

พฤติกรรมทางพลศาสตร์ของลำพุ่งของเหลวความเร็วสูงในน้ำ Dynamic behaviors of high-speed liquid jets in water

อนิรุตต์ มัทธูจักษ์, ชัยเดช เกษมนิมิตรพร, วุฒิชัย สิทธิวงษ์ และ กุลเชษฐา เพียรทอง

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 85 ถ.สถลมารค ต.เมืองศรีไค
อ.วารินชำราบ ติดต่อง: โทรศัพท์: 045-353-309, โทรสาร: 045-353-308
E-mail: Anirut.Mat@gmail.com, A.Matthujak@ubu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของลำพุ่งของเหลวความเร็วสูงที่ฉีดในน้ำ โดยจะทำการศึกษาถึงอิทธิพลของคุณสมบัติที่แตกต่างกันของของเหลว ซึ่งการผลิตลำพุ่งความเร็วสูงในการศึกษาใช้เทคนิคพิเศษที่เรียกว่า Impact driven method จากชุดทดลอง Horizontal Single Stage Powder Gun (HSSPG) โดยลำพุ่งจะถูกฉีดออกมาจากหัวฉีดที่มีลักษณะทรงกรวย (conical nozzle) มุม 30° ขนาดรูคอคอด (orifice) เท่ากับ 0.7 mm โดยคุณลักษณะของลำพุ่งในของเหลวจะถูกอธิบายโดยใช้การถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูง (High-speed digital video camera) ร่วมกับการถ่ายภาพด้วยเทคนิค Shadowgraph ซึ่งอิทธิพลของคุณสมบัติที่แตกต่างกันของของเหลว เช่น ระยะเวลาเคลื่อนที่ ความเร็ว และพฤติกรรมของลำพุ่งจะถูกอธิบายในงานวิจัยนี้ จากภาพถ่ายความเร็วสูงสุดของลำพุ่งน้ำ แอลกอฮอล์ เอ็น-เฮกเซน คลอโรฟอร์ม และกิลเซอร์ิน ที่ฉีดในน้ำมีค่าประมาณ 374.24 m/s, 292.51 m/s, 129.05 m/s, 116.14 m/s และ 215.08 m/s ตามลำดับ นอกจากนี้ยังเห็นพฤติกรรมต่างๆที่เกิดขึ้นภายในน้ำ เช่น vapor bubble, shock wave และ rebound shock wave ที่เกิดจากการยุบตัวของฟองอากาศ ซึ่งจะได้รับการเปิดเผยอย่างชัดเจนในงานวิจัยนี้

คำหลัก: ลำพุ่งของเหลวในน้ำ, การขับลำพุ่งด้วยการกระแทก, shock wave, ฟองอากาศ

Abstract

The objective of this study is to describe the dynamic behaviors of high-speed liquid jets injected in water from an orifice. The main focus is to study the effect of different liquid properties on the dynamic behaviors of the jets injected in water. The high-speed liquid jets are generated by the impact of a projectile launched in a horizontal single-stage power gun. The conical nozzle of 30° angle with the orifice diameter of 0.7 mm was used to generate the high-speed liquid jets. The jets have been visualized using the high-speed digital video camera with shadowgraph optical arrangement. The effects of different liquid types on the jet penetration, velocity attenuation and other dynamic behaviors have been examined. From the shadowgraph images, the maximum averaged velocity of water, alcohol, n-hexane, chloroform and glycerin jets injected in water is estimated to be 374.24 m/s, 292.51 m/s, 129.05 m/s, 116.14 m/s and

215.08 m/s, respectively. The jets, vapor bubble, shock wave in water and rebound shock wave generated because of bubble collapse were obviously revealed in this study

Keywords: Submerged high-speed liquid jets, Impact acceleration method, Shock wave, Bubble

1. บทนำ

เริ่มต้นการวิจัยเกี่ยวกับลำพุ่งความเร็วสูง (high-speed jet) เกิดจากการศึกษาการปะทะของเม็ดฝนบนตัวเครื่องบินระหว่างการบินที่ในอากาศด้วยความเร็วสูงในขณะที่ฝนตก [1] จากนั้นเป็นต้นมาได้มีการนำลำพุ่งความเร็วสูงมาประยุกต์ใช้ในทางด้านวิศวกรรมในหลายๆ ด้าน เช่น การตัดโดยลำพุ่ง การทำความสะอาดโดยลำพุ่ง การฉีดเชื้อเพลิงความเร็วสูง เป็นต้น [2-5] และยังนำมาประยุกต์ใช้ในการแพทย์ เช่น การฉีดยาโดยไม่ใช้เข็ม การรักษาการอุดตันของก้อนเลือดโดยลำพุ่ง เป็นต้น [6,7] จากการศึกษาพบว่า ลำพุ่งความเร็วสูงสามารถตัดวัสดุที่มีความหนา และความแข็งแรงได้เป็นอย่างดี และยังสามารถทำความสะอาดวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ลำพุ่งน้ำมันความเร็วสูงมีส่วนช่วยส่งเสริมการเผาไหม้ให้มีสมรรถนะดีขึ้น เนื่องจากการแตกตัวเป็นฝอยละอองของน้ำมันและการผสมคลุกเคล้ากันกับอากาศที่ดีขึ้น ซึ่งในปัจจุบันเริ่มมีการศึกษาการนำลำพุ่งความเร็วสูงมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้สมบูรณ์ เช่น การตัดโครงสร้างใต้ทะเล และการเจาะใต้ทะเลด้วยลำพุ่งความเร็วสูงเนื่องจากเชื่อว่าลำพุ่งมีพลังงานสูงเพียงพอ [8-10]

ในปี 1996, H. Soyama และคณะ [11] ได้ทำการศึกษาคุณลักษณะของลำพุ่งในน้ำโดยผลิตลำพุ่งจากปั๊มที่มีความดันสูงสุดที่ 70 MPa และอัตราการไหล 22 l/min จากการถ่ายภาพลำพุ่งด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph ซึ่งพบการเกิด bubble รอบๆ ลำพุ่งในลักษณะเดียวกันกับการเกิด cavitation นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการกระแทกของลำพุ่งความเร็วสูงบนผิววัสดุเพื่อศึกษาลักษณะความเสียหายและทำการวัดความดันกระแทกโดยใช้ Polyvinylidene Fluoride Film (PVDF) นอกจากนี้ยังศึกษาอิทธิพลของหัวฉีดต่อ

คุณลักษณะความดันกระแทก ซึ่งพบว่าลำพุ่งที่ฉีดออกมาจากหัวฉีดแบบทรงกรวยให้ความดันสูงสุดเท่ากับ 275 MPa มีค่าสูงเพียงพอต่อการตัดเจาะโลหะ

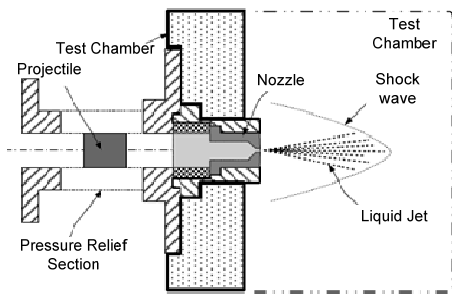
ในปี 2009, K. Otani และคณะ [12] ได้ศึกษาคุณลักษณะของลำพุ่งในน้ำโดยผลิตลำพุ่งจาก Ho: YAG Laser โดยศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการเจาะหินใต้น้ำ ด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph จากภาพที่ได้พบว่า ความเร็วของลำพุ่งมีค่าประมาณ 40 m/s นอกจากนี้ยังวัดความดันกระแทกที่เกิดขึ้น โดยใช้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

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของลำพุ่งของเหลวความเร็วสูงที่ฉีดในน้ำ และทำการเปรียบเทียบคุณลักษณะของลำพุ่งของเหลวที่ต่างชนิดกันเมื่อฉีดในน้ำ โดยวิเคราะห์จากการถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูง (High-speed video camera) ร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph

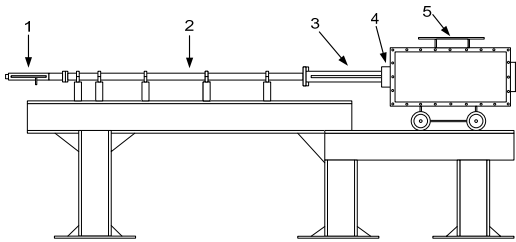
2. วิธีดำเนินงานวิจัย

2.1 ชุดการกำเนิดลำพุ่งความเร็วสูง

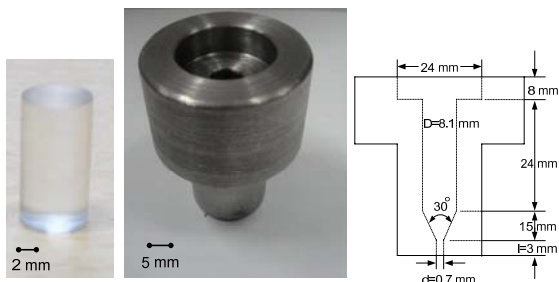
ในการศึกษาการผลิตลำพุ่งความเร็วสูงจะใช้เทคนิคพิเศษที่เรียกว่า Impact driven method [5,9] ดังรูปที่ 1 โดยที่เทคนิคนี้จะยิงกระสุนปืนความเร็วสูง



รูปที่ 1 การขับลำพุ่งด้วยการกระแทก (Impact driven method)



รูปที่ 2 Horizontal Single Stage Powder Gun (HSSPG)



(a) (b)
รูปที่ 3 (a) กระสุนปืน และ (b) หัวฉีด
ที่ใช้ในการทดลอง

(high-speed projectile) เข้าไปกระแทกของเหลวที่บรรจุอยู่ในหัวฉีดด้วยความเร็วสูง จากนั้นของเหลวจะฉีดออกมาจากหัวฉีดด้วยความเร็วสูง โดยในการศึกษานี้กระสุนปืนความเร็วสูงจะถูกยิงออกมาจากชุดทดลองที่เรียกว่า Horizontal Single Stage Powder Gun (HSSPG) ดังรูปที่ 2 ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญ 5 ส่วน คือ 1) ชุดปล่อยกระสุนปืน (launcher) 2) ท่อส่งกระสุนปืน (launch tube) 3) ท่อระบายความดัน (pressure relief section) 4) ส่วนประกอบหัวฉีด (nozzle assembly) 5) ห้องทดสอบ (test chamber)

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

2.2 เทคนิคการถ่ายภาพ

เนื่องจากพฤติกรรมของ High-speed water jet ที่เกิดขึ้นในน้ำเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วโดยใช้เวลาเป็น μs ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าหรือจากกล้องถ่ายรูปทั่วไป ดังนั้นการศึกษานี้จึงใช้กล้องวิดีโอความเร็วสูง (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 กระทบกระจกผิวโค้งอีกบานเพื่อรวมแสง เนื่องจากพื้นที่ในการทดลองมีจำกัดจึงใช้กระจกขนาด 150 mm ในการสะท้อนแสงจำนวน 2 บาน ดังรูปที่ 4

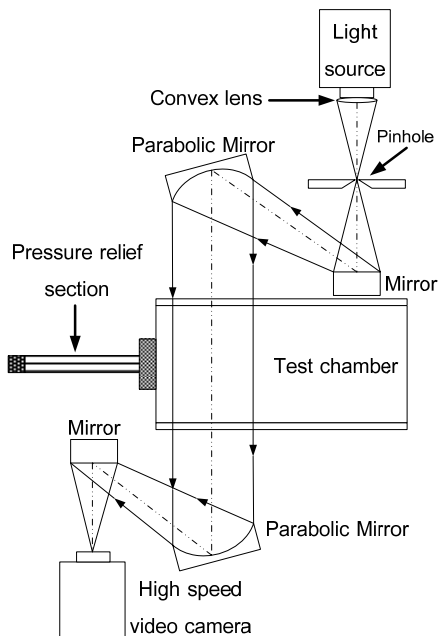
3. คุณลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูงในน้ำ

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาคุณลักษณะของลำพุ่งของเหลวความเร็วสูงเมื่อฉีดในน้ำโดยของเหลวในการศึกษานี้คือ น้ำ แอลกอฮอล์ เอ็น-เฮกเซน คลอโรฟอร์ม และกิลเซอร์ลิน ในการอธิบายคุณลักษณะของลำพุ่งที่เกิดขึ้นใช้กรณีลำพุ่งน้ำฉีดในน้ำเป็นตัวแทนในการอธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้น

รูปที่ 5 แสดงลำพุ่งน้ำความเร็วสูงที่ฉีดในน้ำจากการถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูงร่วมกับ

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของของเหลวที่ใช้ในการทดลอง

Liquid type	Density at 25 ⁰ C (kg/m ³)	Kinematics viscosity (cSt)	Surface tension at 20 ⁰ C (N/m)	Heat capacity at 40 ⁰ C (J/g ⁰ C)	Latent heat (kJ/kg)
Water	998	1.003 (20 ⁰ C)	0.073	4.19	2,257
Alcohol	785.1	1.60 (20 ⁰ C)	0.022	2.3	896
n-Hexane	654.8	0.683 (17.8 ⁰ C)	0.018	2.26	365
Chloroform	1,465	0.38 (20 ⁰ C)	0.027	1.05	247
Glycerin	1,259	0.648 (20.3 ⁰ C)	0.063	2.43	974



รูปที่ 4 การติดตั้งระบบถ่ายภาพด้วยเทคนิค Shadowgraph

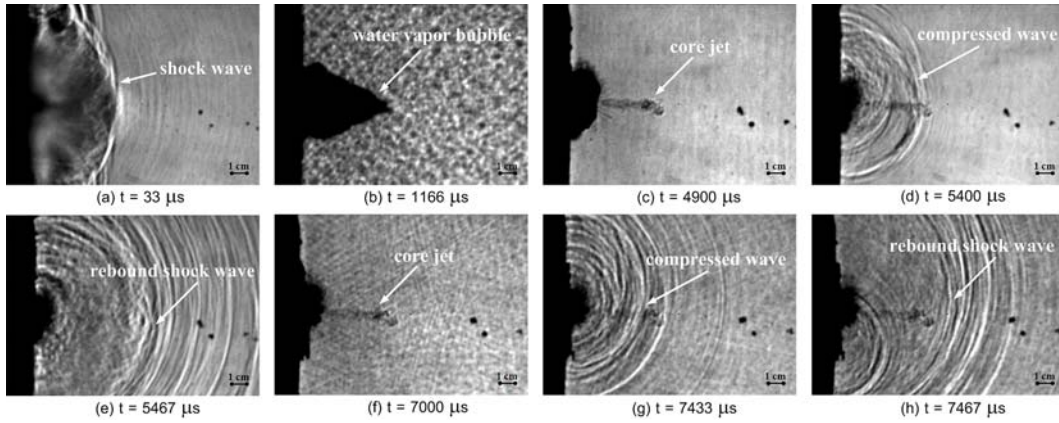
เทคนิคการถ่ายภาพ Shadowgraph โดยเลือกภาพจำนวน 8 ภาพมาใช้แสดงเพื่ออธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นทันทีที่กระสุนปืนกระแทกน้ำที่บรรจุภายในหัวฉีด ลำพุ่งจะพุ่งออกมาด้วยความเร็วสูง (ความเร็วประมาณ 1,669 m/s ที่เวลา 33 μ s ในอากาศ) จึงทำให้เกิด shock wave ภายในน้ำดังรูปที่ 5(a) แต่เนื่องจากลำพุ่งถูกฉีกภายในน้ำจึงทำให้ความเร็วของลำพุ่งลดต่ำลงอย่างรวดเร็วเนื่องจาก hydrodynamic drag นั้นมีค่าสูงจึงทำให้ลำพุ่งและ shock wave แยกตัวออกจากกัน หลังจากนั้นจะเห็นการเกิด water vapor bubble เนื่องจากการแตกตัวเป็นละออง

(atomization) การกลายเป็นไอ (vaporization) ของลำพุ่ง และเกิดการขยายตัวอย่างรวดเร็ว (expansion) ดังแสดงในรูปที่ 5(b)

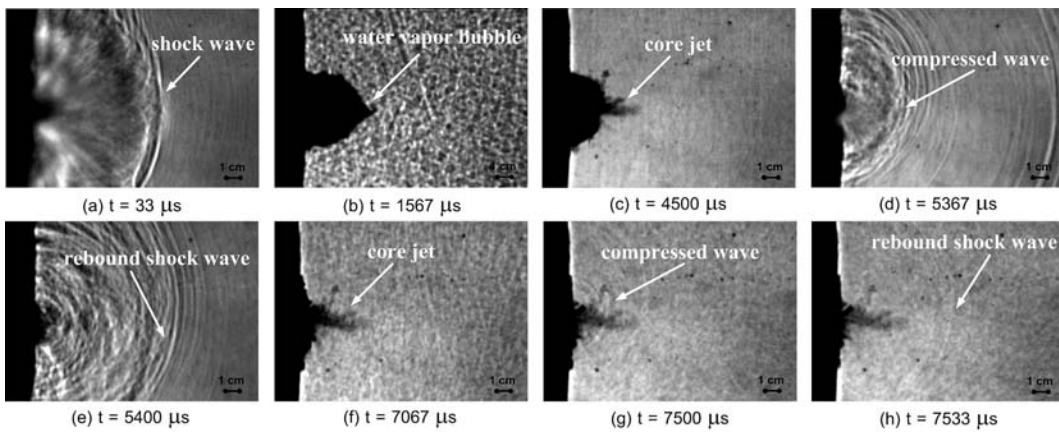
จากรูปที่ 5(c) จะเห็นว่าลำพุ่งจะยุบตัวลงจนทำให้เห็น core jet และเมื่อลำพุ่งยุบตัวเกือบจะถึงค่าต่ำสุดดังรูปที่ 5(d) จะเกิด compressed wave ขึ้นเมื่อ bubble ยุบตัวลงต่ำสุดจะทำให้เกิด rebound shock wave ดังรูปที่ 5(e) เนื่องจากการยุบตัวของ bubble จะทำให้เกิดความดันสูงขึ้นในทันทีทันใดภายใน bubble ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้โดยปรากฏการณ์ของ cavitation

จากรูปที่ 5(f-h) จะเกิด water vapor bubble ขึ้นอีกครั้ง ถึงแม้ว่ากลไกการขยายตัวและการยุบตัวของ bubble จะสังเกตเห็นไม่ชัดเจน แต่ก็เชื่อว่ากลไกดังกล่าวเกิดขึ้นอีกครั้งจริง จากการสังเกตเห็น compressed wave, rebound shock wave และ shock wave หลังจากนั้น bubble จะลอยตัวขึ้นเนื่องจากแรงลอยตัว

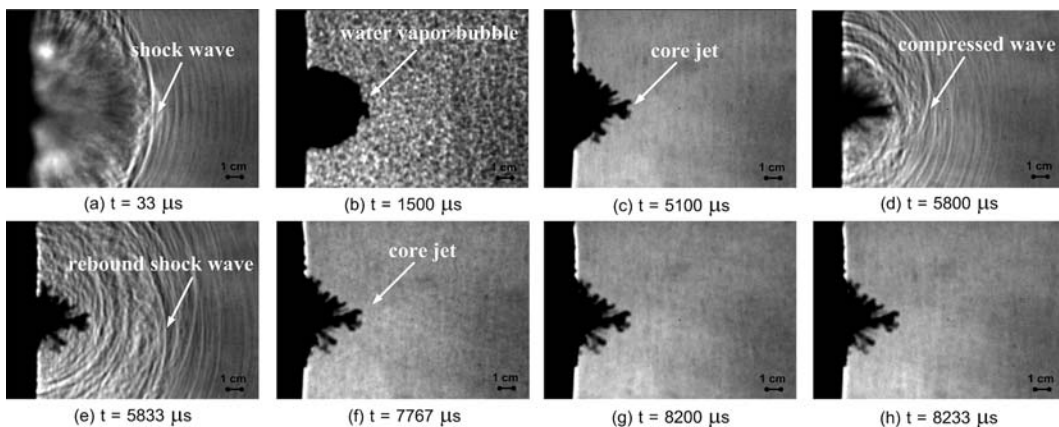
จากรูปที่ 6 แสดงลำพุ่งแอลกอฮอล์ความเร็วสูงที่ฉีดในน้ำจากการถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูงร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพ Shadowgraph จากรูปจะเห็นว่ามิชขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่เล็กและสั้นกว่า ส่วนปลายลำพุ่งจะยาวมากกว่า 35 mm เส้น shock wave ที่เห็นจะจางลงเล็กน้อย การก่อตัวและการเกิด vapor bubble ของแอลกอฮอล์มีลักษณะเหมือนกันกับน้ำ แต่พฤติกรรมของแอลกอฮอล์ เช่น การขยายตัวและการยุบตัวจะช้ากว่าน้ำ



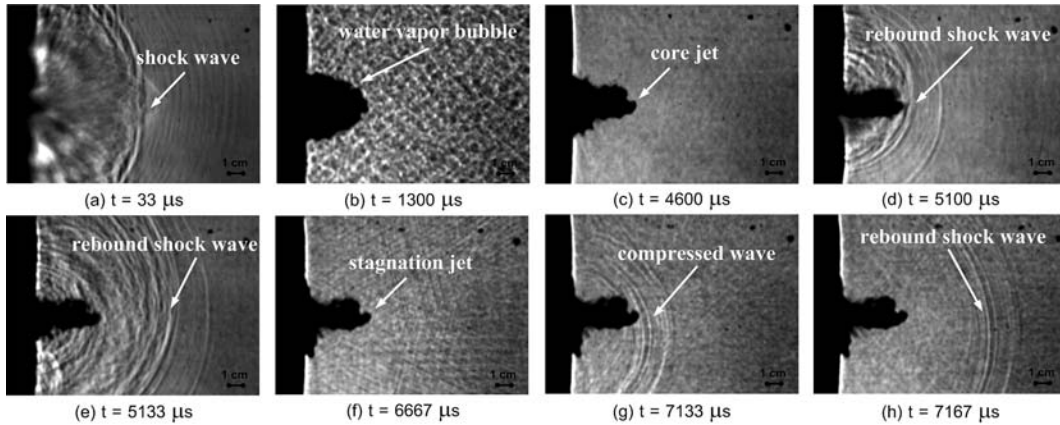
รูปที่ 5 ลำพุงน้ำความเร็วสูงที่ฉีดในน้ำจากการถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูง
ร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพ Shadowgraph



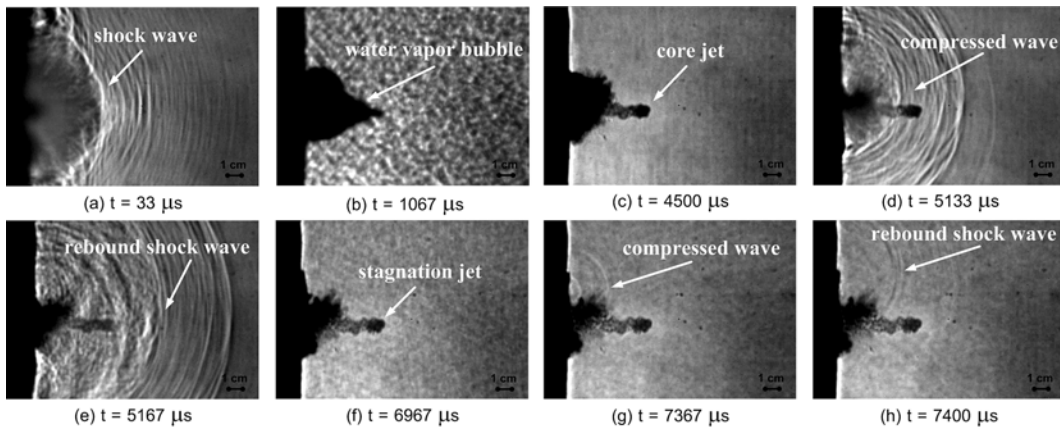
รูปที่ 6 ลำพุงแอลกอฮอล์ความเร็วสูงที่ฉีดในน้ำจากการถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูง
ร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพ Shadowgraph



รูปที่ 7 ลำพุงเอ็น-เฮกเซนความเร็วสูงที่ฉีดในน้ำจากการถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูง
ร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพ Shadowgraph



รูปที่ 8 ลำพุงคลอโรฟอร์มความเร็วสูงที่ฉีดในน้ำจากการถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูง
ร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพ Shadowgraph



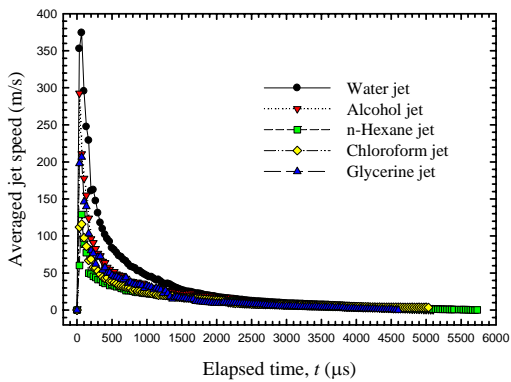
รูปที่ 9 ลำพุงกิลเซอร์รินความเร็วสูงที่ฉีดในน้ำจากการถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูง
ร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพ Shadowgraph

จากรูปที่ 7 แสดงลำพุงเอ็น-เฮกเซนความเร็วสูงที่ฉีดในน้ำจากการถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูงร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพ Shadowgraph จากรูปจะเห็นว่าคลื่น shock wave ของเอ็น-เฮกเซน ที่เกิดขึ้นจะเห็นเป็นเส้นที่ชัดเจนกว่าแอลกอฮอล์ ดังนั้นจึงทำให้การแตกตัว การกลายเป็นไอของเอ็น-เฮกเซนดีกว่าแอลกอฮอล์ ซึ่งจากภาพจะเห็นว่าระยะการเคลื่อนที่นั้นจะสั้นและทำให้ vapor bubble กว้างขึ้นอย่างชัดเจนและไม่พบการเกิด rebound shock wave ในครั้งที่สองเมื่อเทียบกับแอลกอฮอล์

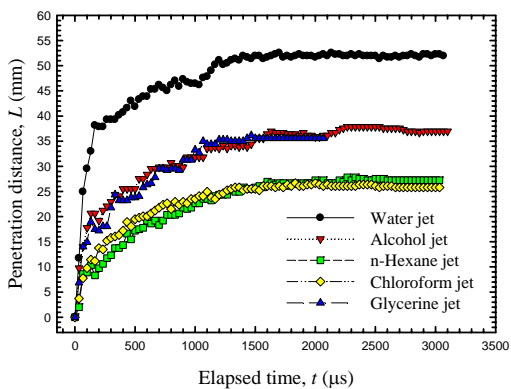
จากรูปที่ 8 แสดงลำพุงคลอโรฟอร์มความเร็วสูงที่ฉีดในน้ำจากการถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูง

ร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพ Shadowgraph จากรูปจะเห็นว่าการก่อตัวและการเกิด bubble จะมีลักษณะที่คล้ายกันกับเอ็น-เฮกเซน แต่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของคลอโรฟอร์มนั้นจะมีขนาดเล็กกว่าและจะเห็น rebound shock wave ที่ชัดเจนว่าเอ็น-เฮกเซน

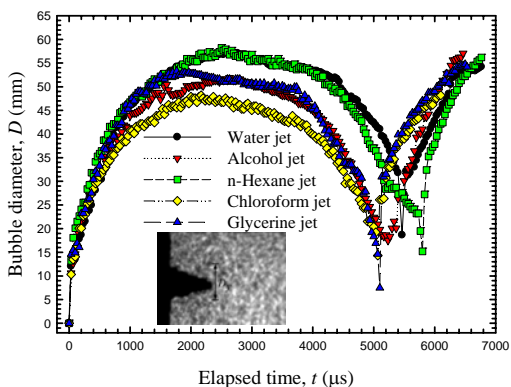
จากรูปที่ 9 แสดงลำพุงกิลเซอร์รินความเร็วสูงที่ฉีดในน้ำจากการถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูงร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพ Shadowgraph จากรูปจะเห็นคลื่นที่แผ่ออกมาเป็นชั้นๆอย่างชัดเจน โดยที่ตัวลำพุงส่วนหัวจะเห็นเป็นลักษณะที่แหลมกว่าส่วนหัวของคลอโรฟอร์ม และเมื่อลำพุงยุบตัวลงจะทำให้เห็น core jet ชัดเจนกว่าคลอโรฟอร์ม



รูปที่ 10 ความเร็วเฉลี่ยของลำพ่นทั้ง 5 ชนิด



รูปที่ 11 ระยะการเคลื่อนที่ของลำพ่นทั้ง 5 ชนิด



รูปที่ 12 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ลำพ่นทั้ง 5 ชนิด

จากลำพ่นของเหลวทั้ง 5 ชนิดที่ฉีดในน้ำ จะเห็นพฤติกรรมต่างๆที่เกิดขึ้นนั้นจะคล้ายกันและจะพบการเกิดกลไกการขยายตัวและยุบตัวของ bubble, shock wave, core jet, compressed wave และ rebound shock wave ในของเหลวอย่างชัดเจน

จากรูปที่ 10 แสดงความเร็วเฉลี่ยของลำพ่นทั้ง 5 ชนิด จากรูปความเร็วสูงสุดของลำพ่นน้ำ แอลกอฮอล์ เอ็น-เฮกเซน คลอโรฟอร์ม และกิลเซอร์ลิน ที่ฉีดในน้ำมีค่าประมาณ 374.24 m/s, 292.51 m/s, 129.05 m/s, 116.14 m/s และ 215.08 m/s ตามลำดับ ซึ่งอาจเป็นผลของค่าความร้อนกลายเป็นไอ (latent heat) ของของเหลวแต่ละชนิด ดังแสดงในตารางที่ 1 และพบว่าคุณสมบัติอื่นๆ ของของเหลว อาทิ density, kinematics viscosity, surface tension และ heat capacity ไม่ได้มีผลกับความเร็วลำพ่นในน้ำ จากรูปเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 67 μs ความเร็วจะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจาก hydrodynamic drag ภายในน้ำนั้นมีความสูง จึงส่งผลให้ระยะการเคลื่อนที่ของลำพ่นนั้นจะเคลื่อนที่ได้ไปถึงระยะหนึ่งก็จะเริ่มหยุดและจะเริ่มอยู่นิ่ง โดยระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของลำพ่นน้ำ แอลกอฮอล์ เอ็น-เฮกเซน คลอโรฟอร์ม และกิลเซอร์ลินที่ฉีดในน้ำมีค่าประมาณ 52.54 mm, 37.85mm, 27.52 mm, 26.38 mm และ 36.13 mm ตามลำดับ ดังรูปที่ 11

จากรูปที่ 12 แสดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ลำพ่นทั้ง 5 ชนิด จากรูปเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะขยายตัวสูงสุดที่เวลา 2,600 μs , 2,600 μs , 2,467 μs , 2,133 μs และ 1,733 μs ซึ่งมีขนาดสูงสุดเท่ากับ 57.34 mm, 51.90 mm, 58.20 mm, 48.17 mm และ 53.33 mm ของลำพ่นน้ำ แอลกอฮอล์ เอ็น-เฮกเซน คลอโรฟอร์ม และกิลเซอร์ลิน ตามลำดับ จากนั้น bubble จะยุบตัวลงและจะเริ่มขยายตัวอีกครั้งที่เวลา 5,500 μs , 5,300 μs , 5,833 μs , 5,100 μs และ 5,133 μs ของลำพ่นน้ำ แอลกอฮอล์ เอ็น-เฮกเซน คลอโรฟอร์ม และกิลเซอร์ลิน ตามลำดับ

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาคุณลักษณะของลำพ่นน้ำ แอลกอฮอล์ เอ็น-เฮกเซน คลอโรฟอร์ม และกิลเซอร์ลิน ความเร็วสูงที่ฉีดในน้ำ ด้วยกล้องวีดิโอความเร็วสูงร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph พบว่าจากภาพถ่ายแสดงให้เห็นกลไกการขยายตัวและ

ยูปตัวของ bubble ซึ่งสามารถอธิบายได้จากปรากฏการณ์ของ cavitation นอกจากนี้ยังสังเกตเห็น shock wave, compressed wave, core jet, stagnation jet, rebound shock wave จากการยูปตัวของ bubble และการเกิดลำพุ่งในน้ำอย่างชัดเจน โดยความเร็วสูงสุดของลำพุ่งน้ำ แอลกอฮอล์ เอ็น-เฮกเซน คลอโรฟอร์ม และกิลเซอร์ลิน ที่ฉีดในน้ำมีค่าประมาณ 374.24 m/s, 292.51 m/s, 129.05 m/s, 116.14 m/s และ 215.08 m/s จึงส่งผลให้ระยะเวลาเคลื่อนที่ของน้ำนั้นสามารถไปได้ไกลกว่าลำพุ่งชนิดอื่นๆ

5. กิตติกรรมประกาศ

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

6. 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. (1981). Cutting cleaning and fragmentation of materials with high pressure liquid jets. *Proc 1st U.S. water jet conference*, 272-288

[3] 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

[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., 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 (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.

[9] 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.

[10] 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.

[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)