

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24  
20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี

## การวัดความดันกระแทกของลำพ่นน้ำความเร็วสูงในน้ำ Measurement of impact pressure of high-speed water jets in water

ชัยเดช เกษมนิมิตรพร, อนิรุตต์ มัทธูจักษ์, วุฒิชัย สิทธิวงษ์, วีระพันธ์ สีหามาน และ กุลเชษฐ เพียรทอง

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 85 ถ.สถลมารค ต.เมืองศรีไค

อ.วารินธาราภ ดิตตอ: โทรศัพท์: 045-353-308, โทรสาร: 045-353-309

E-mail: [chaidet\\_peat@hotmail.com](mailto:chaidet_peat@hotmail.com), [Anirut.Mat@gmail.com](mailto:Anirut.Mat@gmail.com), [A.Matthujuk@ubu.ac.th](mailto:A.Matthujuk@ubu.ac.th).

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวัดความดันกระแทก (Impact pressure) ของลำพ่นน้ำความเร็วสูงในน้ำที่ระยะห่างต่างๆ จากหัวฉีด นอกจากนี้ยังวัดความดันกระแทกของลำพ่นในอากาศเพื่อใช้เป็นข้อมูลเปรียบเทียบอีกด้วย ซึ่งในการศึกษานี้การกำเนิดลำพ่นความเร็วสูงในระดับความเร็วเหนือเสียงใช้เทคนิคพิเศษที่เรียกว่า Impact driven method จากชุดทดลอง Horizontal Single Stage Powder Gun (HSSPG) ซึ่งสามารถผลิตลำพ่นในอากาศได้ที่มีความเร็วสูงสุดเท่ากับ 2,290 m/s แต่ในการศึกษานี้ใช้ความเร็วลำพ่น 1,669 m/s เมื่อวัดในอากาศ และความเร็วลำพ่น 374.24 m/s เมื่อวัดในน้ำ โดยในการศึกษาวัดความดันกระแทกของลำพ่นใช้ Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Film ซึ่งทำการวัดที่ระยะ 1.5, 2.0, 3.0 และ 4.0 cm จากหัวฉีด โดยที่คุณลักษณะของลำพ่นในน้ำนั้นถูกถ่ายภาพโดยเทคนิคการถ่ายภาพที่เรียกว่า Shadowgraph technique ร่วมกับกล้องวิดีโอความเร็วสูง (High speed video camera) จากภาพแสดงให้เห็นกลไกการกระแทกของลำพ่นในน้ำเนื่องมาจากลำพ่นและ water vapor bubble ซึ่งสอดคล้องกับสัญญาณที่ได้จากการวัดการกระแทกโดยมีค่าเท่ากับ 17.33 GPa กับ 18.92 GPa ตามลำดับจากการวัดการกระแทกของลำพ่นในอากาศและในน้ำพบว่าความดันกระแทกมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างจากหัวฉีดเพิ่มขึ้น และมีค่าความดันกระแทกสูงสุดเท่ากับ 25.105 GPa ที่ระยะห่าง 1.5 cm กรณีฉีดในน้ำ และมีค่าความดันกระแทกสูงสุดเท่ากับ 1.890 GPa ที่ระยะห่าง 2 cm กรณีฉีดในอากาศ

**คำหลัก:** ลำพ่นน้ำความเร็วสูง, ความดันกระแทก, Impact driven method, PVDF, Shadowgraph

### Abstract

This research is to measure the impact pressure of high-speed liquid jet ejected in water and air at the stand-off distance from an orifice of 0.7 mm. In this study, the high-speed water jets are generated by the projectile impact driven method. The high-speed projectile is supplied by the horizontal single stage powder gun. The maximum jet velocity of 2,290 m/s can be generated by this facility. In this study, the maximum averaged velocity of jet ejected in air and water is estimated to be 1,669 m/s and 374.24 m/s, respectively. The impact pressure of high-speed water jet at the stand-off distance 1.5, 2.0, 3.0 and 4.0 cm from the nozzle orifice is measure by Polyvinylidene Fluoride (PVDF) film. The impact motion of the jet was visualized by a high-speed video camera and shadowgraph optical arrangement. From the shadowgraph images, the mechanism of the jet impact was revealed. Two peaks of impact pressure

signal detected by PVDF are 17.33 GPa and 18.92 GPa corresponding to the impact of jet and water vapor bubble which can be obviously observed in the shadowgraph images. From the pressure history of jet ejected in air and water, the shorter stand-off distances are, the higher pressures are obtained. The maximum impact pressure of jet ejected in air and water are 25.105 GPa at stand-off distance 1.5 cm and 1.890 GPa at stand-off distance 2 cm, respectively.

**Keywords:** High-speed water jet, Impact pressure, Impact driven method, PVDF , Shadowgraph

## 1. บทนำ

เริ่มแรกนั้นการวิจัยลำพุ่งความเร็วสูง (High-speed jet) นั้นมาจากการศึกษาการปะทะกันระหว่างเม็ดฝนบนตัวเครื่องบินระหว่างการเคลื่อนที่ในอากาศด้วยความเร็วสูงในขณะที่ฝนตก จากการศึกษาดังกล่าวได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ในทางด้านวิศวกรรมในหลายๆด้าน เช่น การตัดโดยลำพุ่ง การทำความสะอาดโดยลำพุ่ง การฉีดเชื้อเพลิงความเร็วสูง เป็นต้น [1-5] จากการศึกษาพบว่าลำพุ่งความเร็วสูงสามารถตัดวัสดุที่มีความหนาหรือความแข็งแรงได้เป็นอย่างดี และยังสามารถทำความสะอาดวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ลำพุน้ำมันความเร็วสูง มีส่วนช่วยส่งเสริมการเผาไหม้มีสมรรถนะดีขึ้น เนื่องจากการแตกตัวเป็นฝอยละอองของน้ำมันและการผสมคลุกเคล้ากันกับอากาศดีขึ้น ซึ่งในปัจจุบันยังได้มีการศึกษาการนำลำพุ่งความเร็วสูงมาประยุกต์ใช้อุตสาหกรรมได้สมูท เช่น การตัดโครงสร้างได้ทะลุหรือการเจาะได้ทะลุด้วยลำพุ่งความเร็วสูง เนื่องจากเชื่อว่ามีพลังงานสูงเพียงพอในการนำไปประยุกต์ใช้งานได้ ในปี 1996, Hitoshi Soyama [6] ได้ทำการศึกษาคูณลักษณะของลำพุ่ง โดยผลิตลำพุ่งจากปั๊มที่มีความดัน 70 MPa โดยใช้กล้องถ่ายภาพความเร็วสูงกับเทคนิคการถ่ายภาพ (Shadowgraph technique) ซึ่งพบว่าเกิดฟองอากาศรอบๆลำพุ่งในลักษณะของ cavitation นอกจากนี้ยังศึกษาการกระแทกของลำพุ่งความเร็วสูงบนผิววัสดุ เพื่อศึกษาความเสียหายของผิววัสดุและทำการวัดความดันกระแทกโดยใช้ Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Film ที่รูปร่างหัวฉีดต่างๆ ซึ่งพบว่าลำพุ่งที่ฉีดออกมาจากลักษณะหัวฉีดแบบทรงกรวยให้ความดันสูงที่สุด

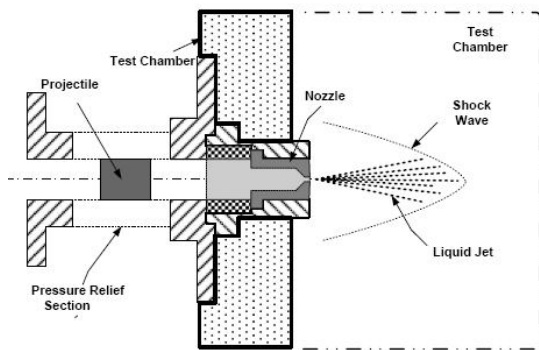
มีค่าเท่ากับ 275 MPa ซึ่งมีค่าสูงเพียงพอต่อการตัดเจาะโลหะ [7-10] แต่งานวิจัยดังกล่าวลำพุ่งที่ใช้ในการศึกษานั้นมีความเร็วต่ำเนื่องจากข้อจำกัดในการผลิตลำพุ่งโดยใช้ปั๊มนั้นความดันกระแทกของลำพุ่งความเร็วสูงในน้ำจึงยังไม่ได้ทำการศึกษาและอธิบายอย่างชัดเจน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการวัดความดันกระแทกของลำพุ่งความเร็วสูงในน้ำ และทำการเปรียบเทียบกับความดันกระแทกในอากาศที่ระยะต่างๆจากปลายหัวฉีด ร่วมกับการวิเคราะห์จากการถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูง (High-speed video camera) ร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph

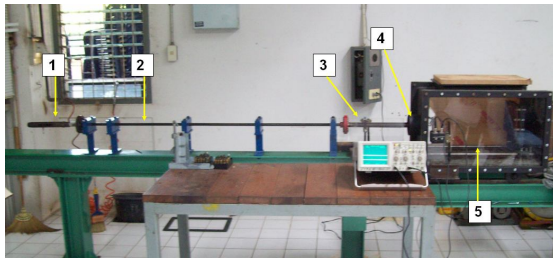
## 2. การทดลอง

### 2.1 ชุดการกำเนิดลำพุ่งความเร็วสูง

ในการศึกษาการผลิตลำพุ่งความเร็วสูง จะใช้เทคนิคพิเศษที่เรียกว่า Impact driven method [4,5,8] ดังรูปที่ 1 โดยเทคนิคนี้จะยิงกระสุนความเร็วสูง (High-speed projectile) เข้าไปกระแทกกับของเหลวที่บรรจุอยู่ในหัวฉีดด้วยความเร็วสูง หลังจากนั้นของเหลวก็จะฉีดออกมาจากหัวฉีดด้วยความเร็วสูง โดยในการศึกษานี้กระสุนความเร็วสูงจะถูกยิงออกมา จากชุดทดลองที่เรียกว่า Horizontal Single Stage Powder Gun (HSSPG) ดังรูปที่ 2 ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญ 5 ส่วน คือ 1.ชุดปล่อยกระสุน (Launcher) 2.ท่อส่งกระสุนปืน (Launch tube) 3.ท่อระบายความดัน (Pressure relief section) 4. ส่วนประกอบหัวฉีด (Nozzle assembly) 5.ห้องทดสอบ (Test chamber)

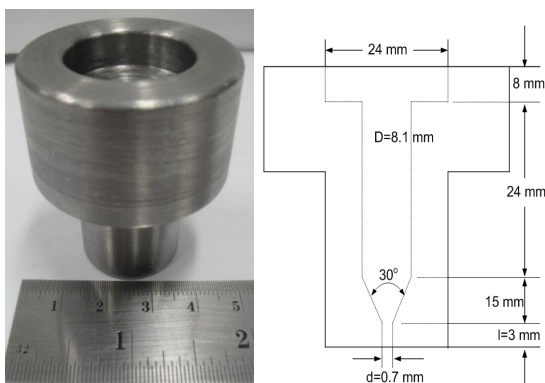


รูปที่ 1 การขับลำพุงด้วยการกระแทก (Impact driven method)



รูปที่ 2 ชุดสร้างลำพุงความเร็วสูง (HSSPG)

ในการทดลองนี้ใช้หัวฉีดรูปทรงกรวยมุม  $30^\circ$  ในการผลิตลำพุงความเร็วสูง โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่บรรจบของเหลว  $D = 8.1 \text{ mm}$  ขนาดของรูหัวฉีด  $d = 0.7 \text{ mm}$  และความยาวของรูหัวฉีด  $l = 3 \text{ mm}$  แสดงในรูปที่ 3

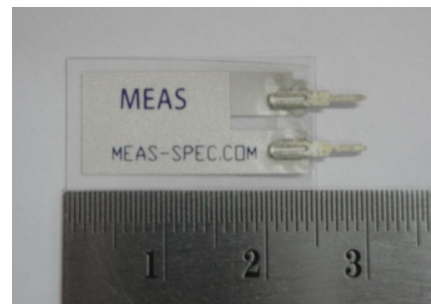


รูปที่ 3 หัวฉีดในการทดลอง

## 2.2 การวัดความดันกระแทกของลำพุง

เนื่องจากความดันจาก High-speed water jet เป็นแบบ Dynamic pressure ซึ่งเครื่องมือที่วัดแบบ Static pressure ไม่สามารถวัดได้ การศึกษาจึงทำการออกแบบและสร้างเครื่องมือขึ้นโดยใช้ Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Film หรือ เปียโซอิเล็กทริกฟิล์ม (Piezoelectric film) ดังรูปที่ 4 ซึ่งหลักการทำงานของ PVDF คือ เมื่อเกิดการโก่งตัวหรือ การกดของ PVDF จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Voltage) โดยแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้จะนำมาเปรียบเทียบเป็นความดันกระแทก (Impact pressure)

เครื่องมือวัดความดันได้ถูกออกแบบและสร้างขึ้นโดยใช้ PVDF film ติดตั้งภายในตัวเรือนโลหะ ดังรูปที่ 5 โดยเครื่องมือวัดความดันกระแทกนั้นจะประกอบไปด้วยส่วนแรกที่ดีกับโลหะ คือ ① จะเป็นแผ่นยางหนา 2 mm. เพื่อป้องกันการกระแทกของ PVDF กับตัวโลหะ ส่วนที่ ② จะเป็น PVDF film มีความหนา  $28 \mu\text{m}$  ซึ่งได้ต่อสายสัญญาณเข้ากับออสซิลโลสโคป ส่วนที่ ③ คือแผ่นอะคริลิกหนา 3 mm. จำนวนสองแผ่น ทำหน้าที่รับแรงดันกระแทกจากลำพุง

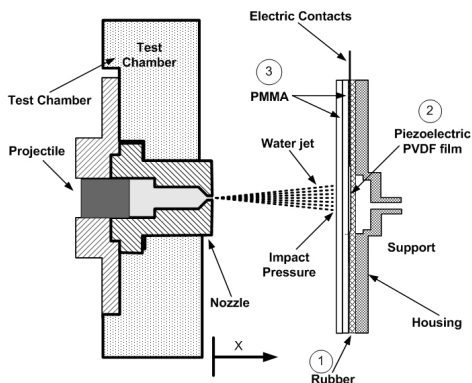


รูปที่ 4 Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Film

## 2.3 เทคนิคการถ่ายภาพความเร็วสูง

เนื่องจากพฤติกรรมของ High-speed water jet ที่เกิดขึ้นในน้ำเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วโดยใช้เวลาเป็น  $\mu\text{s}$  ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าหรือจากกล้องถ่ายรูปทั่วไป ดังนั้น

การศึกษานี้จึงใช้กล้องวิดีโอความเร็วสูง (High-speed video camera) Photron SA5 โดยทำการตั้งความเร็วของการถ่ายภาพเป็น 30,000 fps และความเร็วชัตเตอร์ (Shutter speed) 1/1,000,000 s ร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพที่เรียกว่า Shadowgraph technique โดยแหล่งกำเนิดแสง (Light source) ใช้ Xenon 3500/4300 K ซึ่งจะฉายแสงออกมาผ่านเลนส์นูน (Convex lens) และ Pinhole แสงจะกระทบกระจกผิวโค้ง (Parabolic mirror) ซึ่งทำหน้าที่จัดเรียงแสงให้ขนานผ่าน Test chamber กระจกผิวโค้งอีกบานเพื่อรวมแสง เนื่องจากพื้นที่ในการทดลองมีจำกัดจึงใช้กระจกขนาด 150 mm ในการสะท้อนแสงจำนวน 2 บาน ดังรูปที่ 6



รูปที่ 5 ส่วนประกอบเครื่องมือวัดความดันกระแทก

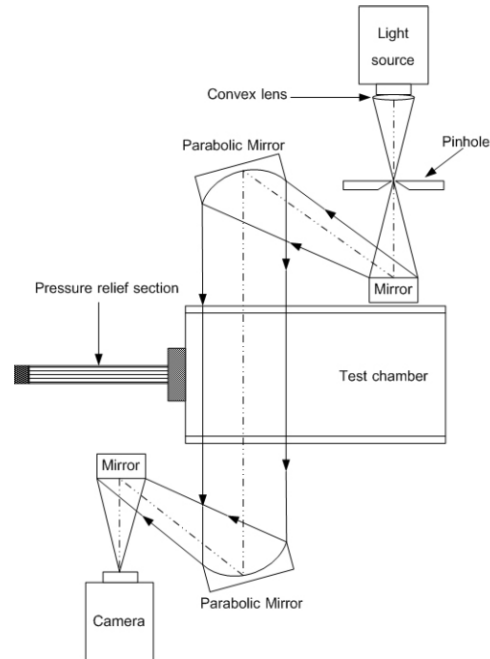
## 2.4 วิธีการทดลอง

ในการทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวัดความดันกระแทกของลำพ่นน้ำที่ฉีดในอากาศและในน้ำ โดยจะทำการวัดความดันกระแทกของลำพ่นน้ำในอากาศที่ระยะ 1.5, 2, 3, 4, 5 และ 6 cm. และทำการวัดความดันกระแทกของลำพ่นน้ำในน้ำที่ระยะ 1.5, 2, 3 และ 4 cm. เมื่อลำพ่นน้ำความเร็วสูงกระทบ ลงบนเครื่องวัดความดันกระแทก PVDF จะโก่งตัว แล้วทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า และจะส่งสัญญาณไปที่ออสซิลโลสโคป ซึ่งแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้ จะนำมาแทนค่าในสมการที่ 1 ก็จะได้ค่าความดันกระแทกโดย

สมการที่ 1 นั้นได้จากการสอบเทียบซึ่งรายละเอียดได้กล่าวไว้แล้วใน [16]

$$P = 17,975 (V) - 2614.4 \quad (1)$$

เมื่อ  $P$  = ความดัน (psi)  
 $V$  = แรงเคลื่อนไฟฟ้า (Voltage)



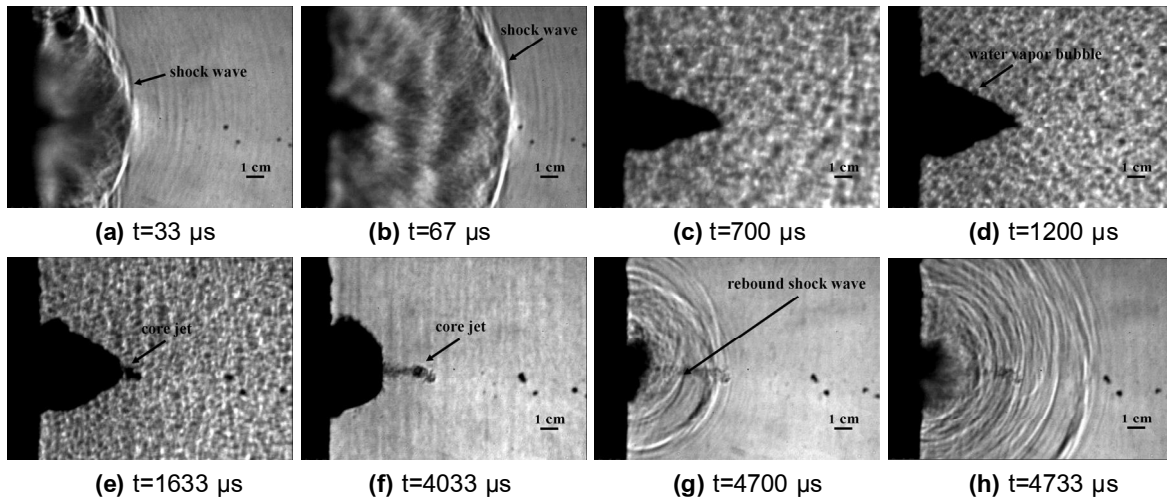
รูปที่ 6 การติดตั้งระบบถ่ายภาพจากเทคนิค Shadowgraph

## 3. ผลการศึกษา

### 3.1 พฤติกรรมลำพ่นน้ำในน้ำ

รูปที่ 7 แสดงรูปภาพของลำพ่นน้ำในน้ำโดยใช้กล้องถ่ายภาพวิดีโอความเร็วสูงร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph ได้เลือกภาพ 8 ภาพมาแสดงให้เห็น ทันทีที่ลูกกระสุนกระแทกน้ำที่บรรจุภายในหัวฉีด ลำพ่นจะพุ่งออกมาด้วยความเร็วสูง (ด้วยความเร็วประมาณ 1,669 m/s ที่  $t=33 \mu s$  ในอากาศ) จึงทำให้เกิด shock wave ภายในน้ำดังรูปที่ 7(a) แต่เนื่องจากลำพ่นถูกฉีดภายในน้ำจึงทำให้ความเร็วของลำพ่นลดต่ำลงอย่างรวดเร็วเนื่องจาก hydrodynamic drag นั้นมีค่าสูง





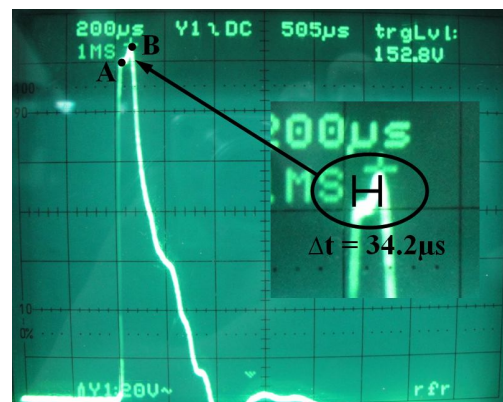
รูปที่ 7 เป็นการถ่ายภาพลำพองน้ำในน้ำโดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพความเร็วสูง

(จาก  $Drag = \frac{1}{2} C_D \rho V^2 A$  ซึ่ง  $\rho$  ของน้ำมีค่าเป็น 1,000 เท่าของอากาศ) ในขณะที่ความดันในน้ำมีค่าสูงกว่าในอากาศเพียง 2.9 kPa (ทดสอบฉีดลำพองที่มีความลึก 30 cm) ความดันในน้ำจึงมีค่าน้อยมากต่อความเร็วของลำพองที่ลดต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับผลจาก hydrodynamic drag โดยความเร็วสูงสุดของลำพองในน้ำมีค่าประมาณ 374 m/s ที่  $t=67 \mu s$  ซึ่งมีค่าต่ำกว่าความเร็วเฉลี่ยของ shock wave จากรูปที่ 7(b) ที่มีค่าประมาณ 1,500 - 1,600 m/s คิดเป็น Mach number มีค่าเท่ากับ 1.04 (ความเร็วเสียงในน้ำมีค่าเท่ากับ 1,500 m/s) จึงทำให้ลำพองและ shock wave แยกตัวออกจากกัน

จากรูปที่ 7(b-d) จะเห็นการเกิด water vapor bubble เนื่องจากการแตกตัวเป็นละออง การกลายเป็นไอของลำพองน้ำและเกิดการขยายตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะเกิดการ shear force ระหว่างลำพองและน้ำภายในห้องทดสอบ ในช่วงแรกมี shear force สูงเนื่องจากความเร็วของลำพองที่สูงจึงทำให้เกิด expansion pressure ของละอองลำพองสูงตามไปด้วย ดังแสดงรูปที่ 7 (b-d) แต่เมื่อลำพองมีความเร็วลดลงอย่างรวดเร็วจึงทำให้ภายใน pressure bubble มีค่าลดลงต่ำกว่าความดันด้านของน้ำภายในห้องทดสอบ

จึงทำให้เกิดการยุบตัวของ bubble ดังแสดงในรูปที่ 7 (e-h)

จากรูปที่ 7(e) พบว่าฟองอากาศจะขยายตัวสูงสุดที่เวลาเท่ากับ 1,663  $\mu s$  หลังจากนั้นฟองอากาศจะเริ่มหดตัวและหลังจากนั้นก็จะทำให้เห็นแกนของลำพองดังรูปที่ 7(f) เมื่อฟองอากาศลดลงต่ำสุดจะทำให้เกิด rebound shock wave เนื่องจากการยุบตัวของฟองอากาศจะทำให้เกิดความดันที่สูงขึ้นทันทีทันใดภายในฟองอากาศ ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้โดยปรากฏการณ์ของ cavitation จากการประมาณจากภาพถ่ายพบว่าการเคลื่อนที่ของ rebound shock wave มีความเร็ว 1,503 m/s คิดเป็น Mach number ประมาณ 1 ดังแสดงในรูปที่ 7(g-h)



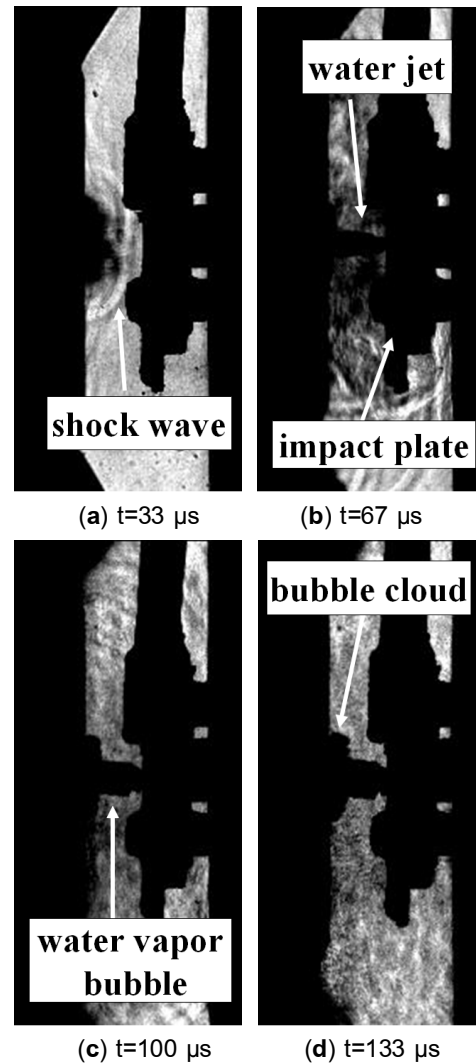
รูปที่ 8 แรงเคลื่อนไฟฟ้าจาก PVDF film เมื่อถูกลำพองน้ำกระแทกที่ระยะ  $x = 2$  cm

### 3.2 ความดันกระแทก (Impact pressure)

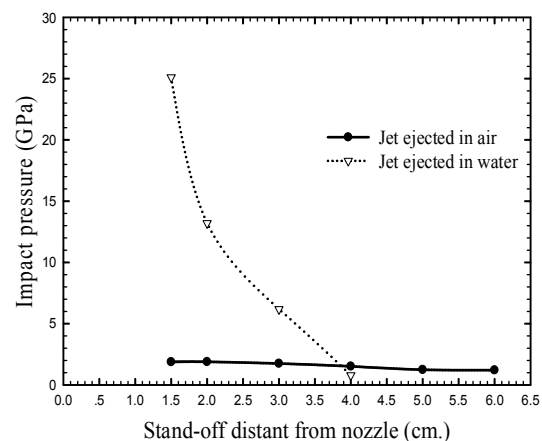
รูปที่ 8 แสดงสัญญาณที่ได้จากออสซิลโลสโคปเมื่อลำพ่นน้ำกระแทกลงบนเครื่องมือวัดความดันกระแทก PVDF film จะโค้งตัวทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า จากรูปจะพบว่าเกิดสัญญาณสูงสุด 2 จุด นั่นคือจุด A มีค่า 140 V และจุด B มีค่า 152 V โดยคิดเป็น 17.33 GPa และ 18.92 GPa ตามลำดับ จากการพิจารณาพบว่าความดันกระแทกจุด A คือความดันกระแทกเนื่องจากลำพ่น และที่จุด B คือความดันกระแทกเนื่องมาจาก water vapor bubble ซึ่งความแตกต่างของเวลาระหว่างจุด A และ B มีค่าเท่ากับ  $34.2 \mu\text{s}$  ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการกระแทกของลำพ่นที่ได้จากภาพถ่าย shadowgraph images จากรูปที่ 9 (b) กับ (c) ระยะห่างของเวลามีค่าเท่ากับ  $33 \mu\text{s}$  ซึ่งสอดคล้องกับสัญญาณที่ได้จาก PVDF

จากรูปที่ 9 แสดงภาพถ่ายการกระแทกของลำพ่นน้ำที่ฉีดในน้ำที่ระยะทำการวัด 2 cm. ทุกๆ ช่วงเวลา  $33 \mu\text{s}$  โดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph ร่วมกับกล้องถ่ายภาพวิดีโอความเร็วสูง จากรูปที่ 9 (a) หลังจากลูกกระสุนกระแทกหัวฉีดที่ภายในบรรจุน้ำ ลำพ่นน้ำความเร็วสูงที่พุ่งออกมาในน้ำ รูปร่างของลำพ่นจะเรียวแหลมกระแทกกับเครื่องมือวัดความดันจาก รูปที่ 9 (b) ซึ่งสอดคล้องกับสัญญาณที่ตำแหน่ง A ดังรูปที่ 8 หลังจากนั้น water vapor bubble จะกระแทกเครื่องมือวัดความดันจากรูปที่ 9 (c) ซึ่งสัมพันธ์กับสัญญาณที่ตำแหน่ง B กลุ่มฟองอากาศยังได้เกิดขึ้นรอบๆ บริเวณหัวฉีด ดังรูปที่ 9 (d)

จากรูปที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบความดันกระแทกของลำพ่นน้ำในอากาศกับในน้ำ จากการทดลองความเร็วเฉลี่ยของลำพ่นน้ำในอากาศมีค่าสูงสุดเท่ากับ  $1,669 \text{ m/s}$  และความเร็วลำพ่นสูงสุด  $374 \text{ m/s}$  เมื่อวัดในน้ำ จะเห็นว่าความเร็วเฉลี่ยลำพ่นน้ำในน้ำมีค่าต่ำกว่ามาก เนื่องจาก hydrodynamic drag นั้นมีค่าสูงกว่า aerodynamic drag จากการทดลองหาค่าความดันกระแทกของลำพ่นน้ำในอากาศที่



รูปที่ 9 ลำพ่นน้ำกระแทกกับเครื่องมือวัดความดันในน้ำที่ระยะ 2 cm.



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบระหว่างความดันกระแทกเฉลี่ยที่ระยะต่างๆ ของลำพ่นน้ำในอากาศกับในน้ำ

ระยะ 1.5, 2, 3, 4, 5 และ 6 cm. และทำการวัดความดันกระแทกของลำพุน้ำในน้ำที่ระยะ 1.5, 2, 3 และ 4 cm. ค่าสูงสุดที่ได้จากการทดลองพบว่า เมื่อระยะห่างจากหัวฉีดเพิ่มขึ้นความดันกระแทกของลำพุน้ำจะมีแนวโน้มต่ำลงกรณีฉีดในน้ำ แต่ค่าความดันกระแทกของลำพุน้ำในอากาศมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.89 GPa ที่ระยะ 2 cm และจะมีค่าลดต่ำลงเมื่อห่างจากตำแหน่งนี้ โดยค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.213 GPa ที่ระยะ 6 cm สำหรับกรณีฉีดในอากาศนั้นความดันกระแทกของลำพุน้ำที่อยู่ใกล้หัวฉีดที่สุดคือ 1.5 cm ไม่ได้มีค่ามากที่สุด อาจเนื่องมาจากลำพุน้ำต้องการระยะทางในการเร่งความเร็ว ดังนั้นความเร็วที่สูงที่สุดจึงอาจอยู่ระหว่างตำแหน่งที่ 2 cm ในขณะที่ค่าความดันกระแทกของลำพุน้ำในน้ำมีค่าสูงสุดเท่ากับ 25.1 GPa ที่ระยะ 1.5 cm ค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.785 GPa ที่ระยะ 4 cm ในขณะที่ระยะ 4 cm เป็นต้นไปจะไม่สามารถวัดความดันกระแทกของลำพุน้ำได้เนื่องจากลำพุน้ำมีระยะการเคลื่อนที่ในน้ำไม่เกิน 4 cm ดังรูป 7(d) นอกจากนี้ยังพบอีกว่า ความดันของลำพุน้ำที่ฉีดในน้ำมีความดันสูงกว่าที่ฉีดในอากาศมาก ดังแสดงในรูปที่ 10 ทั้งที่ความเร็วของลำพุน้ำในน้ำช้ากว่าในอากาศมาก เนื่องมาจากการฉีดของลำพุน้ำในน้ำนั้นมีการส่งเสริมความดันจากปรากฏการณ์ cavitation ที่เกิดขึ้นในน้ำ ซึ่งสังเกตได้จากภาพถ่ายในรูปที่ 9

#### 4.สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเพื่อศึกษาความดันกระแทกของลำพุน้ำความเร็วสูงเมื่อฉีดในน้ำและในอากาศ ลักษณะและพฤติกรรมของลำพุน้ำถูกถ่ายภาพโดยเทคนิคการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph ร่วมกับกล้องวิดีโอความเร็วสูง และใช้ PVDF ในการวัดความดันกระแทก จากผลทดลองที่ได้สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ความเร็วเฉลี่ยลำพุน้ำในอากาศมีค่าเท่ากับ 1,669 m/s และความเร็วเฉลี่ยลำพุน้ำในน้ำมีค่าเท่ากับ 374.24 m/s ความเร็วลำพุน้ำในน้ำมีความเร็วต่ำกว่า

ในอากาศเนื่องจาก hydrodynamic drag นั้นมีค่าสูงกว่า aerodynamic drag

2. ความดันกระแทกของลำพุน้ำจะมีค่าต่ำลงเมื่อห่างจากปลายหัวฉีดเนื่องจากความเร็วของลำพุน้ำจะช้าลงจากผลของ aerodynamic drag และ hydrodynamic drag ของลำพุน้ำเมื่อฉีดในอากาศและน้ำตามลำดับ

3. ความดันกระแทกในน้ำสูงกว่าในอากาศเนื่องจากลำพุน้ำได้เหนี่ยวนำ cavitation มากระแทกกับ PVDF ในช่วงระยะ 1.5 – 4 cm

4. จากภาพถ่ายลำพุน้ำที่ฉีดในน้ำได้แสดงให้เห็นพฤติกรรมที่เกิด shock wave, water vapor bubble, jet core, rebound shock wave, กลุ่มฟองอากาศรอบๆ บริเวณหัวฉีด และ cavitation อย่างชัดเจน

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สัญญาเลขที่ MRG 5180046 สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Vijay, M.M and Brierley, W.H. (1981). Cutting cleaning and fragmentation of materials with high pressure liquid jets. *Proc 1<sup>st</sup> U.S. water jet conference*, 272-288
- [2] Kobayashi, R., Arai, T. and Yamada, H. (1988). Structure of a high-speed water jet and the damage process of metals in jet cutting technology. *JSME Int J Series B* 31, 53-57
- [3] Shi, H.H. and Dear, J.P. (1992). Oblique High-speed liquid-solid impact. *JSME Int J Series* / 35,
- [4] Shi, H.H., Field, J.E. and Pickles, C.S.J. (1994). High speed liquid impact onto wetted solid surfaces. *J Fluids Eng* 116, 345-348

- [5] Yamauchi, Y., Soyama, H. and Adachi, Y. (1995). Suitable Region of High-Speed Submerged Water Jets for Cutting and Peening, *JSME*, Vol. 38 (1), pp. 31-38.
- [6] Soyama H., Yanauchi Y., Sato K., Ikohagi T., Oba R. and Oshima R. (1996). "High-Speed Observation of Ultrahigh-Speed Submerged Water Jets", *Experimental Thermal and Fluid Science* 12:411-4162.
- [7] Shi, H.H., Kazuyoshi Takayama and Nobuo Nagayasu (1995). The measurement of impact pressure and solid surface response in liquid solid impact up to hypersonic range, *WEAR*, Vol. 186-187, pp. 352-359.
- [8] Bourne, N.K., Obara, T., and Field, J.E. (1996). The impact and penetration of a water surface by a liquid jet, *The Royal Society*, Vol. 452, pp. 1497-1502.
- [9] Bourne, N.K., Obara, T., and Field, J.E. (1997). High-speed Photography and Stress Gauge Studies of Jet Impact Upon Surfaces, *The Royal Society*, Vol. 355, pp. 607-623.
- [10] Pianthong, K., S.Zakrzewski, S., Behnia, M. and Milton, B.E. (2002). Supersonic liquid jets: Their generation and shock wave characteristics, *Shock Waves*, Vol.7(11), pp. 457-66.
- [11] วุฒิชัย สิทธิวงษ์, กุลเชษฐ์ เพียรทอง, วีระพันธ์ สีหนาม และ อนิรุตต์ มัทธูจกร (2008). การเปรียบเทียบชุดกำเนิดลำพุ่งความเร็วสูง, *การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จังหวัดปทุมธานี*.
- [12] วุฒิชัย สิทธิวงษ์, วีระพันธ์ สีหนาม, กุลเชษฐ์ เพียรทอง, อนิรุตต์ มัทธูจกร และ Eric Yeo. การเปรียบเทียบชุดทดลองสำหรับการศึกษาการกระแทกความเร็วสูง. *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22, 2551*.
- [13] วุฒิชัย สิทธิวงษ์, วีระพันธ์ สีหนาม, กุลเชษฐ์ เพียรทอง และอนิรุตต์ มัทธูจกร. ความดันของลำพุ่งความเร็วสูง. *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 23, 2552*.
- [14] Matthujak A., Hosseini S. H. R., Takayama K., Sun M. and Voinovich P. (2007). "High speed jet formation by impact acceleration method", *Shock Waves* 16:405-419.
- [15] Obara T., Bourne N.K. and Field J.E. (1995). " Liquid-jet impact on liquid and solid surfaces" *Wear* 186-187, 388-394.
- [16] Pianthong K., Zakrzewski S., Behnia M. and Milton B.E. (2003). "Characteristics of impact driven supersonic liquid jets", *Experimental Thermal and Fluid Science* 27 589-598.
- [17] อนิรุตต์ มัทธูจกร และ กุลเชษฐ์ เพียรทอง. (2547). สมรรถนะของชุดทดลอง Vertical Two Stage Light Gas Gun และการประยุกต์ใช้. *การประชุมวิชาการ 40 ปีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น*.
- [18] Matthujak, A., Pianthong, K., Sun, M., and Takayama, K. (2007). Experimental Study of Impact-Generated High-Speed Liquid Jet, *Mechanical Engineering Network of Thailand*, Chunburi, Thailand.
- [19] Sittiwong, W., Seehanam, W., Pianthong, K. and Matthujak, A. (2009). Effect of stand-off distance on impact pressure of high speed liquid jets, *The 10<sup>th</sup> Asian International Conference on Fluid Machinery*, Kuala Lumpur, Malaysia