

## คุณลักษณะของลำพ่นน้ำความเร็วสูงที่ฉีดในของเหลว

### Characteristics of High-Speed Water Jet Injected in Liquid

ชัยเดช เกษมนิมิตรพร<sup>1</sup> อนิรุตต์ มัทธูจักษ์<sup>1</sup> วุฒิชัย สิทธิวงษ์<sup>2</sup> และกุลเชษฐ์ เพียรทอง<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ห้องปฏิบัติการการประยุกต์ใช้ลำพ่นและการเผาไหม้ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

<sup>2</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

85 ถ.สถลมารค ต.เมืองศรีโค อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190 โทร 0-4535-3309 โทรสาร 0-4535-3308

E-mail: chaidet\_peat@hotmail.com, Anirut.Mat@gmail.com, A.Matthujak@ubu.ac.th

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณลักษณะของลำพ่นน้ำความเร็วสูงเมื่อฉีดในของเหลวและอิทธิพลของชนิดของเหลวในห้องทดสอบต่อคุณลักษณะของลำพ่น โดยใช้ของเหลวในห้องทดสอบ 2 ชนิด คือ น้ำและน้ำทะเล การผลิตลำพ่นความเร็วสูงในการศึกษานี้ใช้เทคนิคพิเศษที่เรียกว่า Impact driven method จากชุดทดลอง Horizontal Single Stage Powder Gun (HSSPG) โดยคุณลักษณะของลำพ่นในของเหลวจะถูกอธิบายโดยใช้การถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูง (High-speed digital video camera) ร่วมกับการถ่ายภาพด้วยเทคนิค Shadowgraph และการถ่ายภาพในแนวแกนของลำพ่น จากภาพถ่ายทำให้เห็นพฤติกรรมของลำพ่น กลไกการขยายตัวและยุบตัวของ bubble, shock wave, core jet, compressed wave และ rebound shock wave ในของเหลวอย่างชัดเจน นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อลำพ่นฉีดในน้ำจะมีความเร็วสูงสุดสูงกว่าฉีดในน้ำทะเลซึ่งมีค่าเท่ากับ 374 m/s และ 275 m/s ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากความหนาแน่นของน้ำต่ำกว่าของน้ำทะเล นอกจากนี้ยังทำให้ความเร็วในการขยายตัวและยุบตัวของ bubble ที่เกิดจากลำพ่นทั้งในแนวนอนและแนวตั้งกรณีฉีดในน้ำมีค่าสูงกว่าในน้ำทะเลอีกด้วย

**คำสำคัญ:** ลำพ่นน้ำความเร็วสูง การขับลำพ่นด้วยการกระแทก Shadowgraph shock wave bubble

#### ABSTRACT

This research is to study the characteristics of high-speed water jet injected in liquids and investigate the effect of various liquids (water and sea water) in test chamber on jet characteristics. In this study, the high-speed jets were generated by impact driven method in a Horizontal Single Stage Powder Gun (HSSPG). The jet characteristics in liquid were visualized by a high-speed digital video camera with shadowgraph optical arrangement and without optical setup in axial view. From the shadowgraph images, the jet behaviors, the expansion and contraction of water vapor bubble, shock wave in liquid, core jet, compressed wave and rebound shock wave generated by water bubble collapse were obviously revealed. The maximum average velocity of jet injected in water and sea water was estimated to be 374 m/s and 275 m/s, respectively. The velocity of jet in water was faster than that in sea water because the density of water is lower than that in sea water. Moreover, that effects on expansion and contraction velocity of jet-induced bubble in both horizontal and vertical directions of bubble in water being faster than that in sea water.

**Keyword:** High-speed water jet, impact driven method, Shadowgraph shock wave bubble

## 1. บทนำ

เริ่มต้นการวิจัยเกี่ยวกับลำพุ่งความเร็วสูง (high-speed jet) เกิดจากการศึกษาการปะทะของเม็ดฝนบนตัวเครื่องบินระหว่างการเคลื่อนที่ในอากาศด้วยความเร็วสูงในขณะที่ฝนตก [1] จากนั้นเป็นต้นมาได้มีการนำลำพุ่งความเร็วสูงมาประยุกต์ใช้ในทางด้านวิศวกรรมในหลายๆ ด้าน เช่น การตัดโดยลำพุ่ง การทำความสะอาดโดยลำพุ่ง การฉีดเชื้อเพลิงความเร็วสูง [2-5] เป็นต้น และยังสามารถประยุกต์ใช้ในการแพทย์ เช่น การฉีดยาโดยไม่ใช้เข็ม การรักษาการอุดตันของหลอดเลือดโดยลำพุ่ง [6,7] เป็นต้น จากการศึกษา พบว่าลำพุ่งความเร็วสูงสามารถตัดวัสดุที่มีความหนา และความแข็งแรงได้เป็นอย่างดี และยังสามารถทำความสะอาดวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ลำพุน้ำมันความเร็วสูงมีส่วนช่วยส่งเสริมการเผาไหม้ให้มีสมรรถนะดีขึ้น เนื่องจากการแตกตัวเป็นฝอยละอองของน้ำมันและการผสมคลุกเคล้ากันกับอากาศที่เพิ่มขึ้น ซึ่งในปัจจุบันเริ่มมีการศึกษาการนำลำพุ่งความเร็วสูงมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้สมุทร เช่น การตัดโครงสร้างได้ทะเล และการเจาะได้ทะเลด้วยลำพุ่งความเร็วสูงเนื่องจากเชื่อว่าลำพุงมีพลังงานสูงเพียงพอ [8-10]

ในปี 1996, H. Soyama และคณะ [11] ได้ทำการศึกษาคุณลักษณะของลำพุ่งในน้ำโดยผลิตลำพุ่งจากปั๊มที่มีความดันสูงสุดที่ 70 MPa และอัตราการไหล 22 l/min จากการถ่ายภาพลำพุ่งด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph ซึ่งพบการเกิด bubble รอบๆ ลำพุ่งในลักษณะเดียวกันกับการเกิด cavitation นอกจากนี้ยังศึกษาการกระแทกของลำพุ่งความเร็วสูงบนผิววัสดุ เพื่อศึกษาลักษณะความเสียหายและทำการวัดความดันกระแทกโดยใช้ Polyvinylidene Fluoride Film (PVDF) นอกจากนี้ยังศึกษาอิทธิพลของหัวฉีดต่อคุณลักษณะความดันกระแทก ซึ่งพบว่าลำพุ่งที่ฉีดออกมาจากหัวฉีดแบบทรงกรวยให้ความดันสูงสุดที่ 275 MPa ซึ่งมีค่าสูงเพียงพอต่อการตัดเจาะโลหะ

ในปี 2009, K. Otani และคณะ [12] ได้ศึกษาคุณลักษณะของลำพุ่งในน้ำโดยผลิตลำพุ่งจาก Ho: YAG Laser โดยศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการเจาะหินใต้น้ำ ด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph จากภาพที่ได้ พบว่าความเร็วของลำพุงมีค่าประมาณ 40 m/s นอกจากนี้ยังวัดความดันกระแทกที่เกิดขึ้น โดยใช้ PVDF needle hydrophone พบว่า ความดันของ shock wave มีค่าประมาณ 22.7 MPa และพบการยุบตัวของ water vapor bubble ที่ทำให้เกิด shock wave นอกจากนี้ยังพบว่าลำพุ่งที่ผลิตได้สามารถเจาะแผ่นหินทรายใต้น้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าความเร็วของลำพุ่งในน้ำที่ศึกษานั้นมีความเร็วต่ำเนื่องจากข้อจำกัดของเทคนิคในการผลิตลำพุ่ง ดังนั้นคุณลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูงในของเหลวจึงยังไม่ได้ทำการศึกษาและอธิบายอย่างชัดเจน

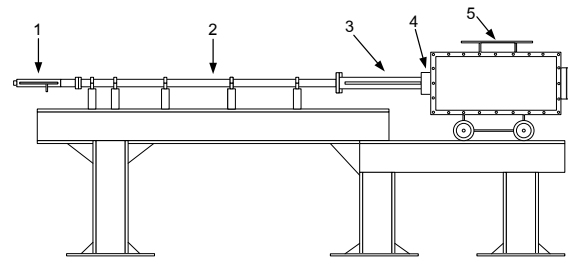
งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณลักษณะของลำพุงน้ำความเร็วสูงที่ฉีดในของเหลว คือ น้ำกับน้ำทะเล และทำการเปรียบเทียบคุณลักษณะของลำพุงที่เกิดขึ้นเมื่อฉีดในของเหลวที่ต่างกันดังกล่าว โดยวิเคราะห์จากการถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูง (High-speed video camera) ร่วมกับเทคนิคของการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph และการถ่ายภาพในแนวแกน ซึ่งผลที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้ คือ เป็นข้อมูลเบื้องต้นที่จะสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้สมุทร เช่น เทคโนโลยีการตัดใต้น้ำ เป็นต้น

## 2. วิธีดำเนินงานวิจัย

### 2.1 ชุดการกำเนิดลำพุ่งความเร็วสูง

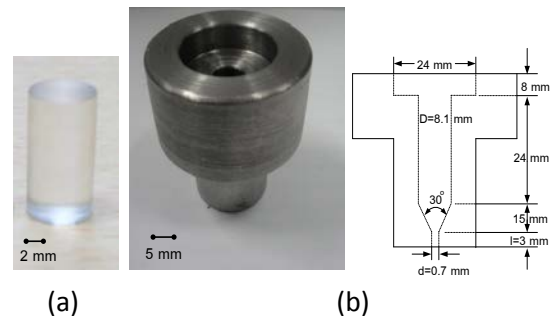
ในการศึกษานี้การผลิตลำพุ่งความเร็วสูงจะใช้เทคนิคพิเศษที่เรียกว่า Impact driven method [5,9] ดังรูปที่ 1 โดยเทคนิคนี้จะยิงกระสุนปืนความเร็วสูง (high-speed projectile) เข้าไปกระแทกของเหลวที่บรรจุอยู่ในหัวฉีดด้วยความเร็วสูง จากนั้นของเหลวจะฉีดออกมาจากหัวฉีดด้วยความเร็วสูงโดยในการศึกษานี้

กระสุนปืนความเร็วสูงจะถูกยิงออกมาจากชุดทดลองที่เรียกว่า Horizontal Single Stage Powder Gun (HSSPG) ดังรูปที่ 2 ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญ 5 ส่วน คือ 1) ชุดปล่อยกระสุนปืน (launcher) ทำหน้าที่คล้ายปืนจะประกอบด้วยเข็มแทงชนวน (firing pin) ทำหน้าที่กระแทกชนวน (primer) ที่อยู่ส่วนท้ายของปลอกกระสุน ซึ่งบรรจุดินปืนไว้ในภายในโดยดินปืนที่ใช้เป็นชนิดที่มีย่าน้อย (smokeless powder) 2) ท่อส่งกระสุนปืน (launch tube) ทำหน้าที่คล้ายลำกล้องปืนใช้ควบคุมทิศทางการขับเคลื่อนกระสุนปืน มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 8 mm ความยาว 1.5 m ที่ส่วนปลายด้านหนึ่งของท่อจะยึดติดอยู่กับท่อระบายความดัน (pressure relief section) 3) ท่อระบายความดัน (pressure relief section) ทำหน้าที่ระบายแรงอัดอากาศที่อยู่ส่วนหน้ากระสุนปืนเพื่อลดแรงต้านและแรงอัดภายในท่อส่งกระสุนปืน มีความยาว 40 cm จะเป็นช่องมีขนาด 3 mm ตามแนวยาวทั้ง 4 ด้าน 4) ส่วนประกอบหัวฉีด (nozzle assembly) จะประกอบไปด้วยหัวฉีดและชุดยึดหัวฉีด ซึ่งถูกติดตั้งระหว่างห้องทดสอบกับท่อระบายความดันและ 5) ห้องทดสอบ (test chamber) ได้ถูกออกแบบให้เป็นถังรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า หน้า 5 มม มีขนาดกว้าง 39.5 cm ยาว 60 cm และสูง 35 cm ฝาด้านข้างทั้งสองด้านเป็นแผ่นอะคริลิกใส หน้า 25 mm ใช้เป็นหน้าต่างสำหรับสังเกตพฤติกรรมที่เกิดขึ้น

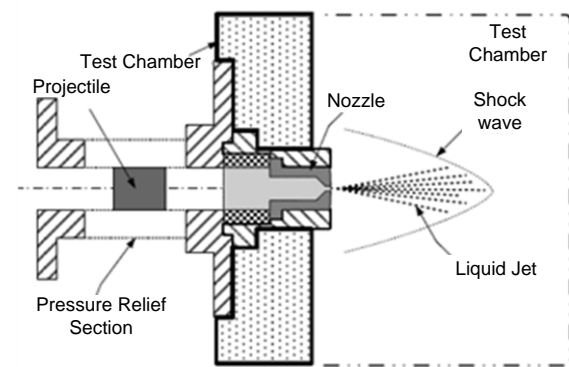


รูปที่ 2 Horizontal Single Stage Powder Gun (HSSPG)

ในการทดลองนี้ใช้กระสุนปืนที่ทำมาจาก polymethyl methacrylate (PMMA) ทรงกระบอกมีความยาว 15 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.05 mm และหัวฉีดที่ใช้ในการผลิตลำพุ่งความเร็วสูงมีรูปทรงกรวยมุม 30° ทำมาจากเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่บรรจุของเหลว  $D = 8.1$  mm ขนาดของรูหัวฉีด  $d = 0.7$  mm และความยาวของรูหัวฉีด  $l = 3$  mm ดังรูปที่ 3 ในการทดลองนี้ใช้ความเร็วของกระสุนปืนประมาณ  $950 \pm 30$  m/s ในการผลิตลำพุ่งจากการใช้ดินปืน 5 g



รูปที่ 3 (a) กระสุนปืน และ (b) หัวฉีดที่ใช้ในการทดลอง

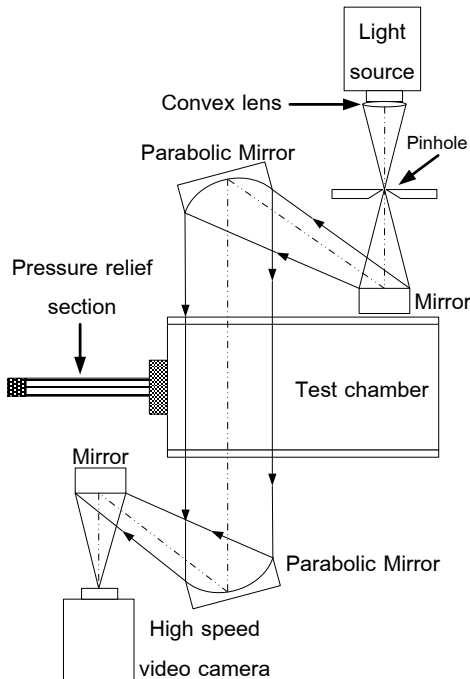


รูปที่ 1 การขับลำพุ่งด้วยการกระแทก (Impact driven method)

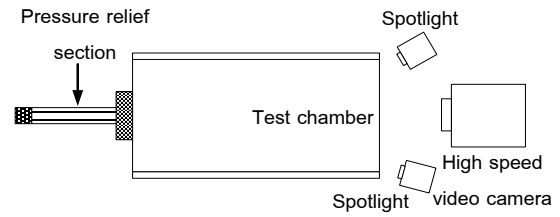
## 2.2 เทคนิคการถ่ายภาพ

เนื่องจากพฤติกรรมของลำพุ่งที่เกิดขึ้นนั้นเป็นความเร็วในระดับเหนือเสียง (supersonic) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วโดยใช้เวลาในระดับไมโครวินาที ( $\mu s$ ) ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าหรือจากกล้องถ่ายภาพทั่วไป ดังนั้นการศึกษานี้จึงใช้กล้องวิดีโอความเร็วสูง (high-speed digital video camera) ยี่ห้อ photron รุ่น FASTCAM SA5 ที่มีความเร็วของการถ่ายภาพเท่ากับ 30,000 fps และมีความเร็วชัตเตอร์ (shutter speed) เท่ากับ  $1 \mu s$  โดยใช้

หลักการถ่ายภาพร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยแหล่งกำเนิดแสง (light source) ในการศึกษานี้ใช้หลอดซีนอน (xenon) 3500/4300 K ซึ่งจะฉายแสงออกมาโดยผ่านเลนส์นูน (convex lens) เพื่อรวมแสงและส่องผ่านรูเข็ม (pinhole) ซึ่งทำหน้าที่ตัดแสงที่กระจายออกจากเลนส์นูน แสงจะกระทบกระจกผิวโค้ง (parabolic mirror) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 cm ความยาวโฟกัสอยู่ที่ 1.5 m ซึ่งทำหน้าที่จัดแสงให้ขนานผ่านห้องทดสอบ โดยแสงที่ผ่านห้องทดสอบหากมีพฤติกรรมการไหลที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของของไหลในห้องทดสอบแสงจะเกิดการหักเห โดยแสงที่หักเหจะกระทบกระจกผิวโค้งอีกบานเพื่อรวมแสง เนื่องจากพื้นที่ในห้องทดลองมีจำกัดจึงใช้กระจกเงา (plane mirror) ซึ่งมีขนาด 19 cm จำนวน 2 บาน ช่วยในการสะท้อนแสงจากนั้นแสงจะฉายลงจอร์ับภาพของกล้องวิดีโอความเร็วสูงและจะถูกบันทึกภาพไว้ จากรูปที่ 5 แสดงการติดตั้งกล้องวิดีโอความเร็วสูงในแนวแกนโดยไม่ใช้เทคนิค Shadowgraph ซึ่งจะมีสปอร์ตไลท์ จำนวน 2 ตัว เป็นแหล่งกำเนิดแสงโดยพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจะถูกบันทึกโดยกล้องวิดีโอความเร็วสูงโดยตรง



รูปที่ 4 การติดตั้งระบบถ่ายภาพด้วยเทคนิค Shadowgraph



รูปที่ 5 การติดตั้งกล้องวิดีโอความเร็วสูงในแนวแกนโดยไม่ใช้เทคนิค Shadowgraph

**3. คุณลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูงในของเหลว**

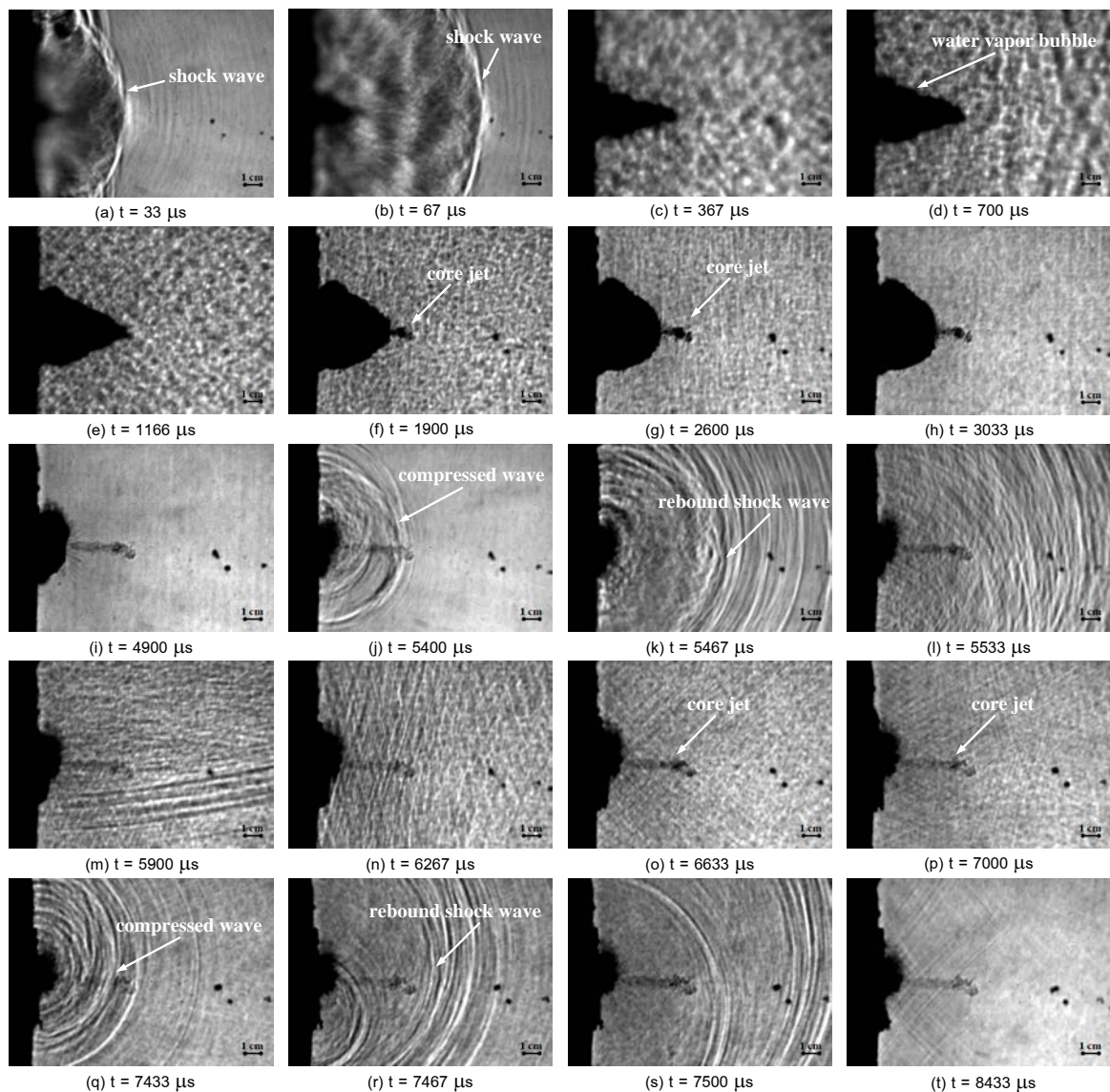
ในงานวิจัยนี้จะศึกษาคุณลักษณะของลำพุ่งน้ำความเร็วสูงเมื่อฉีดในของเหลวโดยของเหลวในการศึกษานี้ คือ น้ำและน้ำทะเล ในการอธิบายคุณลักษณะของลำพุ่งที่เกิดขึ้น ในหัวข้อนี้ใช้กรณีลำพุ่งฉีดในน้ำเป็นตัวแทนในการอธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้น

รูปที่ 6 แสดงลำพุ่งน้ำความเร็วสูงที่ฉีดในน้ำจากการถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูงร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพ Shadowgraph ซึ่งในการทดลองนี้พิจารณาที่อุณหภูมิน้ำ 28 °C โดยเลือกภาพ จำนวน 20 ภาพ มาใช้แสดงเพื่ออธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นทันทีที่กระสุนปืนกระแทกน้ำที่บรรจุภายในหัวฉีด ลำพุ่งจะพุ่งออกมาด้วยความเร็วสูง (ความเร็วประมาณ 1,669 m/s ที่เวลา 33 μs ในอากาศ) จึงทำให้เกิด shock wave ภายในน้ำดังรูปที่ 6(a) แต่เนื่องจากลำพุ่งถูกฉีดภายในน้ำจึงทำให้ความเร็วของลำพุ่งลดต่ำลงอย่างรวดเร็วเนื่องจาก hydrodynamic drag นั้นมีค่าสูง (จาก  $Drag = \frac{1}{2} C_D \rho V^2 A$  ซึ่ง  $\rho$  ของน้ำมีค่าเป็น 1,000 เท่าของอากาศ) โดยความเร็วสูงสุดของลำพุ่งในน้ำมีค่าประมาณ 374 m/s ที่เวลา 67 μs โดยห่างจากความเร็วของ shock wave ในน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 6(b) ซึ่งมีความเร็วเท่ากับ 1,563 m/s คิดเป็น Mach number เท่ากับ 1.04 (ความเร็วเสียงในน้ำมีค่าเท่ากับ 1,500 m/s) จึงทำให้ลำพุ่งและ shock wave แยกตัวออกจากกันเนื่องจากความเร็วที่ต่างกัน

จากนั้นจะเกิด water vapor bubble เนื่องจากการแตกตัวเป็นละออง (atomization) การกลายเป็นไอ (vaporization) ของลำพุ่ง และเกิดการขยายตัวอย่าง

รวดเร็ว (expansion) ดังรูปที่ 6(b)-(d) ซึ่งมีลักษณะเป็นวงรีสีดำเข้ม ดังรูปที่ 6(d) ถึงแม้ว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ water vapor bubble (bubble diameter) ในแนวตั้งของภาพจะขยายตัวขึ้นอย่างรวดเร็วแต่ยังช้ากว่าระยะเวลาเคลื่อนที่ของ bubble (bubble penetration) ในแนวนอนของภาพ แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่ของลำพุ่ง (jet penetration) เร็วกว่าการขยายตัวของ bubble ในแนวตั้ง

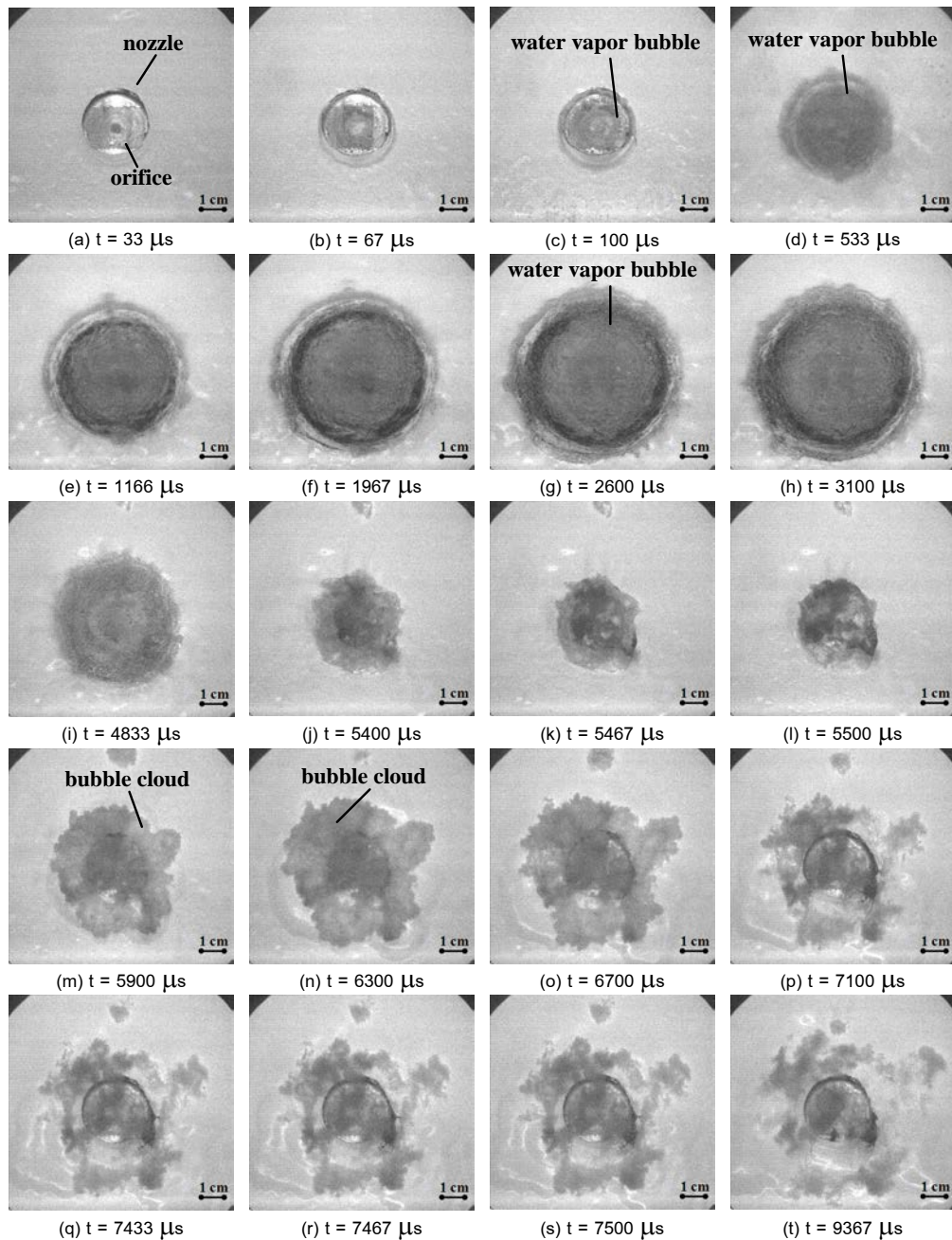
จากรูปที่ 6(e) พบว่าระยะเวลาเคลื่อนที่ของ bubble สูงสุดเกิดขึ้นที่ระยะเวลา 1,166  $\mu\text{s}$  แต่เส้นผ่านศูนย์กลางของ bubble จะยังไม่ขยายตัวสูงสุด ยังคงขยายตัวอย่างต่อเนื่องรอบๆ ลำพุ่ง ดังแสดงในรูปที่ 6(f) หลังจากระยะเวลาเคลื่อนที่ของ bubble มาถึงยังจุดสูงสุดของ bubble จะเริ่มยุบตัว ในขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางของ bubble (ในแนวตั้ง) ยังขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 6 ลำพุ่งน้ำความเร็วสูงที่ฉีดในน้ำจากการถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูงร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพ Shadowgraph

จากรูปที่ 6(g) พบว่า เส้นผ่านศูนย์กลางของ bubble จะขยายตัวสูงสุดที่เวลา 2,600  $\mu\text{s}$  จากนั้น bubble จะเริ่มยุบตัวจึงทำให้สังเกตเห็นแกนของลำพุ่ง (core jet) เคลื่อนที่ไปข้างหน้าอย่างช้าๆ จนเกือบจะหยุดนิ่ง ดังแสดงในรูปที่ 6(h),(i) ซึ่งการยุบตัวของลำพุ่งนั้นเกิดจากความดันของ bubble ต่ำลงกว่าความดันของน้ำภายในห้องทดสอบ โดยก่อนที่ bubble จะยุบตัวลดลงเกือบจะถึงค่าต่ำสุดดังรูปที่ 6(j) จะเกิด

compressed wave ขึ้นเมื่อ bubble ยุบตัวลดลงต่ำสุดจะทำให้เกิด rebound shock wave ขึ้นดังรูปที่ 6(k),(l) เนื่องจากการยุบตัวของ bubble จะทำให้เกิดความดันสูงขึ้นในทันทีทันใดภายใน bubble ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้โดยปรากฏการณ์ของ cavitation ซึ่งจากการประมาณจากภาพถ่ายพบว่า rebound shock wave มีความเร็ว 1,503 m/s คิดเป็น Mach number ประมาณ 1.00

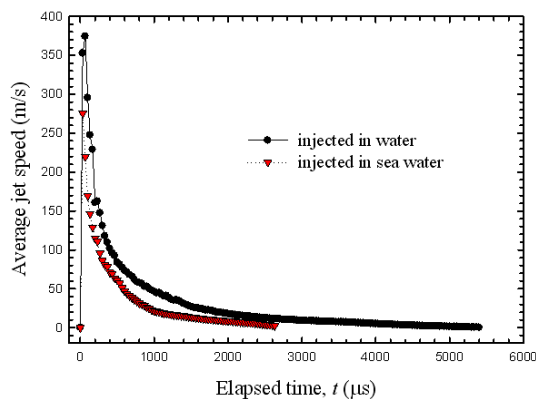


รูปที่ 7 ลำพุ่งน้ำความเร็วสูงที่ฉีดในน้ำในแนวแกนโดยกล้องถ่ายภาพวิดีโอความเร็วสูง

จากรูปที่ 6(m) เนื่องจากความดันภายใน bubble มีค่าสูงมาก ไม่เพียงแต่ทำให้เกิด rebound shock wave ยังทำให้เกิด water vapor bubble ขึ้นอีกครั้งรูปที่ 6(m)-(p) ถึงแม้ว่ากลไกการขยายตัวและการยุบตัวของ bubble จะสังเกตเห็นไม่ชัดเจน แต่ก็เชื่อว่ากลไกดังกล่าวเกิดขึ้นอีกครั้งจริง จากการสังเกตเห็น compressed wave, rebound shock wave และ shock wave ที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 6(p)-(r) ดังนั้นพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในครั้งนี้นี้จึงคล้ายกับพฤติกรรมของการขยายตัวและยุบตัวของ water vapor bubble ที่เกิดขึ้นก่อนหน้านี้ (ดังแสดงในรูปที่ 6(a)-(j)) โดยที่การเคลื่อนที่ของ rebound shock wave ที่เกิดขึ้นในครั้งนี้มีความเร็วเท่ากับ 1,556 m/s คิดเป็น Mach number ประมาณ 1.04

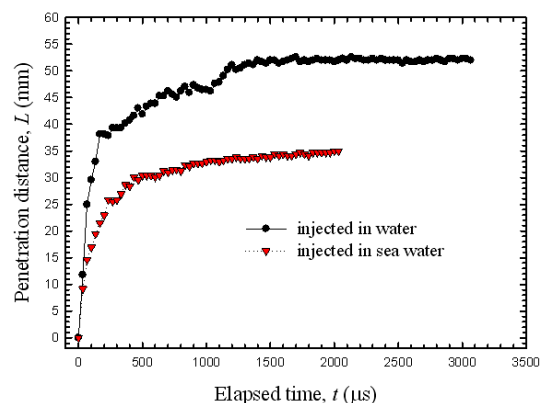
จากรูปที่ 6(r) จะพบ rebound shock wave ที่เกิดจากกลไกการขยายตัวและยุบตัวของ bubble ในครั้งที่สอง จากนั้นความดันภายใน bubble จะลดต่ำลงจนไม่สามารถทำให้เกิด bubble ขึ้นอีกครั้งได้ จึงทำให้ไม่พบกลไกการขยายตัวและยุบตัวที่ทำให้เกิด rebound shock wave ขึ้นอีกครั้งได้ จากนั้น bubble จะลอยตัวขึ้นเนื่องจากแรงลอยตัว ในขณะที่ core jet จะละลายผสมรวมกับน้ำภายในห้องทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 6 (s)-(t) เนื่องจากการสูญเสียแรงพลศาสตร์ (Dynamic force)

รูปที่ 7 แสดงลำพุงน้ำความเร็วสูงที่ฉีดในน้ำในแนวแกนโดยกล้องถ่ายภาพวิดีโอความเร็วสูงจากรูปที่



รูปที่ 8 ความเร็วเฉลี่ยของลำพุง (average jet speed) ที่ฉีดในน้ำและน้ำทะเล

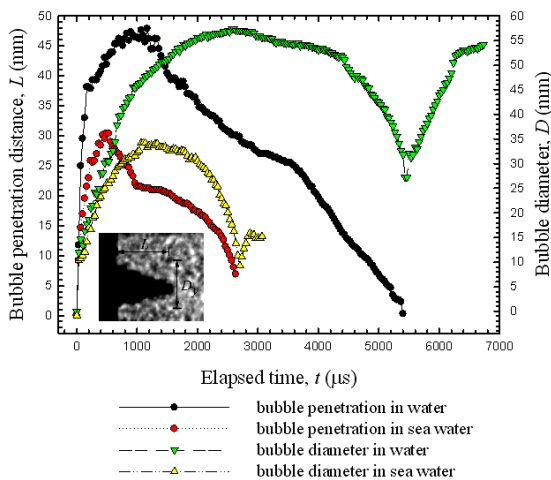
7(a)-(f) จะเห็น bubble นั้นเกือบจะกลมอย่างสมมาตร และขยายตัวขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเส้นผ่านศูนย์กลางของ bubble ขยายตัวสูงสุดที่เวลา 2,600  $\mu\text{s}$  ในรูปที่ 7(g) จากนั้นจะเริ่มยุบตัวลดลงอย่างรวดเร็ว จนเส้นผ่านศูนย์กลางของ bubble ลดลงถึงจุดต่ำสุดดังรูปที่ 7(h)-(k) เนื่องจากไม่ใช่เทคนิคการถ่ายภาพในลักษณะแบบ Shadowgraph การเกิด shock wave ในน้ำและ rebound shock wave เมื่อ bubble ลดขนาดลงต่ำสุด จะไม่สามารถสังเกตเห็นได้ จากรูปที่ 7(l)-(n) หลังจากเส้นผ่านศูนย์กลางของ bubble ลดขนาดถึงจุดต่ำสุด bubble จะแตกตัวเป็นกลุ่ม bubble (bubble cloud) และจะขยายตัวอย่างรวดเร็วเป็นลักษณะรูปวงแหวนรอบๆ หัวฉีด ดังรูปที่ 7(m) โดยกลุ่ม bubble มีการยุบตัวอย่างช้าๆ ดังแสดงในรูปที่ 7(o)-(s) ก่อนที่จะหายไปดังแสดงในรูปที่ 7(t) จากการสังเกตในมุมมองนี้ การเกิด bubble การขยายตัว การยุบและการหายไปของ bubble จะสังเกตเห็นได้ชัดเจนและเข้าใจง่าย โดยในแต่ละรูปในรูปที่ 7 นี้จะสอดคล้องกับแต่ละรูปในรูปที่ 6 ถึงแม้ช่วงเวลาจะไม่เท่ากัน ซึ่งเกิดจากลำพุงที่เกิดขึ้นในทั้งสองรูปมีความเร็วไม่เท่ากัน เนื่องจากความเร็วกระแทกของกระสุนปืนมีค่าความผิดพลาดประมาณ 3.15% จึงส่งผลให้ความเร็วของลำพุงแตกต่างกัน สำหรับคุณลักษณะของลำพุงน้ำเมื่อฉีดในน้ำทะเลนั้นจะมีพฤติกรรมและคุณลักษณะที่สอดคล้องกันกับกรณีฉีดในน้ำ แต่จะมีคุณลักษณะเฉพาะที่แตกต่างกัน ดังที่จะได้อธิบายในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 9 ระยะการเคลื่อนที่ (penetration distance) ของลำพุงที่ฉีดในน้ำและน้ำทะเล

**4. อิทธิพลของน้ำและน้ำทะเล**

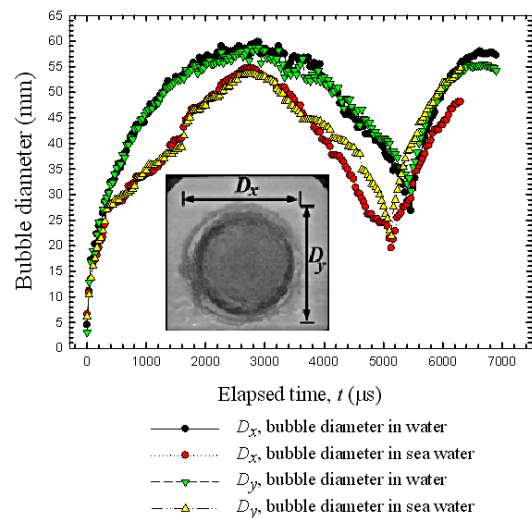
รูปที่ 8 แสดงความเร็วเฉลี่ย (average jet speed) ของลำพุ่งที่ฉีดในน้ำและน้ำทะเล หากพิจารณาที่ลำพุ่งเมื่อฉีดในน้ำพบว่า ความเร็วจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีความเร็วสูงสุดที่ 374 m/s ที่เวลา 67  $\mu$ s จากนั้นจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาผ่านไปเนื่องจาก hydrodynamic drag และเมื่อพิจารณาที่ทุกๆ elapsed time พบว่า ความเร็วของลำพุ่งที่ฉีดในน้ำและในน้ำทะเลมีค่าต่างกันเล็กน้อย เนื่องจากความหนาแน่นของน้ำทะเลมีค่าเท่ากับ 1,025  $\text{kg/m}^3$  ซึ่งสูงกว่าน้ำซึ่งมีค่าเท่ากับ 1,000  $\text{kg/m}^3$  จึงทำให้ความเร็วของลำพุ่งเมื่อฉีดในน้ำทะเลจึงมีค่าต่ำกว่าเนื่องจาก hydrodynamic drag ที่สูงกว่า โดยความเร็วของลำพุ่งเมื่อฉีดในน้ำทะเลมีค่าสูงสุดเท่ากับ 275 m/s จึงส่งผลให้ระยะการเคลื่อนที่ (penetration) ของลำพุ่งในน้ำเคลื่อนที่ได้ไกลกว่าในน้ำทะเล ดังรูปที่ 9



รูปที่ 10 ระยะการเคลื่อนที่ (penetration distance) และเส้นผ่านศูนย์กลาง (diameter) ของ bubble ในน้ำและน้ำทะเล

รูปที่ 11 แสดงเส้นผ่านศูนย์กลางของ bubble (bubble diameter) ในน้ำและน้ำทะเลในแนวแกนเมื่อพิจารณาเส้นผ่านศูนย์กลางของ bubble ในแนวนอน ( $D_x$ ) จะพบว่ามีความยาวที่ใหญ่กว่า bubble ในแนวตั้ง ( $D_y$ ) ทั้งในน้ำและน้ำทะเลจากนั้นจะค่อยๆ ขยายตัว

รูปที่ 10 แสดงระยะของการเคลื่อนที่ (penetration distance) และเส้นผ่านศูนย์กลาง (diameter) ของ bubble ในน้ำและน้ำทะเล เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของ bubble พบว่า bubble จะค่อยๆ เคลื่อนที่ไกลจากหัวฉีดมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป โดยมีการเคลื่อนที่ไกลสุดเกิดขึ้นที่เวลา 1,166  $\mu$ s และ 533  $\mu$ s ซึ่งมีระยะการเคลื่อนที่เท่ากับ 47.88 mm และ 30.39 mm ในน้ำและน้ำทะเล ตามลำดับ จากนั้น bubble จะค่อยๆ ยุบตัวลงต่ำลงเนื่องจาก hydrodynamic drag ซึ่ง bubble ของน้ำจะยุบตัวลงในช่วงเวลา 1,166 - 5,467  $\mu$ s และ 533 - 2,633  $\mu$ s ในน้ำและน้ำทะเล ตามลำดับ ในขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางของ bubble จะขยายตัวสูงสุดที่เวลา 2,600  $\mu$ s และ 1,300  $\mu$ s ซึ่งมีขนาดสูงสุดเท่ากับ 57.34 mm และ 28.67 mm ในน้ำและน้ำทะเลตามลำดับ จากนั้น bubble จะยุบตัวลง และจะเริ่มขยายตัวอีกครั้งที่เวลา 5,467  $\mu$ s ในน้ำ และที่เวลา 2,766  $\mu$ s ในน้ำทะเล



รูปที่ 11 เส้นผ่านศูนย์กลางของ bubble (bubble diameter) ในน้ำและน้ำทะเลในแนวแกน

เพิ่มขึ้น เมื่อเวลาผ่านไปโดยจะมีการขยายตัวใหญ่สุดที่เวลา 2,290  $\mu$ s และ 2,766  $\mu$ s ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ bubble ในแนวนอน ( $D_x$ ) เท่ากับ 59.75 mm และ 54.66 mm และในแนวตั้ง ( $D_y$ ) เท่ากับ 58.84 mm และ 53.49 mm ในน้ำและน้ำทะเล



ตามลำดับ จากนั้น bubble จะยุบตัวลงจนถึงเวลาประมาณ 4,300  $\mu\text{s}$  และ 3,833  $\mu\text{s}$  ในน้ำและน้ำทะเลตามลำดับ ซึ่งจะพบว่า bubble ในแนวนอน ( $D_x$ ) จะมีขนาดเล็กกว่า bubble ในแนวตั้ง ( $D_y$ ) เนื่องจากผลของความดันน้ำที่กระทำกับขอบของ bubble ที่ระดับความลึกของน้ำที่แตกต่างกันในแนวตั้ง ( $D_y$ ) จึงทำให้ bubble ไม่มีรูปร่างที่เป็นวงกลมอย่างสมมาตร จากนั้นเส้นผ่านศูนย์กลางของ bubble จะยุบตัวลดลง ซึ่งการยุบตัวใช้เวลาในช่วง 2,900 - 5,467  $\mu\text{s}$  จนถึงขนาดต่ำสุดที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 26.84 mm ในแนวนอน( $D_x$ ) และ 30.64 mm ในแนวตั้ง ( $D_y$ ) ในน้ำ ในน้ำทะเลที่ช่วงเวลา 2,766 - 5,132  $\mu\text{s}$  ในการยุบตัวจนเส้นผ่านศูนย์กลางถึงขนาดต่ำสุดประมาณ 19.55 mm ในแนวนอน ( $D_x$ ) และ 21.91 mm ในแนวตั้ง ( $D_y$ ) จากนั้นเส้นผ่านศูนย์กลางของ bubble จะเริ่มขยายตัวอีกครั้ง โดยความเร็วของการขยายตัวของ bubble ในน้ำในช่วงเวลา 0 - 2,900  $\mu\text{s}$  คิดเป็น 20.60 m/s ในแนวนอน ( $D_x$ ) และ 20.26 m/s ในแนวตั้ง ( $D_y$ ) และความเร็วของการยุบตัวที่ช่วงเวลา 2,900 - 5,467  $\mu\text{s}$  คิดเป็น 12.23 m/s ในแนวนอน ( $D_x$ ) และ 12.24 m/s ในแนวตั้ง ( $D_y$ ) โดยความเร็วของการขยายตัวของ bubble ในน้ำทะเลในช่วงเวลา 0 - 2,766  $\mu\text{s}$  คิดเป็น 19.76 m/s ในแนวนอน ( $D_x$ ) และ 19.33 m/s ในแนวตั้ง ( $D_y$ ) และความเร็วของการยุบตัวที่ช่วงเวลา 2,766 - 5,132  $\mu\text{s}$  คิดเป็น 11.02 m/s ในแนวนอน ( $D_x$ ) และ 11.43 m/s ในแนวตั้ง ( $D_y$ ) ซึ่งพบว่าความเร็วในการขยายตัวและยุบตัวของ bubble ในน้ำมีค่าสูงกว่าในน้ำทะเล

## 5. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาคุณลักษณะของลำพุน้ำความเร็วสูงที่ฉีดในของเหลวโดยใช้น้ำและในน้ำทะเล ด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูงร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph และการถ่ายภาพในแนวแกน พบว่า

1. จากภาพถ่าย Shadowgraph แสดงให้เห็นกลไกการขยายตัวและยุบตัวของ bubble ซึ่งสามารถอธิบายได้จากปรากฏการณ์ของ cavitation นอกจากนี้ยัง

สังเกตเห็น shock wave, compressed wave, rebound shock wave จากการยุบตัวของ bubble และการเกิดลำพุงในของเหลวอย่างชัดเจน

2. ความแตกต่างของความหนาแน่นในน้ำและน้ำทะเลส่งผลให้ความเร็วของลำพุงในตัวกลางทั้งสองต่างกัน โดยเมื่อความหนาแน่นสูงขึ้นจะทำให้ความเร็วของลำพุงต่ำลง โดยความเร็วสูงสุดของลำพุงในน้ำและน้ำทะเลมีค่าเท่ากับ 374 m/s และ 275 m/s ตามลำดับ และยังส่งผลให้ความเร็วในการขยายตัวและยุบตัวของ bubble แตกต่างกันทั้งในแนวนอน ( $D_x$ ) และในแนวตั้ง ( $D_y$ ) โดยเมื่อความหนาแน่นสูงขึ้นจะทำให้ความเร็วในการขยายตัวและยุบตัวของ bubble ต่ำลง

3. จากผลของความดันที่ระดับความลึกในของเหลวที่ต่างกันของขอบของ bubble ส่งผลให้ bubble มีรูปร่างเป็นวงกลมที่ไม่สมมาตรอย่างสมบูรณ์และยังส่งผลให้ความเร็วในการขยายตัวและยุบตัวในแนวนอน ( $D_x$ ) และในแนวตั้ง ( $D_y$ ) มีค่าแตกต่างกัน

4. จากการถ่ายภาพโดยไม่ใช้เทคนิค Shadowgraph ในแนวแกนจะช่วยให้เห็นกลไกการขยายตัวและยุบตัวของ bubble อย่างชัดเจนถึงแม้จะไม่สามารถสังเกตเห็น shock wave, compressed wave และ rebound shock wave ก็ตาม

## 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สัญญาเลขที่ MRG 5180046 สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช) มูลนิธิโทรเพื่อการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ ประเทศไทย (TTSF) และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Methven, T.J., Fairhead, B., "A correlation between rain erosion of perspex specimens in flight and on a ground rig". *Wear* 2 (6), 498, (1959)

- [2] Vijay, M.M and Brierley, W.H., "Cutting cleaning and fragmentation of materials with high pressure liquid jets". *Proc 1<sup>st</sup> U.S. water jet conference*, 272-288, (1981)
- [3] Kobayashi, R., Arai, T. and Yamada, H., "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, (1988)
- [4] Shi, H.H., Field, J.E. and Pickles, C.S.J., "High speed liquid impact onto wetted solid surfaces". *J Fluids Eng* 116, 345-348, (1994)
- [5] Yamauchi, Y., Soyama, H., Adachi, Y., Sato, K., Shindo, T., Oba, R., Oshima, R., Yamabe, M., "Suitable region of high-speed submerged water jets for cutting and peening". *JSME Int J Series B* 38, 31-38, (1995)
- [6] Hirono, T., Uenohara, H., Komatsu, M., Nakagawa, A., Satoh, M., Ohyama, H., Takayama, K., Yoshimoto, T., "Holmium YAG laser-induced liquid jet dissector: A novel prototype device for dissection organs without impairing vessels". *Minim Invas Neurosurg* 46, 121, (2003)
- [7] Nakagawa, A., Hirano, T., Komatsu, M., Sato, M., Uenohara, H., Ohgawa, H., Kusada, Y., Shirane, R., Takayama, K., Yoshimoto, T., "Holmium: YAG laser-induced liquid jet knife: possible novel method for dissection". *Lasers Surg Med* 31, 125, (2002)
- [8] Shi, H.H., Kazuyoshi Takayama and Nobuo Nagayasu., "The measurement of impact pressure and solid surface response in liquid solid impact up to hypersonic range", *WEAR*, Vol. 186-187, pp. 352-359, (1995)
- [9] Bourne, N.K., Obara, T., and Field, J.E., "The impact and penetration of a water surface by a liquid jet". *The Royal Society*, Vol. 452, pp.1497-1502, (1996)
- [10] Bourne, N.K., Obara, T., and Field, J.E., "High-speed Photography and Stress Gauge Studies of Jet Impact Upon Surfaces", *The Royal Society*, Vol. 355, pp. 607-623, (1997).
- [11] 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.
- [12] Ohtani, K. Numata, D. Takayama, K. Kobayashi, T. Okatsu, K., "Experimental study of underwater rock drilling using a pulsed Ho : YAG laser-induced jets". *Shock wave* 19, 403-412, (2009)