

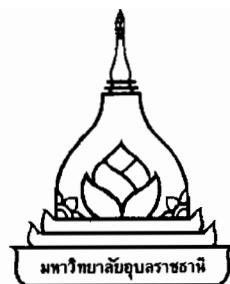
การศึกษาคุณลักษณะของลำพูงของเหลวความเร็วสูงในน้ำ

ขัยเดช เกษมนิมตรพร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิគกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิគกรรมเครื่องกล คณะวิគกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

พ.ศ. 2555

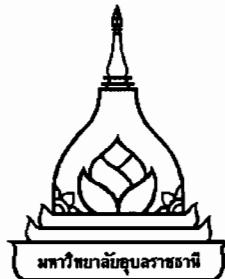
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



**INVESTIGATION ON CHARACTERISTICS OF HIGH-SPEED
LIQUID JET IN WATER**

CHAIDET KASAMNIMITPORN

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER ENGINEERING
MAJOR IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
UBON RATCHATHANI UNIVERSITY
YEAR 2012
COPYRIGHT OF UBON RATCHATHANI UNIVERSITY**



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปริญญา วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

เรื่อง การศึกษาคุณลักษณะของลำพูงของเหลวความเร็วสูงในน้ำ

ผู้วิจัย นายชัยเดช เกษมนิมิตรพร

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนิรุตต์ มักขุจักษ์)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บ้อนพิทิพ กฤตากุล)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนรัฐ ศรีวีระกุล)

คณบดี

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นท แสงเทียน)

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี รับรองแล้ว

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุทิศ อินทร์ประสิทธิ์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

ปฏิบัติราชการแทนอธิการบดี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ปีการศึกษา 2555

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษาผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อนิรุตต์ มัทธุจักร์ ที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นในการศึกษาเป็นอย่างดีมาตลอดระยะเวลาที่ทำการศึกษา อิกทั้งบังได้ให้ความรู้ที่นookหนึ่จากการศึกษาวิจัยนี้อิกหลายประการและบังเป็นแบบอย่างที่ดีเสมอมา จึงขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ ที่นี่

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต กฤตาคม และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนรัฐ ศรีวีระกุล ที่ให้ความกรุณาร่วมเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งได้ให้คำแนะนำในการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของวิทยานิพนธ์ เพื่อทำให้วิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง ที่ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นในการศึกษาเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณนายวุฒิชัย สิทธิวงศ์ และนายวิระพันธ์ สีหานามที่ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนเทคนิคในการทดลองเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ บุคลากร และเจ้าหน้าที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย อุบลราชธานี ทุกท่านที่มีส่วนช่วยเหลือในการดำเนินการวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย อุบลราชธานี สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สว) เลขที่ทุนวิจัย MRG 51-80046 และ สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ) กระทรวงพลังงาน สำหรับทุนสนับสนุนในการทำวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อน พี่ และน้อง นักศึกษาปริญญาโท-เอก ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ให้ความช่วยเหลือและกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ-คุณแม่ ซึ่งเป็นผู้ที่เคยปลูกฝังการศึกษาเรียนรู้ให้ลูกคนนี้เสมอมา รวมทั้งที่เป็นกำลังใจอันสำคัญยิ่งในการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงการสนับสนุนในทุกๆ ด้านเพื่อให้การศึกษารังนี้สำเร็จด้วยดี

ท้ายนี้ คุณความคิดและประ邈ชน์ได้ อันเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขออบเด่ บิตามารดา ครู อาจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่าน

นายชัยเดช เกษมนิมิตรพร
(นายชัยเดช เกษมนิมิตรพร)

ผู้วิจัย

บทคัดย่อ

ชื่อเรื่อง : การศึกษาคุณลักษณะของลำพูงของเหลวความเร็วสูงในน้ำ

โดย : ชัยเดช เกษมนิมิตรพร

ชื่อปริญญา : วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

ประธานกรรมการที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อนิรุตต์ มัทชูจักษ์

ศัพท์สำคัญ : ลำพูงของเหลวความเร็วสูง การขับลำพูงด้วยการกระแทก shock wave
water vapor bubble เทคนิคชาโคล์กราฟ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณลักษณะของลำพูงของเหลวความเร็วสูงที่ฉีดในน้ำ และในอากาศ ซึ่งการผลิตลำพูงความเร็วสูงในงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิคที่เรียกว่า การขับลำพูงด้วยการกระแทก (Impact driven method) ในชุดทดลองที่เรียกว่า Horizontal Single Stage Powder Gun (HSSPG) โดยเทคนิคนี้จะอาศัยกระสุนปืนความเร็วสูงกระแทกกับของเหลวซึ่งบรรจุอยู่ในหัวฉีด ซึ่งการวิจัยนี้จะใช้ความเร็วของกระสุนปืนเท่ากับ 950 ± 30 m/s และหัวฉีดทรงกรวยมุม 30° ขนาด กอกอกดที่ทางออกเท่ากับ 0.7 mm ในการผลิตลำพูง โดยทำการศึกษาคุณลักษณะของลำพูงของเหลว 6 ชนิด คือ น้ำ น้ำทะเล น้ำมันดีเซล กลีโอลีน แอลกอฮอล์ และ น้ำมันแก๊สโซลีน จากภาพถ่ายด้วยกล้องวิดีโอด้วยความเร็วสูง (High-speed digital video camera) ร่วมกับการถ่ายภาพด้วยเทคนิคชาโคล์กราฟ และไม่ใช้เทคนิคชาโคล์กราฟที่การถ่ายภาพใน 2 มุมมองคือ มุมมองปกติเช่นเดียวกับการใช้เทคนิคชาโคล์กราฟและมุมมองในแนวแกน จากการถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอด้วยความเร็วสูงร่วมกับการถ่ายภาพด้วยเทคนิคชาโคล์กราฟ พบว่า ลำพูงของเหลวทั้ง 6 ชนิดที่ฉีดในอากาศ จะมีรูปร่างของลำพูงที่ไม่แตกต่างกันมากนัก และสังเกตพบการเกิด shock wave การเกิดการเปลี่ยนแปลงมุมของ shock wave การแตกตัวของลำพูง การกระจายตัวเป็นฝอยละออง การระเหยกลายเป็นไอของลำพูง อย่างเห็นได้ชัด โดยความเร็วสูงสุดของลำพูงน้ำ น้ำทะเล น้ำมันดีเซล กลีโอลีน แอลกอฮอล์ และน้ำมันแก๊สโซลีน มีค่าเท่ากับ 1,669.03 m/s, 1,514.17 m/s, 1,453.95 m/s, 1,264.68 m/s, 1,548.58 m/s และ 1,634.62 m/s ตามลำดับ ในขณะที่เมื่อฉีดลำพูงในน้ำ พบร่วมกับความเร็วสูงสุดของลำพูงน้ำ, น้ำทะเล, น้ำมันดีเซล, กลีโอลีน, แอลกอฮอล์ และ น้ำมันแก๊สโซลีน มีค่าเท่ากับ 374.24 m/s, 195.00 m/s, 576.41 m/s, 412.95 m/s, 292.51 m/s และ 111.84 m/s ตามลำดับ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการฉีดในอากาศ เนื่องจากพลังของแรงดึงดูดทางในน้ำสูงกว่าในอากาศ และพบพฤติกรรมการขยายตัว การยุบตัวของ

water vapor bubble, shock wave, compressed wave และ rebound shock wave ซึ่งเกิดจากการบุบตัวของ bubble อย่างชัดเจน ซึ่งเป็นคุณลักษณะที่ไม่พบเมื่อฉีดในอากาศ และเมื่อถ่ายภาพโดยไม่ใช้เทคนิคชาโอดิวกราฟ จะพบกลไกการเกิด bubble การขยายตัว การบุบตัว และการหายไปของ bubble ได้อย่างชัดเจนและเข้าใจง่าย แต่จะไม่สามารถสังเกตเห็นพฤติกรรมต่างๆ ของ shock wave และ rebound shock wave ในน้ำได้ นอกจากนี้เมื่อถ่ายภาพลำพูงในน้ำในมุมมองแนวแกน โดยไม่ใช้เทคนิคชาโอดิวกราฟ จะยังเกตุเห็นการเกิด bubble การขยายตัว การบุบและการหายไปของ bubble ได้อย่างชัดเจนและเข้าใจง่าย แต่จะไม่สามารถสังเกตเห็นพฤติกรรมต่างๆ ของ shock wave และ rebound shock wave ในน้ำได้เช่นกัน โดยพบว่าอัตราการขยายตัว ($V_{x, c}$) และบุบตัว ($V_{x, b}$) ของ bubble ในแนวแกนอนสูงสุดมีค่าเท่ากับ 26.19 m/s และ 13.48 m/s ตามลำดับ เกิดขึ้นจากลำพูงแอลกอชอล์ และ ลำพูงกลีโคไซน์ ตามลำดับ และอัตราการขยายตัว ($V_{y, c}$) และบุบตัว ($V_{y, b}$) ในแนวแกนตั้งสูงสุดมีค่าเท่ากับ 23.34 m/s และ 13.66 m/s ตามลำดับ เกิดขึ้นจากลำพูงแอลกอชอล์ และ ลำพูงกลีโคไซน์ ตามลำดับ

ABSTRACT

TITLE : INVESTIGATION ON CHARACTERISTICS OF HIGH-SPEED LIQUID JET IN WATER

BY : CHAIDET KASAMNIMITPORN

DEGREE : MASTER OF ENGINEERING

MAJOR : MECHANICAL ENGINEERING

CHAIR : ASST. PROF. ANNIRUT MATTHUJAK, Ph.D.

KEYWORDS : HIGH-SPEED LIQUID JET / IMPACT DRIVEN METHOD / SHOCK WAVE
WATER VAPOR BUBBLE / SHADOWGRAPH TECHNIQUE

The objective of this research is to study on the characteristics of high-speed liquid jet injected in water and ambient air. The high-speed liquid jets were generated using “impact driven method” in a Horizontal Single Stage Powder Gun (HSSPG). To produce the jets by this technique, the liquid contained inside a nozzle is driven by the impact of a high-speed projectile. In this study, the projectile velocity of 950 ± 30 m/s and 30° conical nozzle having orifice diameter of 0.7 mm were used for jet generation. Characteristics of 6 liquid types (water, sea water, diesel, kerosene, alcohol and gasoline) were described by visualization using a high-speed digital video camera with and without shadowgraph technique in normal and axial views. From shadowgraph images, the jet body of whole liquid jets was quite similar. Jet-generated shock wave, change in shock angle, break-up, atomization and vaporization of the jets were obviously observed. The maximum average jet velocities in air of water, sea water, diesel, kerosene, alcohol and gasoline were 1,669.03 m/s, 1,514.17 m/s, 1,453.95 m/s, 1,264.68 m/s, 1,548.58 m/s and 1,634.62 m/s, respectively, while they in water were 374.24 m/s, 195.00 m/s, 576.41 m/s, 412.95 m/s, 292.51 m/s and 111.84 m/s, respectively. The maximum average velocity of jets injected in water was slower than that in air because the hydrodynamic drag is much higher than the aerodynamic drag. Moreover, water-vapor bubble, expansion and contraction of the jet-induced bubble, shock wave in water, compressed wave and rebound shock wave being generated by water bubble collapse could be obviously observed. From the visualization without shadowgraph

technique, the bubble generation, expansion, contraction and collapse of the bubble were clearly seen and easily interpreted, while the shock wave and rebound shock in water could not be observed with this visualization. Besides, the generation, expansion and contraction of the bubble were clearly observed and easily interpreted using visualization on the axial view, while the shock wave and rebound shock in water could not be observed with this visualization as well. The maximum expansion rate ($V_{x,e}$) and contraction rate ($V_{x,c}$) in x-axis of the bubble are 26.19 m/s and 13.48 m/s, respectively, obtained by alcohol jet and kerosene jet, respectively. The maximum expansion rate ($V_{y,e}$) and contraction rate ($V_{y,c}$) in y-axis of the bubble are 23.34 m/s and 13.66 m/s, respectively, obtained by alcohol jet and kerosene jet, respectively.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฉ
บทที่	ณ
1 บทนำ	
1.1 ปัญหาและที่มาของวิทยานิพนธ์	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ของการวิจัย	4
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ความเร็วเสียง (Speed of sound)	5
2.2 เลขมัค (Mach number)	9
2.3 คลื่นกระแทก (Shock Wave)	10
2.4 ชุดบิงกระสุนความเร็วสูง	16
2.5 เทคนิคการถ่ายภาพ (Visualization Technique)	20
2.6 การประยุกต์ใช้ลำพุ่งความเร็วสูง (High-speed liquid jet)	26
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับลำพุ่งความเร็วสูง (High-speed liquid jet)	29
3 อุปกรณ์และวิธีทำการทดลอง	
3.1 ชุดทดลองบิงกระสุนปืนความเร็วสูง	34
3.2 วิธีทำการทดลอง	36
3.3 การวัดความเร็วของกระสุนปืน	38
3.4 สมรรถนะของชุดทดลอง	41

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

	หน้า
3.5 เทคนิคการถ่ายภาพ (Visualization technique)	43
4 ผลการทดลอง	
4.1 อิทธิพลของชนิดของไอลในห้องทดลอง	46
4.2 อิทธิพลของชนิดของลำพูง	87
5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการศึกษา	124
5.2 ข้อเสนอแนะ	126
เอกสารอ้างอิง	141
ภาคผนวก	
ก การออกแบบชุดทดลอง	134
ข ขั้นตอนการทดลองยิงกระสุนปืนความเร็วสูง	137
ค ผลงานทางวิชาการในระหว่างการศึกษา	147
ประวัติผู้วิจัย	152

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความเร็วเสียงในก๊าซอุ่นคติ	6
2.2 ความเร็วเสียงในตัวกล่างที่อุณหภูมิ 20°C	9
2.3 ค่าคงที่ของแก๊ส	21
4.1 คุณสมบัติของของเหลว	46
4.2 สรุปผลการทดลองคุณลักษณะของลำพูง	86
4.3 สรุปผลการทดลองคุณลักษณะลำพูงความเร็วสูงในอากาศ	93
4.4 สรุปผลการทดลองคุณลักษณะลำพูงความเร็วสูงในน้ำ	121
ұ.1 ความเร็วของกระสุนปืนจากการทดลองเลเซอร์ชุดที่ 1 และเลเซอร์ชุดที่ 2 ระยะห่าง ΔS_1	143
ұ.2 ความเร็วของกระสุนปืนจากการทดลองเลเซอร์ชุดที่ 2 และเลเซอร์ชุดที่ 3 ระยะห่าง ΔS_2	145

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 (a) กระแสการไหลที่ค่าของ $M_a < 1$ และ (b) กระแสการไหลที่ค่าของ $M_a > 1$	10
2.2 คลื่นกระแสหัก หรือ (shock wave)	11
2.3 คลื่นกระแสหักเป็นแนวโค้ง (shock wave)	11
2.4 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงคลื่นกระแสหักตั้งฉาก (Normal shock wave)	12
2.5 ภาพถ่ายของคลื่นกระแสหักตั้งฉาก (Normal shock wave)	13
2.6 การกระโจนตัวของน้ำ (Hydraulic jump)	13
2.7 (a) คลื่นกระแสหักตั้งฉาก (Normal shock wave) (b) คลื่นกระแสหักเฉียง (Oblique shock wave) และ (c) คลื่นกระแสหักโค้ง (Curved shock wave)	14
2.8 การเปลี่ยนทิศของความเร็วหน้า Normal and oblique shock wave	14
2.9 คลื่นกระแสหักที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง	15
2.10 (a) คลื่นกระแสหักที่ไม่มีการเคลื่อนที่ และ (b) คลื่นกระแสหักที่มีการเคลื่อนที่	15
2.11 แผนภาพส่วนประกอบของ Single stage light gas gun	16
2.12 แผนภาพส่วนประกอบของ two stage light gas gun	19
2.13 แผนภาพการทำงานของ powder gun	19
2.14 ระบบชาโคว์กราฟ (Shadowgraph system)	22
2.15 การสร้างภาพของชาโคว์กราฟ (Shadowgraph)	22
2.16 พื้นฐานการจัดระบบชไรเรน (Schlieren)	23
2.17 หลักการทำงานของ Knife-edge	23
2.18 ผลกระทบของการเปลี่ยนทิศทางของลมมีด	23
2.19 ระบบชไรเรนกับกระจกสะท้อน (Schlieren system with mirrors)	24
2.20 ระบบอินเทอร์เฟซโรมิเตอร์ขึ้นพื้นฐานโดยการใช้ beam splitter	25
2.21 Mach-Zehnder interferometer	25
2.22 การถ่ายภาพของการไหลแบบเดียวกันด้วยเทคนิค (a) shadowgraph (b) schlieren และ (c) interferometer	25
2.23 การตัดโดยล้ำผุ่ง	26
2.24 การทำความสะอาทโดยล้ำผุ่ง	27
2.25 เจ็มมิคขาแบบไม่ต้องใช้เจ็ม	28

สารบัญภาค (ต่อ)

ภาคที่		หน้า
2.26	เครื่องยนต์เจ็ท	29
2.27	Bowden and Brunton method	29
3.1	Impact driven method	35
3.2	ชุดทดลอง (a) แผนภาพชุดทดลอง (b) ภาพถ่ายชุดทดลอง Horizontal single stage powder gun (HSSPG)	35
3.3	(a) กระสุนปืน และ (b) หัวฉีดที่ใช้ในการทดลอง	36
3.4	ขั้นตอนการยิงของชุดทดลอง HSSPG : (a) ก่อนจุดระเบิด (b) การจุดระเบิด (c) คินปืนเผาไหม้หมด (d) หลังจากคินปืนเผาไหม้หมด และ (e) การยิงกระสุนปืน	37
3.5	การระบายอากาศด้านหน้ากระสุนปืน	37
3.6	การวัดความเร็วกระสุนปืนด้วยเทคนิค time of flight method	38
3.7	ตัวอย่างสัญญาณที่วัดได้จากเลเซอร์ชุดที่ 1 และ ชุดที่ 2 ($\Delta S_1 = 105 \text{ mm}$) บนหน้าจออสซิลโลสโคปเครื่องที่ 1	39
3.8	ตัวอย่างสัญญาณที่วัดได้จากเลเซอร์ชุดที่ 2 และ ชุดที่ 3 ($\Delta S_2 = 33 \text{ mm}$) บนหน้าจออสซิลโลสโคปเครื่องที่ 2	40
3.9	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของคินปืนและความเร็วของกระสุนปืนที่ระยะ ΔS_1	41
3.10	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของคินปืนและความเร็วของกระสุนปืนที่ระยะ ΔS_2	42
3.11	การการติดตั้งระบบถ่ายภาพด้วยเทคนิชาโคล์กราฟ (Shadowgraph)	44
3.12	การติดตั้งกล้องวิดีโอความเร็วสูงในมุมมองปกติโดยไม่มีการติดตั้งระบบการถ่ายภาพแบบชาโคล์กราฟ (Shadowgraph)	44
3.13	การติดตั้งกล้องวิดีโอความเร็วสูงในแนวแกนโดยไม่มีการติดตั้งระบบการถ่ายภาพแบบชาโคล์กราฟ (Shadowgraph)	45
4.1	ภาพถ่ายโดยเทคนิชาโคล์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่มน้ำในอากาศ (water jet in air, $V_{j, \max} = 1,669 \text{ m/s}$, $M_a = 4.9$)	47
4.2	ภาพถ่ายโดยเทคนิชาโคล์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่มน้ำในน้ำ (water jet in water, $V_{j, \max} = 374 \text{ m/s}$)	48
4.3	ภาพถ่ายโดยไม่ใช้เทคนิชาโคล์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่มน้ำในน้ำ (water jet in water)	51

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.4 ระบบการเคลื่อนที่ของลำพุ่งและ bubble และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ของลำพุ่งน้ำในน้ำ (jet and bubble penetration distance and bubble diameter of water jet in water)	52
4.5 ภาพถ่ายในแนวแกน โดยไม่ใช้เทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งน้ำในน้ำ (water jet in water)	53
4.6 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลำพุ่งในแนวอน (D_x) และแนวตั้ง (D_y) ของลำพุ่งน้ำในน้ำ (bubble diameter D_x and D_y of water jet injected in water)	54
4.7 ความเร็วเฉลี่ยและการเคลื่อนที่ของลำพุ่งน้ำความเร็วสูงในอากาศและในน้ำ	55
4.8 ภาพถ่ายโดยเทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งน้ำทะเลในอากาศ (sea water jet in air, $V_{j, \max} = 1,514 \text{ m/s}$, $M_a = 4.4$)	56
4.9 ภาพถ่ายโดยเทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งน้ำทะเลในน้ำ (sea water jet in water, $V_{j, \max} = 195 \text{ m/s}$)	57
4.10 ภาพถ่ายโดยไม่ใช้เทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งน้ำทะเลในน้ำ (sea water jet in water)	59
4.11 ภาพถ่ายในแนวแกน โดยไม่ใช้เทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งน้ำทะเลในน้ำ (sea water jet in water)	61
4.12 ความเร็วเฉลี่ยและการเคลื่อนที่ของลำพุ่งน้ำทะเลความเร็วสูง ในอากาศและในน้ำ	62
4.13 ภาพถ่ายโดยเทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่มน้ำมันดีเซลในอากาศ (diesel jet in air, $V_{j, \max} = 1,453 \text{ m/s}$, $M_a = 4.2$)	62
4.14 ภาพถ่ายโดยเทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่มน้ำมันดีเซลในน้ำ (diesel jet in water, $V_{j, \max} = 576 \text{ m/s}$)	63
4.15 ภาพถ่ายโดยไม่ใช้เทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่มน้ำมันดีเซลในน้ำ (diesel jet in water)	65
4.16 ภาพถ่ายในแนวแกน โดยไม่ใช้เทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่มน้ำมันดีเซลในน้ำ (diesel jet in water)	67

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.17 ความเร็วเฉลี่ยและระยะการเคลื่อนที่ของลำพุ่งน้ำมันดีเซลความเร็วสูงในอากาศและในน้ำ	68
4.18 ภาพถ่ายโดยเทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งกลีโอลซีนในอากาศ (kerosene jet in air, $V_{j, \max} = 1,264 \text{ m/s}$, $M_a = 3.7$)	68
4.19 ภาพถ่ายโดยเทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งกลีโอลซีนในน้ำ (kerosene jet in water, $V_{j, \max} = 412 \text{ m/s}$)	69
4.20 ภาพถ่ายโดยไม่ใช้เทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งกลีโอลซีนในน้ำ (kerosene jet in water)	71
4.21 ภาพถ่ายในแนวแกน โดยไม่ใช้เทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งกลีโอลซีนในน้ำ (kerosene jet in water)	74
4.22 ความเร็วเฉลี่ยและระยะการเคลื่อนที่ของลำพุ่งกลีโอลซีนความเร็วสูงในอากาศและในน้ำ	75
4.23 ภาพถ่ายโดยเทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งแอลกอฮอล์ในอากาศ (alcohol jet in air, $V_{j, \max} = 1,548 \text{ m/s}$, $M_a = 4.5$)	75
4.24 ภาพถ่ายโดยเทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งแอลกอฮอล์ในน้ำ (alcohol jet in water, $V_{j, \max} = 292 \text{ m/s}$)	76
4.25 ภาพถ่ายโดยไม่ใช้เทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งแอลกอฮอล์ในน้ำ (alcohol jet in water)	77
4.26 ภาพถ่ายในแนวแกน โดยไม่ใช้เทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งแอลกอฮอล์ในน้ำ (alcohol jet in water)	79
4.27 ความเร็วเฉลี่ยและระยะการเคลื่อนที่ของลำพุ่งแอลกอฮอล์ความเร็วสูงในอากาศและในน้ำ	80
4.28 ภาพถ่ายโดยเทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซลีนในอากาศ ($\text{gasoline jet in air, } V_{j, \max} = 1,634 \text{ m/s}, M_a = 4.8$)	80
4.29 ภาพถ่ายโดยเทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซลีนในน้ำ ($\text{gasoline jet in water, } V_{j, \max} = 111 \text{ m/s}$)	82

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.30 ภาพถ่ายโดยไม่ใช้เทคนิคชาโคล์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซเชลินในน้ำ (gasoline jet in water)	84
4.31 ภาพถ่ายในแนวแกน โดยไม่ใช้เทคนิคชาโคล์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซเชลินในน้ำ (gasoline jet in water)	85
4.32 ความเร็วเฉลี่ยและระเบการเคลื่อนที่ของลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซเชลินความเร็วสูงในอากาศและในน้ำ	86
4.33 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของลำพุ่งชนิดต่างๆ เมื่อฉีดในอากาศโดยเทคนิคชาโคล์กราฟ (Shadowgraph)	88
4.34 ความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด	92
4.35 ระเบการเคลื่อนที่ของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด	92
4.36 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของลำพุ่งชนิดต่างๆ เมื่อฉีดในน้ำโดยเทคนิคชาโคล์กราฟ (Shadowgraph)	94
4.37 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของลำพุ่งชนิดต่างๆ เมื่อฉีดในน้ำโดยไม่ใช้เทคนิคชาโคล์กราฟ (Shadowgraph)	100
4.38 ความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด	108
4.39 ระเบการเคลื่อนที่ของลำพุ่ง (jet penetration distance) ของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด	108
4.40 ระเบการเคลื่อนที่ของ bubble (bubble penetration distance) ของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด	109
4.41 ความเร็วระเบการเคลื่อนที่ของ bubble เฉลี่ย (V_b) ของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด	109
4.42 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble (bubble diameter) ของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด	110
4.43 ความเร็วการขยายตัวและหดตัวของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble เฉลี่ย (V_d) ของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด	110
4.44 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของลำพุ่งชนิดต่างๆ เมื่อฉีดในน้ำในแนวแกนโดยไม่ใช้เทคนิคชาโคล์กราฟ (Shadowgraph)	112
4.45 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble (bubble diameter) (D_x) ของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด	117
4.46 ความเร็วการขยายตัวและหดตัวของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble เฉลี่ย (V_x) ของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด	117
4.47 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble (bubble diameter) (D_y) ของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด	119

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.48 ความเร็วการขยายตัวและหดตัวของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble เฉลี่ย (V_y) ของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด	119
ก.1 ชุดปล่อยกระสุนปืน (launcher หรือ powder gun)	135
ก.2 ท่อส่งกระสุนปืน (launch tube)	135
ก.3 ท่อระบายน้ำความดัน (pressure relief section)	136
ก.4 ห้องทดสอบ (test chamber)	136
ข.1 ชั้นมวลของลูกกระสุน	138
ข.2 วัดขนาดของลูกกระสุน	138
ข.3 บรรจุลูกกระสุน	139
ข.4 บรรจุนิปป์และติดไฟรเมอร์	139
ข.5 เช็คสัญญาณเลเซอร์ และออสซิลโลสโคป (oscilloscope)	140
ข.6 การประกอบชุดปืน	140
ข.7 การยิง	141
ข.8 (a) ตำแหน่งเลเซอร์บนหน้าจออสซิลโลสโคป (oscilloscope) และ (b) ตำแหน่งติดตั้งเลเซอร์	142

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ปัญหาและที่มาของวิทยานิพนธ์

การกัดกร่อนจากเม็ดฝน (rain corrosion) [1-8] หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการชนของเม็ดฝน (rain impact) มีการศึกษามานาน ซึ่งถือเป็นการวิจัยเริ่มแรกเกี่ยวกับลำพูงความเร็วสูง (high-speed liquid jet) ที่เกิดจากเม็ดฝนประทับพื้นผิวของตัวเครื่องบินหรือเครื่องบินระหว่างการเคลื่อนที่ในอากาศด้วยความเร็วสูงระหว่างฝนตก ต่อมาก็มีการศึกษาลำพูงความเร็วสูงในการประยุกต์ใช้ในด้านวิศวกรรมต่างๆ เช่น การศึกษาเกี่ยวกับ cavitations [9-10] เครื่องดับเพลิง (fire extinguisher) เทคโนโลยีเกี่ยวกับการตัดโดยลำพูง (jet cutting technology) การทำสะอาดวัสดุโดยลำพูง (material cleaning by jets) การทำเหมืองแร่และการเจาะอุโมงค์โดยการกระแทกของลำพูงความเร็วสูง (mining and tunneling by means of high-speed jet impingements) [11-20] การฉีดน้ำมันในเครื่องยนต์ดีเซล การฉีดน้ำมันแก๊สโซลีนในเครื่องยนต์แก๊สโซลีน (direct injection gasoline engine, GDI engine) และเครื่องยนต์ SCRAM jet (Supersonic Combustion Ram Jet engine, SCRAM jet engine) [21-36] เป็นต้น

จากการวิจัยต่างๆ พบร่วมกันว่า ในมุมมองของการเผาไหม้ (viewpoint of combustion) ลำพูงน้ำมันความเร็วสูง มีส่วนช่วยให้การเผาไหม้มีสตอรณะดีขึ้น เนื่องจากการแตกตัวเป็นฝอยละเอียดของน้ำมันและการช่วย分散คลุกเคล้ากันกับอากาศได้ดีขึ้น และในมุมมองของเทคโนโลยีการตัดโดยลำพูง (viewpoint of jet cutting technology) ลำพูงความเร็วสูงสามารถตัดวัสดุที่มีความหนาหรือความแข็งแรงได้เป็นอย่างดี และยังสามารถทำความสะอาดวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากโมเมนตัม (Momentum energy) ของลำพูงความเร็วสูงมีค่าสูงเพียงพอ อย่างไรก็ตาม สำหรับการผลิตลำพูงความเร็วสูงนั้นมีความเร็วอยู่ในช่วงความเร็วเหนือเสียง (supersonic หรือ hypersonic speed) นั้น จะต้องใช้ความดันขับ (driving pressure) สูงมากถึงหลายร้อย MPa ซึ่งมีข้อจำกัดในด้านการผลิตและการเก็บความดันสูงดังกล่าวในถังเก็บความดัน (pressure vessel) จากข้อจำกัดดังกล่าว จึงมีการคิดค้นวิธีผลิตลำพูงความเร็วสูงโดยวิธีที่เรียกว่า impact driven method หรือ Bowden and Brunton method [37,38] โดยวิธีนี้จะยิงกระสุนความเร็วสูง (high-speed projectile) เข้าไปกระแทก กับของเหลวซึ่งบรรจุอยู่ในหัวฉีด (nozzle) โมเมนตัมของกระสุนจะทำให้ความดันของเหลวมีค่าสูงขึ้นจนกระแทกทั้งความดันในระดับ GPa หลังจากนั้นของเหลวที่จะฉีดออกมายังหัวฉีดด้วย

ความเร็วสูง ซึ่งเป็นการฉีดลำพุ่งจากการกระแทกของกระแสน้ำแรง จากนั้นเป็นต้นมาการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับลำพุ่งความเร็วสูง จะใช้หลักการนี้ทั้งสิ้น

จากการวิจัยต่างๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้นจะพบว่า มีเพียงการศึกษาเกี่ยวกับลำพุ่งความเร็วสูง (high-speed liquid jet) โดยฉีดเข้าไปในของไหลดในสถานะแก๊ส (gas phase) เท่านั้น ซึ่งในปัจจุบัน มีนักวิจัยบางกลุ่มได้พยายามศึกษาการนำลำพุ่งความเร็วสูงมาประยุกต์ใช้ในงานด้านการแพทช์ [39-41] เช่น การฉีดยาแบบไม่ใช้เข็ม (needleless) โดยใช้ลำพุ่งความเร็วสูงของตัวยาฉีดเข้าไปในผิวนังโคลอต และ การรักษาการอุดตันของก้อนเลือด นอกจากนี้แล้วยังมีแนวคิดนำลำพุ่งไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมใต้สมุทร [42-43] เช่น การตัดโครงสร้างใต้ทะเล โดยลำพุ่งความเร็วสูง (jet cutting marine structures) หรือการเจาะใต้ทะเล (jet drilling at the bottom of the sea) จากทิศทางการประยุกต์ใช้ในปัจจุบันพบว่า ไม่เพียงแต่ลำพุ่งความเร็วสูงที่ฉีดเข้าไปในของไหลดสถานะแก๊ส (อากาศ) เท่านั้น แต่ยังมีความพยายามนำไปประยุกต์ใช้ในกรณีที่ฉีดลำพุ่งความเร็วสูงภายใต้ของไหลดในสถานะเหลว (liquid phase) เช่น น้ำ หรือน้ำทะเล เป็นต้น แต่คุณลักษณะสำคัญต่างๆ ของ ลำพุ่งความเร็วสูงที่ฉีดภายใต้ของเหลว (liquid phase) ซึ่งประกอบไปด้วย ลักษณะของลำพุ่ง การแตกตัว (break up) การผสมกัน (mixing) ระหว่างลำพุ่งกับของเหลว ความเร็วของลำพุ่ง (jet velocity) ระยะการพุ่งเข้าไปในของเหลว (penetration distance) และอื่นๆ ซึ่งไม่มีงานวิจัยใดกล่าวถึง หรือรายงานมาก่อนเลย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดที่จะศึกษาและทำการทดลองเกี่ยวกับลำพุ่งความเร็วสูงกรณีฉีดในของเหลว โดยหวังว่าจะได้รับองค์ความรู้ใหม่ๆ และเป็นข้อมูลที่สำคัญ เกี่ยวกับคุณลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูงกรณีฉีดในน้ำและเพื่อเป็นข้อมูลสำคัญในการประยุกต์ใช้ในงานทางวิศวกรรมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อปรับปรุงและทดสอบชุดทดลองยิงกระแสน้ำแรง (high-speed projectile) ให้มีความเหมาะสมในการผลิตลำพุ่งความเร็วสูง (high-speed jet) โดยวิธี impact driven method เมื่อฉีดในของเหลว

1.2.2 เพื่อผลิตลำพุ่งความเร็วสูง (high-speed liquid jet) เมื่อฉีดในของเหลว

1.2.3 เพื่ออธิบายคุณลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูงเมื่อฉีดในของเหลว และคุณลักษณะที่แตกต่างของลำพุ่งความเร็วสูงเมื่อฉีดภายใต้ของไหลดในสถานะแก๊ส (อากาศ)

1.2.4 เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อคุณลักษณะลำพุ่งความเร็วสูง เมื่อฉีดในของเหลว

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ปรับปรุงชุดทดลองยิงกระสุนความเร็วสูง (high-speed projectile) ที่ใช้ในการผลิต ลำพูงความเร็วสูง (high-speed jet) โดยวิธี impact driven method ให้มีความเหมาะสมกับกรณีนี้ดีใน ข้องเหลา

1.3.2 ผลิตลำพูงความเร็วสูงกรณีนี้ดีในของไอลในสถานะแก๊ส คือ (อากาศ) และในของ เหลา คือ (น้ำ)

1.3.3 ศึกษาลำพูงความเร็วสูงกรณีนี้ดีภายในไอลในสถานะแก๊ส คือ (อากาศ) และ ในของเหลา คือ (น้ำ)

1.3.4 ศึกษาถึงพารามิเตอร์ต่างๆ อาทิ ชนิดของลำพูง ชนิดของของไอลที่อยู่ภายในห้อง ทดสอบ (test chamber) ที่มีอิทธิพลต่อคุณลักษณะของลำพูงความเร็วสูง

1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

1.4.1 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องจากการสารวิชาการทั้งในประเทศและต่างประเทศ ที่เกี่ยวข้องกับลำพูงความเร็วสูงทั้งในอากาศและในน้ำ

1.4.2 ศึกษาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองยิงกระสุนความเร็วสูงเพื่อที่จะใช้ สร้างลำพูงความเร็วสูง

1.4.3 ทำการออกแบบและปรับปรุงชุดยิงกระสุนความเร็วสูงเพื่อให้เหมาะสมกับการ ทดลองลำพูงความเร็วสูงทั้งในการณีนี้ดีอากาศและในน้ำ

1.4.4 ออกแบบการทดลอง จัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือวัดต่างๆ เช่น อุปกรณ์วัด ความเร็ว ออสซิลโลสโคป เป็นต้น

1.4.5 ทดลองยิงกระสุนความเร็วสูงเพื่อหาความเร็วของกระสุนปืนที่น้ำหนักดินปืน 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5 และ 7 g

1.4.6 ทดลองผลิตลำพูงความเร็วสูงกรณีนี้ดีในอากาศและในของน้ำ

1.4.7 ศึกษาคุณลักษณะของลำพูงความเร็วสูงกรณีนี้ดีในอากาศและในของน้ำโดยการ ถ่ายภาพ

1.4.8 วิเคราะห์ผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ของการวิจัย

- 1.5.1 รู้ถึงคุณลักษณะของลำพูงความเร็วสูง (high-speed jet) เมื่อนำไปใช้ในน้ำ
- 1.5.2 รู้ถึงตัวแปร (parameters) ต่างๆ ที่มีผลต่อคุณลักษณะของลำพูงความเร็วสูง (high-speed jet) เมื่อนำไปใช้ในน้ำ
- 1.5.3 อาจจะค้นพบชนิดของลำพูงที่เหมาะสมกับงานในแต่ละด้านทั้งในทางวิศวกรรมแพทช์ศาสตร์ หรืออื่นๆ
- 1.5.4 สามารถพัฒนาเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับงานด้านการแพทช์ อุตสาหกรรมได้สมูthat เทคโนโลยีการตัด (cutting technology) ในน้ำ และงานด้านอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องได้จริง

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความเร็วเสียง (Speed of sound)

ความเร็วเสียง [50] คือ ระยะทางที่เสียงเดินทางไปในตัวกล้ามได้ในหนึ่งหน่วยเวลา โดยทั่วไปเสียงเดินทางในอากาศที่อุณหภูมิ 25°C ที่ความเร็วประมาณ 346 m/s และในอากาศที่ อุณหภูมิ 20°C ประมาณ 343 m/s ความเร็วที่เสียงเดินทางได้นั้นอาจมีค่ามากขึ้นหรือน้อยลงขึ้นอยู่ กับอุณหภูมิของตัวกล้ามปั้นหลัก และอาจได้รับอิทธิพลจากความชื้นบ้างเล็กน้อย เนื่องจากการเดินทางของเสียงอาศัยการสั่นของโมเลกุลของตัวกล้าม ดังนั้นเสียงจะเดินทางได้เร็วขึ้นหากตัวกล้าม มีความหนาแน่นมาก ทำให้เสียงเดินทางเร็วในของแข็ง แต่เดินทางไม่ได้ในอากาศ เพราะอากาศเป็น สัญญาแก๊ส ไม่มีโมเลกุลของตัวกล้าม ความเร็วเสียง C โดยทั่วไปคำนวณหาได้จาก

$$C = \sqrt{\frac{c}{\rho}} \quad (2.1)$$

เมื่อ

c คือ สัมประสิทธิ์ของความแข็งกรึง (coefficient of stiffness)

ρ คือ ความหนาแน่น

ดังนั้น ความเร็วเสียง จะเพิ่มขึ้นตามความแข็งกรึงของวัสดุ และ ลดลงเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น

2.1.1 ความเร็วเสียงในแก๊ส

ค่าสัมประสิทธิ์ของความแข็งกรึง (coefficient of stiffness) สำหรับตัวกล้ามที่เป็น แก๊ส สามารถแทนค่าได้จากสมการ

$$c = \gamma p \quad (2.2)$$

เมื่อ

γ คือ ดัชนีอะดีယباتิก (adiabatic index)

p คือ ความดัน

ดังนั้น ความเร็วเสียงในแก๊สสามารถคำนวณได้จาก

$$C_{\text{gas}} = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}} \quad (2.3)$$

ในกรณี แก๊สในอุณหภูมิ (Ideal gas) จะได้

$$C_{\text{ideal gas}} = \sqrt{\gamma RT} \quad (2.4)$$

เมื่อ

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (gas constant) (สำหรับอากาศ มีค่าเท่ากับ 287.05 J/(kg.K) ปกติในทางอากาศพลศาสตร์ค่านี้หายใจ การหารค่าคงที่ของแก๊สสามาก R (J/(mol.K)) ด้วย ค่ามวลโมล (molar mass)

γ คือ ค่า ดัชนีอะเดียบัติก (adiabatic index) มีค่าเท่ากับ 1.402 สำหรับอากาศ บางครั้งเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ K (cappa)

T คือ ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) ที่สภาพบรรยายมาตรฐาน (standard atmosphere)

ในกรณีของแก๊สในอุณหภูมิ ความเร็วเสียง ขึ้นกับอุณหภูมิเท่านั้น โดยไม่ขึ้นกับความดัน อากาศนั้นเกือบจะถือได้ว่าเป็นแก๊สในอุณหภูมิ อุณหภูมิของอากาศเปลี่ยนแปลงตามระดับความสูง เป็นผลให้ความเร็วของเสียงที่ระดับความสูงต่างๆ นั้นแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความเร็วเสียงในแก๊สอุณหภูมิ [50]

ระดับความสูง	อุณหภูมิ	m/s	km/h	mph	knot
ระดับน้ำทะเล	15 °C (59 °F)	340	1225	761	661
11,000 m -20,000 m	-57 °C (-70 °F)	295	1062	660	573
29,000 m	-48 °C (-53 °F)	301	1083	673	585

2.1.2 ความเร็วเสียงในของเหลว

ของเหลว (fluid) จะมีความแข็งเกร็งต่ำกว่าของก๊าซ แต่ไม่ได้หมายความว่าไม่มีความแข็งเกร็ง แต่แรงเฉือน ดังนั้นความเร็วของเสียงในของเหลวหาได้โดย

$$C_{\text{Fluid}} = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (2.5)$$

โดย

K คือ โมดูลัสของการอัด축เดียบตาติก (adiabatic bulk modulus)

2.1.3 ความเร็วเสียงในของแข็ง

ของแข็ง (solid) นั้นมีค่าความแข็งเกร็งไม่เป็นศูนย์ทั้งต่ำกว่าและสูงกว่าของเหลว หรือ การเปลี่ยนปริมาตร (Volumetric deformation) และแรงเฉือน (Shear deformation) ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะกำหนดค่าเสียงที่มีความเร็วต่างกันขึ้นกับรูปแบบของคลื่นในแท่งของแข็งซึ่งมีขนาดความหนา (หรือขนาดของตัวกล่องในแนวตั้งจากกับการเคลื่อนที่ของคลื่น) เล็กกว่าความยาวคลื่นมาก ความเร็วเสียงหาได้จาก

$$C_{\text{solid(thin), longitudinal}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.6)$$

โดย

E คือ โมดูลัสของยัง (Young's modulus)

ρ คือ ความหนาแน่น

ดังนั้น ความเร็วเสียงในตัวกล่องในเหล็กจะมีค่าประมาณ $5,100 \text{ m/s}$ ความเร็วของเสียงสามารถหาได้จากการแทนค่าโมดูลัสของยังด้วยโมดูลัสคลื่นหน้าราน (plane wave modulus) ซึ่งหาได้จาก โมดูลัสของยัง และ อัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's ratio) [21]

$$M = E \frac{1-v}{1-v-2v^2} \quad (2.7)$$

ดังนั้น ความเร็วของเสียง

$$C_{\text{solid}(\text{thick}), \text{longitudinal}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1-\nu-\nu^2)}} \quad (2.8)$$

สำหรับคลื่นตามขวาง (transverse wave) นั้น โมดูลัสของขัง E จะถูกแทนด้วยค่าโมดูลัสของแรงเฉือน (Shear modulus) G

$$C_{\text{solid}, \text{transverse}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.9)$$

จะเห็นได้ว่า ความเร็วของเสียงในของแข็งขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของตัวกลางเท่านั้น โดยไม่ขึ้นกับอุณหภูมิของแข็ง เช่น เหล็ก สามารถนำคลื่นด้วยความเร็วที่สูงกว่าอากาศมาก

ในตัวกลางที่ไม่มีการกระจาย (non-dispersive medium) ความเร็วเสียงไม่ขึ้นกับความถี่ ดังนั้นความเร็วในการส่งถ่ายพลังงาน และ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของเสียงจึงมีค่าเท่ากัน ในย่านความถี่เสียงที่มนุษย์สามารถได้ยิน อากาศมีคุณสมบัติเป็นตัวกลางที่ไม่มีการกระจายแต่พบว่า CO_2 ในอากาศนั้นเป็นตัวกลางที่มีการกระจายและทำให้เกิดการกระจายสำหรับคลื่นเสียงความถี่สูง (28 KHz) ในตัวกลางที่มีการกระจาย (dispersive medium) ความเร็วเสียงจะขึ้นกับความถี่องค์ประกอบที่แต่ละความถี่จะเดินทางด้วยความเร็วเฟส (phase velocity) ที่แตกต่างกัน ส่วนพลังงานของเสียงจะเดินทางด้วยความเร็วที่ความเร็วกลุ่ม (group velocity) ตัวอย่างของตัวกลางที่มีการกระจายคือ น้ำ

2.1.4 ความเร็วเสียงในอากาศ

ความเร็วของเสียงในอากาศโดยประมาณหาได้จาก

$$C_{\text{air}} \approx (331.5 + 0.6t) \quad (2.10)$$

โดยที่ t คือ อุณหภูมิ ในหน่วย $^{\circ}\text{C}$ ความแม่นยำในการประมาณในช่วงของอุณหภูมิในช่วง -20°C ถึง 40°C จะมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 0.2% ในช่วงอุณหภูมิสูงกว่าหรือต่ำกว่านั้นความเร็วของเสียงจะประมาณจากสมการที่ 2.11 และตัวอย่างความเร็วเสียงในตัวกลางต่างๆ แสดงในตารางที่ 2.2

$$C_{\text{air}} \approx 331.5 \sqrt{1 + \frac{t}{273}} \quad (2.11)$$

ตารางที่ 2.2 ความเร็วเสียงในตัวกลางที่อุณหภูมิ 20°C [50]

ชนิดตัวกลาง	ความเร็ว (m/s)
อากาศ	343
น้ำ	1,480
น้ำแข็ง	3,200
แก้ว	5,300
เหล็ก	5,200
ตะกั่ว	1,200
ไทเทเนียม	4,950
พีวีซี (อ่อน)	80
พีวีซี (แข็ง)	1,700
คอนกรีต	3,100

2.2 เลขมัค (Mach number)

เลขมัค (Mach number) คือ สัดส่วนของความเร็วต่อความเร็วเสียง เลขมัคปกติจะใช้กับวัสดุที่เดินทางด้วยความเร็วสูงในของไอล และของเหลวที่ไอลด้วยความเร็วสูงในช่องแคบๆ หรือ อุโมงค์ลม และเนื่องจากเป็นสัดส่วนของความเร็วตั้งนั้น เลขมัคจึงไม่มีหน่วย ที่สภาวะระดับน้ำทะเลมาตรฐาน มัค 1 ในอากาศมีค่าเท่ากับความเร็ว $1,225 \text{ km/hr}$ เนื่องจากความเร็วเสียงนั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น นอกจากนี้อาจพบว่าเลขมัคนั้นยังเป็นสัดส่วนของแรงเนื้อย (แรงอากาศพลศาสตร์) ต่อแรงยืดหยุ่น (elastic force) ดังสมการที่ 2.12

$$M_a = \frac{v}{v_0} \quad (2.12)$$

เมื่อ

M_a คือ เลขมัค (Mach number)

v คือ ความเร็วของเหล็กสำเนิดเสียง

v_0 คือ ความเร็วของเสียงในตัวกลาง

หากนิยามความเร็วตาม Mach number จะสามารถแบ่งประเภทของความเร็วเป็นช่วงได้ดังนี้

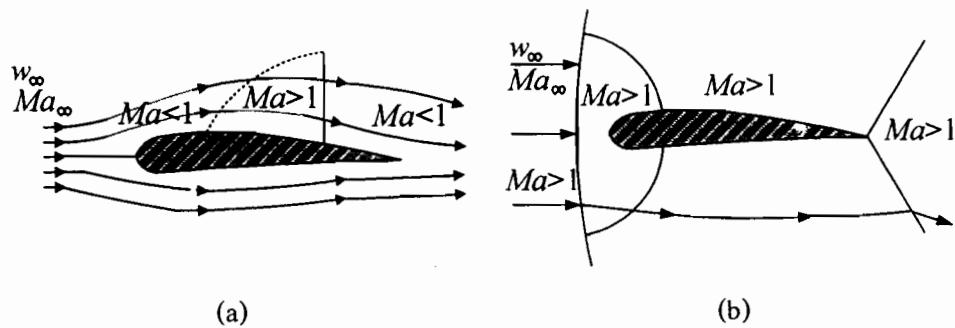
$M_a < 1$ เรียกว่า Subsonic เป็นช่วงของความเร็วที่ต่ำกว่าความเร็วเสียง

$M_a = 1$ เรียกว่า Sonic เป็นช่วงของความเร็วเสียง

$0.8 < M_a < 1.2$ เรียกว่า Transsonic เป็นช่วงของความเร็วบ่นเสียงเป็นความเร็วที่อยู่ประมาณความเร็วเสียง

$1.2 < M_a < 5$ เรียกว่า Supersonic เป็นช่วงของความเร็วที่เหนือหรือมากกว่าความเร็วเสียง

$M_a > 5$ เรียกว่า Hypersonic เป็นช่วงของความเร็วมากกว่าความเร็วเสียงมาก

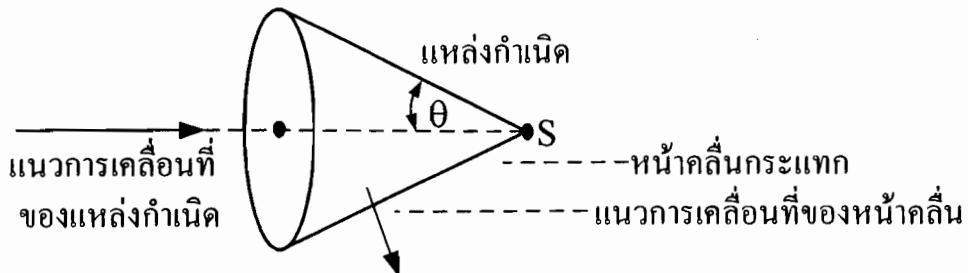


ภาพที่ 2.1 (a) กระแสการไหลที่ค่าของ $M_a < 1$ และ (b) กระแสการไหลที่ค่าของ $M_a > 1$

2.3 คลื่นกระแสแทก (Shock Wave)

คลื่นกระแสแทกเกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่ได้เท่ากับความเร็วของคลื่นหรือเร็วกว่า จึงเกิดปรากฏการณ์ที่สัมคลื่นไม่สามารถที่จะเคลื่อนที่ออกไปจากแหล่งกำเนิดเสียงได้ทัน โดยถ้าแหล่งกำเนิดเคลื่อนที่ได้เท่ากับความเร็วของคลื่น สัมคลื่นจะเกิดการซ้อนกัน เสริมกันกลายเป็นแอมพลิจูดขนาดใหญ่เรียกว่า คลื่นกระแสแทก หรือ (shock wave) และเมื่อแหล่งกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่เร็วกว่าคลื่น สัมคลื่นจะฟอร์มตัวเป็นรูปกรวยโดยมีมุม $\theta = \sin^{-1}(v/v_0)$ โดยอัตราส่วน v/v_0 เรียกว่า เลขมัค (Mach number) คลื่นกระแสแทกเกิดขึ้นได้บ่อยมากในสถานการณ์ต่างๆ กัน ดังเช่น โซนิกบูม (Sonic boom) คือ คลื่นกระแสแทกประเภทหนึ่งของเครื่องบินที่วิ่งเร็วเหนือเสียง คลื่นที่เกิดหลัง

เรือเร็วที่เป็นคลื่นกระแทกอีกประเภทหนึ่ง นอกอวากาศ กีสามารถจะเกิดคลื่นกระแทกได้ อย่างเช่น ลมสูริยะที่วิ่งด้วยความเร็วสูงเข้าชนสนามแม่เหล็กโลก เป็นต้น



ภาพที่ 2.2 คลื่นกระแทก หรือ (shock wave)

เมื่อแหล่งกำเนิดเดินทางมาที่ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วเสียง ($v_s = v$ หรือ Mach Number เท่ากับ 1) หัวคลื่นทางขวาจะถูกอัดกันอยู่ทางด้านหน้าเป็นแนวเส้นโค้ง ทำให้หัวคลื่นเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกัน ความดันของคลื่นเพิ่มขึ้นอย่างมาก เรียกว่า คลื่นกระแทก (shock wave) ดังภาพที่ 2.2 แสดงกราฟสูญญากาศที่วิ่งด้วยความเร็วสูง

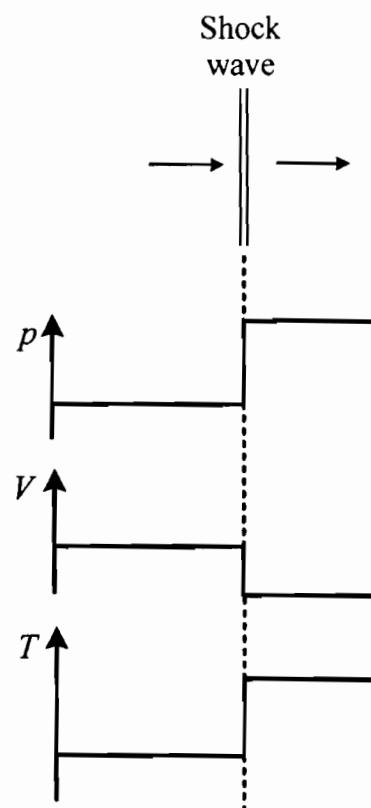


ภาพที่ 2.3 คลื่นกระแทกเป็นแนวโค้ง (shock wave) [50]

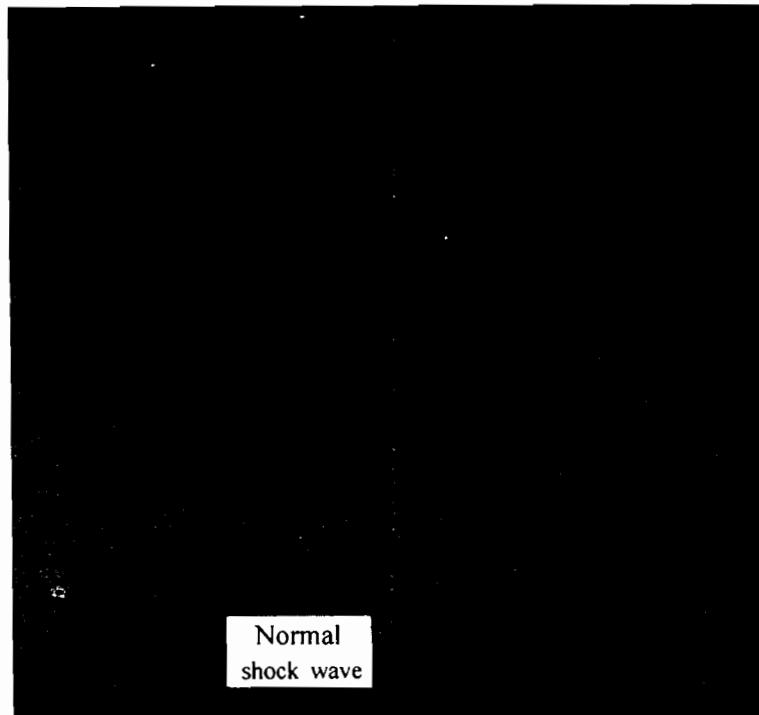
ภายนอกของวัสดุที่มีความเร็วสูงจะมีการเปลี่ยนแปลงของการไหลซึ่งเกิดจากความไม่สมดุลของแรงดันที่ต้องการให้วัสดุผ่านช่องแคบ จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของการไหล ที่สำคัญคือการเปลี่ยนแปลงแบบอุดตัน (Region of sharp change) ของของไหล ได้นั่นความเร็วเริ่มต้นของของไหลจะต้องมีค่าเท่ากับความเร็วเสียง บริเวณที่มีความบางมากๆ ที่อยู่ระหว่างการเปลี่ยนแปลงจากสภาพของการไหลที่มีความเร็วเหนือเสียงและความดันต่ำไปยังสภาพที่มีความเร็วต่ำและความดันสูง เรียกว่า คลื่นกระแทก (Shock

wave) คลื่นกระแทกที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงทำมุนตั้งฉากกับทิศทางการไหลเรียกว่า คลื่นกระแทกตั้งฉาก (Normal shock wave) ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2.4 โดยภาพถ่ายของ Normal shock wave แสดงไว้ในภาพที่ 2.5

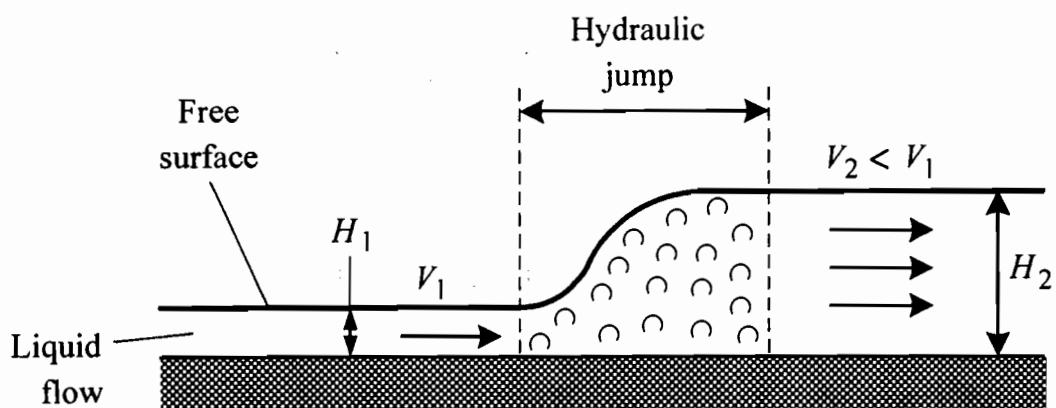
คลื่นกระแทกจะมีความคล้ายคลึงกับลักษณะของการเกิดการกระโจนตัวของน้ำ (Hydraulic jump) ซึ่งจะเกิดขึ้นในการไหลแบบผิวอิสระ (Free surface flow) ลักษณะการเกิดการกระโจนตัวของน้ำ (Hydraulic jump) แสดงในภาพที่ 2.6 ตัวอย่างของการเกิด Hydraulic jump คือ การไหลของกระแสน้ำในเขื่อนหรือท่าน้ำ



ภาพที่ 2.4 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงคลื่นกระแทกตั้งฉาก (Normal shock wave)



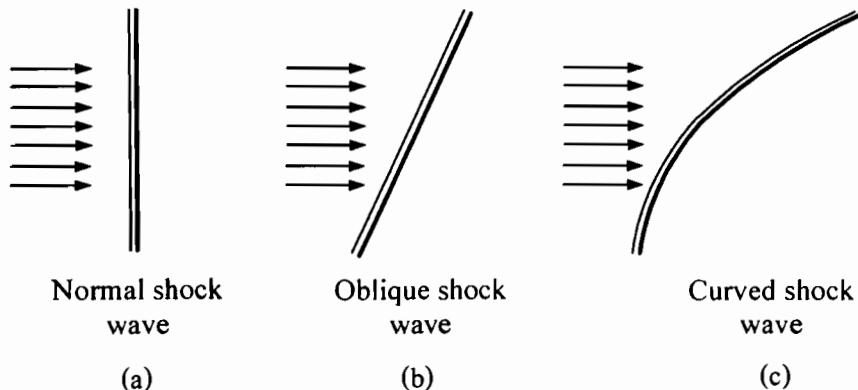
ภาพที่ 2.5 ภาพถ่ายของคลื่นกระแทกตั้งฉาก (Normal shock wave) [51]



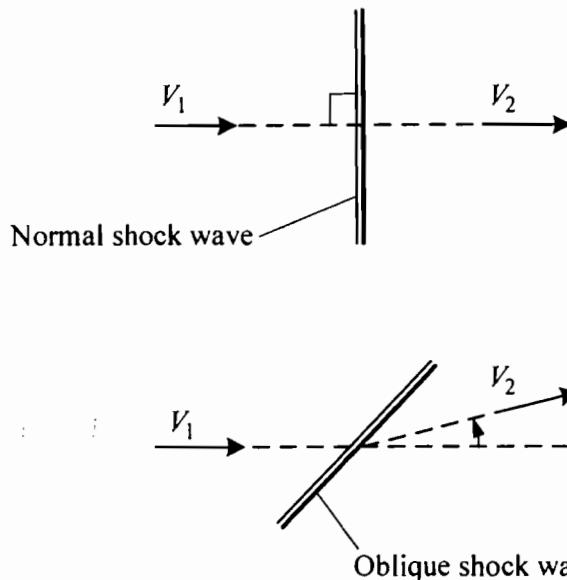
ภาพที่ 2.6 การกระโจนตัวของน้ำ (Hydraulic jump)

โดยทั่วไปคลื่นกระแทกจะมีลักษณะโค้ง (Curved shock wave) แต่ก็มีจำนวนมากที่มีลักษณะตรงทำมุม 90° กับทิศทางการไหล (Normal shock wave) และอีกห้ามุมกับทิศทางของการไหล (Oblique shock wave) ดังแสดงในภาพที่ 2.7 ในกรณีของ Normal shock wave ความเร็วหน้าและหลังคลื่นกระแทกจะทำมุม 90° กับคลื่นกระแทก ในส่วนของ Oblique shock wave นั้นจะเกิดจากการเปลี่ยนทิศของความเร็วของหน้าคลื่นกระแทก ดังแสดงในภาพที่ 2.8 โดยทั่วไปคลื่น

กระแทกที่สมบูรณ์แบบที่เกิดขึ้นอาจจะแบ่งออกได้เป็น Normal shock wave , Curved shock wave และ Oblique shock wave ดังแสดงใน ภาพที่ 2.9



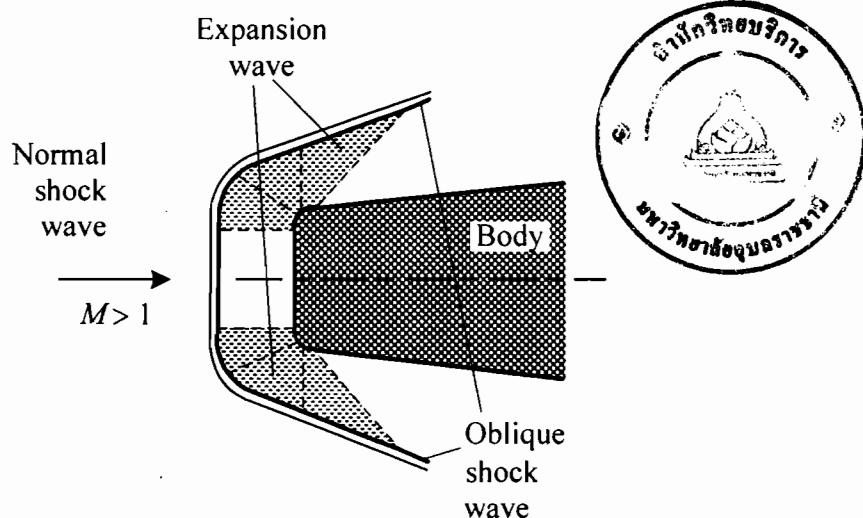
ภาพที่ 2.7 (a) คลื่นกระแทกตั้งฉาก (Normal shock wave) (b) คลื่นกระแทกเฉียง (Oblique shock wave) และ (c) คลื่นกระแทกโค้ง (Curved shock wave)



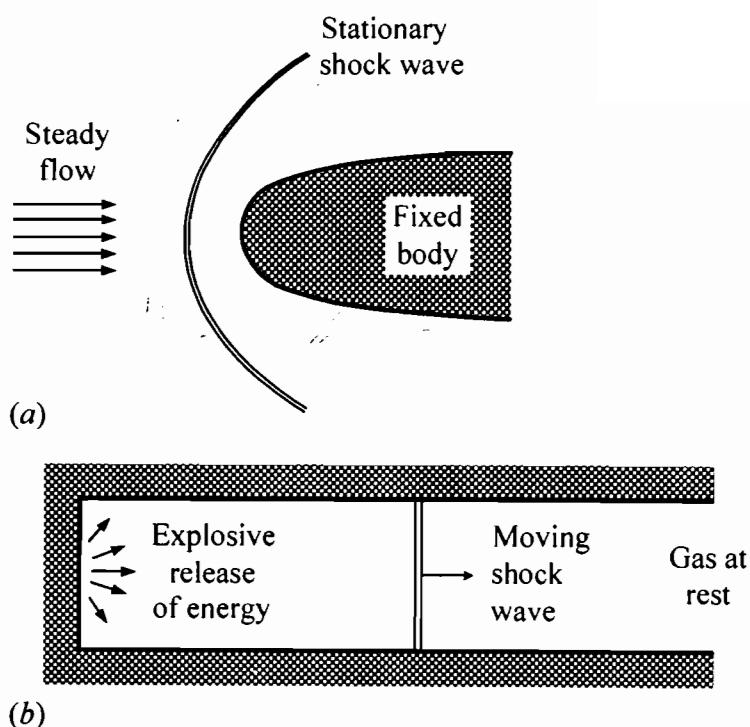
ภาพที่ 2.8 การเปลี่ยนทิศของความเร็วหน้า Normal and oblique shock wave

ตัวอย่างการเกิด Normal shock wave สามารถเกิดได้ในท่อไอคิชของเครื่องยนต์ที่ใช้ในเครื่องบินที่มีความเร็วเหนือเสียง ในระบบไอเสียของเครื่องยนต์ที่มีลูกสูบเคลื่อนที่ขึ้นลงและในท่อแก๊สที่มีความยาวมากๆ เป็นต้น เมื่อ Normal shock wave เกิดขึ้นภายในท่อที่มีการไหลอย่างสม่ำเสมอ (steady flow) ซึ่งจะไม่มีการเคลื่อนที่เมื่อเทียบกับผนังของท่อดังนั้นจะจึงถูกเรียกว่า

stationary shock wave ในทางตรงกันข้าม เมื่อมีการรบกวนการไหลขึ้นอย่างทันทีทันใด ยกตัวอย่าง เช่น การปิดวาล์วอย่างกะทันหันหรือมีการปลดปล่อยพลังงานขึ้นภายในจุดใดจุดหนึ่งของท่อ Normal shock wave จะสามารถเคลื่อนที่ได้เมื่อเทียบกับผนังท่อ ดังแสดงในภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.9 คลื่นกระแสที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง



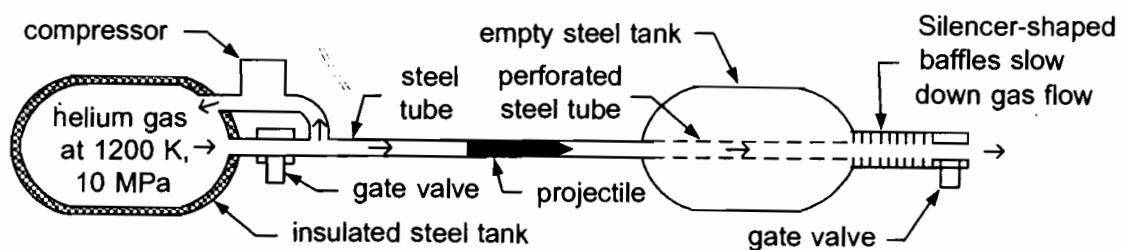
ภาพที่ 2.10 (a) คลื่นกระแสที่ไม่มีการเคลื่อนที่ และ (b) คลื่นกระแสที่มีการเคลื่อนที่

2.4 ชุดยิงกระสุนความเร็วสูง

ปัจจุบันงานวิจัยในด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรม ชุดยิงกระสุน (launcher) หรืออาจเรียกว่า ปืน (gun) มีมากหลายแบบ เช่น ชุดยิงแบบ electrostatic และ electromagnetic ชุดยิงแบบใช้การระเบิด (explosive propulsion) ชุดยิงแบบ plasma เป็นต้น โดยแต่ละแบบจะมีความเหมาะสมในแต่ละงานวิจัย อย่างไรก็ตาม ในหัวข้อนี้จะพูดถึงชนิดของชุดยิงที่ใช้กันมากในงานวิจัยปัจจุบัน โดยจะจำแนกชนิดของชุดยิงหรือปืนออกตามแหล่งของตัวขับดันกระสุนซึ่งมีรายละเอียดดังนี้คือ

2.4.1 ชุดยิงกระสุนแบบใช้แก๊สเบา (light gas gun)

ชุดยิงกระสุนแบบนี้จะใช้แก๊สเบา (light gas) เช่น ไฮโดรเจน (H_2) หรือ ไฮเดรียม (He) เป็นตัวขับดันด้วยน้ำหนักของแก๊สเบ้า light gas gun โดยส่วนประกอบหลักของปืนชนิดนี้คือ ถังเก็บความดันสูง (high pressure reservoir) แผ่นฟลีมบาง (diaphragm) และ ท่อปล่อยกระสุน (launch tube) หรือ ลำกล้องปืน (gun barrel) กระสุนปืน (projectile) โดยทั่วไปจะสอดอยู่ท่าทางออกของลำกล้องปืนดีดกับแผ่น diaphragm แก๊สเบาที่ใช้เป็นตัวขับดันจะบรรจุอยู่ภายในถังเก็บความดันซึ่งแก๊สตั้งกล่าวจะทำให้เพิ่มความร้อนและความดันได้จากหลักวิธีเช่น จากการเผาไหม้ (combustion) จากแหล่งความร้อนภายนอก (external heat) จากการชาร์จประจุ (electric charge) จากคลื่นกระแทก และจากการดันตัวของลูกสูบ (piston compress) ทันทีที่ความดันของแก๊สเบาเพิ่มสูงขึ้นจะกระตุ้นความดันแห่น diaphragm ทันทีไม่ได้ แผ่น diaphragm จะขาดความดันภายในถังเก็บความดันจะขับหรือเร่งความเร็วของกระสุนปืน ดังภาพที่ 2.11 หากประยุกต์ก្នុងของการเคลื่อนที่ของนิวตัน จะสามารถหาความเร็วที่เกิดขึ้นในลำกล้องปืนได้



ภาพที่ 2.11 แผนภาพส่วนประกอบของ Single stage light gas gun

$$m \frac{dv_p}{dt} = m \frac{dv_p}{dx} v_p = PA \quad (2.13)$$

เมื่อ	m คือ น้ำหนักของกระสุน
	v_p คือ ความเร็วของกระสุนปืน ณ ตำแหน่ง x ใดๆ
	P คือ ความดัน
	A คือ พื้นที่หน้าตัดของลำกล้องปืน

หากอนทิเกรตตลอดความยาวของลำกล้องปืน (L) จะได้

$$\frac{mv_{pe}^2}{2} = A \int_0^L P dx \quad (2.14)$$

เมื่อ v_{pe} คือ ความเร็วของกระสุนปืนที่ทางออกของลำกล้องปืน

เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาจะกำหนดให้ \bar{P} มีค่าคงที่ตลอดการเคลื่อนที่ของกระสุนในลำกล้องปืน ซึ่งมีค่าเป็น

$$v_{pe} = \sqrt{2\bar{P} \frac{AL}{m}} \quad (2.15)$$

โดยสมการนี้จะมีค่าความผิดพลาดเนื่องจากสาเหตุหลักคือความเสียดทานระหว่างกระสุนกับภายในลำกล้องปืน และในความเป็นจริงค่าของ \bar{P} จะมีค่าไม่คงที่เนื่องจากการเพิ่มปริมาตรมากขึ้นตามการเคลื่อนที่ของกระสุน ซึ่งความดัน \bar{P} ดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับแก๊สเบาและความดันภายใน Pressure reservoir (P_0) ถ้าพิจารณาเป็นแก๊สอุดมคติ (ideal gas) ซึ่งมีค่าความดันเป็น P_0 และความเร็วเสียง (sound speed) เป็น C ดังนั้นความดันของ P ในขณะแก๊สขยายตัวจะมีความสัมพันธ์เป็น

$$P = P_0 \left(1 - \frac{v_g}{(2/K-1)C} \right)^{2K/(K-1)} \quad (2.16)$$

เมื่อ v_g คือ ความเร็วของการขยายของแก๊ส

K คือ Ratio of the specific heats

ถ้าสมการที่ 2.16 ใช้ในการหาค่าความเร็วแก๊สหลังกระสุน จะได้อัตราส่วนของ P/P_0 จะขึ้นอยู่กับ

$$\frac{v_g(K-1)}{2C} \quad (2.17)$$

จากการนวนการทำงานแก๊สจะขยายตัวจากถังเก็บความดันซึ่งเป็นการแปลงพลังงานที่สะสมภายในถังเก็บความดันเพื่อไปขับหรือเร่งความเร็วของกระสุน ความเร็วสูงสุดของการไหหลงแก๊สจะเกิดขึ้นเมื่อแก๊สแปลงพลังงานทั้งหมดที่มีให้กับการขับดันหรือเร่งความเร็วของกระสุน ซึ่งความดันของแก๊สจะลดลงเป็นศูนย์ โดยที่ความเร็วจะคำนวณได้จาก

$$v_{esc} = \left(\frac{2}{K-1} \right) C \quad (2.18)$$

ค่าความเร็วสูงสุดที่ทางออก คือ Escape velocity (v_{esc}) มีค่าเท่ากับ

$$v_{esc} = \left(\frac{2}{K-1} \right) C = \frac{2}{K-1} \sqrt{\frac{\gamma RT_0}{M}} \quad (2.19)$$

เมื่อ

T_0 คือ อุณหภูมิภายในถังเก็บความดัน

M_{mol} คือ มวลโมเลกุลของแก๊สภายในถังเก็บความดัน

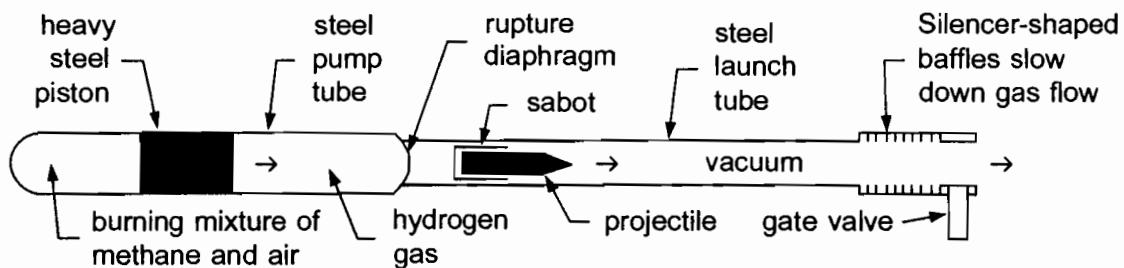
R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (universal gas constant) (สำหรับอากาศ มีค่าเท่ากับ 287.05 J/(kg.K))

ซึ่งความสัมพันธ์นี้แสดงว่า light gas gun จะมีความเร็วสูงกว่าเมื่อใช้แก๊สที่มีค่ามวลโมเลกุลต่ำและแก๊สจะต้องมีอุณหภูมิสูง

2.4.2 ชุดยิงกระสุนแบบใช้แก๊สเบาแบบสองช่วง (two stage light gas gun)

เมื่อใช้ถูกสูบ (piston) กดอัดให้แก๊สที่ใช้ขับกระสุน (driver gas) มีความดันและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ชุดยิงกระสุนแบบนี้จะเรียกว่า ชุดยิงกระสุนแบบใช้แก๊สเบาแบบสองช่วง (two stage light gas gun) ซึ่งเป็นปืนที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง ดังภาพที่ 2.12 แสดงส่วนประกอบพื้นฐานของ piston-powered two-stage light gas gun โดยที่แก๊สเบาถูกบรรจุอยู่ภายในห่อที่มีผนัง

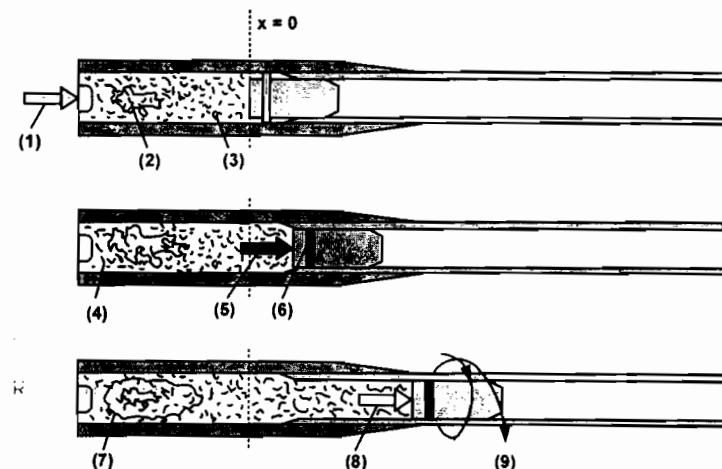
หนาและเรียบซึ่งโดยทั่วไปจะถูกเรียกว่า pump tube โดยที่ด้านหนึ่งจะถูกปิดโดยลูกสูบ (piston) และอีกด้านหนึ่งจะปิดโดย steel diaphragm



ภาพที่ 2.12 แผนภาพส่วนประกอบของ two stage light gas gun

2.4.3 ชุดยิงกระสุนแบบใช้ดินปืน (powder gun)

ชุดยิงกระสุนชนิดนี้จะใช้ชุดปืนทดลองแทนแก๊สซึ่งมีหลักการทำงานคล้ายๆ ใช้แรงของปืนในการขับถูกกระสุนโดยมีดินปืนเป็นเชื้อเพลิง



ภาพที่ 2.13 แผนภาพการทำงานของ powder gun

จากภาพที่ 2.13 สามารถอธิบายการทำงานตามหมายเลขได้ดังนี้

- (1) เริ่มนีการจุดชนวนห้องเผาใหม่
- (2) เริ่มนีการเผาใหม่
- (3) มีแรงดันจากการเผาใหม่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว
- (4) ห้องเผาใหม่เกิดแรงดันประมาณ 14-68 MPa

- (5) กระสุนเริ่มนีการเคลื่อนที่จากอิทธิพลของแรงดัน
- (6) มีแรงต้านการเคลื่อนที่ของกระสุน
- (7) ความคันเริ่มสูงขึ้นจากอัตราการเผาไหม้ที่มากขึ้น
- (8) ลูกกระสุนเคลื่อนที่มากขึ้นและปริมาตรห้องเผาไหม้มากขึ้น
- (9) เกิดแรงหมุนตัวของกระสุนที่เกิดจากแรงดันสูงสุดจากการเผาไหม้สมบูรณ์

2.5 เทคนิคการถ่ายภาพ (Visualization Technique) [51]

วิธีการถ่ายภาพที่นิยมใช้ในการวิจัย สามารถแบ่งออกได้ 3 เทคนิค คือ

2.5.1 การถ่ายภาพชาโดว์กราฟ (Shadowgraph)

2.5.2 การถ่ายภาพไรเรน (Schlieren)

2.5.3 การถ่ายภาพอินเทอร์เฟอโรเมเตอร์ (Interferometer)

โดยทั้ง 3 แบบอาศัยหลักการหักเหของลำแสงเมื่อผ่านแก๊สที่มีความหนาแน่นเปลี่ยนแปลง โดยด้วยการหักเหของแสงจะเป็นพิงก์ชั้นความหนาแน่นของแก๊สดังสมการที่ 2.20

$$n = \text{function} (\rho) \quad (2.20)$$

หรือสามารถประมาณเป็นสมการเด่นตรง คือ

$$n=1+\beta \frac{\rho}{\rho_s} \quad (2.21)$$

เมื่อ

ρ_s = ความหนาแน่นของแก๊สที่ $0^\circ C$ ที่ความดันบรรยายกาศ

β = เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของแก๊ส ดังตารางที่ 2.3

ดังนั้นหากพิจารณาว่า ความหนาแน่นของแก๊สเปลี่ยนแปลงไปในแนวแกน $y(d\rho/dy)$ จะได้ว่า ด้วยการหักเหของแสงก็จะเปลี่ยนแปลงในแนวแกน $y(dn/dy)$ เช่นกัน โดยหลักการถ่ายภาพของแต่ละเทคนิค มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 2.3 ค่าคงที่ของแก๊ส [51]

Gas	β
Air	0.000292
Nitrogen	0.000297
Oxygen	0.000271
Water vapor	0.000254
Carbon dioxide	0.000451

2.5.1 การถ่ายภาพด้วยเทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph)

เมื่อพิจารณาการถ่ายแสงผ่านแก๊สในห้องทดลองแสดงดังภาพที่ 2.14 ลำแสงจะเกิดการหักเหเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของแก๊ส ถ้าทางขอรับแสงเพื่อแสดงภาพที่เกิดจากการหักเหของแสงที่เคลื่อนที่ผ่านแก๊สมาจะพบว่า ลำแสงจะเกิดการหักเหโดยบางส่วนจะรวมกันแสงที่ปรากฏที่ขอจะสว่างมากกว่าปกติ ในขณะที่เมื่อลำแสงกระจายออกจากกัน แสงที่ปรากฏที่จะมีค ดังแสดงในภาพที่ 2.1

ถ้าพิจารณาการเบี่ยงเบนของลำแสงที่แสดงในภาพที่ 2.14 จะพบว่าลำแสงที่ส่องผ่านแก๊สนั้น ถ้าไม่มีเลนส์ที่ทำให้แสงบานกันภาพที่ปรากฏที่ขอจะเห็นแก๊สที่ไหลผ่านนั้นมีขนาดที่ใหญ่กว่าขนาดของจริงที่แก๊สไหลผ่าน ดังนั้นหากใช้เลนส์จะทำให้ภาพที่ขึ้นที่ขอรับภาพมีขนาดเท่ากับขนาดจริง จากสมการของการหักเหของแสงในสมการที่ 2.20 จะพบว่าการถ่ายภาพด้วยเทคนิคชาโคว์กราฟจะไวต่อความหนาแน่นที่เปลี่ยนแปลงดังความสัมพันธ์ $d^2\rho/dy^2$ เช่นเดียวกับค นีหักเหของแสง d^2n/dy^2

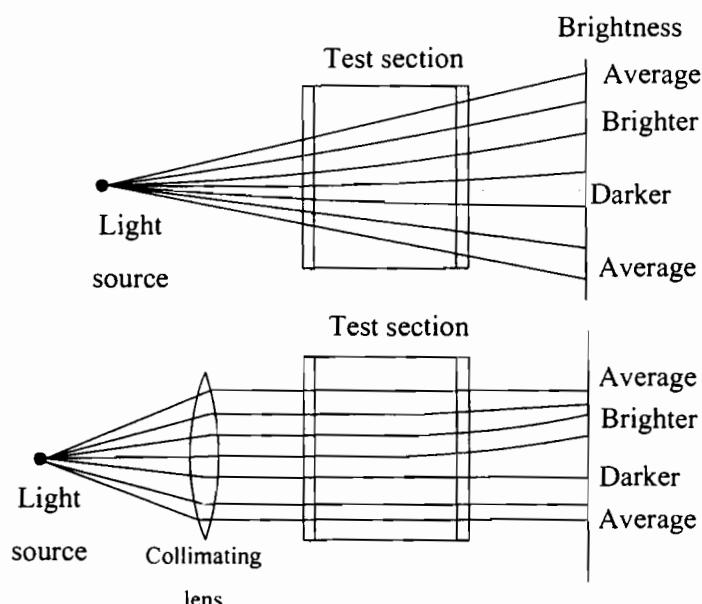
ในธรรมชาตินี้จะสามารถเห็นลักษณะของภาพแบบชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ได้อาทิ แสงแวดล้อมจากหลังคาที่ร้อนในฤดูร้อนทำให้เกิดภาพการไหลของความร้อนถึงแม้ว่าจะไม่มีวันบริเวณหลังคาภาพที่เห็นดังกล่าว คือ ภาพแบบชาโคว์กราฟ โดยที่ดวงอาทิตย์ในภาพนี้เป็นแหล่งกำเนิดของแสง

2.5.2 การถ่ายภาพด้วยเทคนิคไรเรน (Schlieren)

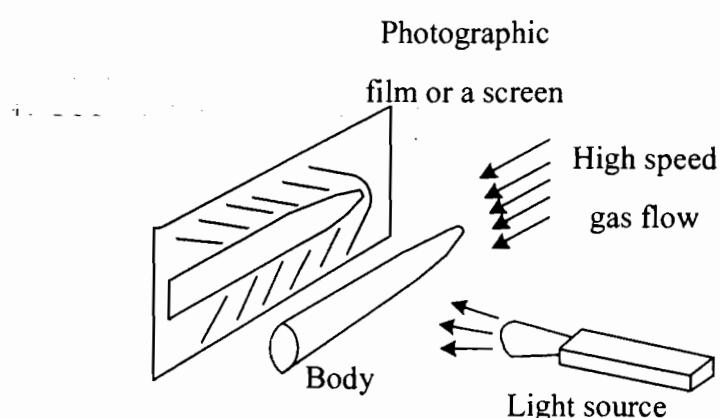
หลักการพื้นฐานของการถ่ายภาพด้วยเทคนิคไรเรน (Schlieren) ดังแสดงในภาพที่ 2.16 โดยแสงจากต้นกำเนิดจะเดินทางผ่านเลนส์ทำให้แสงมีทิศทางบานกันผ่านห้องทดลอง ก่อนที่จะผ่านเลนส์อีกตัวซึ่งทำหน้าที่รวมแสงไปยังจุดไฟกัสรช์ ณ บริเวณนีจีมี (knife-edge) วาง

ติดตั้งอยู่เพื่อทำหน้าที่ในการตัดแสงก่อนที่แสงจะถูกส่องผ่านเลนส์อีกตัวซึ่งทำหน้าที่ฉายแสงบนจอภาพ

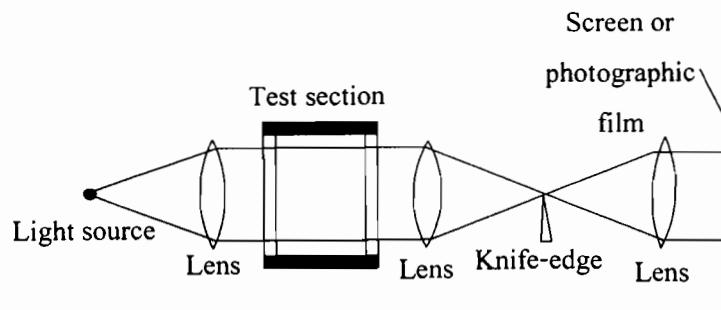
หลักการทำงานของ Knife-edge แสดงดังภาพที่ 2.17 โดย Knife-edge จะทำหน้าที่ตัดแสงที่รบกวนออกไป ลำแสงที่ผ่าน Knife-edge จะมีสว่างมากขึ้นจึงทำให้ภาพที่ปรากฏออกมานั้นมีความคมชัดมากขึ้น



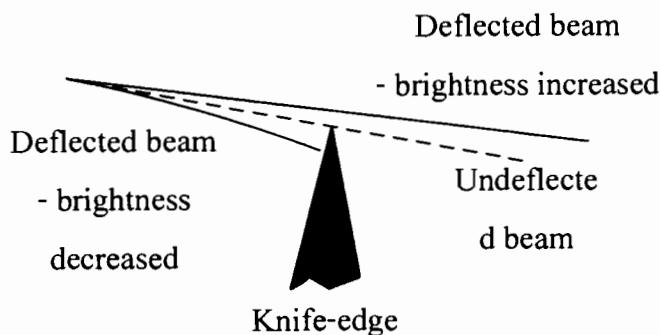
ภาพที่ 2.14 ระบบชาโคว์กราฟ (Shadowgraph system)



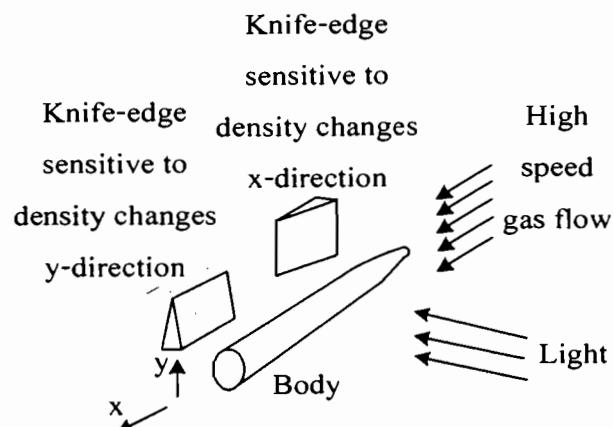
ภาพที่ 2.15 การสร้างภาพของชาโคว์กราฟ (Shadowgraph)



ภาพที่ 2.16 พื้นฐานการจัดระบบชไรเรน (Schlieren)



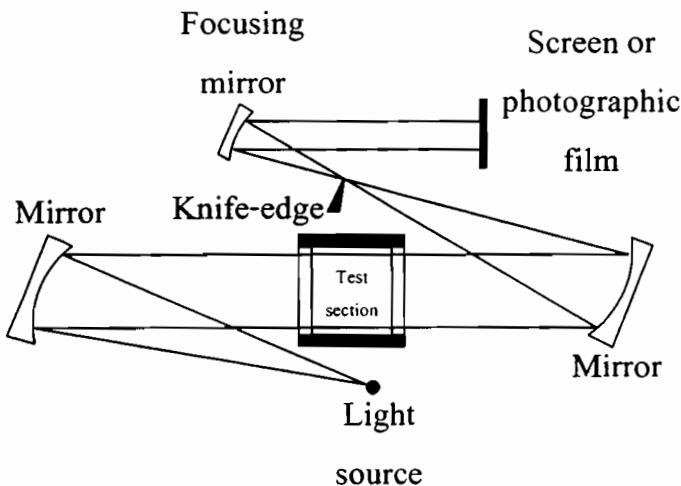
ภาพที่ 2.17 หลักการทำงานของ Knife-edge



ภาพที่ 2.18 ผลจากการเปลี่ยนทิศทางของลมมีด

ภาพที่ 2.18 แสดงผลจากการเปลี่ยนทิศทางของ knife-edge เมื่อต้องการสังเกตการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของแก๊สในแนวแกน y ให้ปรับ knife-edge ให้อยู่ในแนวแกน x และเมื่อต้องการสังเกตการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของแก๊สในแนวแกน x ให้ปรับ knife-edge ให้อยู่ใน

แนวแกน y จากภาพที่ 2.19 เป็นระบบชีโรเรนที่ใช้กระจกแทนเลนส์ถูกนำมาใช้เพื่อช่วยลดขนาดพื้นที่ที่ใช้ในการทดลอง



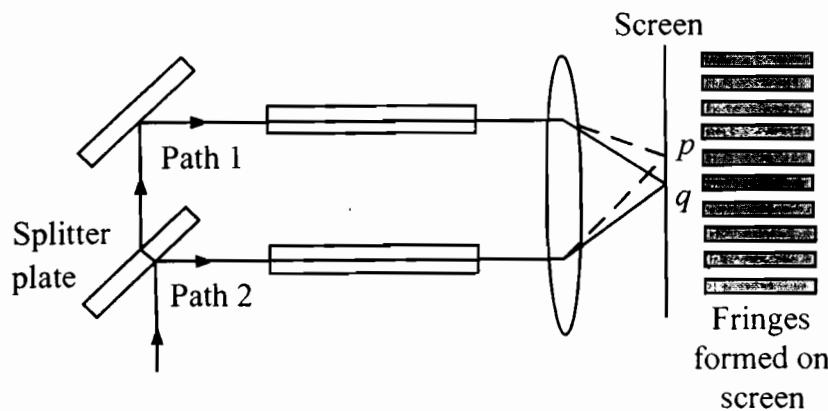
ภาพที่ 2.19 ระบบชีโรเรนกับกระจกสะท้อน (Schlieren system with mirrors)

2.5.3 การถ่ายภาพด้วยเทคนิคoinเทอโฟโรมิเตอร์ (interferometer)

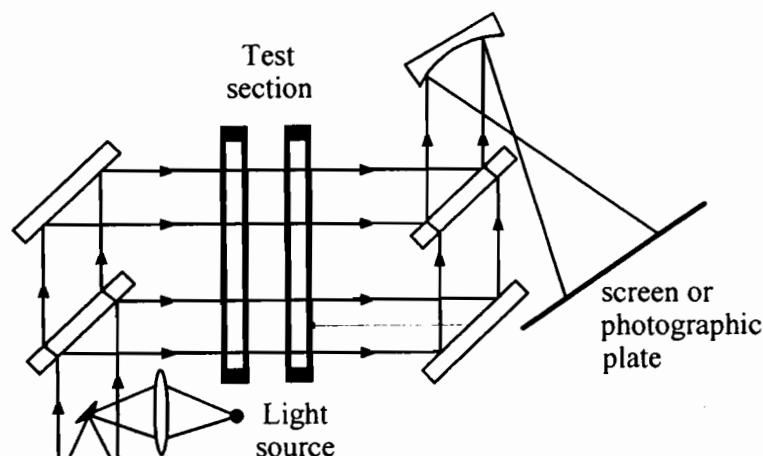
เพื่อให้เข้าใจหลักการทำงานของอินเทอโฟโรมิเตอร์ พิจารณาลำแสงที่แตกออกเป็น 2 ลำโดย splitter plate ดังแสดงในภาพที่ 2.20 ชิ้น splitter plate จะมีคุณสมบัติเป็นกระจกสามารถสะท้อนแสงบางส่วนที่ตัดกรายละเอียดและที่เหลือจะทะลุผ่านไป เกิดการเดินทางของแสงแบ่งออกเป็นสองเส้นทาง หากทำให้แสงทั้งสองขันกัน จะได้ลำแสงสองลำที่มีระยะเดินทางและเฟสที่ต่างกัน ทำให้เกิดชุดของบริเวณมีดและสว่างบนจอรับแสง (Fringes)

เมื่อพิจารณาสิ่งที่เกิดขึ้นหากมีหนึ่งลำแสงวิ่งผ่านแก๊สที่มีความหนาแน่นเปลี่ยนแปลง จะทำให้เวลาในการเดินทางของลำแสงมีความต่างออกไป ดังนั้นความหนาแน่นของแก๊สที่แตกต่างกันตลอดเส้นเดินทางของลำแสง เป็นผลให้รูปแบบชุดของแสงมีดและสว่างเปลี่ยนแปลงด้วย จากหลักการนี้ การวัดความแตกต่างของความหนาแน่นแก๊ส สามารถทำได้ด้วยการวัดรูปแบบของแสงมีดและสว่างจากภาพนั้นเอง

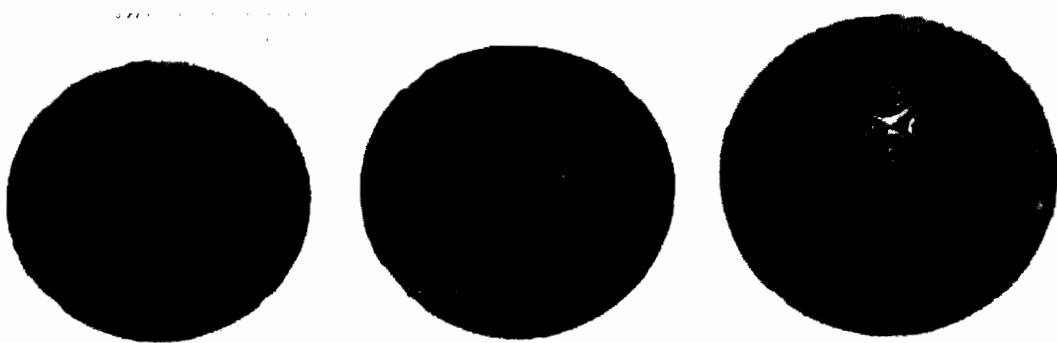
โดยส่วนใหญ่ระบบอินเทอโฟโรมิเตอร์ มักจะใช้กระจกแทนการใช้เลนส์ ชิ้นรูปแบบแสดงในภาพที่ 2.21 ชิ้นภาพที่เกิดจากการให้แสงในลักษณะเหมือนกันแต่มีเทคนิคการถ่ายภาพต่างกันจะได้ภาพที่ต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.22



ภาพที่ 2.20 ระบบอินเทอร์ฟอยร์มิเตอร์ขั้นพื้นฐานโดยการใช้ beam splitter



ภาพที่ 2.21 Mach-Zehnder interferometer



(a) shadowgraph photograph (b) schlieren photograph (c) interferometer photograph

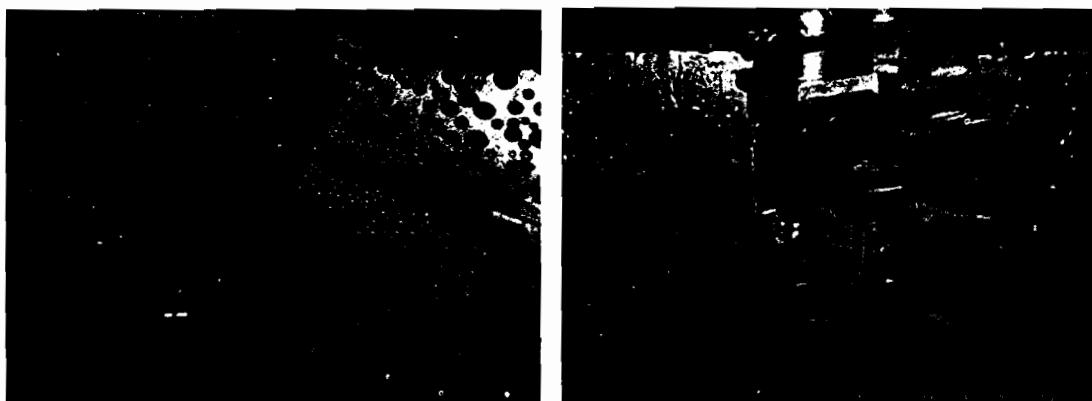
ภาพที่ 2.22 การถ่ายภาพของการไหลแบบเดียวกันด้วยเทคนิค (a) shadowgraph (b) schlieren และ (c) interferometer [51]

2.6 การประยุกต์ใช้ลำพูงความเร็วสูง (High-speed liquid jet)

ปัจจุบันได้มีการนำเอาลำพูงความเร็วสูงมาประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.6.1 การตัดโดยลำพูง (Water jet cutting technology)

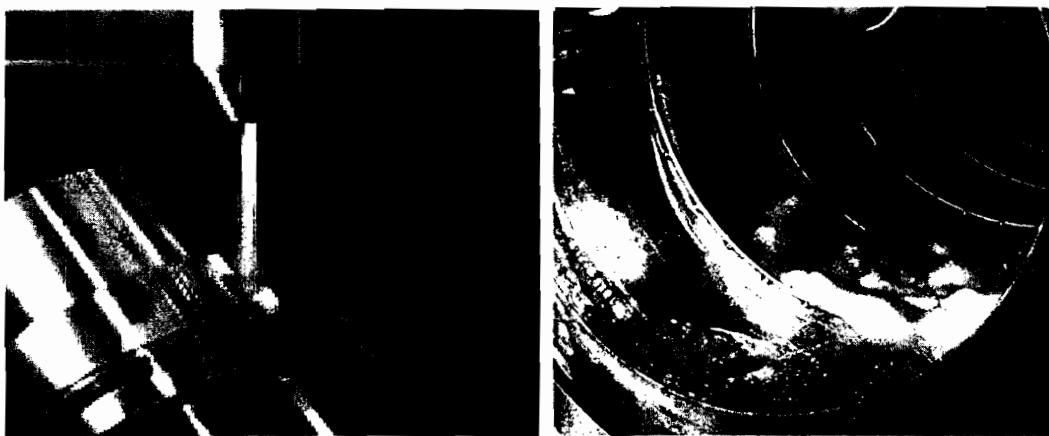
ในงานด้านการตัด โดยลำพูง (water jet cutting) พบว่าวัสดุที่หลุดออกเกิดจากการกัดเซาะของลำพูง ที่ความเร็วเหนือเสียง (supersonic) ซึ่งไม่ได้เกิดจากความคันแต่เกิดจากความเร็วของกระแสน้ำที่กัดเซาะเอาอนุภาคหรือเกรนของวัสดุให้หายไป โดยความเร็วของลำพูงจะเกิดจากความคันที่อยู่ภายในหัวฉีด ซึ่งหัวฉีดจะมีขนาดเล็กมาก โดยทั่วไปความคันที่ใช้ในอุตสาหกรรมจะมีความคันประมาณ 40 ksi ซึ่งทำให้ได้ลำพูงที่ความเร็วเท่ากับ Mach No.2 และที่ความคันประมาณ 60 ksi จะให้ความเร็วของน้ำที่ประมาณ Mach No.3



ภาพที่ 2.23 การตัดโดยลำพูง [52, 53]

2.6.2 การทำความสะอาดโดยลำพูง (Water jet cleaning technology)

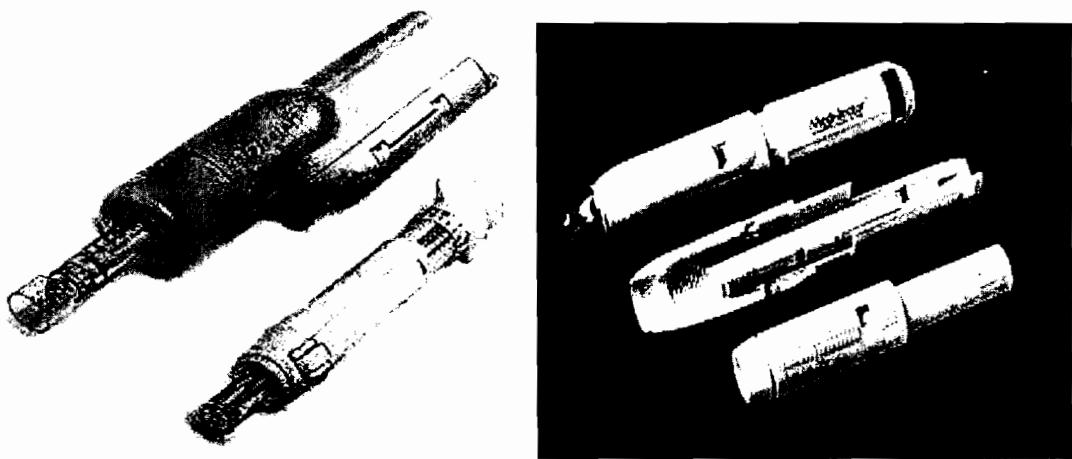
ในงานของการทำความสะอาดโดยลำพูง (water jet cleaning) เป็นเทคโนโลยีที่ประยุกต์ใช้ลำพูงความเร็วสูงเพื่อทำความสะอาดวัสดุมีหลักการคล้ายกับการตัดโดยลำพูง (water jet cutting) โดยการใช้ความเร็วของลำพูงที่ความเร็วเหนือเสียง (supersonic) เพื่อที่จะขจัดสิ่งสกปรกให้ออกไปได้อย่างรวดเร็ว แต่มีความแตกต่างจากการตัดโดยลำพูง (water jet cutting) ตรงที่การใช้แรงคันของน้ำเพื่อผลิตลำพูงออกมาระลักษณะของหัวฉีดที่แตกต่างกัน โดยใช้แรงคันของน้ำอยู่ที่ประมาณ 1,500-3,500 psi



ภาพที่ 2.24 การทำความสะอาดโดยถ่ายผ่าน [54]

2.6.3 การฉีดยาแบบไม่ต้องใช้เข็ม (Needleless technology)

ปัญหาของเข็มฉีดยานั้นมีมากน้อย โดยเฉพาะในประเทศไทยกำลังพัฒนาและประเทศไทยอยู่พัฒนา ไม่ว่าจะเป็นการขาดแคลนตัวอุปกรณ์เองขาดความพิถีพิถันเรื่องความสะอาดและสุขาอนามัยประมาณ 30% ของจำนวนครั้งที่มีการฉีดยานั้น ไม่ปลอดภัย นอกจากนี้ยังมีรายงานการติดเชื้อจากเข็มฉีดยาที่ไม่สะอาด ส่งผลถึงขั้นเสียชีวิตอีกเป็นจำนวนมากถึง 1.3 ล้านคนทั่วโลก แต่ถึงอย่างไรเข็มฉีดยา ก็ยังเป็นสิ่งจำเป็นในการป้องกัน (วัคซีน) และรักษาโรค ในบางประเทศศักดิ์อุบัติที่มีอุปกรณ์ทางการแพทย์มีอยู่อย่างจำกัด ด้วยความรู้เท่าไม่ถึงการณ์และความเพิกเฉย เข็มฉีดยาถูกนำมาใช้ซ้ำกับผู้ป่วยหลายคน คนโดยปราศจากการผ่าเชื้อ (ที่ควรจะต้องผ่าตัดความร้อน 121 °C เป็นเวลา 20 นาที ในแต่ละครั้งที่นำมายัง) นอกจากนี้เข็มที่ใช้แล้วยังถูกกำจัดอย่างไม่เหมาะสม ซึ่งที่มาของแนวคิดเข็มฉีดยาแบบไม่ต้องใช้เข็มหรือ (needle-free injectors) (NFIS) ซึ่งมีหลักการทำงานอย่างเดียวกันแต่ไม่ต้องพึ่งเข็มแต่ใช้หัวฉีด (nozzle orifice) ขนาดเล็กผ่านศูนย์กลาง ตั้งแต่ 76-360 μm เป็นตัวสำคัญของยาแทน ซึ่งสามารถส่งผ่านตัวยาเข้าไปได้ผ่านหนัง ไปสู่ชั้นไขมันหรือกล้ามเนื้อได้อย่างจำกัดด้วยความเร็ว 100 m/s (ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของผิวนัง รวมถึงบริเวณที่ฉีดด้วย) นอกจากนี้ การกำจัดที่เป็นเรื่องง่ายไม่ต้องใช้ถังเก็บขยะแหลมคม (sharps container) ไม่ต้องกังวลเรื่องการสเตอริไลซ์ผ่าเชื้อที่ไม่เหมาะสมหรือการใช้เข็มฉีดยาร่วมกัน

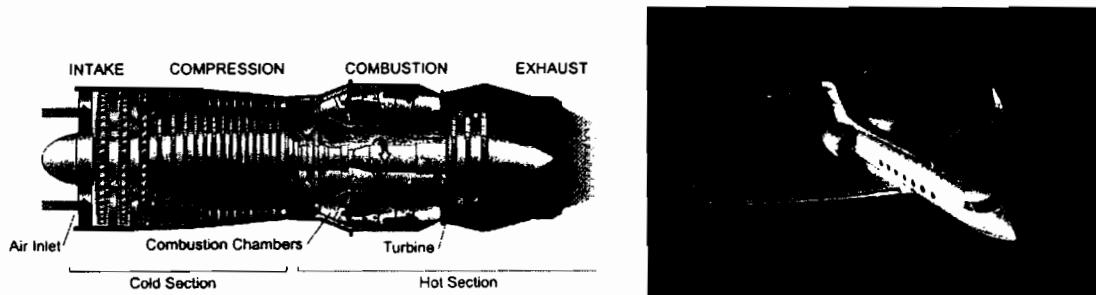


ภาพที่ 2.25 เจ็มจีดข่ายแบบไม่ต้องใช้เข็ม [55]

2.6.4 เครื่องยนต์เจ็ท (Jet engine technology)

จากภาพที่ 2.26 แสดงเครื่องยนต์เจ็ท ซึ่งเครื่องยนต์เจ็ทเป็นเครื่องจักรที่ถูกออกแบบมาเพื่อให้ผลิตหรือสร้างแก๊สที่มีความเร็วสูงให้กับผ่านช่องที่กำหนด โดยเครื่องยนต์เริ่มต้นการหมุนคอมเพรสเซอร์ (compressor) ด้วยสตาร์ทเตอร์ (starter) สามารถจัดภายนอกเครื่องยนต์ก็จะถูกดูดเข้าเครื่องยนต์ คอมเพรสเซอร์ก็จะทำงานกับอากาศที่เข้ามาและก็จะส่งอากาศที่อัดผ่านคอมเพรสเซอร์นี้ ต่อไปยังส่วนของห้องเผาไหม้ ซึ่งจะมีความดันเพิ่มขึ้นมากถึง 12 เท่าของอากาศ ก่อนที่จะผ่านเข้าเครื่องยนต์ในส่วนของห้องเผาไหม้ ตัวจุดระเบิด (igniter) ก็จะทำการจุดเครื่องยนต์ โดยจุดส่วนผสมของน้ำมันเชื้อเพลิงและอากาศในห้องเผาไหม้ หัวจุดไฟจะมีหนึ่ง หรือสองหัว ซึ่งก็คล้ายกับหัวเทียนในรถยนต์ เมื่อเครื่องยนต์ติดหรือทำงานแล้วและคอมเพรสเซอร์หมุนด้วยความเร็วที่เพียงพอตามที่กำหนดแล้วสตาร์ทเตอร์และตัวจุดระเบิดก็จะถูกปิดหรือเลิกใช้ ต่อจากนั้นเครื่องยนต์ ก็จะทำงานของมันเอง โดยไม่ต้องได้รับความช่วยเหลือ จากสตาร์ทเตอร์และตัวจุดระเบิดอีกต่อไป ทราบเท่าที่น้ำมันเชื้อเพลิงและอากาศผสมในอัตราส่วนที่ถูกต้อง ยังไห้เดินทางไป ใหม้อ่างต่อเนื่องเพียง 25% ของอากาศ ที่มีส่วนใช้ในการเผาไหม้ที่ห้องเผาไหม้ส่วนอากาศที่เหลือ ก็จะผสมกับแก๊สไอเสียหรือแก๊สที่ผ่านการเผาไหม้ เพื่อการลดอุณหภูมิของแก๊สไอเสียหรือแก๊สที่ผ่านการเผาไหม้ก่อนที่แก๊สไอเสียจะเข้าไปยังส่วนของกังหัน (turbine) ส่วนของกังหันก็จะนำเอาพลังงานจากการแสงของแก๊สที่ไห้ พลังงานส่วนใหญ่ก็จะถูกนำไปใช้ในการหมุนคอมเพรสเซอร์และอุปกรณ์ต่างๆ แรงขับของเครื่องยนต์ (thrust) ก็มาจากการเอามวลของอากาศจำนวนมากจากด้านหน้าของเครื่องแล้วก็คืนมันออกไปด้วยความเร็วที่สูงมากๆ เมื่อเทียบกับความเร็วเมื่อตอนที่เข้ามาที่ด้านหน้า หรือที่ คอมเพรสเซอร์หากสามารถดูดน้ำมันที่ความเร็วสูงมาก

เท่าใดก็จะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ดีขึ้นเท่านั้น ส่งผลให้เครื่องบินที่ติดตั้งเครื่องยนต์เจ็ทสามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยความเร็วสูงขึ้นนั่นเอง

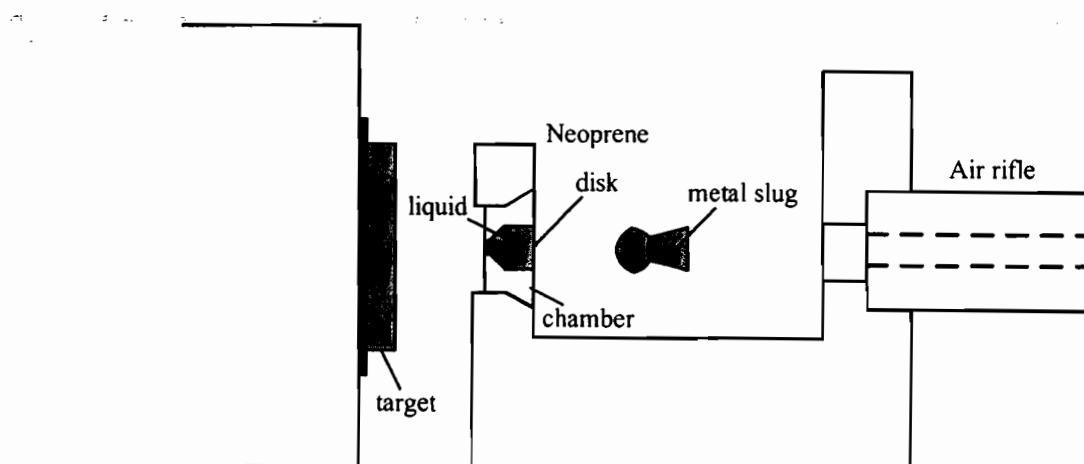


ภาพที่ 2.26 เครื่องยนต์เจ็ท [56]

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับลำพุ่งความเร็วสูง (High-speed liquid jet)

ปัจจุบันได้มีนักวิจัยจำนวนมาก ได้พยาบານศึกษาเกี่ยวกับลำพุ่งความเร็วสูง โดยศึกษาเกี่ยวกับคุณลักษณะและความเร็วของลำพุ่งซึ่งมีรายละเอียดพอสังเขปดังนี้

ในปี ก.ศ.1958 F.P. Bowden และ J.H. Brunton. [37] ได้คิดค้นเทคนิคพิเศษในการผลิตลำพุ่งความเร็วสูง โดยวิธีนี้จะยิงกระสุนความเร็วสูง (high-speed projectile) เข้าไปกระแทกกับของเหลวปริมาตร 0.1 cm^3 ชั่งบรรจุอยู่ในหัวฉีด (nozzle) ที่ทำด้วย stainless steel ถูกผนึกด้วยแผ่น Neoprene ดังแสดงในภาพที่ 2.27 จากการทดสอบพบว่า ลำพุ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1-2 mm และยาวหลาย mm เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ความดันของของเหลวนั้นจะมีค่าสูงขึ้นหลังจากนั้นของเหลวที่จะฉีดออกมานานาหัวฉีดด้วยความเร็วสูง ความเร็วของลำพุ่งประมาณ 1,200 m/s



ภาพที่ 2.27 Bowden and Brunton method [37]

ในปี ค.ศ.1992 H. H. shi, et al. [15] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับลำพุ่งของเหลวความเร็วสูง รวมทั้งวิธีการกำเนิดลำพุ่งและคลื่นกระแทก (shock wave) ของลำพุ่ง และความเป็นไปได้ในการจุดติดคิวบิตัวเอง (auto-ignition) ของลำพุ่งน้ำมันดีเซลความเร็วเหนือเสียง ซึ่งใช้เทคนิคการผลิตลำพุ่ง โดยที่จะยิงกระสุนปืนมากระแทกกับของเหลวโดยตรง ซึ่งใช้วัสดุแบบ hyperbolic และเชื่อมต่อ กับหัวสูบ ที่สามารถดูดออกได้ ความเร็วสูงสุดของลำพุ่งเท่ากับ 4.5 km/s ถึงแม้ว่าหัวฉีดจะทำจากไทเทเนียมแต่ก็ไม่สามารถที่จะทนต่อความร้อนที่สูงมากๆ ที่เกิดจากการ กระแทกของกระสุนปืนซึ่งทำให้เกิดความเสียหายหลังจากทดลองยิงไม่กี่ครั้ง นอกจากนี้ยังได้ทำการเปรียบเทียบการกำเนิดลำพุ่งจากการกระแทก 2 วิช คือ แบบกระแทกแบบขับโดยตรง และแบบ กระแทกขับผ่านตัวกลาง ซึ่งพบว่าความเร็วของลำพุ่งที่ใช้วิธีแบบกระแทกขับผ่านตัวกลางจะช้ากว่า และจะใช้เวลามากกว่าแบบกระแทกแบบขับโดยตรง

ในปี ค.ศ.1995 T. Obara, et al. [19] ได้ทำการทดลองการกระแทกของลำพุ่งบน ของเหลวและของแข็ง ซึ่งในการทดลองนี้ใช้ลำพุ่งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 mm จากชุดทดลอง single impact jet ความเร็วในการกระแทกมีค่าเท่ากับ 600 m/s ลำพุ่งจะกระแทกบนพื้นผิวของน้ำ และ Polymethyl-methacrylate (PMMA) ที่วางห่าง 15 mm ที่ทางออกหัวฉีด และวัดความดันโดยใช้ Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Film และถูกถ่ายภาพโดยใช้ image-converter high-speed camera. จากภาพแสดงให้เห็นการเกิดคลื่นกระแทก (shock wave) คาวิเตชัน (cavitation) และฟองอากาศ จาก การทดลองสรุปได้ว่า จากการกระแทกระหว่างลำพุ่งกับน้ำจะทำให้เกิดกลุ่ม โพรงอากาศใน ของเหลวซึ่งจะเกิดขึ้นและบุบตัวอย่างรวดเร็วซึ่งอาจจะเป็นส่วนที่ทำให้เกิดความเสียหายน้ำสุด ส่วนลำพุ่งที่กระแทกบนพื้นผิวของ PMMA ทำให้พื้นผิวเกิดเป็นรู ซึ่งความเสียหายนั้นจะขึ้นอยู่กับ ขนาดของลำพุ่ง และค่าความดันที่วัด โดยใช้ PVDF นั้นจะสอดคล้องกับสมการ (water-hammer)

ในปี ค.ศ.2002 K. Pianthong, et al. [44] ได้ศึกษาคุณลักษณะลำพุ่งน้ำและน้ำมันดีเซล ความเร็วสูง (high-speed liquid jet) โดยใช้ชุดทดลองที่เรียกว่า vertical single-stage powder gun ความเร็วกระสุนปืนและมวลของดินปืนที่มีผลต่อความเร็วลำพุ่ง นอกจากนี้ยังศึกษาความเร็วลำพุ่งที่ พุ่งออกและรูปทรงของหัวฉีดที่เป็นรูปทรงกรวยตรง และมนูที่แตกต่างของกรวยอิกคิวบิต เพื่อใช้ใน การเปรียบเทียบกัน รูปภาพของลำพุ่งดีเซลเหนือเสียง (ความเร็วประมาณ 2000 m/s) ซึ่งถูกถ่ายภาพ โดยวิธีที่เรียกว่า เทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) โดยภาพที่ได้จะแสดงให้เห็นในแต่ละช่วง ของการเกิดลำพุ่งความเร็วสูง นอกจากนี้ยังศึกษาลักษณะของลำพุ่งและความเป็นไปได้ในการเกิด การจุดติดคิวบิตัวเอง (auto-ignition) และการทดลองนี้ได้มีการใช้ห้องบรรยากาศดัน (pressure relief section) เพื่อระบายอากาศด้านหน้าของกระสุนปืนที่ถูกอากาศอัด จากผลการทดลองสรุปได้ว่า สามารถผลิตลำพุ่งความเร็วสูงสุดที่ได้เท่ากับ คือ 2,195 m/s และ 2,150 m/s จากลำพุ่งน้ำมันดีเซล

และน้ำ ตามลำดับ เมื่อใช้หัวฉีดที่แข็งขึ้นความเร็วสูงสุดของที่ลำพุ่งน้ำมันดีเซลได้ประมาณ 2,500 m/s แต่หัวฉีดแต่ละหัวจะการทดลอง อย่างไรก็ตามส่งผลดีสำหรับแกนลำพุ่งและเห็นเป็นละของ หยดน้อยกว่าอย่างเห็นได้ชัดและมีการกระจายเป็นไอรอบๆแกนลำพุ่ง และไม่พบรากเกิดการจุดติด ด้วยตัวเอง

ในปี ค.ศ.2003 K. Pianthong, et al. [45] ได้ศึกษาคุณลักษณะลำพุ่งน้ำและดีเซลที่มี ความเร็วเหนือเสียง (supersonic liquid jet) โดยลำพุ่งความเร็วสูงถูกผลิตจากชุดทดลองที่เรียกว่า single-stage powder gun ที่สร้างขึ้นมาใช้งานในแนวตั้ง โดยในการศึกษานี้คุณลักษณะและ พฤติกรรมของลำพุ่งความเร็วเหนือเสียงถูกถ่ายภาพโดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพ ที่เรียกว่า เทคนิค ชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) โดยภาพจากผลการทดลองที่ได้เป็นลำพุ่งความเร็วเหนือเสียง (ความเร็วลำพุ่งประมาณ 2,000 m/s) ระหว่างรูปทรงหัวฉีดที่ใช้กับพฤติกรรมของลำพุ่งที่ฉีดใน อากาศ จากผลการทดลองพบว่าลักษณะพฤติกรรมของลำพุ่ง ลักษณะของ shock wave และรูปร่าง ของลำพุ่งเป็นผลมาจากการความเร็วที่สามารถผลิตได้ และรูปทรงของหัวฉีดที่แตกต่างกัน กระบวนการ เกิดลำพุ่งจะถูกตรวจสอบโดยใช้การวิเคราะห์คลื่นกระแทกที่ 1 มิติ ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าเป็น ที่ยอมรับจากผลการทดลองมุมของคลื่นกระแทกของลำพุ่ง ได้มาจากภาพถ่ายชาโคว์กราฟการ คำนวณโดยใช้ CFD ใช้เบริบันเทียบกับ มุมของคลื่นกระแทกสามารถยืนยันได้จากการวัดความเร็ว ใน การทดลอง และคลื่นกระแทกของลำพุ่งดีเซลความเร็วเหนือเสียง 2,000 m/s ที่สภาวะอากาศ หรือ อุณหภูมิสูงถึง 110 °C ทำให้เกิด auto-ignition และที่ช่วง cetane number 50 – 100 จะไม่พบราก เกิด auto-ignition

ในปี ค.ศ.2007 A.Matthujak, et al. [46] ได้ศึกษาการเกิดลำพุ่งความเร็วสูง (high-speed liquid jets) โดยใช้วิธีการผลิตลำพุ่งความเร็วสูงที่เรียกว่า impact driven method โดยใช้เครื่องมือที่ เรียกว่า vertical two-stage light gas gun ที่ออกแบบและสร้างขึ้น นอกจากขั้นศึกษาคุณลักษณะของ ลำพุ่งแล้วยังได้ทำการวัดความดันของเหลวในหัวฉีดอีกด้วย โดยเครื่องมือวัดความดัน (optical fiber pressure transducer) มีขนาดเดือนผ่าศูนย์กลาง 0.1 สองเข้าไปในหัวฉีด ในการทดลองนี้ใช้อัลกิลิกใน การสร้างหัวฉีดมีขนาด $10.6 \text{ mm} \times 10.6 \text{ mm}$ เพื่อสังเกตและถ่ายภาพโดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบ holographic interferometric และใช้การถ่ายภาพความเร็วสูง (high speed video-recording) ร่วมกับ การถ่ายภาพด้วยเทคนิคการถ่ายภาพแบบชาโคว์กราฟ จากการทดลองที่ได้จากการสังเกตจากการ ถ่ายภาพด้วยเทคนิคชาโคว์กราฟและเบริบันเทียบกันของ น้ำ, น้ำมันดีเซล น้ำมันไบโอดีเซล น้ำมันก๊าซและน้ำมันเบนซิน ความเร็วจะอยู่ในช่วง 1,300 m/s ถึง 2,300 m/s นอกจากนี้ยังพบว่า ลำพุ่งที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นการฉีดแบบชั้น (pulse) อย่างต่อเนื่องซึ่งทำให้เห็นคุณลักษณะที่แตกต่างกัน นอกจากรูปแบบนี้ยังได้ทำการศึกษาการเกิดการจุดติดด้วยตัวเอง (auto-ignition) ของลำพุ่งน้ำมันทั้ง 5 ชนิด ใน

อาจาศ ถึงแม้ว่าจะเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นอยู่ในระดับสูงเพียงพอเพื่อทำให้เกิดการจุดติดควยตัวเอง ซึ่งจากการทดลองของลำพูงน้ำมันทั้ง 5 ชนิด นั้นเงื่อนไขความเร็วของลำพูงเพียงอย่างเดียวนั้นไม่เพียงพอที่จะสามารถทำให้เกิดการจุดติดควยตัวเองได้ซึ่งจากการวัดความดันและการสังเกตโดยเทคนิคการถ่ายภาพแบบ holographic interferometric พบว่าคลื่นกระแทกและคลื่นสะท้อนภายในหัวฉีดได้รวมตัวกันเป็นเหตุผลหลักที่ทำให้เกิดคลื่นกระแทกและลำพูงแรกที่พุ่งออกมาจากหัวฉีดสามารถวัดความดันได้เท่ากับ 12.4 GPa จากการกระแทกของกระแสปืนที่ปะทะกับของเหลวในหัวฉีดที่ 300 m/s

ในปี พ.ศ.2550 วิรະพันธ์ สีหานาม และคณะ [48] ได้ศึกษาคุณลักษณะพื้นฐานของลำพูงเชือเพลิงความเร็วสูง โดยใช้การคำนวณของไอลคอมพิวเตอร์ (CFD) ในการจำลองการฉีดของน้ำมันก้าดโดยในแบบจำลองประกอบด้วยของไอล 2 ชนิด คือ น้ำมันก้าด และอากาศ ความเร็วเริ่มแรกของเชือเพลิงอยู่ที่ 1,300 m/s โดยลำพูงจะฉีดออกสู่อากาศที่อยู่นิ่ง โดยการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของของไอลจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา ผลการศึกษาจาก CFD และการทดลองให้ผลใกล้เคียงกัน การศึกษานี้สนใจพิจารณา率ะหว่างอากาศและความเร็วของลำพูง ผลจากการทดลองพบว่าลำพูงจะเคลื่อนที่ช้าลงและอัตราการแพร่กระจายอากาศลดลงหลังจากลำพูงเคลื่อนที่ไปได้ 200 μs เมื่อจากการแตกตัวของหยดน้ำเชือเพลิงและอากาศ นอกจานนี้แล้วแรงด้านจากอากาศก็เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ลำพูงมีความเร็วลดลงเช่นกัน ผลการศึกษาทำให้เราเข้าใจคุณลักษณะของลำพูงเชือเพลิงความเร็วสูงได้ดียิ่งขึ้นและข้อมูลที่ได้อธิบายเป็นรากฐานสำหรับการพัฒนาในระดับต่อไป

จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับลำพูงความเร็วสูงที่ผ่านมาพบว่า การศึกษาคุณลักษณะของลำพูงความเร็วสูงนั้นจะเป็นการศึกษาในกรณีที่ฉีดลำพูงเข้าไปในอากาศหรือสถานะแก๊สเท่านั้น ซึ่งต่อมาในปี ค.ศ.1996 H. Soyama, et al. [43] ได้ศึกษาคุณลักษณะของลำพูงที่ฉีดในน้ำโดยพบว่ามี คavitaiton (cavitation) เกิดขึ้นอย่างรุนแรงรอบๆลำพูง ซึ่งคุณลักษณะของลำพูงถูกถ่ายภาพโดยใช้วิธี shadowgraph-type และ reflective-type ร่วมกับแหล่งกำเนิดแสง xenon flash ในกรรมการทดลองนี้ใช้หัวฉีด 3 แบบ คือ horn nozzle, canonical nozzle และ cylindrical nozzle ลำพูงที่ถูกถ่ายภาพได้จะนำมาศึกษาอย่างละเอียด และทำการวัดความดันกระแทกโดยใช้ Polyvinylidene Fluoride Film (PVDF) จากภาพถ่ายทำให้เห็นความแตกต่างระหว่างลำพูงที่ฉีดในอากาศกับลำพูงที่ฉีดในน้ำ โดยคavitaiton (cavitation) ที่เกิดขึ้นจากลำพูงที่อยู่ในน้ำทำให้เกิดพลังการกัดกร่อนจากการกระแทกโดยตรงของตัวลำพูงซึ่งทำให้ความแข็งแรงของวัสดุลดลง ดังนั้นพฤติกรรมการกระจายตัวของลำพูง ความเร็วสูงที่อยู่ในน้ำสามารถนำมาอธิบายถึงการกัดกร่อนที่รุนแรง เพื่อนำไปพิจารณาหารือวิธีการที่จะทำให้พฤติกรรมการกระจายตัวของลำพูงความเร็วสูงที่เกิดขึ้นนั้นนำมาใช้ประโยชน์มากที่สุด จากการทดลองสรุปได้ว่าลักษณะของลำพูงที่ฉีดในน้ำจะทำให้เกิดพฤติกรรมคavitaiton และ

ลำพูงที่ฉีดในน้ำมีค่าสูงสุด คือ horn nozzle และค่าต่ำสุด คือ canonical nozzle และพฤติกรรมของลำพูงที่เกิดขึ้นไม่แน่นอนเนื่องมาจากรูปแบบของหัวฉีด

ในปี 2009, K. Otani. et al. [47] ได้ศึกษาคุณลักษณะของลำพูงในน้ำโดยผลิตลำพูงจาก Ho: YAG Laser โดยศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการเจาะหินทรายให้น้ำ ด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพแบบชาโดว์กราฟ (Shadowgraph) จากภาพที่ได้พบว่า ความเร็วของลำพูงมีค่าประมาณ 40 m/s นอกจากนี้ยังวัดความดันกระแทกที่เกิดขึ้น โดยใช้ PVDF needle hydrophone พบว่า ความดันของคลื่นกระแทก (shock wave) มีค่าประมาณ 22.7 MPa และพบการบุบตัวของ water vapor bubble ที่ทำให้เกิดคลื่นกระแทก (shock wave) นอกจากนี้ยังพบว่าลำพูงที่ผลิตได้สามารถเจาะแผ่นหินทรายให้น้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากการวิจัยที่ผ่านมา พบว่าความเร็วของลำพูงในน้ำที่ศึกษานั้นมีความเร็วต่ำ เนื่องจากข้อจำกัดของเทคนิคในการผลิตลำพูง ดังนั้นคุณลักษณะของลำพูงความเร็วสูงในของเหลวจึงยังไม่ได้ทำการศึกษาและอธิบายอย่างชัดเจน ดังนั้นการศึกษานี้จึงเกิดความคิดในการศึกษาคุณลักษณะของลำพูงความเร็วสูงที่ฉีดในของเหลว (น้ำ) เพื่อศึกษาคุณลักษณะของลำพูง เช่น ลักษณะของลำพูง ความเร็วของพูง (jet velocity) ระยะการพูงเข้าไปในของเหลว (penetration distance) เป็นต้น

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีทำการทดลอง

3.1 ชุดทดลองยิงกระสุนปืนความเร็วสูง

ในการศึกษานี้กระสุนปืนความเร็วสูงที่ใช้ในการผลิตลำพูงความเร็วสูงด้วยเทคนิค Impact driven method ดังภาพที่ 3.1 จะถูกยิงจากชุดทดลองที่เรียกว่า Horizontal single stage powder gun (HSSPG) ที่ถูกสร้างขึ้นในแนวนอน ดังภาพที่ 3.2 ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญ 5 ส่วน คือ

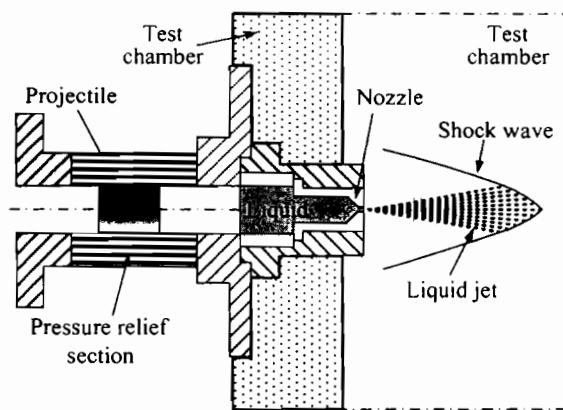
3.1.1 ชุดปล่อยกระสุนปืน (launcher หรือ powder gun) ทำหน้าที่คล้ายปืน โดยเป็นตัวขับดันกระสุนปืน ซึ่งแรงขับเกิดจากการจุดระเบิดของดินปืนในปลอกกระสุนประกอบด้วยเข็มแทงชานวน (firing pin) ทำหน้าที่กระแทกชานวน (primer) ที่อยู่ส่วนท้ายของปลอกกระสุน (cartridge) ซึ่งบรรจุดินปืนภายใน โดยดินปืนที่ใช้เป็นดินปืนชนิดไร้ควัน (smokeless powder) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก)

3.1.2 ท่อส่งกระสุนปืน (launch tube) ทำหน้าที่คล้ายลำกล้องปืน ใช้ควบคุมทิศทางในการขับกระสุนปืนและเพิ่มความเร็วของกระสุนปืนก่อนที่จะไปชนหัวระนาบความดัน มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกเด็นผ่าศูนย์กลางภายใน 8 mm ยาว 1.5 m ที่ส่วนปลายด้านหนึ่งของท่อจะยึดติดชุดปล่อยกระสุนปืน (launcher) อีกด้านยึดติดกับท่อระบบความดัน (pressure relief section)

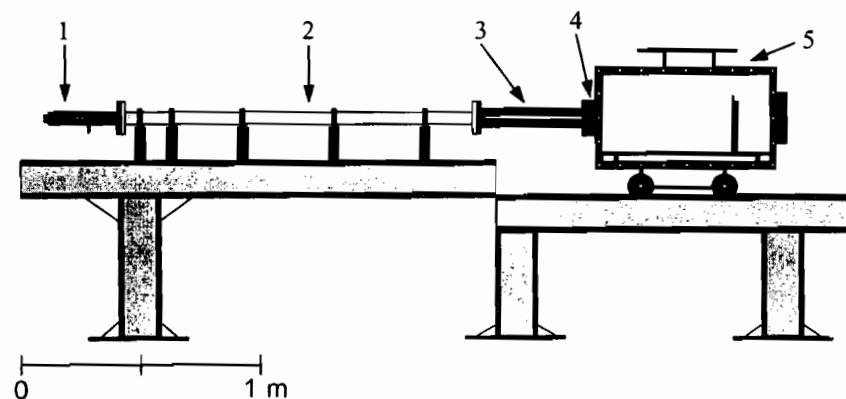
3.1.3 ท่อระบบความดัน (pressure relief section) ทำหน้าที่ระบายน้ำแรงอัดอากาศที่อยู่ส่วนหน้าของกระสุนปืนที่ถูกอัดในท่อ เพื่อลดแรงต้านและแรงอัดภายในท่อส่งกระสุนปืนและป้องกันอากาศกระแทกของเหลวในหัวฉีดก่อนการกระแทกของกระสุนปืน มีความยาว 40 cm เจาะเป็นช่องขนาด 3 mm ตามแนวยาวทั้ง 4 ด้าน

3.1.4 ส่วนประกอบหัวฉีด (nozzle assembly) จะประกอบไปด้วยหัวฉีดและชุดยึดหัวฉีด ซึ่งถูกติดตั้งระหว่างห้องทดสอบกับท่อระบบความดันกับห้องทดสอบ

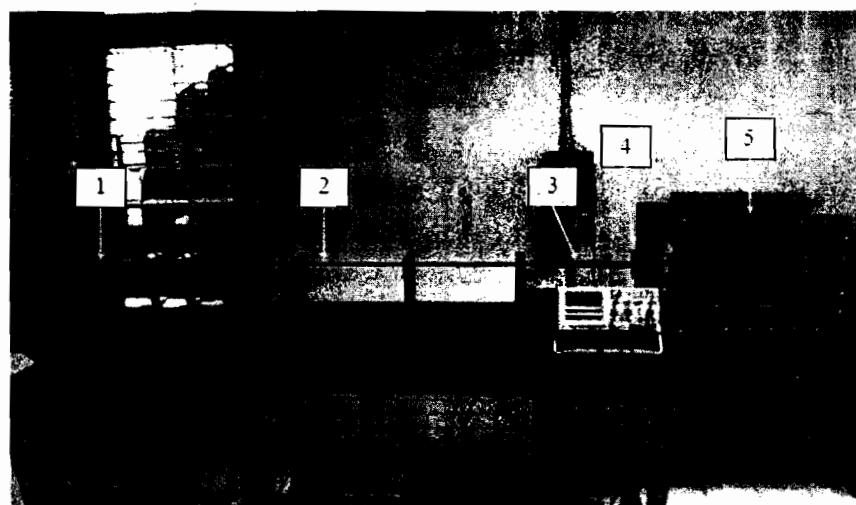
3.1.5 ห้องทดสอบ (test chamber) ได้ถูกออกแบบให้เป็นถังรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 5 mm มีขนาดกว้าง 39.5 cm ยาว 60 cm และสูง 35 cm ฝาด้านข้างทั้งสองด้านเป็นแผ่นอะคริลิกใส หนา 25 mm ใช้เป็นหน้าต่างสำหรับสังเกตพฤติกรรมที่เกิดขึ้น และใช้สำหรับการวัดและเก็บข้อมูลการทดลอง



ภาพที่ 3.1 Impact driven method



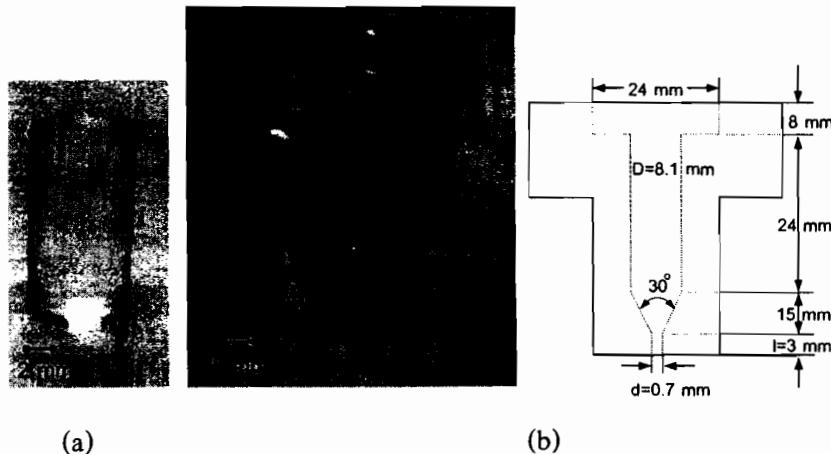
(a)



(b)

ภาพที่ 3.2 ชุดทดลอง (a) แผนภาพชุดทดลอง (b) ภาพถ่ายชุดทดลอง Horizontal single stage powder gun (HSSPG)

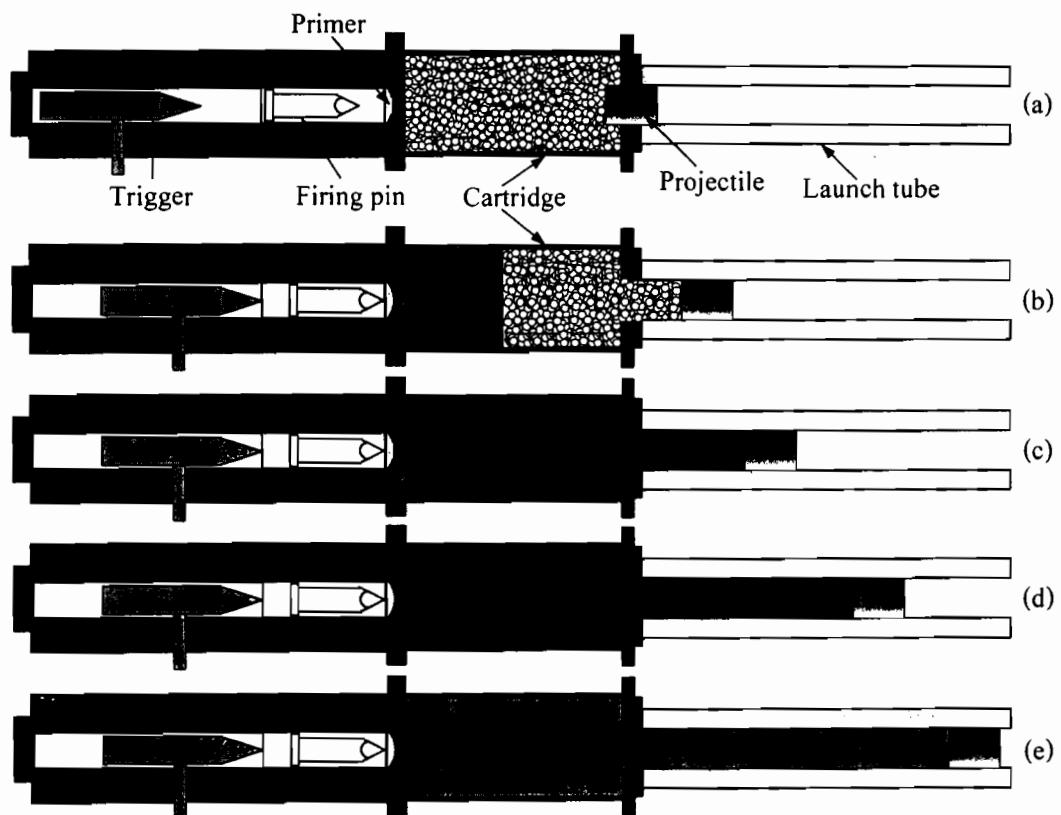
ในการศึกษานี้ใช้กระสุนปืนที่ทำมาจาก Polymethyl methacrylate (PMMA) ทรงกระบอกมีความยาว 15 mm ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8.05 mm และหัวฉีดที่ใช้ในการผลิตลำพูงทำมาจากเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่บรรจุของเหลว $D = 8.1 \text{ mm}$ ขนาดของรูหัวฉีด $d = 0.7 \text{ mm}$ และความยาวของรูหัวฉีด $l = 3 \text{ mm}$ แสดงดังภาพที่ 3.3



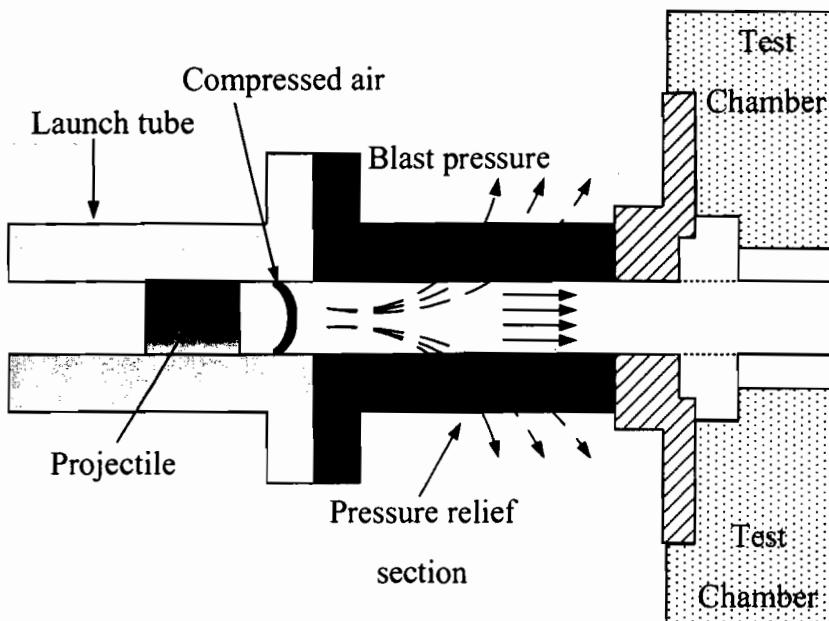
ภาพที่ 3.3 (a) กระสุนปืน และ (b) หัวฉีดที่ใช้ในการทดลอง

3.2 วิธีทำการทดลอง

จากภาพที่ 3.4 แสดงขั้นตอนการยิงกระสุนปืนของชุดทดลอง HSSPG ก่อนทำการยิงกระสุนปืนจะทำการซึ่งดินปืนและซึ่งน้ำหนักของกระสุนปืนซึ่งจะมีน้ำหนักน้ำหนัก 0.92 g ทำการใส่ดินปืนและบรรจุกระสุนปืนในปลอกกระสุน (cartridge) ให้ล็อกลงไปในปลอกกระสุนประมาณ 10 mm และติดตัวจุดระเบิด (primer) ที่ท้ายของปลอกกระสุน จากนั้นนำมาระบบกับชุดปล่อยกระสุน (launcher) (โดยมีรายละเอียดในภาคผนวก ฯ) จากภาพที่ 3.4(a) เป็นขั้นตอนก่อนจุดระเบิด โดยภายในปลอกกระสุน (cartridge) จะมีดินปืนชนิดไร้ควัน (smokeless powder) อยู่เต็มระบบทอกซึ่งจะพบว่ากระสุนปืนจะอยู่ระหว่างปลอกกระสุนกับท่อส่งกระสุนปืน (launch tube) และมีตัวจุดระเบิด (primer) อยู่ส่วนท้ายของปลอกกระสุน เมื่อเข้มแทงชวนกระแทกตัวจุดระเบิดแล้วจะทำให้เกิดประกายไฟและการเผาไหม้ของดินปืนภายในปลอกกระสุน ดังภาพที่ 3.4(b) จากนั้นดินปืนจะเผาไหม้จนหมดและทำให้เกิดความดันที่สูงมากภายในปลอกกระสุนและขับกระสุนปืนออกไปในท่อส่งกระสุนดังภาพที่ 3.4(c-e) จากนั้นกระสุนจะเคลื่อนที่ในท่อส่งกระสุนปืน



ภาพที่ 3.4 ขั้นตอนการยิงของชุดทดลอง HSSPG : (a) ก่อนจุดระเบิด (b) การจุดระเบิด (c) ดินปืนเผาไหม้หลุด (d) หลังจากดินปืนเผาไหม้หลุด และ (e) การยิงกระสุนปืน

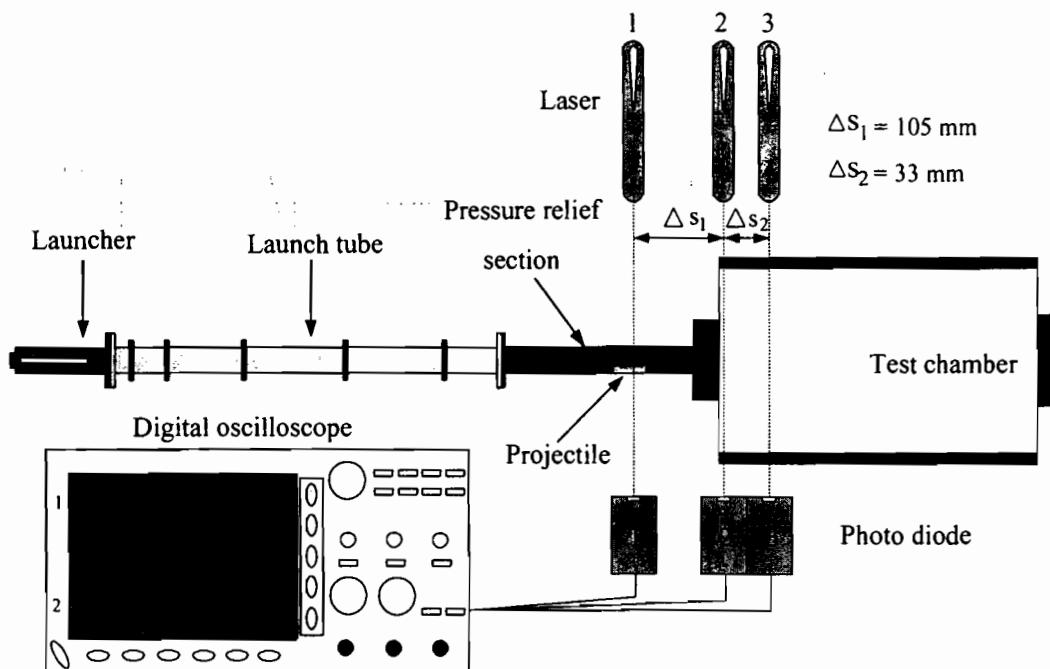


ภาพที่ 3.5 การระบายอากาศด้านหน้ากระสุนปืน

ภาพที่ 3.5 แสดงการระบายน้ำอากาศด้านหน้ากระสุนปืน เมื่อกระสุนปืนความเร็วสูง เคลื่อนที่ตามท่อส่งกระสุนปืน (launch tube) ดังภาพที่ 3.4 มาจนกระทั่งถึงท่อระบายน้ำดัน (pressure relief section) ความดันอากาศที่ถูกอัดจากการเคลื่อนที่ของกระสุนปืนที่อยู่ส่วนหน้าของ กระสุนปืนจะถูกระบายนอกภายนอกเพื่อลดแรงต้านและป้องกันไม่ให้อากาศกระแทกของเหลวใน หัวฉีดก่อนการกระแทกของกระสุนปืน

3.3 การวัดความเร็วของกระสุนปืน

การวัดความเร็วของกระสุนปืนใช้หลักการ “การตัดเลเซอร์ของวัตถุ (laser beam interruption method) หรือ time of flight method โดยใช้เลเซอร์และไดโอดรับแสง (photo diode) จำนวน 3 ชุด โดยการต่อสัญญาณเซ็นเซอร์ (sensor) เข้ากับอสซิลโลสโคป (oscilloscope) เพื่ออ่าน สัญญาณไฟฟ้าจากแสงเลเซอร์และแสดงผลบนหน้าจอซึ่งใช้เป็นอสซิลโลสโคปสองชานแนล (dual trace oscilloscope) จำนวน 2 เครื่อง โดยเครื่องที่ 1 ใช้กับสัญญาณเลเซอร์ชุดที่ 1 กับชุดที่ 2 และเครื่องที่ 2 ใช้กับสัญญาณเลเซอร์ชุดที่ 2 และชุดที่ 3 เพราะในการตรวจวัดความเร็วต้องใช้ sensor 3 ชุด โดยในการทดลองครั้งนี้ได้จัดวางระยะห่างของเลเซอร์ชุดที่ 1 กับชุดที่ 2 ไว้ที่ระยะ 105 mm และเลเซอร์ชุดที่ 2 กับชุดที่ 3 ไว้ที่ระยะ 33 mm ดังแสดงในภาพที่ 3.6 ซึ่งเทคนิคนี้สามารถวัด ความเร็วของลำพูงได้เช่นกัน



ภาพที่ 3.6 การวัดความเร็วกระสุนปืนด้วยเทคนิค time of flight method

เมื่อทำการทดลองยิงกระสุนปืนแล้วเลเซอร์ก็จะสามารถจับสัญญาณของกระสุนปืนหรือลำพุ่งที่ออกจากหัวปืนได้ โดยสัญญาณจะแสดงบนเครื่องออกอสซิลโลสโคปดังภาพที่ 3.7 จากนั้นวัดเวลา (Δt) ที่ส่วนหัวของกระสุนปืนตัดแสงเลเซอร์ของชุดที่ 1 กับ เลเซอร์ชุดที่ 2 และสามารถคำนวณหาความเร็วได้จากการ

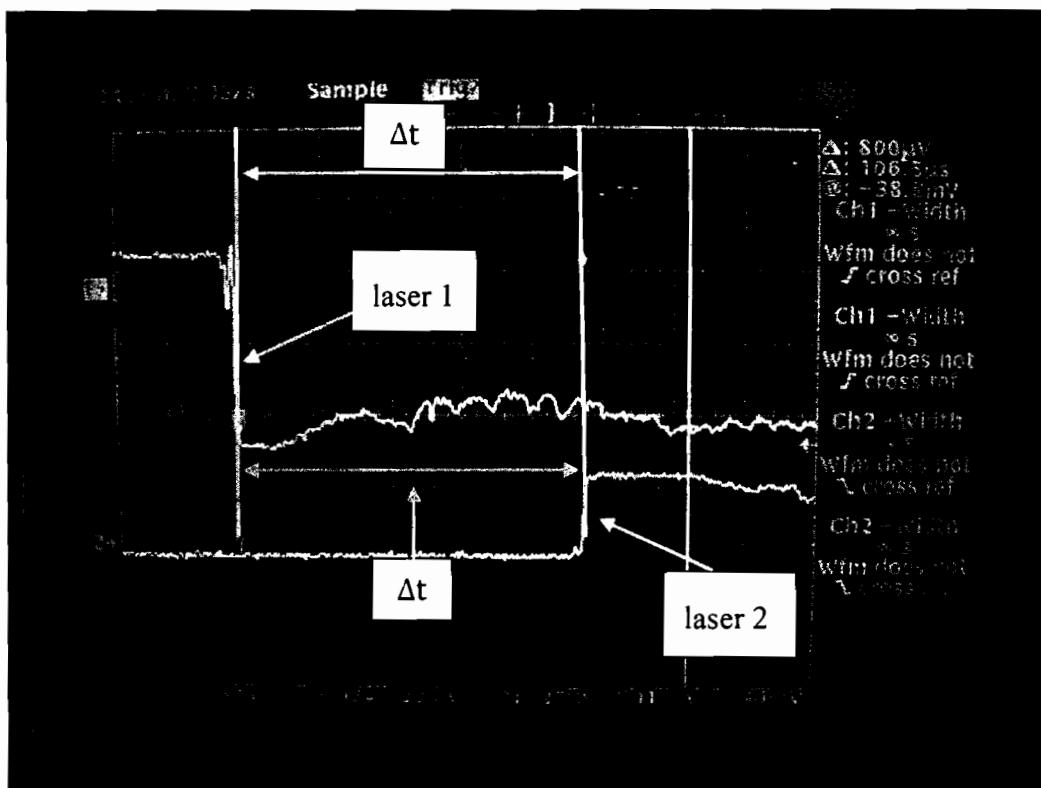
$$V_p = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (3.1)$$

เมื่อ

V_p คือ ความเร็ว

Δs คือ ระยะห่างของเลเซอร์ชุดที่ 1 กับเลเซอร์ชุดที่ 2

Δt คือ เวลาที่วัดได้จากเครื่องออกอสซิลโลสโคป



ภาพที่ 3.7 ตัวอย่างสัญญาณที่วัดได้จากเลเซอร์ชุดที่ 1 และ ชุดที่ 2 ($\Delta s_1=105$ mm) บนหน้าจอ ออสซิลโลสโคปเครื่องที่ 1

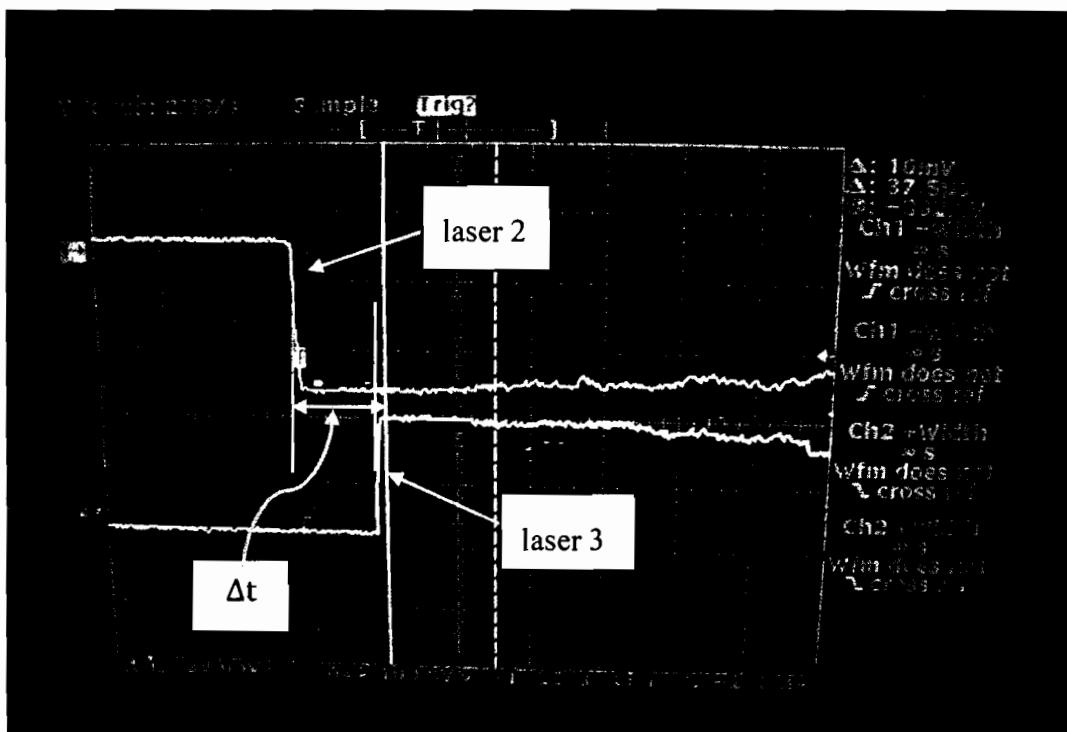
ตัวอย่างการคำนวณหาความเร็วของลูกกระสุนจากภาพที่ 3.7

$$\text{จาก } v_p = \frac{\Delta s}{\Delta t};$$

$$\text{จะได้ } v_p = \frac{105 \times 10^3 \text{ m}}{(263-132.5) \times 10^6 \text{ s}}$$

$$v_p = 804.6 \text{ m/s}$$

ดังนั้นความเร็วของกระสุนปืนเท่ากับ 804.6 m/s



ภาพที่ 3.8 ตัวอย่างสัญญาณที่วัดได้จากเลเซอร์ชุดที่ 2 และ ชุดที่ 3 ($\Delta s_2=33 \text{ mm}$) บนหน้าจอ ออสซิลโลสโคปเครื่องที่ 2

ตัวอย่างการคำนวณหาความเร็วของลูกกระสุนจากภาพที่ 3.8

$$\text{จาก } v_p = \frac{\Delta s}{\Delta t};$$

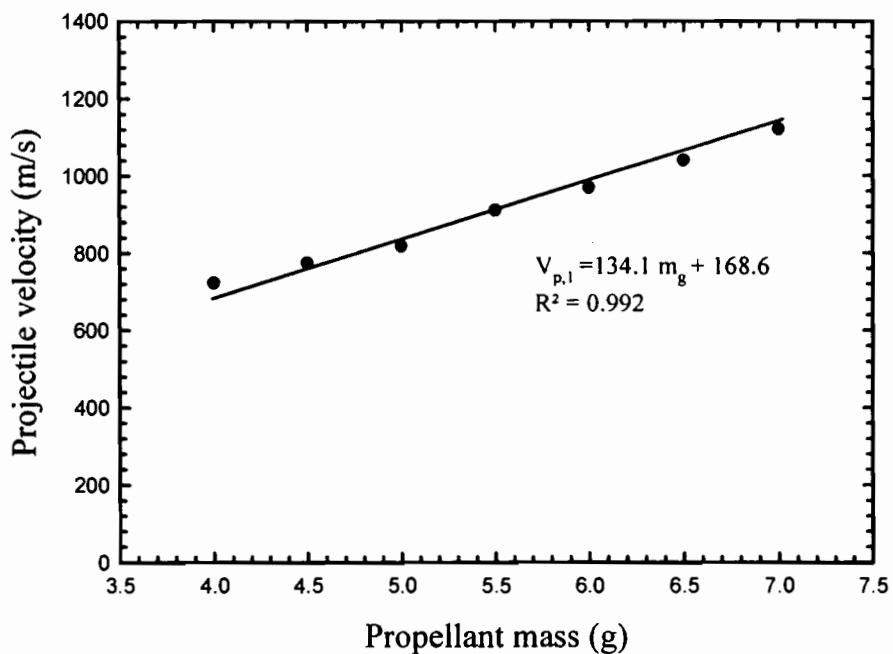
$$\text{จะได้ } v_p = \frac{33 \times 10^3 \text{ m}}{(216-177) \times 10^6 \text{ s}}$$

$$v_p = 846.15 \text{ m/s}$$

ดังนั้นความเร็วของกระสุนปืนเท่ากับ 846.15 m/s

3.4 สมรรถนะของชุดทดลอง

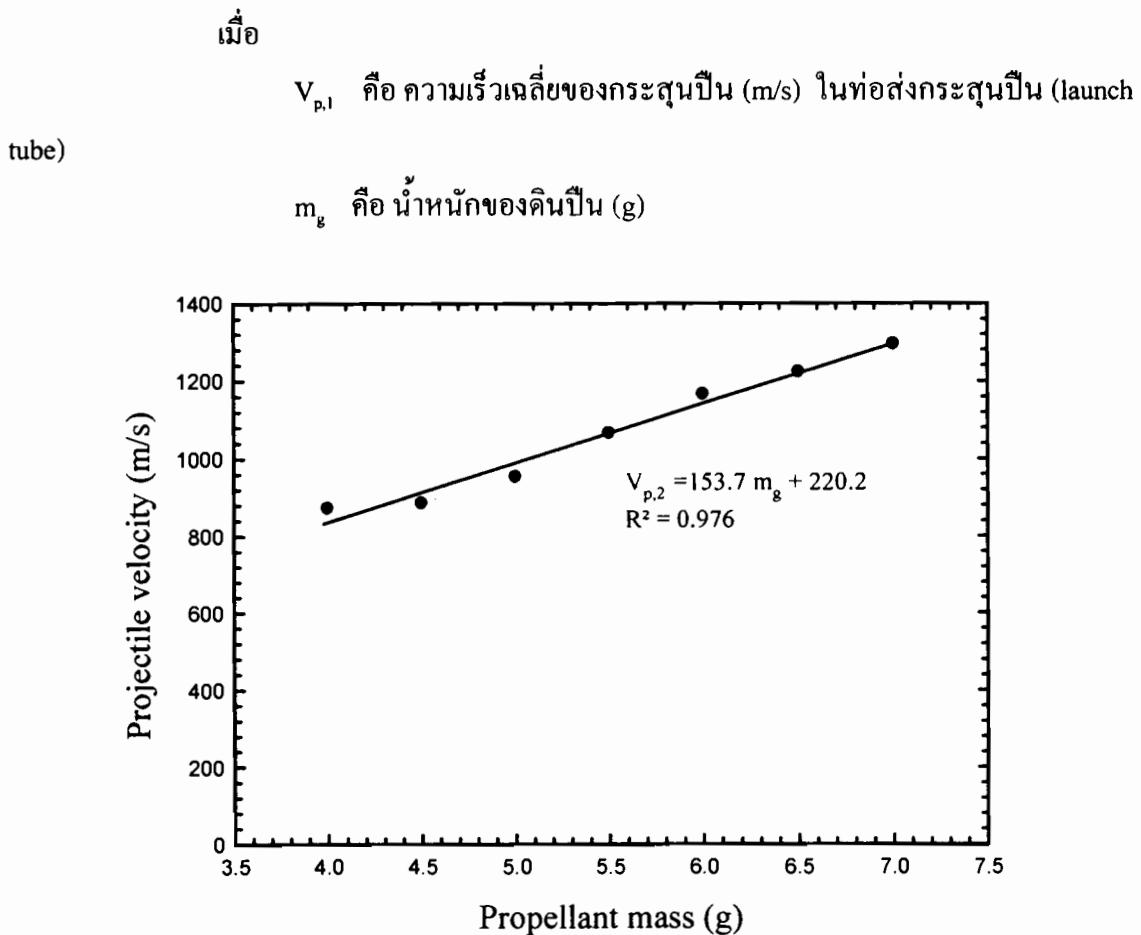
จากการศึกษาเพื่อหาสมรรถนะในการผลิตความเร็วของกระสุนปืนของชุดทดลองโดยใช้ปริมาณดินปืนน้ำหนัก 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5 และ 7 g จากการวัดความเร็ว ดังแสดงในภาพที่ 3.6 ใช้ laser 3 ชุด สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของดินปืน (g) และความเร็วของลูกกระสุน ($V_{p,I}$) ที่ระบุ ΔS_I ได้



ภาพที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของดินปืนและความเร็วของกระสุนปืนที่ระบุ ΔS_I

จากภาพที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของดินปืนและความเร็วของกระสุนปืนที่ระบุ ΔS_I พบว่าความเร็วของกระสุนปืนจะเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักของดินปืนเพิ่มขึ้น โดยที่ความเร็วต่ำสุดของกระสุนปืนเท่ากับ 721 m/s ที่น้ำหนักของดินปืนเท่ากับ 4 g และความเร็วสูงสุดของกระสุนปืนเท่ากับ 1,119 m/s ที่น้ำหนักของดินปืนเท่ากับ 7 g จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของดินปืนและความเร็วของกระสุนปืนจะสามารถหาสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$V_{p,I} = 134.1 m_g + 168.6 \quad (4.1)$$



ภาพที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของดินปืนและความเร็วของกระสุนปืนที่ระยะ ΔS_2

จากภาพที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของดินปืนและความเร็วของกระสุนปืนที่ระยะ ΔS_2 พบว่าความเร็วของกระสุนปืนจะเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักของดินปืนเพิ่มขึ้น โดยที่ความเร็วต่ำสุดของกระสุนปืนเท่ากับ 873 m/s ที่น้ำหนักของดินปืนเท่ากับ 4 g และความเร็วสูงสุดของกระสุนปืนเท่ากับ 1,294 m/s ที่น้ำหนักของดินปืนเท่ากับ 7 g จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของดินปืนและความเร็วของกระสุนปืนจะสามารถการคำนวณได้ดังนี้

$$V_{p,2} = 153.7 m_g + 220.2 \quad (4.2)$$

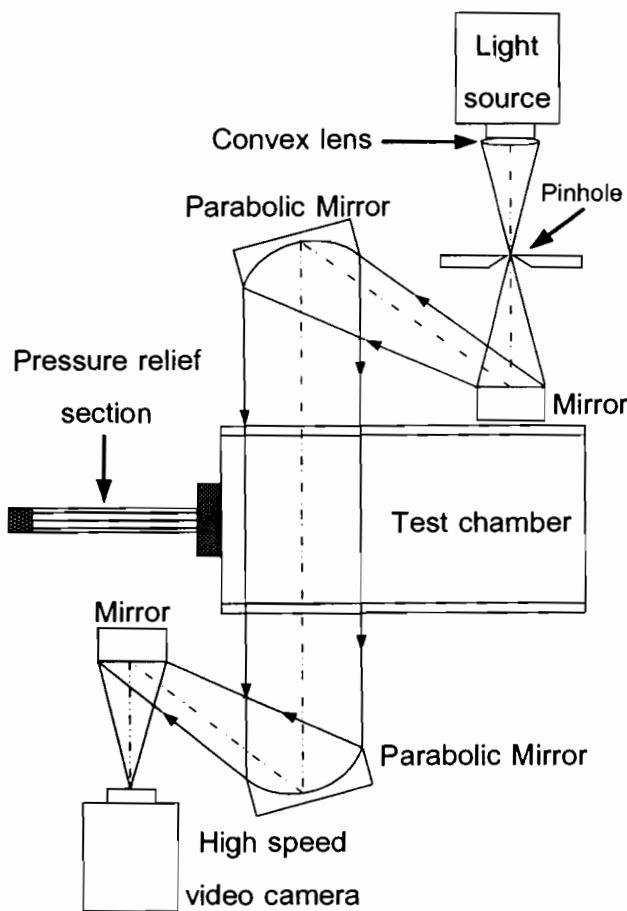
เมื่อ

$V_{p,2}$ คือ ความเร็วเฉลี่ยของกระสุนปืน (m/s) ในห้องทดลอง (test chamber)

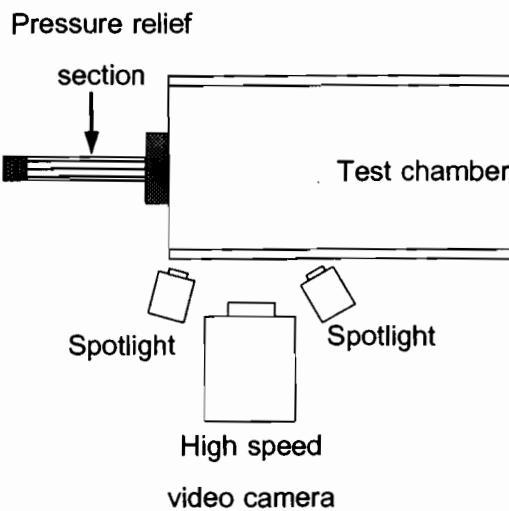
m_g คือ น้ำหนักของดินปืน

3.5 เทคนิคการถ่ายภาพ (visualization technique)

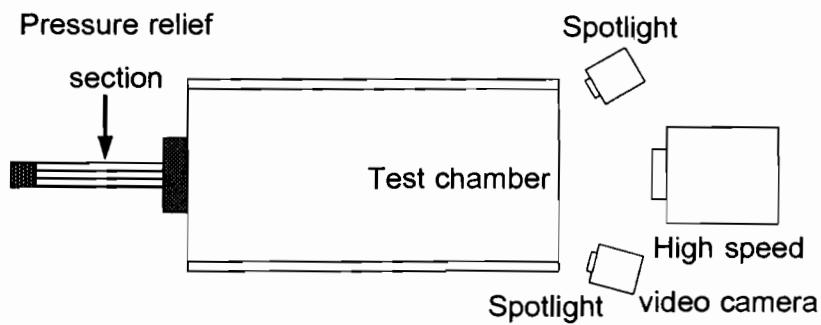
เนื่องจากพฤษติกรรมของลำพูงที่เกิดขึ้นนั้นเป็นความเร็วระดับเหนือเสียง (supersonic) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในเวลาประมาณ 1 มิลลิวินาที (μs) ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าหรือจากกล้องถ่ายภาพทั่วไป ดังนั้นการศึกษานี้จึงใช้กล้องวิดีโอความเร็วสูง (high-speed digital video camera) ยี่ห้อ Photron รุ่น FASTCAM SA5 ที่ความเร็วของการถ่ายภาพเท่ากับ 30,000 fps และความเร็วชัตเตอร์ (shutter speed) 1 μs โดยถ่ายภาพร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพแบบชาโคร์กราฟ (Shadowgraph) ดังแสดงในภาพที่ 3.11 โดยแหล่งกำเนิดแสง (light source) ในการศึกษานี้ใช้หลอดซีนตอน (xenon) 3500/4300 K ซึ่งจะส่องแสงออกมาม่านเลนส์บัน (convex lens) เพื่อรวมแสงและส่องผ่านรูเข็ม (pinhole) ซึ่งทำหน้าที่ตัดแสงที่กระจายออกจากเลนส์บัน แสงจะสะท้อนกระจากผิวโค้ง (parabolic mirror) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 cm ความยาวโฟกัส 1.5 m ซึ่งทำหน้าที่จัดลำแสงให้บานกว้างห้องทดสอบ โดยแสงที่ผ่านห้องทดสอบหากมีพฤษติกรรมการไหลที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของของไหหลินห้องทดสอบแสงจะเกิดการหักเห โดยแสงที่หักเหจะสะท้อนกระจากผิวโค้งอีกบานเพื่อรวมแสง เนื่องจากพื้นที่ในห้องทดลองมีจำกัดจึงใช้กระจกเงา (plane mirror) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 19 cm จำนวน 2 บาน ช่วยในการสะท้อนแสงเพื่อลดระยะภายในห้องทดสอบ จากนั้นแสงจะขยายลงขอรับภาพของกล้องวิดีโอความเร็วสูงและจะถูกบันทึกภาพไว้ จากภาพที่ 3.12 แสดงการติดตั้งกล้องวิดีโอความเร็วสูงในมุมมองปกติโดยไม่มีการติดตั้งระบบการถ่ายภาพแบบชาโคร์กราฟ (Shadowgraph) ซึ่งจะมีสปอร์ตไลท์ จำนวน 2 ตัวเป็นแหล่งกำเนิดแสงโดยพฤษติกรรมที่เกิดขึ้นจะถูกบันทึกโดยกล้องวิดีโอความเร็วสูงโดยตรง และจากภาพที่ 3.13 แสดงการติดตั้งกล้องวิดีโอความเร็วสูงในแนวแกนโดยไม่มีการติดตั้งระบบการถ่ายภาพแบบชาโคร์กราฟ (Shadowgraph) ซึ่งจะมีสปอร์ตไลท์ จำนวน 2 ตัวเป็นแหล่งกำเนิดแสงโดยพฤษติกรรมที่เกิดขึ้นจะถูกบันทึกโดยกล้องวิดีโอความเร็วสูงโดยตรงเช่นกัน



ภาพที่ 3.11 การติดตั้งระบบถ่ายภาพด้วยเทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph)



ภาพที่ 3.12 การติดตั้งกล้องวิดีโอความเร็วสูงในมุมมองปกติโดยไม่มีการติดตั้งระบบการถ่ายภาพแบบชาโคว์กราฟ (Shadowgraph)



ภาพที่ 3.13 การติดตั้งกล้องวิดีโอความเร็วสูงในแนวแกนโดยไม่มีการติดตั้งระบบการถ่ายภาพแบบช้าๆ ได้วร์กราฟ (Shadowgraph)

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

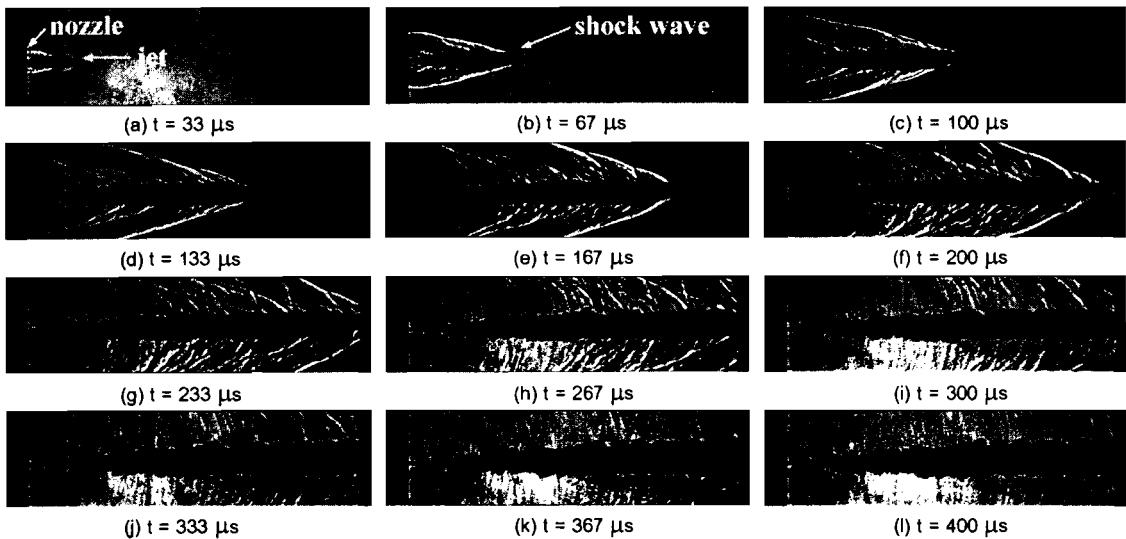
4.1 อิทธิพลของชนิดของไหสในห้องทดสอบ

ในการศึกษาคุณลักษณะของลำพูงความเร็วสูงในอากาศ ในหัวข้อนี้ใช้ของเหลว 6 ชนิด คือ น้ำ น้ำอะเหล น้ำมันดีเซล กลีโอลิน แอลกอฮอล์ และ น้ำมันแก๊สโซลีน ในการทดสอบ ซึ่ง คุณสมบัติทางกายภาพของของเหลวทั้ง 6 ชนิดแสดงดังตารางที่ 4.1 เนื่องจากจำนวนภาพที่ถ่ายได้ จำกัดองวิธีโดยความเร็วสูงมีจำนวนมาก ดังนั้น จะแสดงภาพเพียง 12 ภาพกรณีพิเศษในอากาศและ 20 ภาพกรณีพิเศษในน้ำ โดยมีรายละเอียดของคุณลักษณะของลำพูงดังนี้

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของของเหลว [57]

ชนิดของของเหลว	น้ำหนักโมเลกุล (g/mol)	ความหนาแน่นที่ 20°C (kg/m^3)	หนึ่ดจลน์ที่ 20°C (cSt)	ความตึงผิวที่ 20°C (N/m)	ความ粘稠ที่ 40°C ($\text{J/g}^{\circ}\text{C}$)	ความร้อนแห้ง (kJ/kg)
น้ำ (H_2O)	18	998	1.003	0.0728	4.19	2,257 (at 100°C)
น้ำอะเหล	-	1025	1.044	0.07344	3.898	2,188.8 (at 100°C)
น้ำมันดีเซล ($\text{C}_{14}\text{H}_{30}$)	198	840	1.8 - 4.0	0.0244	1.97	267.49 (at 170°C)
กลีโอลิน ($\text{C}_{10}-\text{C}_{14}$)	170	810	1.5 - 2.5	0.0235	2.02	314.01 (at 117.8°C)
แอลกอฮอล์ (CH_3OH)	32	785.1	1.6	0.022	2.3	896 (at 90°C)
น้ำมันแก๊สโซลีน (C_5H_{12})	114	750	0.5	0.02	2.1	318.66 (at 90°C)

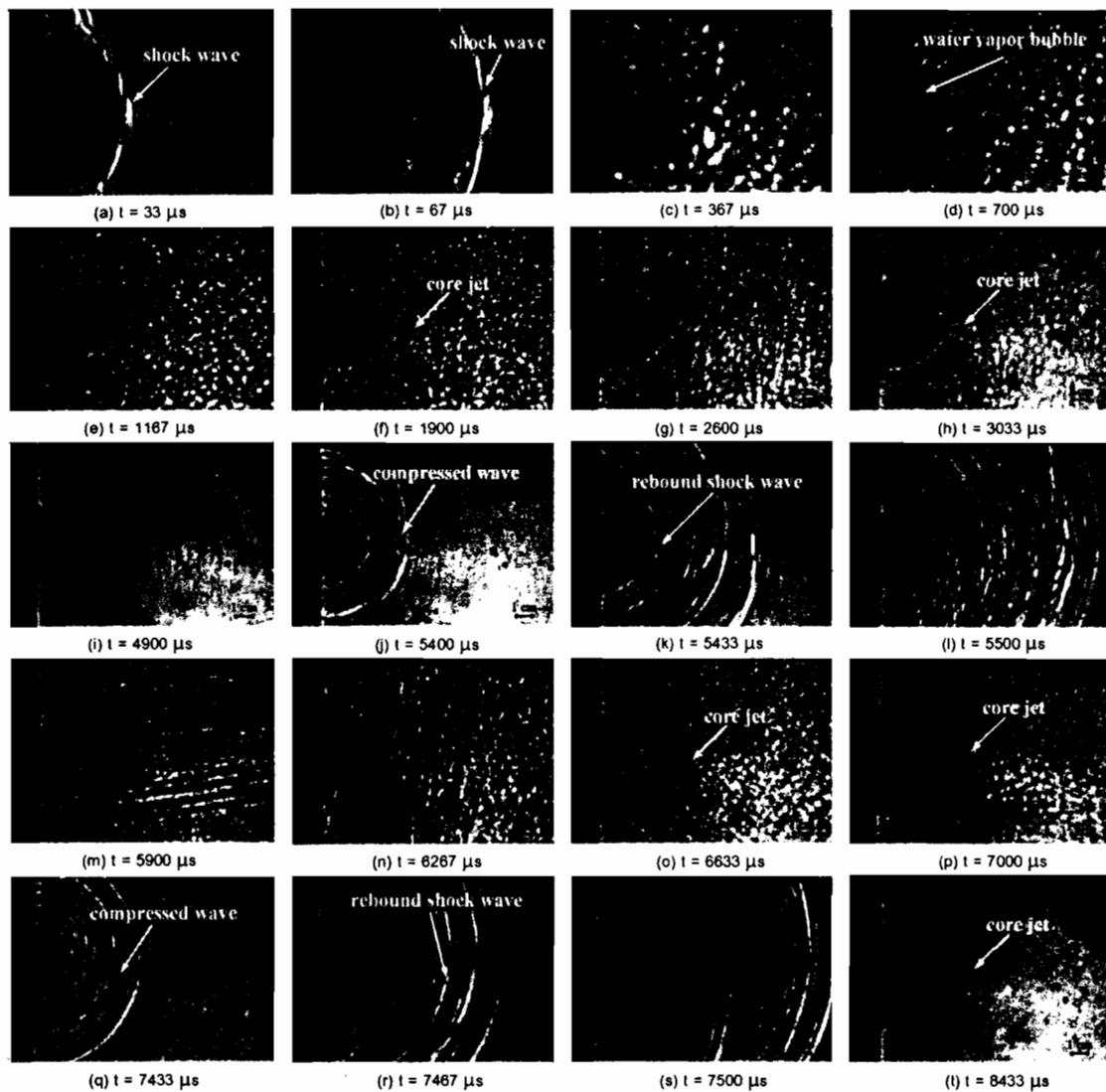
4.1.1 คุณลักษณะของลำพูน้ำ (water jet)



ภาพที่ 4.1 ภาพถ่ายโดยเทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพูน้ำในอากาศ (water jet in air, $V_{j, \max} = 1,669 \text{ m/s}$, $M_a = 4.9$)

จากภาพที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายโดยเทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพูน้ำในอากาศ (water jet in air) พบร้าลำพูน้ำถูกนីดออกมาจากหัวฉีด (nozzle) และพบคลื่นกระแทก (shock wave) ซึ่งเกิดจากลำพูน้ำและ Mach wave รอบๆ ลำพูน้ำย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในภาพที่ 4.1(a-f) รูปร่างของลำพูน้ำจะแคบและยาวซึ่งระบบการเคลื่อนที่มากกว่า 250 mm ก่อนที่จะสูญเสียโมเมนต์ตั้ม และกระจายตัวเป็นฝอยละอองภายในห้องทดสอบดังภาพที่ 4.1(g-l) ซึ่งการเคลื่อนที่ของลำพูน้ำนี้ เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเนื้อเดียง ดังจะสังเกตเห็นคลื่นกระแทก (shock wave) โดยความเร็วเฉลี่ยของลำพูน้ำต่อผลของการเคลื่อนที่ผ่านห้องทดสอบจะระบบการเคลื่อนที่ 250 mm มีค่าเท่ากับ 1,127 m/s คิดเป็น Mach number (M_a) เท่ากับ 3.3 ในขณะที่ความเร็วของลำพูน้ำที่ประมาณได้จากมุมคลื่นกระแทก (shock wave) มีค่าเท่ากับ 992 m/s คิดเป็น M_a เท่ากับ 2.7 ซึ่งจะพบว่าความเร็วจากการวัดจากชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) และการวัดจากมุมของคลื่นกระแทก (shock wave) มีค่าต่างกัน เนื่องมาจากการประเมินจากมุมของคลื่นกระแทก (shock wave) จะพิจารณาการเคลื่อนที่ของวัตถุซึ่งจะไม่คิดผลของการแตกตัวและการแพร่กระจายของวัตถุ รวมไปถึงจะไม่คำนึงถึงการแตกเป็นฝอยละอองของวัตถุ ซึ่งจะให้ผลที่ถูกต้องกับวัตถุที่แข็งเกร็ง ในขณะที่การเคลื่อนที่ของลำพูน้ำมีการแตกตัว (break up) การแตกเป็นฝอยละออง (atomization) และการระเหยกลายเป็นไอ (vaporization) จึงทำให้การ

วัดความเร็วกับผลจากวิเคราะห์โดยคลื่นกระแทก (shock wave) ให้ผลที่แตกต่างกัน โดยที่ความเร็วสูงสุดของลำพุ่งน้ำมีค่าประมาณ $1,669 \text{ m/s}$ คิดเป็น M_a มีค่าเท่ากับ 4.9 ที่ $t = 33 \mu\text{s}$



ภาพที่ 4.2 ภาพถ่ายโดยเทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งน้ำในน้ำ (water jet in water,

$$V_{j,\max} = 374 \text{ m/s}$$

จากภาพที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายโดยเทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งน้ำในน้ำ (water jet in water) ทันทีที่กระสุนปืนกระแทกน้ำที่บรรจุภายในหัวฉีด ลำพุ่งจะพุ่งออกมารี้บ ความเร็วสูง (ความเร็วประมาณ $1,669 \text{ m/s}$ ที่เวลา $33 \mu\text{s}$ ในอากาศ) จึงทำให้เกิดคลื่นกระแทก (shock wave) ภายในน้ำดังภาพที่ 4.1(a) แต่เนื่องจากลำพุ่งถูกฉีดภายในน้ำจึงทำให้ความเร็วของลำพุ่งลด ต่ำลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากแรงต้านของน้ำ (hydrodynamic drag) นั้นมีค่าสูง (จาก Drag =

$\frac{1}{2} C_D \rho V^2 A$ ซึ่ง ρ ของน้ำมีค่าเป็น 1,000 เท่าของอากาศ) โดยความเร็วสูงสุดของลำพุ่งในน้ำมีค่าประมาณ 374 m/s ที่เวลา 67 μs โดยห่างจากความเร็วของคลื่นกระแทก (shock wave) ในน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 4.2(b) ซึ่งมีความเร็วเท่ากับ 1,563 m/s คิดเป็น Mach number เท่ากับ 1.04 (ความเร็วเสียงในน้ำมีค่าเท่ากับ 1,500 m/s) จึงทำให้ลำพุ่งและคลื่นกระแทก (shock wave) แยกตัวออกจากกันเนื่องจากความเร็วที่ต่างกัน

จากนั้นจะเกิด water vapor bubble เนื่องจากการแตกตัวเป็นละออง (atomization) การกลาญเป็นไอ (vaporization) ของลำพุ่งและเกิดการขยายตัว (expansion) อย่างรวดเร็วดังภาพที่ 4.2(b-d) ซึ่งมีลักษณะเป็นวงรีศีริค่าเข้ม ดังภาพที่ 4.2(d) ถึงแม้ว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ water vapor bubble (bubble diameter) ในแนวตั้งของภาพจะขยายตัวขึ้นอย่างรวดเร็วแต่ยังช้ากว่าระเบียบการเคลื่อนที่ของ bubble (bubble penetration) ในแนวนอนของภาพ แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่ของลำพุ่ง (jet penetration) เร็วกว่าการขยายตัวของ bubble ในแนวตั้ง

จากภาพที่ 4.2(e) พบว่า ระเบียบการเคลื่อนที่ของ bubble สูงสุดเท่ากับ 47.88 mm ที่เวลา 1,167 μs แต่เส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ยังไม่ขยายตัวสูงสุด ยังคงขยายตัวอย่างต่อเนื่องรอบๆ ลำพุ่ง ดังภาพที่ 4.2(f) หลังจากระเบียบการเคลื่อนที่ของ bubble มาถึงจุดสูงสุด bubble จะเริ่มยุบตัว ในขณะที่เส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble (ในแนวตั้ง) ยังขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

จากภาพที่ 4.2(g) พบว่า เส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะขยายตัวสูงสุดเท่ากับ 57.34 mm ที่เวลา 2,600 μs ความเร็วการขยายตัว (V_{ex}) เท่ากับ 22.05 m/s จากนั้น bubble จะเริ่มยุบตัวจึงทำให้สั้นเกร็ทเห็นแกนของลำพุ่ง (core jet) ซึ่งเคลื่อนที่ไปข้างหน้าอย่างช้าๆ จนเกือบจะหยุดนิ่ง ดังแสดงในภาพที่ 4.2(h,i) ซึ่งการยุบตัวของลำพุ่งนั้นเกิดจากความดันของ bubble ต่ำลงกว่าความดันของน้ำภายในห้องทดลอง โดยก่อนที่ bubble จะยุบตัวลดลงเกือบจะถึงค่าต่ำสุดดังภาพที่ 4.2(j) จะเกิด compressed wave ขึ้นเมื่อ bubble ยุบตัวลดลงต่ำสุดเท่ากับ 18.63 mm ที่เวลา 5,467 μs ความเร็วการยุบตัว (V_{ex}) เท่ากับ 13.50 m/s ทำให้เกิด rebound shock wave ดังภาพที่ 4.2(k,l) เนื่องจากการยุบตัวของ bubble จะทำให้เกิดความดันสูงขึ้นในทันทีทันใดภายใน bubble ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้โดยประภากृ- การณ์ของควิเตชัน (cavitation) ซึ่งจากการประมาณจากภาพถ่ายพบว่า rebound shock wave มีความเร็ว 1,503 m/s คิดเป็น Mach number ประมาณ 1.00

จากภาพที่ 4.2(m) เนื่องจากความดันภายใน bubble มีค่าสูงมาก ไม่เพียงแต่ทำให้เกิด rebound shock wave ยังทำให้เกิด water vapor bubble ขึ้นอีกครั้งภาพที่ 4.2(m-p) ถึงแม้ว่ากลไกการขยายตัวและการยุบตัวของ bubble จะสั้นเกร็ทเห็นไม่ชัดเจน แต่ก็เชื่อว่ากลไกดังกล่าวเกิดขึ้นอีกครั้ง จริง จากการสั้นเกร็ทเห็น compressed wave, rebound shock wave และ shock wave ที่เกิดขึ้นดังแสดงในภาพที่ 4.2(p-r) ดังนั้นพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในครั้งนี้จึงคล้ายกับพฤติกรรมการขยายตัวและยุบตัว

ของ water vapor bubble ที่เกิดขึ้นก่อนหน้านี้ (ดังแสดงในภาพที่ 4.2(a-j)) โดยที่การเคลื่อนที่ของ rebound shock wave ที่เกิดขึ้นในครั้งนี้มีความเร็วเท่ากับ 1,556 m/s คิดเป็น Mach number ประมาณ 1.04

จากภาพที่ 4.2(r) จะพบ rebound shock wave ที่เกิดจากกลไกการขยายตัวและบุบตัวของ bubble ในครั้งที่สอง จากนั้นความดันภายใน bubble จะลดลงจนไม่สามารถทำให้เกิด bubble ขึ้น อีกครั้งได้ จึงทำให้ไม่พบกลไกการขยายตัวและบุบตัวที่ทำให้เกิด rebound shock wave ขึ้นอีกครั้งได้ จากนั้น bubble จะลดลงตัวขึ้นเนื่องจากแรงดึงดูดตัว ในขณะที่ core jet จะละลายผสมรวมกับน้ำภายในห้องทดสอบ ดังภาพที่ 4.2(s-t) เนื่องจากการสูญเสียแรงผลศักดิ์ (Dynamic force)

จากภาพที่ 4.3 แสดงคุณลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูงเมื่อฉีดในน้ำ ซึ่งในการอธิบายคุณลักษณะของลำพุ่งที่เกิดขึ้น จะใช้กรณีลำพุ่งน้ำที่ฉีดในน้ำจากการถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูง โดยไม่ใช้เทคนิคการถ่ายภาพ Shadowgraph ดังภาพที่ 3.12 เป็นตัวแทนในการอธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้น ซึ่งกลไกของการก่อตัวของลำพุ่งและ bubble นั้นจะช่วยอธิบายพฤติกรรมที่เห็นได้ไม่ชัดเจนในการถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูง โดยใช้เทคนิคการชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ที่ผ่านมา

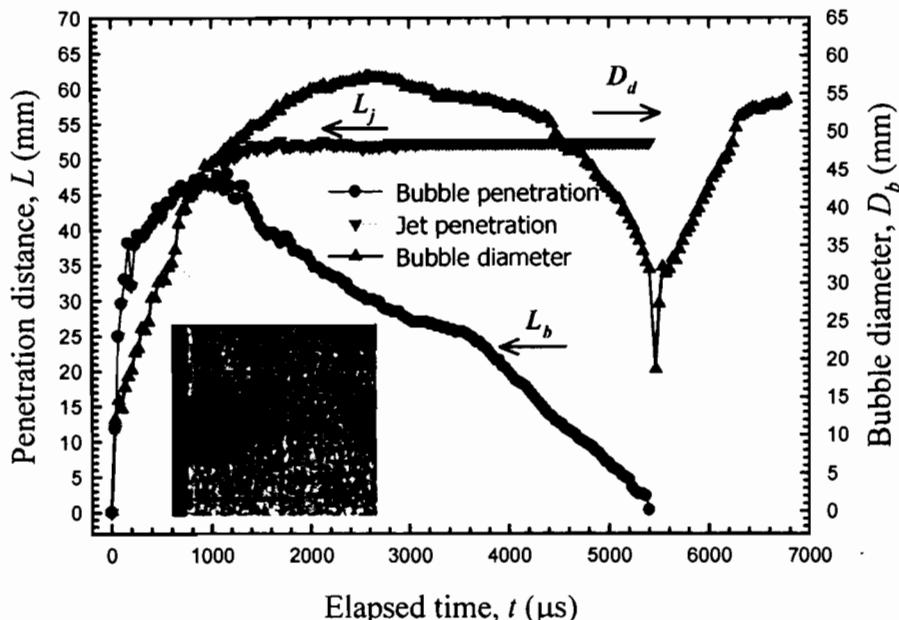
จากภาพที่ 4.3 แสดงภาพถ่ายโดยไม่ใช้เทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งน้ำในน้ำ (water jet in water) โดยเลือกภาพจำนวน 20 ภาพมาใช้แสดงเพื่ออธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้น เมื่อกระแทกน้ำที่บรรจุภายในหัวฉีด ลำพุ่งจะพุ่งออกมาระหว่างความเร็วสูงและทำให้เกิด water vapor bubble โดยที่ความเร็วสูงสุดของลำพุ่มนีค่าประมาณ 345 m/s ที่เวลา 33 μ s ดังภาพที่ 4.3(a) จากภาพที่ 4.3(b-d) จะสังเกตเห็นการกำเนิดและการขยายตัวของ bubble ซึ่ง bubble จะขยายตัวเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ หลังจากนั้น bubble จะมาถึงระยะการเคลื่อนที่สูงสุดเท่ากับ 44.14 mm ที่เวลา 1,633 μ s ดังภาพที่ 4.3(e) จากนั้น bubble จะเริ่มหดตัวกลับและจะเริ่มสังเกตเห็นปลายของลำพุ่ง สังเกตได้จากภาพที่ 4.3(f) จากภาพที่ 4.3(g) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble (D_y) ขยายตัวสูงสุดเท่ากับ 64.87 mm ที่เวลา 1,967 μ s ความเร็วการขยายตัวเท่ากับ 32.97 m/s หลังจากนั้น bubble จะเริ่มหดตัวและจะสังเกตเห็นแกนของลำพุ่งดังภาพที่ 4.3(h-j) จากภาพที่ 4.3(j-l) จะพบว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะบุบตัวลงต่ำสุดเท่ากับ 28.02 mm ที่เวลา 4,800 μ s ความเร็วการบุบตัวเท่ากับ 13.00 m/s และจะเห็นรูปร่างของ bubble เป็นเส้นหยัก



ภาพที่ 4.3 ภาพถ่ายโดยไม่ใช้เทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งน้ำในน้ำ (water jet in water)

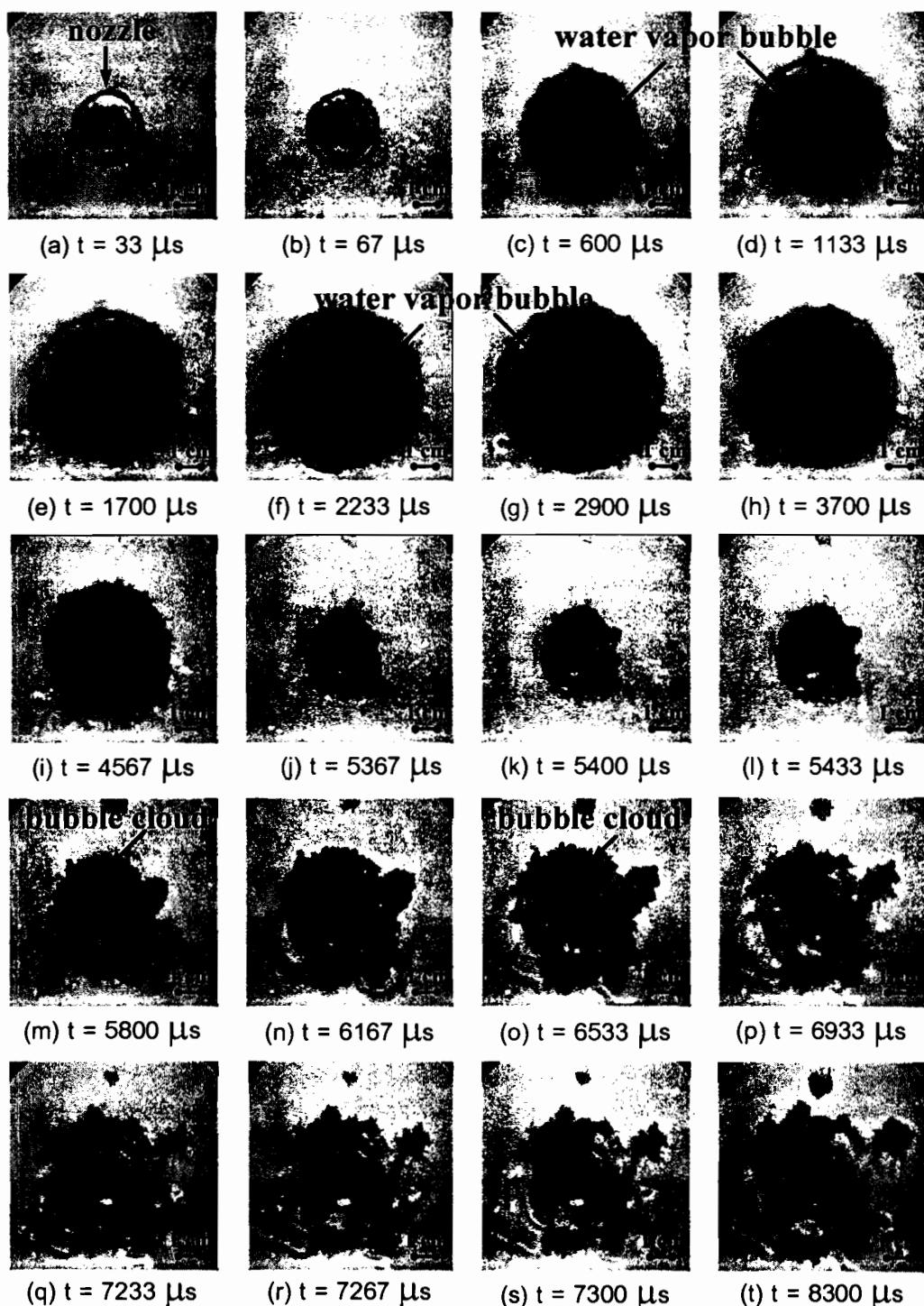
จากภาพที่ 4.2 ภาพถ่ายโดยเทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ที่ผ่านมาในภาพที่ 4.2(m-r) กลไกการขยายตัวและหดตัวน้ำ ไม่สามารถอธิบายได้ เพราะภาพที่ได้จากเทคนิคการถ่ายภาพชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) สังเกตเห็นไม่ชัดเจน ซึ่งกลไกดังกล่าวสามารถอธิบายโดยภาพที่ 4.3(m-r) หลังจากที่ bubble ยุบตัวลงจนถึงค่าต่ำสุด bubble จะเกิดขึ้นอีกรั้ง เนื่องจากการสะสมของความดันที่เพิ่มสูงขึ้น จากความดันที่เกิดจากการยุบตัวของ bubble ซึ่ง bubble ได้ขยายตัวขึ้นอย่างรวดเร็วในแนวตั้ง แต่จะไม่เห็นการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าในแนวอนอีก จากนั้น bubble จะยุบตัวลงจนถึงค่าต่ำสุดอีกรั้งดังภาพที่ 4.3(q-s) หลังจากนั้นกลุ่ม bubble จะลอยตัวขึ้นเนื่องจากแรงดึงดูด และละลายน้ำกับน้ำในห้องทดสอบ ดังภาพที่ 4.3(t) ซึ่งจากการสังเกตในมุมมองนี้จะเป็นตัวสนับสนุนผลที่ได้จากเทคนิคการถ่ายภาพชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) จากภาพที่ได้นั้นจะช่วยในการอธิบายกลไกการเกิด bubble การขยายตัว การยุบตัว และการหายไปของ bubble จะสังเกตเห็นได้

ขัดเจนและเข้าใจง่าย แต่เนื่องจากไม่ใช้เทคนิคการถ่ายภาพช้าโครงร่าง (Shadowgraph) จึงทำให้ไม่เห็นคลื่นกระแทก (shock wave) และ rebound shock wave ในน้ำ



ภาพที่ 4.4 ระยะการเคลื่อนที่ของลำพูงและ bubble และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ของลำพูงน้ำในน้ำ (jet and bubble penetration distance and bubble diameter of water jet in water)

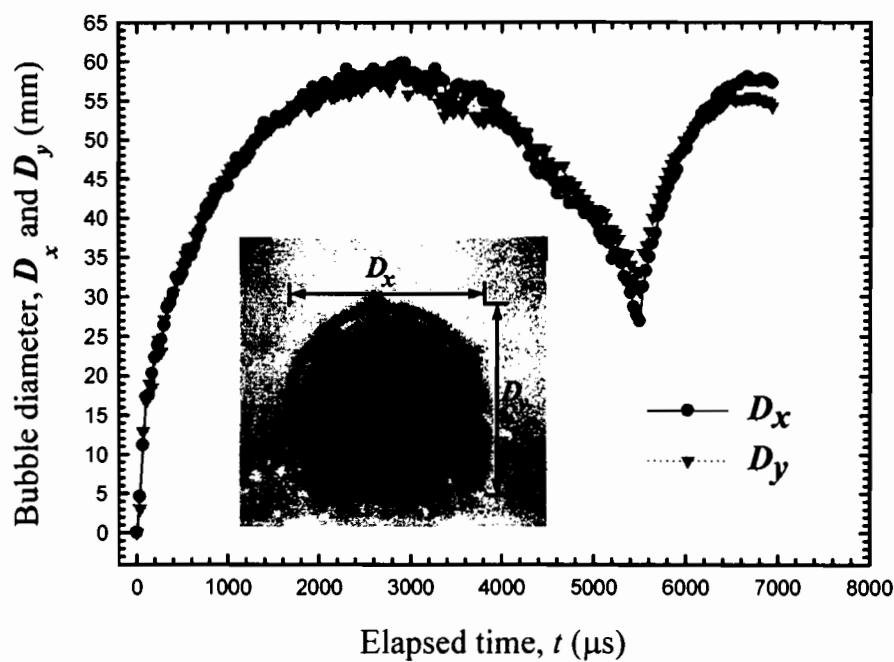
จากการที่ 4.4 แสดงระยะการเคลื่อนที่ของลำพูงและ bubble และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ของลำพูงน้ำในน้ำ พบว่าระยะการเคลื่อนที่ของลำพูง (L_j) มีการเคลื่อนที่ไกลสุคเกิดขึ้นที่เวลา $3,067 \mu\text{s}$ ซึ่งมีระยะการเคลื่อนที่เท่ากับ 52.54 mm จากนั้นลำพูงจะหยุดลง ไม่มีการเคลื่อนที่อีก และเมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของ bubble (L_b) พบว่า bubble จะค่อยๆ เคลื่อนที่ไกลจากหัวฉีดมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป โดยมีการเคลื่อนที่ไกลสุคเกิดขึ้นที่เวลา $1,167 \mu\text{s}$ ซึ่งมีระยะการเคลื่อนที่เท่ากับ 47.88 mm ซึ่งคิดเป็นความเร็วในการเคลื่อนที่เท่ากับ 41.02 m/s จากนั้น bubble จะค่อยๆ บุบตัวลดต่ำลงเนื่องจากแรงต้านของน้ำ (hydrodynamic drag) โดยมีความเร็วในการบุบตัวเท่ากับ 11.03 m/s ซึ่ง bubble ของน้ำจะบุบตัวลงในช่วงเวลา $1,166 - 5,467 \mu\text{s}$ ในขณะที่เส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble (D_b) จะขยายตัวสูงสุดที่เวลา $2,600 \mu\text{s}$ ซึ่งมีขนาดสูงสุดเท่ากับ 57.34 mm คิดเป็นความเร็วได้เท่ากับ 22.05 m/s จากนั้น bubble จะบุบตัวลงและจะเริ่มขยายตัวอีกครั้งที่เวลา $5,467 \mu\text{s}$ คิดเป็นความเร็วได้เท่ากับ 13.05 m/s



ภาพที่ 4.5 ภาพถ่ายในแนวแกน โดยไม่ใช้เทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งน้ำในน้ำ (water jet in water)

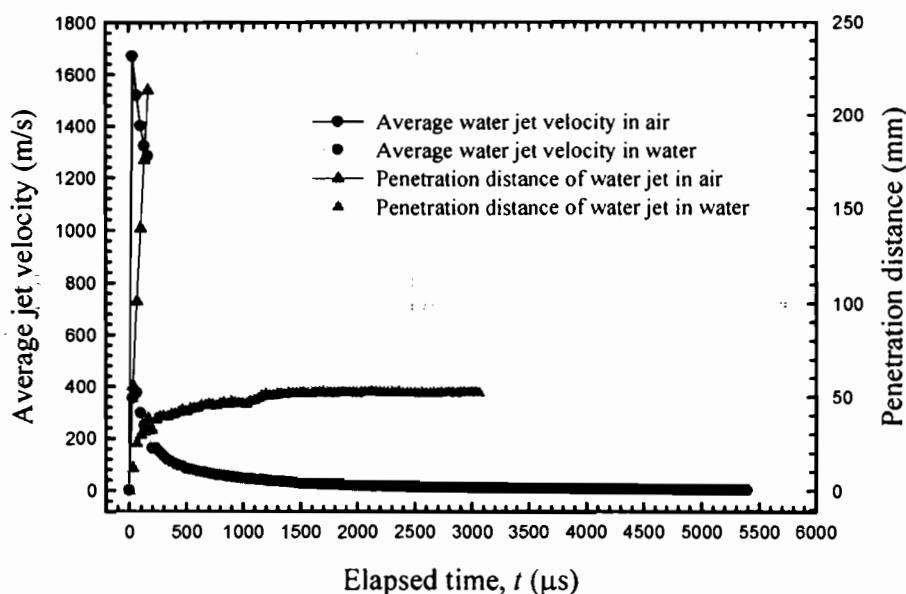
จากภาพที่ 4.5 แสดงภาพถ่ายในแนวแกน โดยไม่ใช้เทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งน้ำในน้ำ จากภาพที่ 4.5(a-f) พบร่วม bubble นั้นเกือบจะกลมอย่างสมมาตรและขยายตัวขึ้น

อย่างรวดเร็ว โดยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ขยายตัวสูงสุดในแนวอน (D_x) เท่ากับ 59.75 mm ที่เวลา 2,900 μ s และในแนวตั้ง (D_y) เท่ากับ 58.74 mm ที่เวลา 2,867 μ s ความเร็วการขยายตัวในแนวอน ($V_{x,c}$) เท่ากับ 20.60 m/s ในแนวตั้ง ($V_{y,c}$) เท่ากับ 20.48 m/s ดังภาพที่ 4.5(g) จากนั้นจะเริ่มบุบตัวและลดลงอย่างรวดเร็วนานาคดีเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ลดลงถึงจุดต่ำสุดในแนวอน (D_x) เท่ากับ 26.83 mm ในแนวตั้ง (D_y) เท่ากับ 30.63 mm ที่เวลา 5,500 μ s ความเร็วการบุบตัวในแนวอน ($V_{x,c}$) เท่ากับ 12.66 m/s ในแนวตั้ง ($V_{y,c}$) เท่ากับ 10.67 m/s ดังภาพที่ 4.5(h-k) เมื่อจากไม่ใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบชาโคล์กราฟ (Shadowgraph) การเกิดคลื่นกระแทก (shock wave) ในน้ำและ rebound shock wave เมื่อ bubble ลดขนาดลงต่ำสุดจะไม่สามารถสังเกตเห็นได้ จากภาพที่ 4.5(l-n) หลังจากเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ลดขนาดถึงจุดต่ำสุด bubble จะแตกตัวเป็นกลุ่ม bubble (bubble cloud) และจะขยายตัวอย่างรวดเร็วเป็นลักษณะรูปวงแหวนรอบๆ หัวฉีด ดังภาพที่ 4.5(m) โดยกลุ่ม bubble มีการบุบตัวอย่างช้าๆ ดังภาพที่ 4.5(o-s) ก่อนที่จะหายไปดังภาพที่ 4.5(t) จากการสังเกตในมุมมองนี้ การเกิด bubble การขยายตัว การบุบและการหายไปของ bubble จะสังเกตเห็นได้ชัดเจนและเข้าใจง่ายขึ้น



ภาพที่ 4.6 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลำพุ่งในแนวอน (D_x) และแนวตั้ง (D_y) ของลำพุ่งน้ำในน้ำ (bubble diameter D_x and D_y of water jet injected in water)

จากภาพที่ 4.6 แสดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลำพุ่ง D_x and D_y ของลำพุ่งน้ำในน้ำ (bubble diameter D_x and D_y of water jet injected in water) แสดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble (bubble diameter) ในน้ำในแนวแกนเมื่อพิจารณาเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ในแนวนอน (D_x) พบว่ามีขนาดที่ใหญ่กว่า bubble ในแนวตั้ง (D_y) จากนั้นจะค่อยๆ ขยายตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป โดยจะมีการขยายตัวใหญ่สุดที่เวลา 2,900 μs ดังภาพที่ 4.5(g) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ในแนวนอน (D_x) เท่ากับ 59.75 mm และในแนวตั้ง (D_y) เท่ากับ 58.74 mm ที่เวลาเท่ากับ 2,867 μs จากนั้น bubble จะยุบตัวลงจนถึงเวลาประมาณ 5,467 μs ซึ่งจะพบว่า bubble ในแนวนอน (D_x) จะมีขนาดเล็กกว่า bubble ในแนวตั้ง (D_y) เนื่องจากผลของการดันน้ำที่กระทำกับขอบของ bubble ที่ระดับความลึกของน้ำที่แตกต่างกันในแนวตั้ง (D_y) จึงทำให้ bubble ไม่มีรูปร่างที่เป็นวงกลมอย่างสมมาตร จากนั้นเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะยุบตัวลดลง ซึ่งการยุบตัวใช้เวลา ในช่วง 2,900 - 5,467 μs จนถึงขนาดต่ำสุดที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 26.84 mm ในแนวนอน (D_x) และ 30.64 mm ในแนวตั้ง (D_y) จากนั้นเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะเริ่มขยายตัวอีกครั้ง โดยความเร็วการขยายตัวของ bubble ในน้ำในช่วงเวลา 0 - 2,900 μs คิดเป็น 20.60 m/s ในแนวนอน ($V_{x,c}$) และในช่วงเวลา 0 - 2,867 μs 20.48 m/s ในแนวตั้ง ($V_{y,c}$) และความเร็วของการยุบตัวที่ช่วงเวลา 2,900 - 5,500 μs คิดเป็น 12.66 m/s ในแนวนอน ($V_{x,c}$) และ 10.67 m/s ในแนวตั้ง ($V_{y,c}$)

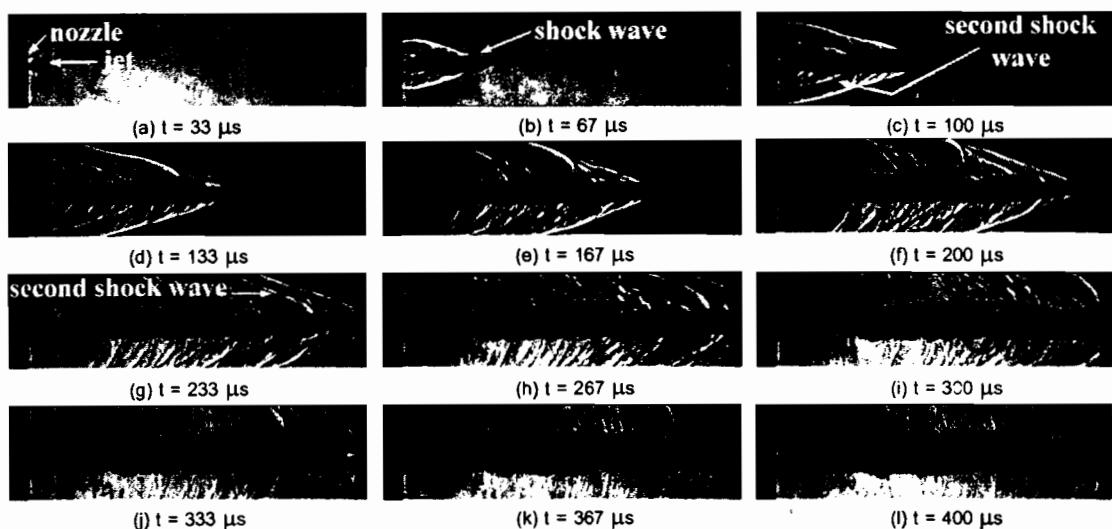


ภาพที่ 4.7 ความเร็วเฉลี่ยและระยะการเคลื่อนที่ของลำพุ่งน้ำความเร็วสูงในอากาศและในน้ำ

จากภาพที่ 4.7 แสดงความเร็วเฉลี่ยและระยะการเคลื่อนที่ของลำพุ่งน้ำความเร็วสูงในอากาศและในน้ำ พบว่าความเร็วจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่เวลา 33 μs และจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อ

เวลาผ่านไปและลำพุ่งน้ำความเร็วสูงที่ฉีดในอากาศจะมีความเร็วสูงกว่าลำพุ่งที่ฉีดในน้ำมากเนื่องจากแรงต้านของอากาศ (aerodynamic drag) น้ำมีค่าต่ำกว่าแรงต้านของน้ำ (hydrodynamic drag) มาก โดยที่ความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่งน้ำในอากาศมีค่าสูงสุดเท่ากับ $1,669 \text{ m/s}$ ที่เวลาเท่ากับ $33 \mu\text{s}$ ความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่งน้ำในน้ำสูงสุดเท่ากับ 374 m/s ที่เวลาเท่ากับ $67 \mu\text{s}$ จึงส่งผลให้ระเบการเคลื่อนที่ของลำพุ่งน้ำในอากาศเคลื่อนที่ได้ไกลงกว่าในน้ำเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น

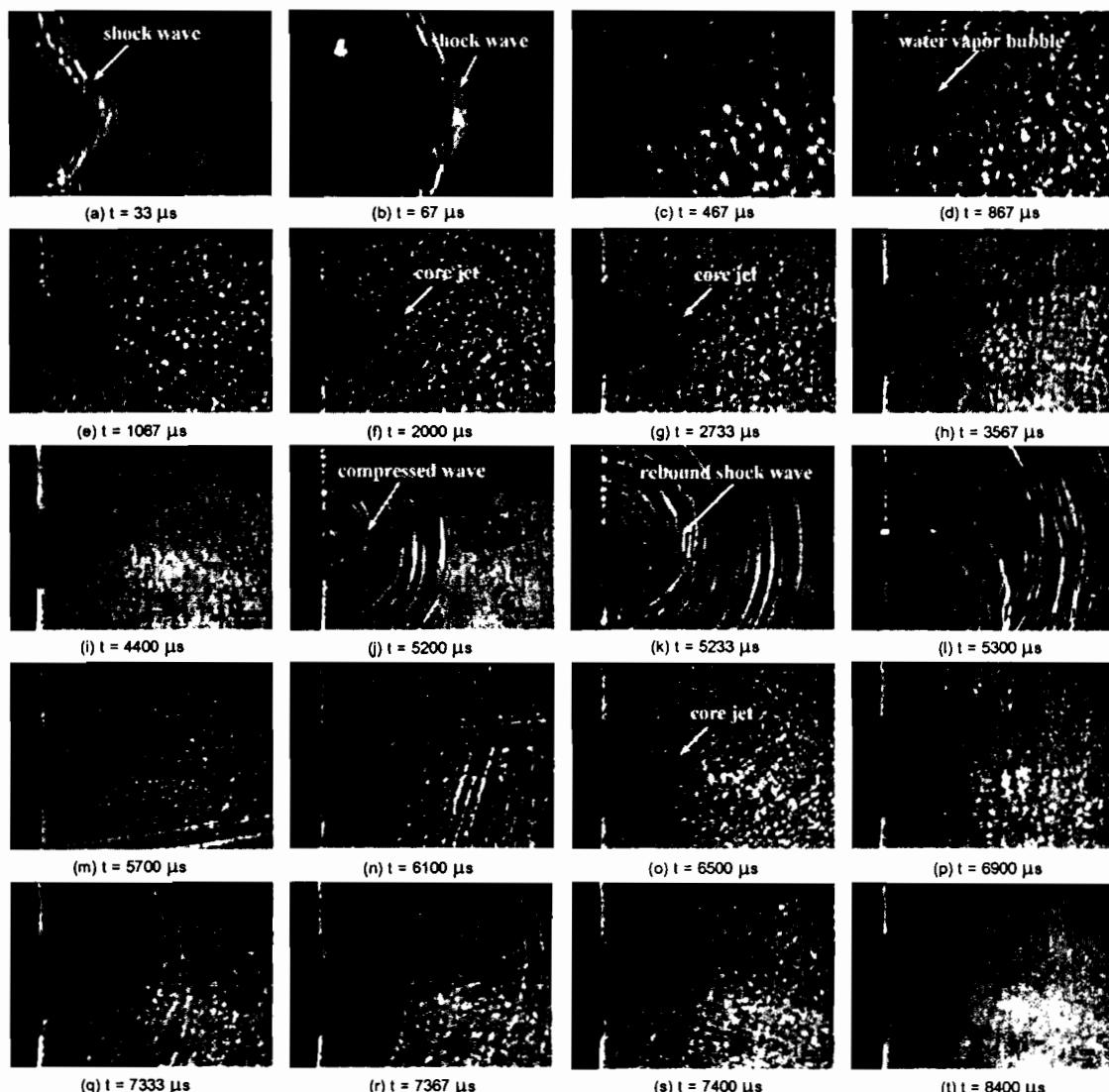
4.1.2 คุณลักษณะลำพุ่งน้ำทะเล (sea water jet)



ภาพที่ 4.8 ภาพถ่ายโดยเทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งน้ำทะเลในอากาศ (sea water jet in air, $V_{j,\max} = 1,514 \text{ m/s}$, $M_a = 4.4$)

จากภาพที่ 4.8 แสดงภาพถ่ายโดยเทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งน้ำทะเลในอากาศ (sea water jet in air) พบว่าลำพุ่งของน้ำทะเลนั้นมีลักษณะที่คล้ายกับลำพุ่งน้ำ คือ ลำพุ่งจะขาวและแคบ แต่ลำพุ่งน้ำทะเลจะมีขนาดใหญ่กว่าลำพุ่งน้ำ และเกิดคลื่นกระแทก (shock wave) อย่างชัดเจน จะสังเกตเห็นว่ามีคลื่นกระแทก (shock wave) เกิดเป็นคลื่นกระแทกคลื่นที่สอง (second shock wave) หลังจากการเกิดคลื่นกระแทก (shock wave) ที่ปลายของลำพุ่ง ซึ่งจากทฤษฎีของคลื่นกระแทก (shock wave) คือ การจะเกิดคลื่นกระแทก (shock wave) ได้จะต้องมีการเคลื่อนที่ของวัตถุที่ความเร็วเหนือเสียง ซึ่ง second shock wave ที่เกิดขึ้นนั้นจะบ่งบอกว่ามีลำพุ่งเกิดขึ้นอีกหนึ่งลำพุ่ง (second jet) โดยมีการกล่าวถึงแล้วใน A.Matthujak [46] ซึ่งเป็นการเกิดลำพุ่งเป็นการฉีดแบบชั้น (pulse) จากการกระแทกของกระสุนปืนเพียงครั้งเดียว จากนั้นลำพุ่งที่สอง (second jet) อาจจะผสมกับลำพุ่งที่หนึ่ง (first jet) จึงทำให้เห็นเป็นคลื่นกระแทก (shock wave) เดียว จากภาพถ่ายชาโคว์กราฟ

(Shadowgraph) ภาพที่ 4.8(a-f) สามารถประมาณความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่งตลอดความยาว 250 mm ของการเคลื่อนที่ของลำพุ่งมีค่าเท่ากับ $1,238 \text{ m/s}$ คิดเป็น M_a เท่ากับ 3.6 การประมาณได้จากนูมของคลื่นกระแทก (shock wave) มีค่า 802 m/s คิดเป็น M_a เท่ากับ 2.3 โดยความเร็วสูงสุดของลำพุ่งน้ำทะเล มีค่าประมาณ $1,514 \text{ m/s}$ คิดเป็น M_a มีค่าเท่ากับ 4.45 ที่ $t = 33 \mu\text{s}$

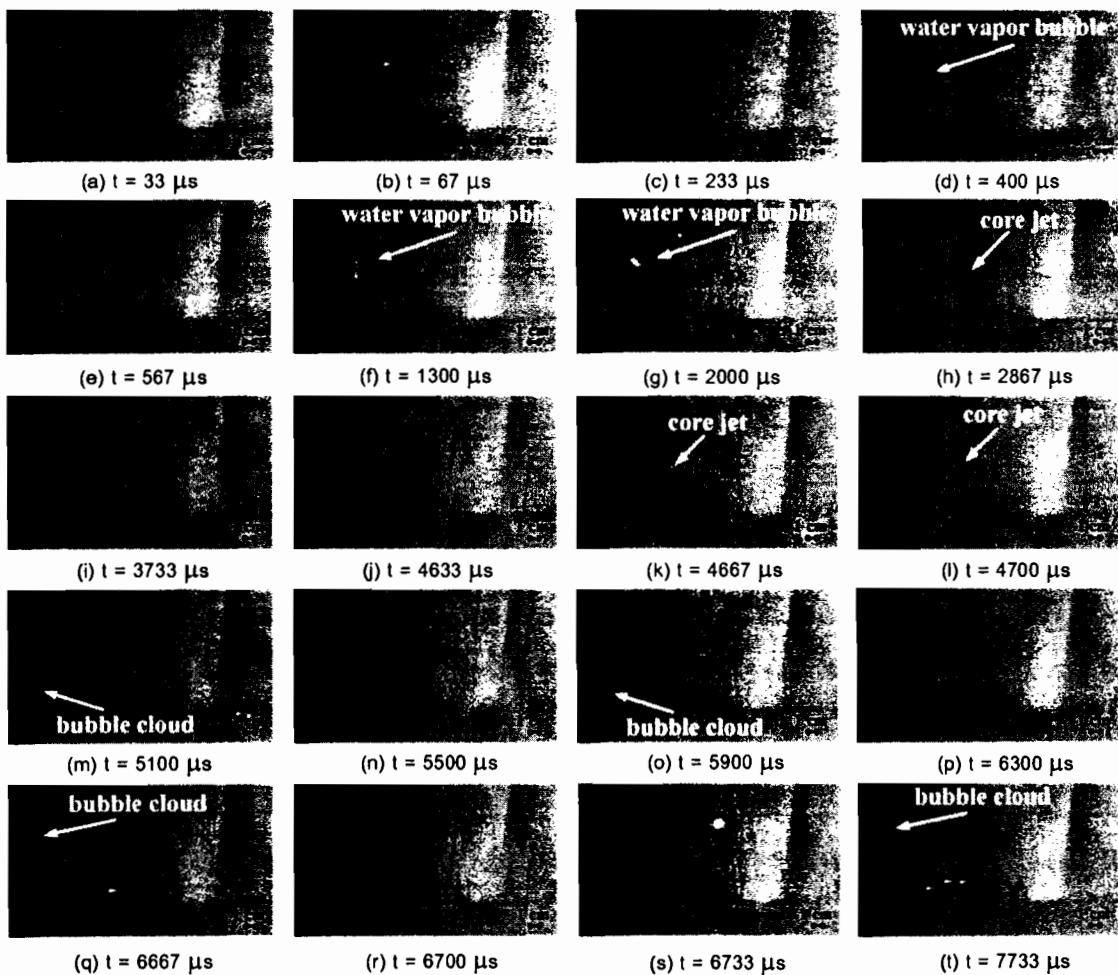


ภาพที่ 4.9 ภาพถ่ายโดยเทคนิคชาโคล์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งน้ำทะเลในน้ำ (sea water jet in water, $V_{j,max} = 195 \text{ m/s}$)

จากภาพที่ 4.9 แสดงภาพถ่ายโดยเทคนิคชาโคล์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งน้ำทะเลในน้ำ (sea water jet in water) พบว่าลำพุ่งน้ำทะเลมีลักษณะที่คล้ายกับลำพุ่งน้ำ แต่ระเบียบการเคลื่อนที่และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะเล็กและสั้นกว่า และมีความเร็วสูง เช่นเดียวกับลำพุ่งน้ำ

เนื่องจากจะพบเห็นการเกิดคลื่นกระแทก (shock wave) โดยความเร็วของคลื่นกระแทก (shock wave) มีความเร็วประมาณ $1,471 \text{ m/s}$ คิดเป็น M_a เท่ากับ 0.98 และมีความเร็วสูงสุดของลำพูงมีค่าประมาณ 195 m/s ที่เวลา $100 \mu\text{s}$ ดังภาพที่ 4.9(a-d) จากภาพที่ 4.9(e) จะพบว่าระเบการเคลื่อนที่ของ bubble สูงสุดเท่ากับ 36.99 mm ที่เวลา $1,067 \mu\text{s}$ หลังจากนั้น bubble จะหยุดตัว แต่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะขยายตัวอย่างต่อเนื่องดังจากภาพที่ 4.9(f) จากจากภาพที่ 4.9(g) พบว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะขยายตัวสูงสุดเท่ากับ 48.17 mm ที่เวลา $2,767 \mu\text{s}$ ความเร็วการขยายตัว ($V_{d,e}$) เท่ากับ 17.40 m/s จากนั้น bubble จะเริ่มยุบตัว นอกจากนี้จะสังเกตเห็นแกนของลำพูง แต่จะเห็นไม่ชัดเจนเมื่อเทียบกับลำพูงน้ำดังในภาพที่ 4.9(h-i) จากจากภาพที่ 4.9(j) เมื่อ bubble ยุบตัวลงจนถึงค่าต่ำสุดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble เท่ากับ 12.04 mm ที่เวลา $5,167 \mu\text{s}$ ความเร็วการยุบตัว ($V_{d,c}$) เท่ากับ 15.05 m/s จะพบว่า compressed wave และ rebound shock wave มีลักษณะจางกว่าลำพูงน้ำ ซึ่งจากภาพถ่ายสามารถประมาณความเร็วของ rebound shock wave เท่ากับ $1,453 \text{ m/s}$ คิดเป็น M_a เท่ากับ 0.96 ดังจากภาพที่ 4.9(k-l) จากภาพที่ 4.9(m-p) bubble จะขยายตัวขึ้นอีกรั้งและแทนจะสังเกตไม่เห็นแกนของลำพูง จากภาพที่ 4.9(q-t) จะพบว่าเกิด rebound shock wave ในครั้งที่สอง แต่จะสังเกตเห็นว่าแทนจะไม่พบ compressed wave และ rebound shock wave ซึ่งจากภาพถ่ายสามารถประมาณความเร็วของ rebound shock wave เท่ากับ $1,505 \text{ m/s}$ คิดเป็น M_a เท่ากับ 1

จากภาพที่ 4.10 แสดงภาพถ่ายโดยไม่ใช้เทคนิคชาโคล์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพูงน้ำทะเลในน้ำ (sea water jet in water) พบว่า bubble มีลักษณะที่แหลม ระเบการเคลื่อนที่และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะสั้นและเล็กกว่าลำพูงน้ำ ดังในภาพที่ 4.3 โดยที่ความเร็วสูงสุดของลำพูงมีค่าประมาณ 335 m/s ที่เวลา $33 \mu\text{s}$ ดังภาพที่ 4.10(a-d) จากภาพที่ 4.10(e) จะพบว่าระเบการเคลื่อนที่ของ bubble สูงสุดเท่ากับ 30.89 mm ที่เวลา $533 \mu\text{s}$ หลังจากนั้น bubble จะหยุดตัว และจะสังเกตเห็นแกนของลำพูงไม่ชัดเจนดังภาพที่ 4.10(f) จากภาพที่ 4.10(g) พบว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะขยายตัวสูงสุดเท่ากับ 36.78 mm ที่เวลา $2,033 \mu\text{s}$ ความเร็วการขยายตัวเท่ากับ 18.09 m/s จากนั้น bubble จะเริ่มยุบตัวลง ดังจากภาพที่ 4.10(h-i) เมื่อเวลาผ่านไป bubble ยุบตัวลงจนถึงค่าต่ำสุดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble เท่ากับ 15.14 mm ที่เวลา $4,600 \mu\text{s}$ ความเร็วการยุบตัวเท่ากับ 8.43 m/s และจะสังเกตเห็นเป็นก้อน bubble รอบๆหัวฉีด โดยที่แกนของลำพูงจะสังเกตแทนไม่พบ ดังภาพที่ 4.10(j-l) จากนั้น bubble จะขยายตัวขึ้นอีกรั้ง ในแนวแกนตั้งรอบๆหัวฉีด ดังภาพที่ 4.10(m-p) โดยที่เส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะเกิดขึ้นอีกรั้ง ดังภาพที่ 4.10(q-s) จากนั้น bubble จะลดหย่อนตัวขึ้นและจะละลายผสมรวมกับน้ำภายในห้องทดลอง ดังภาพที่ 4.10(t)



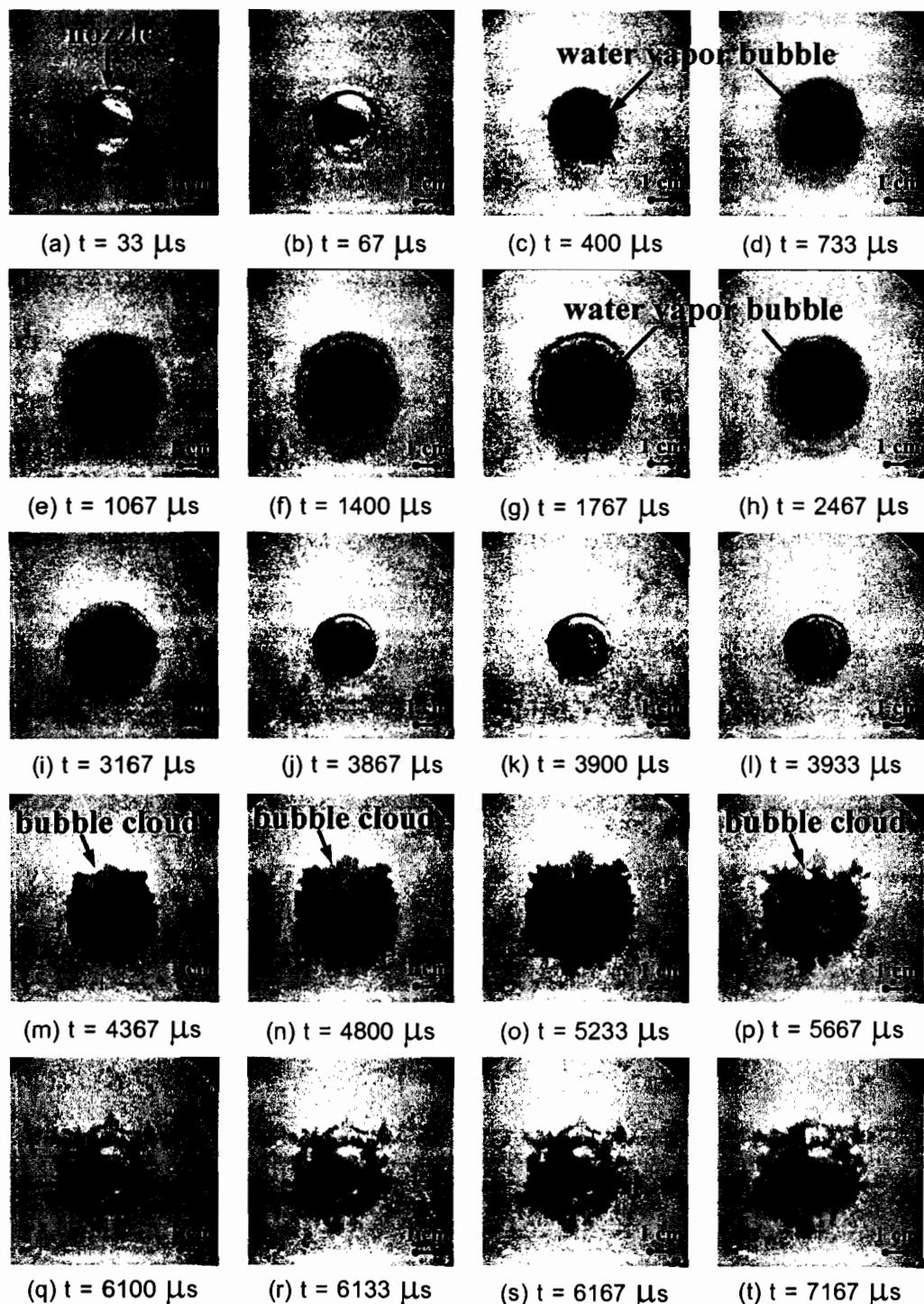
ภาพที่ 4.10 ภาพถ่ายโดยไม่ใช้เทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งน้ำทะเลในน้ำ (sea water jet in water)

จากภาพที่ 4.11 แสดงภาพถ่ายในแนวแกน โดยไม่ใช้เทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งน้ำทะเลในน้ำ จากภาพที่ 4.11(a-f) พบว่า bubble เกือบจะกลมอย่างสมมาตรคล้ายกับลำพุ่งน้ำและขยายตัวขึ้นอย่างรวดเร็ว ขณะที่ bubble จะขยายตัวได้เร็วกว่าลำพุ่งน้ำ แต่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะมีขนาดที่เล็กกว่า เนื่องจากความหนาแน่น (density) และความหนืด (kinematics viscosity) ที่มากกว่าจึงให้การแตกตัวของลำพุ่งน้ำทำได้ไม่ดี โดยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ขยายตัวสูงสุดในแนวอน (D_x) เท่ากับ 39.75 mm ที่เวลา 1,767 μs และในแนวตั้ง (D_y) เท่ากับ 38.70 mm ที่เวลา 1,800 μs ความเร็วในการขยายตัวในแนวอน ($V_{x,e}$) เท่ากับ 22.49 m/s และในแนวตั้ง ($V_{y,e}$) เท่ากับ 21.50 m/s ดังภาพที่ 4.11(g) จากนั้นจะเริ่มหยุดตัวและลดลงอย่างรวดเร็วจนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ลดลงถึงจุดต่ำสุดในแนวอน (D_x) เท่ากับ 21.18 mm และในแนวตั้ง (D_y) เท่ากับ 20.31 mm ที่เวลา 3,900 μs ความเร็วในการหยุดตัวใน

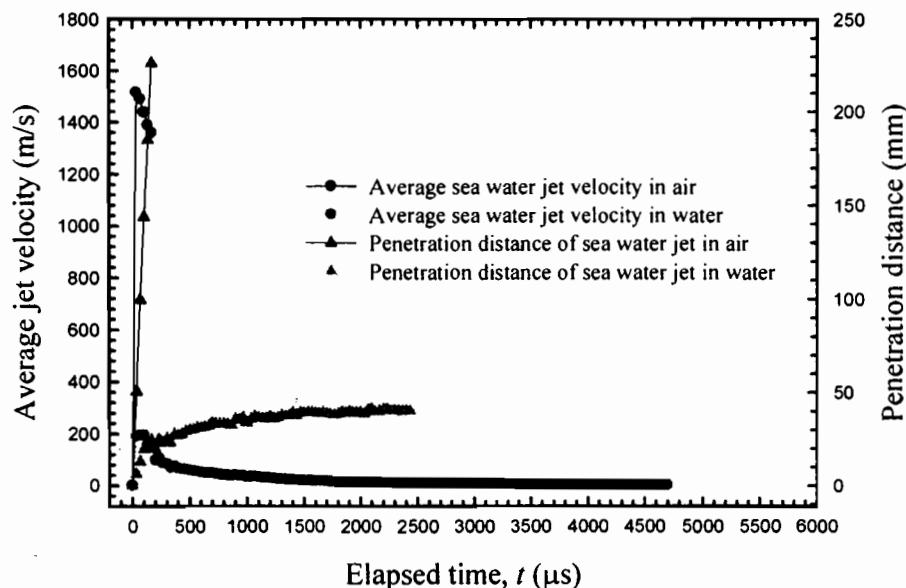
แนวอน (V_{x_c}) เท่ากับ 8.70 m/s และในแนวตั้ง (V_{y_c}) เท่ากับ 8.75 m/s ดังภาพที่ 4.11(h-k) เนื่องจากไม่ใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบชาโดว์กราฟ (Shadowgraph) การเกิดคลื่นกระแทก (shock wave) ในน้ำและ rebound shock wave เมื่อ bubble ลดขนาดลงต่ำสุดจะไม่สามารถสังเกตเห็นได้ จากภาพที่ 4.11(l-n) หลังจากเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ลดขนาดถึงจุดต่ำสุด bubble จะแตกตัว เป็นกลุ่ม bubble (bubble cloud) และจะขยายตัวอย่างรวดเร็วเป็นลักษณะรูปวงแหวนรอบๆ หัวฉีด ดังภาพที่ 4.11(m) โดยกลุ่ม bubble มีการบุบตัวอย่างช้าๆ ดังภาพที่ 4.11(o-s) ก่อนที่จะหายไปดังภาพที่ 4.11(t)

จากภาพที่ 4.12 แสดงความเร็วเฉลี่ยและระยะเวลาเคลื่อนที่ของลำพูน้ำท่าเดลความเร็วสูง ในอากาศและในน้ำ พบว่าความเร็วจะเพิ่มขึ้นเมื่อยิ่งอยู่ห่างจากเรือที่เวลา $33 \mu\text{s}$ และจะลดลงเมื่อยิ่งอยู่ห่างจากเรือ เมื่อเวลาผ่านไปและลำพูน้ำท่าเดลความเร็วสูงที่ฉีดในอากาศจะมีความเร็วสูงกว่าลำพูน้ำที่ฉีดในน้ำมาก เนื่องจากแรงต้านของอากาศ (aerodynamic drag) น้ำนี้มีค่าต่ำกว่าแรงต้านของน้ำ (hydrodynamic drag) มาก โดยที่ความเร็วเฉลี่ยของลำพูน้ำท่าเดลในอากาศมีค่าสูงสุดเท่ากับ $1,514 \text{ m/s}$ ที่เวลาเท่ากับ $33 \mu\text{s}$ ความเร็วเฉลี่ยของลำพูน้ำท่าเดลในน้ำสูงสุดเท่ากับ 195 m/s ที่เวลาเท่ากับ $100 \mu\text{s}$ จึงส่งผลให้ระยะเวลาเคลื่อนที่ของลำพูน้ำท่าเดลในอากาศเคลื่อนที่ไวกว่าในน้ำเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น

จากภาพที่ 4.13 แสดงภาพถ่ายโดยเทคนิคชาโดว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพูน้ำมันดีเซลในอากาศ (diesel jet in air) จากภาพที่ 4.13(a-d) พบว่าลำพูน้ำมันดีเซลในอากาศ ระยะห่างลำพูน้ำมันดีเซลกับอากาศ และยังพบว่าบริเวณผิวด้านข้างของลำพูน้ำมันดีเซลมีผิวที่ขรุขระกว่าลำพูน้ำซึ่งแสดงให้เห็นว่าแรงเสียดฟันที่ผิว (shear layer) ที่รุนแรงกว่าและมีการแตกตัวที่ดีกว่าน้ำซึ่งเกิดจากแรงตึงผิว (surface tension) ของลำพูน้ำมันดีเซลมีค่าต่ำกว่าน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 จากภาพที่ 4.13(e-f) จะสังเกตเห็นการเกิดการเปลี่ยนแปลงมุมของคลื่นกระแทก (change in shock angle) ซึ่งบ่งบอกว่ามีลำพูน้ำที่เกิดจากการกระแทกของกระสุนเพิงหนึ่งครั้ง สามารถทำให้เกิดลำพูน้ำมากกว่าหนึ่งลำพูนหรือเกิดการฉีดแบบชั้น (pulse) โดยลำพูนแรกมีความเร็วลดต่ำลงจึงทำให้ลำพูนที่สองสามารถแซงลำพูนตัวแรกจึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมุมของคลื่นกระแทก (shock wave) ดังภาพที่ 4.13(g) และหลังจากนั้นก็จะระเหยภายในห้องทดลองที่รุนแรงกว่าลำพูนน้ำ จากการถ่ายภาพสามารถประมาณความเร็วเฉลี่ยของลำพูนคลื่นความยาว 250 mm ของการเคลื่อนที่ของลำพูนมีค่าเท่ากับ 688 m/s คิดเป็น M_a เท่ากับ 2.0 การประมาณได้จากมุมของคลื่นกระแทก (shock wave) มีค่า 856 m/s คิดเป็น M_a เท่ากับ 2.5 โดยความเร็วสูงสุดของลำพูน้ำมันดีเซลมีค่าประมาณ $1,453 \text{ m/s}$ คิดเป็น M_a มีค่าเท่ากับ 4.27 ที่ $t = 33 \mu\text{s}$

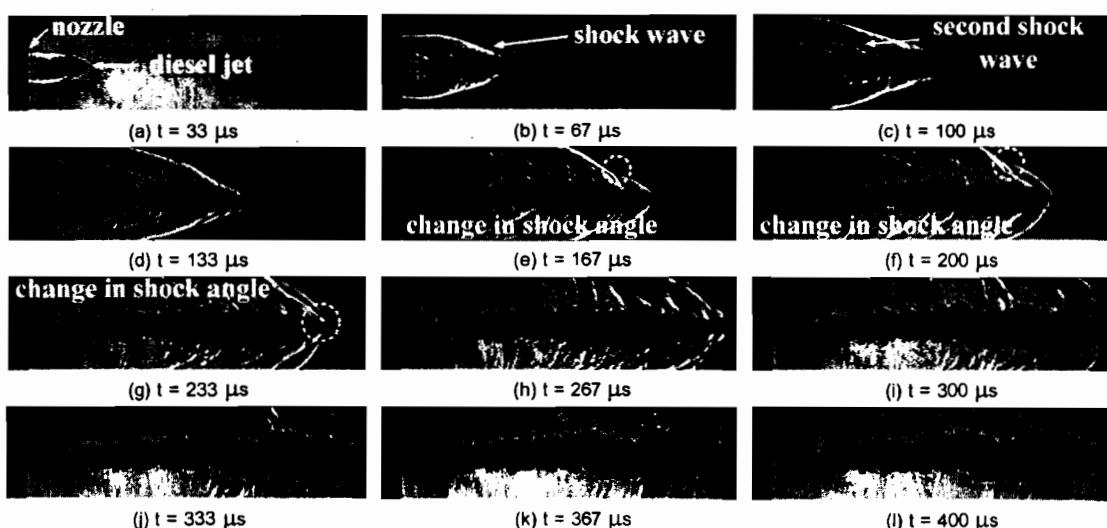


ภาพที่ 4.11 ภาพถ่ายในแนวแกน โดยไม่ใช้เทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งน้ำทะเล
ในน้ำ (sea water jet in water)

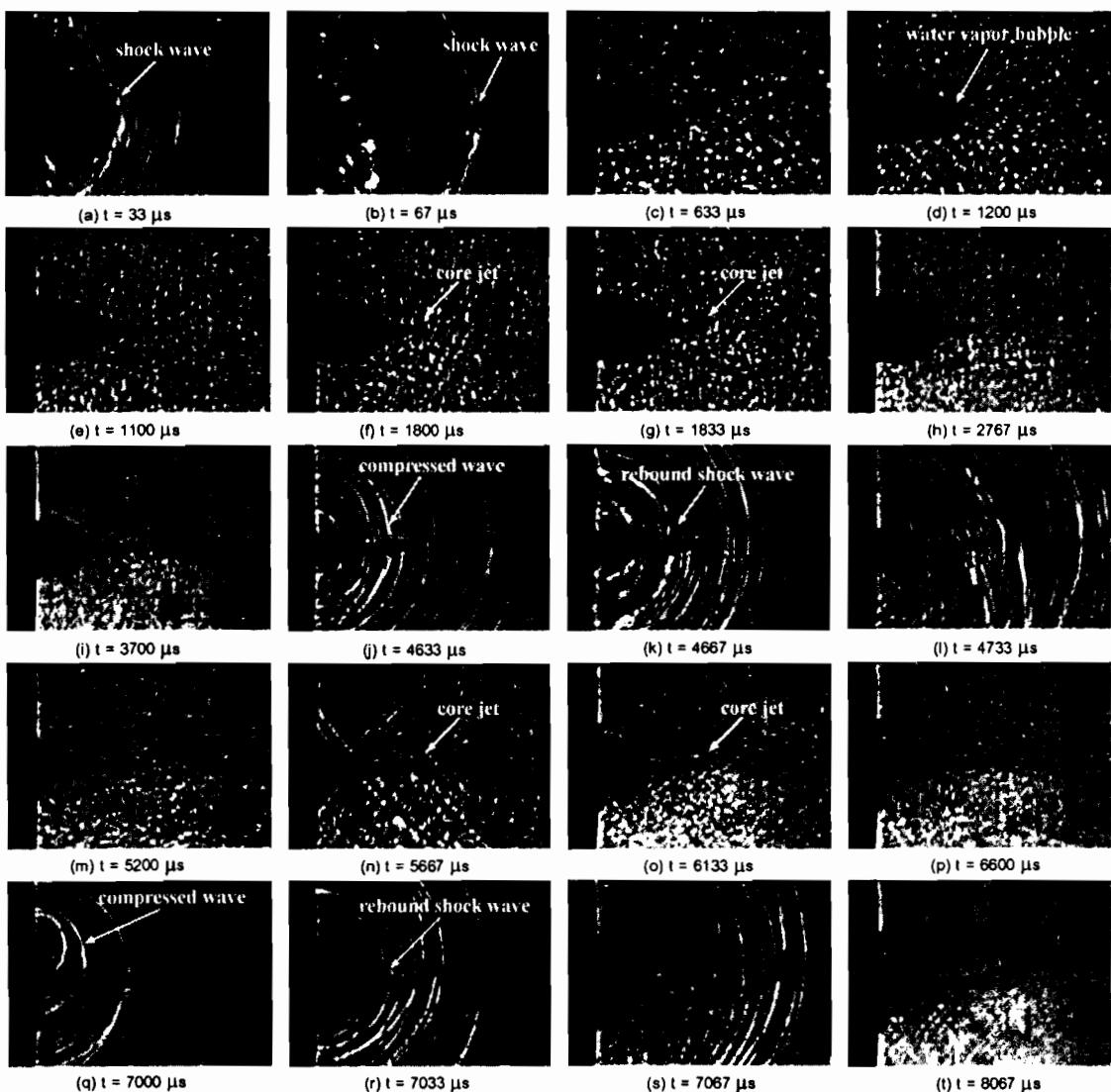


ภาพที่ 4.12 ความเร็วเฉลี่ยและระยะการเคลื่อนที่ของลำพุ่งน้ำทะเลและความเร็วสูงในอากาศและในน้ำ

4.1.3 คุณลักษณะลำพุ่งน้ำมันดีเซล (diesel jet)



ภาพที่ 4.13 ภาพถ่ายโดยเทคนิคชาโดว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งน้ำมันดีเซลในอากาศ (diesel jet in air, $V_{j,max} = 1,453 \text{ m/s}$, $M_a = 4.2$)

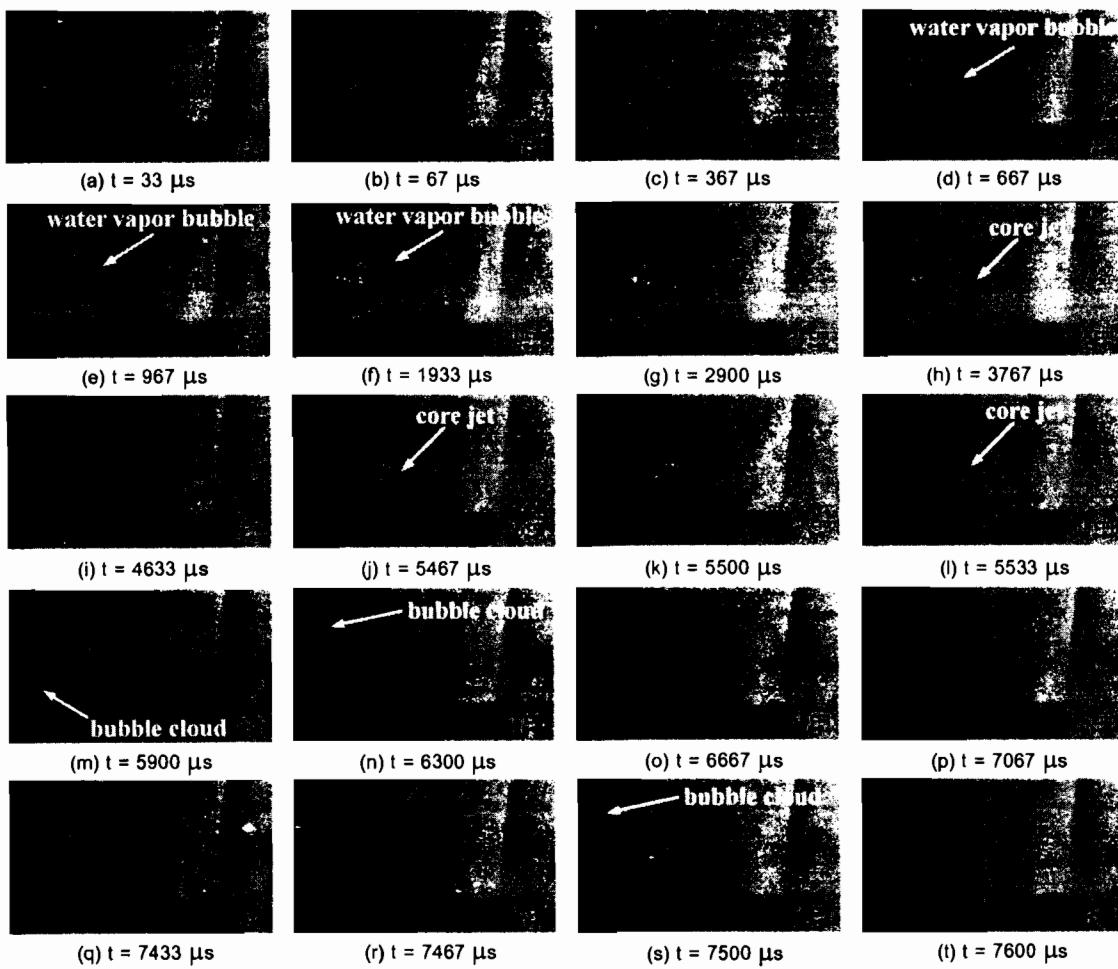


ภาพที่ 4.14 ภาพถ่ายโดยเทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งน้ำมันดีเซลในน้ำ (diesel jet in water, $V_{j,\max} = 576 \text{ m/s}$)

จากภาพที่ 4.14 แสดงภาพถ่ายโดยเทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งน้ำมันดีเซลในน้ำ (diesel jet in water) พบว่าลำพุ่งมีลักษณะที่แหลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะเล็กกว่าลำพุ่งน้ำ และจะพบเห็นการเกิดคลื่นกระแทก (shock wave) เช่นเดียวกับลำพุ่งน้ำในน้ำ โดยความเร็วของคลื่นกระแทก (shock wave) มีความเร็วประมาณ $1,462 \text{ m/s}$ คิดเป็น M_a เท่ากับ 0.97 และมีความเร็วสูงสุดของลำพุ่งมีค่าประมาณ 576 m/s ที่เวลา $33 \mu\text{s}$ ดังภาพที่ 4.14(a-b) จากนั้น bubble จะขยายตัวเพิ่มขึ้น ซึ่งจะพบว่าระยะการเคลื่อนที่ของ bubble จะเคลื่อนที่ได้ไกลกว่า แต่เส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะเล็กกว่าลำพุ่งน้ำ ซึ่งเป็นผลของความหนืดคงทน (kinematics viscosity) ของลำพุ่งน้ำมันดีเซลที่มีค่ามากกว่าลำพุ่งน้ำ จึงทำให้การแตกตัวของลำพุ่งน้ำมันแตกตัวได้

ไม่ตี ดังภาพที่ 4.14(c-d) จากภาพที่ 4.14(e) จะพบว่าระบบการเคลื่อนที่ของ bubble สูงสุดเท่ากับ 61.93 mm ที่เวลา 1,100 μ s หลังจากนั้น bubble จะหยุดตัว และจะสั่นสะเทือนแกนของลำพูงชักเจน กว่าลำพูงน้ำดังภาพที่ 4.14(f) จากจากการที่ 4.14(g) พบว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะขยายตัวสูงสุดเท่ากับ 36.06 mm ที่เวลา 1,867 μ s ความเร็วการขยายตัว (V_{d_e}) เท่ากับ 19.31 m/s จากนั้น bubble จะเริ่มยุบตัวลง ดังจากภาพที่ 4.14(h-i) จากจากการที่ 4.14(j-l) เมื่อ bubble ยุบตัวลง จนถึงค่าต่ำสุดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble เท่ากับ 15.97 mm ที่เวลา 4,800 μ s ความเร็วการยุบตัว (V_{d_e}) เท่ากับ 6.84 m/s จะพบว่า compressed wave และ rebound shock wave จะมีลักษณะของเข้มกว่าลำพูงน้ำ โดยที่สั่นสะเทือนแกนของลำพูงและกลุ่มของ bubble รอบๆหัวฉีดชักเจน ซึ่งจากการถ่ายสารภาพประมวลผลความเร็วของ rebound shock wave เท่ากับ 1,331 m/s คิดเป็น M_a เท่ากับ 0.88 จากภาพที่ 4.14(m-p) bubble จะขยายตัวขึ้นอีกครั้ง โดยที่จะพบว่าการเคลื่อนที่ของ bubble ในแกน x นั้นจะหยุดนิ่ง ไม่เคลื่อนที่ไปข้างหน้าอีก จากการที่ 4.14(q-t) จะพบว่าเกิด rebound shock wave ในครั้งที่สอง แต่จะสั่นสะเทือนเส้นคลื่นของ compressed wave และ rebound shock wave ได้ชัดเจนกว่าลำพูงน้ำ ซึ่งจากการถ่ายสารภาพประมวลผลความเร็วของ rebound shock wave เท่ากับ 1,362 m/s คิดเป็น M_a เท่ากับ 0.9

จากการที่ 4.15 แสดงภาพถ่ายโดยไม่ใช้เทคนิคชาโดว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพูงน้ำมันดีเซลในน้ำ (diesel jet in water) พบว่าลำพูงมีลักษณะที่คล้ายกับลำพูงน้ำในช่วงแรก (ภาพที่ 4.3(a-b)) ระบบการเคลื่อนที่และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะขาวและเล็กกว่าลำพูงน้ำในน้ำ โดยที่ความเร็วสูงสุดของลำพูงมีค่าประมาณ 342 m/s ที่เวลา 33 μ s ดังภาพที่ 4.15(a-b) จากนั้น bubble จะขยายตัวเพิ่มขึ้น จะสั่นสะเทือนว่าบริเวณรอบของ bubble นั้นจะไม่เรียบเนียนเหมือนกับลำพูงน้ำ ดังภาพที่ 4.15(c-d) จากภาพที่ 4.15(e) จะพบว่าระบบการเคลื่อนที่ของ bubble สูงสุดเท่ากับ 29.13 mm ที่เวลา 967 μ s จากนั้น bubble จะหยุดตัว และจะสั่นสะเทือนแกนของลำพูงชักเจน เป็นผลเนื่องจากความหนาแน่นของดีเซล, ไม่เท่ากับน้ำ ดังภาพที่ 4.15(f) จากภาพที่ 4.15(g) พบว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะขยายตัวสูงสุดเท่ากับ 34.84 mm ที่เวลา 2,933 μ s ความเร็วการขยายตัวเท่ากับ 11.87 m/s จากนั้น bubble จะเริ่มยุบตัวลง ดังจากการที่ 4.15(h-i) เมื่อเวลาผ่านไป bubble ยุบตัวลงจนถึงค่าต่ำสุดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble เท่ากับ 17.70 mm ที่เวลา 5,467 μ s ความเร็วการยุบตัวเท่ากับ 6.76 m/s และจะสั่นสะเทือนเป็นกลุ่ม bubble รอบๆหัวฉีด โดยที่แกนของลำพูงจะสั่นสะเทือนได้ชัดเจน ดังภาพที่ 4.15(j-l) จากนั้น bubble จะขยายตัวขึ้นอีกครั้ง ในแนวแกนตั้ง รอบๆหัวฉีด ดังภาพที่ 4.15(m-p) โดยที่เส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble อีกครั้งและยังสั่นสะเทือนแกนของลำพูงอยู่ ดังภาพที่ 4.15(q-s) จากนั้น bubble จะลดตัวขึ้นภายในห้องทดลอง ดังภาพที่ 4.15(t)



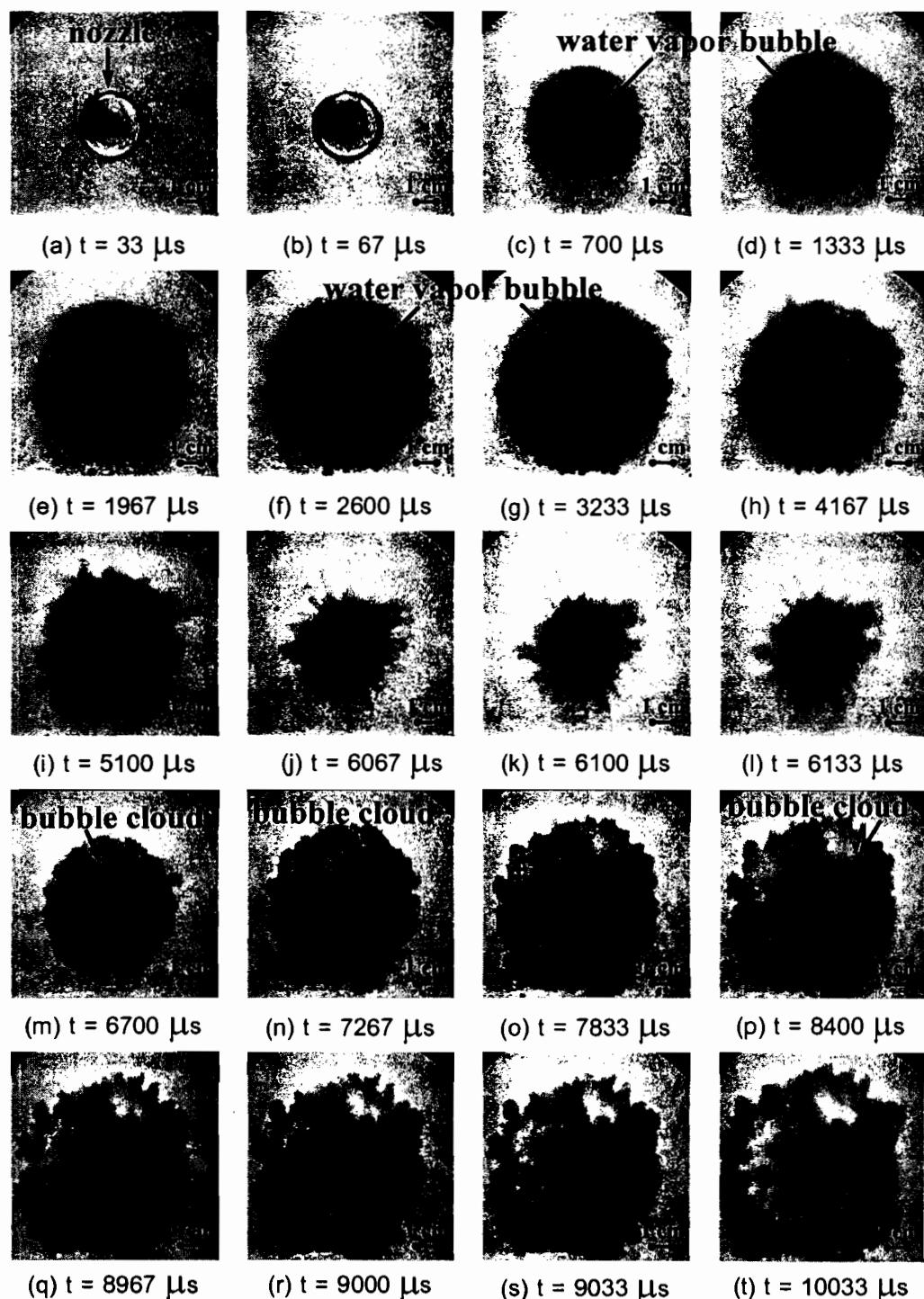
ภาพที่ 4.15 ภาพถ่ายโดยไม่ใช้เทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งน้ำมันดีเซลในน้ำ (diesel jet in water)

จากภาพที่ 4.16 แสดงภาพถ่ายในแนวแกนโดยไม่ใช้เทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของของลำพุ่งน้ำมันดีเซลในน้ำ 从ภาพที่ 4.16(a-f) พบว่า bubble เกือบจะกลมอย่างสมมาตรคล้าย กับลำพุ่งน้ำและขยายตัวขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะสังเกตเห็นว่ามีการแตกตัว คล้ายเป็นละล่องและไอ น้ำจะเกิดขึ้นรุนแรงกว่าลำพุ่งน้ำ เนื่องจากค่าความตึงผิว (surface tension) มีค่าน้อยกว่าลำพุ่งน้ำ โดยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ขยายตัวสูงสุดในแนวอน (D_x) เท่ากับ 65.19 mm ที่เวลา 3,233 μs และในแนวตั้ง (D_y) เท่ากับ 65.69 mm ที่เวลา 3,267 μs ความเร็วการขยายตัวในแนวอน (V_{x,0}) เท่ากับ 20.16 m/s และในแนวตั้ง (V_{y,0}) เท่ากับ 20.10 m/s ดังภาพที่ 4.16(g) จากนั้นจะเริ่มบุบตัวและ ลดลงอย่างรวดเร็วจนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ลดลงถึงจุดต่ำสุดในแนวอน (D_x) เท่ากับ 31.48 mm และในแนวตั้ง (D_y) เท่ากับ 31.48 mm ที่เวลา 6,033 μs ความเร็วการบุบตัวในแนวอน (V_{x,0}) เท่ากับ 12.03 m/s และในแนวตั้ง (V_{y,0}) เท่ากับ 12.36 m/s ดังภาพที่ 4.16(h-k) เนื่องจากไม่ใช้

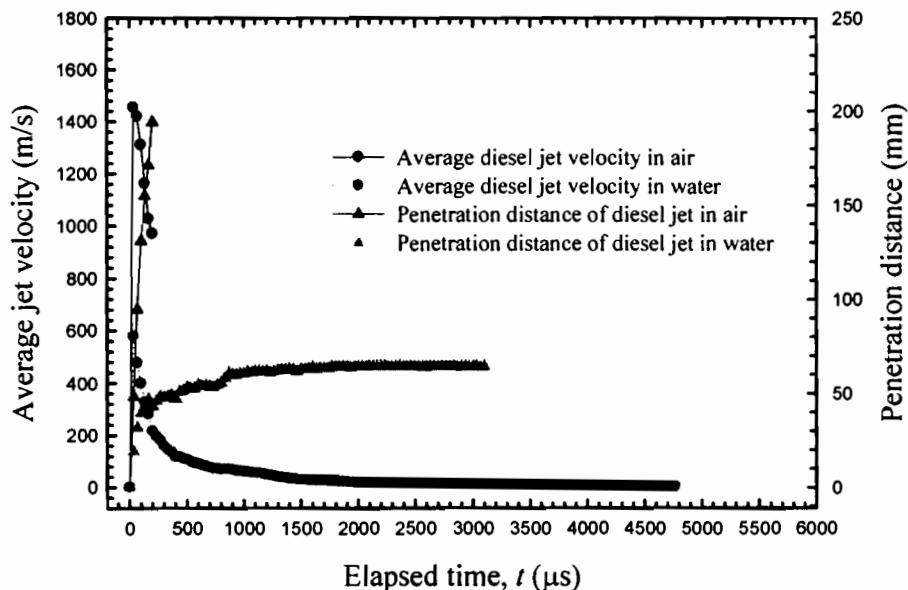
เทคนิคการถ่ายภาพแบบชาโคล์กราฟ (Shadowgraph) การเกิดคลื่นกระแทก (shock wave) ในน้ำและ rebound shock wave เมื่อ bubble ลดขนาดลงต่ำสุดจะไม่สามารถสังเกตเห็นได้ จากภาพที่ 4.16(I-n) หลังจากเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ลดขนาดถึงจุดต่ำสุด bubble จะแตกตัวเป็นกลุ่ม bubble (bubble cloud) และจะขยายตัวอย่างรวดเร็วเป็นลักษณะรูปปั่งแหวนรอบๆ หัวฉีด และบังคับสังเกตเห็นละเอียดและไออุ่น ดังภาพที่ 4.16(m) โดยกลุ่ม bubble มีการบุบตัวอย่างช้าๆ ดังภาพที่ 4.16(o-s) ก่อนที่จะค่อยๆ ถลายตัวหายไปดังภาพที่ 4.16(t)

จากภาพที่ 4.17 แสดงความเร็วเฉลี่ยและการเคลื่อนที่ของลำพุ่งน้ำมันดีเซล ความเร็วสูงในอากาศและในน้ำ พบว่าความเร็วจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่เวลา 33 μs และจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาผ่านไปและลำพุ่งน้ำมันดีเซลความเร็วสูงที่มีค่าในอากาศจะมีความเร็วสูงกว่าลำพุ่งที่มีค่าในน้ำมาก เนื่องจากแรงด้านของอากาศ (aerodynamic drag) น้ำมีค่าต่ำกว่าแรงด้านของน้ำ (hydrodynamic drag) มาก โดยที่ความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่งน้ำมันดีเซลในอากาศมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1,453 m/s ที่เวลาเท่ากับ 33 μs ความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่งน้ำมันดีเซลในน้ำสูงสุดเท่ากับ 576 m/s ที่เวลาเท่ากับ 33 μs ซึ่งส่งผลให้ระบบการเคลื่อนที่ของลำพุ่งน้ำมันดีเซลในอากาศเคลื่อนที่ได้ไกลกว่าในน้ำเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น

จากภาพที่ 4.18 แสดงภาพถ่ายโดยเทคนิคชาโคล์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งกลีโอลิน ในอากาศ (kerosene jet in air) พบว่าลำพุ่งจะมีลักษณะแตกต่างจากลำพุ่งน้ำ ดังภาพที่ 4.18(a) โดยคลื่นกระแทก (shock wave) ที่เกิดขึ้นจะเป็นลักษณะคลื่นกระแทกโถง (bow shock) ซึ่งแตกต่างกว่าลำพุ่งที่ก่อตัวผ่านมา ก่อนหน้านี้ที่ลักษณะคลื่นกระแทก (shock wave) เป็นคลื่นกระแทกเฉียง (oblique shock) นอกจากนี้ยังพบการแตกตัว การระเหย กล้ายเป็นละอองและ ไอบริเวณรอบๆ ลำพุ่งที่รุนแรง ในภาพที่ 4.18(b-d) ยังพบว่ามีการแตกตัวที่รุนแรงโดยลักษณะของลำพุ่งจะเคลื่อนที่ช้ากว่าลำพุ่งน้ำ และมีการแตกตัวที่รุนแรงยันเนื่องมาจากการตึงผิว (surface tension) มีค่าต่ำกว่า นอกจากนี้ยังพบว่ามีการแตกตัวที่รุนแรงกว่าลำพุ่งน้ำมันดีเซลถึงแม้ว่าค่าความตึงผิวจะใกล้เคียงกัน ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากการหนืด粘性 (kinematics viscosity) ของลำพุ่งกลีโอลินที่มีค่าต่ำกว่าลำพุ่งน้ำมันดีเซลในภาพที่ 4.18(f-1) จะพบว่าลำพุ่งที่บริเวณที่ใกล้กับหัวฉีดนั้นจะมีลักษณะที่เรียบและเล็กลง และการแตกตัวของลำพุ่งอยู่ที่ปลายของลำพุ่ง เนื่องจากตัวลำพุ่งเองมีความเร็วที่ลดลงจึงทำให้แรงเฉือน (shear layer) ที่หัวของลำพุ่นนั้นลดลงตามไปด้วย และหลังจากนั้นลำพุ่งก็จะค่อยๆ ระเหยกล้ายเป็นไอภายในห้องทดสอบ ซึ่งจากการถ่ายภาพสามารถประมาณความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่งตลอดความยาว 250 mm ของการเคลื่อนที่ของลำพุ่งมีค่าเท่ากับ 516 m/s คิดเป็น M_a เท่ากับ 1.5 การประมาณได้จากมุมของคลื่นกระแทก (shock wave) มีค่า 714 m/s คิดเป็น M_a เท่ากับ 2.1 โดยความเร็วสูงสุดของลำพุ่งกลีโอลินมีค่าประมาณ 1,264 m/s คิดเป็น M_a มีค่าเท่ากับ 3.71 ที่ $t = 33 \mu s$

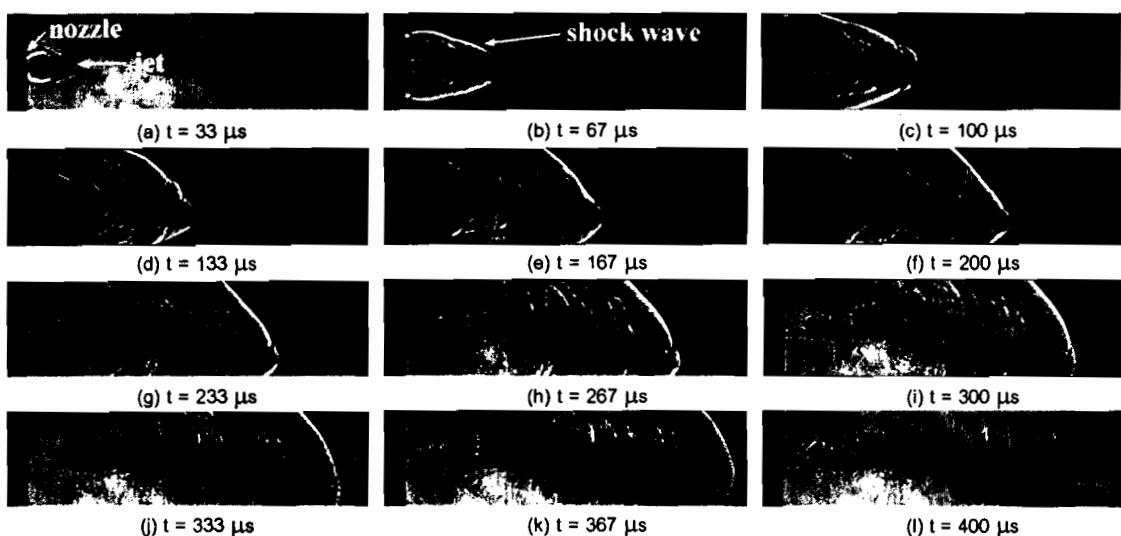


ภาพที่ 4.16 ภาพถ่ายในแนวแกน โดยไม่ใช้เทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งน้ำมันดีเซลในน้ำ (diesel jet in water)

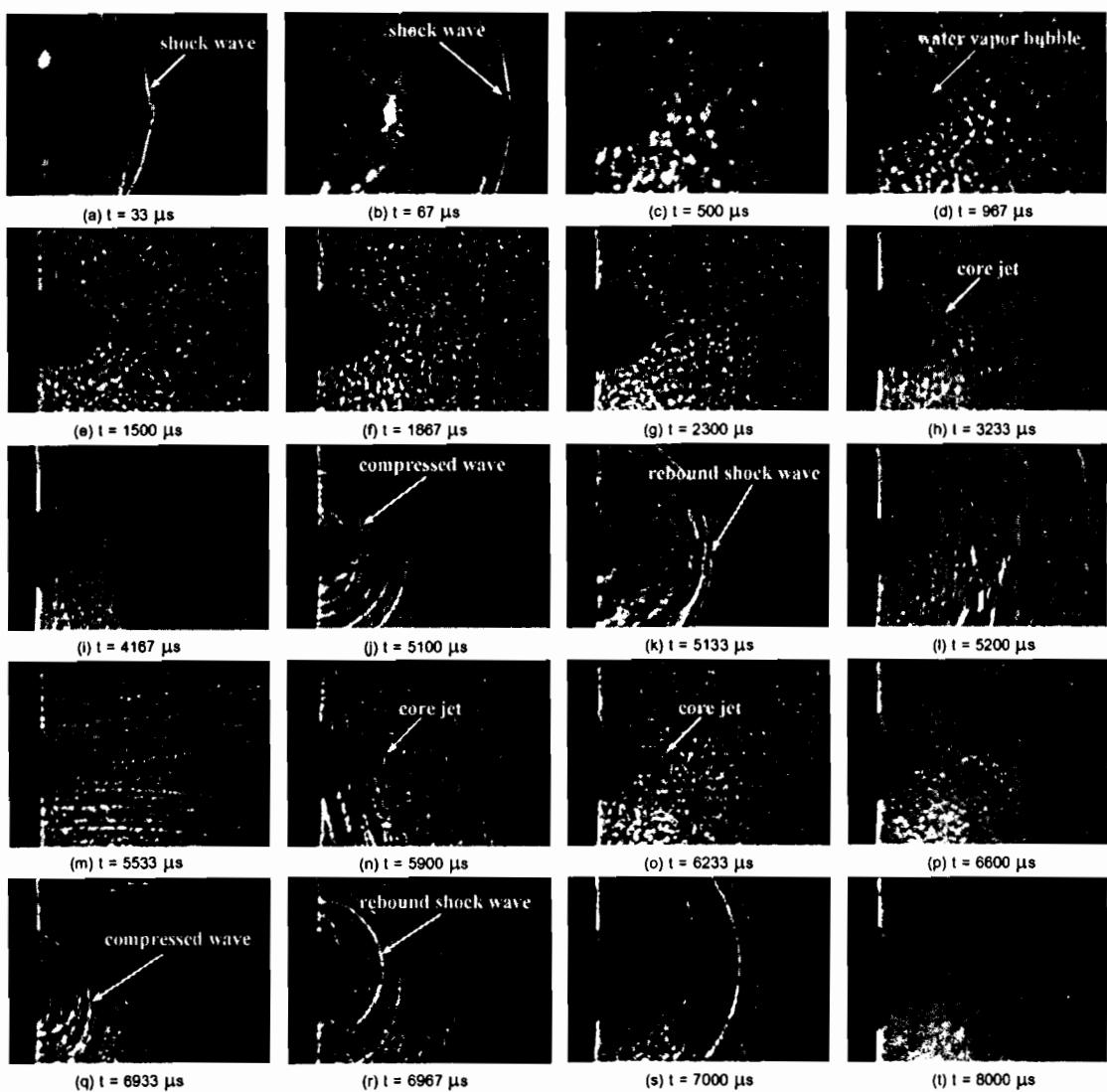


ภาพที่ 4.17 ความเร็วเฉลี่ยและระยะการเคลื่อนที่ของลำพุ่งน้ำมันดีเซลความเร็วสูงในอากาศและในน้ำ

4.1.4 คุณลักษณะลำพุ่งกีโอลซีน (kerosene jet)



ภาพที่ 4.18 ภาพถ่ายโดยเทคนิคห้าโดว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งกีโอลซีนในอากาศ (kerosene jet in air, $V_{j,\max} = 1,264 \text{ m/s}$, $M_a = 3.7$)



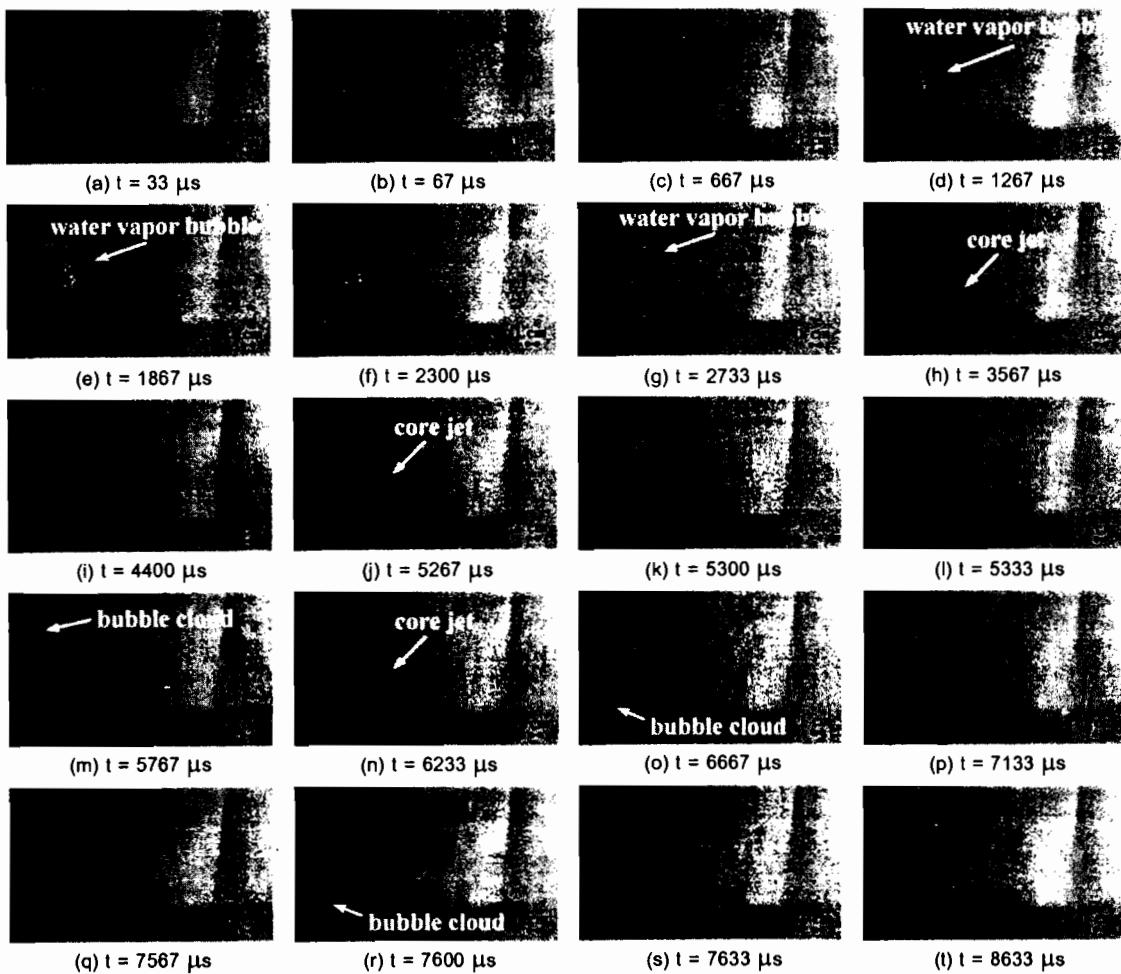
ภาพที่ 4.19 ภาพถ่ายโดยเทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งกลีโอลซีนในน้ำ (kerosene jet in water, $V_{j, \max} = 412 \text{ m/s}$)

จากภาพที่ 4.19 แสดงภาพถ่ายโดยเทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งกลีโอลซีนในน้ำ (kerosene jet in water) พบว่าลำพุ่งมีลักษณะที่แหลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะเล็กกว่าลำพุ่งน้ำ และจะสังเกตเห็นการเกิดคลื่นกระแทก (shock wave) เช่นเดียวกับลำพุ่งน้ำ โดยความเร็วของคลื่นกระแทก (shock wave) มีความเร็วประมาณ $1,488 \text{ m/s}$ คิดเป็น M_a เท่ากับ 0.99 และมีความเร็วสูงสุดของลำพุ่งมีค่าประมาณ 412 m/s ที่เวลา $33 \mu\text{s}$ ดังภาพที่ 4.19(a-b) จากนั้น bubble จะขยายตัวเพิ่มขึ้น และจะพบว่าทั้งระบบการเคลื่อนที่และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะสั้นและเล็กกว่าลำพุ่งน้ำในน้ำ (ภาพที่ 4.2(c-d)) ซึ่งเป็นผลของความหนาแน่น (density) ที่มีค่า น้อยกว่าลำพุ่งน้ำ นอกจากนี้ยังพบว่ามีการแตกตัวที่ดีกว่าลำพุ่งน้ำมันดีเซลถึงแม้ว่าความตึงผิวจะ

ไกล์เคียงกัน ซึ่งอาจเป็นผลของความหนืดชนน์ที่น้อยกว่าลำพูงน้ำมันดีเซล ดังภาพที่ 4.19(c-d) จากภาพที่ 4.21(e) จะพบว่าระเบการเคลื่อนที่ของ bubble สูงสุดเท่ากับ 35.84 mm ที่เวลา $1,500 \mu\text{s}$ หลังจากนั้น bubble จะหยุดตัว และจะสังเกตเห็นแกนของลำพูงชัดเจนและมีขนาดใหญ่กว่าลำพูงน้ำ ดังภาพที่ 4.19(f) จากจากภาพที่ 4.19(g) พบว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะขยายตัวสูงสุด เท่ากับ 52.18 mm ที่เวลา $2,333 \mu\text{s}$ ความเร็วการขยายตัว ($V_{d,e}$) เท่ากับ 22.36 m/s จากนั้น bubble จะเริ่มยุบตัวลง ดังจากภาพที่ 4.19(h-i) จากจากภาพที่ 4.19(j-l) เมื่อ bubble ยุบตัวลงจนถึงค่าต่ำสุด ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble เท่ากับ 14.62 mm ที่เวลา $5,100 \mu\text{s}$ ความเร็วการยุบตัว ($V_{d,i}$) เท่ากับ 13.57 m/s จะพบว่า compressed wave และ rebound shock wave จะมีลักษณะของเส้นคลื่น จะจางกว่าลำพูgn้ำในน้ำ โดยที่สังเกตเห็นแกนของลำพูงชัดเจน ซึ่งจากการถ่ายสารภาพประมวล ความเร็วของ rebound shock wave เท่ากับ $1,273 \text{ m/s}$ คิดเป็น M_a เท่ากับ 0.84 จากภาพที่ 4.19(m-p) bubble จะขยายตัวขึ้นอีกรั้ง และสังเกตเห็นแกนของลำพูงชัดเจน จากภาพที่ 4.19(q-t) จะพบว่าเกิด rebound shock wave ในครั้งที่สอง แต่จะสังเกตเห็นเส้นเส้นคลื่นของ compressed wave และ rebound shock wave ได้ชัดเจนกว่าลำพูgn้ำ ซึ่งจากการถ่ายสารภาพประมวลความเร็วของ rebound shock wave เท่ากับ $1,281 \text{ m/s}$ คิดเป็น M_a เท่ากับ 0.85

จากการที่ 4.20 แสดงภาพถ่ายโดยไม่ใช้เทคนิคชาโคลว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพูง ก๊อลโซเชนในน้ำ (kerosene jet in water) พบว่าลำพูgn มีลักษณะที่คล้ายกับลำพูgn้ำมันดีเซลในน้ำ แต่ ระเบการเคลื่อนที่และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะขาวและใหญ่กว่าลำพูgn้ำมันดีเซล โดย ที่ความเร็วสูงสุดของลำพูgn มีค่าประมาณ 206 m/s ที่เวลา $67 \mu\text{s}$ ดังภาพที่ 4.20(a-b) จากนั้น bubble จะขยายตัวเพิ่มขึ้น จะสังเกตเห็นว่า bubble นั้นจะมีลักษณะที่กลมสมมาตรกว่าลำพูgn คีเซลในน้ำ (ดัง ภาพที่ 4.15) ถึงแม้ว่าค่าความตึงผิวจะไกล์เคียงกัน ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากการความหนืดชนน์ (kinematics viscosity) ที่ต่ำกว่าลำพูgn คีเซล จึงทำให้การแตกตัวเป็นคลื่นจะและ ไอทำได้ค่อนข้าง ดังภาพ ที่ 4.20(c-d) จากภาพที่ 4.20(e) จะพบว่าระเบการเคลื่อนที่ของ bubble สูงสุดเท่ากับ 41.05 mm ที่ เวลา $1,867 \mu\text{s}$ จากนั้น bubble จะหยุดตัว และจะสังเกตเห็นแกนของลำพูgnชัดเจน เป็นผลเนื่องจาก ความหนาแน่น (density) ที่น้อยกว่าลำพูgn น้ำ ดังภาพที่ 4.20(f) จากภาพที่ 4.20(g) พบว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะขยายตัวสูงสุดเท่ากับ 58.91 mm ที่เวลา $2,767 \mu\text{s}$ ความเร็วการ ขยายตัวเท่ากับ 21.29 m/s จากนั้น bubble จะเริ่มยุบตัวลง ดังจากภาพที่ 4.20(h-i) เมื่อเวลาผ่านไป bubble ยุบตัวลงจนถึงค่าต่ำสุดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble เท่ากับ 26.41 mm ที่เวลา $5,100 \mu\text{s}$ ความเร็วการยุบตัวเท่ากับ 13.93 m/s และจะสังเกตเห็นเป็นกลุ่ม bubble รอบๆหัวฉีด โดยที่แกนของ ลำพูgn จะสังเกตได้ชัดเจน ดังภาพที่ 4.20(j-l) จากนั้น bubble จะขยายตัวขึ้นอีกรั้ง ในแนวแกนตั้ง

รอบๆหัวฉีด ดังภาพที่ 4.20(m-p) โดยที่เส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble อิ่กครั้งและขังสั้นเกตเห็นแกนของลำพูงอยู่ ดังภาพที่ 4.20(q-s) จากนั้น bubble จะลอดตัวขึ้นภายในห้องทดลอง ดังภาพที่ 4.20(t)



ภาพที่ 4.20 ภาพถ่ายโดยไม่ใช้เทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพูงกลีโโลชีนในน้ำ (kerosene jet in water)

จากภาพที่ 4.21 แสดงภาพถ่ายในแนวแกนโดยไม่ใช้เทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพูงกลีโโลชีนในน้ำจากภาพที่ 4.21(a-f) พบว่า bubble นั้นเกือบจะกลมอย่างสมมาตรคล้ายกับลำพูงน้ำมันดีเซลและขยายตัวขึ้นอย่างรวดเร็ว จะพบว่าการขยายตัวของ bubble นั้นจะใช้เวลาไม่ต่างกัน และการแตกตัว กลไกเป็นลักษณะเดียวกันกับลำพูงน้ำมันดีเซล แต่เนื่องจากค่าความหนาแน่น (density) มีค่าน้อยกว่าจึงทำให้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble มีขนาดเล็กกว่าเล็กน้อยโดยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ขยายตัวสูงสุดในแนวอน (D_x) เท่ากับ 60.95 mm และในแนวตั้ง (D_y) เท่ากับ 61.20 mm ที่เวลา 2,967 μ s ความเร็วการขยายตัวในแนวอน

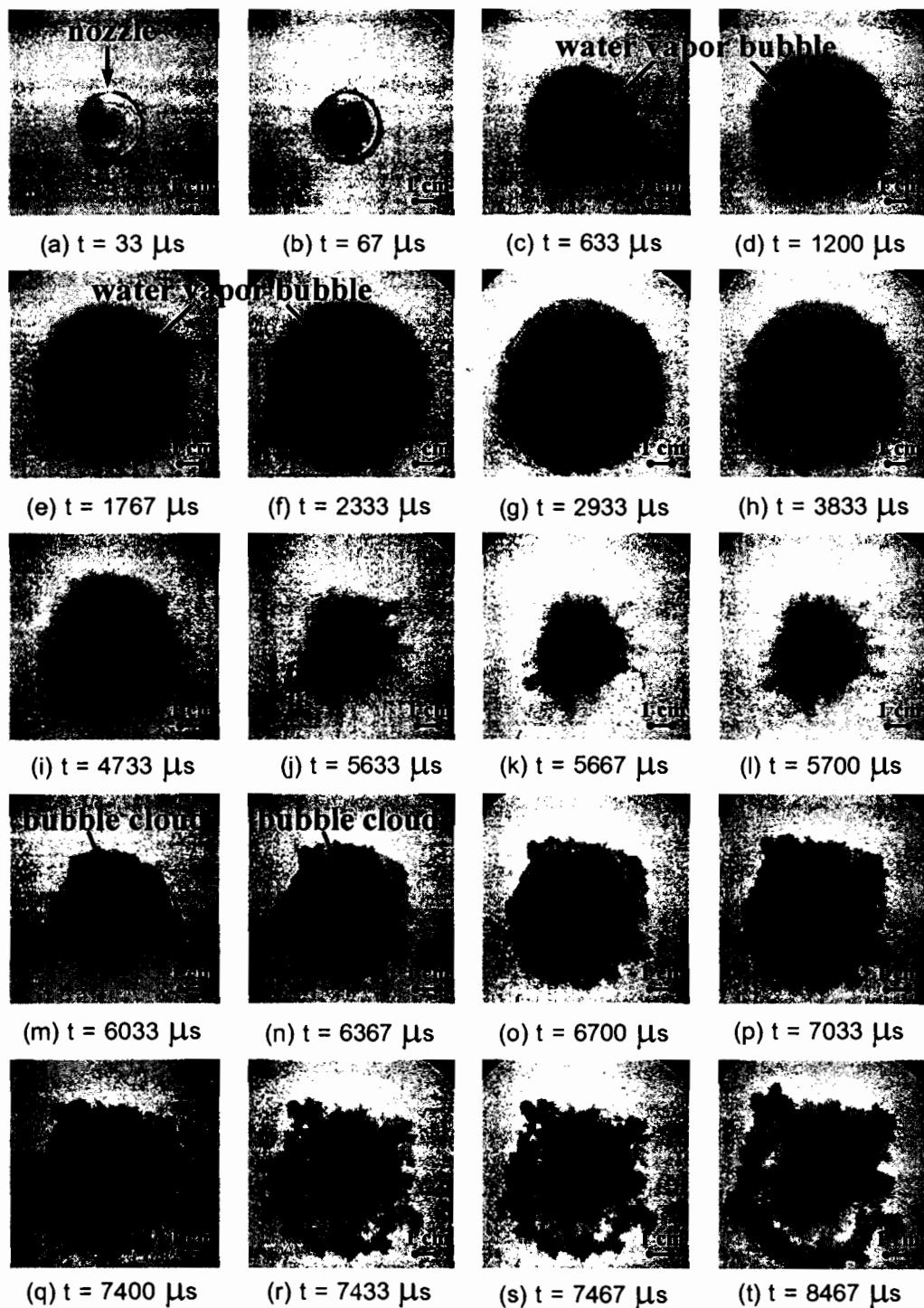
($V_{x,c}$) เท่ากับ 20.54 m/s และในแนวตั้ง ($V_{y,c}$) เท่ากับ 20.62 m/s ดังภาพที่ 4.21(g) จากนั้นจะเริ่มขุบตัวและลดลงอย่างรวดเร็วจนนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ลดลงถึงจุดต่ำสุดในแนวนอน (D_x) เท่ากับ 25.01 mm และในแนวตั้ง (D_y) เท่ากับ 24.77 mm ที่เวลา 5,633 μ s ความเร็วการขุบตัวในแนวนอน ($V_{x,c}$) เท่ากับ 13.48 m/s และในแนวตั้ง ($V_{y,c}$) เท่ากับ 13.66 m/s ดังภาพที่ 4.21(h-k) เนื่องจากไม่ใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบชาโคล์กราฟ (Shadowgraph) การเกิดคลื่นกระแทก (shock wave) ในน้ำและ rebound shock wave เมื่อบubble ลดขนาดลงต่ำสุดจะไม่สามารถสังเกตเห็นได้ จากการที่ 4.21(l-n) หลังจากเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ลดขนาดถึงจุดต่ำสุด bubble จะแตกตัวเป็นกลุ่ม bubble (bubble cloud) และจะขยายตัวอย่างรวดเร็วเป็นลักษณะรูปวงแหวนรอบๆ หัวฉีด และขังคงสังเกตเห็นลงทะเบลงและไออุ่นลักษณะกับลำพูงน้ำมันดีเซลในน้ำ ดังภาพที่ 4.21(m) โดยกลุ่ม bubble มีการขุบตัวอย่างช้าๆ ดังภาพที่ 4.21(o-s) ก่อนที่จะค่อยๆ ลายตัวหายไปดังภาพที่ 4.21(t)

จากการที่ 4.22 แสดงความเร็วเฉลี่ยและระยะการเคลื่อนที่ของลำพูงกลีโลซีนความเร็วสูงในอากาศและในน้ำ พบว่าความเร็วจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่เวลา 33 μ s และจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาผ่านไปและลำพูงกลีโลซีนความเร็วสูงที่มีค่าในอากาศจะมีความเร็วสูงกว่าลำพูงที่มีค่าในน้ำมาก เนื่องจากแรงด้านของอากาศ (aerodynamic drag) นั้นมีค่าต่ำกว่าแรงด้านของน้ำ (hydrodynamic drag) มาก โดยที่ความเร็วเฉลี่ยของลำพูงกลีโลซีนในอากาศมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1,264 m/s ที่เวลาเท่ากับ 33 μ s ความเร็วเฉลี่ยของลำพูงกลีโลซีนในน้ำสูงสุดเท่ากับ 412 m/s ที่เวลาเท่ากับ 33 μ s ซึ่งส่งผลให้ระบบการเคลื่อนที่ของลำพูงกลีโลซีนในอากาศเคลื่อนที่ได้ไกลกว่าในน้ำเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น

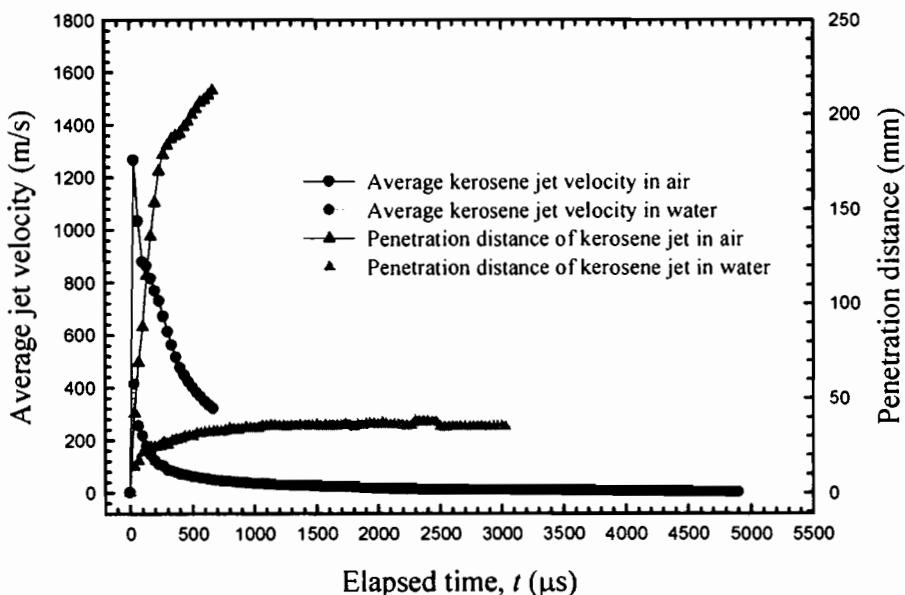
จากการที่ 4.23 แสดงภาพถ่ายโดยเทคนิคชาโคล์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพูงแออลกอฮอล์ในอากาศ (alcohol jet in air) จากภาพที่ 4.23 พบร่วมกับลักษณะที่คล้ายกับลำพูงน้ำมันดีเซล ดังภาพที่ 4.23(a-b) แต่มีลักษณะของลำพูงที่ใหญ่กว่า แต่กลับมีผิวเรียบและน้อยกว่าและจะสังเกตเห็น oblique shock ที่เกิดจากลำพูงอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อพิจารณาภาพที่ 4.23(c) จะพบว่า มีคลื่นกระแทกที่สองเกิดขึ้น (second shock wave) ซึ่งแสดงว่าเกิดลำพูงที่สองเกิดขึ้น และลำพูงที่สอง (second jet) ที่มีการเคลื่อนที่แข็งลำพูงแรก ซึ่งสังเกตว่ามีการเปลี่ยนมุมของคลื่นกระแทก (change in shock angle) จากการสังเกตลักษณะของคลื่นกระแทก (shock wave) พบร่วมกับภาพที่ 4.23(a-e) จะเป็นคลื่นกระแทกเฉียง (oblique shock) และเมื่อเวลาผ่านไปดังภาพที่ 4.23(f) คลื่นกระแทก (shock wave) กลายเป็นคลื่นกระแทกโค้ง (bow shock) แสดงให้เห็นว่าความเร็วของลำพูงแรกช้าลงอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับลำพูงน้ำมันดีเซล ค่าความตึงผิว (surface tension) และความหนืด粘滞 (kinematics viscosity) จะมีค่าใกล้เคียงกับลำพูงกลีโลซีน แต่ลักษณะการแตกตัวไม่รุนแรงเหมือนกับลำพูงกลีโลซีน แต่จะแตกตัวคล้ายเป็นไอไก้ลีเคียงกัน ซึ่งจะเกิดขึ้นช้ากว่าลำพูงกลีโลซีน ดังภาพที่ 4.23(g-l) ซึ่งจากการถ่ายภาพสามารถประมาณความเร็วเฉลี่ยของลำพูงตลอดความยาว 250

mm ของการเคลื่อนที่ของลำพูงมีค่าเท่ากับ 434 m/s คิดเป็น M_a เท่ากับ 1.2 การประมาณได้จากนั้นของคลื่นกระแทก (shock wave) มีค่า 962 m/s คิดเป็น M_a เท่ากับ 2.8 โดยความเร็วสูงสุดของลำพูงแอลกอฮอล์มีค่าประมาณ $1,548 \text{ m/s}$ คิดเป็น M_a มีค่าเท่ากับ 4.55 ที่ $t = 33 \mu\text{s}$

จากการที่ 4.24 แสดงภาพถ่ายโดยเทคนิคชาโคล์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพูงแอลกอฮอล์ในน้ำ (alcohol jet in water) พบว่ามีลักษณะที่คล้ายกับลำพูงน้ำในน้ำ โดยที่ระบบการเคลื่อนที่และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะสั้นและเล็กกว่าลำพูงน้ำเล็กน้อย และจะพบเห็นการเกิดคลื่นกระแทก (shock wave) เช่นเดียวกับลำพูงน้ำ (ดังภาพที่ 4.2(a-b)) โดยความเร็วของคลื่นกระแทก (shock wave) มีความเร็วประมาณ $1,489 \text{ m/s}$ คิดเป็น M_a เท่ากับ 0.99 และมีความเร็วสูงสุดของลำพูงมีค่าประมาณ 292 m/s ที่เวลา $33 \mu\text{s}$ ดังภาพที่ 4.24(a-b) จากนั้น bubble จะขยายตัวเพิ่มขึ้น และจะพบว่าทั้งระบบการเคลื่อนที่และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะสั้นและเล็กกว่าลำพูงน้ำ ซึ่งเป็นผลของความหนาแน่น (density) ที่มีค่าน้อยกว่าลำพูงน้ำ และจะพบว่าเกิดการแตกตัวໄวดีเนื่องจากค่าความตึงผิว (surface tension) มีค่าน้อยกว่าลำพูงน้ำ ดังภาพที่ 4.24(c-d) จากภาพที่ 4.24(e) จะพบว่าระบบการเคลื่อนที่ของ bubble สูงสุดเท่ากับ 39.99 mm ที่เวลา $1,633 \mu\text{s}$ หลังจากนั้น bubble จะหดตัว และจะสั้นเกตเဟนแกนของลำพูงชัดเจนกว่าลำพูงน้ำเล็กน้อยดังภาพที่ 4.24(f) จากภาพที่ 4.24(g) พบว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะขยายตัวสูงสุดเท่ากับ 51.90 mm ที่เวลา $2,633 \mu\text{s}$ ความเร็วการขยายตัว (V_{d_e}) เท่ากับ 19.71 m/s จากนั้น bubble จะเริ่มบุบตัวลง ดังจากภาพที่ 4.24(h-i) จากจากภาพที่ 4.24(j-l) เมื่อ bubble บุบตัวลงจนถึงค่าต่ำสุดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble เท่ากับ 17.49 mm ที่เวลา $5,233 \mu\text{s}$ ความเร็วการบุบตัว (V_{d_e}) เท่ากับ 13.23 m/s จะพบว่า compressed wave และ rebound shock wave จะมีลักษณะของเส้นคลื่นจะจางกว่าลำพูงน้ำ โดยที่สั้นเกตเဟนแกนของลำพูงชัดเจน ซึ่งจากภาพถ่ายสามารถประมาณความเร็วของ rebound shock wave เท่ากับ $1,435 \text{ m/s}$ คิดเป็น M_a เท่ากับ 0.96 จากภาพที่ 4.24(m-p) bubble จะขยายตัวขึ้นอีกครั้ง และสั้นเกตเဟนแกนของลำพูงชัดเจน จากภาพที่ 4.24(q-t) จะพบว่าเกิด rebound shock wave ในครั้งที่สอง แต่จะสั้นเกตเဟนเส้นของ compressed wave และ rebound shock wave ได้ชัดเจนกว่าลำพูงน้ำ ซึ่งจากภาพ ถ่ายสามารถประมาณความเร็วของ rebound shock wave เท่ากับ $1,445 \text{ m/s}$ คิดเป็น M_a เท่ากับ 0.96

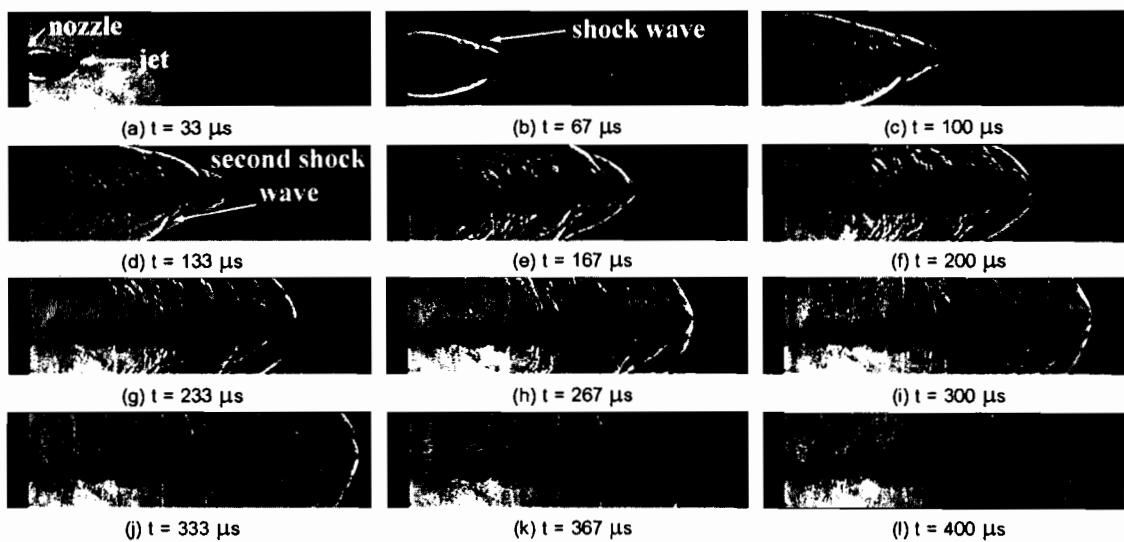


ภาพที่ 4.21 ภาพถ่ายในแนวแกนโดยไม่ใช้เทคนิคขาวดำวีกราฟ (Shadowgraph) ของลำพูงกลีโอลซีนในน้ำ (kerosene jet in water)

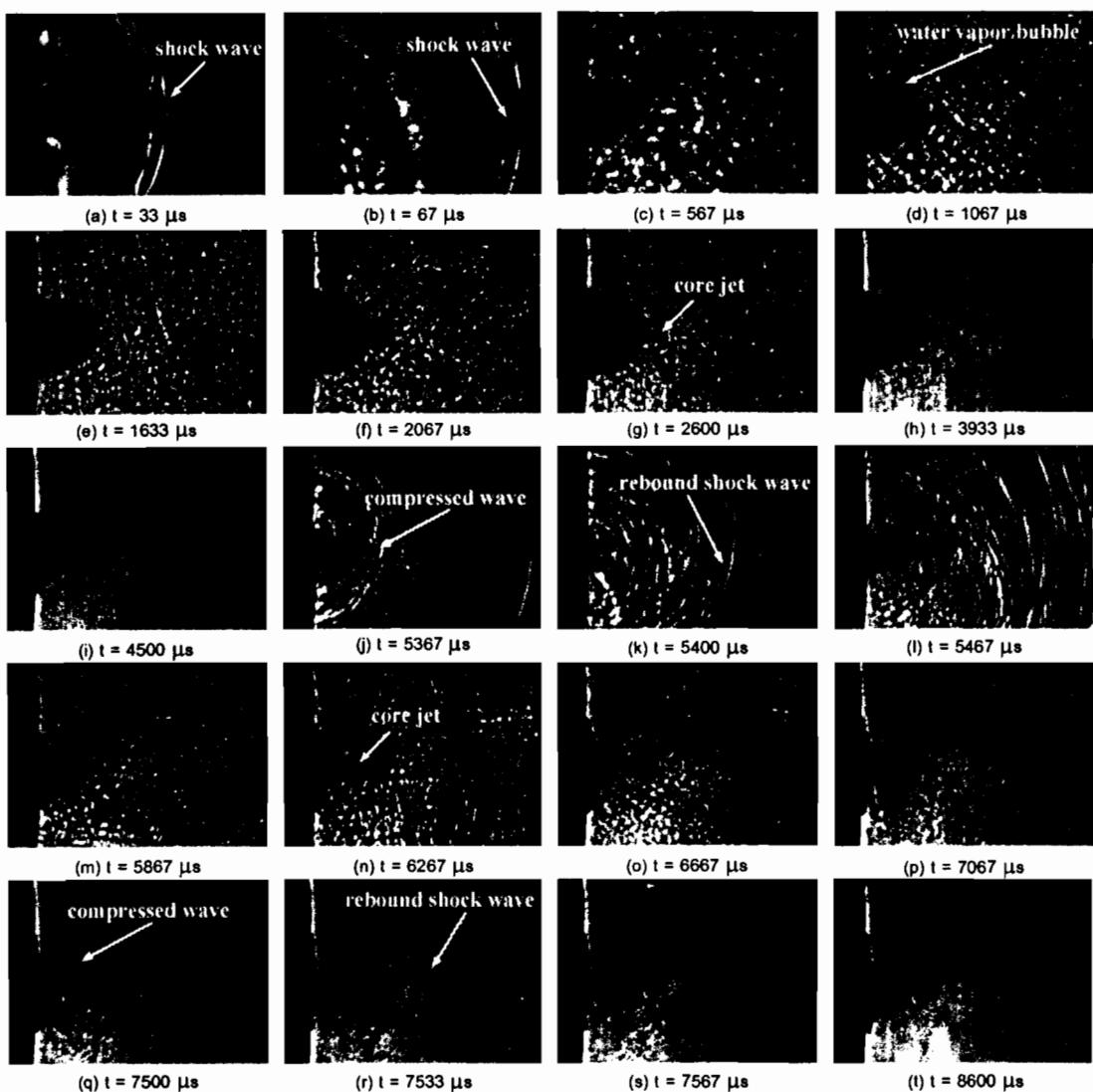


ภาพที่ 4.22 ความเร็วเฉลี่ยและระยะการเคลื่อนที่ของลำพุ่งกลีโดยชีนความเร็วสูงในอากาศและในน้ำ

4.1.5 คุณลักษณะลำพุ่งแอลกอฮอล์ (alcohol jet)



ภาพที่ 4.23 ภาพถ่ายโดยเทคนิคชาโคล์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งแอลกอฮอล์ในอากาศ (alcohol jet in air, $V_{j,\max} = 1,548 \text{ m/s}$, $M_a = 4.5$)



ภาพที่ 4.24 ภาพถ่ายโดยเทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งแอ落กอชอล์ในน้ำ (alcohol jet in water, $V_{j, \max} = 292 \text{ m/s}$)

จากภาพที่ 4.25 แสดงภาพถ่ายโดยไม่ใช้เทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งแอ落กอชอล์ในน้ำ (alcohol jet in water) พบว่ามีลักษณะที่คล้ายกับลำพุ่งน้ำในน้ำ แต่ระบบการเคลื่อนที่และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะสั้นและเล็กกว่าลำพุ่งน้ำ และไม่พบรการแตกตัวที่บริเวณส่วนหัวของ bubble ใกล้กับหัวฉีด ซึ่งเป็นผลของความหนาแน่น (density) โดยที่ความเร็วสูงสุดของลำพุ่งมีค่าประมาณ 246 m/s ที่เวลา $33 \mu\text{s}$ ดังภาพที่ 4.25(a-d) จากภาพที่ 4.25(e) จะพบว่าระบบการเคลื่อนที่ของ bubble สูงสุดเท่ากับ 35.13 mm ที่เวลา $1,833 \mu\text{s}$ จากนั้น bubble จะหยุดตัวและจะสังเกตเห็นแกนของลำพุ่งชัดเจน เป็นผลเนื่องจากความหนาแน่น (density) ที่น้อยกว่าลำพุ่งน้ำ ดังภาพที่ 4.25(f) จากภาพที่ 4.25(g) พบร่องรอยเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะขยายตัวสูงสุด

เท่ากับ 39.38 mm ที่เวลา 1,900 μ s ความเร็วการขยายตัวเท่ากับ 20.72 m/s จากนั้น bubble จะเริ่มบุบตัวลง ดังจากภาพที่ 4.25(h-i) เมื่อเวลาผ่านไป bubble บุบตัวลงจนถึงค่าต่ำสุดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble เท่ากับ 16.43 mm ที่เวลา 4,000 μ s ความเร็วการบุบตัวเท่ากับ 10.92 m/s และจะสังเกตเห็นเป็นกลุ่ม bubble รอบๆหัวน้ำ โดยที่แกนของลำพุ่งจะสังเกตได้ชัดเจน ดังภาพที่ 4.25(j-l) จากนั้น bubble จะขยายตัวขึ้นอีกรั้ง ในแนวแกนตั้งรอบๆหัวน้ำ โดยที่เส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble อีกรั้งและยังสังเกตเห็นแกนของลำพุ่งชัดเจนกว่าลำพุ่นนำ ดังภาพที่ 4.25(q-s) จากนั้น bubble จะลอยตัวขึ้นและผสมกับน้ำภายในห้องทดลอง ดังภาพที่ 4.25(t)

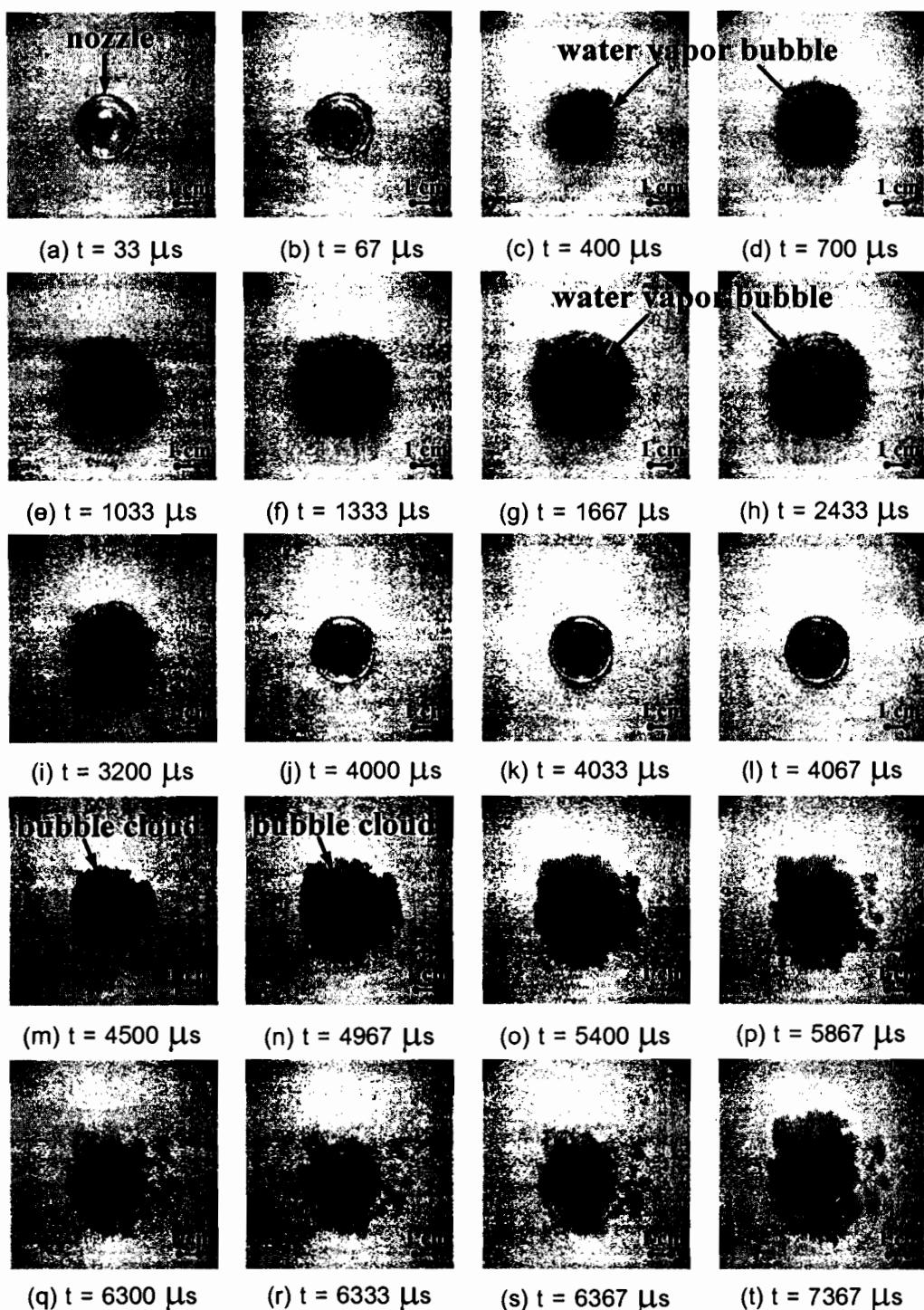


ภาพที่ 4.25 ภาพถ่ายโดยไม่ใช้เทคนิคชาโคล์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งแอลกอฮอล์ในน้ำ (alcohol jet in water)

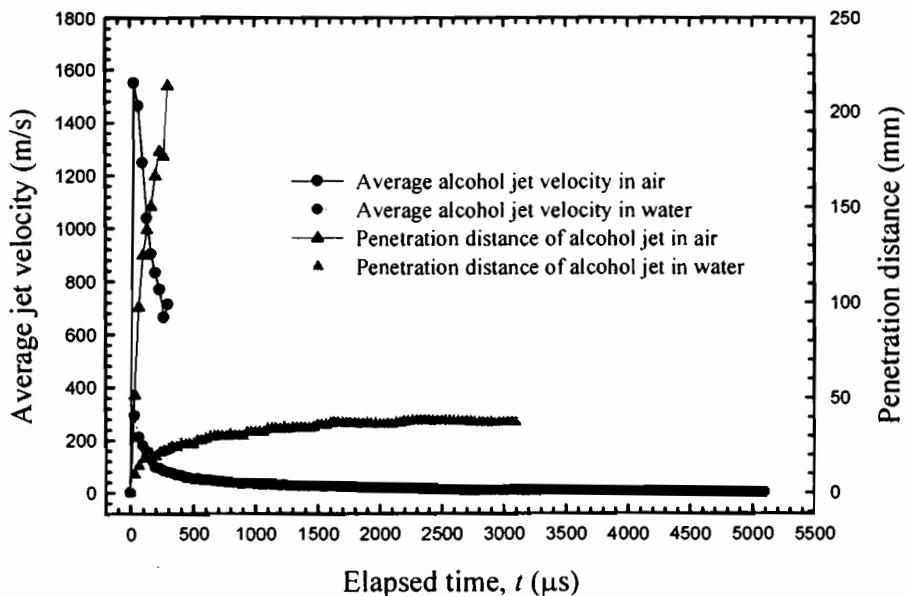
จากภาพที่ 4.26 แสดงภาพถ่ายในแนวแกน โดยไม่ใช้เทคนิคชาโคล์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งแอลกอฮอล์ในน้ำ จากภาพที่ 4.26(a-f) พบร้า bubble นั้นเกือบจะกลมอย่างสมมาตรคล้ายกับ

ลำพุ่งน้ำทะเลในน้ำและขยายตัวขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะสังเกตว่าระยะเวลาในการขยายตัวของ bubble นั้นจะใช้เวลาที่่ใกล้เคียงกันมาก และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะใหญ่กว่าเล็กน้อย เนื่องจากค่าความตึงผิว (surface tension) มีค่าน้อยกว่าลำพุ่งน้ำทะเล จึงทำให้แตกตัวสามารถทำได้ดีกว่า โดยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ขยายตัวสูงสุดในแนวอน (D_x) เท่ากับ 42.78 mm ที่เวลา 1,633 μ s และในแนวตั้ง (D_y) เท่ากับ 43.58 mm ที่เวลา 1,867 μ s ความเร็วในการขยายตัวในแนวอน ($V_{x,e}$) เท่ากับ 26.19 m/s และในแนวตั้ง ($V_{y,e}$) เท่ากับ 23.34 m/s ดังภาพที่ 4.26(g) จากนั้น จะเริ่มบุบตัวและลดลงอย่างรวดเร็วนานาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ลดลงถึงจุดต่ำสุดในแนวอน (D_x) เท่ากับ 17.11 mm และในแนวตั้ง (D_y) เท่ากับ 18.45 mm ที่เวลา 4,033 μ s ความเร็วในการบุบตัวในแนวอน ($V_{x,e}$) เท่ากับ 10.69 m/s และในแนวตั้ง ($V_{y,e}$) เท่ากับ 11.60 m/s ดังภาพที่ 4.26(h-k) เนื่องจากไม่ใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบชาโคล์กราฟ (Shadowgraph) การเกิดคลื่นกระแทก (shock wave) ในน้ำและ rebound shock wave เมื่อ bubble ลดขนาดลงต่ำสุดจะไม่สามารถสังเกตเห็นได้ จากรูปที่ 4.26(l-n) หลังจากเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ลดขนาดถึงจุดต่ำสุด bubble จะแตกตัวเป็นกลุ่ม bubble (bubble cloud) และจะขยายตัวอย่างรวดเร็วเป็นลักษณะรูปวงแหวนรอบๆ หัวฉีด และขึ้นคงสังเกตเห็นละอองและไออุ่นคล้ายกับลำพุ่งน้ำทะเล ดังภาพที่ 4.26(m) โดยกลุ่ม bubble มีการบุบตัวอย่างช้าๆ ดังภาพที่ 4.26(o-s) ก่อนที่จะหายไปดังภาพที่ 4.26(t)

จากรูปที่ 4.27 แสดงความเร็วเฉลี่ยและระยะเวลาเคลื่อนที่ของลำพุ่งแอ落กอซอล์ความเร็วสูงในอากาศและในน้ำ พนว่าความเร็วจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่เวลา 33 μ s และจะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อเวลาผ่านไปและลำพุ่งแอ落กอซอล์ความเร็วสูงที่ฉีดในอากาศมีความเร็วสูงกว่าลำพุ่งที่ฉีดในน้ำมาก เนื่องจากแรงต้านของอากาศ (aerodynamic drag) นั้นมีค่าต่ำกว่าแรงต้านของน้ำ (hydrodynamic drag) มาก โดยที่ความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่งแอ落กอซอล์ในอากาศมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1,548 m/s ที่เวลาเท่ากับ 33 μ s ความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่งแอ落กอซอล์ในน้ำสูงสุดเท่ากับ 292 m/s ที่เวลาเท่ากับ 33 μ s จึงส่งผลให้ระบบการเคลื่อนที่ของลำพุ่งแอ落กอซอล์ในอากาศเคลื่อนที่ได้ไกกลว่าในน้ำ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น

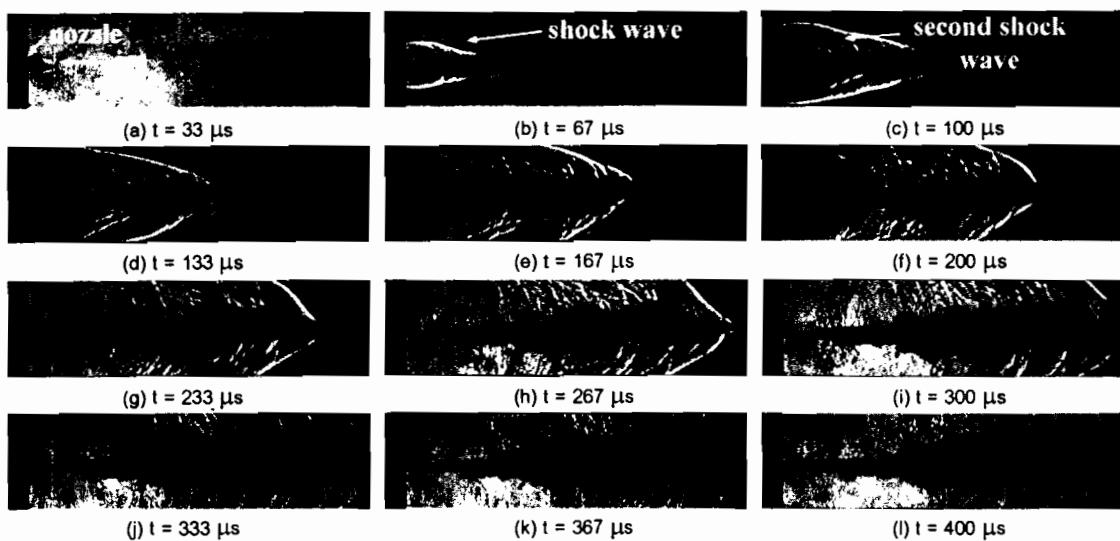


ภาพที่ 4.26 ภาพถ่ายในแนวแกนโดยไม่ใช้เทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งแอลกอฮอล์ในน้ำ (alcohol jet in water)



ภาพที่ 4.27 ความเร็วเฉลี่ยและการเคลื่อนที่ของลำพูงแอลกอฮอล์ความเร็วสูงในอากาศและในน้ำ

4.1.6 คุณลักษณะลำพูงน้ำมันแก๊สโซเชลิน (gasoline jet)



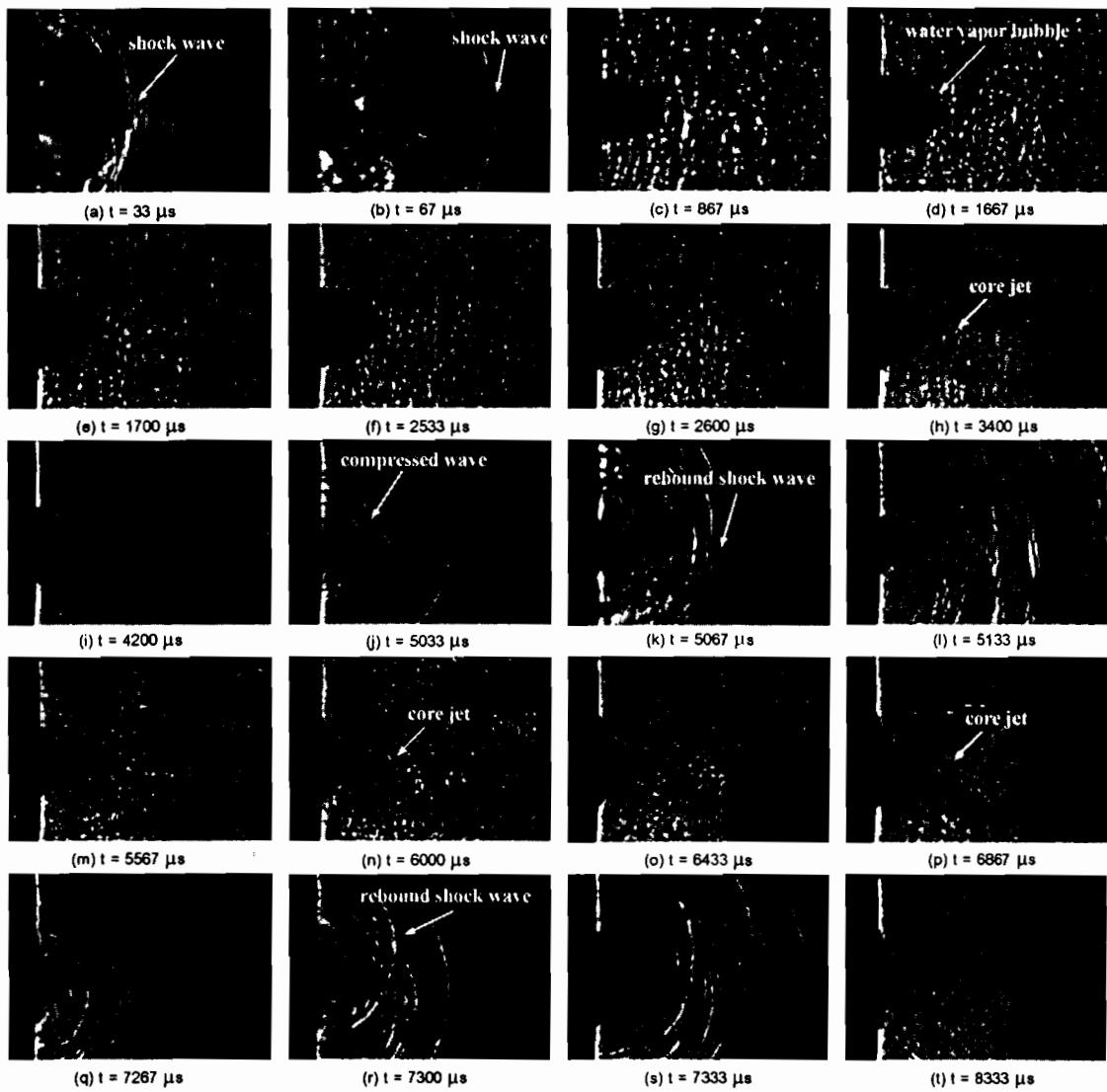
ภาพที่ 4.28 ภาพถ่ายโดยเทคนิคขาวดำ (Shadowgraph) ของลำพูgn้ำมันแก๊สโซเชลินในอากาศ (gasoline jet in air, $V_{j, \max} = 1,634 \text{ m/s}$, $M_a = 4.8$)

จากภาพที่ 4.28 แสดงภาพถ่ายโดยเทคนิคขาวดำ (Shadowgraph) ของลำพูgn้ำมันแก๊สโซเชลินในอากาศ (gasoline jet in air) พบว่าลำพูgn้ำมันแก๊สโซเชลินจะมีลักษณะคล้ายกับลำพูgn้ำ

ในช่วงแรกและสังเกตเห็นคลื่นกระแทกเฉียง (oblique shock) อย่างชัดเจนเช่นกัน ดังภาพที่ 4.28(a-b) และจะเริ่มนีการแตกตัวที่บริเวณปลายของลำพูงดังภาพที่ 4.28(c-d) โดยการแตกตัวของลำพูงเริ่มเกิดขึ้นที่บริเวณส่วนกลางลำพูง โดยจะสังเกตว่าเกิดเป็นไอที่ผิวที่รุนแรง ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีแรงเฉือนที่ผิว (shear layer) ที่รุนแรงขึ้นดังภาพที่ 4.28(e-h) จากนั้นการแตกตัวของลำพูงจะเกิดขึ้นตลอดทั้งลำพูงที่รุนแรง ดังภาพที่ 4.28(j-l) ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าถึงจะมีลักษณะลำพูงจะคล้ายกันนี้ แต่จะมีการแตกตัวที่รุนแรงและเร็วกว่าน้ำซึ่งเป็นผลจากค่าความตึงผิว (surface tension) และความหนืด粘滞 (kinematics viscosity) ที่ต่ำกว่าน้ำ ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งจากการถ่ายภาพสามารถประมาณความเร็วเฉลี่ยของลำพูงตลอดความยาว 250 mm ของการเคลื่อนที่ของลำพูงมีค่าเท่ากับ 757 m/s คิดเป็น M_a เท่ากับ 2.2 การประมาณได้จากมุมของคลื่นกระแทก (shock wave) มีค่า 765 m/s คิดเป็น M_a เท่ากับ 2.25 โดยความเร็วสูงสุดของลำพูงแอ落กอ肖ล์มีค่าประมาณ 1,634 m/s คิดเป็น M_a มีค่าเท่ากับ 4.8 ที่ $t = 33 \mu s$

จากการที่ 4.29 แสดงภาพถ่ายโดยเทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพูgn้ำมันแก๊สโซลินในน้ำ (gasoline jet in water) พบว่ามีลักษณะที่คล้ายกับลำพูงกลีโอลีเซ็น โดยที่ระบบการเคลื่อนที่ของ bubble จะสั้นกว่า แต่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะใหญ่กว่าในช่วงแรก และจะพบเห็นการเกิดคลื่นกระแทก (shock wave) เช่นเดียวกับลำพูงกลีโอลีเซ็น โดยความเร็วของคลื่นกระแทก (shock wave) มีความเร็วประมาณ 1,505 m/s คิดเป็น M_a เท่ากับ 1 และมีความเร็วสูงสุดของลำพูgnมีค่าประมาณ 111 m/s ที่เวลา 33 μs ดังภาพที่ 4.29(a-b) จากนั้น bubble จะขยายตัวเพิ่มขึ้น และจะพบว่าทั้งระบบการเคลื่อนที่และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะสั้นและเล็กกว่าลำพูงกลีโอลีเซ็นเล็กน้อยซึ่งเป็นผลของความหนาแน่น (density) ที่มีค่าน้อยกว่าลำพูงกลีโอลีเซ็น ดังภาพที่ 4.29(c-d) จากภาพที่ 4.29(e) จะพบว่าระบบการเคลื่อนที่ของ bubble สูงสุดเท่ากับ 25.80 mm ที่เวลา 1,700 μs หลังจากนั้น bubble จะหดตัวและสังเกตเห็นแกนของลำพูงชัดเจนกว่าลำพูgn้ำเล็กน้อยดังภาพที่ 4.29(f) จากจากการที่ 4.29(g) พบว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะขยายตัวสูงสุดเท่ากับ 48.46 mm ที่เวลา 2,633 μs ความเร็วการขยายตัว ($V_{d,c}$) เท่ากับ 18.40 m/s จากนั้น bubble จะเริ่มบุบตัวลง ดังจากภาพที่ 4.29(h-i) จากภาพที่ 4.29(j-l) เมื่อบubble บุบตัวลงจนถึงค่าต่ำสุดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble เท่ากับ 19.49 mm ที่เวลา 5,000 μs ความเร็วการบุบตัว ($V_{d,c}$) เท่ากับ 12.23 m/s จะพบว่า compressed wave และ rebound shock wave จะมีลักษณะของเส้นคลื่นจะจางกว่าลำพูงกลีโอลีเซ็น โดยที่สังเกตเห็นแกนของลำพูงชัดเจน ซึ่งจากการถ่ายภาพถ่ายสามารถประมาณความเร็วของ rebound shock wave เท่ากับ 1,479 m/s คิดเป็น M_a เท่ากับ 0.98 จากการที่ 4.29(m-p) bubble จะขยายตัวขึ้นอีกครั้ง และสังเกตเห็นแกนของลำพูงชัดเจน จากการที่ 4.29(q-t) จะพบว่าเกิด rebound shock wave ในครั้งที่สอง และจะสังเกตเห็นเส้นของ compressed wave และ rebound shock wave ได้

ชัดเจนกว่าลำพุ่งน้ำ ซึ่งจากภาพถ่ายสามารถประมาณความเร็วของ rebound shock wave เท่ากับ $1,531 \text{ m/s}$ คิดเป็น M_a เท่ากับ 1

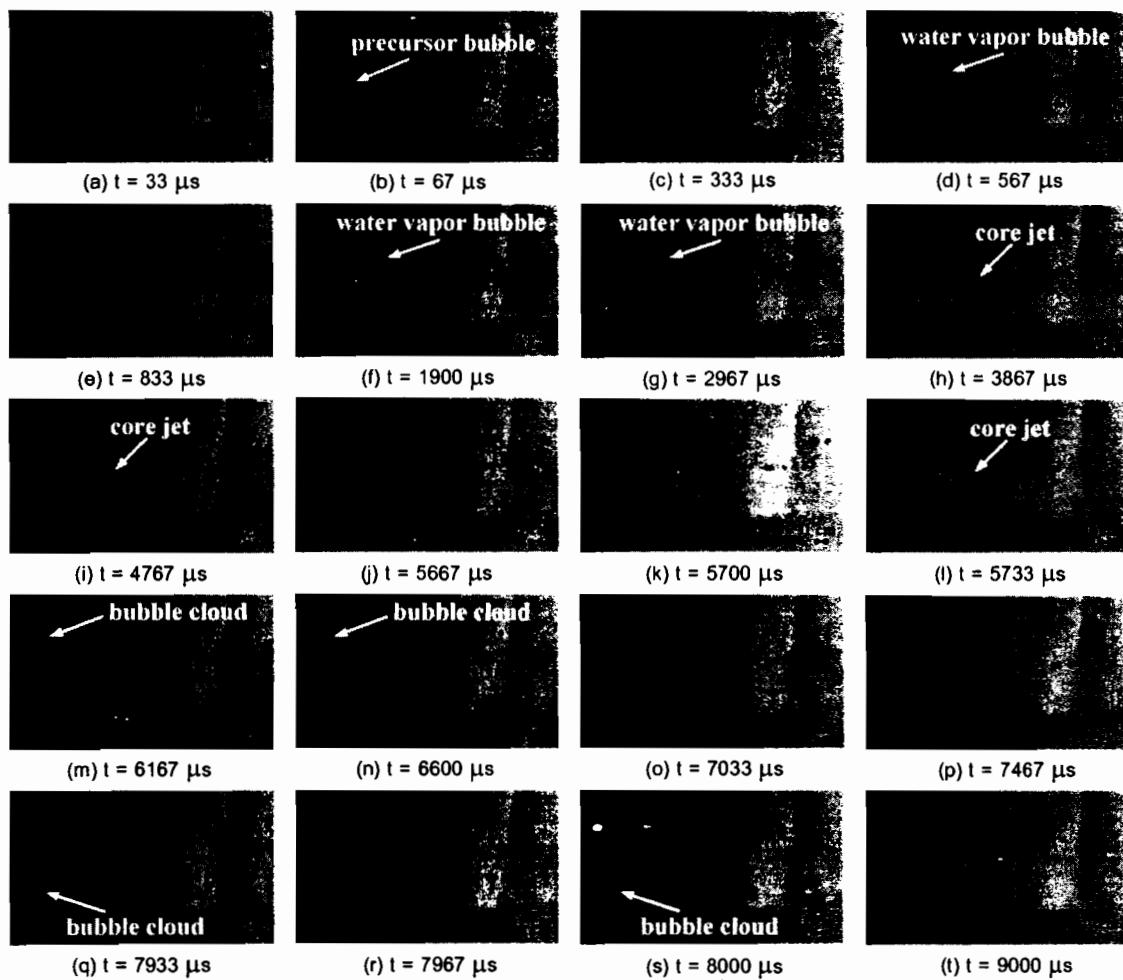


ภาพที่ 4.29 ภาพถ่ายโดยเทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซลีนในน้ำ
(gasoline jet in water, $V_{j, \max} = 111 \text{ m/s}$)

จากภาพที่ 4.30 แสดงภาพถ่ายโดยไม่ใช้เทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซลีนในน้ำ (gasoline jet in water) พบว่ามีลักษณะที่คล้ายกับลำพุ่งน้ำมันดีเซล แต่ระยะการเคลื่อนที่และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะสั้นและใหญ่กว่าลำพุ่งน้ำมันดีเซล จะสังเกตเห็นว่าระยะการเคลื่อนที่ในช่วงแรกจะเคลื่อนที่ได้ช้า โดยที่ความเร็วสูงสุดของลำพุ่มนี้ค่าประมาณ 345 m/s ที่เวลา $33 \mu\text{s}$ ดังภาพที่ 4.30(a-d) จากภาพที่ 4.30(e) จะพบว่าระยะการเคลื่อนที่

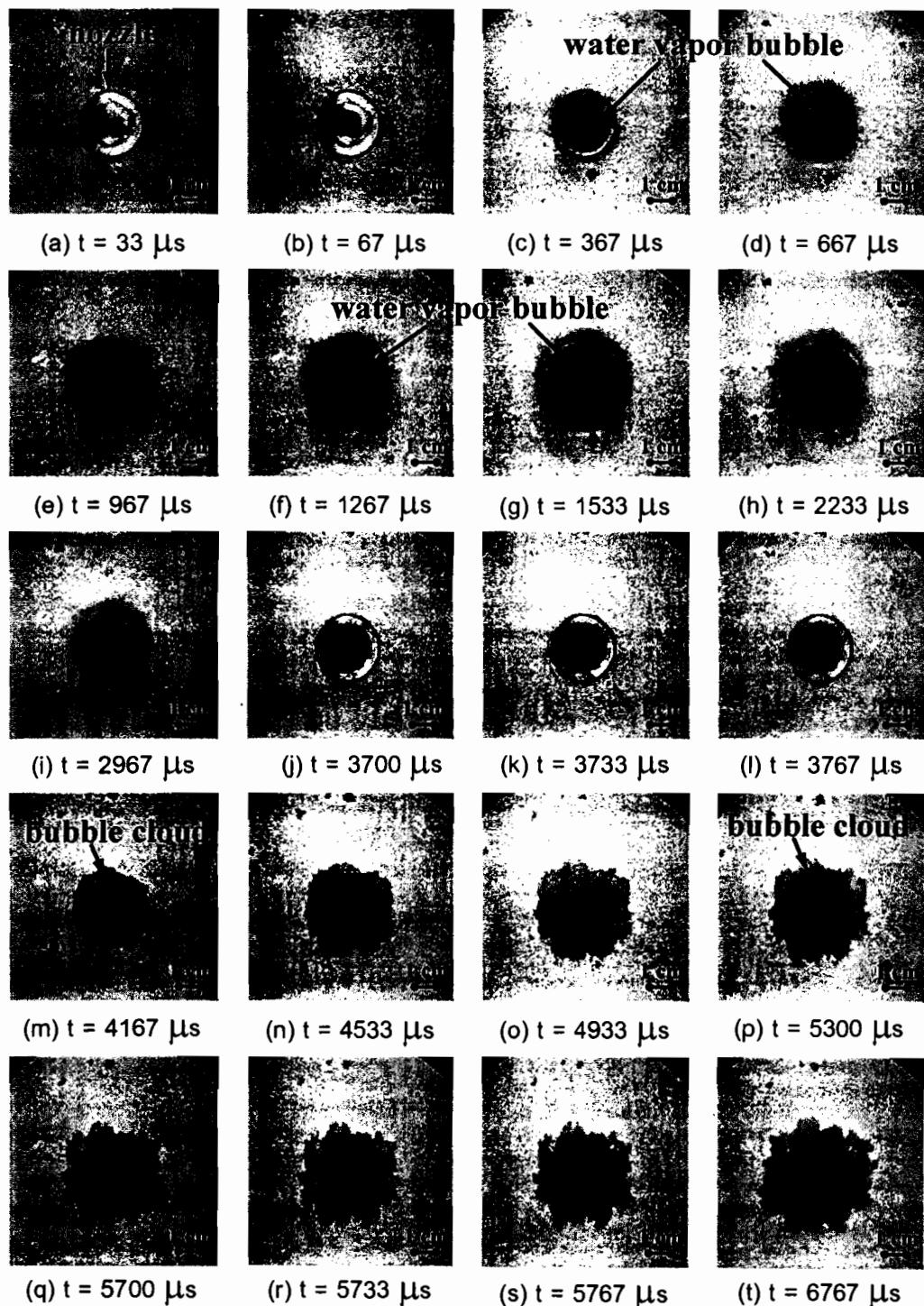
ของ bubble สูงสุดเท่ากับ 33.57 mm ที่เวลา 833 μ s จากนั้น bubble จะหดตัว และจะสั่งเกตเห็นแกนของลำพุ่งชัดเจน ดังภาพที่ 4.30(f) จากภาพที่ 4.30(g) พบว่ามีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ใหญ่กว่าลำพุ่งคีเซล พบรการแตกตัวที่รุนแรง เนื่องจากความหนาแน่น (density) และความหนืดคลื่น (kinematics viscosity) ที่น้อยกว่าลำพุ่งคีเซล โดยที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะขยายตัวสูงสุดเท่ากับ 51.10 mm ที่เวลา 3,000 μ s ความเร็วการขยายตัวเท่ากับ 17.03 m/s จากนั้น bubble จะเริ่มบุบตัวลง ดังจากภาพที่ 4.30(h-i) เมื่อเวลาผ่านไป bubble บุบตัวลงจนถึงค่าต่ำสุดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble เท่ากับ 16.28 mm ที่เวลา 5,600 μ s ความเร็วการบุบตัวเท่ากับ 13.39 m/s และจะสั่งเกตเห็นเป็นกลุ่ม bubble รอบๆหัวฉีด โดยที่แกนของลำพุ่งจะสั่งเกตได้ชัดเจน ดังภาพที่ 4.30(j-l) จากนั้น bubble จะขยายตัวขึ้นอีกครั้ง ในแนวแกนตั้งรอบๆหัวฉีด ดังภาพที่ 4.30(m-p) โดยที่เส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble อีกครั้งและขึ้นสั่งเกตเห็นแกนของลำพุ่งอยู่ ดังภาพที่ 4.30(q-s) จากนั้น bubble จะลดตัวขึ้นภายในห้องทดลอง ดังภาพที่ 4.30(t)

จากภาพที่ 4.31 แสดงภาพถ่ายในแนวแกน โดยไม่ใช้เทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซลินในน้ำ จากภาพที่ 4.31(a-f) พบรการ bubble น้ำมันแก๊สโซลินอย่างสมมาตร คล้ายกับลำพุ่งน้ำทะเลขและขยายตัวขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะสั่งเกตว่าการขยายตัวของ bubble น้ำมันจะใช้เวลาที่ใกล้เคียงกัน แต่จะช้ากว่าเล็กน้อย และจะพบว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble น้ำมันจะเล็กกว่าลำพุ่งน้ำทะเลขเล็กน้อย ถึงแม้ว่าค่าความตึงผิว ความหนาแน่น และความหนืดคลื่นจะน้อยกว่า แต่ความหนาแน่นในห้องทดลองน้ำมันน้ำมันแก๊สโซลิน โดยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ขยายตัวสูงสุดในแนวโน้ม (D_x) เท่ากับ 38.87 mm ที่เวลา 1,500 μ s และในแนวตั้ง (D_y) เท่ากับ 36.33 mm ที่เวลา 1,567 μ s ความเร็วในการขยายตัวในแนวโน้ม (V_{x_n}) เท่ากับ 25.91 m/s และในแนวตั้ง (V_{y_n}) เท่ากับ 23.18 m/s ดังภาพที่ 4.31(g) จากนั้นจะเริ่มบุบตัวและลดลงอย่างรวดเร็วจนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ลดลงถึงจุดต่ำสุดในแนวโน้ม (D_x) เท่ากับ 13.05 mm และในแนวตั้ง (D_y) เท่ากับ 13.05 mm ที่เวลา 3,767 μ s ความเร็วในการบุบตัวในแนวโน้ม (V_{x_n}) เท่ากับ 11.38 m/s และในแนวตั้ง (V_{y_n}) เท่ากับ 10.58 m/s ดังภาพที่ 4.31(h-k) เนื่องจากไม่ใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) การเกิดคลื่นกระแทก (shock wave) ในน้ำและ rebound shock wave เมื่อบubble ลดขนาดลงต่ำสุดจะไม่สามารถสั่งเกตเห็นได้ จากภาพที่ 4.31(l-n) หลังจากเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ลดขนาดถึงจุดต่ำสุด bubble จะแตกตัวเป็นกลุ่ม bubble (bubble cloud) และจะขยายตัวอย่างรวดเร็วเป็นลักษณะรูปวงแหวนรอบๆ หัวฉีด ดังภาพที่ 4.31(m) โดยกลุ่ม bubble มีการบุบตัวอย่างช้าๆ ดังภาพที่ 4.31(o-s) ก่อนที่จะลดตัวขึ้นภายในห้องทดลองไปดังภาพที่ 4.31(t)

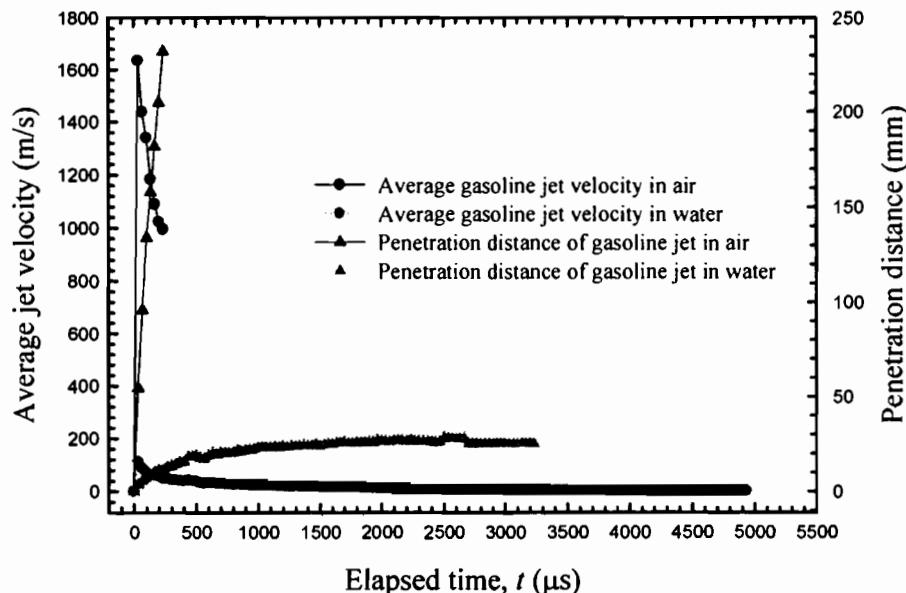


ภาพที่ 4.30 ภาพถ่ายโดยไม่ใช้เทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซเชลินในน้ำ (gasoline jet in water)

จากภาพที่ 4.32 แสดงความเร็วเฉลี่ยและการเคลื่อนที่ของลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซเชลิน ความเร็วสูงในอากาศและในน้ำ พบว่าความเร็วจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่เวลา $33 \mu\text{s}$ และจะลดลง อย่างรวดเร็วเมื่อเวลาผ่านไป และลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซเชลินความเร็วสูงที่มีค่าในอากาศจะมีความเร็วสูง กว่าลำพุ่งที่มีค่าในน้ำมาก เนื่องจากแรงต้านของอากาศ (aerodynamic drag) น้ำมีค่าต่ำกว่าแรงต้าน ของน้ำ (hydrodynamic drag) มาก โดยที่ความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซเชลินในอากาศมี ค่าสูงสุดเท่ากับ $1,634 \text{ m/s}$ ที่เวลาเท่ากับ $33 \mu\text{s}$ ความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซเชลินในน้ำสูงสุด เท่ากับ 111 m/s ที่เวลาเท่ากับ $33 \mu\text{s}$ จึงส่งผลให้ระบบการเคลื่อนที่ของลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซเชลินใน อากาศเคลื่อนที่ได้ไกลกว่าในน้ำเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.31 ภาพถ่ายในแนวแกน โดยไม่ใช้เทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ของลำพุ่งน้ำมัน
แก๊สโซซีลินในน้ำ (gasoline jet in water)



ภาพที่ 4.32 ความเร็วเฉลี่ยและระยะการเคลื่อนที่ของลำพุ่มน้ำมันแก๊สโซลีนความเร็วสูงในอากาศและในน้ำ

ตารางที่ 4.2 สรุปผลการทดลองคุณลักษณะของลำพุ่ง

ชนิดของเหลว	ความเร็วสูงสุดเฉลี่ยของลำพุ่ง (m/s)		ระยะการเคลื่อนที่ของลำพุ่ง (mm)	
	ในอากาศ	ในน้ำ	ในอากาศที่ $t = 167 \mu s$	ในน้ำสูงสุด
น้ำ	1,669	374	213	52.54 at $t = 1,700 \mu s$
น้ำอะเจเล	1,514	195	226	41.00 at $t = 2,100 \mu s$
น้ำมันดีเซล	1,453	576	171	54.23 at $t = 1,767 \mu s$
ก๊าซโซลีน	1,264	412	135	37.85 at $t = 2,300 \mu s$

ตารางที่ 4.2 สรุปผลการทดลองคุณลักษณะของลำพูง (ต่อ)

ชนิดของเหวว	ความเร็วสูงสุดเฉลี่ยของลำพูง (m/s)		ระยะการเคลื่อนที่ของลำพูง (mm)	
	ในอากาศ	ในน้ำ	ในอากาศที่ $t = 167 \mu\text{s}$	ในน้ำสูงสุด
แอลกอซอล์	1,548	292	150	37.85 at $t = 2,267 \mu\text{s}$
น้ำมันแก๊สโซลีน	1,634	111	181	28.10 at $t = 2,500 \mu\text{s}$

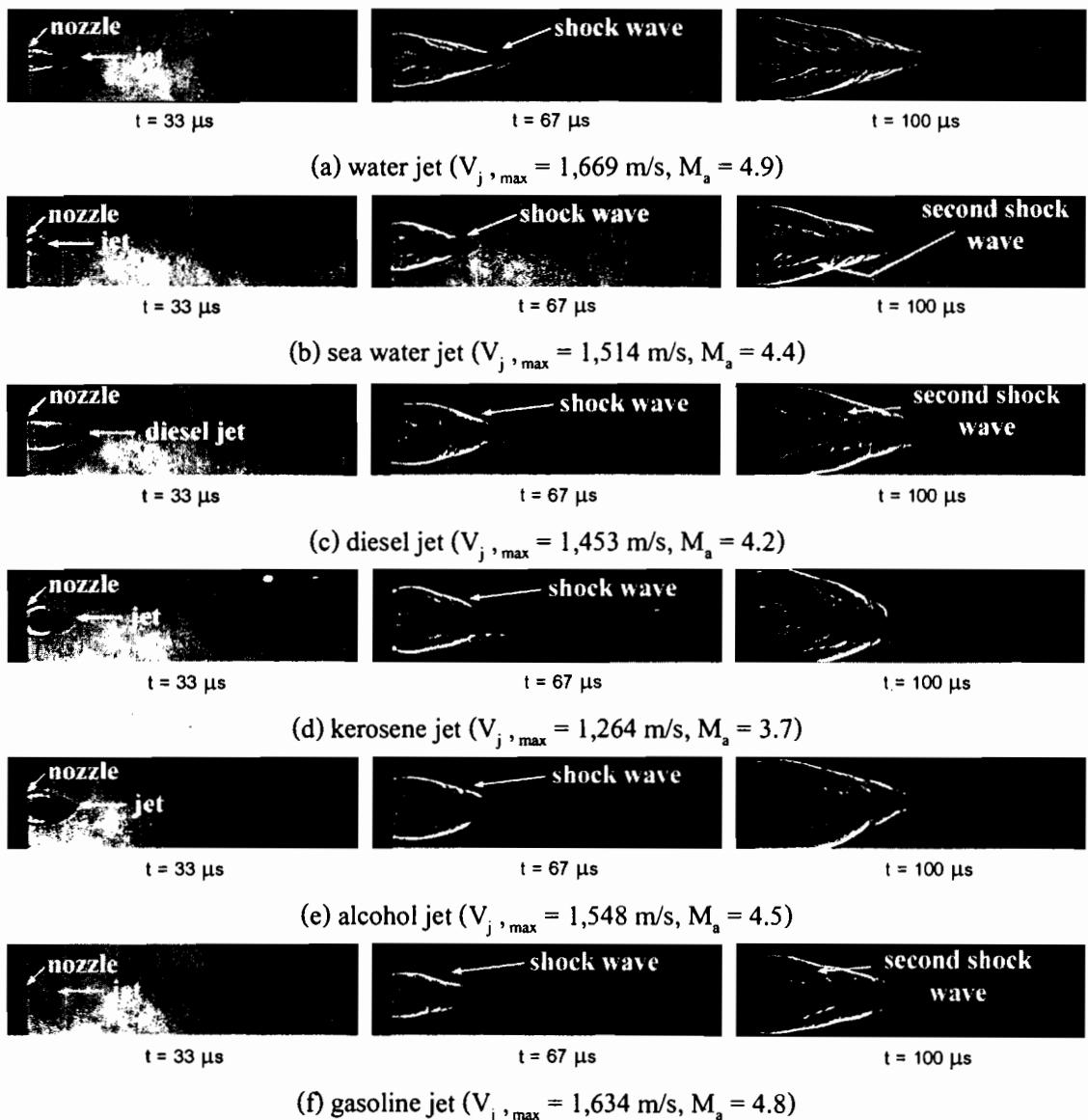
4.2 อิทธิพลของชนิดของลำพูง

4.2.1 คุณลักษณะลำพูงความเร็วสูงในอากาศ

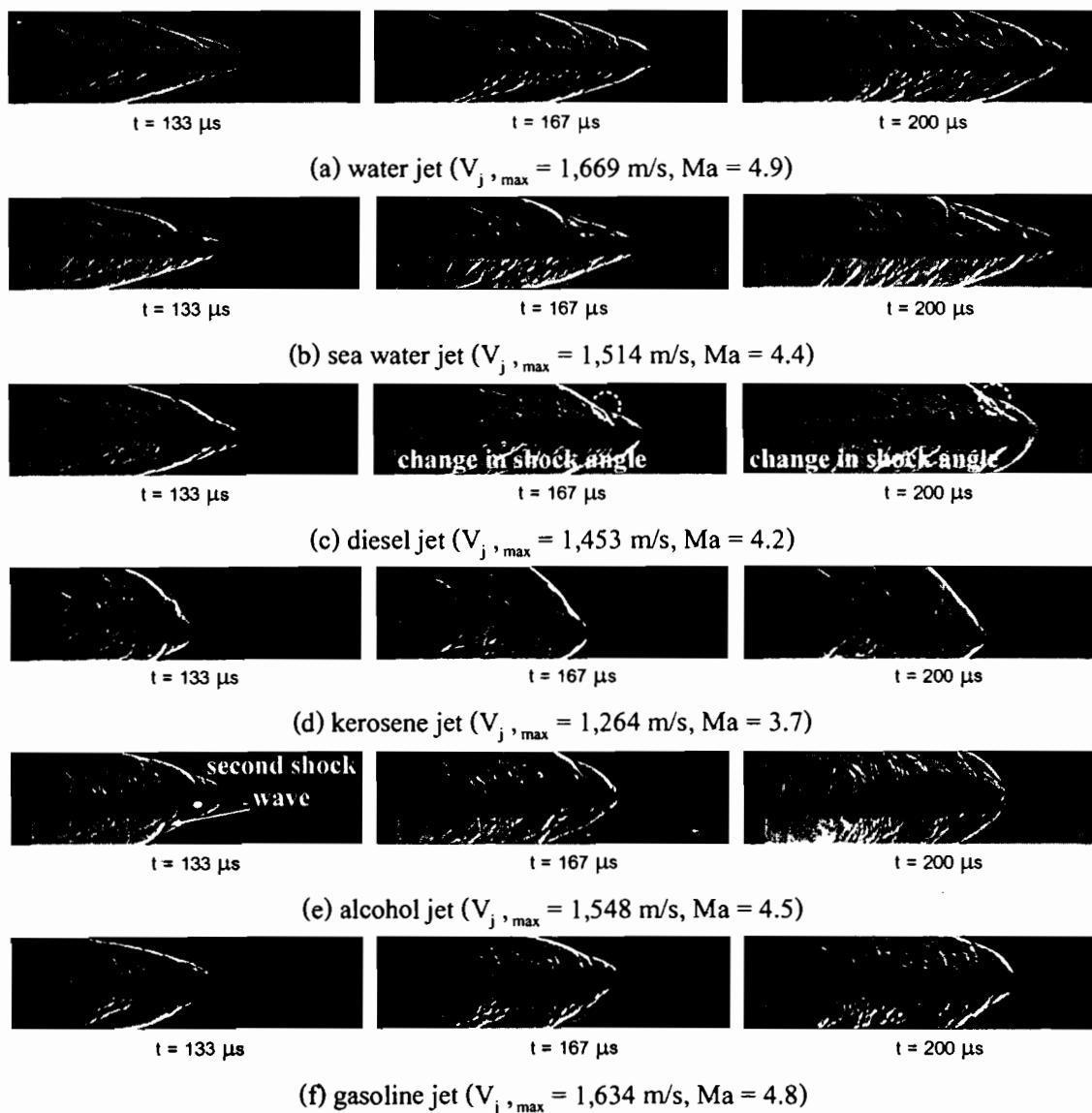
ในหัวข้อนี้จะศึกษาการเปรียบเทียบคุณลักษณะของลำพูงความเร็วสูงเมื่อหีดในอากาศโดยของเหววในการศึกษานี้ คือ น้ำ น้ำทะเล น้ำมันดีเซล กลิโอลีน และน้ำมันแก๊สโซลีน ซึ่งในการอธิบายคุณลักษณะของลำพูงที่เกิดขึ้น ในหัวข้อนี้จะใช้การถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูงร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพแบบชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ดังภาพที่ 3.11 ในการอธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้น

จากภาพที่ 4.33 แสดงการเปรียบเทียบคุณลักษณะของลำพูงชนิดต่างๆ เมื่อหีดในอากาศ พนว่าลำพูงความเร็วสูงทุกชนิดนั้นจะพบเห็นการเกิดคลื่นกระแทก (shock wave) อย่างชัดเจน ซึ่งคุณลักษณะของลำพูgn น้ำ น้ำทะเล น้ำมันดีเซลและน้ำมันแก๊สโซลีน จะคล้ายกัน คือ จะเรียวและแหลม ส่วนลำพูงกลิโอลีนและแอลกอซอล์จะมีลักษณะที่คล้ายกัน คือ จะกว้างและใหญ่ ที่เวลาเท่ากับ 100 μs จะพบว่าลำพูgn น้ำจะบังมีลักษณะที่เรียวแหลมเหมือนเดิม ลำพูgn น้ำทะเลกับน้ำมันดีเซล จะเห็นการเกิดคลื่นกระแทกคลื่นที่สอง (second shock wave) ส่วนลำพูgn กลิโอลีน แอลกอซอล์ และน้ำมันแก๊สโซลีน จะพบการแตกตัว การระเหย กล้ายเป็นละอองและไอบริเวณรอบๆ ลำพูgn ที่เวลาเท่ากับ 167 μs จะพบว่าลำพูgn น้ำมันดีเซล จะเห็นการเกิด การเปลี่ยนแปลงมุมของคลื่นกระแทก (change in shock angle) และบังพว่าคลื่นกระแทก (shock wave) จากที่เป็นคลื่นกระแทกเฉียง (oblique shock) เริ่มเปลี่ยนเป็นคลื่นกระแทกโค้ง (bow shock) คล้ายกับลำพูgn แอลกอซอล์ นอกจากนี้ ลำพูgn แอลกอซอล์ บังพวการแตกตัว การระเหย กล้ายเป็นละอองและไอบริเวณรอบๆ ลำพูgn ที่รุนแรง เมื่อเทียบกับลำพูgn กลิโอลีน และน้ำมันแก๊สโซลีน ที่เวลาเท่ากับ 233 μs พนว่าคลื่นกระแทก (shock wave) ของลำพูgn น้ำมันดีเซลเริ่มคลับมาเป็นคลื่นกระแทกเฉียง (oblique shock) อีกครั้ง ส่วนลำพูgn

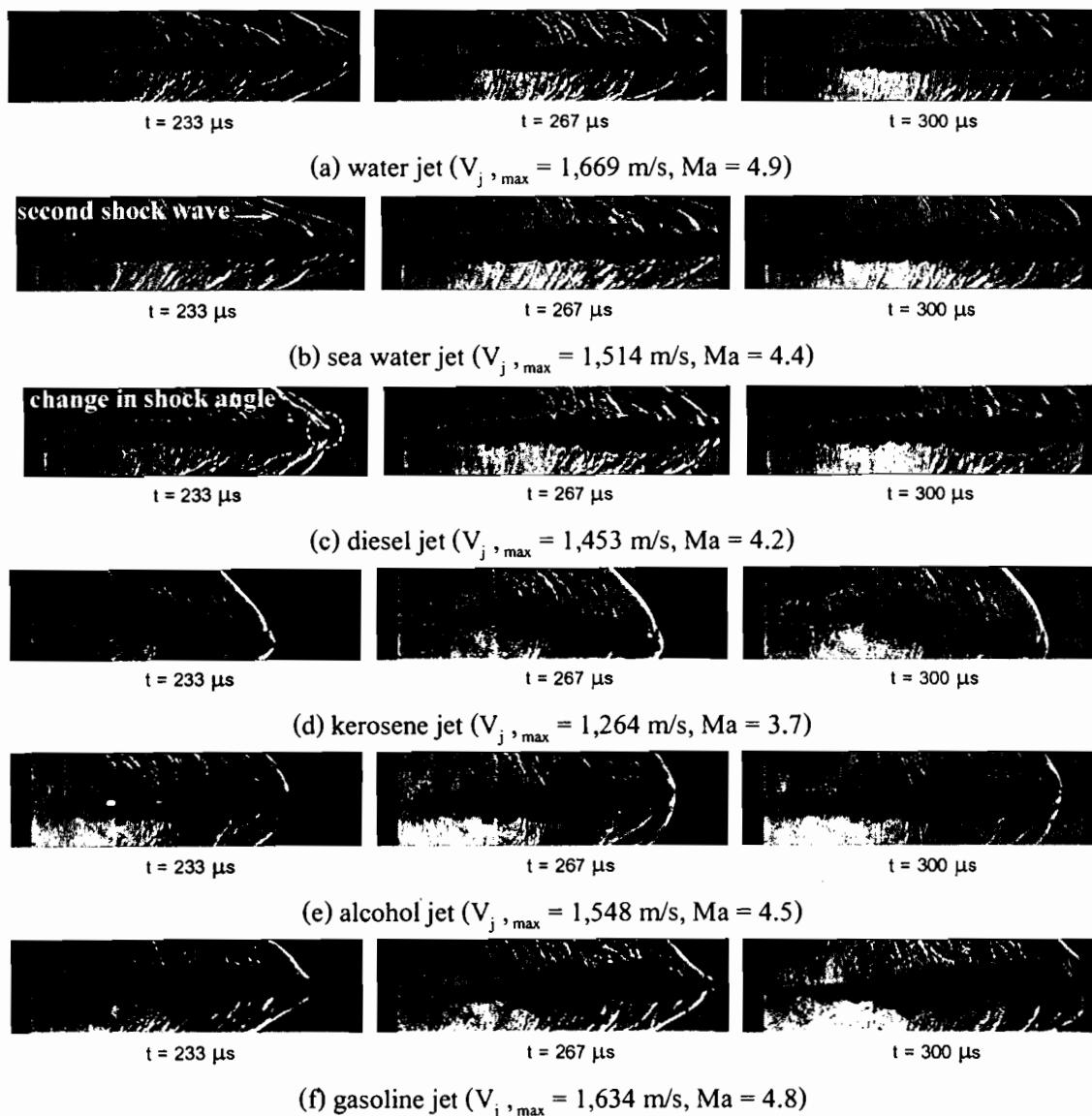
กลีโอลซีน ลำพุ่งแอログอซอล์ และลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซเชลิน จะพบว่า ลำพุ่งที่บริเวณที่ใกล้กับหัวฉีดนั้นมีลักษณะที่เรียบและเล็กลง และการแตกตัวจะอยู่ที่ปลายของลำพุ่ง และลำพุ่งน้ำกับลำพุ่งน้ำทะเล จะพบว่า ส่วนหัวของลำพุ่งได้หายไปจากกล้องถ่ายวิดีโอความเร็วสูง



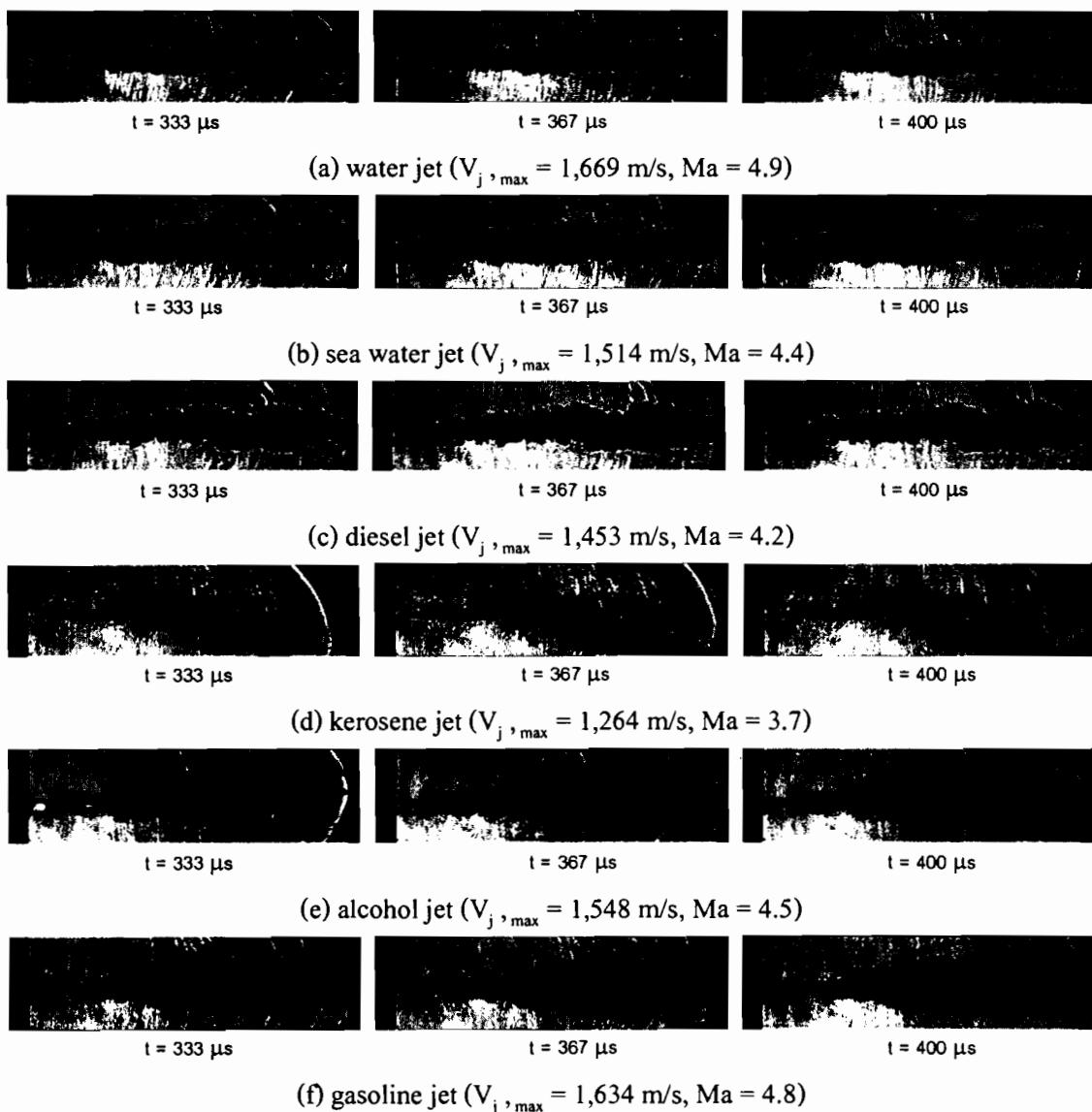
ภาพที่ 4.33 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของลำพุ่งชนิดต่างๆ เมื่อฉีดในอากาศโดยเทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph)



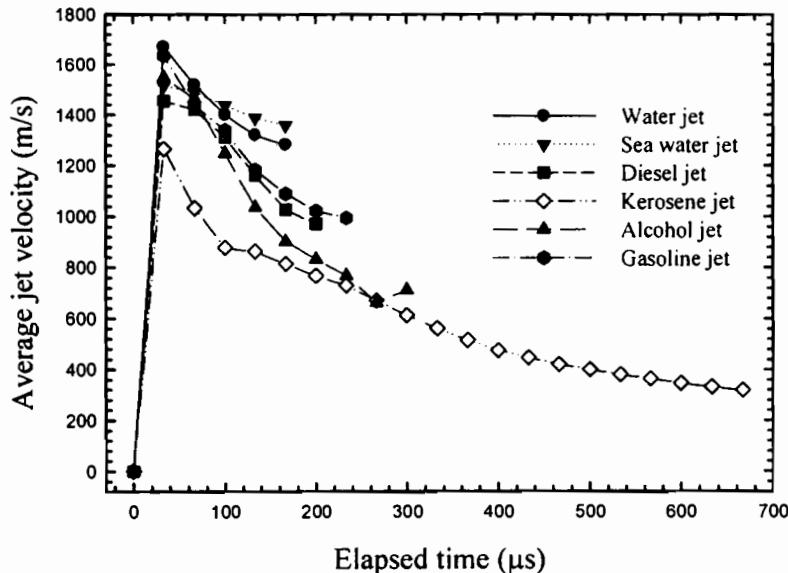
ภาพที่ 4.33 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของลำพูงชนิดต่างๆ เมื่อฉีดในอากาศโดยเทคนิคshadowgraph (影子圖) (ต่อ)



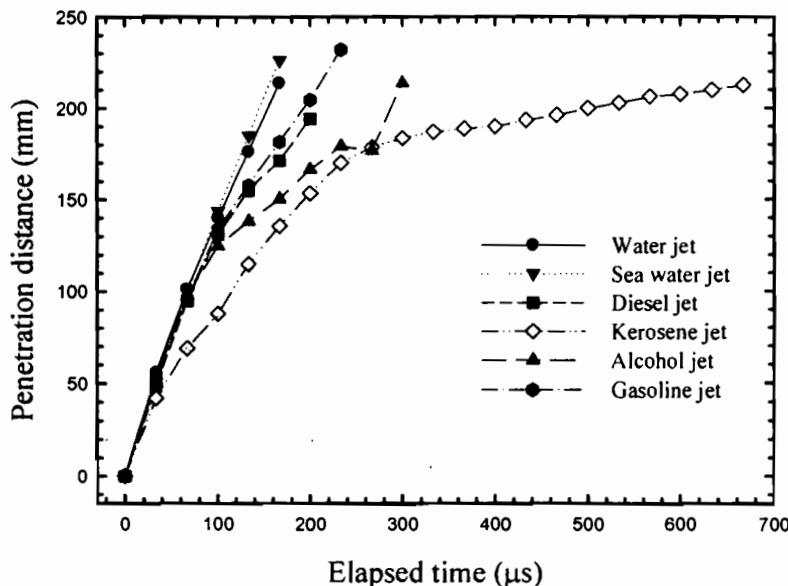
ภาพที่ 4.33 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของลำพูงชนิดต่างๆ เมื่อฉีดในอากาศโดยเทคนิคชาโคล์กราฟ (Shadowgraph) (ต่อ)



ภาพที่ 4.33 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของลำพูงชนิดต่างๆ เมื่อฉีดในอากาศโดยเทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) (ต่อ)



ภาพที่ 4.34 ความเร็วเฉลี่ยของลำพูงทั้ง 6 ชนิด



ภาพที่ 4.35 ระยะการเคลื่อนที่ของลำพูงทั้ง 6 ชนิด

จากภาพที่ 4.34 แสดงความเร็วเฉลี่ยของลำพูงทั้ง 6 ชนิด จากภาพความเร็วสูงสุดของลำพูงน้ำ น้ำทะเล น้ำมันดีเซล กดีโลซีน และกอชอล์ แลวน้ำมันเก๊สโซลิน มีค่าประมาณ 1,669.03 m/s, 1,514.17 m/s, 1,453.95 m/s, 1,264.68 m/s, 1,548.58 m/s และ 1634.62 m/s ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 67 μ s ความเร็วของลำพูงจะค่อยๆ ลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเกิดแรงต้านระหว่าง

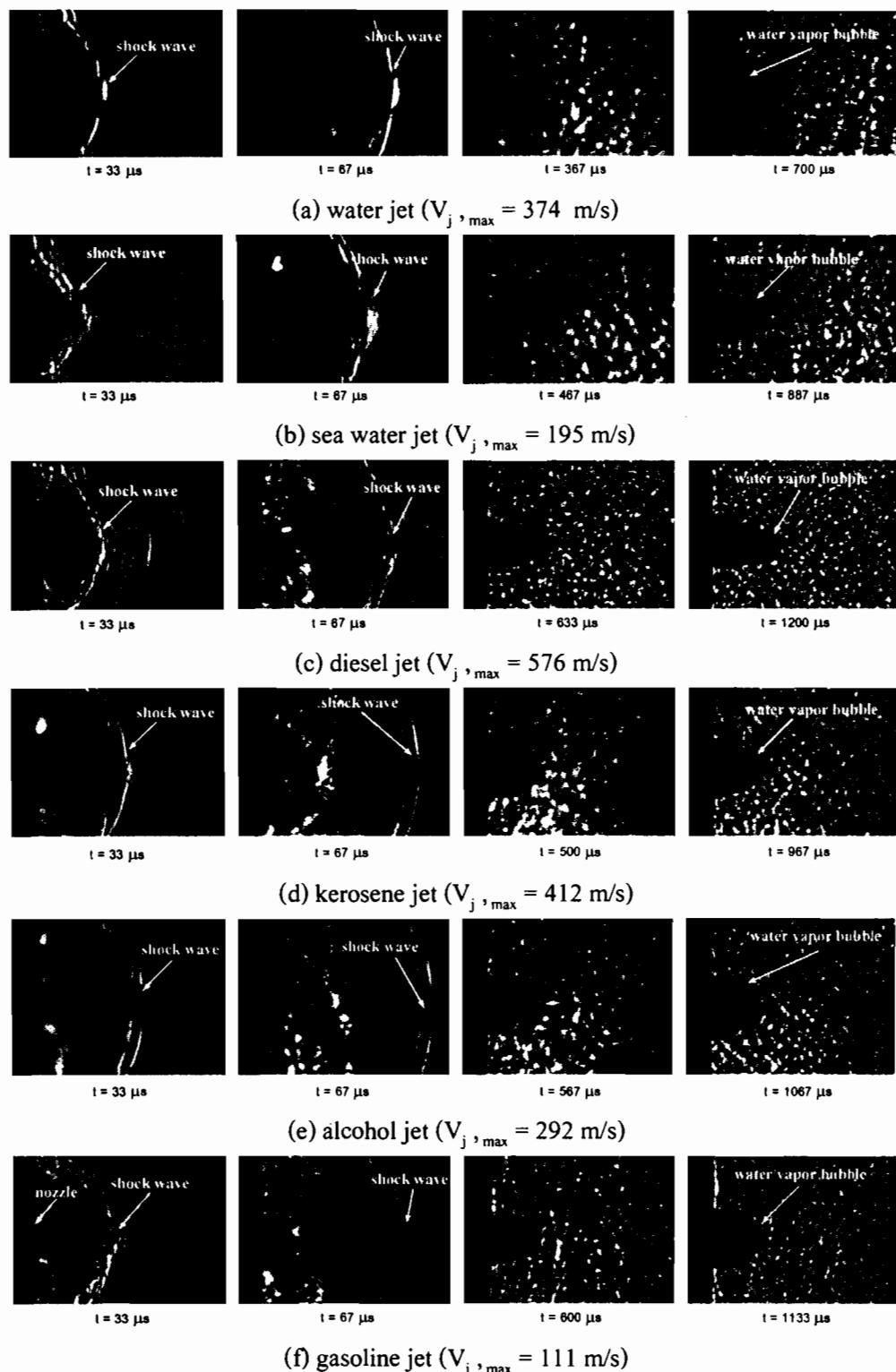
ลำพูงกับอากาศ และพบว่าความเร็วของลำพูงน้ำมีความเร็วสูงที่สุด รองลงมาคือ น้ำมันแก๊สโซลิน แอลกอฮอล์ น้ำทะเล น้ำมันดีเซล และกลีโอลีน ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกันเป็นคู่ คือ ลำพูgn้ำกับ น้ำมันแก๊สโซลิน ลำพูgn้ำและน้ำทะเล และลำพูgn้ำมันดีเซล กับกลีโอลีน พบร่วมกัน ความเร็วของลำพูgn้ำ ลำพูgn้ำและน้ำทะเล และลำพูgn้ำมันดีเซล ต่างก็มีความเร็วที่สูงกว่าซึ่งเป็นผลมาจากการ ความหนืด粘滞 ที่มีค่าสูงกว่า นอกจากนี้ผลของความเร็วของลำพูgทั้ง 6 ชนิด ยังส่งผลทำให้ระเบการ เคลื่อนที่น้ำเคลื่อนที่เมื่อเวลาเท่ากันจึงทำให้เคลื่อนที่ได้ไม่เท่ากัน โดยที่ลำพูgn้ำเคลื่อนที่ได้ 213.62 mm น้ำทะเล 226.24 mm น้ำมันดีเซล 171.18 กลีโอลีน 135.63 mm แอลกอฮอล์ 150.25 mm และ น้ำมันแก๊สโซลิน 181.51 mm ดังภาพที่ 4.35

ตารางที่ 4.3 สรุปผลการทดลองคุณลักษณะลำพูงความเร็วสูงในอากาศ

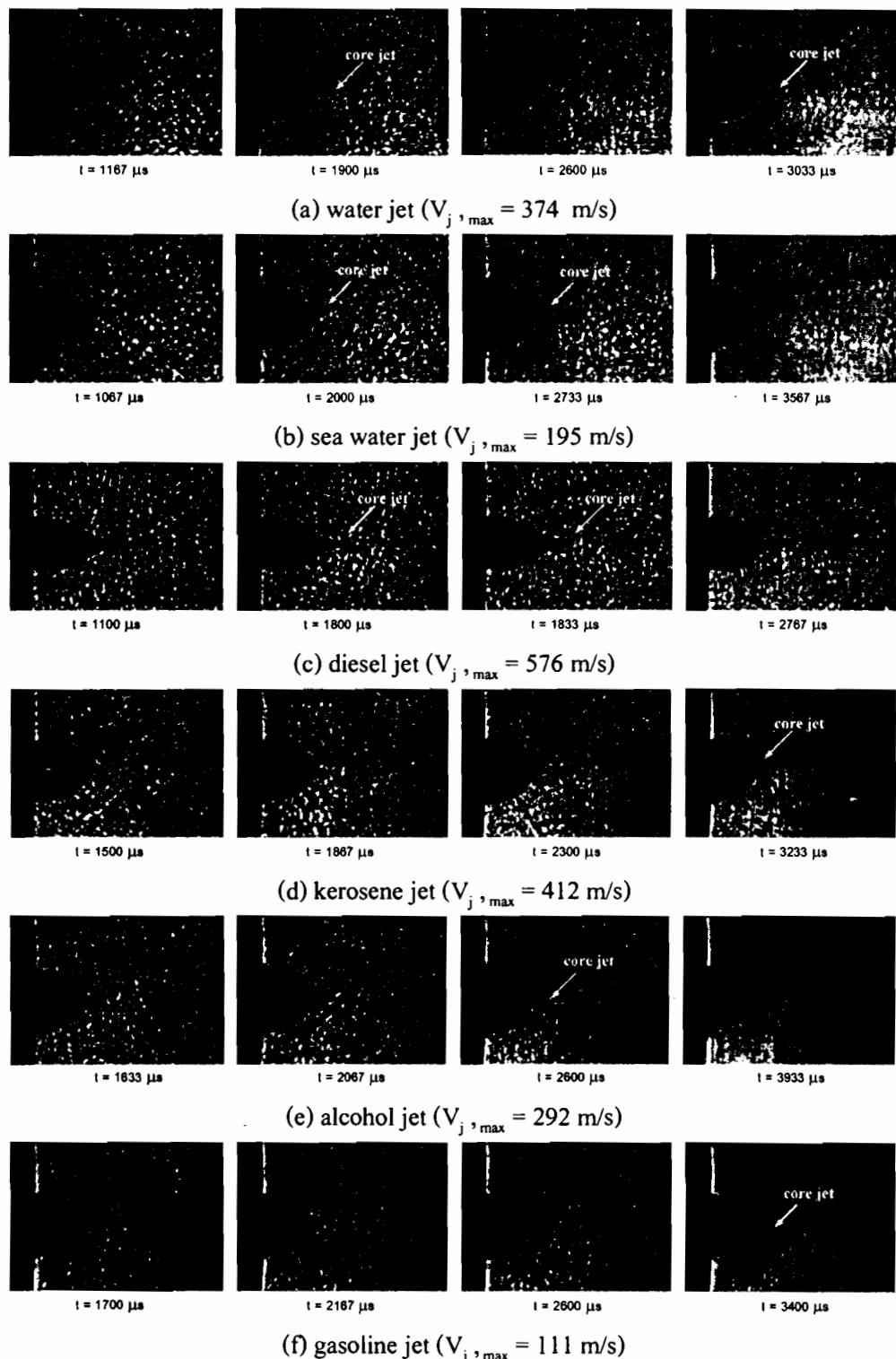
ชนิดของเหลว	ความเร็วสูงสุดเฉลี่ยของลำพูง (m/s)	ระยะการเคลื่อนที่ของลำพูง ที่เวลาเท่ากับ 167 μ s (mm)
น้ำ	1,669	213
น้ำทะเล	1,514	226
น้ำมันดีเซล	1,453	171
กลีโอลีน	1,264	135
แอลกอฮอล์	1,548	150
น้ำมันแก๊สโซลิน	1,634	181

4.2.2 คุณลักษณะลำพูงความเร็วสูงในน้ำ

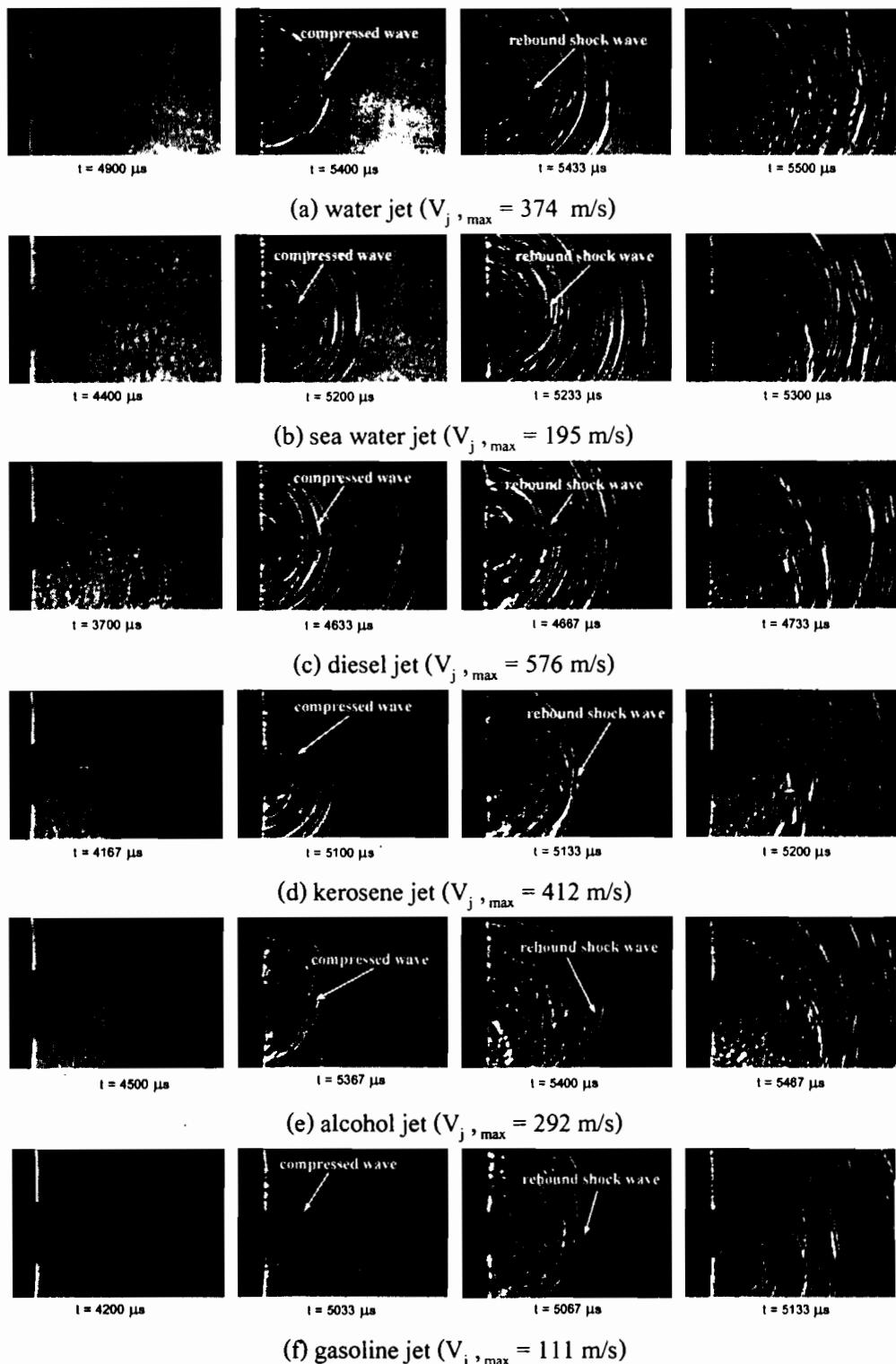
ในหัวข้อนี้จะศึกษาการเปรียบเทียบคุณลักษณะของลำพูงความเร็วสูงเมื่อฉีดในน้ำ โดยของเหลวในการศึกษานี้ คือ น้ำ, น้ำทะเล, น้ำมันดีเซล, กลีโอลีน, แอลกอฮอล์ และ น้ำมันแก๊สโซลิน ซึ่งในการอธิบายคุณลักษณะของลำพูงที่เกิดขึ้น ในหัวข้อนี้จะใช้การถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอ ความเร็วสูงร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพแบบชาโดว์กราฟ (Shadowgraph) ดังภาพที่ 3.11 ในการ อธิบายพฤตกรรมที่เกิดขึ้น



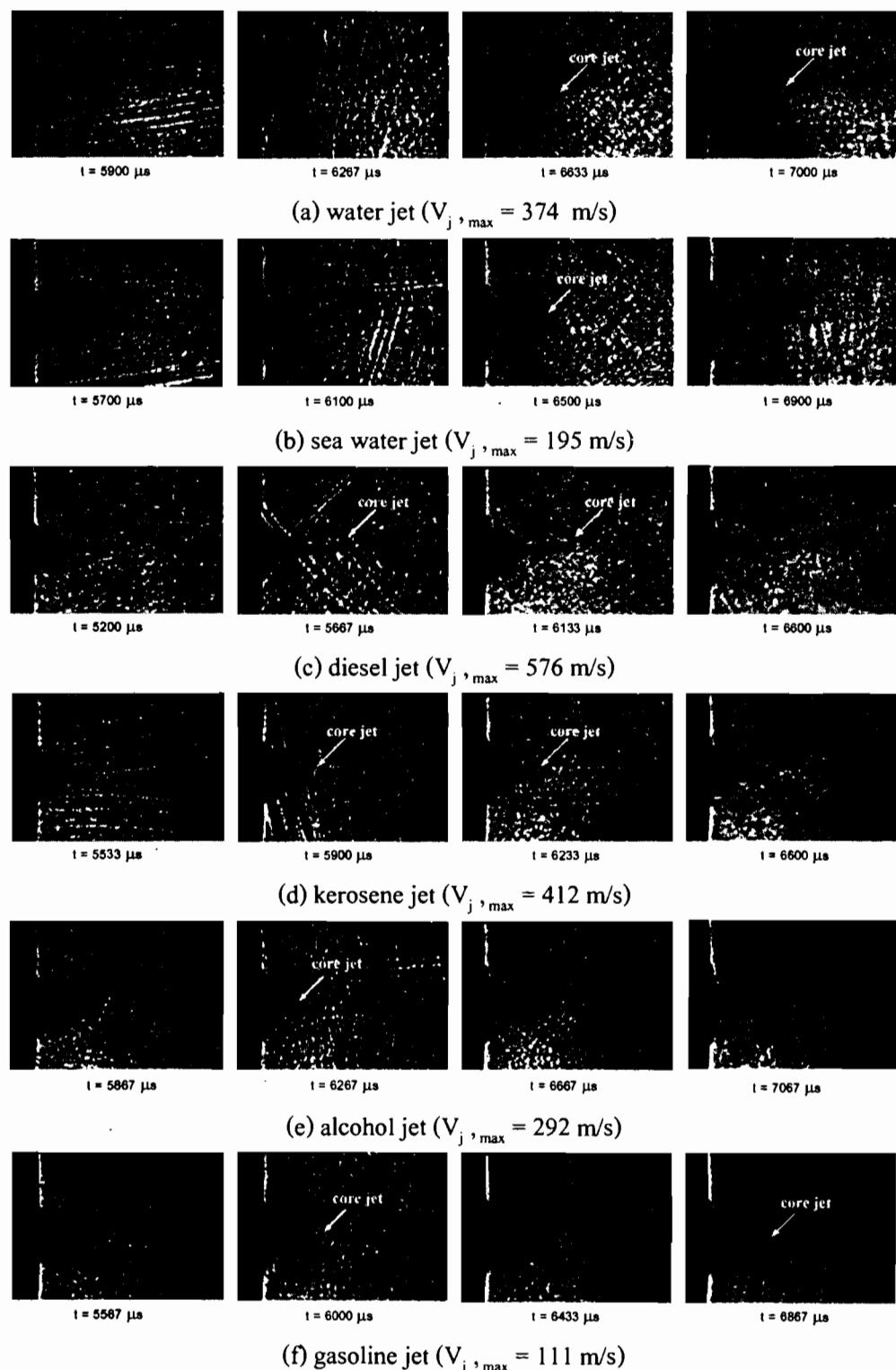
ภาพที่ 4.36 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของลำพูงชนิดต่างๆ เมื่อฉีดในน้ำโดยเทคนิคชั้นภาพ (Shadowgraph)



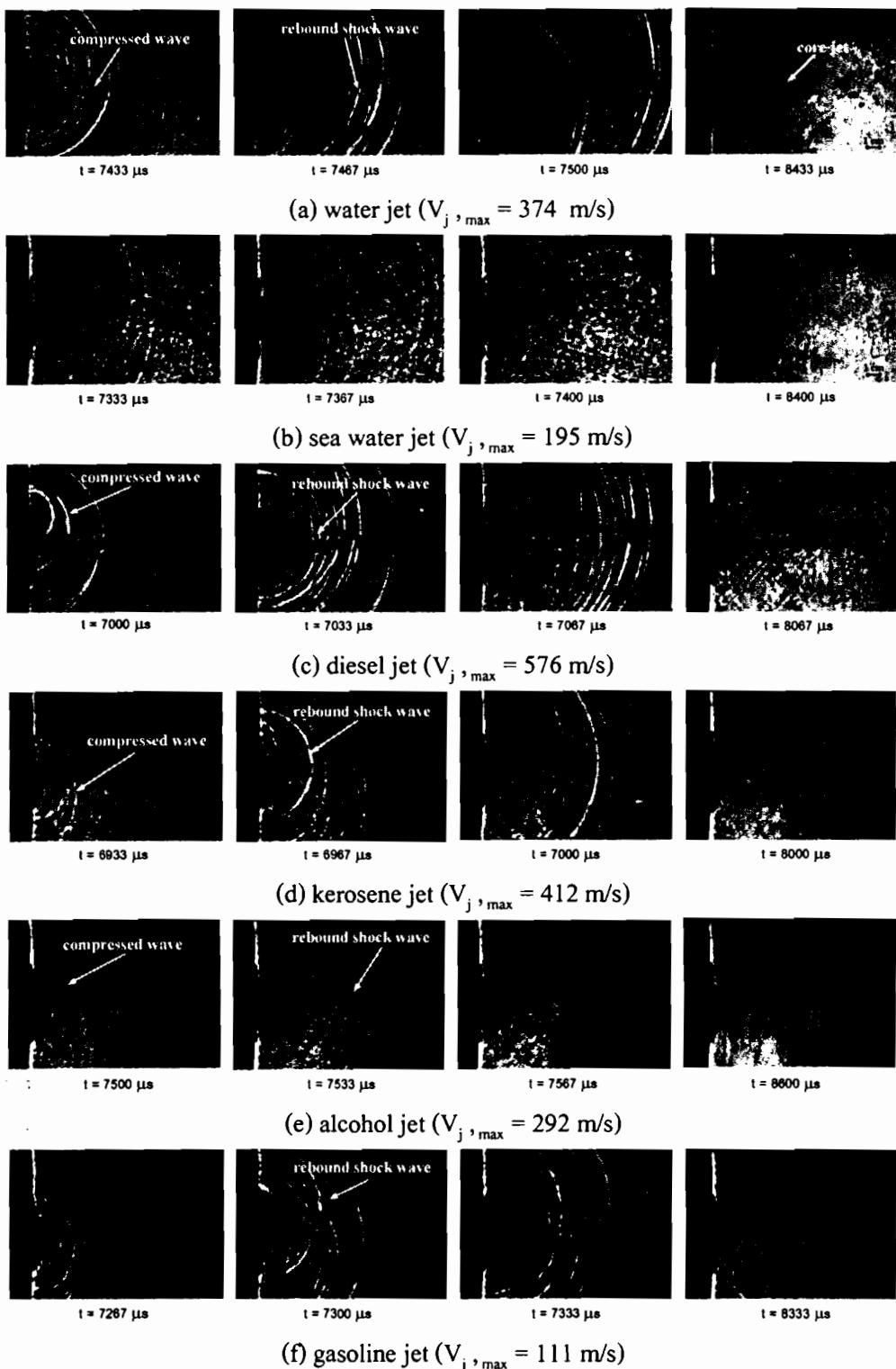
ภาพที่ 4.36 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของลำพุ่งชนิดต่างๆ เมื่อฉีดในน้ำโดยเทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) (ต่อ)



ภาพที่ 4.36 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของลำพูงชนิดต่างๆ เมื่อฉีดในน้ำโดยเทคนิคช้าโครง (Shadowgraph) (ต่อ)

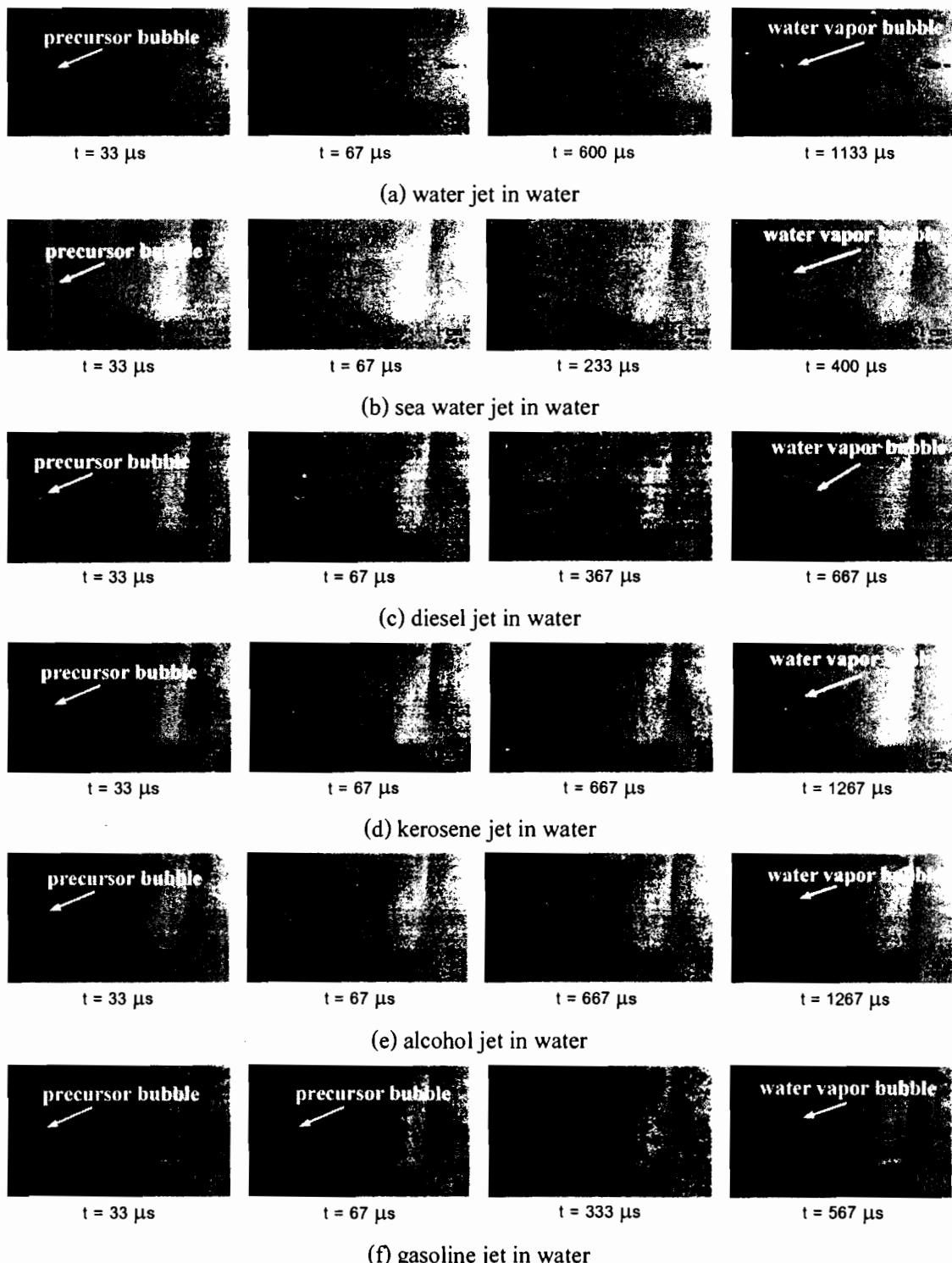


ภาพที่ 4.36 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของลำพุ่งชนิดต่างๆ เมื่อฉีดในน้ำโดยเทคนิคชาร์โกราฟ (Shadowgraph) (ต่อ)

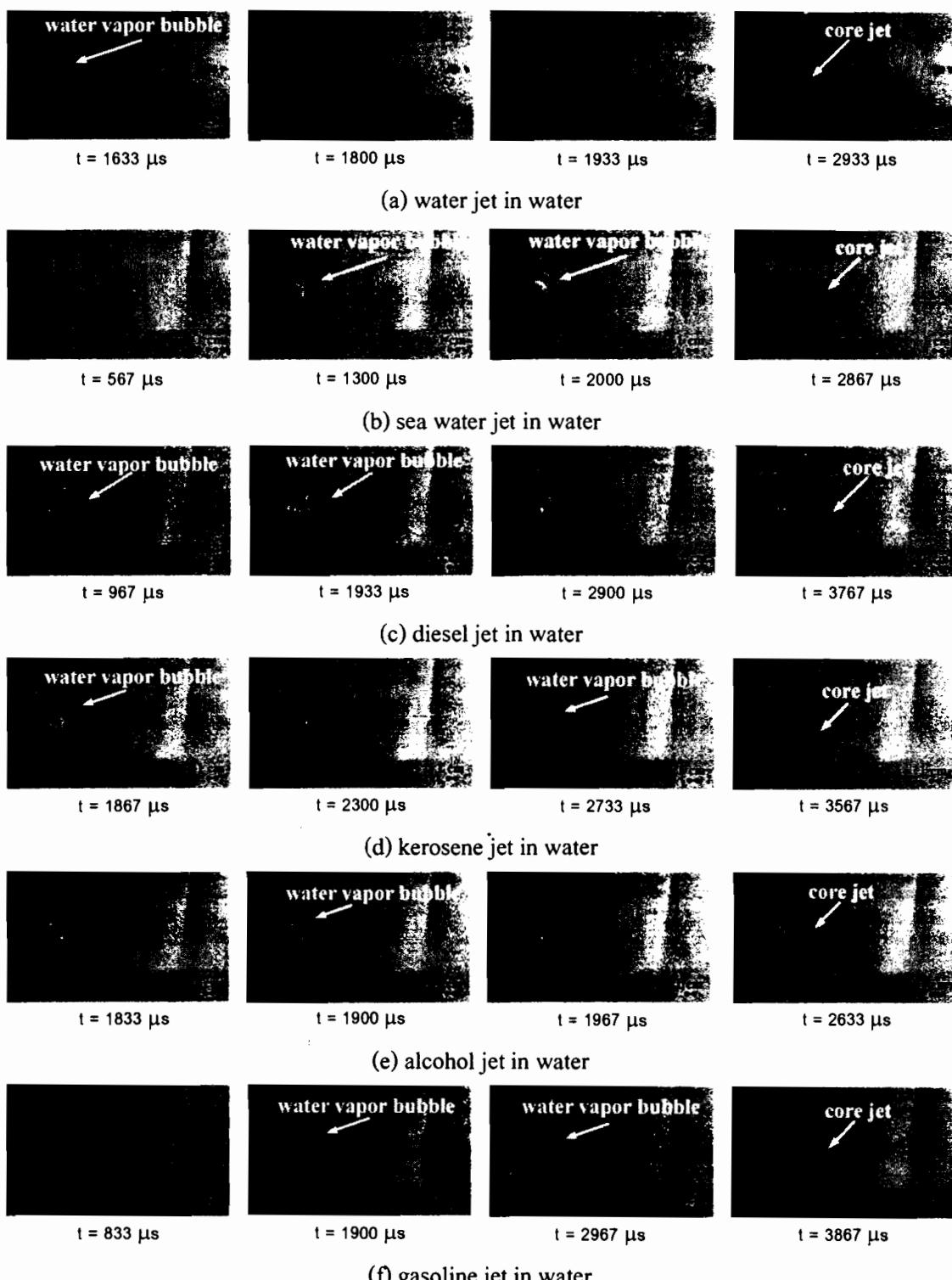


ภาพที่ 4.36 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของลำพุ่งชนิดต่างๆ เมื่อฉีดในน้ำโดยเทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) (ต่อ)

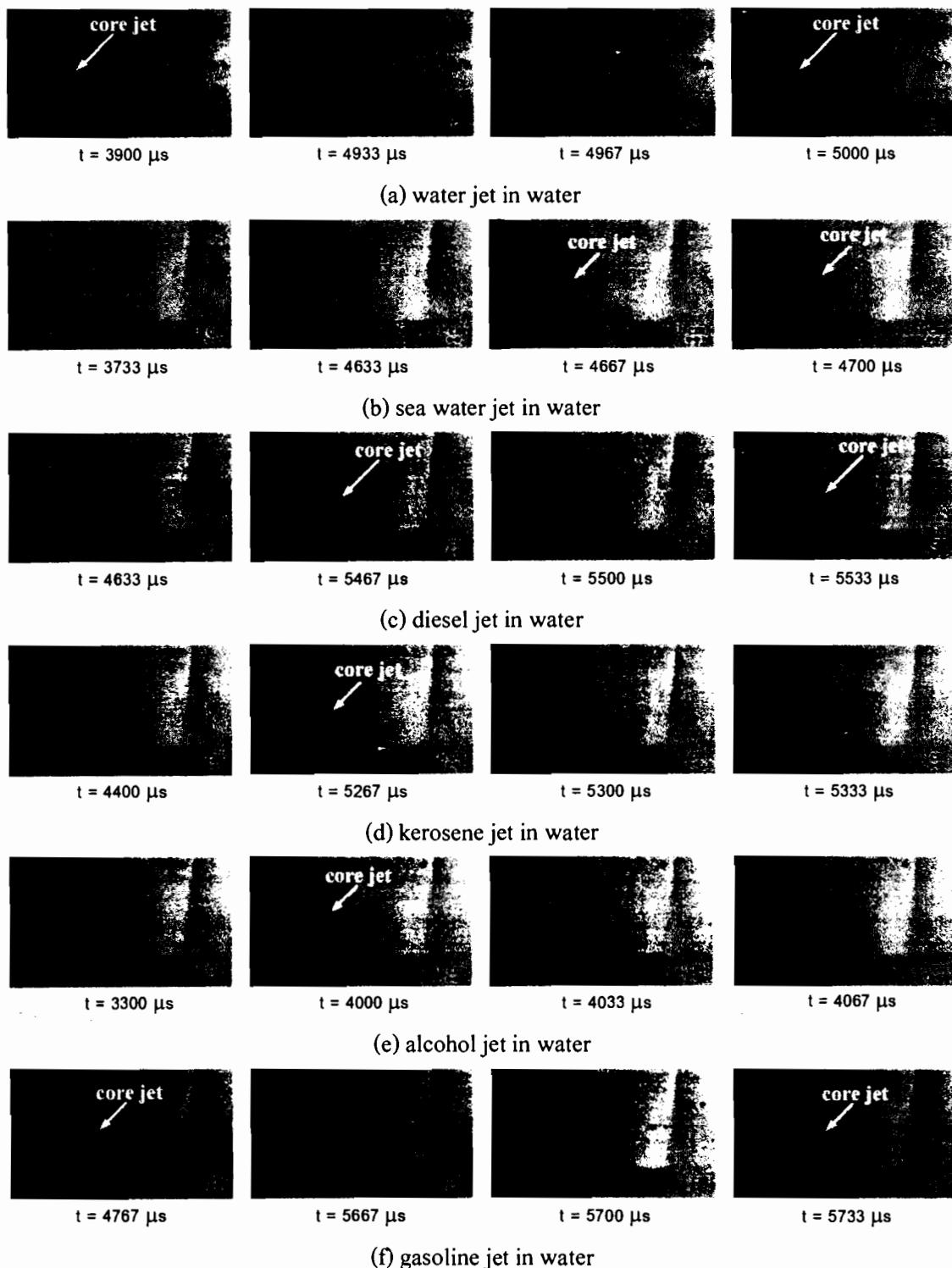
จากภาพที่ 4.36 แสดงการเปรียบเทียบชนิดของลำพูงที่มีค่าในน้ำโดยเทคนิคชาโคล์กราฟ (Shadowgraph) พบว่าลำพูงความเร็วสูงทุกชนิดนั้นจะพบเห็นการเกิดคลื่นกระแทก (shock wave) ในน้ำอย่างชัดเจน ที่เวลาเท่ากับ 67 μs ซึ่งคุณลักษณะของลำพูงน้ำ แอ落กอซอล์ และน้ำมันแก๊สโซลีน จะมีลักษณะที่คล้ายกัน คือ จะใหญ่และกว้าง ส่วนลำพูงน้ำทะเล น้ำมันดีเซล และกลีโอลซีนจะมีลักษณะที่คล้ายกัน คือ จะเรียวแหลม และจากนั้นจะเกิด water vapor bubble เมื่อเวลาเท่ากับ 700 μs ของลำพูgn้ำและที่เวลาเท่ากับ 1,200 μs ของลำพูgn้ำมันดีเซล พบว่ามีลักษณะที่คล้ายกัน โดยมีลักษณะที่แหลมที่บริเวณส่วนหัวของลำพูงและมีระบบการเคลื่อนที่ที่ไกลงกว่า ลำพูgn้ำทะเล กลีโอลซีน แอ落กอซอล์ และน้ำมันแก๊สโซลีน ที่เวลาเท่ากับ 867 μs , 967 μs , 1,067 μs และ 1,133 μs ตามลำดับ เมื่อเวลาผ่านไปจะพบว่าระบบการเคลื่อนที่ bubble ทั้ง 6 ชนิดสูงสุดที่เวลาเท่ากับ 1,167 μs , 1,067 μs , 1,100 μs , 1,500 μs , 1,633 μs และ 1,700 μs จากนั้นเส้นผ่าศูนย์กลาง bubble ทั้ง 6 ชนิด สูงสุดที่เวลาเท่ากับ 2,600 μs , 2,733 μs , 1,833 μs , 2,300 μs , 2,600 μs และ 2,600 μs ของลำพูgn้ำ น้ำทะเล น้ำมันดีเซล กลีโอลซีน แอ落กอซอล์ และน้ำมันแก๊สโซลีน ตามลำดับ เมื่อ bubble ทั้ง 6 ชนิด บุบตัวลงต่ำสุดจะเกิด compressed wave เกิดขึ้นที่เวลาเท่ากับ 5,400 μs , 5,200 μs , 4,633 μs , 5,100 μs , 5,367 μs และ 5,033 μs ของลำพูgn้ำ น้ำทะเล น้ำมันดีเซล กลีโอลซีน แอ落กอซอล์ และน้ำมันแก๊สโซลีน ตามลำดับ จะพบว่าเส้นของคลื่นของลำพูgn้ำทะเล กลีโอลซีนและน้ำมันแก๊สโซลีน จะจางกว่า ของลำพูgn้ำ น้ำมันดีเซล และแอ落กอซอล์ หลักจากการบุบตัวลงจะสังเกตเห็นแก่นของลำพูง ไม่ชัดเจน คือ ลำพูgn้ำ น้ำทะเล และแอ落กอซอล์ หลังจากนั้น bubble ก็จะขยายตัวเพิ่มขึ้นอีกรั้งที่ บริเวณรอบๆ หัวฉีด และจะสังเกตเห็นแก่นของลำพูงได้ชัดเจน คือ ลำพูgn้ำมันดีเซล กลีโอลซีน และน้ำมันแก๊สโซลีน และเมื่อ bubble ทั้ง 6 ชนิดบุบตัวลงต่ำสุดครั้งที่สองเกิดขึ้นที่เวลาเท่ากับ 7,433 μs , 7,333 μs , 7,000 μs , 6,933 μs , 7,500 μs และ 7,267 μs ของลำพูgn้ำ น้ำทะเล น้ำมันดีเซล กลีโอลซีน แอ落กอซอล์ และน้ำมันแก๊สโซลีน ตามลำดับ จะพบว่าเส้นของคลื่นของลำพูgn้ำทะเล กลีโอลซีน และแอ落กอซอล์ จะจางกว่าของลำพูgn้ำ น้ำมันดีเซล และน้ำมันแก๊สโซลีน และลำพูgn้ำมันดีเซล กลีโอลซีน และน้ำมันแก๊สโซลีนจะบังพับเห็นแก่นของลำพูงชัดเจน



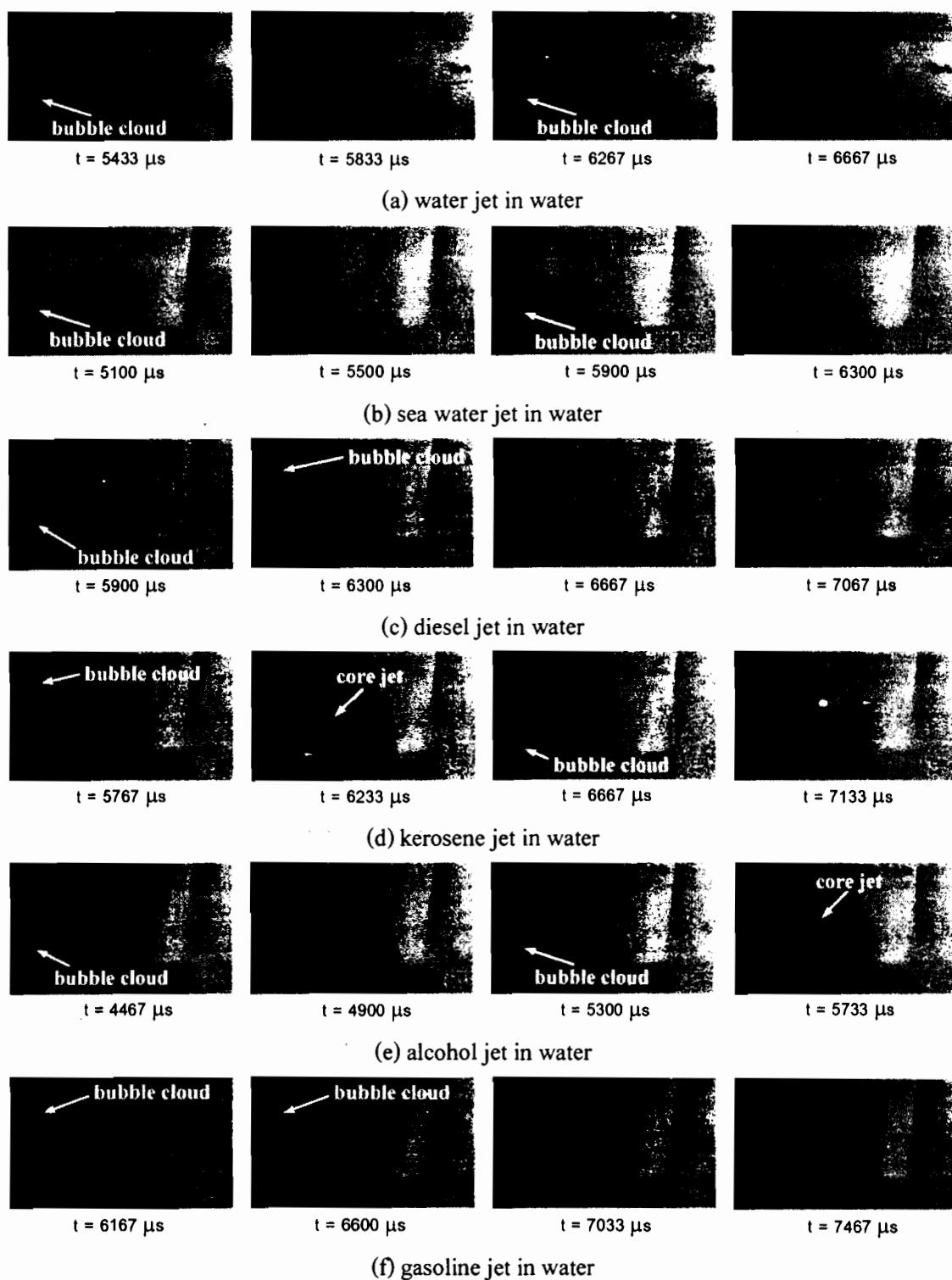
ภาพที่ 4.37 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของลำพูงชนิดต่างๆ เมื่อฉีดในน้ำโดยไม่ใช้เทคนิคชาโคล์กราฟ (Shadowgraph)



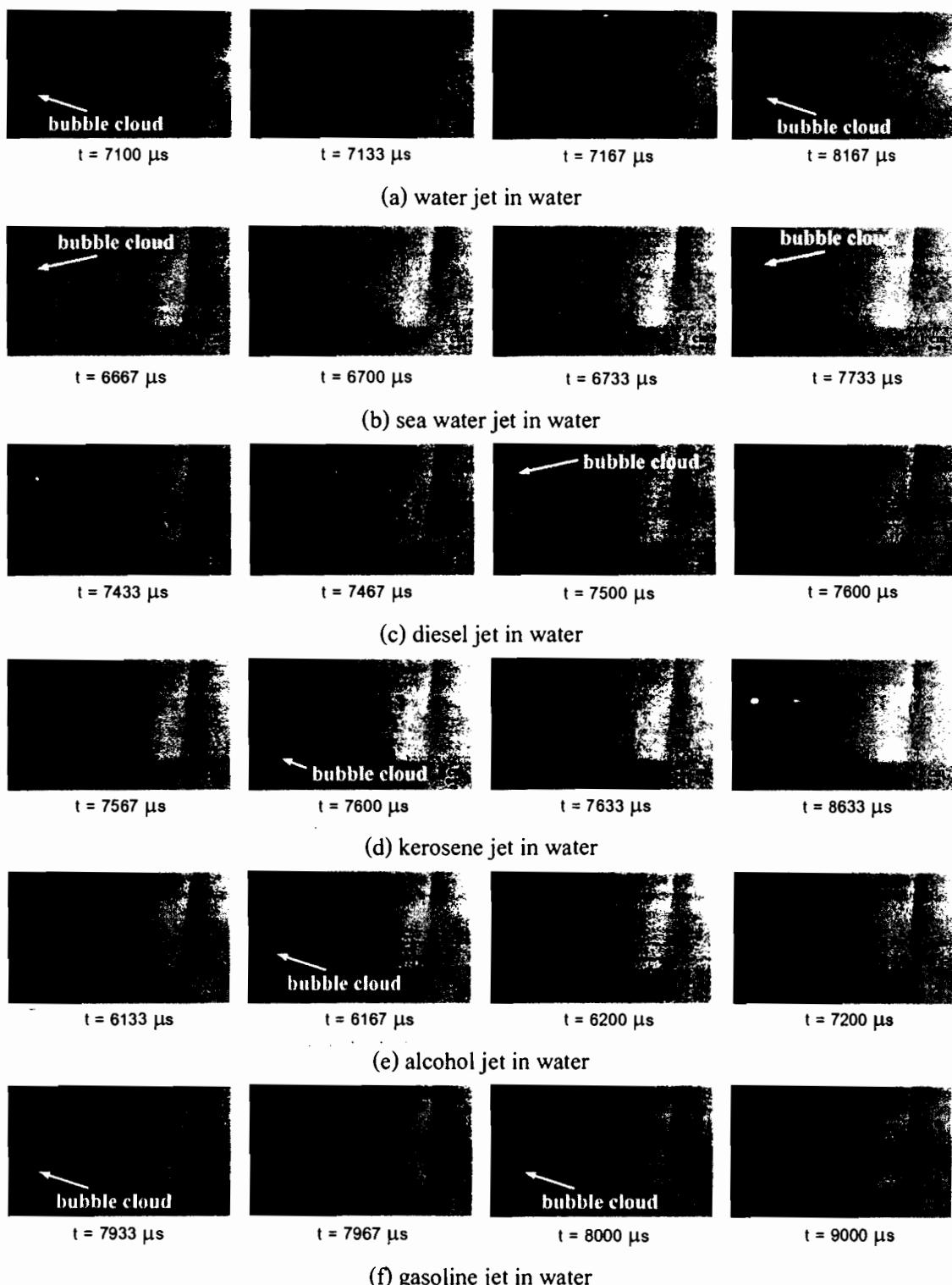
ภาพที่ 4.37 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของลำพูงชนิดต่างๆ เมื่อฉีดในน้ำโดยไม่ใช้เทคนิคชาโคร์กราฟ (Shadowgraph) (ต่อ)



ภาพที่ 4.37 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของลำพูงชนิดต่างๆ เมื่อฉีดในน้ำโดยไม่ใช้เทคนิคชาโคล์กราฟ (Shadowgraph) (ต่อ)



ภาพที่ 4.37 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของลำพูงชนิดต่างๆ เมื่อฉีดในน้ำโดยไม่ใช้เทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) (ต่อ)



ภาพที่ 4.37 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของลำพูงชนิดต่างๆ เมื่อฉีดในน้ำโดยไม่ใช้เทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) (ต่อ)

จากภาพที่ 4.37 แสดงการเปรียบเทียบคุณลักษณะของลำพูงชนิดต่างๆ เมื่อฉีดในน้ำโดยไม่ใช้เทคนิคชาโคลว์กราฟ (Shadowgraph) พบร่วมกัน 67 μs ซึ่งคุณลักษณะของลำพูงทั้ง 6 ชนิดจะมีลักษณะที่คล้ายกัน คือ จะเรียวแหลม และเห็นการเกิด water vapor bubble ที่ชัดเจน โดยคุณลักษณะของลำพูงน้ำ น้ำมันดีเซล กลีโอลีน แอลกอฮอล์ และน้ำมันแก๊สโซลิน จะมีลักษณะที่คล้ายกัน คือ จะใหญ่และกว้าง ที่เวลาเท่ากับ 1,133 μs , 667 μs , 1,267 μs , 1,267 μs และ 567 μs ตามลำดับ ส่วนลำพูงน้ำทะเลจะมีลักษณะที่เรียวแหลมและเล็กกว่า ที่เวลาเท่ากับ 400 μs จากนั้น bubble ทั้ง 6 ชนิดจะขยายตัวเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเวลาผ่านไปจะพบว่าระเบการเคลื่อนที่ bubble ทั้ง 6 ชนิดสูงสุดที่เวลาเท่ากับ 1,633 μs , 533 μs , 967 μs , 1,867 μs , 1,833 μs และ 833 μs จากนั้นเส้นผ่าศูนย์กลาง bubble ทั้ง 6 ชนิดสูงสุดที่เวลาเท่ากับ 1,933 μs , 2,000 μs , 2,900 μs , 2,733 μs , 1,967 μs และ 2,967 μs ของลำพูงน้ำ น้ำทะเล น้ำมันดีเซล กลีโอลีน แอลกอฮอล์ และน้ำมันแก๊สโซลิน ตามลำดับ เมื่อ bubble ทั้ง 6 ชนิดยุบตัวลงต่ำสุดจะเกิดขึ้นที่เวลาเท่ากับ 4,933 μs , 4,633 μs , 5,467 μs , 5,267 μs , 4,000 μs และ 5,667 μs ของลำพูงน้ำ น้ำทะเล น้ำมันดีเซล กลีโอลีน แอลกอฮอล์ และน้ำมันแก๊สโซลิน ตามลำดับ จะสังเกตเห็นว่าแกนของลำพูงน้ำ และน้ำทะเลจะสังเกตไม่พบ ลำพูงแอลกอฮอล์นั้นจะสังเกตเห็นได้ไม่ชัดเจน ส่วนลำพูgn้ำมันดีเซล กลีโอลีน และน้ำมันแก๊สโซลินจะสังเกตเห็นได้ชัดเจน หลังจากนั้น bubble ก็จะขยายตัวเพิ่มขึ้นอีกรอบๆ หัวฉีดได้ชัดเจน และเมื่อ bubble ทั้ง 6 ชนิดยุบตัวลงต่ำสุดครั้งที่สองเกิดขึ้นที่เวลาเท่ากับ 7,100 μs , 6,667 μs , 7,433 μs , 7,567 μs , 6,133 μs และ 7,933 μs ของลำพูงน้ำ น้ำทะเล น้ำมันดีเซล กลีโอลีน แอลกอฮอล์ และน้ำมันแก๊สโซลิน ตามลำดับ จะสังเกตเห็นว่าแกนของลำพูงน้ำ และน้ำทะเลจะสังเกตไม่พบ ลำพูงแอลกอฮอล์นั้นจะสังเกตเห็นได้ไม่ชัดเจน ส่วนลำพูgn้ำมันดีเซล กลีโอลีน และน้ำมันแก๊สโซลินจะยังสังเกตเห็นได้ชัดเจน

จากภาพที่ 4.38 แสดงความเร็วเฉลี่ยของลำพูงทั้ง 6 ชนิด จากการความเร็วสูงสุดของลำพูgn้ำ น้ำทะเล น้ำมันดีเซล กลีโอลีน แอลกอฮอล์ และน้ำมันแก๊สโซลิน มีค่าประมาณ 374.24 m/s, 195.00 m/s, 576.41 m/s, 412.95 m/s, 292.51 m/s และ 111.84 m/s ตามลำดับ พบร่วมกับความเร็วของลำพูgn้ำมันดีเซลมีความเร็วสูงที่สุด รองลงมาคือ กลีโอลีน น้ำ แอลกอฮอล์ น้ำทะเล และน้ำมันแก๊สโซลิน ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกันเป็นคู่ คือ ลำพูgn้ำมันดีเซลกับกลีโอลีน ลำพูgn้ำกับแอลกอฮอล์ และลำพูgn้ำทะเลกับน้ำมันแก๊สโซลิน พบร่วมกับความเร็วของลำพูgn้ำมันดีเซลมีค่าสูงกว่า ลำพูงกลีโอลีน เป็นผลมาจากการค่าความหนาแน่นและความหนืด粘滞ที่มีค่ามากกว่า ส่วนลำพูgn้ำและลำพูgn้ำทะเลต่างก็มีค่าความตึงผิวที่มากกว่าจึงทำให้มีความเร็วที่สูงกว่าลำพูงแอลกอฮอล์และลำพูgn้ำมันแก๊สโซลิน จากนั้นความเร็วของลำพูงจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาผ่านไปเนื่องจาก hydrodynamic drag ของน้ำนั้นมีค่าสูงจึงส่งผลให้ระบบการเคลื่อนที่ของลำพูงจะเคลื่อนที่ได้ไปถึง

ระยะห่างที่เริ่มหยุดและจะเริ่มอยู่นั่ง โดยระยะเวลาเคลื่อนที่สูงสุดของลำพุ่ง water, sea water, diesel, kerosene, alcohol และ gasoline มีค่าประมาณ 52.54 mm, 41.00 mm, 54.23 mm, 37.85 mm, 37.85mm และ 28.10 mm ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.39

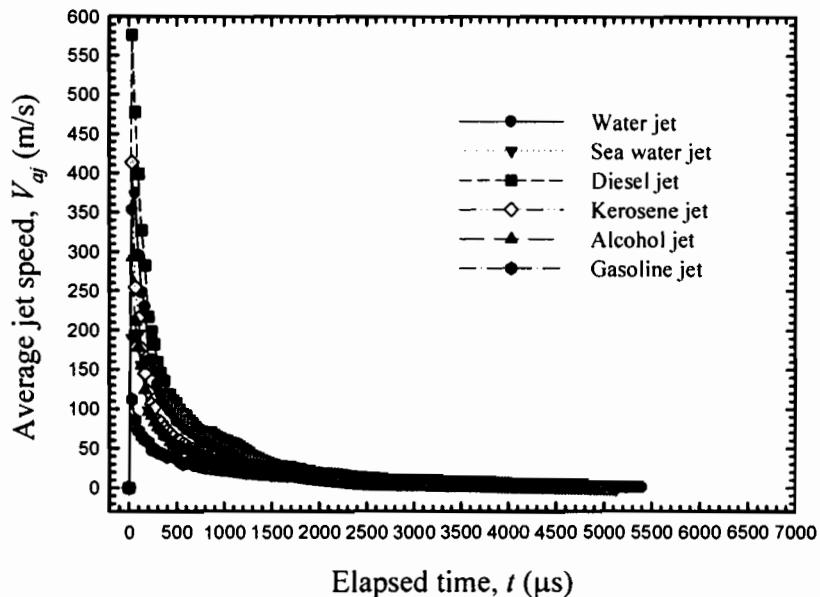
จากภาพที่ 4.40 แสดงระยะเวลาเคลื่อนที่ของ bubble (bubble penetration distance) ของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด พบว่า bubble ของลำพุ่งน้ำ น้ำทะเล น้ำมันดีเซล กลีโอลิน แอลกอฮอล์ และ น้ำมันแก๊สโซลีน จะค่อนข้างเร็วที่สุด โดยระยะเวลาเคลื่อนที่ของ bubble สูงสุดที่เวลา 1,167 μs, 1,067 μs, 1,100 μs, 1,500 μs, 1,633 μs และ 1,700 μs ซึ่งระยะเวลาเคลื่อนที่สูงสุดเท่ากับ 47.88 mm, 36.99 mm, 61.93 mm, 35.48 mm, 36.99 mm และ 25.80 mm ตามลำดับ หลังจากนั้น bubble จะค่อนข้างตัวลงจนถึงจุดต่ำสุด โดยพบว่าระยะเวลาเคลื่อนที่ของ bubble ของลำพุ่งน้ำมันดีเซล เคลื่อนที่ได้ใกล้สุด รองลงมาคือ น้ำ น้ำทะเลกับแอลกอฮอล์มีค่าเท่ากัน กลีโอลิน และ น้ำมันแก๊สโซลีน ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกันเป็นคู่ คือ ลำพุ่งน้ำมันดีเซลกับน้ำ ลำพุ่งน้ำทะเลกับแอลกอฮอล์ และ ลำพุ่งกลีโอลินกับน้ำมันแก๊สโซลีน พบว่าลำพุ่งน้ำมันดีเซลเคลื่อนที่ได้ใกล้กว่าเป็นผลของน้ำหนัก มวลโมเลกุลและค่าความหนืด粘滞系数 น้ำมันดีเซลกว่าลำพุ่งน้ำ ซึ่งลำพุ่งน้ำทะเลกับแอลกอฮอล์จะมีระยะเวลาเคลื่อนที่เท่ากันเป็นผลเนื่องจากค่าความหนืด粘滞系数 น้ำมันดีเซลนี้ค่าต่างกันเดือนonomy และลำพุ่งกลีโอลินจะเคลื่อนที่ได้ใกล้กว่าลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซลีน เป็นผลจากค่าความหนืด粘滞系数 น้ำมันดีเซลกว่า

จากภาพที่ 4.41 แสดงความเร็วระยะเวลาเคลื่อนที่ของ bubble เฉลี่ยของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด พบว่าความเร็วสูงสุดของลำพุ่งน้ำมีค่าประมาณ 349.85 m/s , น้ำทะเลเร็วค่าประมาณ 438.76 m/s, น้ำมันดีเซลมีค่าประมาณ 369.94 m/s, กลีโอลินมีค่าประมาณ 352.73 m/s, แอลกอฮอล์มีค่าประมาณ 344.13 m/s และ น้ำมันแก๊สโซลีนมีค่าประมาณ 585.02 m/s พบว่าความเร็วระยะเวลาเคลื่อนที่ของ bubble ของลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซลีนมีความเร็วที่สุด รองลงมาคือ น้ำทะเล น้ำมันดีเซล กลีโอลิน น้ำ และ แอลกอฮอล์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกันเป็นคู่ คือ ลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซลีนกับน้ำทะเล ลำพุ่งน้ำมันดีเซลกับกลีโอลิน และ ลำพุ่งน้ำกับแอลกอฮอล์ พบว่าความเร็วของลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซลีนมีความเร็วสูงกว่าเป็นผลจากน้ำหนักมวลโมเลกุลมีค่าสูงกว่าลำพุ่งน้ำทะเล ส่วนลำพุ่งน้ำมันดีเซลมีความเร็วสูงกว่ากลีโอลิน เป็นผลมาจากการค่าความหนาแน่นและความหนืด粘滞系数 ที่มีค่ามากกว่า และลำพุ่งน้ำมีความเร็วสูงกว่าแอลกอฮอล์ เป็นผลมาจากการค่าความตึงผิวที่มากกว่า

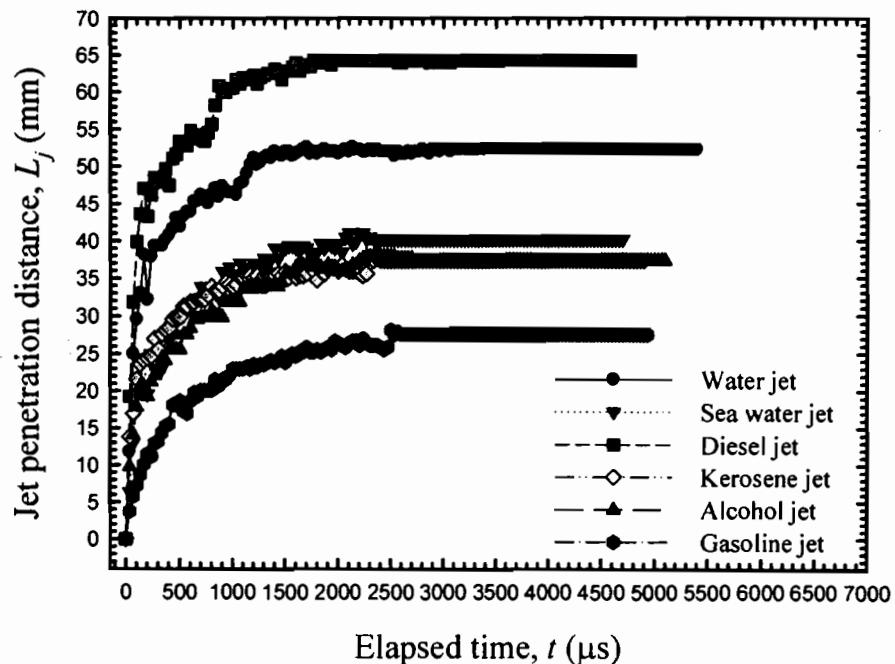
จากภาพที่ 4.42 แสดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble (bubble diameter) ของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด พบว่าเส้นผ่าศูนย์กลาง bubble ของลำพุ่งน้ำ น้ำทะเล น้ำมันดีเซล กลีโอลิน แอลกอฮอล์ และ น้ำมันแก๊สโซลีนจะขยายตัวสูงสุดที่เวลา 2,567 μs, 2,733 μs, 1,367 μs, 2,433 μs, 2,600 μs และ 2,600 μs ซึ่งมีขนาดสูงสุดเท่ากับ 57.34 mm, 48.17 mm, 36.32 mm, 52.18 mm, 51.90 mm และ 48.46 mm ตามลำดับ จากนั้น bubble จะยุบตัวลงและจะเริ่มขยายตัวอีกรั้งที่เวลา 5,500 μs, 5,167

μ s, 4,667 μ s, 5,100 μ s, 5,233 μ s และ 5,000 μ s ของลำน้ำ น้ำทะเล น้ำมันดีเซล กลีโอลีน แอลกอฮอล์ และ น้ำมันแก๊สโซลีน ตามลำดับ โดยพบว่านาคเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ของลำพุ่ง น้ำมีขนาดใหญ่สุด รองลงมาคือ กลีโอลีน แอลกอฮอล์ น้ำมันแก๊สโซลีน น้ำทะเลและน้ำมันดีเซล ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกันเป็นคู่ คือ ลำพุ่งน้ำกับกลีโอลีน ลำพุ่งแอลกอฮอล์กับน้ำมันแก๊สโซลีน และลำพุ่งน้ำทะเลกับน้ำมันดีเซล พนว่าลำพุ่งน้ำมีขนาดที่ใหญ่กว่าเป็นผลจากค่าน้ำหนักมวล โนเลกุลและค่าความหนืดจลน์ที่น้อยกว่าจึงทำให้การแตกตัวทำได้ดีกว่าลำพุ่งกลีโอลีน ซึ่งลำพุ่ง แอลกอฮอล์มีน้ำหนักมวลโนเลกุลที่น้อยกว่าจึงมีขนาดที่ใหญ่กว่าลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซลีน และลำพุ่ง น้ำทะเลมีค่าความหนืดจลน์ที่น้อยกว่าจึงมีขนาดที่ใหญ่กว่าลำพุ่งน้ำมันดีเซล

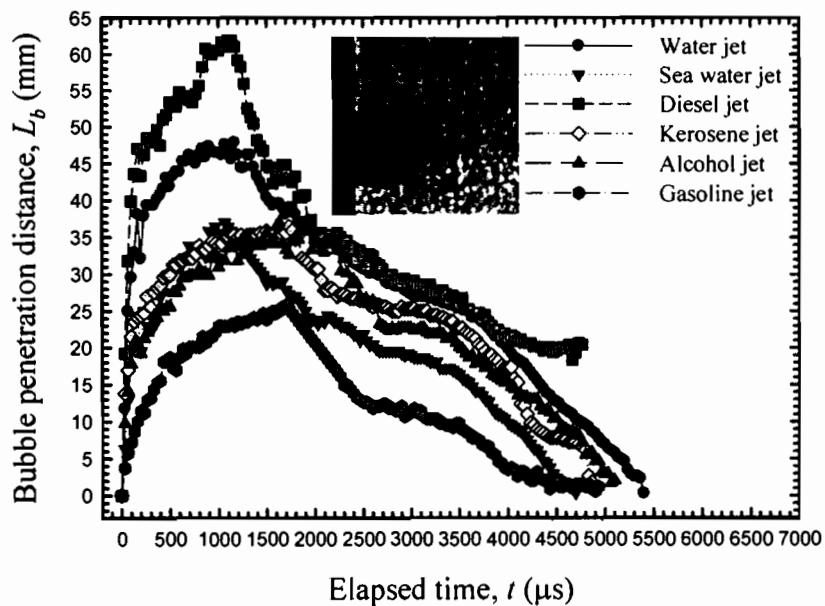
จากภาพที่ 4.43 แสดงความเร็วการขยับตัวและหดตัวของนาคเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble เนลี่ย (V_g) ของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด พนว่าความเร็วการขยับตัวสูงสุดของลำพุ่งน้ำมีค่าประมาณ 361.33 m/s ความเร็วการขยับตัวเท่ากับ 22.05 m/s ความเร็วการยุบตัวเท่ากับ 13.50 m/s, น้ำทะเลมี ความเร็วการขยับตัวสูงสุดประมาณ 206.47 m/s ความเร็วการขยับตัวเท่ากับ 17.40 m/s ความเร็ว การยุบตัวเท่ากับ 15.05 m/s, น้ำมันดีเซลมีความเร็วการขยับตัวสูงสุดประมาณ 177.76 m/s ความเร็ว การขยับตัวเท่ากับ 19.31 m/s ความเร็วการยุบตัวเท่ากับ 6.84 m/s, กลีโอลีนมีความเร็วการขยับตัว สูงสุดประมาณ 176.36 m/s ความเร็วการขยับตัวเท่ากับ 22.36 m/s ความเร็วการยุบตัวเท่ากับ 13.57 m/s, แอลกอฮอล์มีความเร็วการขยับตัวสูงสุดประมาณ 318.32 m/s ความเร็วการขยับตัวเท่ากับ 19.71 m/s ความเร็วการยุบตัวเท่ากับ 13.23 m/s และ น้ำมันแก๊สโซลีนมีความเร็วการขยับตัวสูงสุด ประมาณ 275.30 m/s ความเร็วการขยับตัวเท่ากับ 18.40 m/s ความเร็วการยุบตัวเท่ากับ 12.23 m/s จะ พนว่าลำพุ่งน้ำมีความเร็วการขยับตัวสูงสุด รองลงมาคือ แอลกอฮอล์ น้ำมันแก๊สโซลีน น้ำทะเล น้ำมันดีเซลและกลีโอลีน ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกันเป็นคู่ คือ ลำพุ่งน้ำกับแอลกอฮอล์ ลำพุ่ง น้ำมันแก๊สโซลีนกับน้ำทะเล และลำพุ่งน้ำมันดีเซลกับกลีโอลีน พนว่าความเร็วของลำพุ่งน้ำ ความเร็วสูงกว่าเป็นผลจากค่าความตึงผิวมีค่าสูงกว่าลำพุ่งแอลกอฮอล์ ส่วนลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซลีนมี ความเร็วสูงกว่าน้ำทะเล เป็นผลจากน้ำหนักมวลโนเลกุลมีค่าสูงกว่า และลำพุ่งน้ำมันดีเซลมีความเร็ว สูงกว่ากลีโอลีน เป็นผลมาจากการค่าความหนาแน่นและความหนืดจลน์ที่มีค่านากกว่า



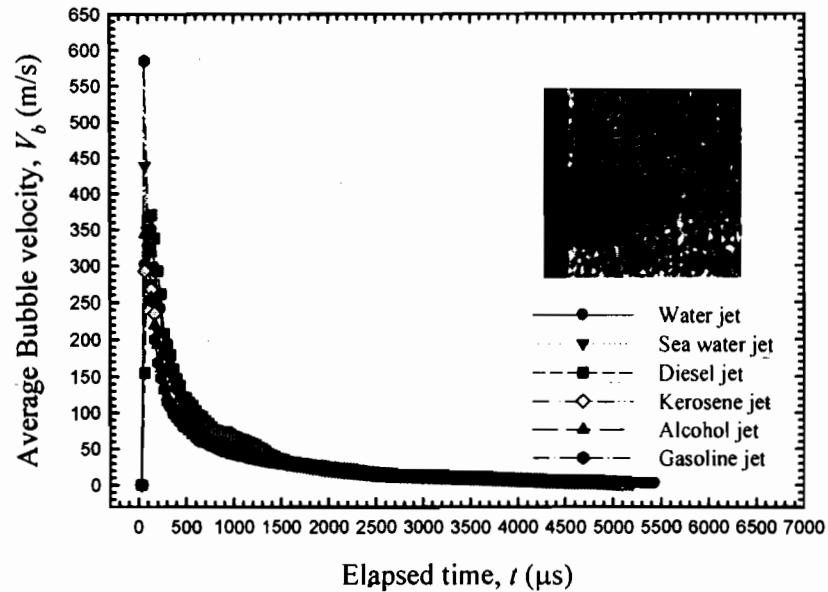
ภาพที่ 4.38 ความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด



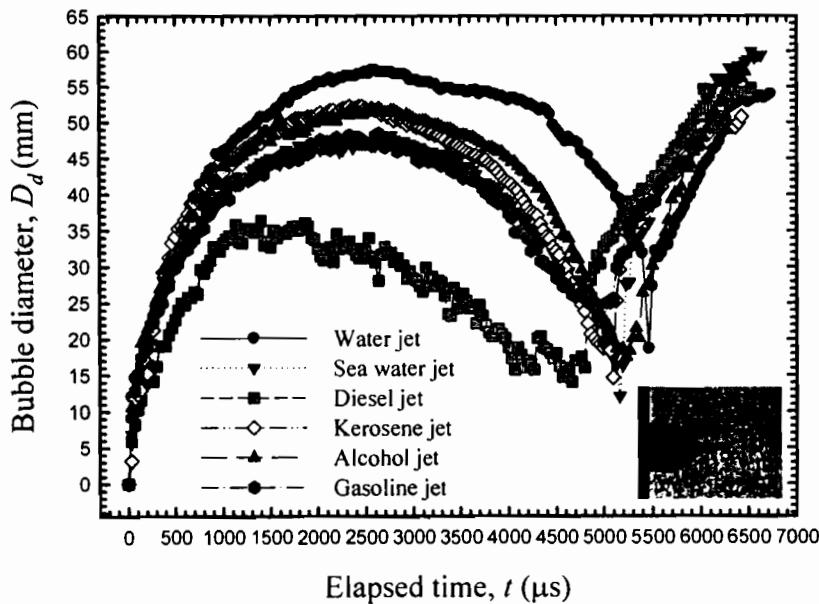
ภาพที่ 4.39 ระยะการเคลื่อนที่ของลำพุ่ง (jet penetration distance) ของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด



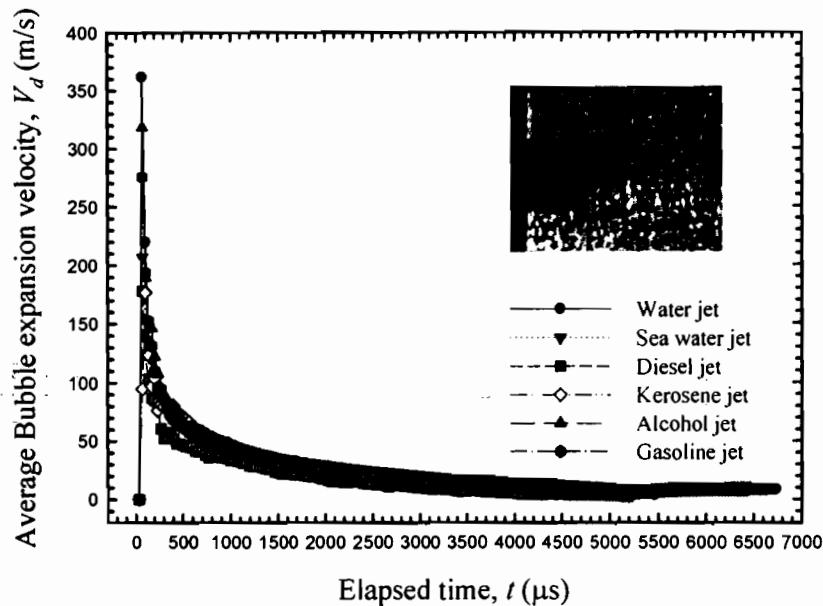
ภาพที่ 4.40 ระบบการเคลื่อนที่ของ bubble (bubble penetration distance) ของลำพูงทั้ง 6 ชนิด



ภาพที่ 4.41 ความเร็วระบบการเคลื่อนที่ของ bubble เฉลี่ย (V_b) ของลำพูงทั้ง 6 ชนิด



ภาพที่ 4.42 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble (bubble diameter) ของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด

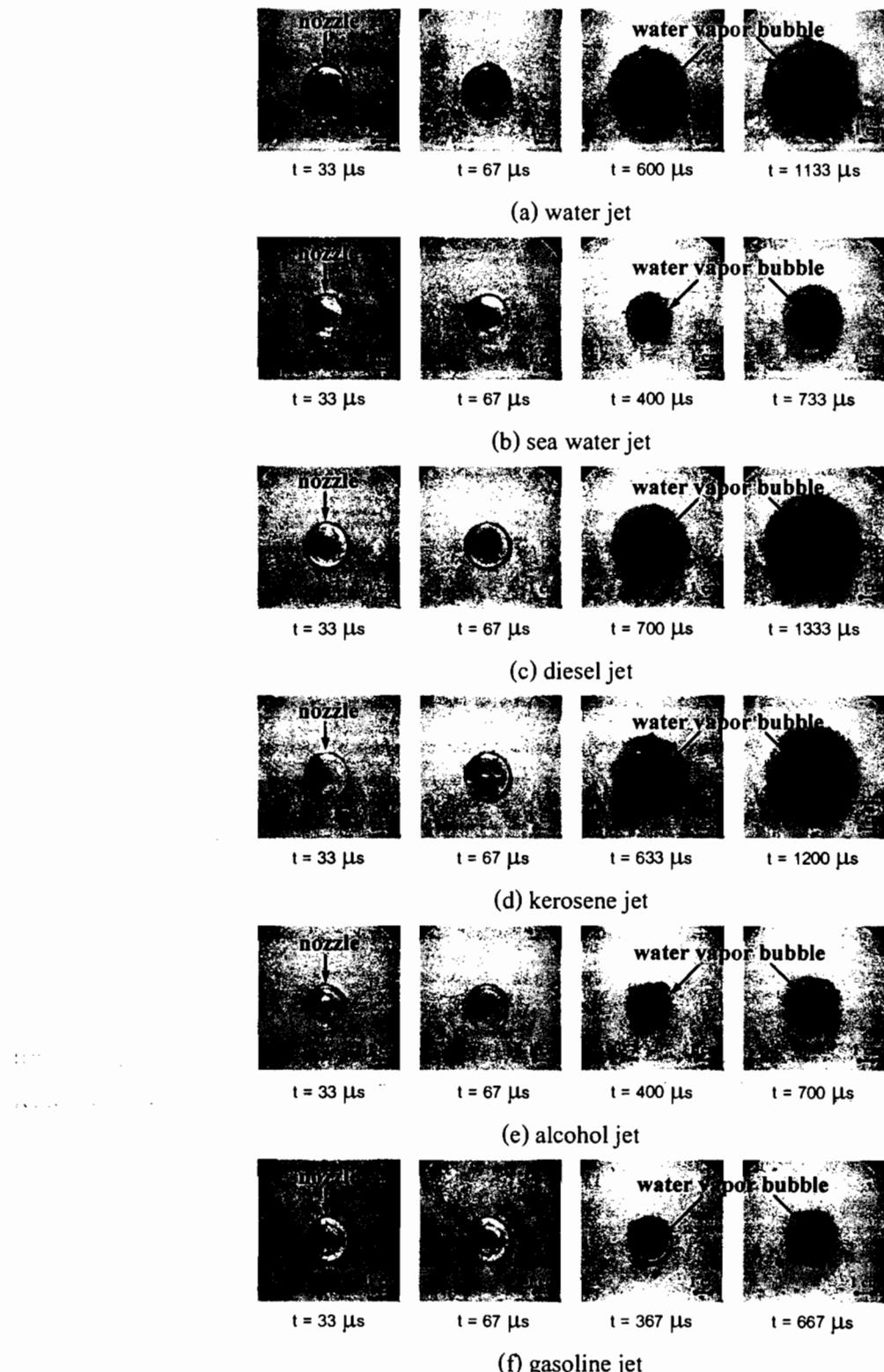


ภาพที่ 4.43 ความเร็วการขยายตัวและหดตัวของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble เนลลี่ (V_d) ของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด

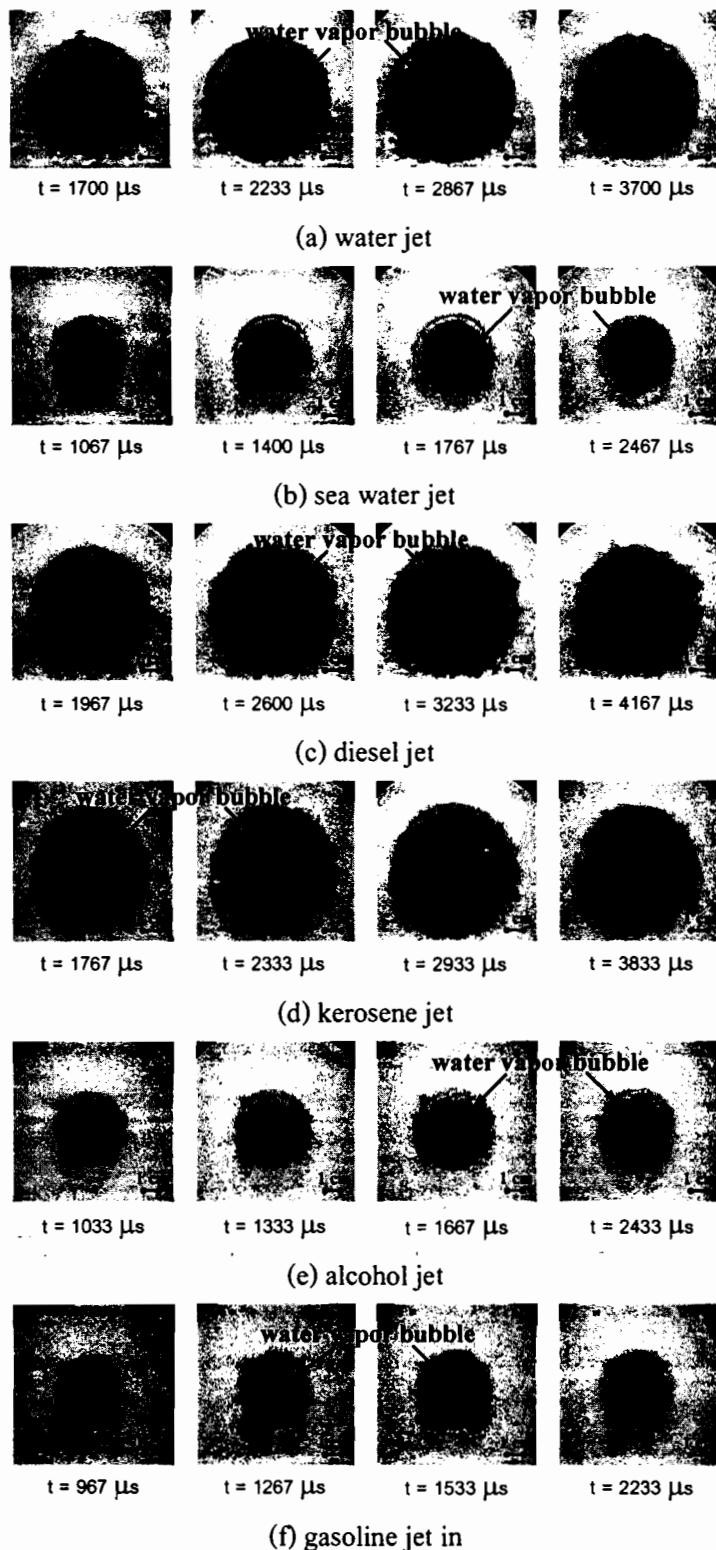
4.2.3 คุณลักษณะสำคัญของลำพูงความเร็วสูงในน้ำในมุมมองแนวแกน

ในหัวข้อนี้จะศึกษาการเปรียบเทียบคุณลักษณะของลำพูงความเร็วสูงเมื่อจัดในน้ำ โดยของเหลวในการศึกษานี้ คือ น้ำ, น้ำทะเล, น้ำมันดีเซล, ก๊าซโอลิฟ, แอלקอฮอล์ และ น้ำมันแก๊สโซลีน ซึ่งในการอธิบายคุณลักษณะของลำพูงที่เกิดขึ้น ในหัวข้อนี้จะใช้การถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอ ความเร็วสูงในมุมมองแนวแกน โดยไม่ใช้เทคนิคการถ่ายภาพ Shadowgraph ดังภาพที่ 3.13 ใน การอธิบายพฤตกรรมที่เกิดขึ้น

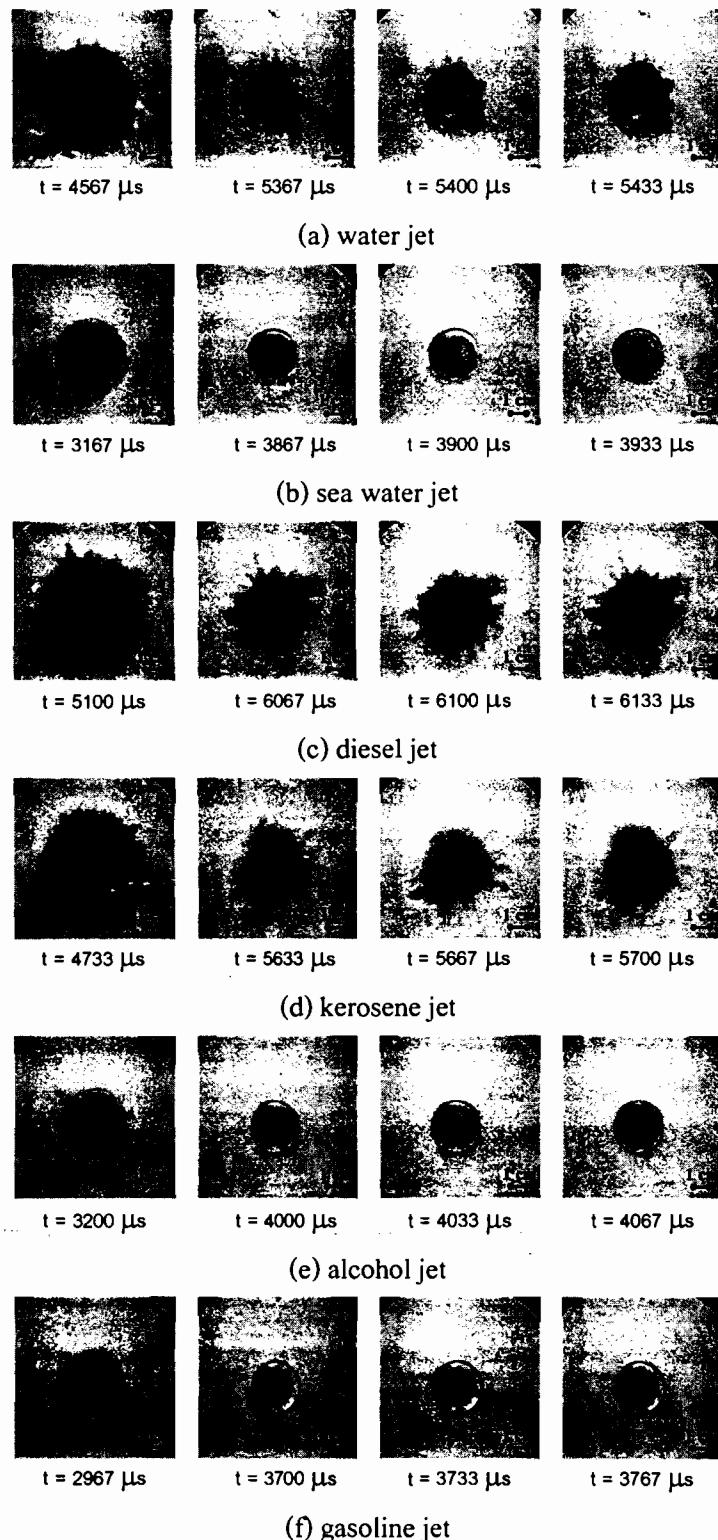
จากภาพที่ 4.44 แสดงการเปรียบเทียบคุณลักษณะของลำพูงชนิดต่างๆ เมื่อจัดในน้ำใน แนวแกนโดยไม่ใช้เทคนิคขาวิดีโอ (Shadowgraph) พบว่าที่เวลาเท่ากับ 67 μs ซึ่งคุณลักษณะของ ลำพูงทั้ง 6 ชนิดมีลักษณะที่คล้ายกัน คือ จะกลมแต่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางจะต่างกันเล็กน้อย และพบ การเกิด water vapor bubble ชัดเจน ซึ่งคุณลักษณะของลำพูgn้ำ น้ำมันดีเซล และก๊าซโอลิฟ จะมี ลักษณะที่คล้ายกัน คือ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ใหญ่กว่า ที่เวลาเท่ากับ 1,133 μs , 1,333 μs และ 1,200 μs ตามลำดับ ส่วนลำพูgn้ำทะเล แอลกอฮอล์ และน้ำมันแก๊สโซลีน มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ เล็กกว่า 733 μs , 700 μs และ 667 μs ตามลำดับ จากนั้นเส้นผ่าศูนย์กลาง bubble ทั้ง 6 ชนิดจะ ขยายตัวเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเวลาผ่านไป จากนั้นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง bubble ทั้ง 6 ชนิดสูงสุดที่เวลา เท่ากับ 2,867 μs , 1,767 μs , 3,233 μs , 2,933 μs , 1,667 μs และ 1,533 μs ของลำพูgn้ำ น้ำทะเล น้ำมัน ดีเซล ก๊าซโอลิฟ แอลกอฮอล์ และน้ำมันแก๊สโซลีน ตามลำดับ จะพบว่าโดยคุณลักษณะของลำพูgn้ำ น้ำมันดีเซล และก๊าซโอลิฟ จะมีลักษณะที่คล้ายกัน คือ จะมีการแตกตัวที่รุนแรงและขนาด เส้นผ่าศูนย์กลางที่ใหญ่กว่ามาก ส่วนลำพูgn้ำทะเล แอลกอฮอล์ และน้ำมันแก๊สโซลีน จะขนาด เส้นผ่าศูนย์กลางที่เล็กกว่า ซึ่งเมื่อบรรผี bubble ทั้ง 6 ชนิดยุบตัวลงต่ำสุดจะเกิดขึ้นที่เวลาเท่ากับ 5,400 μs , 3,900 μs , 6,100 μs , 5,667 μs , 4,033 μs และ 3,733 μs ของลำพูgn้ำ น้ำทะเล น้ำมันดีเซล ก๊าซโอลิฟ แอลกอฮอล์ และน้ำมันแก๊สโซลีน ตามลำดับ จะสังเกตเห็นว่าลำพูgn้ำ น้ำมันดีเซล และก๊าซโอลิฟ มี กลุ่ม bubble รอบๆ หัวฉีด หลังจากนั้น bubble ก็จะขยายตัวเพิ่มขึ้นอีกครั้งที่บริเวณรอบๆ หัวฉีดได้ ชัดเจน และพบว่า bubble ที่เกิดขึ้นรอบๆ หัวฉีดนั้นเริ่มที่จะสลายตัวและรวมตัวกับน้ำภายในห้อง ทดสอบ และเมื่อบรรผี bubble ทั้ง 6 ชนิดยุบตัวลงต่ำสุดครั้งที่สองเกิดขึ้นที่เวลาเท่ากับ 7,233 μs , 6,100 μs , 8,967 μs , 7,400 μs , 6,300 μs และ 5,700 μs ของลำพูgn้ำ น้ำทะเล น้ำมันดีเซล ก๊าซโอลิฟ แอลกอฮอล์ และน้ำมันแก๊สโซลีน ตามลำดับ จะสังเกตเห็นว่า bubble ที่เกิดขึ้นรอบๆ หัวฉีดนั้นได้สลายตัวและ รวมตัวกับน้ำภายในห้องทดสอบ



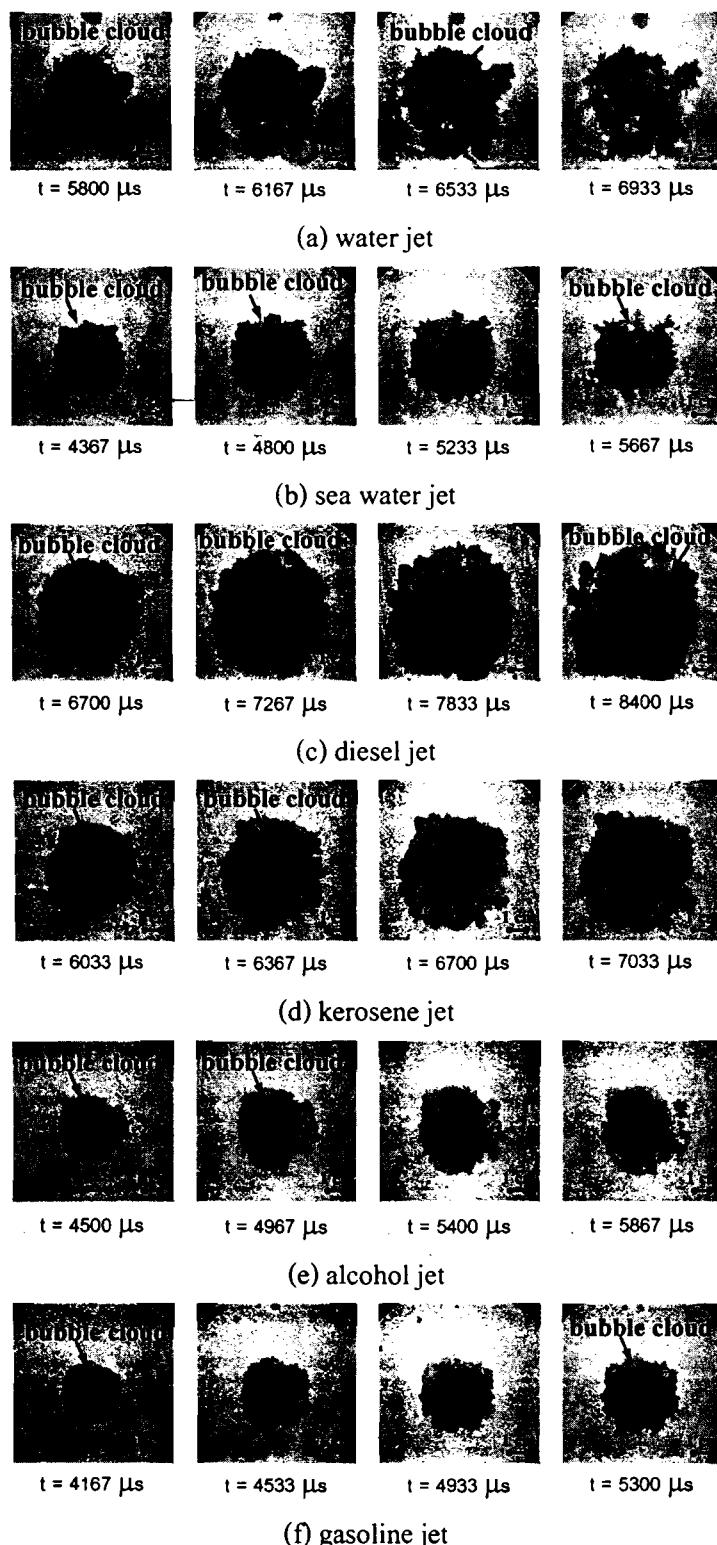
ภาพที่ 4.44 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของลำพูงชนิดต่างๆ เมื่อฉีดในน้ำในแนวแกนโดยไม่ใช้เทคนิคชาโคล์กราฟ (Shadowgraph)



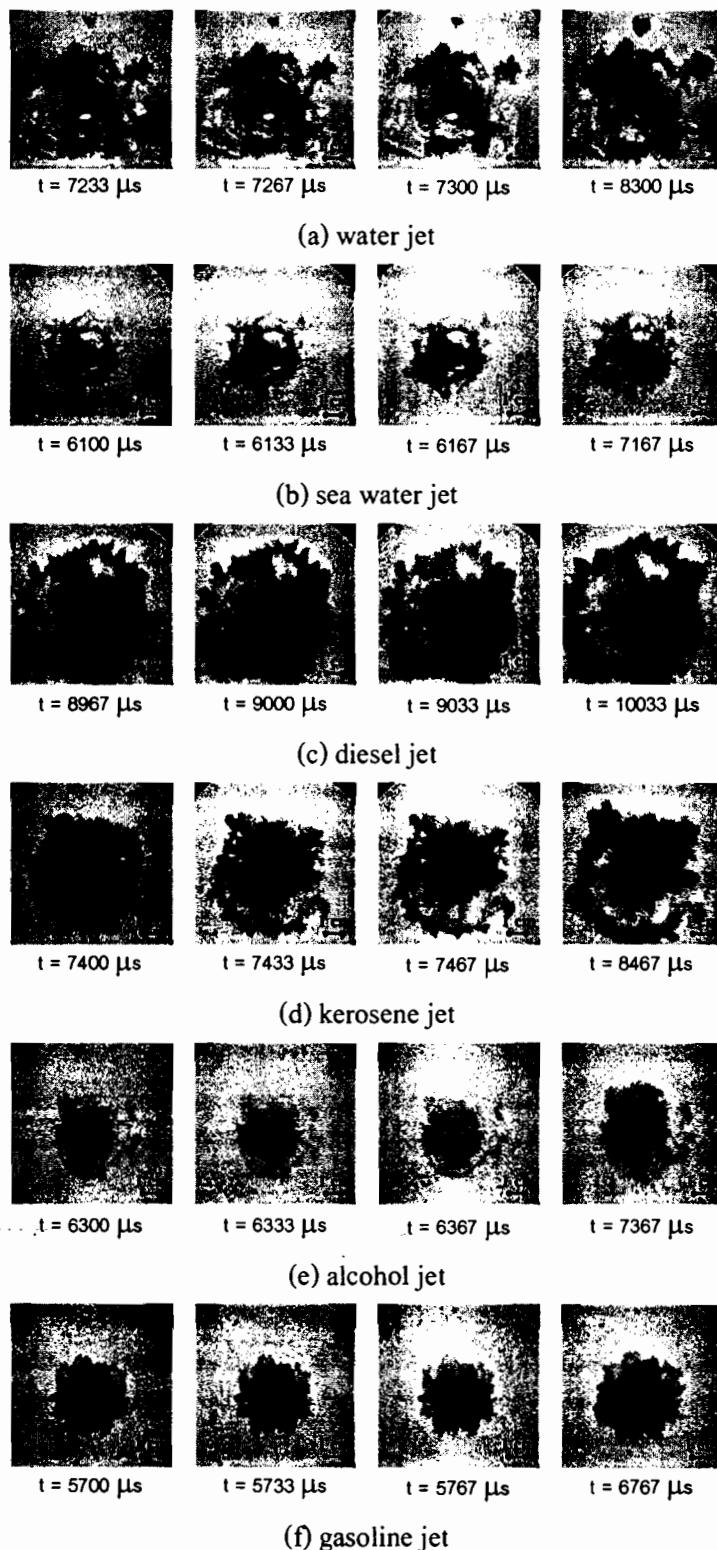
ภาพที่ 4.44 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของลำพูงชนิดต่างๆ เมื่อฉีดในน้ำในแนวแกนโดยไม่ใช้เทคนิคชาโคล์กราฟ (Shadowgraph) (ต่อ)



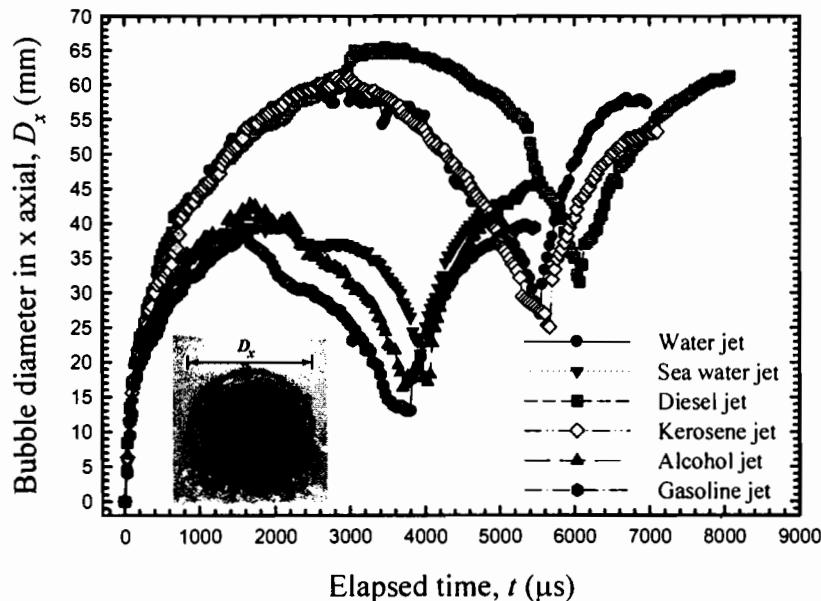
ภาพที่ 4.44 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของลำพูงชนิดต่างๆ เมื่อฉีดในน้ำในแนวแกนโดยไม่ใช้เทคนิคชาโคล์กราฟ (Shadowgraph) (ต่อ)



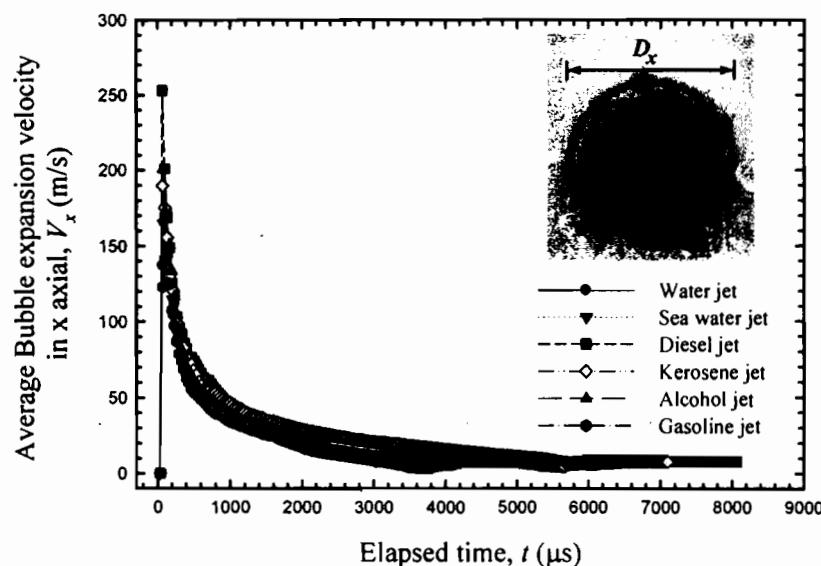
ภาพที่ 4.44 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของลำพูงชนิดต่างๆ เมื่อฉีดในน้ำในแนวแกนโดยไม่ใช้เทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) (ต่อ)



ภาพที่ 4.44 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของลำพูงชนิดต่างๆ เมื่อฉีดในน้ำในแนวแกน โดยไม่ใช้เทคนิคชาโคล์กราฟ (Shadowgraph) (ต่อ)



ภาพที่ 4.45 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble (bubble diameter) (D_x) ของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด

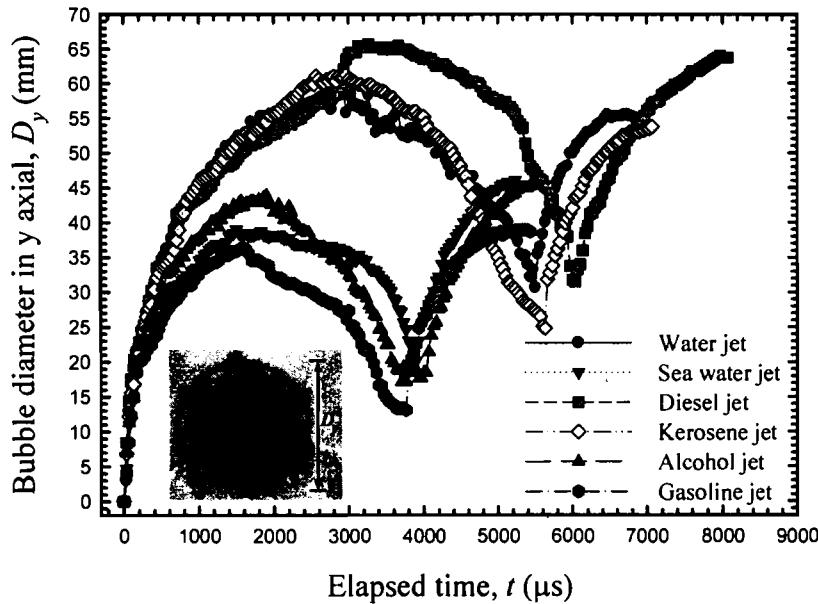


ภาพที่ 4.46 ความเร็วการขยายตัวและทดสอบของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble เมล็ด (V_x) ของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด

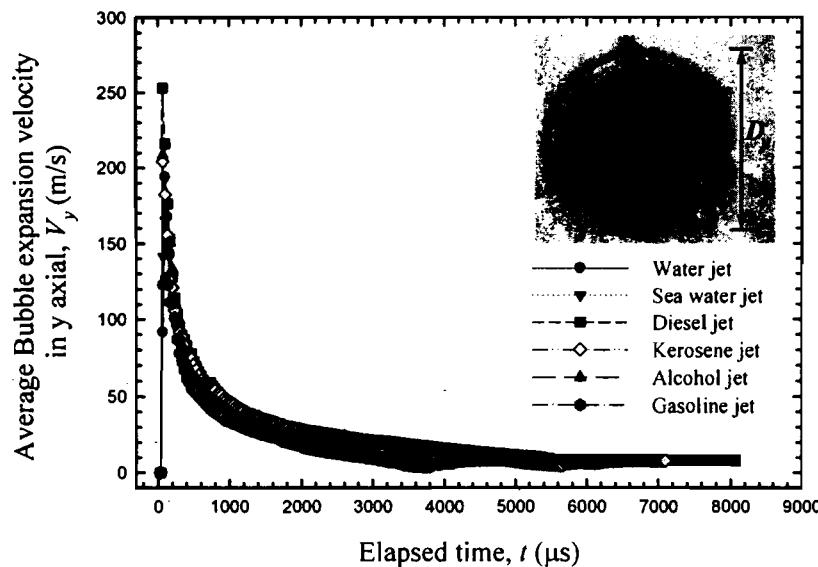
จากภาพที่ 4.45 แสดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble (bubble diameter) (D_x) ของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด คือ ลำพุ่ง น้ำ น้ำทะเล น้ำมันดีเซล กลิโอลีน แอลกอฮอล์ และ น้ำมันแก๊สโซลีน พบร่วมกับ ลำพุ่งจะคือข่าย ขยายตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปโดยจะมีการขยายตัวใหญ่สุดที่เวลา 2,900 μ s, 1,767 μ s,

3,233 μs , 2,967 μs , 1,633 μs และ 1,500 μs ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ในแนวนอน (D_x) เท่ากับ 59.75 mm, 39.75 mm, 65.19 mm, 60.95 mm, 42.78 mm และ 38.87 mm ของลำพูงน้ำ น้ำทะเล น้ำมันดีเซล กลีโอลิซิน แอลกอฮอล์ และ น้ำมันแก๊สโซลีนตามลำดับ จากนั้น bubble จะค่อยๆ ขุนตัวลง ซึ่งการขุนตัวของ bubble จะใช้เวลาในช่วง 2,900-5,467 μs จนถึงขนาดต่ำสุดที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 26.83 mm ของลำพูงน้ำ ลำพูงน้ำ น้ำทะเลจะใช้เวลาในช่วง 1,767-3,867 μs จนถึงขนาดต่ำสุดที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 21.18 mm, ลำพูงน้ำ น้ำทะเลจะใช้เวลาในช่วง 3,233-6,000 μs จนถึงขนาดต่ำสุดที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 31.48 mm, ลำพูงกลีโอลิซินจะใช้เวลาในช่วง 2,933-5,600 μs จนถึงขนาดต่ำสุดที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 25.01 mm, ลำพูง แอลกอฮอล์จะใช้เวลาในช่วง 1,667-4,000 μs จนถึงขนาดต่ำสุดที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 13.11 mm และ ลำพูงน้ำ น้ำมันแก๊สโซลีน จะใช้เวลาในช่วง 1,533-3,733 μs จนถึงขนาดต่ำสุดที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 13.05 mm หลังจากนั้นเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะขยายตัวขึ้นอีกครั้ง และหายไป

จากภาพที่ 4.46 แสดงความเร็วการขยายตัวและหดตัวของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble เฉลี่ย (V_x) ของลำพูงทั้ง 6 ชนิด จากภาพจะพบว่าความเร็วการขยายตัวสูงสุดของลำพูงน้ำมีค่าประมาณ 172.18 m/s ความเร็วการขยายตัวเท่ากับ 20.60 m/s ความเร็วการขุนตัวเท่ากับ 12.66 m/s, น้ำทะเลมีความเร็วการขยายตัวสูงสุดประมาณ 172.63 m/s ความเร็วการขยายตัวเท่ากับ 22.49 m/s ความเร็วการขุนตัวเท่ากับ 8.70 m/s, น้ำมันดีเซลมีความเร็วการขยายตัวสูงสุดประมาณ 252.88 m/s ความเร็วการขุนตัวเท่ากับ 20.16 m/s ความเร็วการขุนตัวเท่ากับ 12.03 m/s, กลีโอลิซินมีความเร็วการขยายตัวสูงสุดประมาณ 89.44 m/s ความเร็วการขยายตัวเท่ากับ 20.54 m/s ความเร็วการขุนตัวเท่ากับ 13.48 m/s, แอลกอฮอล์มีความเร็วการขยายตัวสูงสุดประมาณ 200.58 m/s ความเร็วการขยายตัวเท่ากับ 26.29 m/s ความเร็วขุนตัวเท่ากับ 10.69 m/s และ น้ำมันแก๊สโซลีน มีความเร็วการขยายตัวสูงสุดประมาณ 142.04 m/s ความเร็วการขยายตัวเท่ากับ 25.91 m/s ความเร็วการขุนตัวเท่ากับ 11.38 m/s จะพบว่า ลำพูงน้ำ น้ำมันดีเซล มีความเร็วการขยายตัวสูงสุด รองลงมาคือ แอลกอฮอล์ กลีโอลิซิน น้ำทะเล น้ำ และ น้ำมันแก๊สโซลีน ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกันเป็นคู่ คือ ลำพูงน้ำ น้ำมันดีเซล กับ แอลกอฮอล์ ลำพูงกลีโอลิซิน กับ น้ำทะเล และ ลำพูงน้ำ กับ น้ำมันแก๊สโซลีน พบว่า ความเร็วของลำพูงน้ำมันดีเซล ความเร็วสูงกว่า เป็นผลจากค่าน้ำหนักมวล ไม่เกิดกุล และ ความความหนืดจลน์ มีค่าสูงกว่า ลำพูง แอลกอฮอล์ ส่วน ลำพูงกลีโอลิซิน มีความเร็วสูงกว่า น้ำทะเล เป็นผลจากน้ำหนักมวล ไม่เกิดกุล มีค่าสูงกว่า และ ลำพูงน้ำ มีความเร็วสูงกว่า น้ำมันแก๊สโซลีน เป็นผลมาจากการค่าความหนาแน่น และ ความหนืดจลน์ ที่มีค่ามากกว่า



ภาพที่ 4.47 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble (bubble diameter) (D_y) ของลำพูงหัว 6 ชนิด



ภาพที่ 4.48 ความเร็วการขยายตัวและลดตัวของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble เคลื่อน (V_y) ของลำพูงหัว 6 ชนิด

จากภาพที่ 4.47 แสดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble (bubble diameter) (D_y) ของลำพูงหัว 6 ชนิด คือ น้ำ น้ำทะเล น้ำมันดีเซล กลีโอลิน แอลกอฮอล์ และ น้ำมันแก๊สโซลีน พบว่า ลำพูงจะค่อยๆ ขยายตัวเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาผ่านไป โดยจะมีการขยายตัวใหญ่สุดที่เวลา 2,867 μ s, 1,800 μ s,

3,267 μs , 2,967 μs , 1,867 μs และ 1,567 μs ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ในแนวนอน (D_x) เท่ากับ 58.74 mm, 38.70 mm, 65.69 mm, 61.20 mm, 43.58 mm และ 36.33 mm ของลำพูงน้ำ น้ำทะเล น้ำมันดีเซล ก๊าซโอดิจีน แอログอิชอล์ และ น้ำมันแก๊สโซลีนตามลำดับ จากนั้น bubble จะค่อยๆ ยุบตัวลง ซึ่งการยุบตัวของ bubble จะใช้เวลาในช่วง 2,867-5,467 μs จนถึงขนาดต่ำสุดที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 30.63 mm ของลำพูงน้ำ ลำพูงน้ำทะเล จะใช้เวลาในช่วง 1,767-3,867 μs จนถึงขนาดต่ำสุดที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 20.13 mm, ลำพูงน้ำมันดีเซล จะใช้เวลาในช่วง 3,233-6,000 μs จนถึงขนาดต่ำสุดที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 31.48 mm, ลำพูงก๊าซโอดิจีนจะใช้เวลาในช่วง 2,933-5,600 μs จนถึงขนาดต่ำสุดที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 24.77 mm ลำพูง แอログอิชอล์จะใช้เวลาในช่วง 1,667-4,000 μs จนถึงขนาดต่ำสุดที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 18.45 mm และลำพูงน้ำมันแก๊สโซลีนจะใช้เวลาในช่วง 1,533-3,733 μs จนถึงขนาดต่ำสุดที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 13.05 mm หลังจากนั้นเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะขยายตัวขึ้นอีกรั้ง และหายไป

จากภาพที่ 4.48 แสดงความเร็วการขยายตัวและหดตัวของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble เฉลี่ย (V_s) ของลำพูงทั้ง 6 ชนิด พบร่วมกันว่าความเร็วการขยายตัวสูงสุดของลำพูงน้ำมีค่าประมาณ 193.71 m/s ความเร็วการขยายตัวเท่ากับ 20.48 m/s ความเร็วการยุบตัวเท่ากับ 10.67 m/s, น้ำทะเลมีความเร็วการขยายตัวสูงสุดประมาณ 164.78 m/s ความเร็วการขยายตัวเท่ากับ 21.50 m/s ความเร็วการยุบตัวเท่ากับ 8.75 m/s, น้ำมันดีเซลมีความเร็วการขยายตัวสูงสุดประมาณ 252.88 m/s ความเร็วการขยายตัวเท่ากับ 20.10 m/s ความเร็วการยุบตัวเท่ากับ 12.36 m/s, ก๊าซโอดิจีนมีความเร็วการขยายตัวสูงสุดประมาณ 204.02 m/s ความเร็วการขยายตัวเท่ากับ 20.62 m/s ความเร็วการยุบตัวเท่ากับ 13.66 m/s, แอログอิชอล์มีความเร็วการขยายตัวสูงสุดประมาณ 208.60 m/s ความเร็วการขยายตัวเท่ากับ 23.34 m/s ความเร็วการยุบตัวเท่ากับ 11.60 m/s และ น้ำมันแก๊สโซลีนมีความเร็วการขยายตัวสูงสุดประมาณ 126.69 m/s ความเร็วการขยายตัวเท่ากับ 23.18 m/s ความเร็วการยุบตัวเท่ากับ 10.58 m/s จะพบร่วมกันว่า ลำพูงน้ำมันดีเซลมีความเร็วการขยายตัวสูงสุด รองลงมาคือ แอログอิชอล์ ก๊าซโอดิจีน น้ำทะเล และน้ำมันแก๊สโซลีน ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกันเป็นคู่ ก็อ ลำพูงน้ำมันดีเซลกับแอlogicอิชอล์ ลำพูง ก๊าซโอดิจีนกับน้ำ และลำพูงน้ำทะเลกับน้ำมันแก๊สโซลีน พบร่วมกันว่า ความเร็วของลำพูงน้ำมันดีเซล ความเร็วสูงกว่าเป็นผลจากค่าน้ำหนักมวลโนเดกูลและความหนืดจลน์มีค่าสูงกว่าลำพูง แอlogicอิชอล์ ส่วนลำพูงก๊าซโอดิจีนมีความเร็วสูงกว่าน้ำมันแก๊สโซลีน เป็นผลจากน้ำหนักมวลโนเดกูลและความหนืด จลน์มีค่าสูงกว่า และลำพูงน้ำทะเลมีความเร็วสูงกว่าน้ำมันแก๊สโซลีนเป็นผลมาจากการค่าความตึงผิว และความหนืดจลน์ที่มีค่ามากกว่า

ตารางที่ 4.4 สรุปผลการทดลองด้วยเล็กน้อยและคำพูดความเร็วต่างๆ ในน้ำ

Liquid type	Jet			Bubble in normal view				Bubble in axial view						
	V _{a,j,m} (m/s)	L _{j,m} (mm)	L _{b,m} (mm)	V _{b,e} (m/s)	V _{b,c} (m/s)	D _{d,m} (mm)	V _{d,e} (m/s)	V _{d,c} (m/s)	D _{x,m} (mm)	D _{y,m} (mm)	V _{x,e} (m/s)	V _{x,c} (m/s)	V _{y,e} (m/s)	V _{y,c} (m/s)
Water	374.24	at t = 374.24 μs	47.88 at t = 1,167 μs	52.54 at t = 1,700 μs	41.02 at t = 1,167 μs	11.03 at t = 2,600 μs	57.34 at t = 22.05	22.05 at t = 2,900 μs	13.50 at t = 2,867 μs	59.75 at t = 2,900 μs	58.74 at t = 2,867 μs	20.60 at t = 2,900 μs	12.66 at t = 2,867 μs	20.48 at t = 2,900 μs
Sea water	195.00	at t = 2,100 μs	36.99 at t = 1,067 μs	41.00 at t = 34.66	34.66 at t = 10.10	10.10 at t = 2,767 μs	48.17 at t = 17.40	17.40 at t = 1,767 μs	15.05 at t = 1,767 μs	39.75 at t = 1,767 μs	38.70 at t = 1,800 μs	22.49 at t = 1,800 μs	8.70 at t = 1,800 μs	21.50 at t = 1,800 μs
Diesel	576.41	at t = 1,767 μs	61.93 at t = 1,100 μs	54.23 at t = 56.30	56.30 at t = 11.34	11.34 at t = 1,867 μs	36.06 at t = 19.31	19.31 at t = 3,233 μs	6.84 at t = 3,261 μs	65.19 at t = 3,233 μs	65.69 at t = 3,261 μs	20.16 at t = 3,233 μs	12.03 at t = 3,261 μs	20.10 at t = 3,233 μs

ตารางที่ 4.4 สรุปผลการทดลองคุณลักษณะพิพากษาเมร์เวสตูในน้ำ (ต่อ)

Liquid type	Jet			Bubble in normal view						Bubble in axial view					
	$V_{aj,m}$ (m/s)	$L_{j,m}$ (mm)	$L_{b,m}$ (mm)	$V_{b,e}$ (m/s)	$V_{b,c}$ (m/s)	$D_{d,m}$ (mm)	$V_{d,e}$ (m/s)	$V_{d,c}$ (m/s)	$D_{x,m}$ (mm)	$D_{y,m}$ (mm)	$V_{x,e}$ (m/s)	$V_{x,c}$ (m/s)	$V_{y,e}$ (m/s)	$V_{y,c}$ (m/s)	
Kerosene	412.95	37.85 at t = 2,300 μ s	35.84 at t = 1,500 μ s	23.89 at t = 2,333 μ s	10.28 at t = 2,333 μ s	52.18 at t = 2,333 μ s	22.36 at t = 2,333 μ s	13.57 at t = 2,967 μ s	60.95 at t = 2,967 μ s	61.20 at t = 2,967 μ s	20.54 at t = 2,967 μ s	13.48 at t = 2,967 μ s	20.62 at t = 2,967 μ s	13.66 at t = 2,967 μ s	
Alcohol	292.51	37.85 at t = 2,267 μ s	39.99 at t = 1,633 μ s	24.48 at t = 1,633 μ s	10.95 at t = 2,633 μ s	51.90 at t = 2,633 μ s	19.71 at t = 2,633 μ s	13.23 at t = 1,633 μ s	42.78 at t = 1,633 μ s	43.58 at t = 1,867 μ s	26.19 at t = 1,867 μ s	10.69 at t = 1,867 μ s	23.34 at t = 1,867 μ s	11.60 at t = 1,867 μ s	
Gasoline	111.84	28.10 at t = 2,500 μ s	25.80 at t = 1,700 μ s	15.17 at t = 1,700 μ s	7.62 at t = 2,633 μ s	48.46 at t = 2,633 μ s	18.40 at t = 2,633 μ s	12.23 at t = 1,500 μ s	38.87 at t = 1,500 μ s	36.33 at t = 1,567 μ s	25.91 at t = 1,567 μ s	11.38 at t = 1,567 μ s	23.18 at t = 1,567 μ s	10.58 at t = 1,567 μ s	

หมายเหตุ

$V_{aj,m}$ คือ ความเร็วสูงสุดของลำพุ่ง (m/s), (Maximum average jet velocity)

$L_{j,m}$ คือ ระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของลำพุ่ง (mm), (Maximum jet penetration distance)

$L_{b,m}$ คือ ระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของ bubble (mm), (Maximum penetration distance of bubble)

$V_{b,e}$ คือ ความเร็วการขยายตัวเฉลี่ยของระยะการเคลื่อนที่ของ bubble (m/s), (Average expansion velocity of bubble penetration)

$V_{b,c}$ คือ ความเร็วการหดตัวเฉลี่ยของระยะการเคลื่อนที่ของ bubble (m/s), (Average contraction velocity of bubble penetration)

$D_{d,m}$ คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่ที่สุดของ bubble (mm), (Maximum bubble diameter)

$V_{d,e}$ คือ ความเร็วการขยายตัวเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble (m/s), (Average expansion velocity of bubble diameter)

$V_{d,c}$ คือ ความเร็วการหดตัวเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble (m/s), (Average contraction velocity of bubble diameter)

$D_{x,m}$ คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่ที่สุดของ bubble ในแนวแกน x จากมุมมองแนว (mm), (Maximum bubble diameter in x axial)

$D_{y,m}$ คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่ที่สุดของ bubble ในแนวแกน y จากมุมมองแนว (mm), (Maximum bubble diameter in y axial)

$V_{x,e}$ คือ ความเร็วการขยายตัวเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ในแนวแกน x จากมุมมองแนว (m/s), (Average expansion velocity of bubble diameter in x axial)

$V_{x,c}$ คือ ความเร็วการหดตัวเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ในแนวแกน x จากมุมมองแนว (m/s), (Average contraction velocity of bubble diameter in x axial)

$V_{y,e}$ คือ ความเร็วการขยายตัวเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ในแนวแกน y จากมุมมองแนว (m/s), (Average expansion velocity of bubble diameter in y axial)

$V_{y,c}$ คือ ความเร็วการหดตัวเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ในแนวแกน y จากมุมมองแนว (m/s), (Average contraction velocity of bubble diameter in y axial)

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาคุณลักษณะของลำพุ่งของเหลวความเร็วสูงที่มีดีในอากาศและในน้ำ ใน การผลิตลำพุ่งความเร็วสูงในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิคพิเศษที่เรียกว่า Impact driven method จากชุด ทดสอบ Horizontal Single Stage Powder Gun (HSSPG) โดยใช้ความเร็วของกระสุนปืนในการ กระแทกประมาณ $950 \pm 30 \text{ m/s}$ ซึ่งลำพุ่งจะถูกฉีดออกมาจากหัวฉีดที่มีลักษณะทรงกรวย (conical nozzle) บุบ 30° ขนาดรู出口 (orifice) เท่ากับ 0.7 mm โดยพฤติกรรมของลำพุ่งที่เกิดขึ้นนั้นถูก อนิบาลจากการถ่ายภาพใน 3 แบบ คือ 1) การถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอด้วยความเร็วสูง (High-speed digital video camera) ร่วมกับการถ่ายภาพด้วยเทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) 2) การติดตั้ง กล้องวิดีโอด้วยความเร็วสูงในบุบของปืนโดยไม่มีการติดตั้งระบบการถ่ายภาพแบบชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) 3) การติดตั้งกล้องวิดีโอด้วยความเร็วสูงในแนวแกน โดยไม่มีการติดตั้งระบบการ ถ่ายภาพแบบชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ซึ่งจากภาพนั้นจะทำให้เข้าใจและทราบถึงพฤติกรรม ต่างๆ ของลำพุ่ง ได้ชัดเจน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 คุณลักษณะของลำพุ่งของเหลวความเร็วสูงที่มีดีในอากาศ

จากการถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอด้วยความเร็วสูงร่วมกับการถ่ายภาพด้วยเทคนิคชาโคว์ กราฟ (Shadowgraph) พบว่าลำพุ่งจะถูกฉีดออกมาจากหัวฉีดและพบคลื่นกระแทก (shock wave) ซึ่ง เกิดจากลำพุ่งและ Mach wave รอบๆ ลำพุ่งอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งการเคลื่อนที่ของลำพุ่งจะเคลื่อนที่ด้วย ความเร็วเหนือเสียง ดังจะสังเกตเห็นคลื่นกระแทก (shock wave) ตลอดการเคลื่อนที่ผ่านห้อง ทดสอบ นอกจากนี้จะสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงมุมของคลื่นกระแทก (change in shock angle) ซึ่ง บ่งบอกว่ามีลำพุ่งที่เกิดจากการกระแทกของกระสุนเพียงหนึ่งครั้งสามารถทำให้เกิดลำพุ่งมากกว่า หนึ่งลำพุ่งหรือเกิดการฉีดแบบชั้น (pulse) โดยลำพุ่งแรกมีความเร็วลดลงมากเมื่อทำให้ลำพุ่งที่สอง สามารถแข่งลำพุ่งตัวแรกจึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมุมของคลื่นกระแทก (shock wave) และยัง พบรการแตกตัว การระเหย กล้ายเป็นละอองและไอบริเวณรอบๆ ลำพุ่งอย่างชัดเจน ซึ่งจากการ ถ่ายภาพสามารถประมาณความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่งตลอดความยาว 250 mm จะพบว่าความเร็วสูงสุด ของลำพุ่งน้ำ, น้ำทะเล, น้ำมันดิเซล, ก๊าซโซลิน, แอลกอฮอล์ และ น้ำมันแก๊สโซลิน มีค่าประมาณ

1,669.03 m/s, 1,514.17 m/s, 1,453.95 m/s, 1,264.68 m/s, 1,548.58 m/s และ 1,634.62 m/s ตามลำดับ

5.1.2 คุณลักษณะของลำพูงของเหลวความเร็วสูงที่ฉีดในน้ำ

จากการถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูงร่วมกับการถ่ายภาพด้วยเทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) พบว่า จะเห็นการเกิดคลื่นกระแทก (shock wave) ภายในน้ำ จากนั้นจะเกิด water vapor bubble เนื่องจากการแตกตัวเป็นละออง (atomization) การกลายเป็นไอ (vaporization) ของลำพูง การขยายตัว การบุบตัวของลำพูง การเคลื่อนที่ของ bubble การเคลื่อนที่ของลำพูง โดยก่อนที่ bubble จะบุบตัวลดลงเกือบจะถึงค่าต่ำสุดจะเกิด compressed wave ขึ้นและเมื่อ bubble บุบตัวลดลงต่ำสุด จะทำให้เกิด rebound shock wave เนื่องจากการบุบตัวของ bubble จะทำให้เกิดความดันสูงขึ้นในทันทีทันใดภายใน bubble ปรากฏการณ์สามารถอธิบายได้โดยปรากฏการณ์ของความวิเทชั่น (cavitation) ซึ่งจากการถ่ายภาพสามารถประมาณความเร็วเฉลี่ยของลำพูงสูงสุดของลำพูงน้ำ น้ำทะเล น้ำมันดีเซล กลีโอลซีน แอลกอฮอล์ และ น้ำมันแก๊สโซลีน มีค่าประมาณ 374.24 m/s, 195.00 m/s, 576.41 m/s, 412.95 m/s, 292.51 m/s และ 111.84 m/s ตามลำดับ

จากการถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูงโดยไม่ใช้เทคนิคชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) พบว่า จากการสังเกตในมุมมองนี้จะเป็นตัวสนับสนุนผลที่ได้จากการถ่ายภาพแบบชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) ซึ่งจากการที่ได้นั้นจะช่วยในการอธิบายกลไกการเกิด bubble การขยายตัว การบุบตัว และการหายไปของ bubble จะสังเกตเห็นได้ชัดเจนและเข้าใจง่าย แต่เนื่องจากไม่ใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) จึงทำให้ไม่เห็นคลื่นกระแทก (shock wave) และ rebound shock wave ในน้ำ

จากการถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูงในมุมมองแนวแกน โดยไม่ใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) จากการสังเกตในมุมมองนี้ การเกิด bubble การขยายตัว การบุบและการหายไปของ bubble จะสังเกตเห็นได้ชัดเจนและเข้าใจง่ายขึ้น เนื่องจากไม่ใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบชาโคว์กราฟ (Shadowgraph) การเกิดคลื่นกระแทก (shock wave) ในน้ำและ rebound shock wave เมื่อ bubble ลดขนาดลงต่ำสุดจะไม่สามารถสังเกตเห็นได้ ซึ่งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble มีการขยายตัวใหญ่สุด ในแนวนอน (D_x) เท่ากับ 59.75 mm, 39.75 mm, 65.19 mm, 60.95 mm, 42.51 mm และ 38.38 mm ที่เวลา 2,900 μ s, 1,767 μ s, 3,233 μ s, 2,967 μ s, 1,633 μ s และ 1,500 μ s และในแนวดิ่ง (D_y) เท่ากับ 58.74 mm, 38.70 mm, 65.65 mm, 61.20 mm, 43.05 mm และ 36.33 mm ที่เวลา 2,867 μ s, 1,800 μ s, 3,267 μ s, 2,967 μ s, 1,867 μ s และ 1,567 μ s ของลำพูงน้ำ, น้ำทะเล, น้ำมันดีเซล, กลีโอลซีน, แอลกอฮอล์ และ น้ำมันแก๊สโซลีนตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เวลาทำการทดลองจะต้องรอบคอบและระมัดระวังเป็นพิเศษ เพราะวัสดุและอุปกรณ์นั้นมีอันตรายมาก โดยเฉพาะคินเป็นที่ต้องวางให้ห่างจากประกายไฟ

5.2.2 ควรที่จะผลิตกระสุนปืนให้ได้ขนาดและน้ำหนักที่เท่ากันทั้งหมด เพราะว่ามีผลกับความเร็วที่ผลิตได้

5.2.3 ควรที่จะมีการศึกษาเกี่ยวกับชุดทดลองให้มีการยิงได้อย่างต่อเนื่องและลดเวลาในการประกอบชุดยิงให้สั้นลง

5.2.4 ควรมีการศึกษาเกี่ยวกับความคันกระแทกของลำพูงให้มากขึ้น เพื่อที่จะได้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้จริงกับการเจาะหรือตัดโครงสร้างได้ทันเด

เอกสารอ้างอิง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Methven, T.J. and Fairhead, B. "A correlation between rain erosion of perspex specimens in flight and on a ground rig", Wear. 2(6): 498, 1959.
- [2] Methven, T.J. and Fairhead, B. "A correlation between rain erosion of perspex specimens in flight and on ground rig", Wear. 3(6): 485, 1960.
- [3] King, R.B. "Rain erosion IV An assessment of various materials", Wear. 4(4): 328, 1961.
- [4] Springer, G.S. Erosion by liquid impact. New York: Wiley & Sons, 1976.
- [5] Adler, W.F. and Hooker S.V. "Rain erosion mechanisms in brittle materials", Wear. 50(1): 11-38, 1978.
- [6] Zwaag, V.D. and Field, J.E. "Rain erosion damage in brittle materials", Eng Fracture Mech. 17(4): 367-379, 1983.
- [7] Adler, W.F. "Water drop impact modeling", Wear. 186-187(2): 341-351, 1995.
- [8] Westmark, C. and Lawless, G.W. "A discussion of rain erosion testing at the United States Air Force rain erosion test facility", Wear. 186-187(2): 384-387, 1995.
- [9] Lesser, M. and Field, J. "Studies in shock waves, liquid impact, jets and cavitation", Proc 1st ISSW. 61-72. Colorado, USA: 1992.
- [10] Bourne, N.K. and Field; J.E. "A high-speed photographic study of cavitation damage", J App Physics. 78: 4423-4427, 1995.
- [11] Bowden, F.P. and Field, J.E. "The brittle fracture of solids by liquid-impact, by solid impact and by shock", Proc Royal Soc London. 282: 331-352, 1964.
- [12] Reichman, J.M. and Cheung, J.B. "An oscillating water jet deep-karfing technique", Int J Rock mech. Min. Sci. & Geomech. 15: 135-144, 1978.
- [13] Vijay, M.M. and Brierley, W.H. "Cutting cleaning and fragmentation of materials with high pressure liquid jets", Proc 1st U.S. water jet conference. 272-288. Berkeley University of California, USA: 1981.
- [14] 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.
- [15] Shi, H.H. and Dear, J.P. "Oblique High-speed liquid-solid impact", JSME Int J. Series I: 35, 1992.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [16] 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.
- [17] Yamauchi, Y and et al. "Suitable region of high-speed submerged water jets for cutting and peening", JSME Int J. Series B 38: 31–38, 1995.
- [18] Lesser, M. "Thirty years of liquid impact research: a tutorial review", Wear. 186-187: 28–34, 1995.
- [19] Obara, T., Bourne, N.K. and Field, J.E. "Liquid-jet impact on liquid and solid surfaces", Wear. 186-187(2): 388-394, 1995.
- [20] Shi, H.H., Takayama, K. and Nagayasu, N. "The Measurement of impact pressure and solid surface response in liquid-solid impact up to hypersonic range". Wear. 186-187: 352-359, 1995.
- [21] Nakahira, T. and et al. "A study of shock wave generation around high pressure fuel spray in a diesel engine", Proc 2nd ISSW. 1271–1276. Colorado, USA:,1992.
- [22] Shi, H.H., Takayama, K. and Onodera, O. "Supersonic diesel fuel injection through a single-hole nozzle in a compact gas gun (part 2)", JSME Int J. Series B 37(3): 509-516, 1994.
- [23] Akiyama, H. and et al. "Study of diesel spray combustion and ignition using high-pressure fuel injection and a micro-hole nozzle with a rapid compression machine: improvement of combustion using low cetane number fuel", JSME Review 19: 319–327, 1998.
- [24] Lee, S. and et al. "Effects of diesel fuel characteristics on spray and combustion in a diesel engine", JSME. 23(4): 407-414, 2002.
- [25] Shimotani, K. and et al. "Characteristics of gasoline in-cylinder direct injection engine", JSME. 17(3): 267-272, 1996.
- [26] Kamura, H. and Takada, K. "Development of in-cylinder gasoline direct injection engine", JSME. 19(2): 175-180, 1998.
- [27] Alle, J. and Hargrave, G. "Fundamental study of in-nozzle fluid flow and its effect on liquid jet break-up in Gasoline Direct injectors", ILASS Europ. 2000: I4.2-I4.5, 2000.

ເອກສາຮ້າງອີງ (ຕ່ອ)

- [28] Lee, K.H., Lee, C.H. and Lee, C.S. “An experimental study on the spray behavior and fuel distribution of GDI injectors using the entropy analysis and PIV method”, Fuel 83(7-8): 971-980, 2004.
- [29] Billig, F. S. “Research on supersonic combustion”, J Propulsion and Power. 9(4): 499–514, 1993.
- [30] Ferri, A. “Review of problems in application of supersonic combustion”, J Royal Aero Soc 68: 575–597, 1964.
- [31] Rubins, P.M. “Review of shock-induced supersonic combustion research and hypersonic applications”, J Propulsion and Power. 10(5): 593–601, 1994.
- [32] Adelberg, M. “Breakup rate and penetration of a liquid jet in a gas stream”, AIAA J. 5(8): 1408–1415, 1967.
- [33] Catton, I., Hill, D.E. and McRae, R.P. “Study of liquid jets penetration in a hypersonic stream”, AIAA J. 6(11): 2084–2089, 1968.
- [34] Kolpin, M.A., Horn, K.P. and Reichenbach, R.E. “Study of penetration of a liquid injection into a supersonic flow”, AIAA J. 6(5): 853–858, 1968.
- [35] Horn, K.P. and Reichenbach, R.E. “Further experiments on spreading References 205 of liquids injected into a supersonic flow”, AIAA J. 7(2): 358–359, 1969.
- [36] Edelman, R.B., Schmotolocha, S. and Slutsky, S. “Combustion of liquid hydrocarbons in a high-speed air stream”, AIAA J. 9(7): 1357–1364, 1971.
- [37] Bowden, F.P. and Brunton, J.H. “Damage to solids by liquid impact at supersonic speeds”, Nature. 181: 873-875, 1958.
- [38] Bowden, F.P. and Brunton, J.H. “The deformation of solids by liquid impact at supersonic speeds”, Proc Royal Society London. 263 (series A): 433–450, 1961.
- [39] Ohki, T. and et al. “Experimental application of Pulsed Ho: YAG laser-induced liquid jet as a novel device for rigid neuroendoscope”, Laser Surg Med. 34: 227, 2004.
- [40] Nakagawa, A. and et al. “Holmium: YAG laser-induced liquid jet knife: possible novel method for dissection”, Lasers Surg Med. 31: 125, 2002.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [41] Hirono, T. and et al. "Holmium YAG laser-induced liquid jet dissector: A novel prototype device for dissection organs without impairing vessels", Minim Invas Neurosurg. 46: 121, 2003.
- [42] Iwasaki, M. "Application of Water Jet for Drilling Rocks Undersea", Turbomachinery. 17(12): 761-767, 1989. (In Japanese)
- [43] Soyama H. and et al. "High-Speed Observation of Ultrahigh-Speed Submerged Water Jets", Experimental Thermal and Fluid Science. 12: 411-4162, 1996.
- [44] Pianthong K. and et al. "Supersonic liquid jets: Their generation and shock wave characteristics", Shock Waves. 11: 457–466, 2002.
- [45] Pianthong K. and et al. "Characteristics of impact driven supersonic liquid jets", Experimental Thermal and Fluid Science. 27: 589–598, 2003.
- [46] Matthujak A. and et al. "High speed jet formation by impact acceleration method", Shock Waves. 16: 405-419, 2007.
- [47] Ohtani, K. and et al. "Experimental study of underwater rock drilling using a pulsed Ho : YAG laser-induced jets", Shock wave. 19: 403-412, 2009.
- [48] วิระพันธ์ สีหานาม และคณะ. "การจำลองคุณลักษณะเบื้องต้นของลำพูงเชือเพลิงความเร็วสูง", การประชุมวิชาการเครื่อข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21. 2550.
- [49] วุฒิชัย สิทธิวงศ์ และคณะ. "การปรับเทียบชุดทดลองสำหรับการศึกษาการกระแทกความเร็วสูง", การประชุมวิชาการเครื่อข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22. 2551.
- [50] คณะอาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ฟิสิกส์ 1. กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
- [51] Patrick H. Oosthuizen and William E.Carscallen. Compressible fluid flow. USA : McGRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS, 1997.
- [52] Optaminerals Inc. Waterjet cutting media, <http://www.optaminerals.com/Water-Jet-Cutting>. มกราคม, 2553.
- [53] Hayes & stolz. Laser and water jet cutting service. <http://www.hayes-stolz.com/lwjpages/lwjhome.html>. มกราคม, 2553.

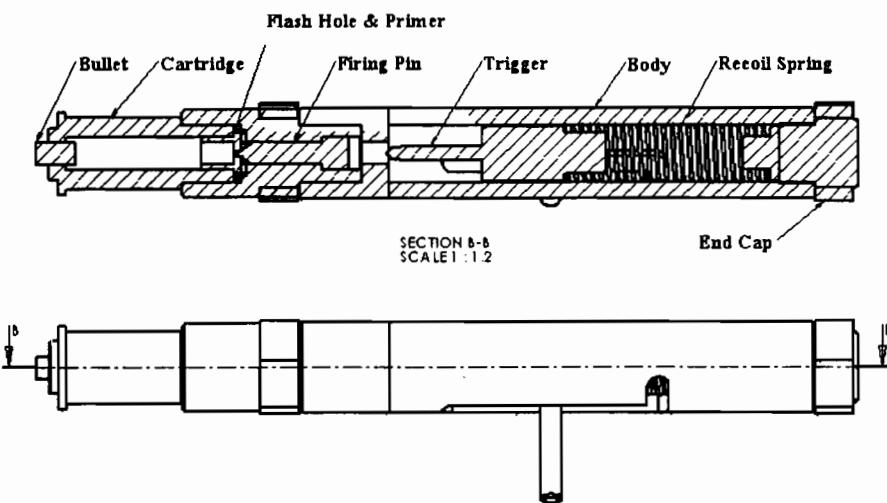
เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [54] Advanced clean production. Technology application. http://www.acp-micron.com/5699_CO2-Schneestrahl-Reinigung.html?lang=1. มกราคม, 2553.
- [55] Laboratorynews. Needle free injections making their point. <http://www.labnews.co.uk/features/needle-free-injections-making-their-point/>. มกราคม, 2553.
- [56] Planebuzz. Oil goes on a tear jet fuel follows. http://www.planebuzz.com/2008/06/oil_goes_on_a_ear_jet_fuel_fo.html. มกราคม, 2553.
- [57] The engineering toolbox. Tools and basic information for design, engineering and constructions of technical applications. <http://www.engineeringtoolbox.com>. เมษายน, 2555.

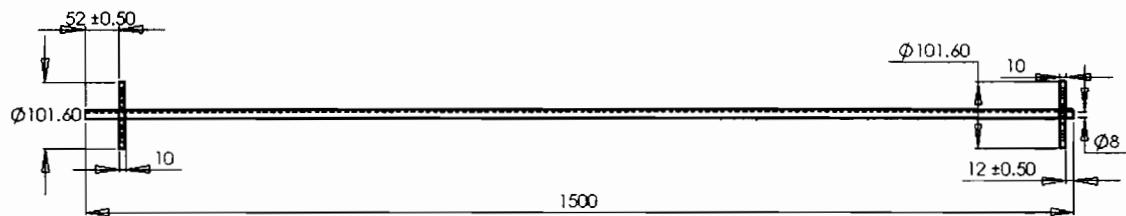
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

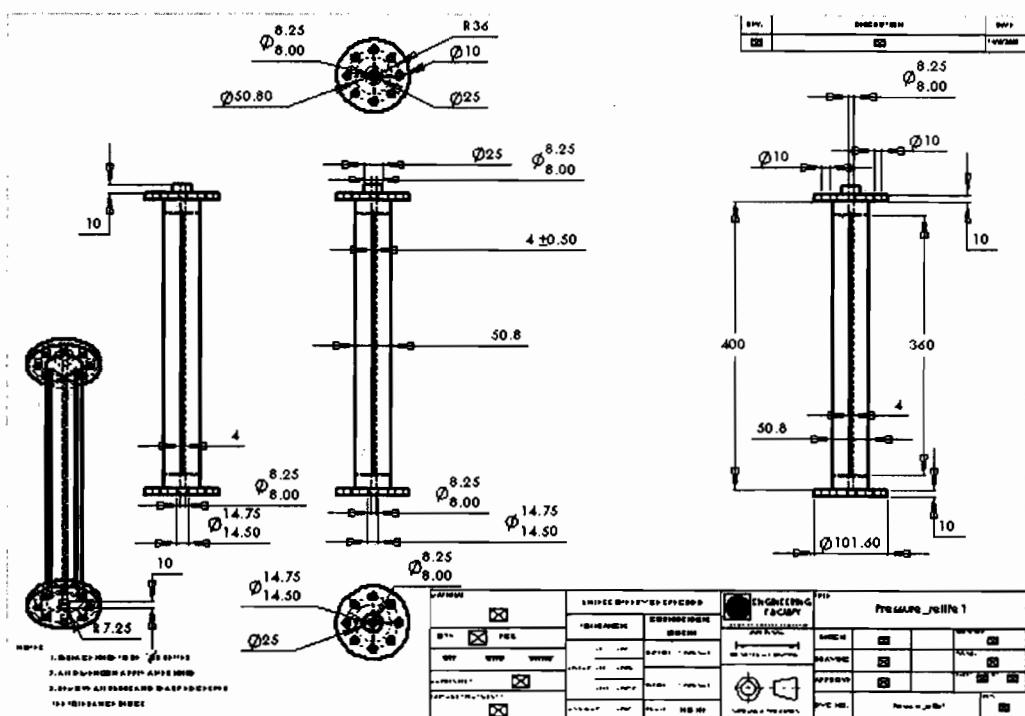
การออกแบบชุดทดลอง



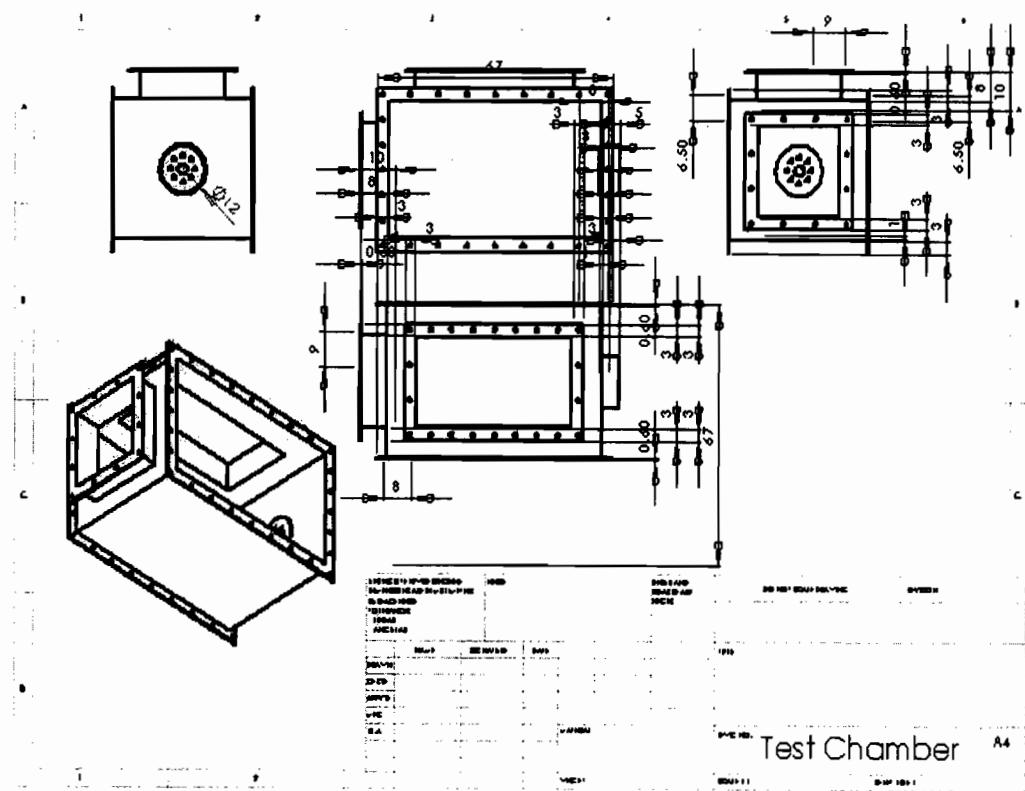
ภาพที่ ก.1 ชุดปล่อยกระสุนปืน (launcher หรือ powder gun)



ภาพที่ ก.2 ท่อส่งกระสุนปืน (launch tube)



ภาพที่ ก.3 ท่อระบายน้ำดัน (pressure relief section)



ภาพที่ ก.4 ห้องทดสอบ (test chamber)

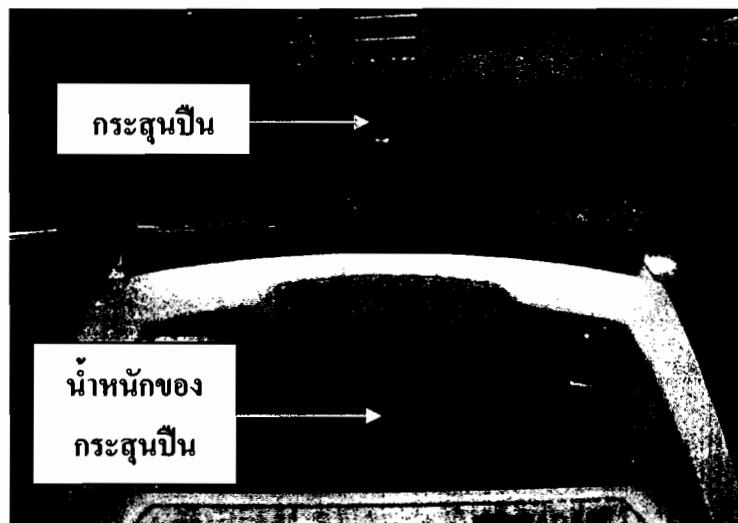
ภาคผนวก ข
ขั้นตอนการทดลองยิงกระสุนปืนความเร็วสูง

ข.1 วิธีทำการทดลองยิงกระสุนปืนความเร็วสูง

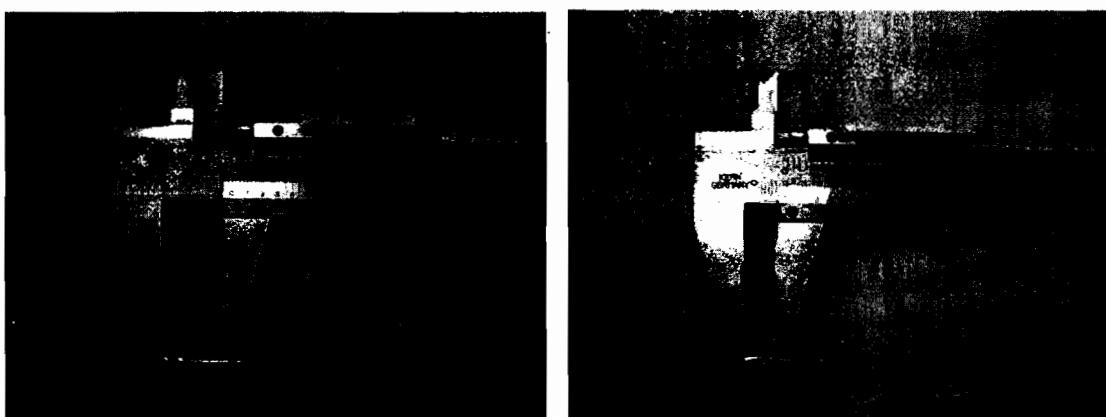
การทดลองยิงกระสุนปืนความเร็วสูงเพื่อที่จะผลิตลำพูงความเร็วสูงนั้นในแต่ละขั้นตอน การทดลองผู้ทำการทดลองต้องคำนึงถึงความความปลอดภัยและความละเอียดรอบคอบ ดังนั้นในการทดลองแต่ละครั้งจึงมีขั้นตอนดังนี้

ข.1.1 การชั่งมวลของกระสุนปืนและการวัดขนาดของสูกกระสุนปืน

เนื่องจากมวลของกระสุนปืนและขนาดของลูกกระสุนปืนที่แตกต่างกันนั้นอาจมีผลทำให้ความเร็วของกระสุนปืนที่ได้จากการยิงมีความแตกต่างกันนั้นในการทดลองแต่ละครั้งจึงต้องมีการชั่งและการวัดกระสุนปืนทุกรอบ ดังภาพที่ ข.1 และ ข.2



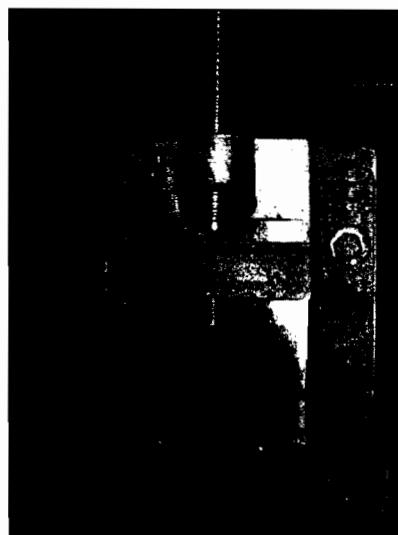
ภาพที่ ข.1 ชั่งมวลของกระสุนปืน



ภาพที่ ข.2 วัดขนาดของกระสุนปืน

ข.1.2 การบรรจุกระสุนปืน

เมื่อทำการวัดขนาดและชั่งมวลของกระสุนปืนแล้ว ต่อไปคือขั้นตอนในการบรรจุกระสุนปืนโดยในการบรรจุไม่สามารถบรรจุกระสุนปืนเข้ากับปลอกกระสุนได้โดยง่าย จึงต้องมีเครื่องช่วยบรรจุกระสุนปืนโดยการอัดกระสุนปืนให้เหลือพื้นจากปลอกกระสุน 5 mm. ดังภาพที่ ข.3



(a) ก่อนการบรรจุกระสุนปืน

(b) หลังจากการบรรจุกระสุนปืน

ภาพที่ ข.3 บรรจุกระสุนปืน

ข.1.3 การบรรจุดินปืน

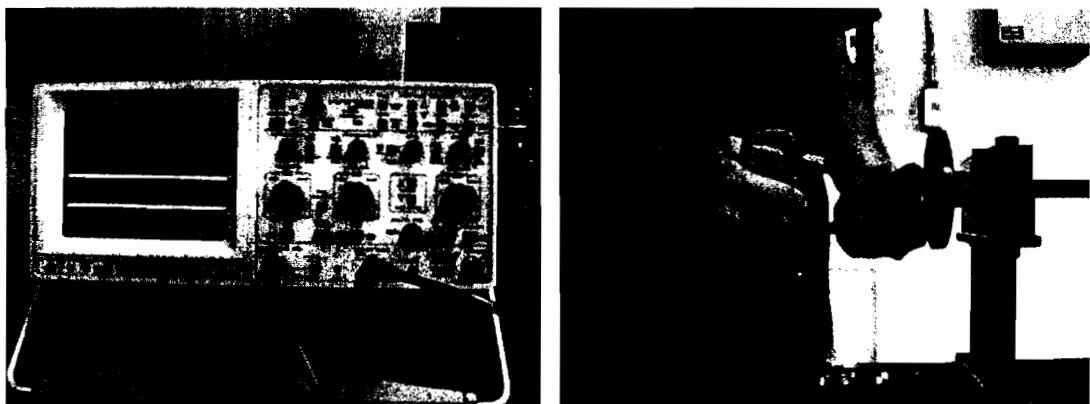
หลังจากการบรรจุกระสุนปืนเสร็จแล้วจะเป็นขั้นตอนการบรรจุดินปืนโดยการซั่งด้วยเครื่องซั่งคิจitol และไส้ไฟรเมอร์ (แก๊ป) โดยการติดคิวบyleป่าใส ดังภาพที่ ข.4



ภาพที่ ข.4 บรรจุดินปืนและติดไฟรเมอร์

ข.1.4 การเช็คสัญญาณเดเซอร์ และ ออสซิลโลสโคป (oscilloscope)

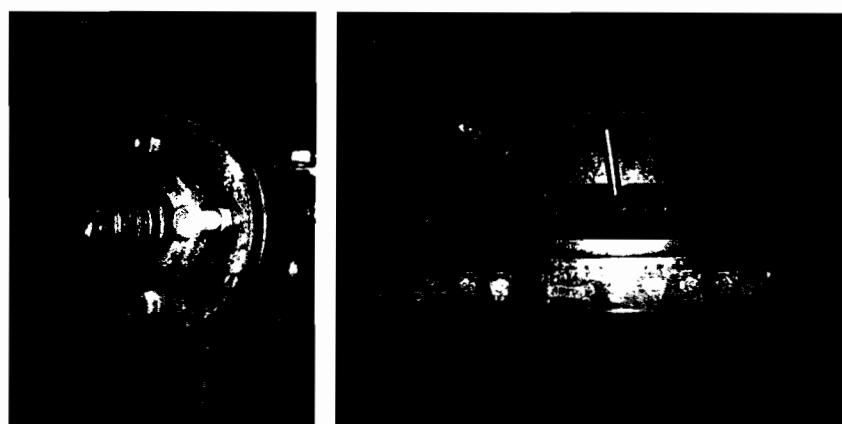
เมื่อเสร็จขั้นตอนต่างๆที่ผ่านมาแล้วก่อนที่จะทำการประกอบชุดปืนเข้ากับชุดทดลองต้องมีการเช็คสัญญาณเดเซอร์ และ ออสซิลโลสโคป (oscilloscope) เพื่อทุกครั้งว่าเครื่องทำงานหรือไม่โดยการยิงกระสุนด้วยปืนลม ดังภาพที่ ข.5



ภาพที่ ข.5 เช็คสัญญาณเดเซอร์ และ ออสซิลโลสโคป (oscilloscope)

ข.1.5 ประกอบชุดปืน

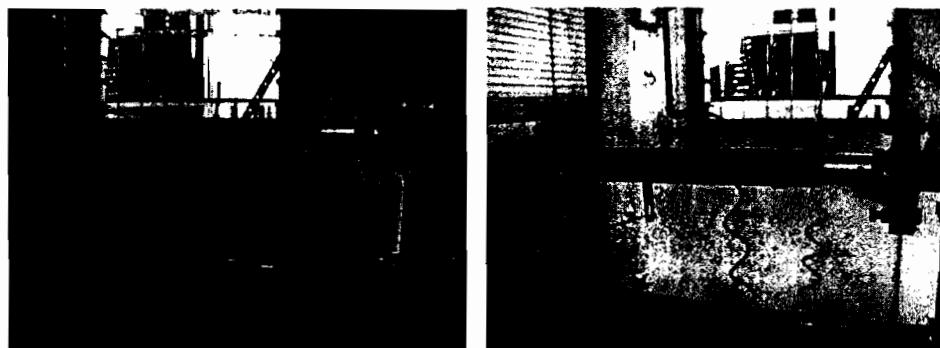
เมื่อเช็คสัญญาณเรียบร้อยแล้ว จากนั้นก็ทำการประกอบชุดปืนเข้ากับชุดทดลอง โดยประกอบปืนกับกระสุนเข้ากับหน้าแปลนของลำกล้องก่อนแล้วจึงประกอบชุดปืนที่ใช้ในการชุดชนวน ดังภาพที่ ข.6



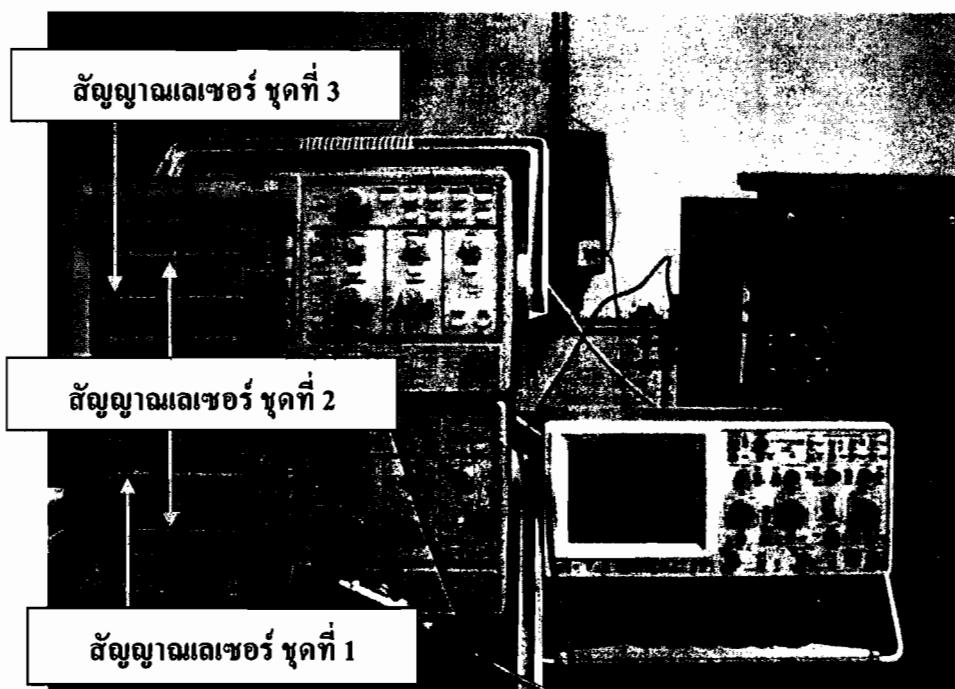
ภาพที่ ข.6 การประกอบชุดปืน

ข.1.6 การยิง

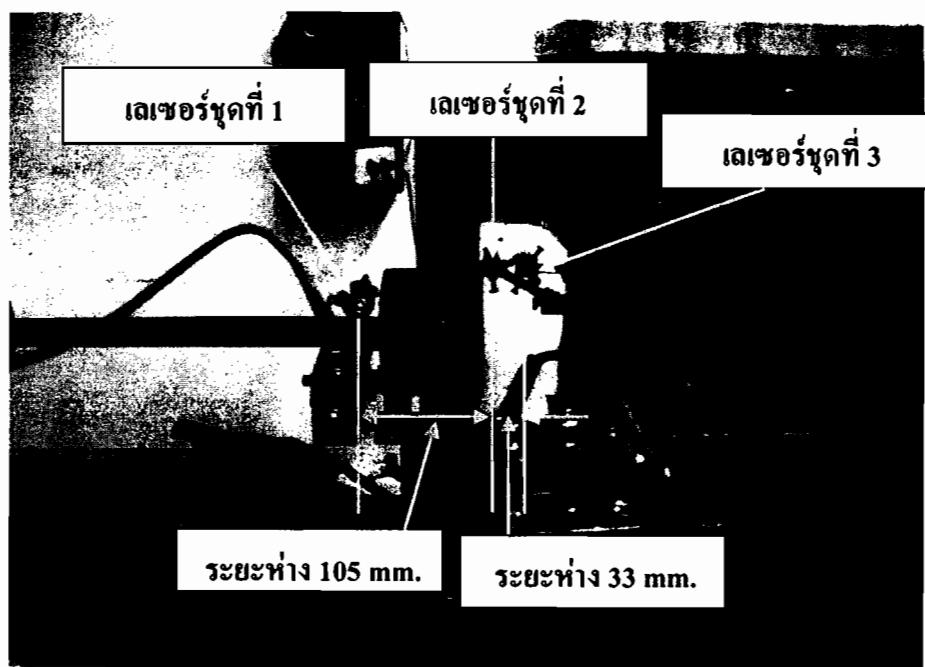
เนื่องจากในขั้นตอนการยิงน้ำเป็นขั้นตอนที่มีความอันตรายสูงและต้องใช้ความระมัดระวัง ดังนั้นในการยิงจึงใช้ตะขอเกี่ยวไกปืนที่ร้อยด้วยเชือกเพื่อทำการที่จะลั่นไกปืนที่ระยะห่างจากชุดทากลองประมาณ 4-5 m. ดังภาพที่ ข.7



ภาพที่ ข.7 การยิง



(a) ตำแหน่งเลเซอร์ และบนหน้าจออสซิลโลสโคป (oscilloscope)



(b) ตำแหน่งติดตั้งเลเซอร์

ภาพที่ บ.8 (a) ตำแหน่งเลเซอร์บนหน้าจออสซิลโลสโคป (oscilloscope) และ (b) ตำแหน่งติดตั้งเลเซอร์

ตารางที่ ข.1 ความเร็วของกระสุนปืนจากการทดลองเลเซอร์ชุดที่ 1 และเลเซอร์ชุดที่ 2 ระยะห่าง

ΔS_1

มวลของดิน ปืน (g)	ครั้ง ที่	มวลของกระสุน ปืน(g)	ขนาดของกระสุน ปืน(mm)	Δt (μs)	ΔS_1 (mm)	ΔV (m/s)
4.0	1	0.92	8.00	144	105	729.17
	2	0.92	8.00	143.5	105	731.71
	3	0.92	8.00	149.5	105	702.34
ค่าเฉลี่ย						<u>721.07</u> $^{+10.64}_{-18.73}$
4.5	1	0.92	8.00	130.5	105	804.60
	2	0.92	8.00	134	105	783.58
	3	0.92	8.00	132.5	105	792.45
ค่าเฉลี่ย						<u>793.45</u> $^{+11.06}_{-9.96}$
5.0	1	0.92	8.00	129.5	105	810.81
	2	0.92	8.00	129	105	813.95
	3	0.92	8.00	127.5	105	823.53
ค่าเฉลี่ย						<u>816.10</u> $^{+7.43}_{-5.29}$
5.5	1	0.92	8.00	119	105	882.35
	2	0.92	8.00	113.5	105	925.11
	3	0.92	8.00	114.9	105	921.05
ค่าเฉลี่ย						<u>909.51</u> $^{+15.6}_{-27.16}$
6.0	1	0.92	8.00	105	105	1000
	2	0.92	8.00	109	105	963.30
	3	0.92	8.00	112	105	937.50
ค่าเฉลี่ย						<u>966.93</u> $^{+33.07}_{-29.43}$

ตารางที่ ช.1 ความเร็วของกระสุนปืนจากการทดลองเลเซอร์ชุดที่ 1 และเลเซอร์ชุดที่ 2 ระยะห่าง ΔS_1 (ต่อ)

มวลของดินปืน (g)	ครั้งที่	มวลของกระสุนปืน (g)	ขนาดของกระสุนปืน(mm)	Δt (μs)	ΔS_1 (mm)	ΔV (m/s)
6.5	1	0.92	8.00	103	105	1,019.42
	2	0.92	8.00	103.5	105	1,014.49
	3	0.92	8.00	103	105	1,019.42
ค่าเฉลี่ย						<u>1,017.78</u> ^{+1.64} _{-3.29}
7.0	1	0.92	8.00	94.5	105	1,111.11
	2	0.92	8.00	92	105	1,141.30
	3	0.92	8.00	95	105	1,105.26
ค่าเฉลี่ย						<u>1,119.2</u> ^{+22.07} _{-13.97}

- * หมายเหตุ ค่า +,- เป็นค่าห่างจากค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดห่างจากค่าเฉลี่ยเท่าไหร่
- * ปริมาณของดินปืนนั้นบอกถึงความเร็วที่มวลของดินปืนนั้นๆ เมื่อต้องการความเร็วที่ระดับใดๆ สามารถนำไปใช้ได้ โดยที่ไม่ต้องทดลองซ้ำ
- * จะทำให้ทราบว่าที่ปริมาณดินปืนจำนวนเท่าไหร่จึงจะทำให้ความเร็วของลูกปืนถึงจุดอิ่มตัวของชุดขิงในการทดลองนี้

ตารางที่ ข.2 ความเร็วของกระสุนปืนจากการทดลองเลเซอร์ชุดที่ 2 และเลเซอร์ชุดที่ 3 ระยะห่าง

ΔS_2

มวลของดิน ปืน (g)	ครั้ง ที่	มวลของ กระสุนปืน (g)	ขนาดของกระสุนปืน (mm)	Δt (μ s)	ΔS_2 (mm)	Δv (m/s)
4.0	1	0.92	8.00	37	33	891.89
	2	0.92	8.00	37	33	891.89
	3	0.92	8.00	39.5	33	835.4
ค่าเฉลี่ย						<u>873.08</u> $^{+18.81}_{-37.64}$
4.5	1	0.92	8.00	39	33	846.15
	2	0.92	8.00	36	33	916.67
	3	0.92	8.00	37	33	891.89
ค่าเฉลี่ย						<u>884.90</u> $^{+31.77}_{-38.75}$
5.0	1	0.92	8.00	35.5	33	929.58
	2	0.92	8.00	35	33	942.86
	3	0.92	8.00	33.5	33	985.07
ค่าเฉลี่ย						<u>952.50</u> $^{+32.57}_{-22.92}$
5.5	1	0.92	8.00	32	33	1,031.25
	2	0.92	8.00	29.5	33	1,118.64
	3	0.92	8.00	31.5	33	1,047.62
ค่าเฉลี่ย						<u>1,065.8</u> $^{+52.8}_{-34.59}$
6.0	1	0.92	8.00	27.5	33	1,200
	2	0.92	8.00	28	33	1,178.57
	3	0.92	8.00	29	33	1,137.93
ค่าเฉลี่ย						<u>1,172.1</u> $^{+27.83}_{-34.24}$

ตารางที่ ข.2 ความเร็วของกระสุนปืนจากการทดลองเดเซอร์ชุดที่ 2 และเดเซอร์ชุดที่ 3 ระยะห่าง ΔS_2 (ต่อ)

มวลของดินปืน (g)	ครั้งที่	มวลของกระสุนปืน (g)	ขนาดของกระสุนปืน(mm)	Δt (μs)	ΔS_2 (mm)	Δv (m/s)
6.5	1	0.92	8.00	27	33	1,222.22
	2	0.92	8.00	27.5	33	1,200.00
	3	0.92	8.00	27	33	1,222.22
ค่าเฉลี่ย						<u>1,214.8</u> ^{+7.41} _{-14.81}
7.0	1	0.92	8.00	25.5	33	1,294.12
	2	0.92	8.00	25	33	1,320.00
	3	0.92	8.00	26	33	1,269.23
ค่าเฉลี่ย						<u>1,294.4</u> ^{+25.55} _{-25.22}

- * หมายเหตุ ค่า +/- เป็นค่าห่างจากค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดว่าห่างจากค่าเฉลี่ยเท่าไหร่
- * ปริมาณของดินปืนนั้นจะบอกถึงความเร็วที่มวลของดินปืนนั้นๆ เมื่อต้องการความเร็วที่ระดับใดๆ สามารถนำไปใช้ได้ โดยที่ไม่ต้องทดลองซ้ำ
- * จะทำให้ทราบว่าที่ปริมาณดินปืนจำนวนเท่าไหร่จึงจะทำให้ความเร็วของลูกปืนถึงจุดอิ่มตัวของชุดยิงในการทดลองนี้

ภาคผนวก ก
ผลงานทางวิชาการในระหว่างการศึกษา

ผลงานทางวิชาการในระหว่างการศึกษา

1 ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารระดับประเทศหรือระดับนานาชาติ

1.1 International Refereed Journals

- [1] Matthujak, A., Kasamnimitporn, C., Sitthinwong, W. and Pianthong, K.: **Effect of stand-off distance on impact pressure of high speed water jets injected into water.** Applied Mechanics and Materials, Vols. 52-54 (Advances in Mechanical Engineering), pp. 1873-1878, 2011. (SJR 2010 = 0.027 equivalent to Impact factor 0.146, powered by SCOPUS).
- [2] Matthujak, A., Kasamnimitporn, C., Sitthinwong, W. and Pianthong, K.: **Effects of different liquid properties on the characteristics of impact-generated high speed liquid jets.** Applied Mechanics and Materials, Vols. 110-116 (Mechanical and Aerospace engineering), pp. 370-376, 2011. (SJR 2010 = 0.027 equivalent to Impact factor 0.146, powered by SCOPUS)
- [3] Matthujak, A., Kasamnimitporn, C., Sittiwong, W., Pianthong, K., Takayama, K. and Milton. B.E.: **Characteristics of impact driven high speed liquid jets in water.** Shock Waves .

1.2 National Refereed Journals

- [1] วุฒิชัย สิทธิวงศ์ กุลเชษฐ์ เพียรทอง วิระพันธ์ สีหานาม อนิรุตต์ มัทธุจักษ์ และ ชัยเดช เกณมนิมตรพร. “ผลของสภาวะห้องทดลองต่อพฤติกรรมของลำพุ่งน้ำมันดีเซลความเร็วสูง” วารสารวิชาการ ม.อบ. มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, ปีที่ 13, ฉบับที่ 1, 2554 หน้า 99-110
- [2] ชัยเดช เกณมนิมตรพร, อนิรุตต์ มัทธุจักษ์, วุฒิชัย สิทธิวงศ์ และ กุลเชษฐ์ เพียรทอง. คุณลักษณะ ของลำพุ่งน้ำความเร็วสูงที่มีดีในของเหลว. วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรี-นครินทร์ วิโรฒ. ปีที่ 6 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2554.

1.3 International Refereed Conferences

- [1] Matthujak, A., Kasamnimitporn, C., Sittiwong, W., Seehanam, W. and Pianthong, K.: **Characteristics of High-Speed liquid jets in water.** The 1st International Conference on Mechanical Engineering (TSME-ICoME), Ubon Ratchathani, Thailand, 20th – 22nd October, 2010, paper no. AME004

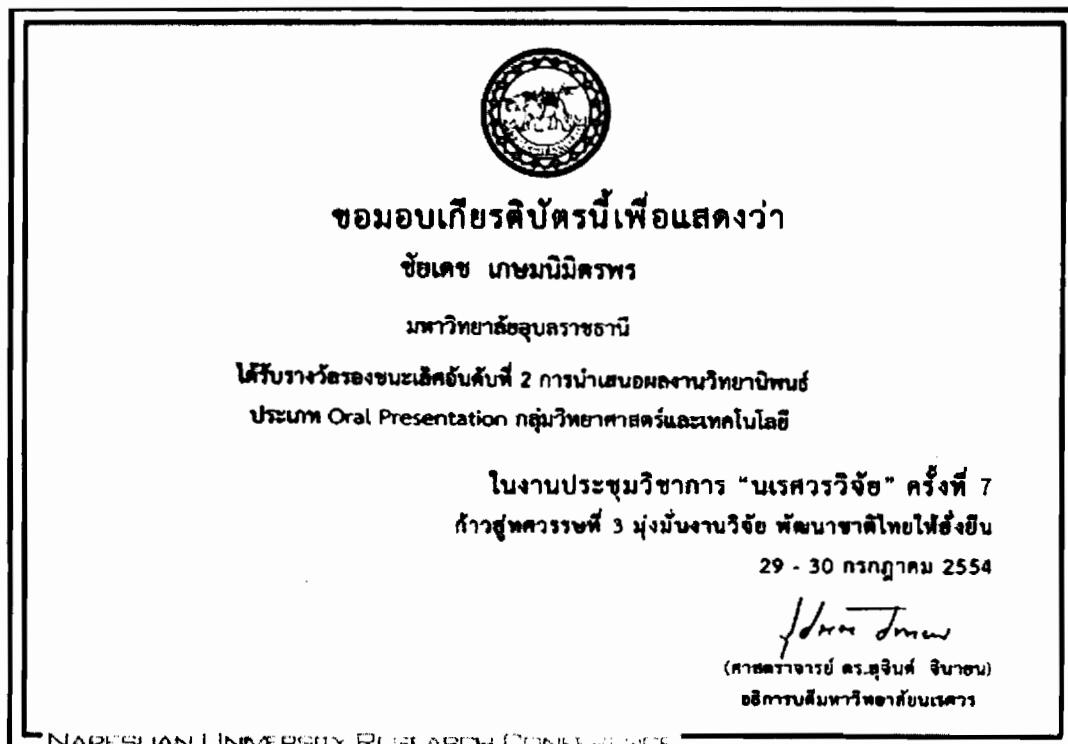
- [2] Sittiwong, W., Seehanam, W., Pianthong, K. Matthujak, A. and Kasamnimitporn, C.: **Effect of Temperature and Pressure on Characteristics of High Speed Diesel Jets.** The 1st International Conference on Mechanical Engineering (TSME-ICoME), Ubon Ratchathani, Thailand, 20th – 22nd October, 2010, paper no. TSF014
- [3] A. Matthujak, C. Kasamnimitporn, W. Sittiwong, W. Seehanam, K. Pianthong and K. Takayama. **Effects of different liquid properties on the characteristics of high-speed liquid jets injected in water.** The International Conference of Experiment Mechanics 2010 (ICEM 2010), paper page no. 132, Malaysia, 28 November - 1 October 2010.
- [4] W. Sittiwong, C. Kasamnimitporn, W. Seehanam, K. Pianthong and A. Matthujak. **Effects of test chamber conditions on characteristics high speed fuel jets behaviors.** The International Conference of Experiment Mechanics 2010 (ICEM 2010), paper page no. 124, Malaysia, 28 November - 1 October 2010.
- [5] A. Matthujak, C. Kasamnimitporn, W. Sittiwong and K. Pianthong. **Effects of different liquid properties on the characteristics of impact-generated high-speed liquid jets.** 2nd International Conference on Mechanical, Industrial, and Manufacturing Technologies 2011 (MIMT 2011), paper no. T0301, Singapore, 26-28 February 2011.
- [6] A. Matthujak, C. Kasamnimitporn, W. Sittiwong and K. Pianthong. **Effect of stand-off distance on impact pressure of high-speed water jet injected in water.** 2011 the 1st International Conference on Mechanical Engineering (ICME 2011), paper no. 487, Thailand, 3-4 April 2011.
- [7] A. Matthujak, C. Kasamnimitporn, W. Sittiwong and K. Pianthong. **Visualization of ignition over high-speed liquid fuel jet.** the 3rd International Conference on Mechanical, Industrial, and Manufacturing Technologies 2012 (MIMT 2012), paper no. M114, China, Shenzhen, 24-25 March 2012.
- [8] A. Matthujak, C. Kasamnimitporn, W. Sittiwong and K. Pianthong. **Visualization of supersonic non-Newtonian liquid jets.** the 3rd International Conference on Mechanical, Industrial, and Manufacturing Technologies 2012 (MIMT 2012), paper no. M128, China, Shenzhen, 24-25 March 2012.

1.4 National Refereed Conferences

- [1] ชัยเดช เกณมนิตรพร, อนิรุตต์ มัทชุจักษ์, วุฒิชัย สิทธิช่วงษ์, วิระพันธ์ สีหานาม และ กุลเชญฐ์ เพียรทอง. การวัดความดันกระแทกของลำพูงน้ำความเร็วสูงในน้ำ. การประชุมวิชาการเครือข่าย วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24. : 20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี. มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. paper no. AME 08.
- [2] วุฒิชัย สิทธิช่วงษ์, วิระพันธ์ สีหานาม, กุลเชญฐ์ เพียรทอง, อนิรุตต์ มัทชุจักษ์ และ ชัยเดช เกณมนิตรพร, 2553. ผลของอุณหภูมิและความดันที่มีต่อคุณลักษณะของลำพูงน้ำมันดีเซลความเร็วสูง. การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24, 20 – 22 ตุลาคม 2553; อุบลราชธานี.มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. paper no. TSF20
- [3] วุฒิชัย สิทธิช่วงษ์, วิระพันธ์ สีหานาม, กุลเชญฐ์ เพียรทอง, อนิรุตต์ มัทชุจักษ์ และ ชัยเดช เกณมนิตรพร, 2553. ผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณลักษณะของลำพูงน้ำมันเชื้อเพลิงความเร็วสูง. การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24, 20 – 22 ตุลาคม 2553; อุบลราชธานี.มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. paper no. TSF 25
- [4] ชัยเดช เกณมนิตรพร, อนิรุตต์ มัทชุจักษ์, วุฒิชัย สิทธิช่วงษ์, วิระพันธ์ สีหานาม และ กุลเชญฐ์ เพียรทอง, 2553. คุณลักษณะของลำพูงดีเซลความเร็วสูงในน้ำ. การประชุมวิชาการบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 3, 21 – 23 พฤษภาคม 2553; นครราชสีมา.มหาวิทยาลัยสุรนารี Paper no. ENG1-O-04
- [5] ชัยเดช เกณมนิตรพร, อนิรุตต์ มัทชุจักษ์, 2554, คุณลักษณะของลำพูงน้ำมันดีเซลความเร็วสูงในอากาศ. การประชุมวิชาการบัณฑิตศึกษาศิลปกรรมระดับชาติ/นานาชาติ ครั้งที่ 1, 10-11 พฤษภาคม 2554, ศูนย์นานาชาติวิทยาลัยธุรกิจและบริการ, กทม, paper no 0_05
- [6] ชัยเดช เกณมนิตรพร, อนิรุตต์ มัทชุจักษ์, วุฒิชัย สิทธิช่วงษ์ และ กุลเชญฐ์ เพียรทอง, 2554, อิทธิพลของของไนโตรเจนที่อยู่ในห้องทดลองต่อคุณลักษณะของลำพูง. การประชุมวิชาการนิรภัย ครั้งที่ 7, 29-30 กรกฎาคม 2554, มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก, หน้า 140-150
- [7] อนิรุตต์ มัทชุจักษ์, ชัยเดช เกณมนิตรพร, วุฒิชัย สิทธิช่วงษ์ และ กุลเชญฐ์ เพียรทอง, 2554, พฤติกรรมทางพลศาสตร์ของลำพูงของเหลวความเร็วสูงในน้ำ. การประชุมวิชาการเครือข่าย วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25, 19-21 ตุลาคม 2554, โรงแรมอ่าววนาง วิลล่ารีสอร์ท, กระบี่, paper no. AME 02

1.5 รางวัล (Reward)

- [1] รางวัลรองชนะเลิศอันดับที่ 2 การนำเสนอผลงานวิทยานิพนธ์ประเภท oral presentation กลุ่ม วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี การประชุมวิชาการนเรศวรวิจัย ครั้งที่ 7, 29-30 กรกฎาคม 2554



NARESUAN UNIVERSITY RESEARCH CONFERENCE

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล

วัน เดือน ปีเกิด

ที่อยู่ปัจจุบัน

ประวัติการศึกษา

ทุนการศึกษาหรือทุนงานวิจัย

นายชัยเดช เกษมนิมตรพร

26 เมษายน 2530

80/99 หมู่ที่ 23 ถนนอุบล-ตระการ ตำบลelman ใหญ่ อำเภอ
เมือง จังหวัดอุบลราชธานี 34000

นัชย์มนศึกษาปีที่ 1-6 โรงเรียนครีปทุมพิทยาคาร

อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี พ.ศ. 2547

ปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาศึกกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

พ.ศ. 2552

ทุนสนับสนุนการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา

ภาควิชาศึกกรรมเครื่องกล และทุนพัฒนาวิชาการ

ระดับบัณฑิตศึกษามหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

