมันแก๊สโซลีน ตามลำดับ โดยมีค่าเท่ากับ 361 307, 278 และ 247 MPa ที่ระยะการกระแทก 2 cm และจากการพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพของของเหลว พบว่า ความหนาแน่น ความตึงผิว และความเร็วเสียง เป็นคุณสมบัติทางกายภาพที่มีผลต่อความดันกระแทกของลำฟุ้งในน้ำ นอกจากนี้ยังพบว่า ที่ระยะห่างจากหัวฉีด 2 cm มีค่าความดันกระแทกมากกว่าที่ระยะ 1 cm และเมื่อระยะห่างจากหัวฉีดเพิ่มมากขึ้นความดันกระแทกก็มีค่าลดลง และจากการตรวจวัดยังพบอีกว่า ทุกการทดลองจะเกิดความดันกระแทกอันเนื่องมาจากลำฟุ้งและ water vapor bubble ทุกครั้ง โดยความดันกระแทกอันเนื่องมาจาก bubble จะมีค่าสูงกว่าลำฟุ้งที่ระยะห่างจากหัวฉีด

### 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี และภาคีวิศวกรรมการเครื่องกล มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย

### 7. เอกสารอ้างอิง

[1] M. J. Matthewson and D.A. Gorhan, "An oblique impact anomaly in high-velocity liquid impact on glass," *Journal of materials science*, 1980, vol. 15, 1980, pp. 1518-20.

[2] R.C. Dykhuizen, M.F. Smith and D.L. Gilmore, "Impact of High Velocity Cold Spray Particles," *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 8(4), 1999, pp. 559-64.

[3] B.E. Edney, "Experimental studies of pulsed water jets," In 3<sup>rd</sup> International Symposium on Jet Cutting Technology, 1976, paper no. B2, Chicago, USA.

[4] M. Iwasaki, "Application of Water jet for Drilling Rocks Undersea," *Turbomachinery*, vol. 17(12), 1989, pp. 761-767.

[5] S. Dehkoda and M. Hood, "An experimental study of surface and sub-surface damage impuled water-jet breakage of rocks," *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, vol. 63, 2013, pp. 138-147.

[6] F.P.Bowden, and J.H.Brunton, "Damage to solids by liquid impact at supersonics speeds," *Nature*, vol. 181, 1958, pp. 873-875

[7] H.H. Shi, K. Takayama, N. Nagayasu, "The measurement of impact pressure and solid surface response in liquid solid impact up to hypersonic range," *Wear*, vol. 186-187, 1995, pp. 352-359

[8] วุฒิชัย สิทธิวงษ์ , วิระพันธ์ สีหานาม, กุลเชษฐ์ เพียรทอง และ อนิรุตต์ มัทธจักร.ความดันกระแทกของลำฟุ้งความเร็วสูง; การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23 ปี พ.ศ. 2552

[9] ชัยเดช เกษมนิมิตรพร, อนิรุตต์ มัทธจักร, วุฒิชัย สิทธิวงษ์, วิระพันธ์ สีหานาม และ กุลเชษฐ์ เพียรทอง. การวัดความดันกระแทกของลำฟุ้งน้ำความเร็วสูงในน้ำ; การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24 ปี พ.ศ. 2553

[10] M. Iwasaki, "Application of Water jet for Drilling Rocks Undersea," *Turbomachinery*, vol. 17(12), 1989, pp. 761-767

## AME-144

- [11] Soyama H. and et al. "High-Speed Observation of Ultrahigh-Speed Submerged Water Jets", *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 12, 1996, pp. 411-416
- [12] K. Ohtani, D. Numata, K. Takayama, T. Kobayashi, and K. Okatsu, "Experimental study of underwater rock drilling using a pulsed Ho : YAG laser-induced jets," *Shock wave*, vol. 19, 2009, p. 403-412
- [13] ชัยเดช เกษมนิมิตรพร, อนิรุตต์ มัทธูจักร์, วุฒิชัย สิทธิวงษ์, วิระพันธ์ สีหานาม และ กุลเชษฐ์ เพียรทอง.การวัดความดันกระแทกของลำพ่นน้ำความเร็วสูงในน้ำ; การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24 ปี พ.ศ. 2553
- [14] วุฒิชัย สิทธิวงษ์ , วิระพันธ์ สีหานาม, กุลเชษฐ์ เพียรทอง และ อนิรุตต์ มัทธูจักร์.ความดันกระแทกของลำพ่นความเร็วสูง; การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23 ปี พ.ศ. 2552
- [15] A. Matthujak, S.H.R. Hosseini, K. Takayama, M. Sun and P. Voinovich, "High speed jet formation by impact acceleration method," *Shock Waves*, vol. 16, 2007, pp. 405-419.