



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การศึกษาคุณลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูงใน  
condensed media

โดย นายอนิรุตต์ มัธธุจักษ์ และคณะ

สิงหาคม 2555

สัญญาเลขที่ MRG5180046

## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การศึกษาคุณลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูงใน condensed media

คณบุรุษวิจัย

สังกัด

1. นายอนิรุตต์ มัธรุจักร	คณวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
2. นายกุลเชษฐ์ เพียรทอง	คณวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

สนับสนุนโดยทบวงมหาวิทยาลัย และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย  
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย ทบวงฯ และ สกอ. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

รายงานการวิจัยเรื่อง	การศึกษาคุณลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูงใน condensed media
หัวหน้าโครงการ	นายอนรุตต์ มัธุจักร์
หน่วยงาน	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ระยะเวลาดำเนินโครงการ	2 ปี
งบประมาณที่ได้รับ	480,000.00 บาท (สี่แสนแปดหมื่นบาทถ้วน)
ศัพท์สำคัญ	ลำพุ่งของเหลวความเร็วสูง การขับลำพุ่งด้วยการกระแทก shock wave water vapor bubble เทคนิคชาโดว์กราฟ

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณลักษณะของลำพุ่งของเหลวความเร็วสูงที่ฉีดใน condensed media (น้ำ) และในอากาศ ซึ่งการผลิตลำพุ่งความเร็วสูงในงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิคที่เรียกว่า การขับลำพุ่งด้วยการกระแทก (Impact driven method) ในชุดทดลองที่เรียกว่า Horizontal Single Stage Powder Gun (HSSPG) โดยเทคนิคนี้จะอาศัยกระสุนปืนความเร็วสูงกระแทกกับของเหลวซึ่งบรรจุอยู่ในหัวฉีด ซึ่งการวิจัยนี้จะใช้ความเร็วของกระสุนปืนเท่ากับ  $950 \pm 30$  m/s และหัวฉีดทรงกรวยมุม  $30^\circ$  ขนาดรูคอดคอดที่ทางออกเท่ากับ 0.7 mm ในการผลิตลำพุ่ง โดยทำการศึกษาคุณลักษณะของลำพุ่งของเหลว 6 ชนิด คือ น้ำ, น้ำทะเล, น้ำมันดีเซล, กลีโคเลชิน, แอลกอฮอล์ และน้ำมันแก๊สโซเชลีน จากภาพถ่ายด้วยกล้องวิดีโocommunity ความเร็วสูง (High-speed digital video camera) ร่วมกับการถ่ายภาพด้วยเทคนิคชาโดว์กราฟ และไม่ใช้เทคนิคชาโดว์กราฟที่การถ่ายภาพใน 2 มุมมองคือ มุมมองปกติเช่นเดียวกับการใช้เทคนิคชาโดว์กราฟและมุมมองในแนวแกน จากการถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโocommunity ความเร็วสูงร่วมกับการถ่ายภาพด้วยเทคนิคชาโดว์กราฟ พบว่า ลำพุ่งของเหลวทั้ง 6 ชนิดที่ฉีดในอากาศ จะมีรูปร่างของลำพุ่งที่ไม่แตกต่างกันมากนัก และสังเกตพบการเกิด shock wave การเกิดการเปลี่ยนแปลงมุมของ shock wave การแตกตัวของลำพุ่ง การกระจายตัวเป็นฝอยละออง การระเบิดภายในของลำพุ่งอย่างเห็นได้ชัด โดยความเร็วสูงสุดของลำพุ่มน้ำ, น้ำทะเล, น้ำมันดีเซล, กลีโคเลชิน, แอลกอฮอล์ และ น้ำมันแก๊สโซเชลีน 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 ในขณะที่เมื่อฉีดลำพุ่งในน้ำ พบว่า ความเร็วสูงสุดของลำพุ่มน้ำ, น้ำทะเล, น้ำมันดีเซล, กลีโคเลชิน, แอลกอฮอล์ และ น้ำมันแก๊สโซเชลีน 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 ซึ่งข้ากว่ากรณีที่ฉีดในอากาศเนื่องจากผลของแรงต้านทานในน้ำสูงกว่าในอากาศ และพบพฤติกรรมการขยายตัว การยุบตัวของ water vapor bubble, shock wave, compressed wave และ rebound shock wave ซึ่งเกิดจากการยุบตัวของ bubble อย่างชัดเจน ซึ่งเป็นคุณลักษณะที่ไม่พบเมื่อฉีดในอากาศ และเมื่อถ่ายภาพโดยไม่ใช้เทคนิคชาโดว์กราฟ จะพบกลไกการเกิด bubble การขยายตัว การยุบตัว และการหายไปของ bubble ได้อย่างชัดเจน และเข้าใจง่าย แต่จะไม่สามารถสังเกตเห็นพฤติกรรมต่างๆ ของ shock wave และ rebound shock wave ในน้ำได้ นอกจากนี้เมื่อถ่ายภาพลำพุ่งในน้ำในมุมมองแนวแกนโดยไม่ใช้เทคนิคชาโดว์กราฟ จะ

ยังเกตุเห็นการเกิด bubble การขยายตัว การยุบและการหายไปของ bubble ได้อย่างชัดเจนและเข้าใจง่าย แต่จะไม่สามารถสังเกตเห็นพฤติกรรมต่างๆ ของ shock wave และ rebound shock wave ในน้ำได้เช่นกัน โดยพบว่าอัตราการขยายตัว ( $V_{x, e}$ ) และยุบตัว ( $V_{x, c}$ ) ของ bubble ในแนวแกนอนสูงสุดมีค่าเท่ากับ 26.19 m/s และ 13.48 m/s ตามลำดับ เกิดขึ้นจากลำพุ่งแอลกอฮอล์ และ ลำพุ่งกลีโคซีน ตามลำดับ และอัตราการขยายตัว ( $V_{y, e}$ ) และยุบตัว ( $V_{y, c}$ ) ในแนวแกนตั้งสูงสุดมีค่าเท่ากับ 23.34 m/s และ 13.66 m/s ตามลำดับ เกิดขึ้นจากลำพุ่งแอลกอฮอล์ และ ลำพุ่งกลีโคซีน ตามลำดับ

---

Title	: Investigation on Characteristics of High-Speed Liquid Jet in Condensed Media
Head of Project	: Mr.Anirut Matthujak
Organization	: Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University
Run time	: 2 years
Budget	: 480,000 baht
Keywords	: High-speed liquid jet, Impact driven method, Shock wave, Water vapor bubble, Shadowgraph technique

## ABSTRACT

The objective of this research is to study on the characteristics of high-speed liquid jet injected in condensed media (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  $950 \pm 30$  m/s and  $30^\circ$  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.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ รศ.ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ในฐานะนักวิจัยพี่เลี้ยง เป็นอย่างสูงที่ได้ให้คำปรึกษาตลอดงานวิจัยนี้ ขอขอบคุณ นายชัยเดช เกษมนิมิตรพร ผู้ช่วยวิจัยและนักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี และ ดร.วุฒิชัย สิทธิวงศ์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสานวิทยาเขตสุรินทร์ ที่ช่วยดำเนินการทำน้ำดีลดลงและรวมผลการทำน้ำดีลดลง ตลอดระยะเวลาที่ทำการวิจัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) ที่สนับสนุนทุนวิจัยในโครงการนี้

นายอนิรุตต์ มัธธุจักษ์  
15 สิงหาคม 2555

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
Abstract	III
กิตติกรรมประกาศ	V
สารบัญ	VI
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	IX
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>4</b>
2.1 ความเร็วเสียง	4
2.2 เลขมัค	8
2.3 คลื่นกระแทก	9
2.4 ชุดยิงกระสุนความเร็วสูง	13
2.5 เทคนิคการถ่ายภาพ	17
2.6 การประยุกต์ใช้ High-speed liquid jet	22
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ High-speed liquid jet	25
<b>บทที่ 3 สมรรถนะของชุดทดลองยิงกระสุนความเร็วสูง</b>	<b>29</b>
3.1 บทนำ	29
3.2 ชุดทดลอง Horizontal single-state powder gun	29
3.3 วิธีทำการทดลอง	31
3.4 การวัดความเร็วของกระสุนเป็น	33
3.5 ผลการทดลอง	35
3.6 สรุปผลการทดลอง	36

## สารบัญ (ต่อ)

	<b>หน้า</b>
<b>บทที่ 4 คุณลักษณะของลำพุ่งของเหลวความเร็วสูง</b>	<b>37</b>
4.1 บทนำ	37
4.2 การผลิตลำพุ่งความเร็วสูง	37
4.3 การถ่ายภาพ	38
4.4 คุณลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูงในอากาศ	41
4.5 คุณลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูงในน้ำ	42
4.6 อิทธิพลของชนิดลำพุ่งเมื่อฉีดในอากาศ	50
4.7 อิทธิพลของชนิดลำพุ่งเมื่อฉีดในน้ำ	56
4.8 สรุปผลการทดลอง	86
<b>บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ</b>	<b>87</b>
5.1 สรุปผลการศึกษา	87
5.2 ข้อเสนอแนะ	88
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>89</b>
<b>ภาคผนวก</b>	<b>93</b>
ภาคผนวก ก การออกแบบชุดทดลอง	94
ภาคผนวก ข ขั้นตอนการทดลองยิงกระสุนปืนความเร็วสูง	96
ภาคผนวก ค ผลสำเร็จจากการดำเนินโครงการ	106

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความเร็วเสียงในแก๊สอุดมคติ	5
2.2 ความเร็วเสียงในตัวกล่างที่อุณหภูมิ $20^{\circ}\text{C}$	7
2.3 ค่าคงที่ของก้าช	17
4.1 คุณสมบัติของของเหลวที่ใช้ในการทดลอง	50
4.2 สรุปผลการทดลองคุณลักษณะลำพุ่งความเร็วสูงในอากาศ	56
4.3 สรุปผลการทดลองคุณลักษณะลำพุ่งความเร็วสูงในน้ำ	83
၅.၁ ความเร็วของกระแสปืนจากการทดลอง laser 1 และ laser 2 ระยะห่าง $\Delta s_1$	102
၅.၂ ความเร็วของกระแสปืนจากการทดลอง laser 2 และ laser 3 ระยะห่าง $\Delta s_2$	104

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 (a) กระแสน้ำที่ค่าของ $M_a < 1$ และ (b) กระแสน้ำที่ค่าของ $M_a > 1$	9
2.2 คลื่นกระแทก (shock wave)	9
2.3 คลื่นกระแทกเป็นแนวโค้ง	10
2.4 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงสภาพต่างๆ ข้ามคลื่นกระแทกตั้งฉาก	10
2.5 ภาพถ่ายของ normal shock wave	11
2.6 Hydraulic jump	11
2.7 (a) normal shock wave (b) curved shock wave และ (c) oblique shock wave	12
2.8 การเปลี่ยนทิศของความเร็วด้านหน้าของ normal และ oblique shock wave	12
2.9 shock wave ที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง	13
2.10 แผนภาพส่วนประกอบของ Single-stage light gas gun	14
2.11 แผนภาพส่วนประกอบของ two stage light gas gun	16
2.12 แผนภาพการทำงานของ powder gun	16
2.13 เทคนิคการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph	18
2.14 การสร้างภาพด้วยเทคนิค Shadowgraph	18
2.15 พื้นฐานการจัดระบบชีโรเรน (Schlieren)	19
2.16 หลักการทำงานของ Knife-edge	19
2.17 ผลจากการเปลี่ยนทิศทางของคอมมีด	20
2.18 ระบบชีโรเรนกับกระเจาะห้อง (Schlieren system with mirrors)	20
2.19 ระบบอินเทอร์เฟซชีโรเรนโดยการใช้ beam splitter	21
2.20 Mach-Zehnder interferometer	21
2.21 การถ่ายภาพของการไอลเดี่ยวกันด้วยเทคนิค (a) Shadowgraph photograph, (b) Schlieren photograph และ (c) Interferometer photograph	22
2.22 Water jet cutting technology	22
2.23 Water jet cleaning technology	23
2.24 Injectors injectors	24
2.25 Jet engine technology	24
2.26 Bowden and Brunton method	25
3.1 Impact driven method หรือ Bowden and Brunton method	29
3.2 ชุดทดลอง (a) แผนภาพชุดทดลอง (b) ภาพถ่ายชุดทดลอง	29

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3 ขั้นตอนการยิงของชุดทดลอง HSSPG : (a) ก่อนจุดระเบิด, (b) การจุดระเบิด, (c) ดินปืนเผาไหม้หมด, (d) หลังจากดินปืนเผาไหม้หมด และ (e) การยิงกระสุนปืน	31
3.4 การระบายอากาศด้านหน้ากระสุนปืน	32
3.5 การวัดความเร็วกระสุนปืนด้วยเทคนิค time of flight method	32
3.6 ตัวอย่างสัญญาณที่วัดได้จาก laser beam ชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ( $\Delta s_1 = 105 \text{ mm}$ ) บนหน้าจอ oscilloscope เครื่องที่ 1	34
3.7 ตัวอย่างสัญญาณที่วัดได้จาก laser beam ชุดที่ 2 และชุดที่ 3 ( $\Delta s_2 = 33 \text{ mm}$ ) บนหน้าจอ oscilloscope เครื่องที่ 2	34
3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของดินปืนและความเร็วของกระสุนปืนที่ระยะ $\Delta s_1$	35
3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของดินปืนและความเร็วของกระสุนปืนที่ระยะ $\Delta s_2$	36
4.1 การขับลำพุ่งด้วยการกระแทก (Impact driven method)	38
4.2 (a) กระสุนปืน และ (b) หัวฉีดที่ใช้ในการทดลอง	38
4.3 การการติดตั้งระบบถ่ายภาพด้วยเทคนิค Shadowgraph	39
4.4 การติดตั้งกล้องวิดีโอความเร็วสูงในมุมมองปกติโดยไม่มีการติดตั้งระบบการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph	40
4.5 การติดตั้งกล้องวิดีโอความเร็วสูงในแนวแกนโดยไม่มีการติดตั้งระบบการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph	40
4.6 ภาพถ่ายโดยเทคนิค shadowgraph ของลำพุ่งน้ำในอากาศ (water jet in air, $V_{j, \text{max}} = 1,669 \text{ m/s}$ , $Ma = 4.9$ )	41
4.7 ความเร็วเฉลี่ยและระยะการเคลื่อนที่ของลำพุ่งน้ำในอากาศ (Average jet velocity and jet penetration distance in air)	42
4.8 ภาพถ่ายโดยเทคนิค shadowgraph ของลำพุ่งน้ำในน้ำ (water jet in water, $V_{j, \text{max}} = 374 \text{ m/s}$ )	43
4.9 ภาพถ่ายโดยไม่ใช้เทคนิค shadowgraph ของลำพุ่งน้ำในน้ำ	45
4.10 ระยะการเคลื่อนที่ของลำพุ่งและ bubble และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ของลำพุ่งน้ำในน้ำ (jet and bubble penetration distance and bubble diameter of water jet in water)	46
4.11 ภาพถ่ายในแนวแกนโดยไม่ใช้เทคนิค shadowgraph ของลำพุ่งน้ำในน้ำ	48

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลำพุ่งในแนวนอน ( $D_x$ ) และแนวตั้ง ( $D_y$ ) ของลำพุ่งน้ำในน้ำ (bubble diameter $D_x$ and $D_y$ of water jet injected in water)	49
4.13 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิด เมื่อฉีดในอากาศ	51
4.14 ความเร็วเฉลี่ย (average jet velocity) ของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด	55
4.15 ระยะการเคลื่อนที่ (penetration distance) ของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด	55
4.16 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิดเมื่อฉีดในน้ำ	57
4.17 ภาพถ่ายโดยไม่ใช้เทคนิค shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิด เมื่อฉีดในน้ำ	63
4.18 ความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่งในน้ำ (average jet velocity in water) ทั้ง 6 ชนิด	68
4.19 ระยะการเคลื่อนที่ของลำพุ่งในน้ำ (jet penetration distance in water) ทั้ง 6 ชนิด	69
4.20 ความเร็วเฉลี่ยของ bubble (average bubble velocity) ที่เกิดจากลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด	69
4.21 ระยะการเคลื่อนที่ของ bubble (bubble penetration distance; $L_b$ ) ที่เกิดจากลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด	70
4.22 ความเร็วเฉลี่ยในการขยายตัวของ bubble (average expansion velocity of bubble) ของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด	71
4.23 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble (bubble diameter; $D_d$ ) ของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด	72
4.24 ภาพถ่ายในแนวแกนโดยไม่ใช้เทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิดเมื่อฉีดในน้ำ	74
4.25 ความเร็วในการขยายตัวของ bubble ในแนวนอน (average expansion velocity of bubble in x axial; $V_x$ ) ของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด	79
4.26 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ในแนวนอน (bubble diameter in x axial; $D_x$ ) ของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด	79
4.27 ความเร็วในการขยายตัวของ bubble ในแนวตั้ง (average expansion velocity of bubble in y axial $D_y$ ) ของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด	81
4.28 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ในแนวตั้ง (bubble diameter in y axial; $D_y$ ) ของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด	81

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.1 ชุดปล่อยกระสุนปืน (launcher หรือ powder gun)	94
ก.2 ท่อส่งกระสุนปืน (launch tube)	94
ก.3 ท่อระบายน้ำความดัน (pressure relief section)	95
ก.4 ห้องทดสอบ (test chamber)	95
ข.1 ชั้นมวลของกระสุนปืน	97
ข.2 วัดขนาดของกระสุนปืน	97
ข.3 บรรจุกระสุนปืน	98
ข.4 บรรจุถุงปืนและติดไฟรเมอร์	98
ข.5 เช็คสัญญาณ laser beam และ oscilloscope	99
ข.6 การประกอบชุดปืน	99
ข.7 การยิง	100
ข.8 (a) ตำแหน่ง laser beam บนหน้าจอ oscilloscope และ (b) ตำแหน่งติดตั้ง laser beam	100

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

การกัดกร่อนจากเม็ดฝน (rain corrosion) [1-8] หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการชนของเม็ดฝน (rain impact) มีการศึกษามานาน ซึ่งถือเป็นการวิจัยเริ่มแรกเกี่ยวกับลำพุ่งความเร็วสูง (high-speed liquid jet) ที่เกิดจากเม็ดฝนประทับพื้นผิวของตัวเครื่องบินหรือเครื่องบินระหว่างการเคลื่อนที่ในอากาศด้วยความเร็วสูงระหว่างฝนตก ต่อมาก็ได้ศึกษาลำพุ่งความเร็วสูงในแรงมุ่งด้านวิศวกรรมต่างๆ เช่น การศึกษาเกี่ยวกับ cavitations [9-10] เครื่องดับเพลิง (fire extinguisher) เทคโนโลยีเกี่ยวกับการตัดโดยลำพุ่ง (jet cutting technology) การทำความสะอาดด้วยลำพุ่ง (material cleaning by jets) การทำเหมืองแร่และการเจาะอุโมงค์โดยการระแทกของลำพุ่งความเร็วสูง (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]

จากการวิจัยต่างๆ พบว่า ในมุมมองของการเผาไหม้ (viewpoint of combustion) ลำพุ่งน้ำมันความเร็วสูง มีส่วนช่วยให้การเผาไหม้มีสมรรถนะดีขึ้น เนื่องจากการแทกตัวเป็นฝอยลดลงของน้ำมันและการผสมคลุกเคล้ากันกับอากาศดีขึ้น และในมุมมองของเทคโนโลยีการตัดโดยลำพุ่ง (viewpoint of jet cutting technology) ลำพุ่งความเร็วสูงสามารถตัดวัสดุที่มีความหนาหรือความแข็งแรงได้เป็นอย่างดี และยังสามารถทำความสะอาดด้วยสุดได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจาก Momentum energy ของลำพุ่งความเร็วสูงมีค่าสูงเพียงพอ อย่างไรก็ตาม สำหรับการผลิตลำพุ่งความเร็วสูงมีความเร็วอยู่ในช่วง supersonic หรือ hypersonic speed นั้น จะต้องใช้ความดันขับ (driving pressure) สูงมากถึงหลายร้อย MPa ซึ่งมีข้อจำกัดในด้านการผลิตและการเก็บความดันสูง ดังกล่าวในถังเก็บความดัน pressure vessel จากข้อจำกัดดังกล่าว จึงมีการคิดค้นวิธีการผลิตลำพุ่งความเร็วสูงโดยวิธีที่เรียกว่า impact driven method หรือ Bowden and Brunton method [37,38] โดยวิธีนี้จะยิงกระสุนความเร็วสูง (high-speed projectile) เข้าไปกระแทกกับของเหลวซึ่งบรรจุอยู่ในหัวฉีด (nozzle) โดยมีแรงต้านของกระสุนจะทำให้ความดันของของเหลวมีค่าสูงขึ้นจนกระทั่งความดันในระดับ GPa หลังจากนั้นของเหลวจะฉีดออกมายังหัวฉีดด้วยความเร็วสูง ซึ่งเป็นการฉีดลำพุ่งจากการกระแทกของกระสุนนั้นเอง จากนั้นเป็นต้นมาการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับลำพุ่งความเร็วสูง จะใช้หลักการนี้ทั้งสิ้น

จากการวิจัยต่างๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้นนี้จะพบว่า มีเพียงการศึกษาเกี่ยวกับลำพุ่งความเร็วสูง (high-speed liquid jet) โดยฉีดเข้าไปในของเหลวในสถานะแก๊ส (gas phase) เช่น อากาศเท่านั้น ซึ่งในปัจจุบัน มีนักวิจัยบางกลุ่มได้พยายามศึกษาการนำ high-speed jet มาประยุกต์ใช้กับด้านการแพทย์ [39-41] เช่น การฉีดยาแบบไม่ใช้เข็ม (needleless) โดยใช้ลำพุ่งความเร็วสูงของตัวยาฉีดเข้าไปในผิวหนังโดยตรง และ การรักษาการอุดตันของก้อนเลือดในเส้นเลือดในสมองโดยการฉีดลำ

พุ่งความเร็วสูงเข้าไปกราฟแทกทำลายเม็ดเลือด นอกจานนี้แล้วยังมีแนวคิดนำลำพุ่งไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมใต้สมุทร [42-43] เช่น การตัดโครงสร้างใต้ทะเลโดยลำพุ่งความเร็วสูง (jet cutting marine structures) หรือการเจาะใต้ทะเล (jet drilling at the bottom of the sea) จากทิศทางการประยุกต์ใช้ในปัจจุบันพบว่า ไม่เพียงแต่ลำพุ่งความเร็วสูงที่ฉีดเข้าไปในของเหลวสถานะแก๊ส (อากาศ) เท่านั้น แต่ยังมีความพยายามนำไปประยุกต์ใช้ในกรณีที่ฉีดลำพุ่งความเร็วสูงภายใน condensed media เช่น น้ำ หรือน้ำทะเล เป็นต้น แต่คุณลักษณะสำคัญต่างๆ ของ ลำพุ่งความเร็วสูง ที่ฉีดภายใน condensed media (น้ำ) ซึ่งประกอบไปด้วย ลักษณะของลำพุ่ง การแตกตัว (break up) การผสมกัน (mixing) ระหว่างลำพุ่งกับของเหลว ความเร็วของลำพุ่ง (jet velocity) ระยะการเคลื่อนที่พุ่งเข้าไปในของเหลว (penetration distance) และอื่นๆ ยังไม่มีงานวิจัยใดกล่าวถึงหรือรายงานมาก่อนเลย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาและทำการทดลองเกี่ยวกับลำพุ่งความเร็วสูงกรณีฉีดใน condensed media โดยหวังว่าจะได้รับองค์ความรู้ใหม่ๆ และเป็นข้อมูลที่สำคัญเกี่ยวกับคุณลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูงกรณีฉีดใน condensed media (น้ำ) และเพื่อเป็นข้อมูลสำคัญในการประยุกต์ใช้ในงานทางวิศวกรรมต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ออกแบบ ปรับปรุงและทดสอบชุดทดลองยิงกระสุนความเร็วสูง (high-speed projectile) เพื่อให้มีความเหมาะสมในการผลิตลำพุ่งความเร็วสูง (high-speed jet) โดยวิธี impact driven method

1.2.2 ผลิตลำพุ่งความเร็วสูง (high-speed liquid jet) เมื่อฉีดใน condensed media

1.2.3 อธิบายคุณลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูง เมื่อฉีดใน condensed media (น้ำ) และคุณลักษณะที่แตกต่างของลำพุ่งความเร็วสูงเมื่อฉีดภายในสถานะแก๊ส (อากาศ)

1.2.4 ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลกับคุณลักษณะลำพุ่งความเร็วสูง เมื่อฉีดใน condensed media

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ปรับปรุงชุดทดลองยิงกระสุนความเร็วสูง (high-speed projectile) ที่ใช้ในการผลิตลำพุ่งความเร็วสูง (high-speed jet) โดยวิธี impact driven method ให้มีความเหมาะสมกับกรณีฉีดใน condensed media

1.3.2 ผลิตลำพุ่งความเร็วสูงกรณีฉีดภายในสถานะแก๊ส (อากาศ) และใน condensed media (น้ำ)

1.3.3 ศึกษาลำพุ่งความเร็วสูงกรณีฉีดภายในสถานะแก๊ส (อากาศ) และใน condensed media (น้ำ)

1.3.4 ศึกษาถึง parameters ต่างๆ อาทิ ชนิดของลำพุ่ง ชนิดของของเหลวที่อยู่ภายในห้องทดสอบ (test chamber) เป็นต้น ที่มีอิทธิพลต่อคุณลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูง

## 1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

1.4.1 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องจากการสารวิชาการทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศที่เกี่ยวข้องกับลำพุ่งความเร็วสูงทั้งในอากาศและใน condensed media

1.4.2 ศึกษาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองยิงกระสุนความเร็วสูงเพื่อที่จะใช้สร้างลำพุ่งความเร็วสูง

1.4.3 ทำการออกแบบและปรับปรุงชุดยิงกระสุนความเร็วสูงเพื่อให้เหมาะสมกับการทดลองยิงลำพุ่งความเร็วสูงทั้งในกรณีดีอากาศและใน condensed media

1.4.4 ออกแบบการทดลอง จัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือวัดต่างๆ เช่น อุปกรณ์วัดความเร็ว ออสซิลโลสโคป เป็นต้น

1.4.5 ศึกษาสมรรถนะของชุดทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของกระสุนปืนกับน้ำหนักดินปืนที่ใช้ในการทดลอง

1.4.6 ทดลองผลิตลำพุ่งความเร็วสูงกรณีดีในสถานะแก๊ส (อากาศ) และใน condensed media (น้ำ)

1.4.7 ศึกษาคุณลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูงกรณีดีในสถานะแก๊ส (อากาศ) และใน condensed media (น้ำ) โดยการถ่ายภาพ

1.4.8 วิเคราะห์ผลการทดลอง

1.4.9 สรุปและเขียนรายงานผลการวิจัย

## 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.5.1 รู้ถึงคุณลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูง (high-speed jet) เมื่อฉีดใน condensed media (น้ำ)

1.5.2 รู้ถึงตัวแปร (parameters) ต่างๆ ที่มีผลต่อคุณลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูง (high- speed jet) เมื่อฉีด condensed media (น้ำ)

1.5.3 อาจจะค้นพบชนิดของลำพุ่งที่เหมาะสมกับงานในแต่ละด้านทั้งในทางวิศวกรรม แพทย์ ศาสตร์ หรืออื่นๆ

1.5.4 สามารถพัฒนาเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับงานด้านการแพทย์ อุตสาหกรรมใต้สมุทร เทคโนโลยีการตัด (cutting technology) ในน้ำ และงานด้านอื่นๆที่เกี่ยวข้องได้จริง

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ความเร็วเสียง (Speed of sound)

ความเร็วเสียง [44] คือ ระยะทางที่เสียงเดินทางไปในตัวกลางได้ ในหนึ่งหน่วยเวลา โดยทั่วไปเสียงเดินทางในอากาศที่อุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$  ที่ความเร็วเท่ากับ  $346 \text{ m/s}$  และในอากาศที่ อุณหภูมิ  $20^{\circ}\text{C}$  ที่ความเร็วเท่ากับ  $343 \text{ m/s}$  ความเร็วที่เสียงเดินทางได้นั้นอาจมีค่ามากขึ้นหรือน้อยลง ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของตัวกลางเป็นหลัก และอาจได้รับอิทธิพลจากความชื้นบ้างเล็กน้อย แต่ไม่ขึ้นกับ ความดันอากาศ เนื่องจากการเดินทางของเสียงอาศัยการสั่นของโมเลกุลของตัวกลาง ดังนั้นเสียงจะ เดินทางได้เร็วขึ้นหากตัวกลางมีความหนาแน่นมาก ทำให้เสียงเดินทางเร็วในของแข็ง แต่เดินทางไม่ได้ ในอากาศ เพราะอากาศเป็นสุญญากาศจึงไม่มีโมเลกุลของตัวกลางอยู่ ความเร็วเสียง ( $C$ ) โดยทั่วไป คำนวณหาได้จาก

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

เมื่อ

$c$  คือ สัมประสิทธิ์ของความแข็งเกร็ง (coefficient of stiffness)

$\rho$  คือ ความหนาแน่น

ดังนั้น ความเร็วเสียง จะเพิ่มขึ้นตามความแข็งเกร็งของวัสดุ และ ลดลงเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น

##### 2.1.1 ความเร็วเสียงในแก๊ส

ค่า  $c$  ในตัวกลางสถานะแก๊สสามารถประมาณโดย

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

เมื่อ

$\gamma$  คือ ดัชนีอัตราเดียบอาทิก (adiabatic index)

$p$  คือ ความดัน

ดังนั้น ความเร็วเสียงในแก๊สสามารถคำนวณได้โดย

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

ในกรณี แก๊สในอุดมคติ (Ideal gas) จะได้

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

เมื่อ

$R$  คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (gas constant) (287.05 J/(kg.K) สำหรับอากาศ) ปกติในทางอากาศพลศาสตร์ค่านี้ห่างจาก การหารค่าคงที่ของแก๊สสากล  $R$  (J/(mol.K)) ด้วย ค่ามวลโมล (molar mass)

$\gamma$  คือ ค่าดัชนีอัตราเดียบatic (Adiabatic index) มีค่าเท่ากับ 1.402 สำหรับอากาศ บางครั้งเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์  $\kappa$  (cappa)

$T$  คือ ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) ที่สภาพบรรยากาศมาตรฐาน (Standard atmosphere)

ในกรณีของแก๊สในอุดมคติ ความเร็วเสียง  $C$  จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเท่านั้น โดยไม่ขึ้นอยู่กับความดัน สำหรับอากาศนั้นเกือบถือได้ว่าเป็นแก๊สในอุดมคติ อุณหภูมิของอากาศเปลี่ยนแปลงตามระดับความสูง เป็นผลให้ความเร็วของเสียงที่ระดับความสูงต่างๆ นั้นแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความเร็วเสียงในแก๊สอุดมคติ [44]

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

ของเหลวจะมีความแข็งเกร็งต่อแรงอัดเท่านั้นโดยไม่มีความแข็งเกร็งต่อแรงเฉือน ดังนั้น ความเร็วของเสียงในของเหลวหาได้โดย

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

โดย

$K$  คือ โมดูลัสของการอัดอหะเดียบაติก (adiabatic bulk modulus)

### 2.1.3 ความเร็วเสียงในของแข็ง

ของแข็งนั้นมีความแข็งเกร็งไม่เป็นศูนย์ทั้งต่อแรงบีบอัดหรือการเปลี่ยนปริมาตร (volumetric deformation) และแรงเฉือน (shear deformation) ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะกำเนิดคลื่นเสียงที่มีความเร็วต่างกันขึ้นกับรูปแบบของคลื่นในแท่งของแข็งซึ่งมีขนาดความหนา (หรือขนาดของตัวกล่างในแนวตั้ง) แตกต่างกับการเคลื่อนที่ของคลื่น) เล็กกว่าความยาวคลื่นมาก ความเร็วเสียงหาได้จาก

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

โดย

$E$  คือ โมดูลัสของยัง

$\rho$  คือ ความหนาแน่น

ดังนั้น ความเร็วเสียงในตัวกล่างในเหล็กจะมีค่าประมาณ 5,100 m/s ความเร็วของเสียงสามารถหาได้จากการแทนค่าโมดูลัสของยังด้วยโมดูลัสคลื่นหน้ารับ (plane wave modulus) ซึ่งหาได้จาก โมดูลัสของยัง และ อัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's ratio) [21]

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

ดังนั้น ความเร็วของเสียง

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

สำหรับคลื่นตามขวาง (transverse wave) นั้นโมดูลัสของยัง  $E$  จะถูกแทนด้วยค่าโมดูลัสของแรงเฉือน (shear modulus)  $G$

$$C_{solid\_transverse} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.9)$$

จะเห็นได้ว่า ความเร็วของเสียงในของแข็งจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของตัวกลางเท่านั้น โดยไม่ขึ้นกับอุณหภูมิของแข็ง เช่น เหล็ก สามารถนำคลื่นด้วยความเร็วที่สูงกว่าอากาศมาก

ในตัวกลางที่ไม่มีการกระจาย (non-dispersive medium) ความเร็วเสียงไม่ขึ้นกับความถี่ ดังนั้นความเร็วในการส่งถ่ายพลังงานและความเร็วในการเคลื่อนที่ของเสียงนั้นมีค่าเท่ากันในย่านความถี่เสียงที่มนุษย์สามารถได้ยินนั้น อากาศมีคุณสมบัติเป็นตัวกลางที่ไม่มีการกระจาย แต่จะสังเกตว่า  $CO_2$  ในอากาศนั้นเป็นตัวกลางที่มีการกระจายและทำให้เกิดการกระจายสำหรับคลื่นเสียงความถี่สูง (28 KHz) ในตัวกลางที่มีการกระจาย (dispersive medium) ความเร็วเสียงจะขึ้นกับความถี่ องค์ประกอบที่แต่ละความถี่จะเดินทางด้วยความเร็วเฟส (phase velocity) ที่แตกต่างกัน ส่วนพลังงานของเสียงจะเดินทางด้วยความเร็วที่ความเร็วกลุ่ม (group velocity) ตัวอย่างของตัวกลางที่มีการกระจาย คือ น้ำ

ตารางที่ 2.2 ความเร็วเสียงในตัวกลางที่อุณหภูมิ 20 °C [44]

ชนิดวัสดุ	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

#### 2.1.4 ความเร็วเสียงในอากาศ

ความเร็วของเสียงในอากาศโดยประมาณหาได้จาก

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

โดยที่  $t$  คือ อุณหภูมิ ในหน่วย  $^{\circ}\text{C}$  ความแม่นยำในการประมาณในช่วงของ อุณหภูมิในช่วง  $-20^{\circ}\text{C}$  ถึง  $40^{\circ}\text{C}$  จะมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 0.2% ในช่วงอุณหภูมิสูงกว่า หรือ ต่ำ กว่านั้นความเร็วของเสียงจะประมาณจากสมการที่ 2.11 และตัวอย่างความเร็วเสียงในตัวกลางต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 2.2

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

## 2.2 เลขมัค (Mach number)

เลขมัค (Mach number) คือ สัดส่วนของความเร็ววัตถุต่อความเร็วเสียง เลขมัคปกติจะใช้กับ วัตถุที่เดินทางด้วยความเร็วสูงในของไหหละของเหลวที่เหลด้วยความเร็วสูงในช่องแคบๆ หรืออุโมงค์ ลม และเนื่องจากเป็นสัดส่วนของความเร็ว ดังนั้น เลขมัคจึงเทอมไม่มีหน่วย โดยที่ส่วนของ ระดับน้ำที่เลมาตรฐาน มัค 1 เท่ากับความเร็ว  $1,225 \text{ km/hr}$  เนื่องจากความเร็วเสียงนั้นจะเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น นอกจากนี้อาจพบว่าเลขมัคนั้นยังเป็นสัดส่วนของแรงนื้อย (แรงอากาศ พลศาสตร์) ต่อแรงยืดหยุ่น (elastic force)

$$M_a = \frac{V}{V_0} \quad (2.12)$$

เมื่อ

$M_a$  คือ เลขมัค (Mach number)

$V$  คือ ความเร็ววัตถุ

$V_0$  คือ ความเร็วของเสียงในตัวกลาง

หากนิยามความเร็วตาม Mach number จะสามารถแบ่งประเภทของความเร็วเป็นช่วงได้ดังนี้

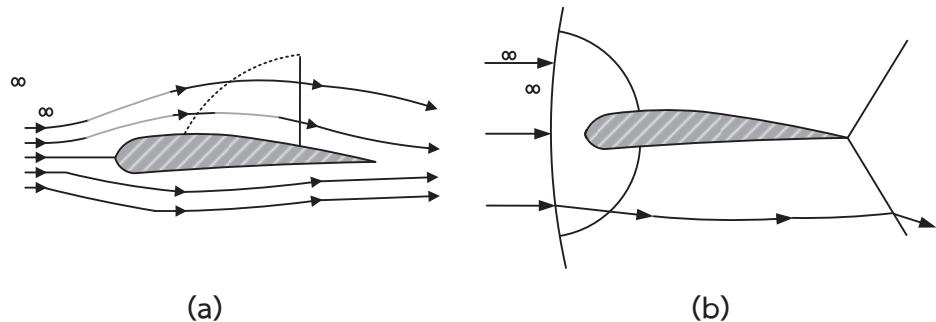
$M_a < 1$  เรียกว่า Subsonic เป็นช่วงของความเร็วที่ต่ำกว่าความเร็วเสียง

$M_a = 1$  เรียกว่า Sonic เป็นช่วงของความเร็วเสียง

$0.8 < M_a < 1.2$  เรียกว่า Transsonic เป็นช่วงของความเร็วที่สูงกว่าเสียงเป็นความเร็วที่อยู่ ประมาณความเร็วเสียง

$1.2 < M_a < 5$  เรียกว่า Supersonic เป็นช่วงของความเร็วที่เหนือหรือมากกว่าความเร็ว เสียง

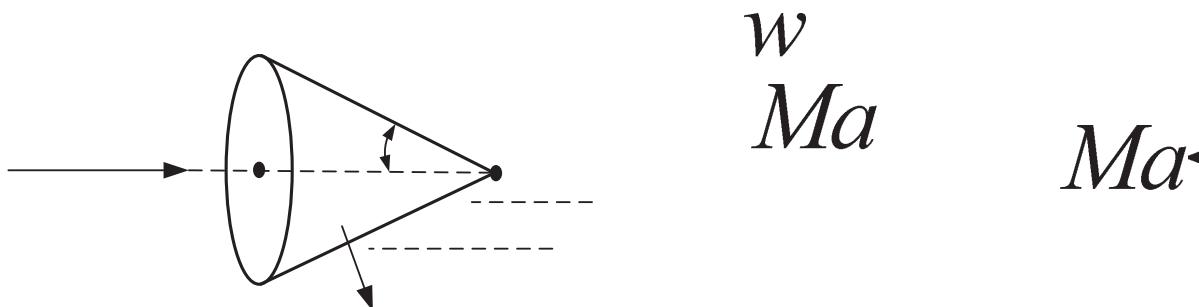
$M_a > 5$  เรียกว่า Hypersonic เป็นช่วงของความเร็วเหนือเสียงมาก มากกว่า 5 เท่าขึ้นไป



รูปที่ 2.1 (a) กระแสลมที่ค่าของ  $M_a < 1$  และ (b) กระแสลมที่ค่าของ  $M_a > 1$

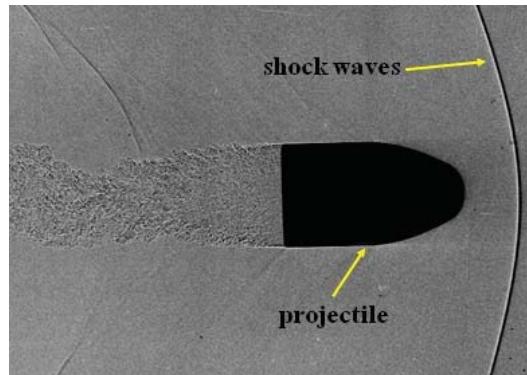
### 2.3 คลื่นกระแส (shock wave)

คลื่นกระแสเกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่ได้เท่ากับความเร็วของคลื่นหรือเร็วกว่า ซึ่งจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่สัมคลื่นไม่สามารถที่จะเคลื่อนที่ออกไปจากแหล่งกำเนิดเสียงได้ โดยถ้า แหล่งกำเนิดเคลื่อนที่ได้เท่ากับความเร็วของคลื่น สัมคลื่นจะเกิดการซ้อนทับกันและเสริมกันกลายเป็น แอมพลิจูดขนาดใหญ่เรียกว่า คลื่นกระแส (shock wave) และเมื่อแหล่งกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่เร็วกว่า คลื่น สัมคลื่นจะพอร์มตัวเป็นรูปกรวยโดยมีมุม  $\theta = \sin^{-1}(V/V_0)$  อัตราส่วน  $(V/V_0)$  เรียกว่า เลขมัค (Mach number) คลื่นกระแสเกิดขึ้นได้บ่อยมากในสถานการณ์ต่างๆ กัน เช่น โซนิกบูม (Sonic boom) คือ คลื่นกระแสที่ประเทหหนึ่งของเครื่องบินที่บินด้วยความเร็วเหนือเสียง คลื่นที่เกิด หลังเรือเร็วๆ เป็นคลื่นกระแสที่อีกประเทหหนึ่ง นอกวิภาคก็สามารถจะเกิดคลื่นกระแสได้ อย่างเช่น ลมสุริยะที่วิ่งด้วยความเร็วสูงเข้าชนสนามแม่เหล็กโลก เป็นต้น

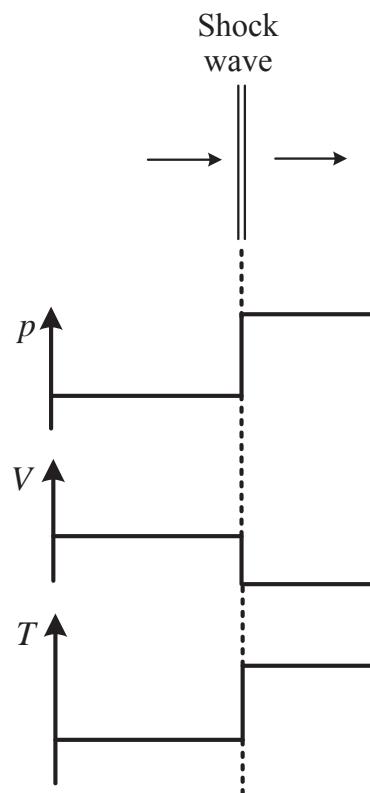


รูปที่ 2.2 คลื่นกระแส (shock wave)

เมื่อแหล่งกำเนิดเสียงเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วเสียง ( $V = V_0$  หรือ Mach no เท่ากับ 1) หน้าคลื่นทางขวาจะถูกอัดกันอยู่ทางด้านหน้าเป็นแนวเส้นโค้ง ทำให้หน้าคลื่นเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกัน ความดันของคลื่นเพิ่มขึ้นอย่างมาก เรียกว่า คลื่นกระแทก (shock wave) ตัวอย่าง คลื่นกระแทกแสดงดัง [http://203.158.100.139/physics/oldfront/89/sound\\_files/bullet-2.gif](http://203.158.100.139/physics/oldfront/89/sound_files/bullet-2.gif) รูปที่ 2.2 เป็นการเคลื่อนที่ของกระสุนปืนที่วิ่งด้วยความเร็วสูง

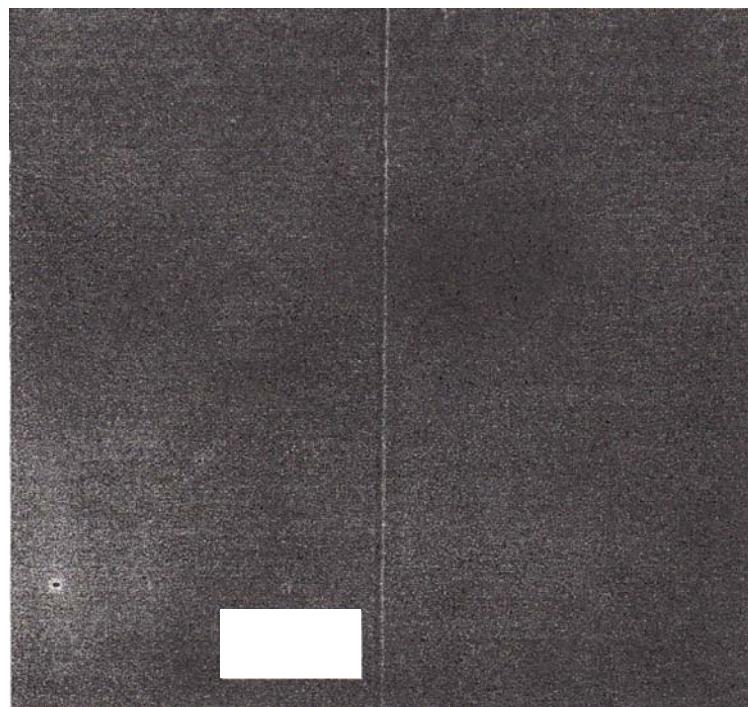


รูปที่ 2.3 คลื่นกระแทกเป็นแนวโค้ง [44]



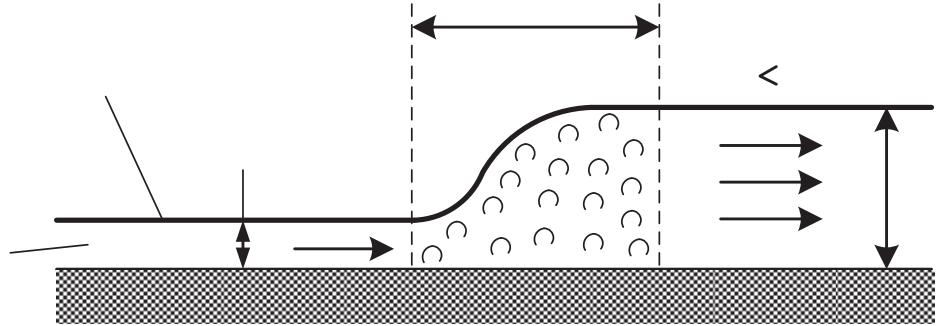
รูปที่ 2.4 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงสภาวะต่างๆ ข้ามคลื่นกระแทกตั้งฉาก [45]

จากข้อมูลที่ได้จากการวิจัยต่างๆ พบว่า ภายใต้บางสภาวะมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของการไหลขึ้นเกือบจะทันที โดยมีการลดลงของความเร็วและการเพิ่มขึ้นของความดันอย่างฉับพลันตลอดช่วงการเปลี่ยนแปลงของการไหลนั้น การที่จะเกิดบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบอย่างฉับพลัน (region of sharp change) ของของไหลได้นั้นความเร็วเริ่มต้นของของไหลจะต้องมีค่าเท่ากับความเร็วเสียง บริเวณที่มีความบางมากๆ ที่อยู่ระหว่างการเปลี่ยนแปลงจากสภาวะของการไหลที่มีความเร็วเหนือเสียงและความดันต่ำไปยังสภาวะที่มีความเร็วต่ำและความดันสูง เรียกว่า คลื่นกระแทก (shock wave) คลื่นกระแทกที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงทำมุมตั้งฉากกับทิศทางการไหลเรียกว่า คลื่นกระแทกตั้งฉาก (normal shock wave) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.4 และภาพถ่ายของ normal shock wave แสดงไว้ในรูปที่ 2.5



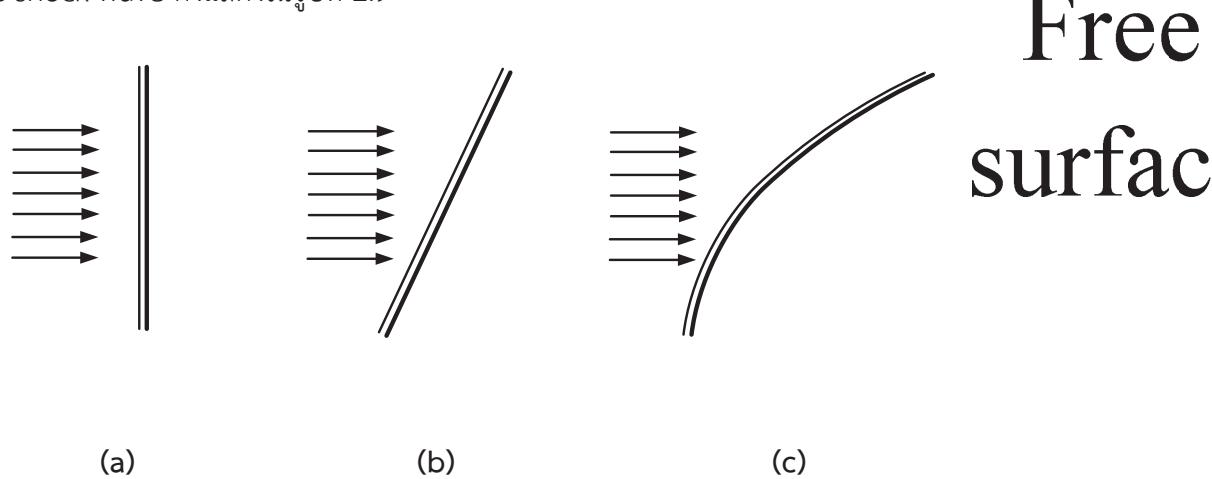
รูปที่ 2.5 ภาพถ่ายของ normal shock wave [45]

คลื่นกระแทกมีความคล้ายคลึงกับลักษณะของการเกิด Hydraulic jump ซึ่งจะเกิดขึ้นในการไหลแบบผิวนิ่ม (free surface flow) ลักษณะการเกิด Hydraulic jump แสดงในรูปที่ 2.6 ตัวอย่างของการเกิด Hydraulic jump คือ การไหลของกระแส้ำในเขื่อนหรือท่าน้ำ



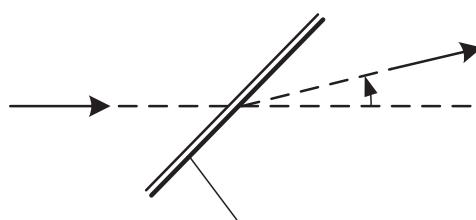
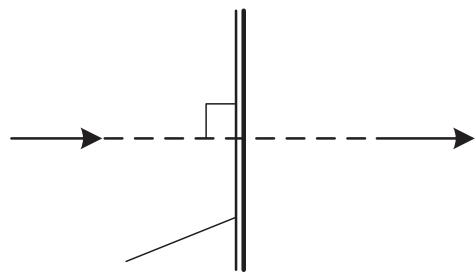
รูปที่ 2.6 Hydraulic jump [45]

โดยทั่วไปคลื่นกระแทกจะมีลักษณะโค้ง (curved shock wave or bow shock) แต่ก็มีจำนวนมากที่มีลักษณะตรงทำมุม  $90^\circ$  กับทิศทางการไหล (normal shock wave) และเอียงทำมุมกับทิศทางของการไหล (oblique shock wave) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ในกรณีของ normal shock wave ความเร็วหน้าและหลังคลื่นกระแทกจะทำมุม  $90^\circ$  กับคลื่นกระแทก ในกรณีของ oblique shock wave เกิดจากการเปลี่ยนทิศของความเร็วหน้าคลื่นกระแทก ดังแสดงในรูปที่ 2.8 คลื่นกระแทกที่สมบูรณ์แบบอาจจะประกอบด้วย normal shock wave, curved shock wave และ oblique shock wave ดังแสดงในรูปที่ 2.9

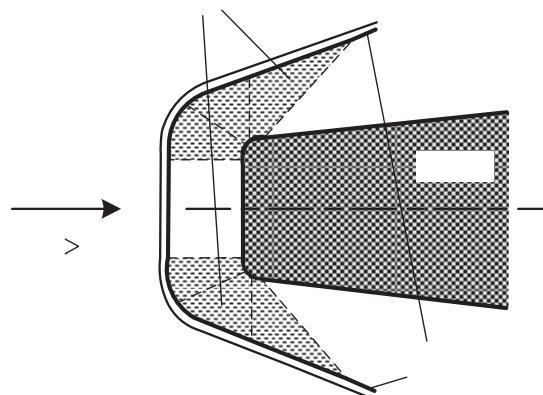


รูปที่ 2.7 (a) normal shock wave (b) curved shock wave และ (c) oblique shock wave

Liquid  
flow



รูปที่ 2.8 การเปลี่ยนทิศของความเร็วด้านหน้าของ normal และ oblique shock wave [45]



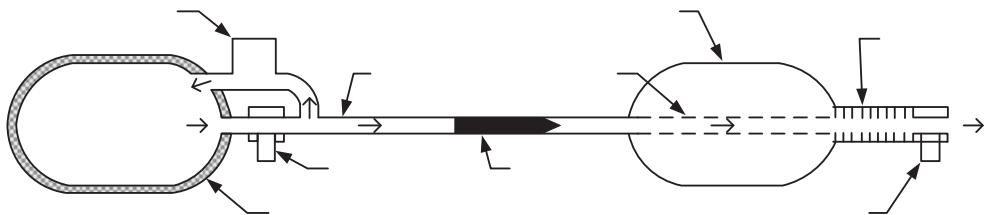
รูปที่ 2.9 shock wave ที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง [45]

#### 2.4 ชุดยิงกระสุนความเร็วสูง

ปัจจุบันงานวิจัยในด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรม ชุดยิงกระสุน (Launcher) หรืออาจเรียกว่า ปืน (gun) มีมากมายหลายแบบ เช่น ชุดยิงแบบ electrostatic และ electromagnetic ชุดยิงแบบใช้การระเบิด (explosive propulsion) ชุดยิงแบบ plasma เป็นต้น โดยแต่ละแบบจะมีความเหมาะสมในแต่ละงานวิจัย อย่างไรก็ตามในหัวข้อนี้จะพูดถึงชนิดของชุดยิงที่ใช้กันมากในงานวิจัยปัจจุบันโดยจะจำแนกชนิดของชุดยิงหรือปืนออกตามแหล่งพลังงานของตัวขับดันกระสุนซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 2.4.1 ชุดยิงกระสุนแบบใช้แก๊สเบา (light gas gun)

ชุดยิงกระสุนแบบนี้จะใช้แก๊สเบา (light gas) เช่น ไฮโดรเจน ( $H_2$ ) หรือ ไฮเลียม ( $He$ ) เป็นพลังงานในการขับ ดังนั้นชุดยิงชนิดนี้จึงเรียกว่า light gas gun โดยส่วนประกอบหลักของปืนชนิดนี้ คือ ถังเก็บความดันสูง (high pressure reservoir) แผ่นฟิล์มบาง (diaphragm) และ ท่อปล่อยกระสุน (launch tube) หรือ ลำกล้องปืน (gun barrel) กระสุน (projectile) โดยทั่วไปจะสอดอยู่ทางออกของลำกล้องปืนติดกับแผ่น diaphragm แก๊สเบาที่ใช้เป็นตัวขับจะบรรจุอยู่ใน reservoir ซึ่งแก๊สดังกล่าวจะทำให้เพิ่มความร้อนและความดันได้จากหลายวิธี เช่น จากการเผาไหม้ (combustion) จากแหล่งความร้อนภายนอก (external heat) จากการชาร์จประจุ (electric charge) จาก shock wave และจากการดันตัวของ piston (piston compress) ทันทีที่ความดันของแก๊สเบาเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งความดันแผ่น diaphragm ทนรับไม่ได้ แผ่น diaphragm จะขาดความดันภายใน high pressure reservoir จะขับหรือเร่งความเร็วของกระสุน ดังรูปที่ 2.10 หากประยุกต์ก្នុងของการเคลื่อนที่ของนิวตัน จะสามารถหาความเร็วที่เกิดขึ้นในลำกล้องปืนได้



รูปที่ 2.10 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 ความเร็วของกระสุน ณ ตำแหน่ง  $x$  ใดๆ

$P$  คือ ความดัน

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของลำกล้องปืน

หากอินทิเกรตตลอดความยาวของลำกล้องปืน ( $L$ ) จะได้

$$\frac{mv_0^2}{2} = A \int_0^L P dx \quad (2.14)$$

เมื่อ

$v_0$  คือ ความเร็วของกระสุนที่ทางออกของลำกล้องปืน

เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาจะกำหนดให้  $\bar{P}$  มีค่าคงที่ตลอดการเคลื่อนที่ของกระสุนในลำกล้องปืน ซึ่งมีค่าเป็น

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

โดยสมการนี้จะมีค่าความผิดพลาดเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของกระสุนกับภายในลำกล้องปืน 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

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

เมื่อ

$v_g$  คือ ความเร็วของการขยายของแก๊ส

$\gamma$  คือ Ratio of the specific heats

ถ้าสมการที่ 2.16 ใช้ในการหาค่าความเร็วแก๊สหลังกระสุนปืน จะได้วัตรส่วนของ  $P/P_0$  จะขึ้นอยู่กับ

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

จากการบวนการทำงานแก๊สจะขยายตัวจาก high pressure reservoir ซึ่งเป็นการแปลงพลังงานที่สะสมภายใน high pressure reservoir เพื่อไปขับหรือเร่งความเร็วของกระสุน ความเร็วสูงสุดของการไหลของแก๊สจะเกิดขึ้นเมื่อแก๊สแปลงพลังงานทั้งหมดที่มีให้กับการขับดันหรือเร่งความเร็วของกระสุน ซึ่งความดันของแก๊สจะลดลงเป็นศูนย์ โดยที่ความเร็วจะคงวนได้จาก

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

ค่าความเร็วสูงสุดที่ทางออก คือ Escape velocity ( $v_{esc}$ ) มีค่าเท่ากับ

$$v_{esc} = \left( \frac{2}{\gamma - 1} \right) c = \frac{2}{\gamma - 1} \sqrt{\frac{\gamma R T_0}{M}} \quad (2.19)$$

เมื่อ

$T_0$  คือ อุณหภูมิภายใน pressure reservoir

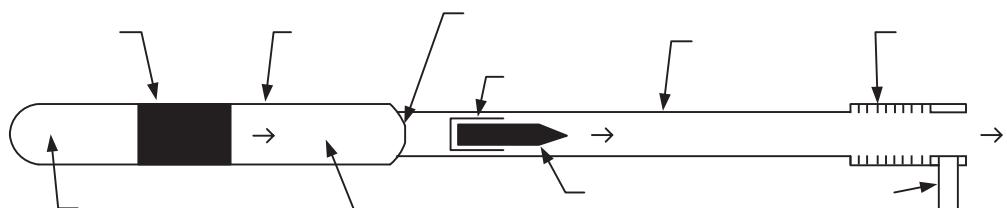
$M_{mol}$  คือ มวลโมเลกุลของแก๊สภายใน pressure reservoir

$R$  คือ universal gas constant

ซึ่งความสัมพันธ์นี้แสดงว่า light gas gun จะมีความเร็วสูงก็ต่อเมื่อใช้แก๊สที่มีค่ามวลโมเลกุลต่ำและแก๊สจะต้องมีอุณหภูมิสูง

#### 2.4.2 ชุดยิงกระสุนแบบใช้แก๊สเบาแบบสองช่วง (two stage light gas gun)

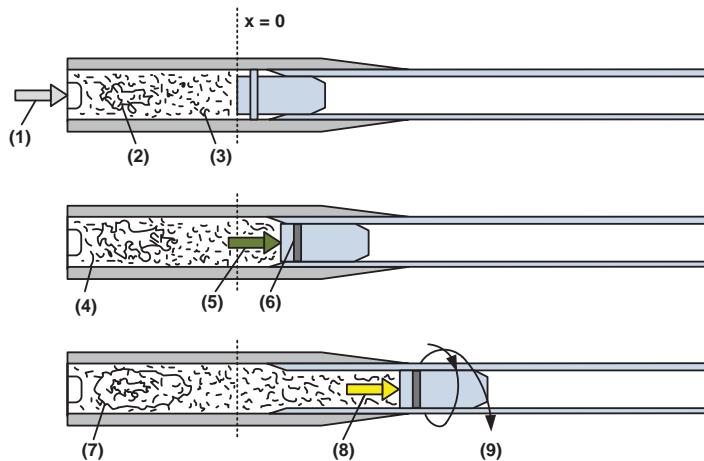
เมื่อใช้ลูกสูบ (piston) กดอัดให้แก๊สที่ใช้ขับกระสุน (driver gas) มีความดันและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ชุดยิงกระสุนแบบนี้จะเรียกว่า ชุดยิงกระสุนแบบใช้แก๊สเบาแบบสองช่วง (two stage light gas gun) ซึ่งเป็นปืนที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง ดังรูปที่ 2.11 แสดงส่วนประกอบพื้นฐานของ piston-powered two-stage light gas gun โดยที่แก๊สเบาถูกบรรจุอยู่ภายในห้องท่อที่มีผนังหนาและเรียบซึ่งโดยทั่วไปจะถูกเรียกว่า pump tube โดยที่ด้านหนึ่งจะถูกปิดโดยลูกสูบ (piston) และอีกด้านหนึ่งจะปิดโดย steel diaphragm



รูปที่ 2.11 แผนภาพส่วนประกอบของ two stage light gas gun

#### 2.4.3 ชุดยิงกระสุนแบบใช้ดินปืน (powder gun)

ชุดยิงกระสุนชนิดนี้จะใช้ดินปืนทดลองแทนแก๊สซึ่งมีหลักการทำงานคือ ใช้แรงของปืนในการขับลูกกระสุนโดยมีดินปืนเป็นเชื้อเพลิง



รูปที่ 2.12 แผนภาพการทำงานของ powder gun

จากรูปที่ 2.12 สามารถอธิบายการทำงานตามหมายเลขได้ดังนี้

- (1) เริ่มมีการจุดชนวนห้องเผาใหม้
- (2) เริ่มมีการเผาใหม้
- (3) มีแรงดันจากการเผาใหม้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว
- (4) ห้องเผาใหม้เกิดแรงดันประมาณ 14-68 MPa
- (5) กระสุนเริ่มมีการเคลื่อนที่จากอิทธิพลของแรงดัน
- (6) มีแรงต้านการเคลื่อนที่ของกระสุน
- (7) ความดันเริ่มสูงขึ้นจากอัตราการเผาใหม้ที่มากขึ้น
- (8) ลูกกระสุนเคลื่อนที่มากขึ้นและปริมาตรห้องเผาใหม่มากขึ้น
- (9) เกิดแรงหมุนตัวของกระสุนที่เกิดจากแรงดันสูงสุดจากการเผาใหม่สมบูรณ์

## 2.5 เทคนิคการถ่ายภาพ (visualization technique) [45]

เทคนิคการถ่ายภาพที่นิยมใช้ในการวิจัย สามารถแบ่งออกได้ 3 เทคนิค คือ

1. เทคนิคชาโดว์กราฟ (Shadowgraph technique)
2. เทคนิคชไรเรน (Schlieren technique)
3. เทคนิคอินเทอเฟอร์ometร์ (Interferometer technique)

โดยทั้ง 3 เทคนิคอาศัยหลักการหักเหของลำแสงเมื่อผ่านแก้วที่มีความหนาแน่นเปลี่ยนแปลง โดยด้วยการหักเหของแสงจะเป็นฟังก์ชันความหนาแน่นของแก้วดังสมการที่ 2.20

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

หรือสามารถประมาณเป็นสมการเส้นตรง คือ

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

เมื่อ

$\rho_s$  = ความหนาแน่นของแก๊สที่  $0^\circ C$  ที่ความดันบรรยายกาศ

$\beta$  = เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของแก๊ส ดังตารางที่ 2.3

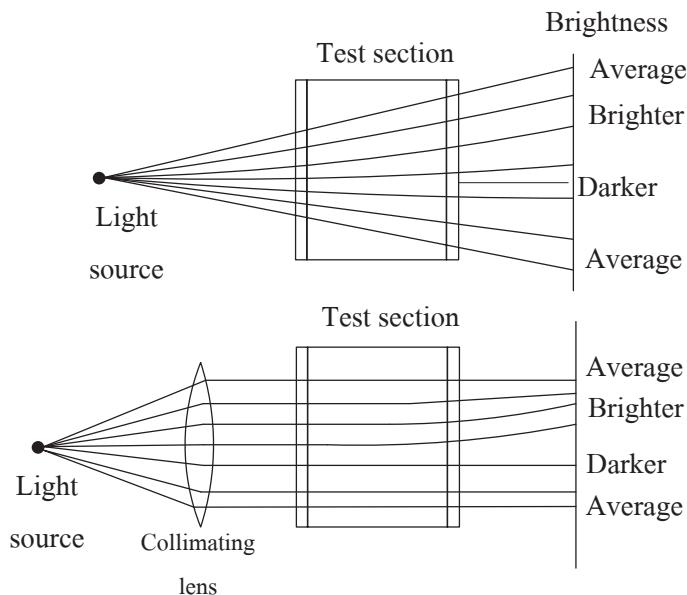
ตารางที่ 2.3 ค่าคงที่ของแก๊ส [45]

Gas	$\beta$
Air	0.000292
Nitrogen	0.000297
Oxygen	0.000271
Water vapor	0.000254
Carbon dioxide	0.000451

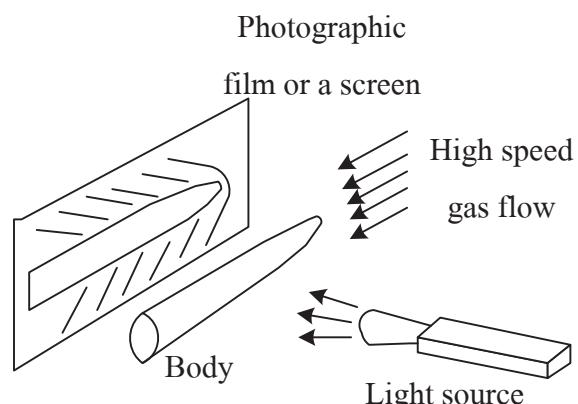
ดังนั้นหากพิจารณาว่า ความหนาแน่นของแก๊สเปลี่ยนแปลงไปในแนวแกน  $y$  ( $d\rho/dy$ ) จะได้ว่า ดัชนีการหักเหของแสงจะเปลี่ยนแปลงในแนวแกน  $y$  ( $dn/dy$ ) เช่นกัน โดยหลักการถ่ายภาพของแต่ละวิธีมีรายละเอียดดังนี้

### 2.5.1 การถ่ายภาพด้วยเทคนิคชาโดว์กราฟ (Shadowgraph technique)

เมื่อพิจารณาการถ่ายแสงผ่านแก๊สในห้องทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.13 ลำแสงจะเกิดการหักเหเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของแก๊ส ถ้าวางจอร์บแสงเพื่อแสดงรูปที่เกิดจากการหักเหของแสงที่เคลื่อนที่ผ่านแก๊สมาจะพบว่า ลำแสงจะเกิดการหักเหโดยบางส่วนจะรวมกันแสงที่ปรากฏที่จ่อจะสว่างมากกว่าปกติ ในขณะที่เมื่อถ่ายภาพจะมีดีดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 เทคนิคการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph

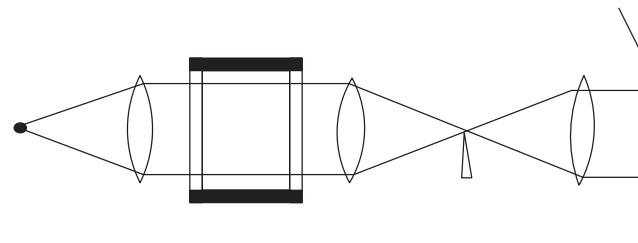


รูปที่ 2.14 การสร้างภาพด้วยเทคนิค Shadowgraph

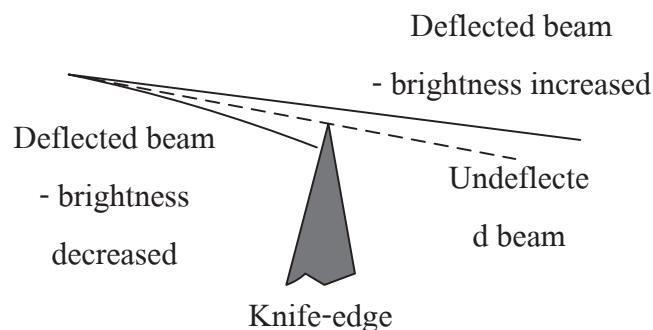
ถ้าพิจารณาการเบี่ยงเบนของลำแสงที่แสดงในรูปที่ 2.13 จะพบว่า ลำแสงที่ส่องผ่านแก๊สนั้น ถ้าไม่มีเลนส์ที่ทำให้แสงนานกันภาพที่ปรากฏบนจอรับภาพจะมีขนาดที่ใหญ่กว่าขนาดของจริง ดังนั้น หากใช้เลนส์จะทำให้ภาพที่ขึ้นที่จอรับภาพมีขนาดเท่ากับขนาดจริง จากสมการของการหักเหของแสง ในสมการที่ 2.20 จะพบว่า การถ่ายภาพด้วยเทคนิค Shadowgraph จะໄວต่อความหนาแน่นที่เปลี่ยนแปลงด้วยความสัมพันธ์  $d^2 \rho / dy^2$  เช่นเดียวกับดัชนีหักเหของแสง  $d^2 n / dy^2$  โดยในธรรมชาตินี้จะสามารถพบรากษณของภาพแบบ Shadowgraph ได้ เช่น แสงแวงวัวจากหลังคาน้ำร้อนในถ้ำร้อนทำให้เกิดภาพการไฟลของความร้อนถึงแม้ว่าจะไม่มีวันบริเวณหลังคาก็ได้ภาพที่เห็นดังกล่าว คือ ภาพแบบ Shadowgraph โดยที่ดวงอาทิตย์ในภาพนี้เป็นแหล่งกำเนิดของแสง

### 2.5.2 การถ่ายภาพเทคนิคไรเรน (Schlieren technique)

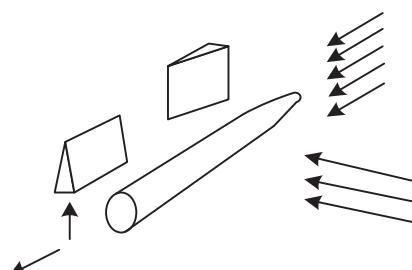
หลักการพื้นฐานของการถ่ายภาพด้วยเทคนิค Schlieren แสดงในรูปที่ 2.15 คือ เมื่อแสงจากแหล่งกำเนิดแสงเดินทางผ่านเลนส์ จะทำให้ลำแสงมีทิศทางนานกันผ่านห้องทดลอง จากนั้นจะส่องผ่านเลนส์อีกตัวซึ่งทำหน้าที่ร่วมแสงไปยังจุดโฟกัสซึ่ง ณ บริเวณนี้จะมี knife-edge วางติดตั้งอยู่ โดย Knife-edge จะทำหน้าที่ตัดแสงที่รบกวนออกไป ลำแสงที่ผ่าน Knife-edge จะสว่างมากขึ้นจึงทำให้รูปที่ปรากฏออกมานั้นมีความคมชัดมากขึ้น ดังรูปที่ 2.16 แสดงหลักการทำงานของ Knife-edge



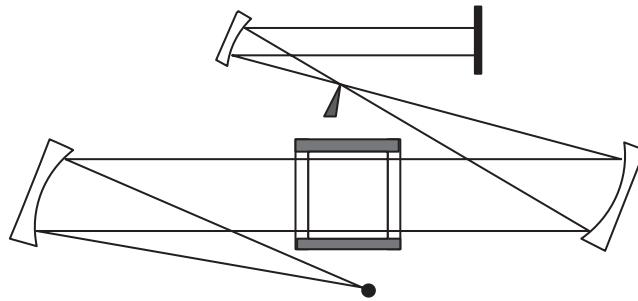
รูปที่ 2.15 พื้นฐานการจัดระบบไรเรน (Schlieren)



รูปที่ 2.16 หลักการทำงานของ Knife-edge



รูปที่ 2.17 ผลจากการเปลี่ยนทิศทางของคอมมีด

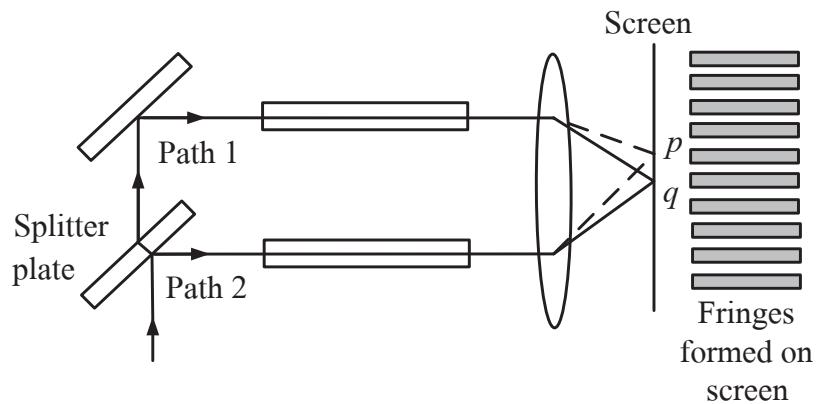


รูปที่ 2.18 ระบบชีโรเรนกับกระจกสะท้อน (Schlieren system with mirrors)

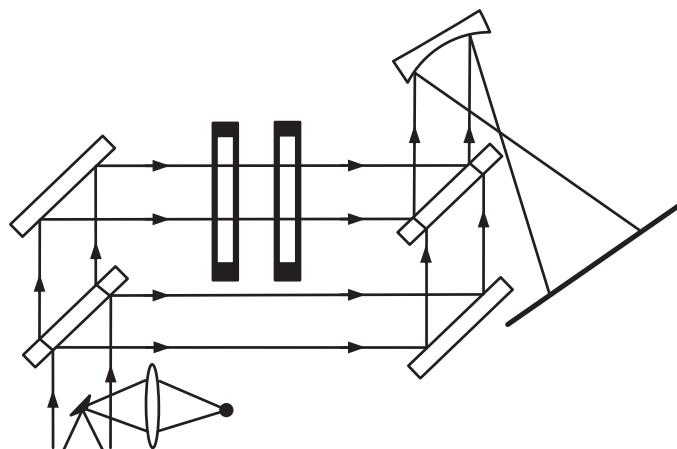
รูปที่ 2.17 แสดงผลจากการเปลี่ยนทิศทางของ knife-edge เมื่อต้องการสังเกตการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของแก๊สในแนวแกน y ให้ปรับ knife-edge ให้อยู่ในแนวแกน x และเมื่อต้องการสังเกตการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของแก๊สในแนวแกน x ให้ปรับ knife-edge ให้อยู่ในแนวแกน y นอกจากจะใช้เลนส์ในการทำให้แสงที่ส่องผ่านห้องทดลองนานแล้วยังสามารถใช้กระจกโค้ง (Parabolic mirror) ได้ซึ่งจะสามารถช่วยลดขนาดพื้นที่ที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในรูปที่ 2.18

### 2.5.3 การถ่ายภาพด้วยเทคนิคօนเทอโรմิเตอร์ (interferometer system)

จากรูปที่ 2.19 แสดงการแยกลำแสงเป็นสองทิศทางโดย splitter plate ซึ่ง splitter plate จะมีคุณสมบัติเป็นกระจกสามารถสะท้อนแสงบางส่วนที่ตกรอบทบและสามารถส่องทะลุผ่านได้ในบางส่วน จึงทำให้เกิดการเดินทางของแสงออกเป็นสองเส้นทาง หากทำให้ลำแสงทั้งสองนานกันดังรูปซึ่งลำแสงสองลำมีระยะทางในการเดินทางต่างกัน จึงทำให้เฟสต่างกัน เมื่อนำลำแสงทั้งสองมาส่องผ่านเลนส์เพื่อร่วมแสงจะทำให้เกิดบริเวณมืดและสว่างบนจอรับแสงที่เรียกว่า Fringes โดยหลักการดังกล่าวคือ หลักการพื้นฐานของการถ่ายภาพด้วยเทคนิคօนเทอโรมิเตอร์



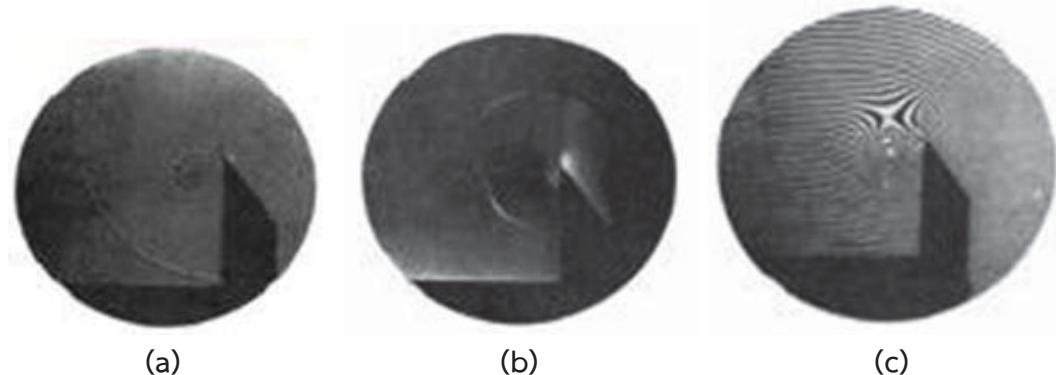
รูปที่ 2.19 ระบบอินเทอเฟอร์มิเตอร์ขั้นพื้นฐานโดยการใช้ beam splitter



รูปที่ 2.20 Mach-Zehnder interferometer.

หากเพิ่มลำแสงอีกคู่หนึ่งให้ส่องผ่านแก๊สที่มีความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงในห้องทดลองดังรูปที่ 2.20 ลำแสงดังกล่าวจะมีเวลาในการเดินทางที่แตกต่างกันออกไปเป็นผลให้รูปแบบ Fringes ที่เกิดขึ้นที่เกิดขึ้นแตกต่างกันไปด้วย เมื่อนำลำแสงทั้งสองสายลงบนจอรับภาพ จะได้ภาพที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงการไหล ซึ่งเป็นหลักการที่เรียกว่า Mach-Zehnder interferometer โดยส่วนใหญ่ระบบอินเทอเฟอร์มิเตอร์ มักจะใช้กระจากแทนการใช้เลนส์ด้วยเหตุผลเดียวกับรูปที่ 2.18

รูปที่ 2.21 แสดงภาพถ่ายจากเทคนิคการถ่ายภาพต่างกันจากการสังเกตพฤติกรรมการไหลในเงื่อนไขเดียวกัน ซึ่งจะพบว่า ภาพถ่ายด้วยเทคนิค Shadowgraph จะสังเกตพฤติกรรมการไหลได้ไม่ชัดเจนเท่ากับภาพถ่ายด้วยเทคนิค Schlieren ในขณะที่ภาพถ่ายด้วยเทคนิค Interferometer จะสังเกตพฤติกรรมการไหลได้จาก Fringes ในภาพได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 2.21 การถ่ายภาพของการไฟลเดียวกันด้วยเทคนิค (a) Shadowgraph photograph, (b) Schlieren photograph และ (c) Interferometer photograph [51]

## 2.6 การประยุกต์ใช้ High-speed liquid jet

ปัจจุบันได้มีการนำเอา high-speed liquid jet มาประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ ดังต่อไปนี้ ดังนี้

### 2.6.1 Water jet cutting technology

ในงานด้าน water jet cutting พบว่า วัสดุที่หลุดออกจากการกัดเชาะของลำพุ่งความเร็วสูงที่ความเร็วเหนือเสียง (supersonic) ไม่ได้เกิดจากความดันแต่เกิดจากความเร็วของกระแสลำพุ่งกัดเชาะเอาอนุภาคหรือเกรนของวัสดุให้หายไป โดยความเร็วของลำพุ่งจะเกิดจากความดันที่อยู่ภายในหัวฉีด ซึ่งหัวฉีดจะมีขนาดเล็กมาก โดยทั่วไปความดันที่ใช้ในอุตสาหกรรมจะมีความดันประมาณ 40 ksi ซึ่งทำให้ได้ลำพุ่งที่ความเร็วเท่ากับ 2 มัค และที่ความดันประมาณ 60 ksi จะให้ความเร็วของน้ำที่ประมาณ Mach no เท่ากับ 3 ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 Water jet cutting technology [46, 47]

### 2.6.2 Water jet cleaning technology

ในงานด้าน water jet cleaning จะเป็นเทคโนโลยีที่ประยุกต์ใช้ลำพุ่งความเร็วสูงเพื่อทำความสะอาดวัสดุมีหลักการคล้ายกับ water jet cutting โดยการใช้ความเร็วของลำพุ่งที่ความเร็วเหนือเสียง (supersonic) เพื่อที่จะขัดสิ่งสกปรกให้ออกไปได้อย่างรวดเร็ว แต่มีความแตกต่างจาก water jet cutting ตรงที่การใช้แรงดันในการผลิตลำพุ่งออกมาและลักษณะของหัวฉีดที่แตกต่างกัน โดยใช้แรงดันของน้ำอยู่ที่ประมาณ 1,500-3,500 psi ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.23



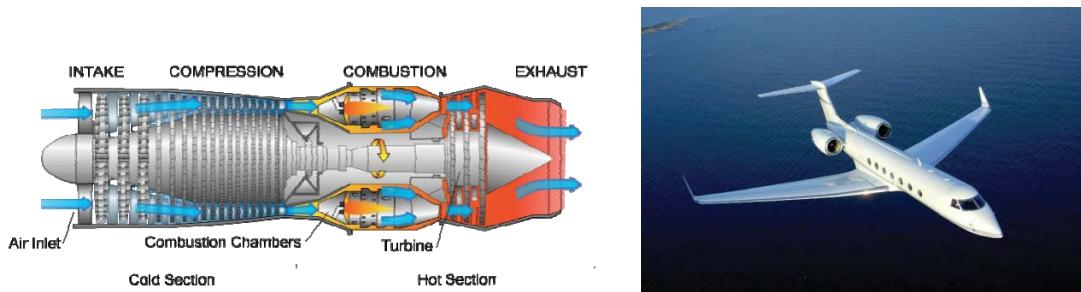
รูปที่ 2.23 Water jet cleaning technology [48]

### 2.6.3 Needleless technology

ปัจจุบันของเข็มฉีดยานั้นมีมากมาย โดยเฉพาะในประเทคโนโลยีกำลังพัฒนาและประเทคโนโลยีพัฒนาไม่ว่าจะเป็นการขาดแคลนตัวอุปกรณ์ของขาดความพิถีพิถันเรื่องความสะอาดและสุขอนามัย ประมาณ 30% ของจำนวนครั้งที่มีการฉีดยานั้นไม่ปลอดภัย นอกจากนี้ยังมีรายงานการติดเชื้อจากเข็มฉีดยาที่ไม่สะอาด ส่งผลถึงขั้นเสียชีวิตอีกเป็นจำนวนมากถึง 1.3 ล้านคนทั่วโลก แต่ถึงอย่างไรเข็มฉีดยาที่ยังเป็นสิ่งจำเป็นในการป้องกัน (วัคซีน) และรักษาโรค ในบางประเทศด้วยพัฒนาที่มีอุปกรณ์ทางการแพทย์มีอยู่อย่างจำกัด ด้วยความรู้เท่าไม่ถึงการณ์และความเพิกเฉย เข็มฉีดยาถูกนำมาใช้ซักกับผู้ป่วยหลายๆ คนโดยปราศจากการฉีดเชื้อ (ที่ควรจะต้องผ่านความร้อน 121 °C เป็นเวลา 20 นาที ในแต่ละครั้งที่นำมาใช้) นอกจากนี้เข็มที่ใช้แล้วยังถูกกำจัดอย่างไม่เหมาะสม ซึ่งที่มาของแนวคิดเข็มฉีดยาแบบไม่ต้องใช้เข็มหรือ needle-free injectors (NFIS) ซึ่งมีหลักการทำงานอย่างเดียวกันแต่ไม่ต้องพึ่งเข็มแต่ใช้หัวฉีด (nozzle orifice) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 76-360 ไมโครเมตรอร์ เป็นตัวลำเลียงยาแทน ซึ่งสามารถส่งผ่านด้วยยาเข้าไปได้ผ่านหู ไปสู่ชั้นไขมันหรือกล้ามเนื้อได้อย่างง่ายดายด้วยความเร็ว 100 m/s (ขึ้นอยู่กับความหยาบและหนาของผิวหนัง รวมถึงบริเวณที่ฉีดด้วย) นอกจากนี้ การกำจัดก็เป็นเรื่องง่ายไม่ต้องใช้ถังเก็บขยะแหลมคม (sharps container) ไม่ต้องกังวลเรื่องการสเตริลล์เสียเข็มที่ไม่เหมาะสมหรือการใช้เข็มฉีดยาร่วมกัน



ຮູບທີ 2.24 Injectors injectors [49]



รูปที่ 2.25 Jet engine technology [50]

#### 2.6.4 Jet engine technology

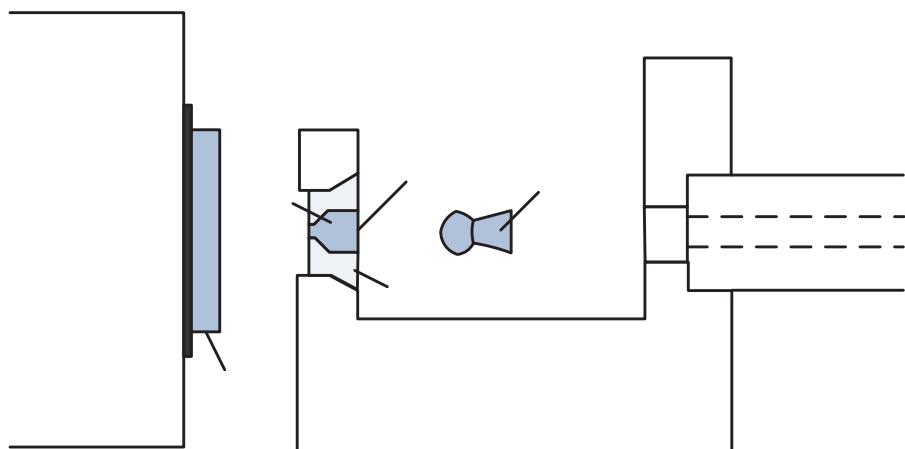
จากรูปที่ 2.25 แสดง Jet engine technology ซึ่งเครื่องยนต์ jet เป็นเครื่องจักที่ถูกออกแบบมาเพื่อให้ผลิตหรือสร้างแก๊สที่มีความเร็วสูงให้ผ่านช่องที่กำหนด โดยเครื่องยนต์เริ่มต้นการหมุน compressor ด้วย starter อากาศจากภายนอกเครื่องยนต์ก็จะถูกดูดเข้าเครื่องยนต์ compressor ก็จะทำงานกับอากาศที่เข้ามาและก็จะส่งอากาศที่อัดผ่าน compressor นี้ ต่อไปยังส่วนของห้องเผาไหม้ ซึ่งจะมีความดันเพิ่มขึ้นมากถึง 12 เท่าของอากาศก่อนที่จะผ่านเข้าเครื่องยนต์ ในส่วนของห้องเผาไหม้หัวจุดไฟ (igniter) ก็จะทำการจุดเครื่องยนต์ โดยจุดส่วนผสมของน้ำมันเชื้อเพลิง และอากาศในห้องเผาไหม้ หัวจุดไฟจะมีหนึ่งหรือสองหัว ซึ่งก็คล้ายกับหัวเทียนในรถยนต์ เมื่อเครื่องยนต์ติดหรือทำงานแล้วและ compressor หมุนด้วยความเร็วที่เพียงพอตามที่กำหนด แล้ว starter และ igniters ก็จะถูกปิดหรือเลิกใช้ ต่อจากนั้นเครื่องยนต์ก็จะทำงานด้วยตัวเอง โดยไม่ต้องได้รับความช่วยเหลือจาก starter และ igniters อีกต่อไป ทราบเท่าที่น้ำมันเชื้อเพลิงและอากาศผสมในอัตราส่วนที่ถูกต้องยังไห้เข้าห้องเผาไหม้อ่าย่างต่อเนื่องเพียง 25% ของอากาศ ที่มีส่วนใช้ในการเผาไหม้ที่ห้องเผาไหม้ส่วนอากาศที่เหลือก็จะผสมกับแก๊สไออกไซเดียมหรือแก๊สที่ผ่านการเผาไหม้เพื่อลดอุณหภูมิของแก๊สไออกไซเดียมหรือแก๊สที่ผ่านการเผาไหม้ก่อนที่แก๊สไออกไซเดียมจะเข้าไปยังส่วนของกังหัน (turbine) ส่วนของกังหันก็จะนำเอาพลังงานจากการแสงของแก๊สที่เหลือผ่านมาใช้ประโยชน์ พลังงานส่วนใหญ่ก็จะถูก

นำเอาไปใช้ในการหมุน compressor และอุปกรณ์ต่างๆ แรงขับของเครื่องยนต์ (thrust) ก็มาจากการเอามวลของอากาศจำนวนมากจากด้านหน้าของเครื่องแล้วก็ดันมันออกไปด้วยความเร็วที่สูงมาก เมื่อเทียบกับความเร็วเมื่อตอนที่เข้ามาที่ด้านหน้าหรือที่ compressor หากสามารถนีดามันที่ความเร็วสูงมากเท่าได้ก็จะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ดีขึ้นเท่านั้น ส่งผลให้เครื่องบินที่ติดตั้งเครื่องยนต์ Jet สามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยความเร็วสูงขึ้นนั่นเอง

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ High-speed liquid jet

ปัจจุบันได้มีนักวิจัยจำนวนมากได้พยายามศึกษาเกี่ยวกับลำพุ่งความเร็วสูงโดยศึกษาเกี่ยวกับคุณลักษณะและความเร็วของลำพุ่งซึ่งมีรายละเอียดพอสังเขปดังนี้

ในปี ค.ศ.1958, Bowden, F.P. และ Brunton, J.H. [37] ได้คิดค้นเทคนิคใหม่ในการผลิตลำพุ่งความเร็วสูง โดยวิธีนี้จะยิงกระสุนความเร็วสูง (high-speed projectile) เข้าไปกระแทกกับของเหลวปริมาตร  $0.1 \text{ cm}^3$  ซึ่งบรรจุอยู่ในหัวฉีด (nozzle) ที่ทำด้วย stainless steel ถูกผนึกด้วยแผ่น Neoprene ดังแสดงในรูปที่ 2.28 จากการทดสอบพบว่า ลำพุ่งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1-2 mm เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ความดันของของเหลวนั้นจะมีค่าสูงขึ้นหลังจากนั้นของเหลวจะฉีดออกมายังหัวฉีดด้วยความเร็วสูงที่ความเร็วเท่ากับ  $1,200 \text{ m/s}$  โดยการผลิตลำพุ่งความเร็วสูงด้วยเทคนิคนี้ถูกเรียกว่า impact driven method หรือเรียกตามชื่อนักวิจัยว่า Bowden and Brunton method ดังแสดงในรูปที่ 2.26 ซึ่งจากนั้นเป็นต้นมา เทคนิคนี้เป็นที่นิยมใช้ในการผลิตลำพุ่งความเร็วสูงในงานวิจัยต่างๆ



รูปที่ 2.26 Bowden and Brunton method [37]

ในปี ค.ศ.1992, H. H. Shi และคณะ [15] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับลำพุ่งของเหลวความเร็วสูง รวมทั้งลักษณะของ shock wave ที่เกิดขึ้นจากลำพุ่ง นอกจากนี้ยังศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการ

เกิด auto-ignition ของลำพุ่งน้ำมันดีเซลความเร็วเหนือเสียง โดยการผลิตลำพุ่งด้วยเทคนิค impact driven method โดยสามารถผลิตลำพุ่งได้ความเร็วสูงสุดเท่ากับ 4.5 km/s และทำการอธิบายคุณลักษณะของลำพุ่งที่ผลิตได้ด้วยการถ่ายภาพด้วยเทคนิค interferometer นอกจากนี้ยังได้ทำการเปรียบเทียบการผลิตลำพุ่งจากการกระแทก 2 วิธี คือ แบบกระแทกโดยตรง และแบบกระแทกผ่านตัวกลาง ซึ่งพบว่า ความเร็วของลำพุ่งที่ใช้วิธีแบบกระแทกขับผ่านตัวกลางจะช้ากว่าและจะใช้เวลามากกว่าแบบกระแทกแบบขับโดยตรง นอกจากนี้ยังพบการจุดติดไฟด้วยตัวเองสำหรับลำพุ่งน้ำมันดีเซลที่ความเร็วสูงกว่า 2 km/s จากภาพถ่าย

ในปี ค.ศ.1995, T. Obara และคณะ [19] ได้ทำการทดลองการกระแทกของลำพุ่งลงบนของเหลวและของแข็ง ซึ่งในการทดลองนี้ใช้ลำพุ่งของเหลวขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 mm จากชุดทดลอง single impact jet ที่ความเร็วในการกระแทกเท่ากับ 600 m/s ลำพุ่งจะกระแทกบนพื้นผิวของน้ำโดยมี polymethyl-methacrylate (PMMA) วางห่างทางออกของหัวฉีดที่ระยะ 15 mm และวัดความดันโดยใช้ Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Film นอกจากนี้ยังถ่ายภาพโดยใช้ image-converter high-speed camera จากภาพแสดงให้เห็นการเกิด shock wave, cavitation และฟองอากาศ จากการทดลองสรุปได้ว่า การกระแทกระหว่างลำพุ่งกับน้ำจะทำให้เกิดกลุ่ม cavitation ซึ่งจะเกิดขึ้นและยุบตัวอย่างรวดเร็วและอาจจะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดความเสียหายบนวัสดุ ส่วนลำพุ่งที่กระแทกบนพื้นผิวของแข็ง พบว่า พื้นผิว PMMA เกิดเป็นรู ซึ่งความเสียหายนั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดของลำพุ่ง และค่าความดันที่วัดโดยใช้ PVDF นั้นจะสอดคล้องกับสมการ water-hammer

ในปี ค.ศ.2002, K. Pianthong และคณะ [51] ได้ศึกษาคุณลักษณะลำพุ่งความเร็วสูงของน้ำและน้ำมันดีเซล (high-speed liquid jet) จากชุดทดลองที่เรียกว่า vertical single-stage powder gun และศึกษาถึงอิทธิพลของความเร็วกระสุนปืน มวลของดินปืนและรูปทรงของหัวฉีด ที่มีผลต่อความเร็วลำพุ่ง โดยจากถ่ายภาพด้วยเทคนิค Shadowgraph จะแสดงให้เห็นในแต่ละช่วงของการเกิดลำพุ่ง จากผลการทดลองพบว่า สามารถผลิตลำพุ่งความเร็วสูงสุดที่ได้เท่ากับ 2,195 m/s และ 2,150 m/s จากลำพุ่งน้ำมันดีเซลและน้ำ ตามลำดับ เมื่อใช้หัวฉีดที่แข็งขึ้นความเร็วสูงสุดของที่ลำพุ่งน้ำมันดีเซลก็จะมีค่าสูงขึ้นโดยมีค่าเท่ากับ 2,500 m/s และสังเกตเห็นลักษณะลำพุ่งเป็นลักษณะของหยดน้อยกว่าอย่างเห็นได้ชัดและมีการกระจายเป็นไอروبุ แกนลำพุ่ง ต่อมาในปี ค.ศ.2003, K. Pianthong และคณะ [52] ยังศึกษาคุณลักษณะลำพุ่งน้ำและดีเซลความเร็วสูงที่มีความเร็วเหนือเสียง (supersonic liquid jet) เพิ่มเติม โดยลำพุ่งความเร็วสูงถูกผลิตจากชุดทดลองที่เรียกว่า single-stage powder gun ที่สร้างขึ้นมาใช้งานในแนวตั้ง โดยในการศึกษานี้คุณลักษณะและพฤติกรรมของ supersonic liquid jet ถูกถ่ายภาพโดยใช้เทคนิค Shadowgraph และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างรูปทรงหัวฉีดที่ใช้กับพฤติกรรมของลำพุ่งที่ฉีดในอากาศที่ความเร็วประมาณ 2 km/s จากผลการทดลองพบว่าลักษณะพฤติกรรมของลำพุ่ง ลักษณะของ shock wave และรูปร่างของลำพุ่งเป็นผลมาจากการรูปทรงของหัวฉีดที่แตกต่างกัน กระบวนการเกิดลำพุ่งแบบ pulse ถูกวิเคราะห์ในหัวฉีดโดยใช้การวิเคราะห์ที่ 1 มิติ ซึ่งพบว่ามีความสอดคล้องกับภาพถ่ายของลำพุ่งจาก shadowgraph image นอกจากนี้ยังใช้การคำนวณของไอลผลศาสตร์ (CFD) ในการจำลองการเกิดลำพุ่งและทำการเปรียบเทียบกันมุ่งของ shock wave ที่ได้กับการทดลอง ซึ่งพบว่า มีความสอดคล้องกันถึงแม้ว่ารูปร่างของลำพุ่งจะแตกต่างกันก็ตาม นอกจากนี้ยังทำการศึกษาการจุดติดไฟของลำพุ่งดีเซลความเร็วเหนือเสียงที่ความเร็ว 2

km/s ที่สภาวะอากาศปกติและอุณหภูมิ  $110^{\circ}\text{C}$  โดยใช้น้ำมันดีเซลที่ cetane number ระหว่าง 50 – 100 จากการตรวจสอบ ไม่พบการเกิด auto-ignition อย่างที่อ้างถึงในงานวิจัยของ H.H. Shi [15]

ในปี ค.ศ.2007, A.Matthujak และคณะ [53] ได้ศึกษาการเกิดลำพุ่งความเร็วสูง (high-speed liquid jets) โดยใช้วิธีการผลิตลำพุ่งความเร็วสูงที่เรียกว่า impact driven method จากชุดทดลอง vertical two-stage light gas gun ที่ออกแบบและสร้างขึ้น นอกจากจะศึกษาคุณลักษณะของลำพุ่งแล้วยังได้ทำการวัดความดันของเหลวในหัวฉีดด้วย optical fiber pressure transducer ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.1 แตรกอยู่ในหัวฉีด ซึ่งพบว่า ความดันที่เกิดขึ้นในการขับลำพุ่งค่าสูงถึง  $1.24 \text{ GPa}$  จากการกระแทกของกระสุนปืน ในการทดลองนี้ได้สร้างหัวฉีดอะคิลิคขนาด  $10.6 \text{ mm} \times 10.6 \text{ mm}$  เพื่อใช้ในการศึกษาพฤติกรรมภายในหัวฉีดระหว่างการผลิตลำพุ่งโดยการถ่ายภาพด้วยเทคนิค holographic interferometry พบว่า มี shock wave ที่เกิดขึ้นภายในหัวฉีดเป็นสาเหตุหลักในการขับลำพุ่ง และใช้การถ่ายภาพด้วยเทคนิค holographic interferometry รวมทั้ง high speed video camera ร่วมกับการถ่ายภาพด้วยเทคนิค shadowgraph ในการถ่ายภาพลำของเหลว 5 ชนิด คือ น้ำ น้ำมันดีเซล ไบโอดีเซล น้ำมันก้าดและน้ำมันเบนซิน โดยความเร็วที่ผลิตได้สูงสุดจะอยู่ในช่วง  $1.3 \text{ km/s}$  ถึง  $2.3 \text{ km/s}$  และพบว่า คุณลักษณะของลำพุ่งจะมีลักษณะแตกต่างกันเมื่อชนิดของลำพุ่ง ต่างกัน นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาการเกิด auto-ignition ของลำพุ่งน้ำมันในอากาศ จากการวัดความดันและการถ่ายภาพด้วยเทคนิค holographic interferometry ซึ่งไม่มีการเกิด auto-ignition ขึ้นเลย

ในปี พ.ศ.2550, วิระพันธ์ สีหานามและคณะ [54] ได้ศึกษาคุณลักษณะพื้นฐานของลำพุ่งเชือเพลิงความเร็วสูง โดยใช้การคำนวณของไฟลเพลสตาเตอร์ (CFD) ในการจำลองการฉีดของน้ำมันก้าด โดยในแบบจำลองประกอบด้วยของเหลว 2 ชนิด คือ น้ำมันก้าด และอากาศ ความเร็วเริ่มแรกของเชือเพลิงอยู่ที่  $1,300 \text{ m/s}$  โดยลำพุ่งจะพุ่งออกสู่อากาศที่อยู่นิ่ง โดยการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของของเหลวจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา ในการศึกษานี้สนใจพิจารณาระยะการเคลื่อนที่ของลำพุ่งในอากาศ และความเร็วของลำพุ่ง ผลจากการศึกษาพบว่า ผลการศึกษาจาก CFD และการทดลองให้ผลใกล้เคียงกัน โดยลำพุ่งจะมีความเร็วต่ำลงและระยะทางการเคลื่อนที่ในอากาศลดลงหลังจากลำพุ่งเคลื่อนที่ผ่านไป  $200 \mu\text{s}$  เนื่องจากการแตกเป็นฝอยละเอียงของลำพุ่ง นอกจากนี้แรงต้านจากอากาศก็เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ลำพุ่งมีความเร็วลดลงเช่นกัน ผลการศึกษาทำให้เข้าใจคุณลักษณะของลำพุ่งเชือเพลิงความเร็วสูงได้ดียิ่งขึ้นและข้อมูลที่ได้ถือเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการพัฒนาในระดับต่อไป

จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับลำพุ่งความเร็วสูงที่ผ่านมา พบว่า การศึกษาคุณลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูงนั้นจะเป็นการศึกษาในกรณีที่ฉีดลำพุ่งเข้าไปในอากาศหรือสถานะแก๊สเท่านั้น แต่การฉีดลำพุ่งเข้าไปใน condensed media นั้นยังมีการศึกษาน้อยมาก โดยในปี ค.ศ.1996, Hitoshi Soyama และคณะ [43] ได้ศึกษาคุณลักษณะของลำพุ่งที่ฉีดในน้ำโดยพบว่ามีกลุ่ม cavitation เกิดขึ้นอย่างรุนแรงรอบๆ ลำพุ่ง ซึ่งคุณลักษณะของลำพุ่งถูกถ่ายภาพโดยใช้วิธี shadowgraph-type และ reflective-type ร่วมกับแหล่งกำเนิดแสง xenon flash ในการทดลองนี้ใช้หัวฉีด 3 แบบ คือ horn nozzle, canonical nozzle และ cylindrical nozzle ลำพุ่งที่ถูกถ่ายภาพได้จะนำมาศึกษาอย่างละเอียด และทำการวัดความดันซึ่งจะวัดโดยวิธีการใช้แผ่นที่ไวต่อความดัน (pressure-sensitive film) ผลกระทบของการฉีดแรงดันและการออกแบบหัวฉีดจะทำให้เข้าใจมากขึ้น จากการถ่ายภาพทำให้เห็น

ความแตกต่างระหว่างลำพุ่งที่ฉีดในอากาศกับลำพุ่งที่ฉีดในน้ำ โดย cavitation ที่เกิดขึ้นจากลำพุ่งที่อยู่ในน้ำนำไปสู่การกัดกร่อนจากการกระแทกโดยตรงของตัวลำพุ่งจะทำให้ความแข็งแรงของวัสดุลดลง ดังนั้นพฤติกรรมกระเจยตัวของลำพุ่งความเร็วสูงที่อยู่ในน้ำสามารถนำอธิบายถึงการกัดกร่อนที่รุนแรงได้ เพื่อนำไปพิจารณาหาวิธีการที่จะทำให้พฤติกรรมกระเจยตัวของลำพุ่งความเร็วสูงที่เกิดขึ้นนั้นนำมาใช้ประโยชน์มากที่สุด จากการทดลองสรุปได้ว่าลักษณะของลำพุ่งที่ฉีดในน้ำจะทำให้เกิดพฤติกรรม cavitation และคุณลักษณะของลำพุ่งที่ฉีดในน้ำจะแตกต่างกันมากกับลำพุ่งที่ฉีดในอากาศ แรงดันเฉียบพลันที่เกิดขึ้นรอบๆ ลำพุ่งที่ฉีดในน้ำมีค่าสูงสุด คือ horn nozzle และมีค่าต่ำสุดคือ canonical nozzle ผลลัพธ์ของพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจะไม่แน่นอนเนื่องมาจากรูปแบบของหัวฉีด

ในปี 2009, K. Otani และคณะ [55] ได้ศึกษาคุณลักษณะของลำพุ่งในน้ำโดยผลิตลำพุ่งจาก Ho: YAG Laser โดยศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการเจาะหินทรายใต้น้ำ ด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph จากรูปที่ได้พบว่า ความเร็วของลำพุ่งมีค่าประมาณ 40 m/s นอกจานี้ยังวัดความดันกระแทกที่เกิดขึ้น โดยใช้ PVDF needle hydrophone พบว่า ความดันของ shock wave มีค่าประมาณ 22.7 MPa และพบการยุบตัวของ water vapor bubble ที่ทำให้เกิด shock wave นอกจานี้ยังพบว่าลำพุ่งที่ผลิตได้สามารถเจาะแผ่นหินทรายใต้น้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

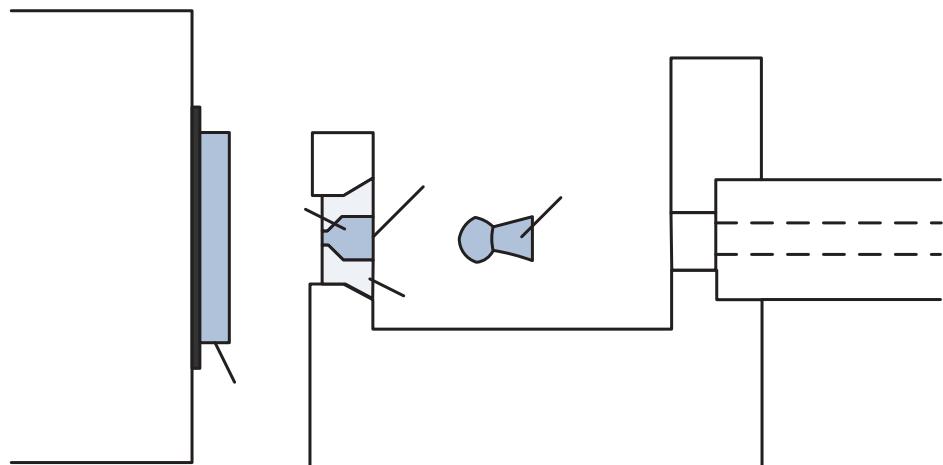
จากการวิจัยที่ผ่านมา พบว่า ความเร็วของลำพุ่งในน้ำที่ศึกษานั้นมีความเร็วต่ำ เนื่องจากข้อจำกัดของเทคนิคในการผลิตลำพุ่ง ดังนั้นคุณลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูงใน condensed media จึงยังไม่ได้ทำการศึกษาและอธิบายอย่างชัดเจน

### บทที่ 3

#### สมรรถนะของชุดทดลองยิงกระสุนความเร็วสูง

##### 3.1 บทนำ

ในการศึกษานี้การผลิตลำพุ่งความเร็วสูงจะใช้เทคนิคที่เรียกว่า impact driven method หรือ Bowden and Brunton method ดังรูปที่ 3.1 [37] ซึ่งเรียกตามหลักการในการผลิตลำพุ่งจาก การยิงกระสุนปืนความเร็วสูง (high-speed projectile) เข้าไปกระแทกกับของเหลวซึ่งบรรจุอยู่ใน หัวฉีด (nozzle) โดยมีการตั้มของกระสุนปืนจะทำให้ความดันของของเหลวมีค่าสูงขึ้นจนกระทั่งความ ดันประมาณ GPa จากนั้นของเหลวจะฉีดออกมายังหัวฉีดด้วยความเร็วสูง ซึ่งเป็นการฉีดลำพุ่งจาก การกระแทกของกระสุนนั้นเอง ซึ่งจะเห็นได้ว่า กระสุนปืนความเร็วสูงมีความจำเป็นสำหรับการผลิตลำ พุ่งด้วยเทคนิค ซึ่งในการศึกษานี้จะยิงกระสุนปืนความเร็วสูงหรือผลิตลำพุ่งความเร็วสูงจากชุดทดลอง ที่เรียกว่า Horizontal Single Stage Powder Gun (HSSPG) ดังรูปที่ 3.2 โดยในบทนี้จะศึกษาถึง สมรรถนะของชุดทดลองและความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของดินปืนกับความเร็วของกระสุนปืนที่ผลิต ได้เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการผลิตลำพุ่งในการศึกษานี้



รูปที่ 3.1 Impact driven method หรือ Bowden and Brunton method [37, 38]

##### 3.2 ชุดทดลอง Horizontal single-stage powder gun

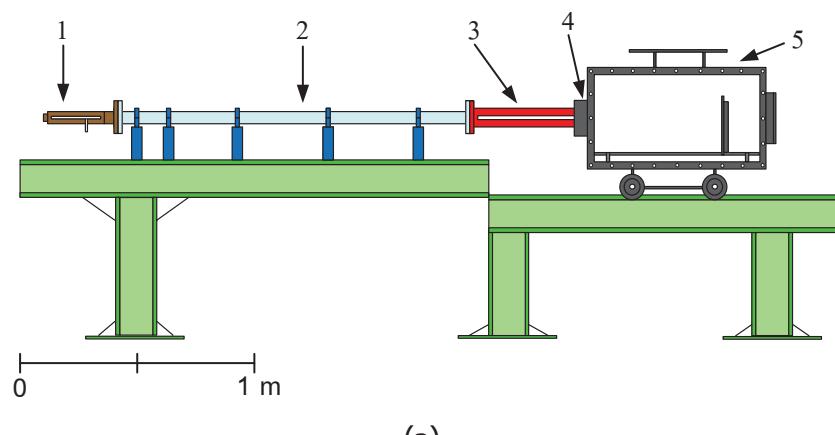
ดังรูปที่ 3.2 แสดงชุดทดลอง Horizontal Single Stage Powder Gun (HSSPG) ที่ถูกสร้าง ขึ้นในแนวนอน ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญ 5 ส่วน คือ

1. ชุดปล่อยกระสุนปืน (launcher หรือ powder gun) ทำหน้าที่คล้ายปืน โดยเป็นตัวขับ กระสุนปืนซึ่งแรงขับเกิดจากการจุดระเบิดของดินปืนในห้องเผาไหม้ จะประกอบด้วยเข็มแทงชานวน (firing pin) ทำหน้าที่กระแทกชนวน (primer) ที่อยู่ส่วนท้ายของปลอกกระสุนซึ่งบรรจุดินปืนภายใน โดยดินปืนที่ใช้เป็นชนิดที่มีคุณน้อย (smokeless powder) โดยมีรายละเอียดการออกแบบดังแสดง ในภาคผนวก ก

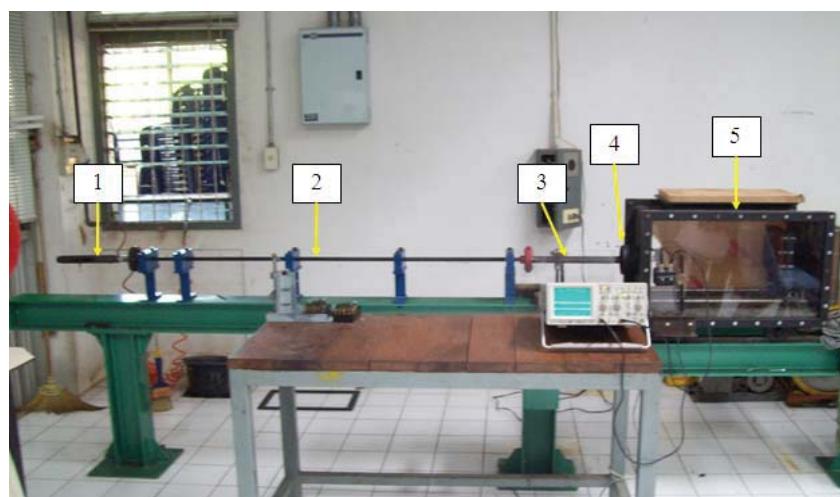
2. ท่อส่งกระสุนปืน (launch tube) ทำหน้าที่คล้ายลำกล้องปืน ใช้ควบคุมทิศทางในการขับกระสุนปืนและเพิ่มความเร็วของกระสุนปืนก่อนที่จะไปยังท่อระบายน้ำดัน มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 8 mm ยาว 1.5 m ที่ส่วนปลายด้านหนึ่งของท่อจะยึดติดกับท่อระบายน้ำดัน (pressure relief section)

3. ท่อระบายน้ำดัน (pressure relief section) ทำหน้าที่ระบายน้ำแรงอัดอากาศที่อยู่ส่วนหน้าของกระสุนปืนที่ถูกอัดในท่อ เพื่อลดแรงต้านและแรงแรงอัดภายในท่อส่งกระสุนปืนและป้องกันอากาศกระแทกบนของเหลวที่บรรจุในหัวฉีดก่อนการกระแทกของกระสุนปืน มีความยาว 40 cm เจาะเป็นช่องขนาด 3 mm ตามแนวยาวทั้ง 4 ด้าน

4. ส่วนประจุหัวฉีด (nozzle assembly) ทำหน้าที่ยึดจับหัวฉีดไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ระหว่างทำการทดลอง ซึ่งถูกติดตั้งระหว่างห้องทดสอบกับท่อระบายน้ำดัน



(a)



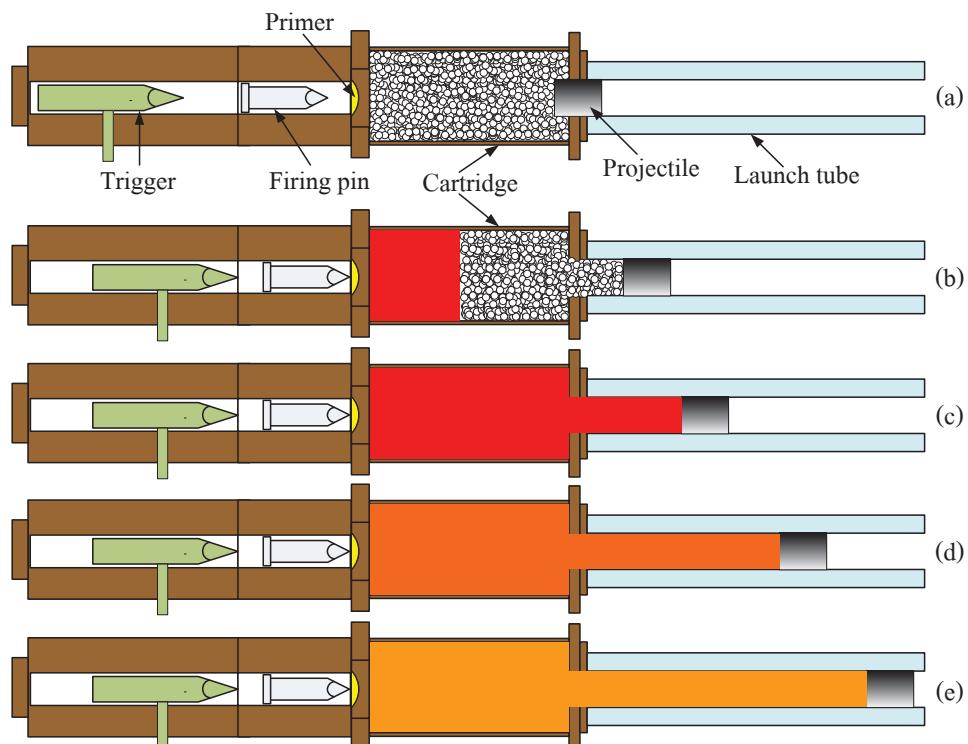
(b)

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

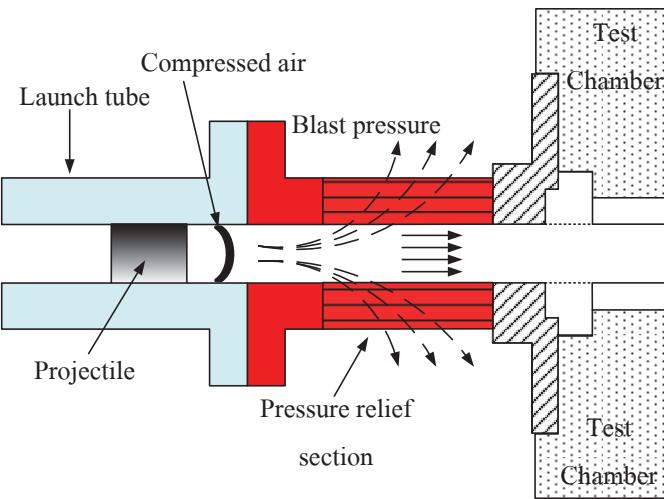
5. ห้องทดสอบ (test chamber) ได้ถูกออกแบบให้เป็นถังรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าหนา 5 mm มีขนาดกว้าง 39.5 cm ยาว 60 cm และสูง 35 cm ฝ้าด้านข้างทั้งสองด้านเป็นแผ่นอะคริลิคใส หนา 25 mm ใช้เป็นหน้าต่างสำหรับสังเกตพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในการเก็บข้อมูลการทดลอง

### 3.3 วิธีทำการทดลอง

จากรูปที่ 3.3 แสดงขั้นตอนการยิงกระสุนปืนของชุดทดลอง HSSPG ก่อนทำการยิงกระสุนปืน จะทำการซั่งดินปืนน้ำหนัก ชั่งน้ำหนักของกระสุนปืนซึ่งจะมีน้ำหนัก 0.92 g ทำการใส่ดินปืนและบรรจุกระสุนปืนในปลอกกระสุน (cartridge) ซึ่งลึกจากด้านหน้าของปลอกกระสุนประมาณ 10 mm โดยที่ตัวจุดระเบิดจะติดอยู่ท้ายของปลอกกระสุน จากนั้นนำมาประกอบกับชุดปล่อยกระสุน (launcher) จากรูปที่ 3.3(a) จะเป็นขั้นตอนก่อนจุดระเบิด โดยภายในปลอกกระสุน (cartridge) จะมีดินปืนชนิดไร้ควัน (smokeless powder) อยู่เต็มระบบทอก ซึ่งกระสุนปืนจะอยู่ระหว่างปลอกกระสุนกับท่อส่งกระสุนปืน (launch tube) และจะมีตัวจุดระเบิด (primer) อยู่ส่วนท้ายของปลอกกระสุน เมื่อเข้มแรงขวนกระแทกตัวจุดระเบิดจะทำให้เกิดการเผาไหม้ของดินปืนภายในปลอกกระสุน ดังรูปที่ 3.3(b) หลังจากนั้นดินปืนจะเผาไหม้จนหมดอย่างรวดเร็วและทำให้เกิดความดันที่สูงมากภายในปลอกกระสุน จนทำให้กระสุนปืนเคลื่อนที่ออกไปข้างหน้าภายในท่อส่งกระสุนปืนดังรูปที่ 3.3(c) หลังจากที่กระสุนปืนเคลื่อนที่ไปข้างหน้าซึ่งเป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นในการยิงกระสุนในชุดทดลอง จากนั้นความดันภายในกระบอกปืนและท่อส่งกระสุนปืนจะมีความดันลดลงจนมีความดันปกติ ดังรูปที่ 3.3(d-e) ซึ่งถือว่าสิ้นสุดการทำงานของชุดทดลอง (รายละเอียดวิธีทำการทดลองแสดงในภาคผนวก ข)

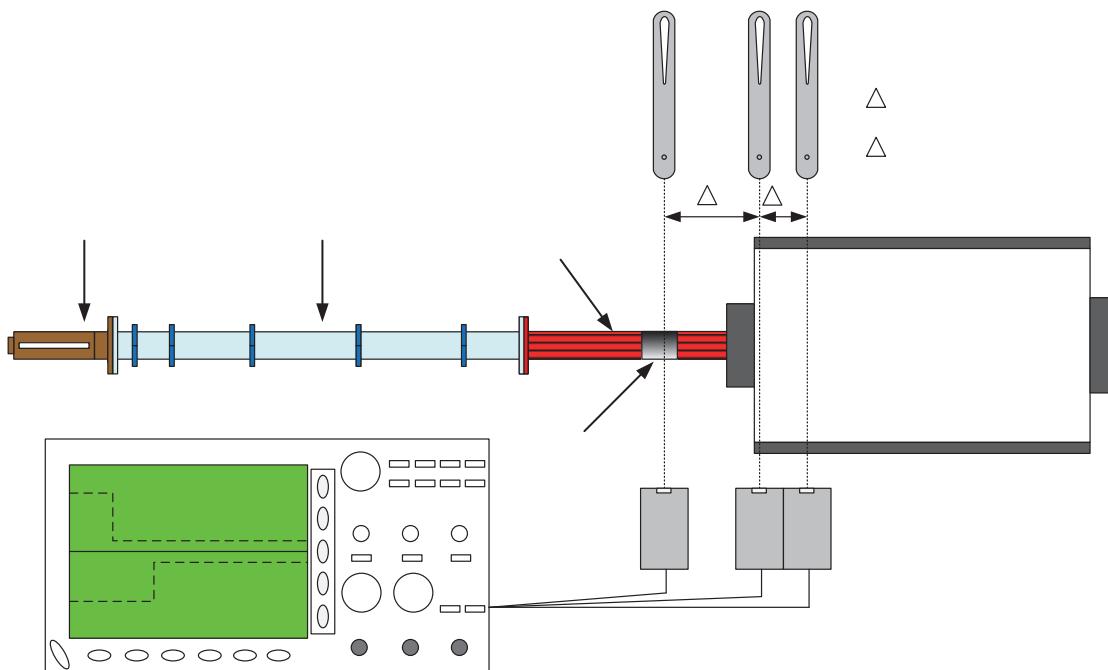


รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการยิงของชุดทดลอง HSSPG : (a) ก่อนจุดระเบิด, (b) การจุดระเบิด, (c) ดินปืนเผาไหม้หมด, (d) หลังจากดินปืนเผาไหม้หมด และ (e) การยิงกระสุนปืน



รูปที่ 3.4 การระบายอากาศด้านหน้ากระสุนปืน

รูปที่ 3.4 แสดงการระบายอากาศด้านหน้ากระสุนปืน เมื่อกระสุนปืนความเร็วสูงเคลื่อนที่ตามท่อส่งกระสุนปืน (launch tube) มาจนกระทั่งถึงท่อระบายความดัน (pressure relief section) จะพบว่า ท่อระบายความดันจะช่วยระบายแรงอัดอากาศที่อยู่ส่วนหน้าของกระสุนปืนออกจากท่อ เพื่อลดแรงต้านและป้องกันไม่ให้อากาศกระแทกของเหลวในหัวฉีดก่อนการระแทกของกระสุนปืน



รูปที่ 3.5 การวัดความเร็วกระสุนปืนด้วยเทคนิค time of flight method

### 3.4 การวัดความเร็วของกระสุนปืน

การวัดความเร็วของกระสุนปืนในการทดลองนี้ใช้หลักการการตัดเลียเซอร์ของวัตถุ (laser beam interruption method) หรือ time of flight method โดยใช้ไดโอดกำเนิดแสงเลียเซอร์ และไดโอดรับแสงจำนวน 3 ชุด โดยต่อสัญญาณ sensor เข้ากับ oscilloscope เพื่ออ่านสัญญาณไฟฟ้าจากไดโอดรับแสงและแสดงผลบนหน้าจอ ซึ่งเป็น dual trace oscilloscope (อุปกรณ์ลิสโคปสองชานแนล) จำนวน 2 เครื่อง โดยเครื่องที่ 1 ใช้กับสัญญาณ sensor ชุดที่ 1 กับ 2 และเครื่องที่ 2 ใช้กับสัญญาณ sensor ชุดที่ 2 และ 3 โดยในการทดลองนี้ได้จัดวางระยะห่างของ Sensor ชุดที่ 1 กับ 2 ไว้ที่ระยะ 105 mm และ sensor ชุดที่ 2 กับ 3 ไว้ที่ระยะ 33 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งเทคนิคนี้สามารถวัดความเร็วของลำพุ่งได้เช่นกัน

เมื่อทำการทดลองยิงกระสุนปืนแล้ว sensor ก็จะสามารถจับสัญญาณของกระสุนหรือลำพุ่งที่ออกจากหัวฉีดได้ โดยสัญญาณจะแสดงบนเครื่อง oscilloscope ดังรูปที่ 3.6 จากนั้นจะทำการวัดความแตกต่างของเวลาที่ส่วนหัวของกระสุนปืนที่ตัดแสงเลียเซอร์ชุดที่ 1 และ 2 ซึ่งสามารถคำนวณหาความเร็วได้จากการ

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

เมื่อ

$V$  คือ ความเร็ว

$\Delta s$  คือ ระยะห่างของ laser beam ชุดที่ 1 กับ laser beam ชุดที่ 2

$\Delta t$  คือ เวลาที่วัดได้จากเครื่อง oscilloscope

ตัวอย่างการคำนวณหาความเร็วของลูกกระสุนจากรูปที่ 3.6

$$\text{จาก } V_1 = \frac{\Delta s_1}{\Delta t} ; \quad \text{จะได้ } V_1 = \frac{105 \times 10^3 \text{ m}}{(263 - 132.5) \times 10^6 \text{ s}}$$

$$V_1 = 804.6 \text{ m/s}$$

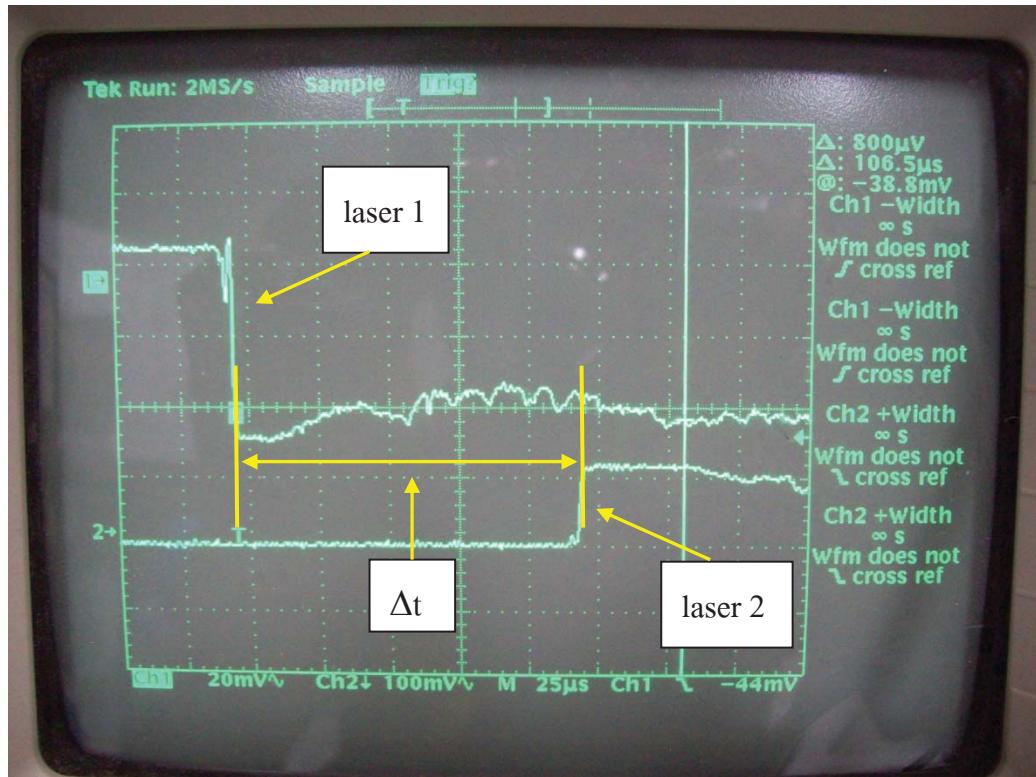
ดังนั้นความเร็วของกระสุนปืนเท่ากับ 804.6 m/s

ตัวอย่างการคำนวณหาความเร็วของลูกกระสุนจากรูปที่ 3.7

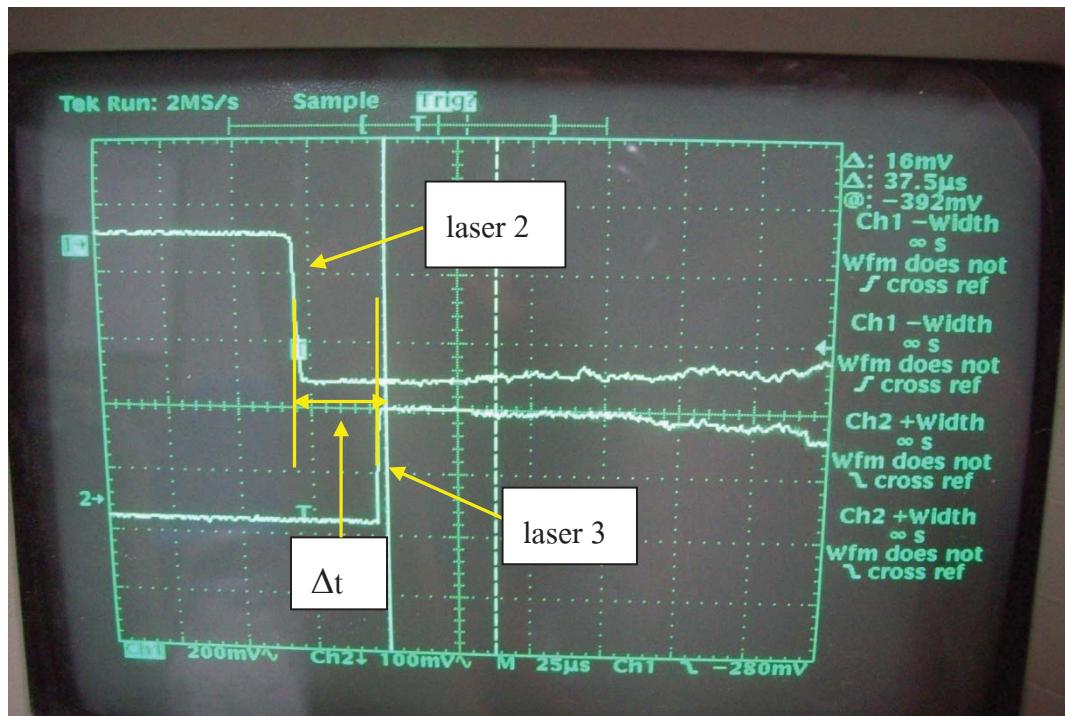
$$\text{จาก } V_2 = \frac{\Delta s_2}{\Delta t} ; \quad \text{จะได้ } V_2 = \frac{33 \times 10^3 \text{ m}}{(216 - 177) \times 10^6 \text{ s}}$$

$$V_2 = 846.15 \text{ m/s}$$

ดังนั้นความเร็วของกระสุนปืนเท่ากับ 846.15 m/s



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างสัญญาณที่วัดได้จาก laser beam ชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ( $\Delta s_1 = 105 \text{ mm}$ ) บนหน้าจอ oscilloscope เครื่องที่ 1



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างสัญญาณที่วัดได้จาก laser beam ชุดที่ 2 และชุดที่ 3 ( $\Delta s_2 = 33 \text{ mm}$ ) บนหน้าจอ oscilloscope เครื่องที่ 2

### 3.5 ผลการทดลอง

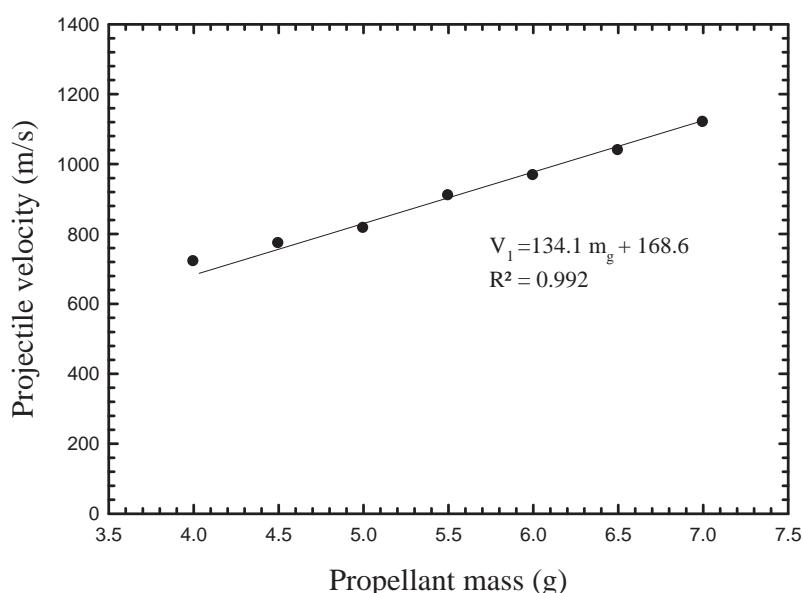
จากการทดลองเพื่อหาสมรรถนะในการผลิตความเร็วของกระสุนปืนของชุดทดลองโดยใช้ น้ำหนักดินปืน 4 g, 4.5 g, 5 g, 5.5 g, 6 g, 6.5 g และ 7 g จากการวัดความเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ใช้ laser 3 ชุด สามารถหาความสัมพันธ์ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของดินปืน (g) และความเร็วของ กระสุนปืน (m/s) ที่ระยะ  $\Delta s_1$  ได้ดังรูปที่ 3.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของดินปืนและ ความเร็วของกระสุนปืนที่ระยะ  $\Delta s_1$  จากภาพแสดงว่าความเร็วของกระสุนปืนจะเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนัก ของดินปืนเพิ่มขึ้น โดยที่ความเร็วต่ำสุดของกระสุนปืนเท่ากับ 721 m/s ที่น้ำหนักของดินปืนในการขับ 4 g และความเร็วสูงสุดของกระสุนปืนเท่ากับ 1,119 m/s ที่น้ำหนักของดินปืนในการขับ 7 g จาก ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของดินปืนและความเร็วของกระสุนปืนสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$V_1 = 134.1m_g + 168.6 \quad (3.2)$$

เมื่อ

$V_1$  คือ ความเร็วเฉลี่ยของกระสุนปืน (m/s) ในท่อส่งกระสุนปืน (launch tube)

$m_g$  คือ น้ำหนักของดินปืน



รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของดินปืนและความเร็วของกระสุนปืนที่ระยะ  $\Delta s_1$

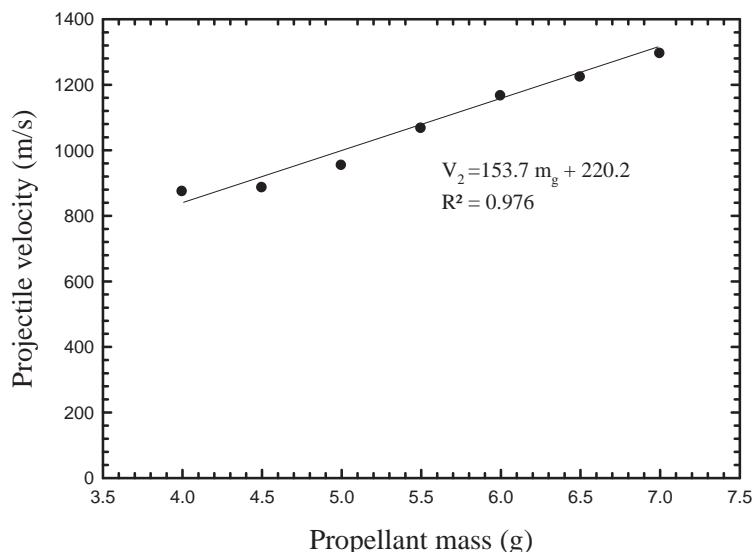
จากรูปที่ 3.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของดินปืนและความเร็วของกระสุนปืนที่ ระยะ  $\Delta s_2$  จากภาพแสดงว่าความเร็วของกระสุนปืนจะเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักของดินปืนเพิ่มขึ้น โดยที่ ความเร็วต่ำสุดของกระสุนปืนเท่ากับ 873 m/s ที่น้ำหนักของดินปืนในการขับ 4 g และความเร็วสูงสุด ของกระสุนปืนเท่ากับ 1,294 m/s ที่น้ำหนักของดินปืนในการขับ 7 g จากความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักของดินปืนและความเร็วของกระสุนปืนสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$V_2 = 153.7m_g + 220.2 \quad (3.3)$$

เมื่อ

$V_2$  คือ ความเร็วเฉลี่ยของกระสุนปืน (m/s) ในห้องทดสอบ (test chamber)

$m_g$  คือ น้ำหนักของดินปืน



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของดินปืนและความเร็วของกระสุนปืนที่ระยะ  $\Delta s_2$

### 3.6 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเพื่อหาสมรรถนะในการผลิตความเร็วของกระสุนปืนจากชุดทดลอง Horizontal single stage powder gun (HSSPG) ที่ปริมาณดินปืนจำนวน 4 g, 4.5 g, 5 g, 5.5 g, 6 g, 6.5 g และ 7 g โดยทำการวัดความเร็วของกระสุนปืนด้วยหลักการ time of flight method พบร่วมกันว่า กระสุนปืนมีความเร็วสูงขึ้นเมื่อดินปืนที่ใช้ในการทดลองมีน้ำหนักมากขึ้น โดยความเร็วต่ำสุดของกระสุนปืนเท่ากับ 721 m/s และ 873 m/s ที่ระยะ  $\Delta s_1$  ในท่อส่งกระสุนปืน (launch tube) และที่ระยะ  $\Delta s_2$  ในห้องทดสอบ (test chamber) ตามลำดับ และความเร็วสูงสุดของกระสุนปืนเท่ากับ 1,119 m/s และ 1,294 m/s ที่ระยะ  $\Delta s_1$  ในท่อส่งกระสุนปืน (launch tube) และที่ระยะ  $\Delta s_2$  ในห้องทดสอบ (test chamber) ตามลำดับ ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของดินปืนและความเร็วของกระสุนปืนที่ระยะ  $\Delta s_1$  ในท่อส่งกระสุนปืน ได้เป็น  $V_1 = 134.1m_g + 168.6$  และที่ระยะ  $\Delta s_2$  ในห้องทดสอบ ได้เป็น  $V_2 = 153.7m_g + 220.2$

## บทที่ 4

### คุณลักษณะของลำพุ่งของเหลวความเร็วสูง

#### 4.1 บทนำ

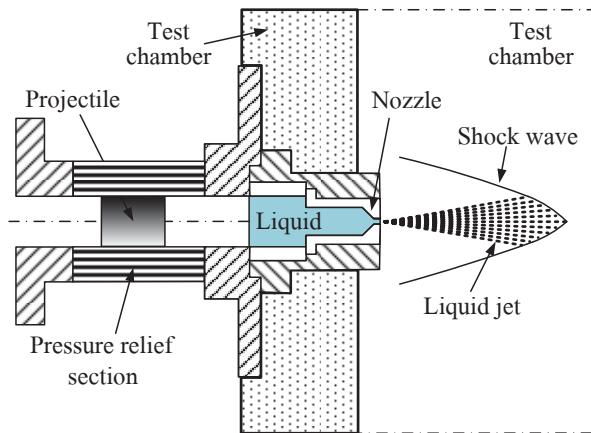
การวิจัยเกี่ยวกับลำพุ่งความเร็วสูง (high-speed jet) เริ่มมีการศึกษาจากปัญหาการชนของเม็ดฝน (rain impact) บนตัวเครื่องบินระหว่างการเคลื่อนที่ในขณะที่ฝนตก [1-8] จากนั้นเป็นต้นมา จึงมีการศึกษาเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมในหลายๆ ด้าน เช่น การตัดโดยลำพุ่ง การทำความสะอาดโดยลำพุ่ง การฉีดเชื้อเพลิงความเร็วสูง เป็นต้น [11-36] และยังนำมาประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ เช่น การฉีดยาโดยไม่ใช่เข็ม การรักษาการอุดตันของก้อนเลือดโดยลำพุ่ง เป็นต้น [39-41] จากการศึกษาต่างๆ พบว่า ลำพุ่งความเร็วสูงสามารถตัดวัสดุที่มีความหนา และความแข็งแรงได้เป็นอย่างดี และยังสามารถทำความสะอาดวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ลำพุ่งน้ำมัน ความเร็วสูงมีส่วนช่วยส่งเสริมการเผาไหม้ให้มีสมรรถนะดีขึ้น เนื่องจากการแตกตัวเป็นฝอยของของน้ำมันและการผสมคลุกเคล้ากันกับอากาศที่ดีขึ้น ซึ่งในปัจจุบันเริ่มมีการศึกษาการนำลำพุ่งความเร็วสูง มาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้สมุทร เช่น การตัดโครงสร้างได้ทั้งเล และการเจาะได้ทั้งเลด้วยลำพุ่งความเร็วสูงเนื่องจากเชื่อว่าลำพุ่งมีพลังงานสูงเพียงพอ [42-43] ดังเช่น งานวิจัยของ H. Soyama และคณะ [43] และ K. Otani และคณะ [55]

จากการวิจัยที่ผ่านมา ความเร็วของลำพุ่งในน้ำที่ศึกษานั้นมีความเร็วต่ำ เนื่องจากข้อจำกัดของเทคนิคในการผลิตลำพุ่ง จึงทำให้คุณลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูงใน condensed media จึงยังไม่ได้ทำการศึกษาและอธิบายอย่างชัดเจน ดังนั้นในการศึกษานี้จึงทำการศึกษาคุณลักษณะของลำพุ่งของเหลวความเร็วสูงที่จัดในอากาศและใน condensed media (น้ำ) และทำการเปรียบเทียบคุณลักษณะของลำพุ่งที่เกิดขึ้นเมื่อของไหหลที่ใช้ในการทดลองแตกต่างกันดังกล่าว โดยวิเคราะห์จากการถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอด้วยความเร็วสูง (High-speed video camera) ร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph และการถ่ายภาพในแนวแกน

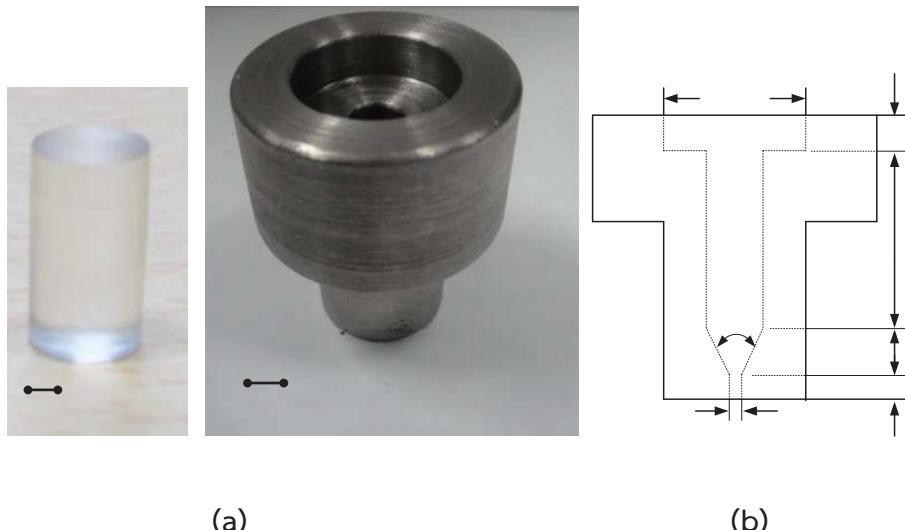
#### 4.2 การผลิตลำพุ่งความเร็วสูง

ในการศึกษานี้การผลิตลำพุ่งความเร็วสูงจะใช้เทคนิค impact driven method [37] ดังรูปที่ 4.1 โดยที่เทคนิคนี้จะยิงกระสุนปืนความเร็วสูง (high-speed projectile) ในชุดทดลอง Horizontal Single Stage Powder Gun (HSSPG) ซึ่งรายละเอียดรวมถึงสมรรถนะของชุดยิงได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 โดยในการศึกษานี้ใช้กระสุนปืนที่ทำมาจาก Polymethyl methacrylate (PMMA) ทรงกระบอก มีความยาว 15 mm ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8.05 mm ดังรูปที่ 4.2(a) และหัวฉีดที่ใช้ในการผลิตลำ

พุ่งความเร็วสูง ทำมาจากเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่บรรจุของเหลว  $D = 8.1$  mm ขนาดของรูหัวฉีด  $d = 0.7$  mm และความยาวของรูหัวฉีด  $l = 3$  mm ดังรูปที่ 4.2(b) ในการทดลองนี้ใช้ความเร็วของกระสุนปืนประมาณ  $950 \pm 30$  m/s ในการผลิตลำพุ่งจากการใช้ดินปืน 5 g (ซึ่งรายละเอียดของวิธีทดลองได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3)



รูปที่ 4.1 การขับลำพุ่งด้วยการกระแทก (Impact driven method)

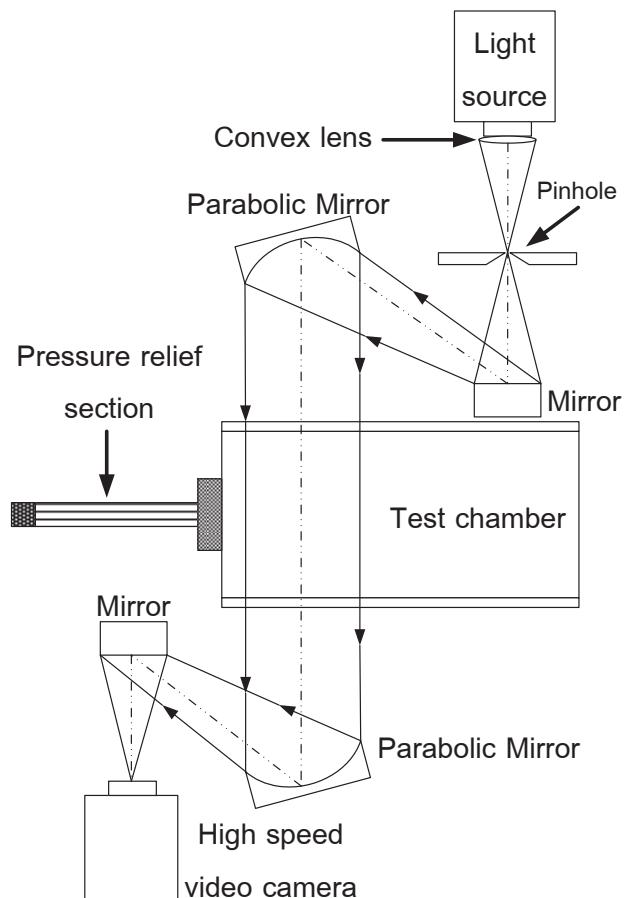


รูปที่ 4.2 (a) กระสุนปืน และ (b) หัวฉีดที่ใช้ในการทดลอง

#### 4.3 การถ่ายภาพ (Visualization)

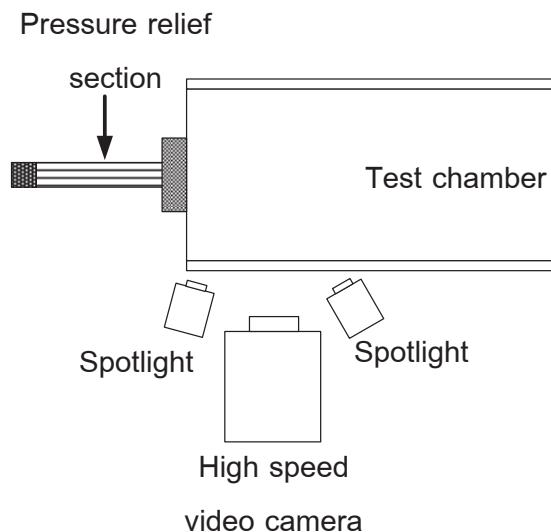
เนื่องจากพฤติกรรมของลำพุ่งที่เกิดขึ้นนั้นเป็นความเร็วระดับเหนือเสียง (supersonic) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในระดับไมโครวินาที ( $\mu\text{s}$ ) ซึ่งไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า หรือจากกล้องถ่ายภาพทั่วไป ดังนั้นการศึกษานี้จึงใช้กล้องวิดีโอด้วยความเร็วสูง (high-speed digital

video camera) ยี่ห้อ photron รุ่น FASTCAM SA5 ที่ความเร็วของการถ่ายภาพเท่ากับ 30,000 fps และความเร็วชัตเตอร์ (shutter speed) 1  $\mu$ s โดยถ่ายภาพร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph ดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยแหล่งกำเนิดแสง (light source) ในการศึกษานี้ใช้หลอดซีน่อน (xenon) 3500/4300 K ซึ่งจะส่องแสงของมาผ่านเลนส์มน (convex lens) เพื่อร่วมแสงและส่องผ่านรูเข็ม (pinhole) ซึ่งทำหน้าที่ตัดแสงที่กระจายออกจากเลนส์มน แสงจะกระทบกระจกผิวโค้ง (parabolic mirror) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 cm ความยาวโฟกัส 1.5 m ซึ่งทำหน้าที่จัดลำแสงให้ขนานผ่านห้องทดสอบ โดยแสงที่ผ่านห้องทดสอบหากมีพฤติกรรมการไฟล์ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของของไฟล์ในห้องทดสอบแสงจะเกิดการหักเห โดยแสงที่หักเหจะกระทบกระจกผิวโค้งอีกบานเพื่อร่วมแสง เนื่องจากพื้นที่ในห้องทดลองมีจำกัดจึงใช้กระจกเงา (plane mirror) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 19 cm จำนวน 2 บาน ช่วยในการสะท้อนแสงเพื่อลดระayah ในห้องทดสอบจากนั้นแสงจะฉายลงจอรับภาพของกล้องวีดีโอความเร็วสูงและจะถูกบันทึกภาพไว้

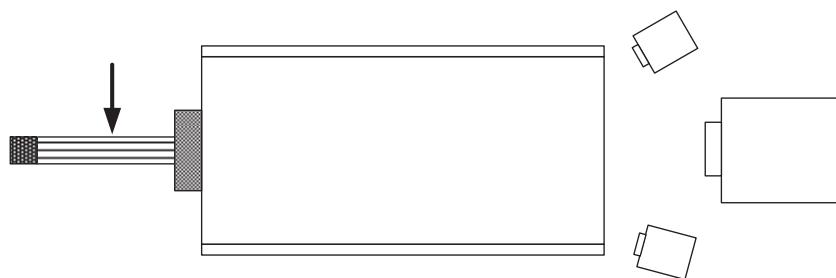


รูปที่ 4.3 การการติดตั้งระบบถ่ายภาพด้วยเทคนิค Shadowgraph

จากรูปที่ 4.4 แสดงการติดตั้งกล้องวิดีโอความเร็วสูงในมุนมองปกติโดยไม่มีการติดตั้งระบบการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph ซึ่งจะมีสปอร์ตไลท์จำนวน 2 ตัวเป็นแหล่งกำเนิดแสงโดยพุติกรรมที่เกิดขึ้นจะถูกบันทึกโดยกล้องวิดีโอความเร็วสูงโดยตรง และรูปที่ 4.5 แสดงการติดตั้งกล้องวิดีโอความเร็วสูงในแนวแกนโดยไม่มีการติดตั้งระบบการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph ซึ่งจะมีสปอร์ตไลท์จำนวน 2 ตัวเป็นแหล่งกำเนิดแสงโดยพุติกรรมที่เกิดขึ้นจะถูกบันทึกโดยกล้องวิดีโอความเร็วสูงโดยตรงเช่นกัน



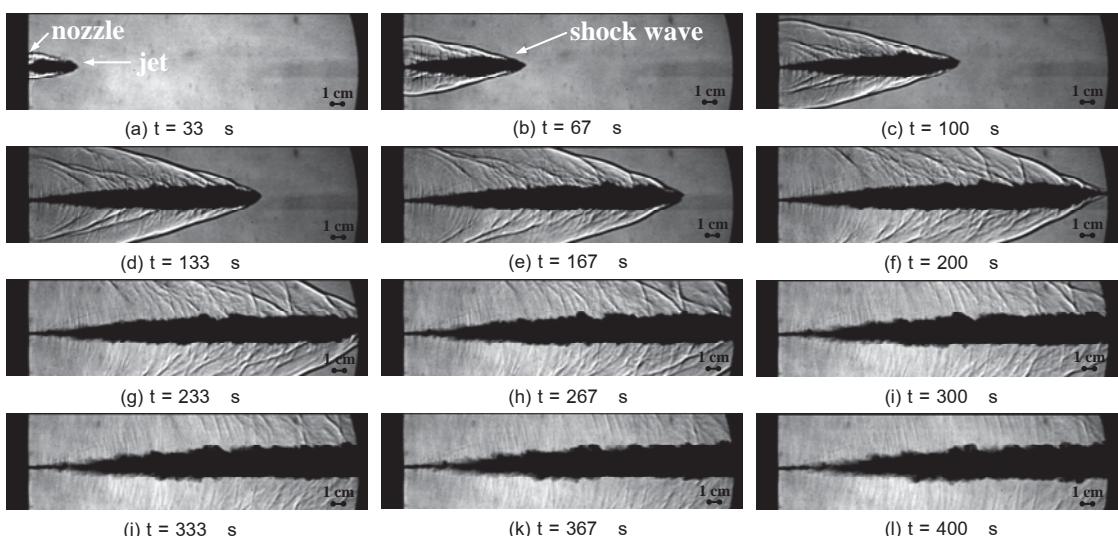
รูปที่ 4.4 การติดตั้งกล้องวิดีโอความเร็วสูงในมุนมองปกติโดยไม่มีการติดตั้งระบบการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph



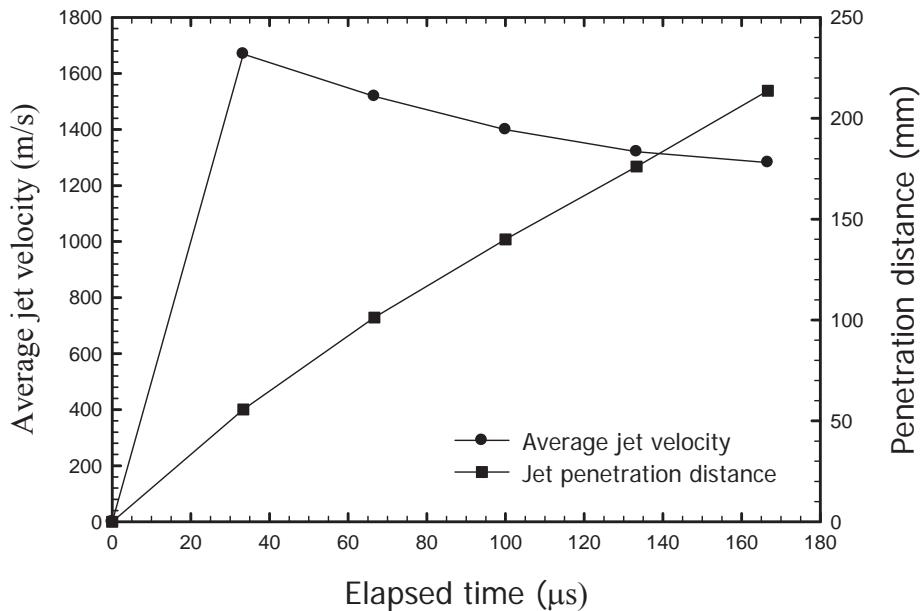
รูปที่ 4.5 การติดตั้งกล้องวิดีโอความเร็วสูงในแนวแกนโดยไม่มีการติดตั้งระบบการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph

#### 4.4 คุณลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูงในอากาศ

รูปที่ 4.6 แสดงภาพถ่ายโดยเทคนิค shadowgraph ของลำพุ่งน้ำในอากาศ (water jet in air) เนื่องจากจำนวนภาพที่ถ่ายได้จำกัดของวิดีโอ์ความเร็วสูงมีจำนวนมาก ดังนั้น ในหัวข้อนี้จะแสดงภาพเพียง 12 ภาพในการอธิบายคุณลักษณะของลำพุ่งน้ำ ภาพจะสังเกตเห็น ลำพุ่งน้ำที่ถูกฉีดออกมาจากหัวฉีด (nozzle) และ shock wave ซึ่งเกิดจากลำพุ่งรวมไปถึง much wave รอบๆ ลำพุ่ง อย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูปที่ 4.6(a-f) รูปร่างของลำพุ่งจะแคบและยาวซึ่งมีรั้งการเคลื่อนที่มากกว่า 250 mm ก่อนที่จะสูญเสียโมเมนตัมและกระจายตัวเป็นฝอยละอองภายในห้องทดลองดังรูปที่ 4.6(g-l) โดยการเคลื่อนที่ของลำพุ่น้ำนี้จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเหนือเสียงดังจะสังเกตเห็น shock wave ที่เกิดขึ้น ซึ่งความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่น้ำตลอดการเคลื่อนที่ผ่านห้องทดลองประมาณที่ความเร็วของลำพุ่งที่ประมาณได้จากมุ่งของ shock wave มีค่า 992 m/s คิดเป็น Mach number (Ma) เท่ากับ 3.3 ในขณะที่ต่างกัน เนื่องมาจากการประเมินจากมุ่งของ shock wave จะพิจารณาการเคลื่อนที่ของวัตถุซึ่งจะไม่คิดผลของการแตกตัวและการแพร่กระจายของวัตถุ รวมไปถึงจะไม่คำนึงถึงการแตกเป็นฝอยละอองของวัตถุ ซึ่งจะให้ผลที่ถูกต้องกับวัตถุที่แข็งเกร็ง ในขณะที่การเคลื่อนที่ของลำพุ่งจะมีการแตกตัว (break up) การแตกเป็นฝอยละออง (atomization) และการระเหยกลาญเป็นไอ (vaporization) จึงทำให้การวัดความเร็วกับผลจากวิเคราะห์โดย shock wave ให้ผลที่แตกต่างกัน โดยที่ความเร็วสูงสุดของลำพุ่น้ำมีค่าประมาณ 1,669 m/s คิดเป็น Ma มีค่าเท่ากับ 4.9 ที่  $t = 33 \mu\text{s}$



รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายโดยเทคนิค shadowgraph ของลำพุ่น้ำในอากาศ (water jet in air,  $V_{j, \text{max}} = 1,669 \text{ m/s}, \text{Ma} = 4.9$ )



รูปที่ 4.7 ความเร็วเฉลี่ยและระยะการเคลื่อนที่ของลำพุ่งน้ำในอากาศ (Average jet velocity and jet penetration distance in air)

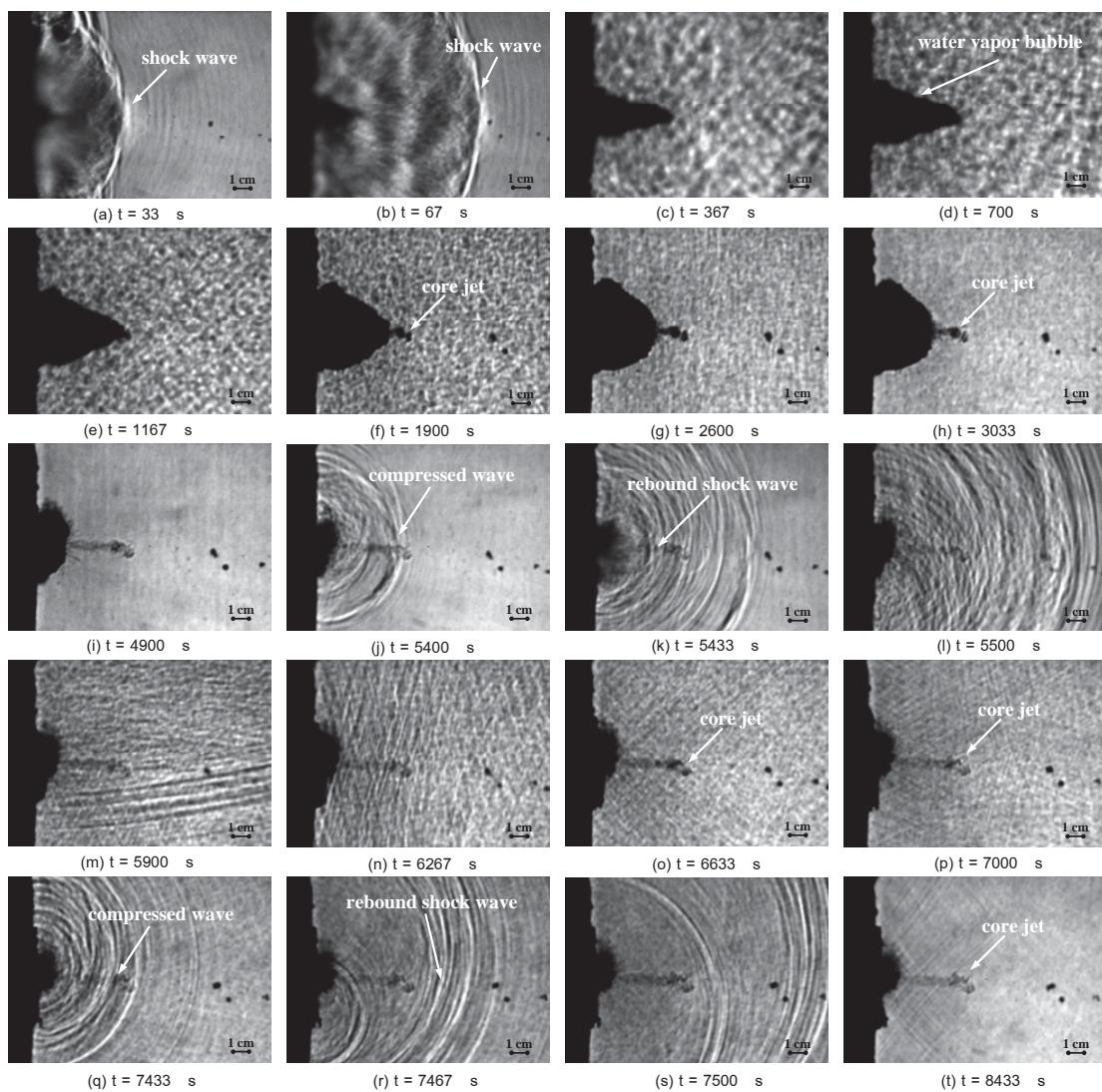
รูปที่ 4.7 แสดงความเร็วเฉลี่ยและระยะการเคลื่อนที่ของลำพุ่งน้ำในอากาศ (Average jet speed and jet penetration distance in air) พบว่า ความเร็วจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งเวลา 33  $\mu$ s จากนั้นความเร็วของลำพุ่งจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจาก aerodynamic drag การแตกตัว (break up) การแตกเป็นฝอยละออง (atomization) และการระเหยกลาญเป็นไอของลำพุ่ง (vaporization) โดยที่ความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่งน้ำสูงสุดเท่ากับ 1,669 m/s ที่เวลาเท่ากับ 33  $\mu$ s จึงส่งผลให้ระยะการเคลื่อนที่ของลำพุ่งน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นดังรูป

#### 4.5 คุณลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูงในน้ำ

ในหัวข้อนี้อธิบายถึงคุณลักษณะของลำพุ่งน้ำความเร็วสูงเมื่อฉีดในน้ำจากการถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอด้วยความเร็วสูงร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพ Shadowgraph เนื่องจากจำนวนภาพที่ถ่ายได้จากกล้องวิดีโอด้วยความเร็วสูงมีจำนวนมาก ดังนั้น ในหัวข้อนี้จะแสดงภาพเพียง 20 ภาพในการอธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้น

รูปที่ 4.8 แสดงภาพถ่ายโดยเทคนิค shadowgraph ของลำพุ่งน้ำในน้ำ (water jet in water) ทันทีที่กระสุนปืนกระแทกน้ำที่บรรจุภายในหัวฉีด ลำพุ่งจะพุ่งออกม้าด้วยความเร็วสูง (ความเร็วประมาณ 1,669 m/s ที่เวลา 33  $\mu$ s ในอากาศ) จึงทำให้เกิด shock wave ภายในน้ำดังรูป

ที่ 4.8(a) แต่เนื่องจากลำพุ่งถูกฉีดภายในน้ำจึงทำให้ความเร็วของลำพุ่งลดต่ำลงอย่างรวดเร็วเนื่องจาก hydrodynamic drag นั้นมีค่าสูง (จาก  $Drag = \frac{1}{2} C_D \rho V^2 A$  ซึ่ง  $\rho$  ของน้ำมีค่าเป็น 1,000 เท่าของอากาศ) โดยความเร็วสูงสุดของลำพุ่งในน้ำมีค่าประมาณ 374 m/s ที่เวลา 67  $\mu$ s โดยห่างจากความเร็วของ shock wave ในน้ำ ซึ่งมีความเร็วเท่ากับ 1,563 m/s คิดเป็น Mach number เท่ากับ 1.04 (ความเร็วเสียงในน้ำมีค่าเท่ากับ 1,500 m/s) ตั้งแสดงในรูปที่ 4.8(b) จึงทำให้ลำพุ่งและ shock wave แยกตัวออกจากกันเนื่องจากความเร็วที่ต่างกัน



รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายโดยเทคนิค shadowgraph ของลำพุ่งน้ำในน้ำ

(water jet in water,  $V_{j, \max} = 374$  m/s)

จากนั้นจะเกิด water vapor bubble เนื่องจากการแตกตัวเป็นละออง (atomization) การกลาญเป็นไอ (vaporization) ของลำพุ่ง และเกิดการขยายตัวอย่างรวดเร็ว (expansion) ดังรูปที่ 4.8(b-d) ซึ่งมีลักษณะเป็นวงรีสีดำเข้มดังรูปที่ 4.8(d) ถึงแม้ว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ water vapor bubble (bubble diameter) ในแนวตั้งของภาพจะขยายตัวขึ้นอย่างรวดเร็วแต่ยังช้ากว่าระยะการเคลื่อนที่ของ bubble (bubble penetration) ในแนวอนของภาพ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่ของลำพุ่ง (jet penetration) เร็วกว่าการขยายตัวของ bubble ในแนวตั้ง

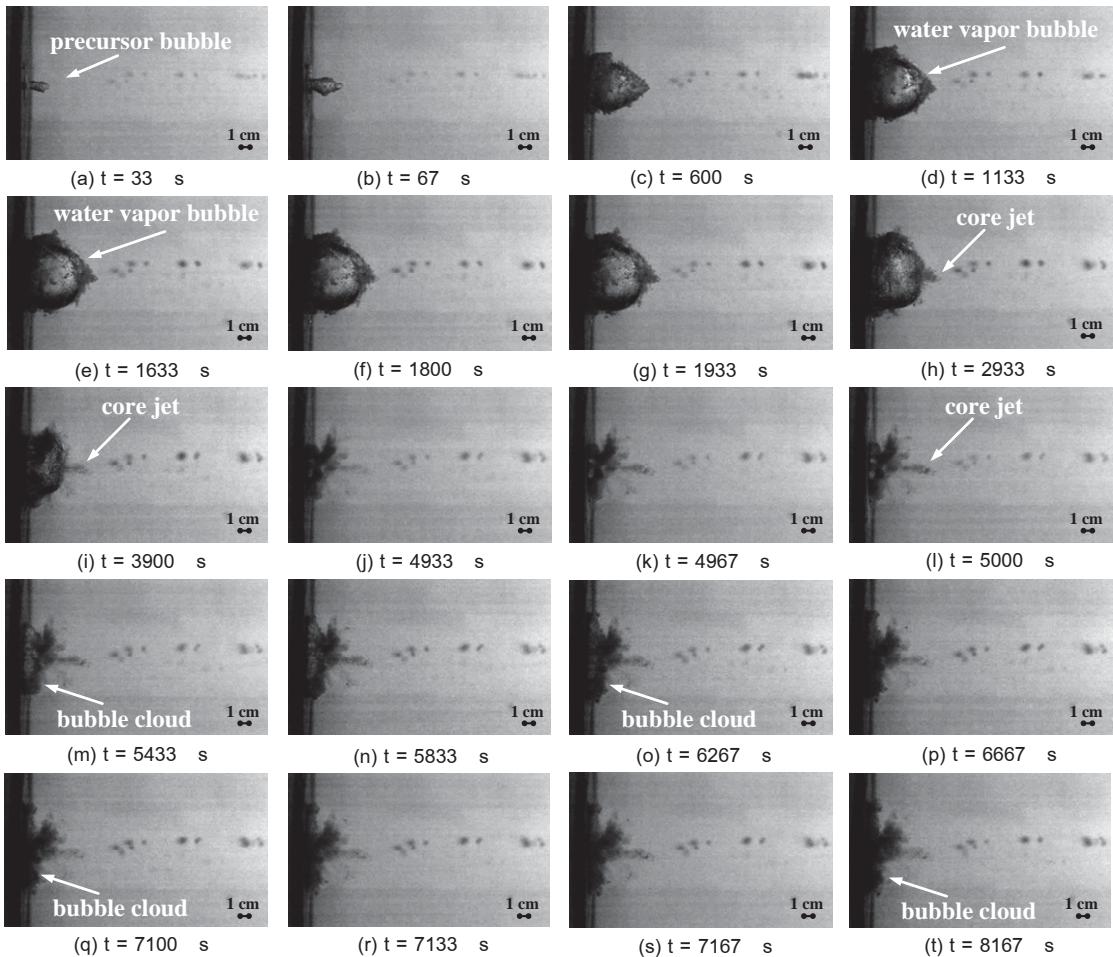
จากรูปที่ 4.8(e) พบว่า ระยะการเคลื่อนที่ของ bubble สูงสุดเท่ากับ 47.88 mm ที่เวลา 1,167  $\mu$ s แต่เส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ยังไม่ขยายตัวสูงสุด ยังคงขยายตัวอย่างต่อเนื่องรอบๆ ลำพุ่งดังรูปที่ 4.8(f) หลังจากระยะ การเคลื่อนที่ของ bubble มาถึงจุดสูงสุด bubble จะเริ่มยุบตัว ในขณะที่เส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble (ในแนวตั้ง) ยังขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

จากรูปที่ 4.8(g) พบว่า เส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะขยายตัวสูงสุดเท่ากับ 57.34 mm ที่เวลา 2,600  $\mu$ s คิดเป็นความเร็วในการขยายตัวเท่ากับ 22.05 m/s จากนั้น bubble จะเริ่มยุบตัวจึงทำให้สังเกตเห็นแกนของลำพุ่ง (core jet) ซึ่งเคลื่อนที่ไปข้างหน้าอย่างช้าๆ จนเกือบจะหยุดนิ่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.8(h,i) ซึ่งการยุบตัวของลำพุ่นนั้นเกิดจากความดันของ bubble ต่ำลงกว่าความดันของน้ำภายในห้องทดสอบ โดยก่อนที่ bubble จะยุบตัวลดลงเกือบจะถึงค่าต่ำสุดดังรูปที่ 4.8(j) จะเกิด compressed wave ขึ้นเมื่อ bubble ยุบตัวลดลงต่ำสุดเท่ากับ 18.63 mm ที่เวลา 5,467  $\mu$ s คิดเป็นความเร็วในการยุบตัวเท่ากับ 13.50 m/s ซึ่งทำให้เกิด rebound shock wave ดังรูปที่ 4.8(k,l) เนื่องจากการยุบตัวของ bubble จะทำให้เกิดความดันสูงขึ้นในทันทีทันใดภายใน bubble ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้โดยปรากฏการณ์ของ cavitation ซึ่งจากการประมาณจากภาพถ่ายพบว่า rebound shock wave มีความเร็ว 1,503 m/s คิดเป็น Mach number ประมาณ 1.00

จากรูปที่ 4.8(m) เนื่องจากความดันภายใน bubble มีค่าสูงมาก ไม่เพียงแต่ทำให้เกิด rebound shock wave ยังทำให้เกิด water vapor bubble ขึ้นอีกครั้งรูปที่ 4.8(m-p) ถึงแม้ว่ากลไกการขยายตัวและการยุบตัวของ bubble จะสังเกตเห็นไม่ชัดเจน แต่ก็เชื่อว่ากลไกดังกล่าวเกิดขึ้น อีกครั้งจริง จากการสังเกตเห็น compressed wave, rebound shock wave และ shock wave ที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.8(p-r) ดังนั้นพุติกรรมที่เกิดขึ้นในครั้งนี้จึงคล้ายกับพุติกรรมการขยายตัว และยุบตัวของ water vapor bubble ที่เกิดขึ้นก่อนหน้านี้ (ดังแสดงในรูปที่ 4.8(a-j) โดยที่การเคลื่อนที่ของ rebound shock wave ที่เกิดขึ้นในครั้งนี้มีความเร็วเท่ากับ 1,556 m/s คิดเป็น Mach number ประมาณ 1.04

จากรูปที่ 4.8(r) จะพบ rebound shock wave ที่เกิดจากกลไกการขยายตัวและยุบตัวของ bubble ในครั้งที่สอง จากนั้นความดันภายใน bubble จะลดต่ำลงจนไม่สามารถทำให้เกิด bubble ขึ้นอีกครั้งได้ จึงทำให้ไม่พบกลไกการขยายตัวและยุบตัวที่ทำให้เกิด rebound shock wave ขึ้นอีก

ครั้งได้ จากนั้น bubble จะลอยตัวขึ้นเนื่องจากแรงลอยตัว ในขณะที่ core jet จะละลายผสมรวมกับน้ำภายในห้องทดสอบ ดังรูปที่ 4.8(s-t) เนื่องจากการสูญเสียแรงพลศาสตร์ (Dynamic force)



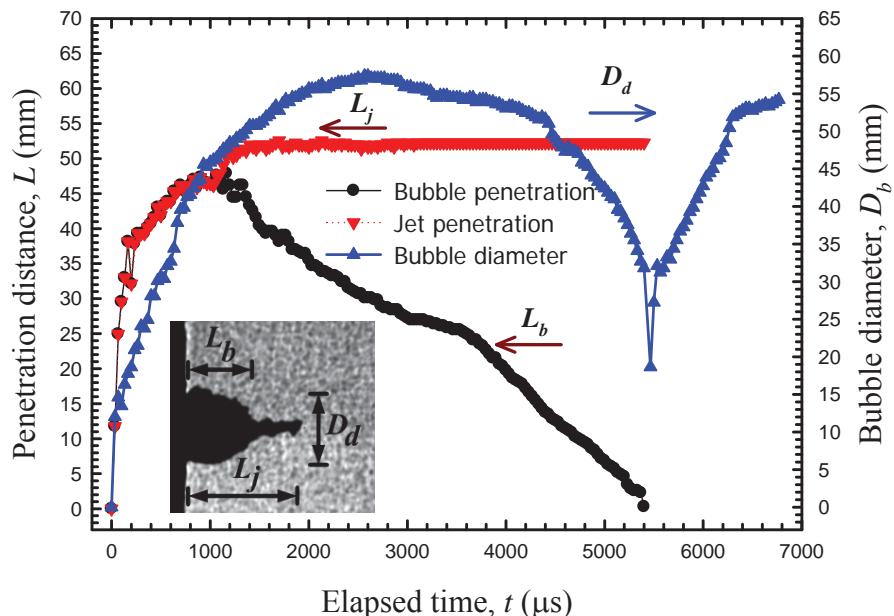
รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายโดยไม่ใช้เทคนิค shadowgraph ของลำพุ่มน้ำในน้ำ

รูปที่ 4.9 แสดงภาพถ่ายโดยไม่ใช้เทคนิค shadowgraph ของลำพุ่มน้ำในน้ำ (water jet in water) โดยเลือกภาพจำนวน 20 ภาพที่สอดคล้องกับรูปที่ 4.8 ซึ่งกลไกของการเกิดลำพุ่มและ bubble นั้นจะช่วยอธิบายพฤติกรรมที่เห็นได้ไม่ชัดเจนในการถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูงโดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพ Shadowgraph ในรูปที่ 4.8

เมื่อกราฟสูบีนรูปหัวใจที่บรรจุภายในหัวฉีด ลำพุ่มจะพุ่งออกมายอดความเร็วสูงและทำให้เกิด water vapor bubble โดยที่ความเร็วสูงสุดของลำพุ่มมีค่าประมาณ  $345 \text{ m/s}$  ที่เวลา  $33 \mu\text{s}$  ดังรูปที่ 4.9(a) จากรูปที่ 4.9(b-d) จะสังเกตเห็นการเกิดและการขยายตัวของ bubble ซึ่ง bubble จะขยายตัวเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ หลังจากนั้น bubble จะเคลื่อนที่ถึงระยะการเคลื่อนที่สูงสุดเท่ากับ  $44.14 \text{ mm}$  ที่เวลา  $1,633 \mu\text{s}$  ดังรูปที่ 4.9(e) จากนั้น bubble จะเริ่มยุบตัวกลับและจะเริ่มสังเกตเห็นปลายของลำพุ่ม สังเกตได้จากรูปที่ 4.9(f)

จากรูปที่ 4.9(g) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ในแนวตั้ง ( $D_y$ ) ขยายตัวสูงสุดเท่ากับ 64.87 mm ที่เวลา 1,967  $\mu$ s คิดเป็นความเร็วในการขยายตัวเท่ากับ 32.97 m/s จากนั้น bubble จะเริ่มยุบตัวและจะสังเกตเห็นแกนของลำพุ่งดังรูปที่ 4.9(h-j) จากรูปที่ 4.9(j-l) จะพบว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะยุบตัวลงต่ำสุดเท่ากับ 28.02 mm ที่เวลา 4,800  $\mu$ s คิดเป็นความเร็วในการยุบตัวเท่ากับ 13.00 m/s และจะเห็นรูปร่างของ bubble เป็นเส้นหยัก

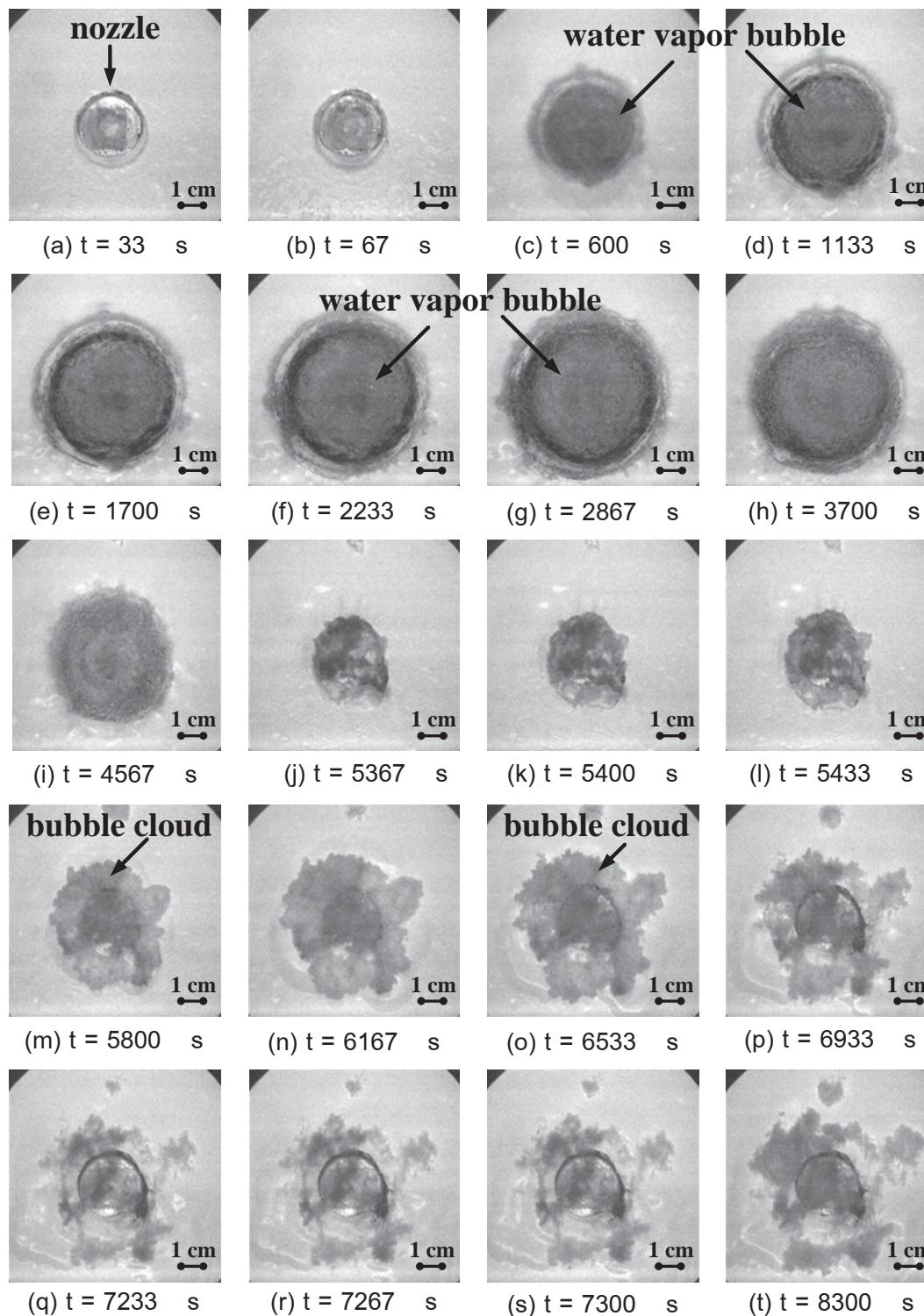
จากรูปที่ 4.9(g) น้ำที่ถูกยิงโดยเทคนิค shadowgraph ที่ผ่านมาในรูปที่ 4.8(m-r) นั้นกลไกการขยายตัวและยุบตัวนั้น ไม่สามารถอธิบายได้ เพราะรูปที่ได้จากเทคนิคการถ่ายภาพ shadowgraph สังเกตเห็นไม่ชัดเจน ซึ่งกลไกดังกล่าวสามารถอธิบายโดยรูปที่ 4.9(m-r) หลังจากที่ bubble ยุบตัวลงจนถึงค่าต่ำสุด bubble จะขยายตัวอีกครั้ง เนื่องจากการสะสมของความดันที่เพิ่มสูงขึ้นจากการยุบตัวของ bubble ซึ่ง bubble ได้ขยายตัวขึ้นอย่างรวดเร็วในแนวตั้ง แต่จะไม่เห็นการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าในแนวโนนอีก จากนั้น bubble จะยุบตัวลงจนถึงค่าต่ำสุดอีกครั้งดังรูปที่ 4.9(q-s) หลังจากนั้น bubble จะลอยตัวขึ้นเนื่องจากแรงลอยตัวและละลายรวมกับน้ำในห้องทดสอบ ดังรูปที่ 4.9(t) ซึ่งจากการสังเกตในรูปที่ 4.9 นี้จะช่วยสนับสนุนผลที่ได้จากเทคนิคการถ่ายภาพ shadowgraph จากรูปที่ได้นั้น จะช่วยในการอธิบายกลไกการเกิด bubble การขยายตัว การยุบตัว และการหายไปของ bubble ได้อย่างชัดเจนและเข้าใจง่าย แต่เนื่องจากการไม่ใช้เทคนิคการถ่ายภาพ shadowgraph จึงทำให้ไม่เห็น shock wave และ rebound shock wave ในน้ำ



รูปที่ 4.10 ระยะการเคลื่อนที่ของลำพุ่งและ bubble และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ของลำพุ่งน้ำในน้ำ (jet and bubble penetration distance and bubble diameter of water jet in water)

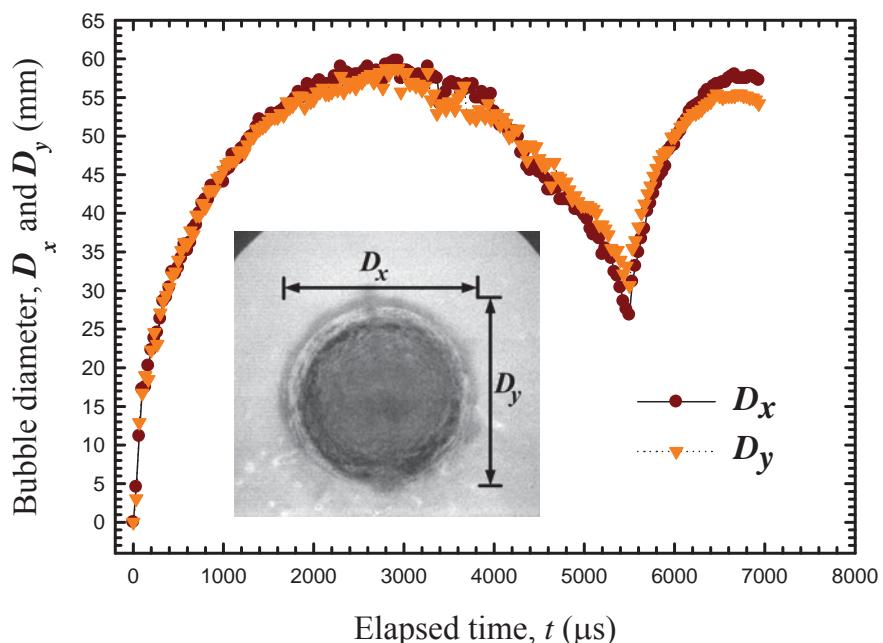
รูปที่ 4.10 แสดงระยะการเคลื่อนที่ของลำพุ่งและ bubble และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ของลำพุ่น้ำในน้ำ จากภาพพบว่า ระยะการเคลื่อนที่ของลำพุ่มีการเคลื่อนที่ใกล้สุดเกิดขึ้นที่เวลา 3,067  $\mu$ s ซึ่งมีระยะการเคลื่อนที่เท่ากับ 52.25 mm หลังจากนั้นลำพุ่งจะหยุดนิ่งไม่มีการเคลื่อนที่อีกและเมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของ bubble พบว่า bubble จะค่อยๆ เคลื่อนที่ไกลจากหัวฉีดมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป โดยมีการเคลื่อนที่ใกล้สุดเกิดขึ้นที่เวลา 1,166  $\mu$ s ซึ่งมีระยะการเคลื่อนที่เท่ากับ 47.88 mm จากนั้น bubble จะค่อยๆ ยุบตัวลดต่ำลงเนื่องจาก hydrodynamic drag ซึ่ง bubble ของน้ำจะยุบตัวลงในช่วงเวลา 1,166 - 5,467  $\mu$ s ในขณะที่เส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะขยายตัวสูงสุดที่เวลา 2,600  $\mu$ s ซึ่งมีขนาดสูงสุดเท่ากับ 57.34 mm จากนั้น bubble จะยุบตัวลงและจะเริ่มขยายตัวอีกครั้งที่เวลา 5,467  $\mu$ s

รูปที่ 4.11 แสดงภาพถ่ายในแนวแกนโดยไม่ใช้เทคนิค shadowgraph ของลำพุ่น้ำในน้ำ เนื่องจากจำนวนภาพที่ถ่ายได้จำกัดของวิดีโอด้วยความเร็วสูงมีจำนวนมาก ดังนั้น จะแสดงภาพเพียง 20 ภาพในการอธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้น จากรูปที่ 4.11(a-f) พบว่า bubble นั้นเกือบจะกลมอย่างสมมาตรและขยายตัวขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ขยายตัวสูงสุดในแนวอน (D<sub>x</sub>) เท่ากับ 59.75 mm ที่เวลา 2,900  $\mu$ s และในแนวตั้ง (D<sub>y</sub>) เท่ากับ 58.74 mm ที่เวลา 2,867  $\mu$ s ดังรูปที่ 4.11(g) จากนั้นจะเริ่มยุบตัวลดลงอย่างรวดเร็วจนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ลดลงต่ำสุดในแนวอน (D<sub>x</sub>) มีขนาด 26.83 mm และในแนวตั้ง (D<sub>y</sub>) มีขนาด 30.63 mm ที่เวลา 5,500  $\mu$ s ดังรูปที่ 4.11(h-k) เนื่องจากไม่ใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบ shadowgraph การเกิด shock wave ในน้ำและ rebound shock wave เมื่อ bubble ลดขนาดลงต่ำสุดจึงไม่สามารถสังเกตเห็น จากรูปที่ 4.11(l-n) หลังจากเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ลดขนาดลงต่ำสุด bubble จะแตกตัวเป็นกลุ่ม bubble (bubble cloud) และจะขยายตัวอย่างรวดเร็วเป็นลักษณะรูปวงแหวนรอบๆ หัวฉีด ดังรูปที่ 4.11(m) โดย bubble มีการยุบตัวอย่างช้าๆ ดังรูปที่ 4.11(o-s) ก่อนที่จะหายไปดังรูปที่ 4.11(t) จากการสังเกตในมุมมองนี้ การเกิด bubble การขยายตัว การยุบและการหายไปของ bubble จะสังเกตเห็นได้ชัดเจนและเข้าใจง่ายขึ้น



รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายในแนวแกนโดยไม่ใช้เทคนิค shadowgraph ของลำพูน้ำในรูป

รูปที่ 4.12 แสดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลำพุ่งในแนวอน (D<sub>x</sub>) และแนวตั้ง (D<sub>y</sub>) ของ ลำพุ่งน้ำในน้ำ (bubble diameter D<sub>x</sub> and D<sub>y</sub> of water jet injected in water) เมื่อพิจารณา เส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ในแนวอน (D<sub>x</sub>) จะพบว่ามีขนาดที่ใหญ่กว่า bubble ในแนวตั้ง (D<sub>y</sub>) จากนั้นจะค่อยๆ ขยายตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปโดยจะมีการขยายตัวใหญ่สุดที่เวลา 2,900  $\mu$ s ซึ่งมี ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ในแนวอน (D<sub>x</sub>) เท่ากับ 59.75 mm และในแนวตั้ง (D<sub>y</sub>) เท่ากับ 58.74 mm ที่เวลาเท่ากับ 2,867  $\mu$ s จากนั้น bubble จะยุบตัวลงจนถึงเวลาประมาณ 5,467  $\mu$ s ซึ่ง มีพบร่วมกันของ bubble ในแนวอน (D<sub>x</sub>) จะมีขนาดเล็กกว่า bubble ในแนวตั้ง (D<sub>y</sub>) เนื่องจากผลของการ ดันน้ำที่กระทำกับขอบของ bubble ที่ระดับความลึกของน้ำที่แตกต่างกันในแนวตั้ง (D<sub>y</sub>) จึงทำให้ bubble ไม่มีรูปร่างเป็นวงกลมอย่างสมมาตร จากนั้นเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะยุบตัวลดลง ซึ่งการยุบตัวใช้เวลาในช่วง 2,900 - 5,467  $\mu$ s จนถึงขนาดต่ำสุดที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 26.84 mm ในแนวอน (D<sub>x</sub>) และ 30.64 mm ในแนวตั้ง (D<sub>y</sub>) จากนั้นเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะเริ่มขยายตัวอีกครั้ง โดยความเร็วของการขยายตัวของ bubble ในน้ำในช่วงเวลา 0 - 2,900  $\mu$ s คิด เป็น 20.60 m/s ในแนวอน (D<sub>x</sub>) และในช่วงเวลา 0 - 2,867  $\mu$ s คิดเป็น 20.48 m/s ในแนวตั้ง (D<sub>y</sub>) และ ความเร็วของการยุบตัวที่ช่วงเวลา 2,900 - 5,500  $\mu$ s คิดเป็น 12.66 m/s ในแนวอน (D<sub>x</sub>) และ 10.67 m/s ในแนวตั้ง (D<sub>y</sub>)



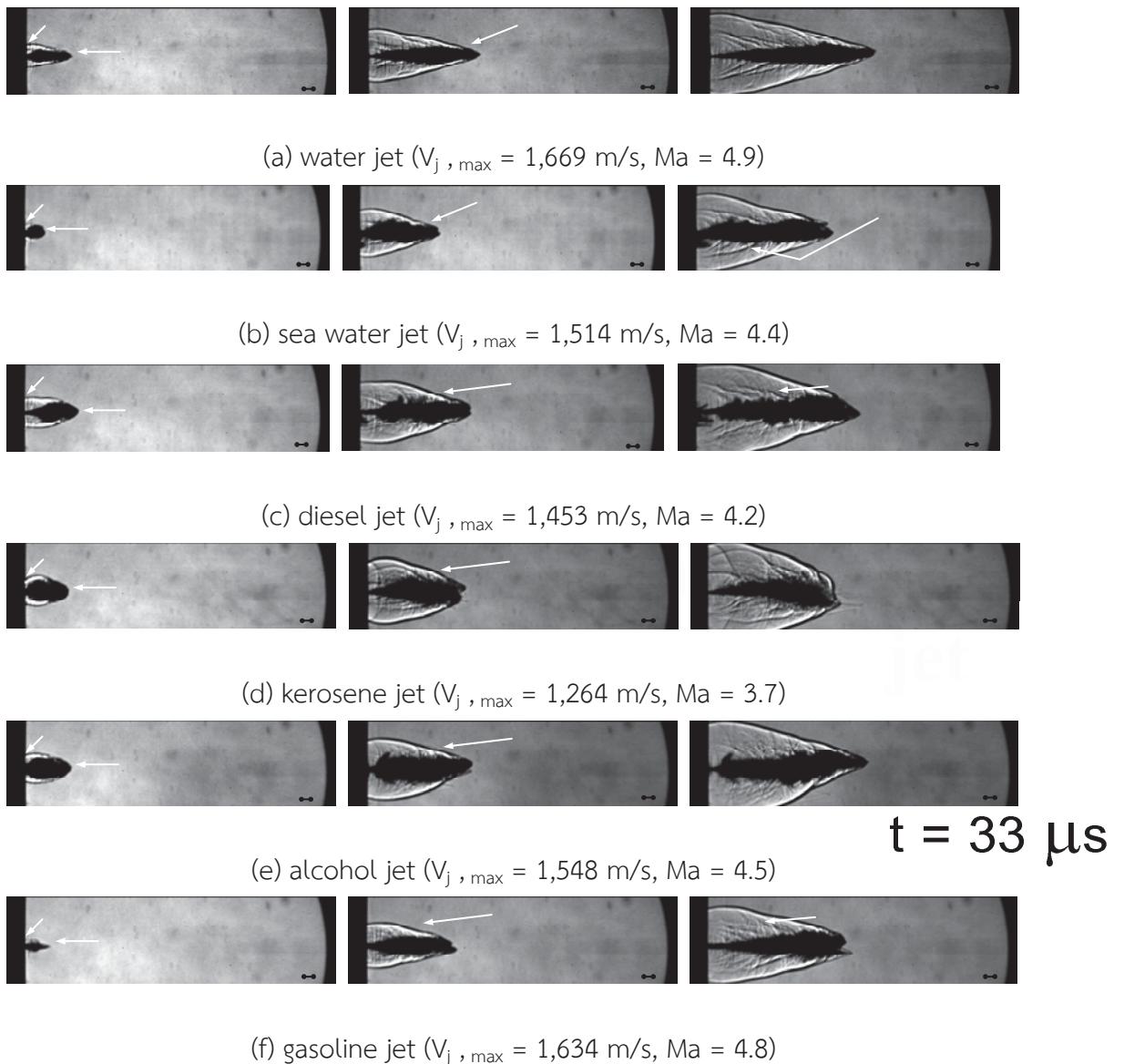
รูปที่ 4.12 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลำพุ่งในแนวอน (D<sub>x</sub>) และแนวตั้ง (D<sub>y</sub>) ของลำพุ่งน้ำในน้ำ (bubble diameter D<sub>x</sub> and D<sub>y</sub> of water jet injected in water)

#### 4.6 อิทธิพลของชนิดลำพุ่งเมื่อฉีดในอากาศ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงอิทธิพลของชนิดของลำพุ่งต่อคุณลักษณะของลำพุ่ง ความเร็วสูงเมื่อฉีดในอากาศโดยของเหลวในการศึกษานี้ คือ น้ำ (water), น้ำทะเล (sea water), น้ำมันดีเซล (diesel), น้ำมันก๊าด (kerosene), แอลกอฮอล์ (alcohol) และน้ำมันแก๊สโซลีน (gasoline) โดยคุณสมบัติของของเหลวทั้ง 6 ชนิดแสดงดังตารางที่ 4.1 ในกรอบข้างล่าง ในการอธิบายคุณลักษณะของลำพุ่งที่เกิดขึ้นจะใช้การถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูงร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของของเหลวที่ใช้ในการทดลอง [58]

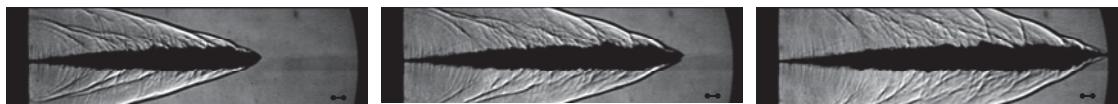
Liquid type	Molecular weight (g/mol)	Density at 20°C (kg/m <sup>3</sup> )	Kinematics viscosity 20°C (cSt)	Surface tension at 20°C (N/m)	Heat capacity at 40°C (J/g°C)	Latent heat (kJ/kg)
Water (H <sub>2</sub> O)	18	998	1.003	0.0728	4.19	2,257 (at 100°C)
Sea water -	-	1025	1.044	0.07344	3.898	2,188.8 (at 100°C)
Diesel (C <sub>14</sub> H <sub>30</sub> )	198	840	1.8 - 4.0	0.0244	1.97	267.49 (at 170°C)
Kerosene (C <sub>10</sub> -C <sub>14</sub> )	170	810	1.5 - 2.5	0.0235	2.02	314.01 (at 117.8°C)
Alcohol (CH <sub>3</sub> OH)	32	785.1	1.6	0.022	2.3	896 (at 90°C)
Gasoline (C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> )	114	750	0.5	0.02	2.1	318.66 (at 90°C)



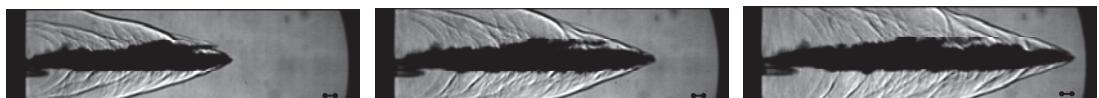
รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิด เมื่อฉีดในอากาศ

รูปที่ 4.13 แสดงภาพถ่ายด้วยเทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิด เมื่อฉีดในอากาศ เมื่อพิจารณาที่เวลาเท่ากับ  $33-67 \mu\text{s}$  พบว่า ลำพุ่งน้ำ, น้ำทะเล, น้ำมันดีเซล และ น้ำมันแก๊สโซลีน จะมีลักษณะแคบเรียวแหลม ในขณะที่ลำพุ่งน้ำมันก้ำดและแหลกอยู่  $t = 33 \mu\text{s}$  เรียกว่าหัวเรืออวนกว่า เนื่องจากลำพุ่งทุกชนิดนั้นเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ดังนั้นจึงสังเกตเห็น shock wave และ mach wave ที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาที่เวลาเท่ากับ  $100 \mu\text{s}$  จะเริ่มสังเกตเห็น second shock wave เกิดขึ้นกับลำพุ่งน้ำ น้ำทะเล น้ำมันดีเซล และน้ำมันแก๊สโซลีน ซึ่งบ่งบอกว่า อาจมีลำพุ่งเกิดขึ้นอีกลำพุ่งจากการกระแทกของกระสุนปืนเพียงครั้งเดียว ซึ่งเป็นคุณลักษณะเฉพาะที่ได้

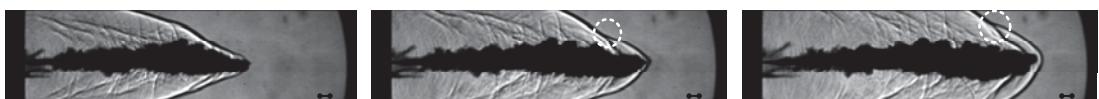
ถูกอธิบายไว้แล้วในการศึกษาของ K.Pianthong [52] ในขณะที่ไม่สามารถสังเกตพบในลำพุ่งน้ำมันก้าดและแอลกอฮอล์ นอกจากนี้ยังพบการแตกตัวที่รุนแรงสำหรับลำพุ่งน้ำมันก้าด



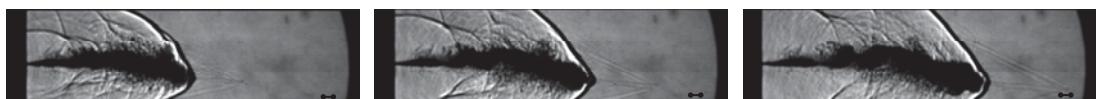
(a) water jet ( $V_{j, \text{max}} = 1,669 \text{ m/s}$ ,  $\text{Ma} = 4.9$ )



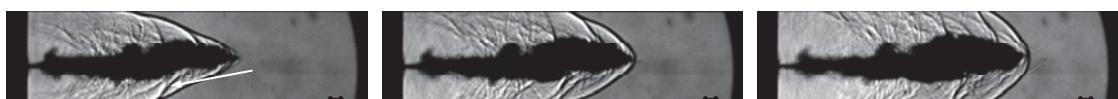
(b) sea water jet ( $V_{j, \text{max}} = 1,514 \text{ m/s}$ ,  $\text{Ma} = 4.4$ )



(c) diesel jet ( $V_{j, \text{max}} = 1,453 \text{ m/s}$ ,  $\text{Ma} = 4.2$ )



(d) kerosene jet ( $V_{j, \text{max}} = 1,264 \text{ m/s}$ ,  $\text{Ma} = 3.7$ )



(e) alcohol jet ( $V_{j, \text{max}} = 1,548 \text{ m/s}$ ,  $\text{Ma} = 4.5$ )

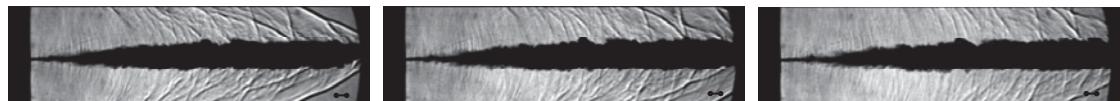


(f) gasoline jet ( $V_{j, \text{max}} = 1,634 \text{ m/s}$ ,  $\text{Ma} = 4.8$ )

รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิด เมื่อฉีด **โซดา** ใช้เวลา **133 μs**

เมื่อพิจารณาที่เวลาเท่ากับ 133 – 200  $\mu\text{s}$  พบว่า ลำพุ่งน้ำและน้ำทະเลยังคงมีลักษณะเรียวแหลม ในขณะที่ลำพุ่งดีเซลเริ่มมีการฉลุความเร็วและมีขนาดลำพุ่งที่ใหญ่ขึ้น และเมื่อสังเกตที่ shock wave พบว่า มีการเปลี่ยนมุมของ shock wave (change in shock angle) ซึ่งเป็นการบ่งชี้ว่า การเคลื่อนที่ของลำพุ่งลำที่สองมีความเร็วสูงกว่าลำที่หนึ่งและเกิดการแข่งของลำพุ่งลำที่สอง และหากพิจารณาที่ลำพุ่งน้ำมันก้าดจะพบการแตกตัวเป็นละอองอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ลำพุ่ง

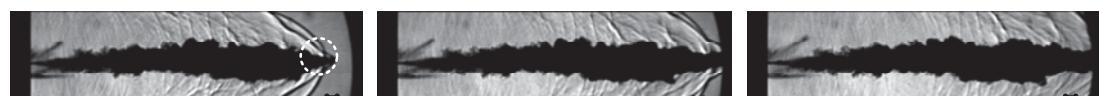
แอลกอฮอล์เริ่มมีความเร็วข้าลงซึ่งสังเกตจากมุมของ shock wave ที่เริ่มเปลี่ยนจาก oblique shock เป็น bow shock และเมื่อสังเกตุลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซลีน จะพบการแตกตัวที่ชัดเจนขึ้นและมีการเคลื่อนที่ที่ชัด



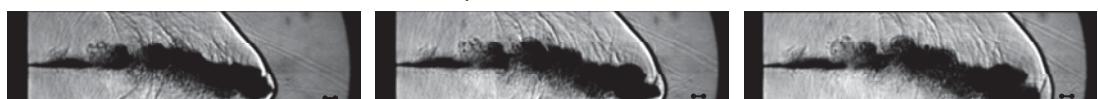
(a) water jet ( $V_{j, \text{max}} = 1,669 \text{ m/s}$ ,  $\text{Ma} = 4.9$ )



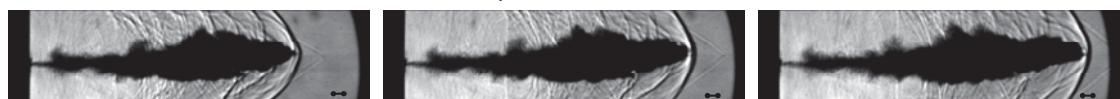
(b) sea water jet ( $V_{j, \text{max}} = 1,514 \text{ m/s}$ ,  $\text{Ma} = 4.4$ )



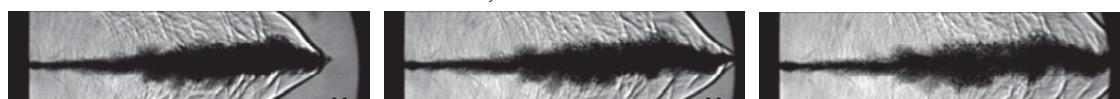
(c) diesel jet ( $V_{j, \text{max}} = 1,453 \text{ m/s}$ ,  $\text{Ma} = 4.2$ )



(d) kerosene jet ( $V_{j, \text{max}} = 1,264 \text{ m/s}$ ,  $\text{Ma} = 3.7$ )



(e) alcohol jet ( $V_{j, \text{max}} = 1,548 \text{ m/s}$ ,  $\text{Ma} = 4.5$ )

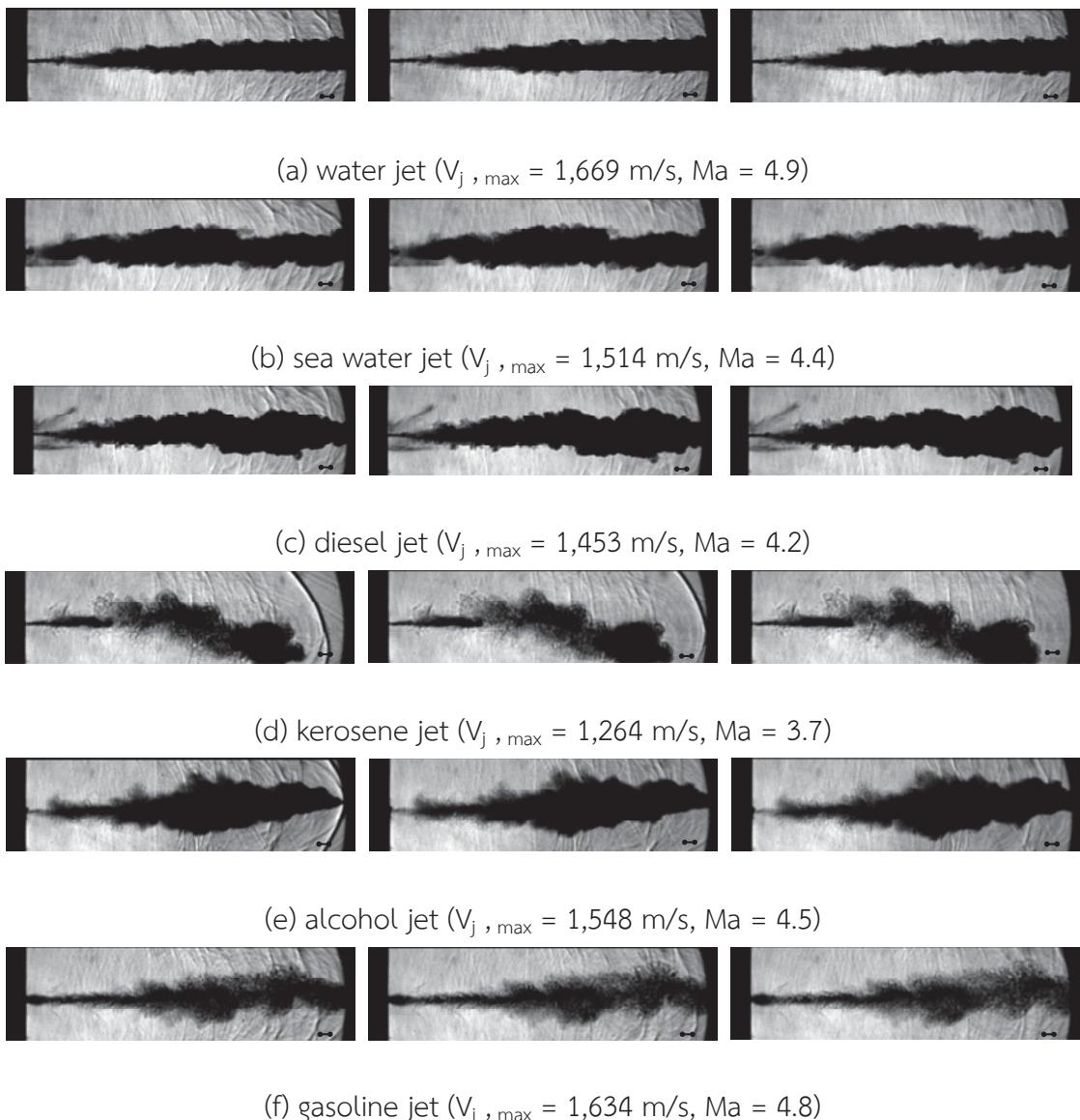


(f) gasoline jet ( $V_{j, \text{max}} = 1,634 \text{ m/s}$ ,  $\text{Ma} = 4.8$ )

รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิด เมื่อฉีดในอากาศ (ต่อ)

เมื่อพิจารณาที่เวลาเท่ากับ  $233 - 300 \mu\text{s}$  พบร่วมกับ ลำพุ่งน้ำและน้ำที่เลยังคงมีลักษณะเรียบ แหลมและยังไม่แสดงให้เห็นถึงการแตกตัวเป็นฝอยละออง แต่ลำพุ่งลำที่สองเริ่มจะสังเกตเห็นได้ชัด สำหรับลำพุ่งน้ำที่เล เมื่อพิจารณาลำพุ่งน้ำมันดีเซลจะพบว่า ขนาดของลำพุ่งมีขนาดใหญ่ขึ้น ในขณะ

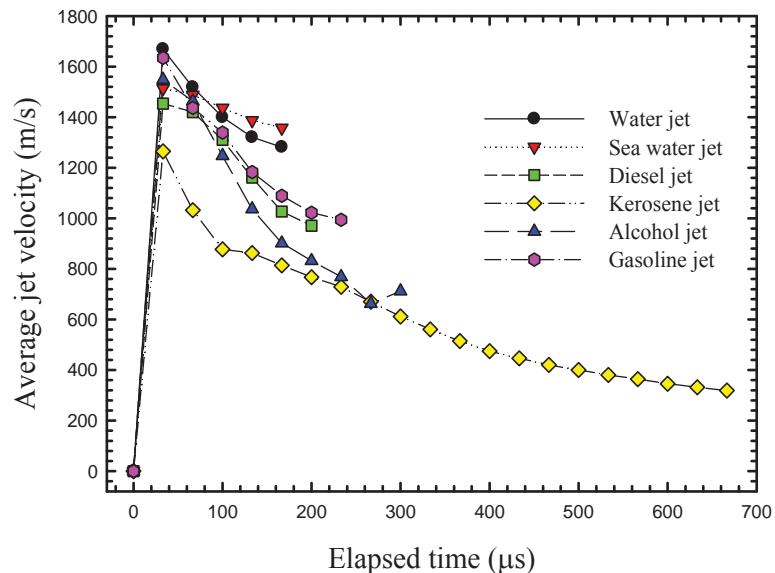
ที่การแตกตัวเป็นฟอยล์ของอย่างรุนแรงเกิดขึ้นกับลำพุ่งน้ำมันก้าดและน้ำมันแก๊สโซเชลิน เมื่อสังเกตลำพุ่งแลกอหออล์จะพบว่า ลำพุ่งมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีความเร็วช้าลงเมื่อเทียบกับลำพุ่งชนิดอื่น



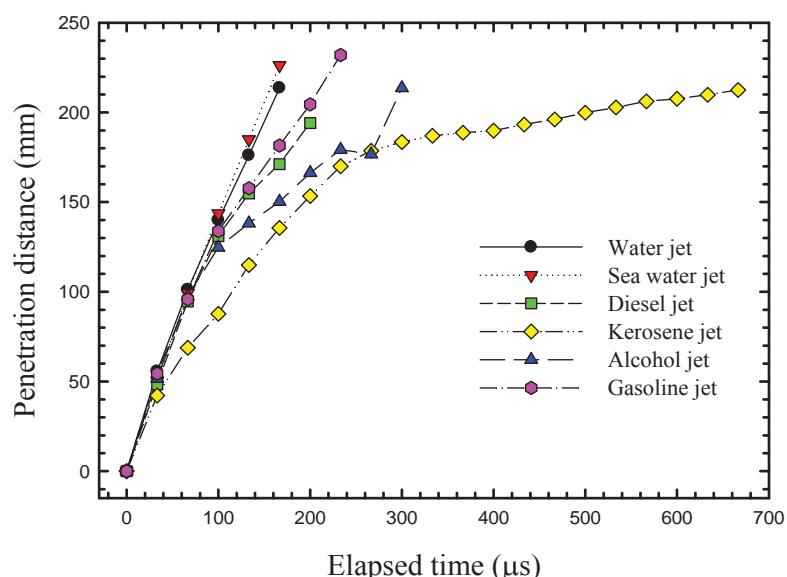
รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิด เมื่อฉีดใช้เวลา  $333 \mu\text{s}$

เมื่อพิจารณาที่เวลาเท่ากับ  $333 - 400 \mu\text{s}$  พบร่วมกับลำพุ่งน้ำมันก้าดและน้ำมันแก๊สโซเชลินอย่างเห็นได้ชัด เมื่อพิจารณาลำพุ่งน้ำมันดีเซลและแลกอหออล์จะพบว่า ขนาดของลำพุ่งมีขนาดใหญ่ขึ้น ถึงแม้จะไม่แตกตัวเป็นฟอยล์ของอย่างเห็นได้ชัดก็ตาม แต่จะสังเกตเห็นการแตกตัวที่ผิดด้านข้างของลำพุ่งทั้งสอง และเมื่อพิจารณาคุณสมบัติของเหลวในตารางที่ 4.1 จะสังเกตพบ การแตกตัวเป็นฟอยล์ของ

ของลำพุ่งจะมีความสัมพันธ์กับความตึงผิว (surface tension) โดยค่าความตึงผิวของน้ำและน้ำทະเลมีค่าสูงจึงยังไม่พบรการแตกตัวเป็นฟอยละองในขณะที่น้ำมันดีเซล น้ำมันก้าด แอลกอฮอล์และน้ำมันแก๊สโซลีนมีค่าความตึงผิวต่ำกว่าจึงทำให้พบรการแตกตัวอย่างชัดเจน ในขณะที่คุณสมบัติอื่นๆ ของของเหลวยังไม่แสดงให้เห็นนัยสำคัญต่อคุณลักษณะของลำพุ่งอย่างชัดเจน



รูปที่ 4.14 ความเร็วเฉลี่ย (average jet velocity) ของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด



รูปที่ 4.15 ระยะการเคลื่อนที่ (penetration distance) ของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด

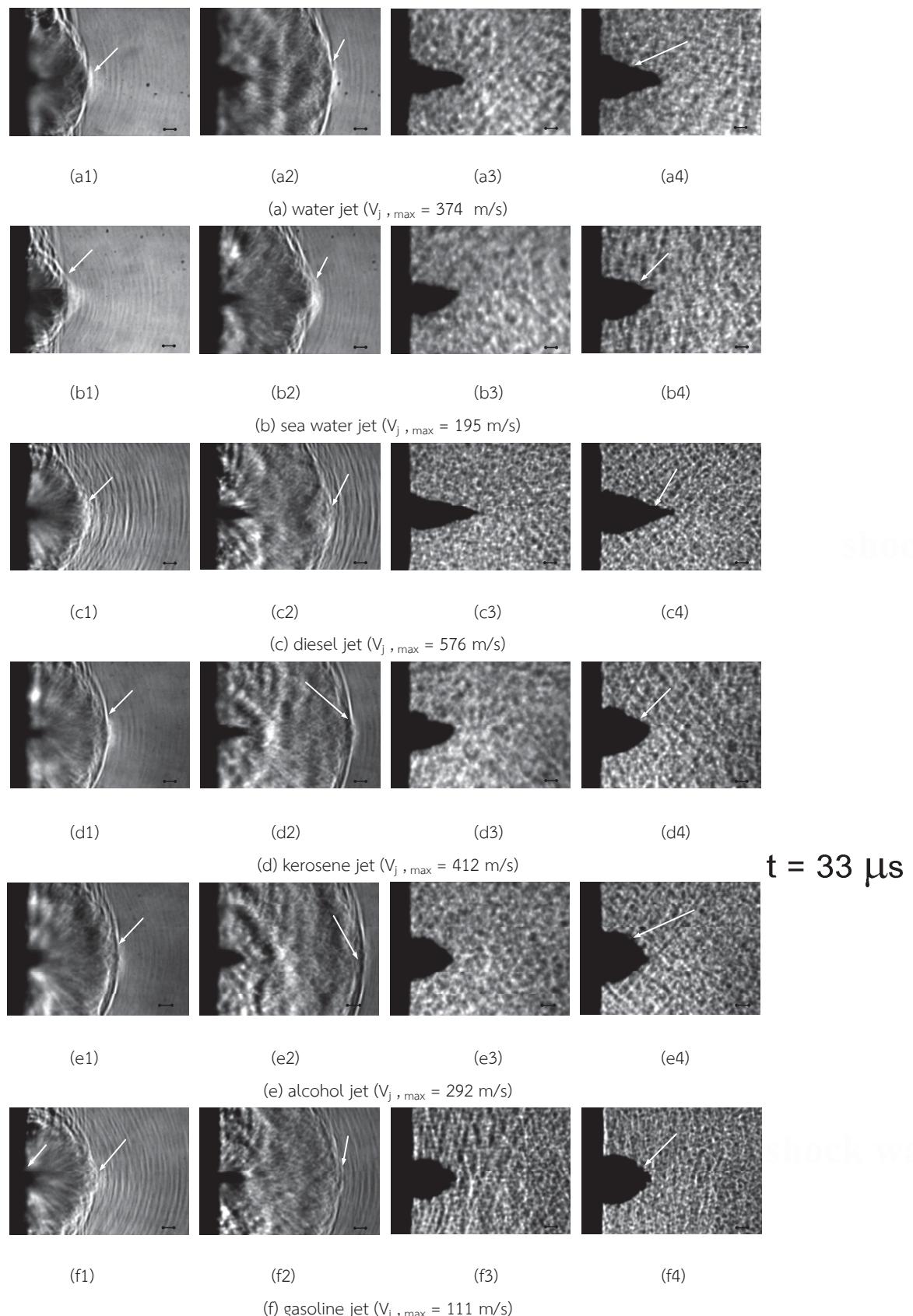
จากรูปที่ 4.14 แสดงความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด จากรูป พบร้า ความเร็วเฉลี่ยสูงสุดของลำพุ่งน้ำ, น้ำทะเล, น้ำมันดีเซล, น้ำมันก๊าด, แอลกอฮอล์ และน้ำมันแก๊สโซเชลีน มีค่าเท่ากับ 1,669.03 m/s, 1,514.17 m/s, 1,453.95 m/s, 1,264.68 m/s, 1,548.58 m/s และ 1634.62 m/s ตามลำดับ ที่เวลาเท่ากับ 67  $\mu$ s จากนั้นความเร็วของลำพุ่งจะค่อยๆ ลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อพิจารณาคุณสมบัติของลำพุ่งจากตารางที่ 4.1 พบร้า คุณสมบัติทางกายภาพต่างๆ ไม่มีนัยสำคัญกับความเร็วของลำพุ่ง อาจเนื่องมาจากการพลังงานจากการระเบกของกระสุนปืนที่ของเหลวได้รับมีค่าสูงมากจนส่งผลให้อิทธิพลของคุณสมบัติทางกายภาพของของเหลวไม่มีนัยสำคัญกับความเร็ว ซึ่งความเร็วที่ผลิตได้ของแต่ละลำพุ่งมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ผลของความเร็วของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด จึงสอดคล้องกับระเบกการเคลื่อนที่ของลำพุ่งโดยที่ลำพุ่งน้ำ น้ำทะเล น้ำมันดีเซล น้ำมันก๊าด แอลกอฮอล์และน้ำมันแก๊สโซเชลีน เคลื่อนที่ได้ 213.62 mm, 226.24 mm, 171.18, 135.63 mm, 150.25 mm และ 181.51 mm ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.15 โดยความเร็วเฉลี่ยสูงสุด Mach no และระเบกการเคลื่อนที่สูงสุดของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิดสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สรุปผลการทดลองคุณลักษณะลำพุ่งความเร็วสูงในอากาศ

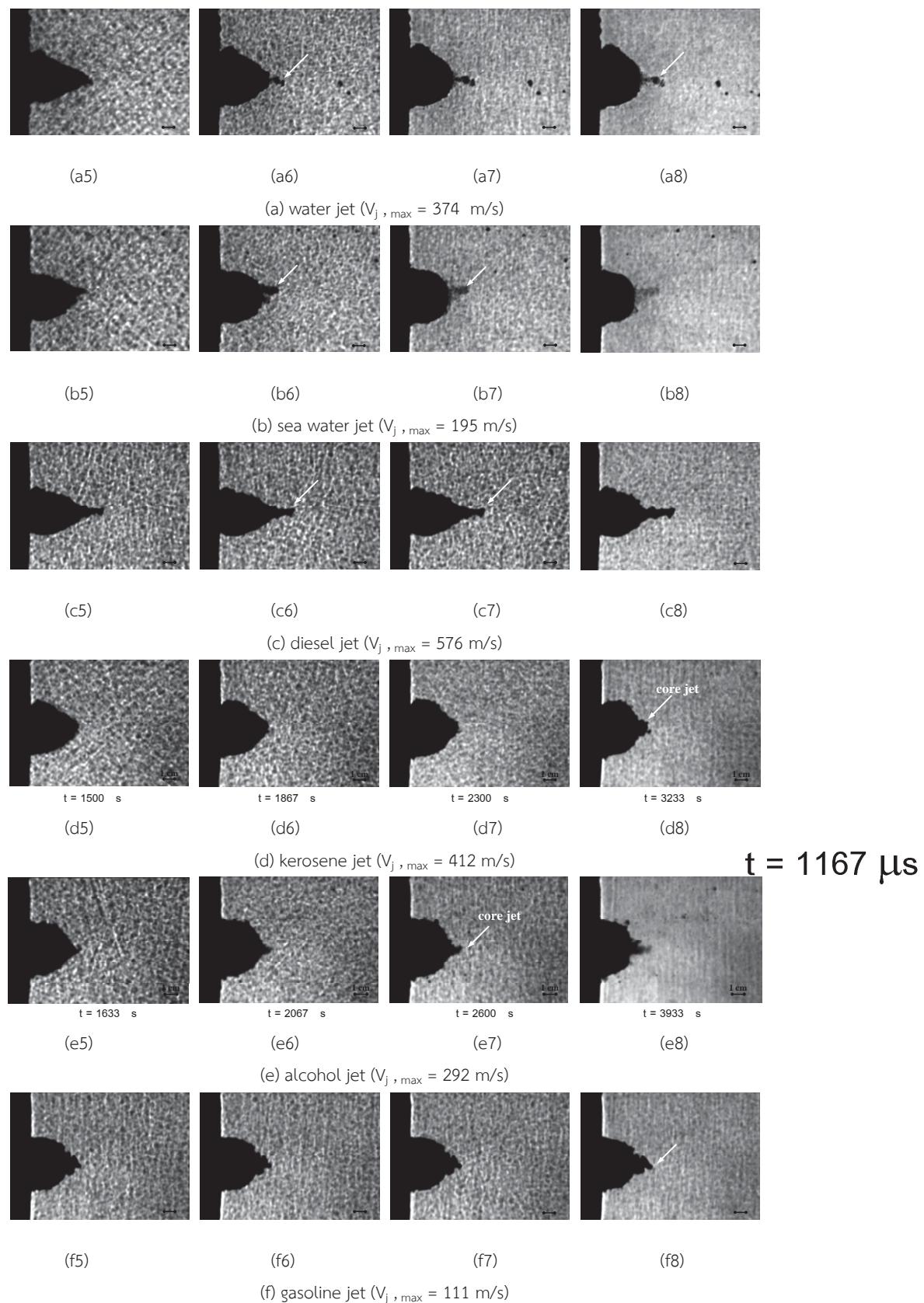
Liquid type	Maximum average jet velocity (m/s)	Mach no.	Jet Penetration distance at 167 $\mu$ s (mm)
Water	1,669	4.9	213
Sea water	1,514	4.4	226
Diesel	1,453	4.2	171
Kerosene	1,264	3.7	135
Alcohol	1,548	4.5	150
Gasoline	1,634	4.8	181

#### 4.7 อิทธิพลของชนิดลำพุ่งเมื่อฉีดในน้ำ

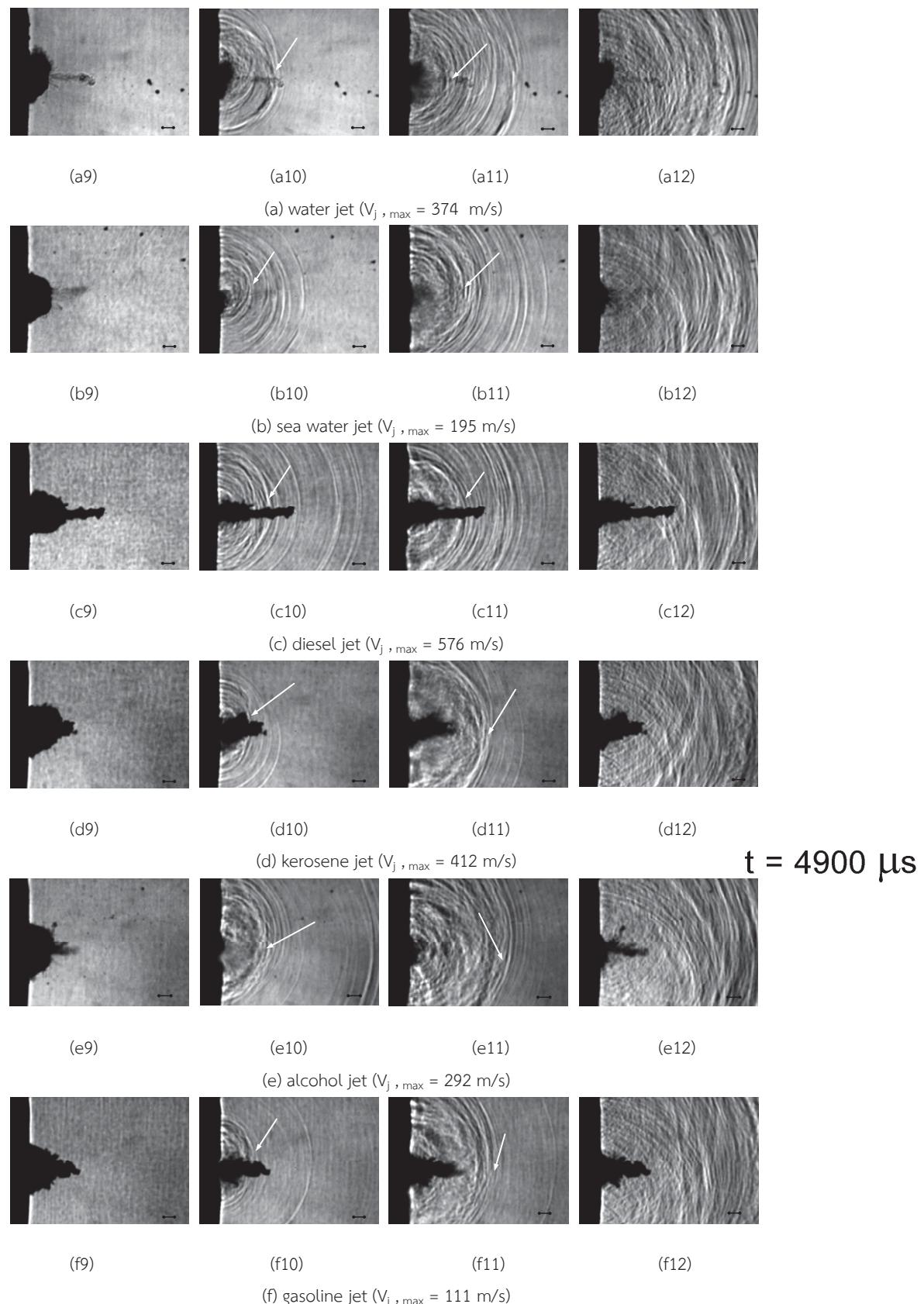
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงอิทธิพลของชนิดของลำพุ่งต่อคุณลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูงเมื่อฉีดในน้ำโดยของเหลวที่ใช้เป็นชนิดเดียวกับกรณีฉีดในอากาศ ในการอธิบายคุณลักษณะของลำพุ่งที่เกิดขึ้น จะใช้การถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูงร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพ Shadowgraph และไม่มีเทคนิค Shadowgraph ร่วมถึงการถ่ายภาพในแนวแกน



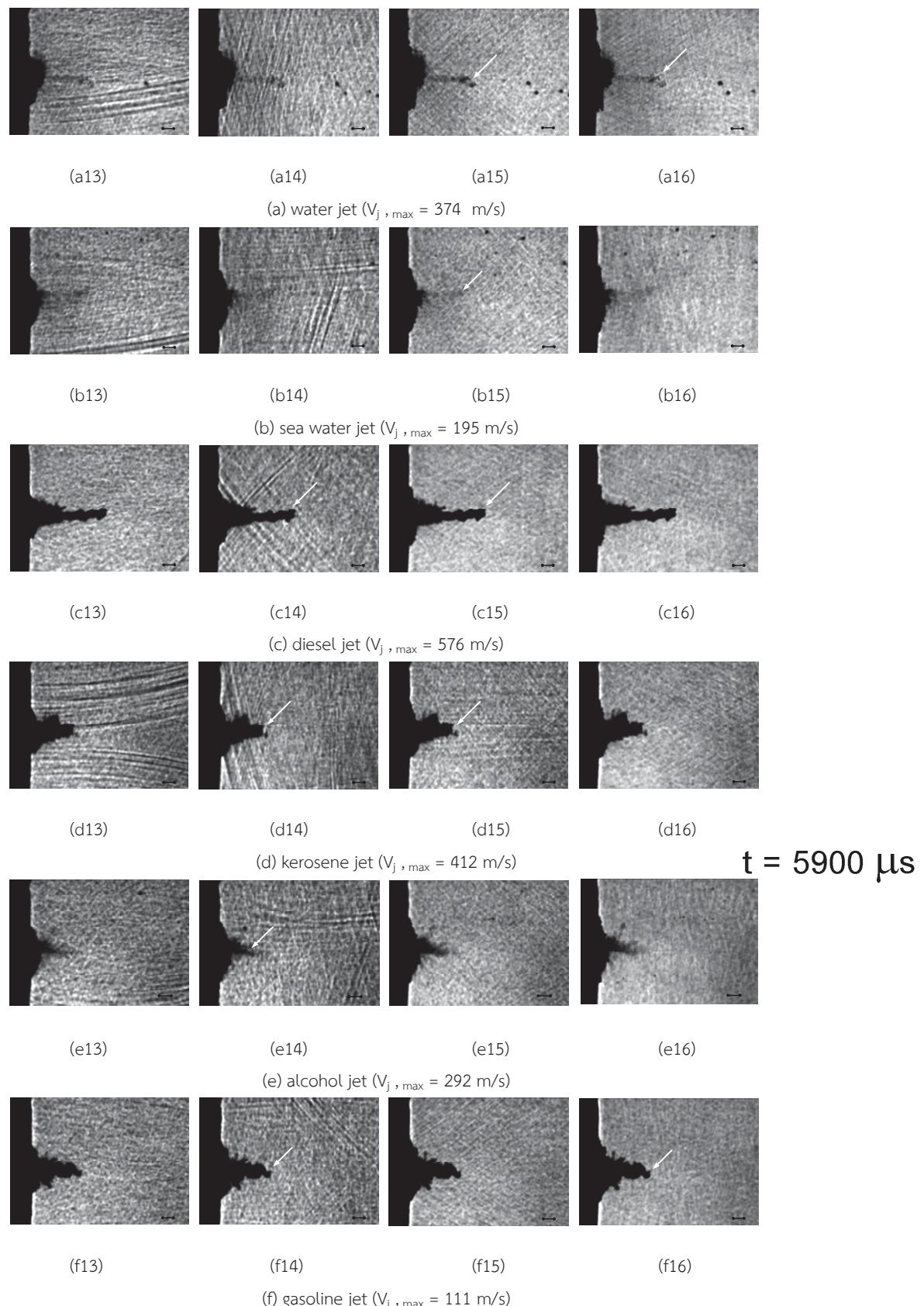
รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิดเมื่อฉีดในน้ำ



รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิดเมื่อฉีดในน้ำ (ต่อ)



รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิดเมื่อฉีดในน้ำ (ต่อ)



รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิดเมื่อฉีดในน้ำ (ต่อ)