



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การศึกษาคุณลักษณะของลําพังความเร็วสูงใน
condensed media

โดย นายอนิรุตต์ มัทธูจักษ์ และคณะ

สิงหาคม 2555

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การศึกษาคุณลักษณะของลำพุงความเร็วสูงใน condensed media

คณะผู้วิจัย

สังกัด

1. นายอนิรุตต์ มัทธจักร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

2. นายกุลเชษฐ์ เพียรทอง

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

สนับสนุนโดยทบวงมหาวิทยาลัย และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย ทบวงฯ และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณลักษณะของลำพุ่งของเหลวความเร็วสูงที่ฉีดใน condensed media (น้ำ) และในอากาศ ซึ่งการผลิตลำพุ่งความเร็วสูงในงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิคที่เรียกว่า การขับลำพุ่งด้วยการกระแทก (Impact driven method) ในชุดทดลองที่เรียกว่า Horizontal Single Stage Powder Gun (HSSPG) โดยเทคนิคนี้จะอาศัยกระสุนปืนความเร็วสูง กระแทกกับของเหลวซึ่งบรรจุอยู่ในหัวฉีด ซึ่งการวิจัยนี้จะใช้ความเร็วของกระสุนปืนเท่ากับ 950 ± 30 m/s และหัวฉีดทรงกรวยมุม 30° ขนาดรูคอคอดที่ทางออกเท่ากับ 0.7 mm ในการผลิตลำพุ่ง โดยทำการศึกษาคุณลักษณะของลำพุ่งของเหลว 6 ชนิด คือ น้ำ, น้ำทะเล, น้ำมันดีเซล, กลีโกลีน, แอลกอฮอล์ และน้ำมันแก๊สโซลีน จากภาพถ่ายด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูง (High-speed digital video camera) ร่วมกับการถ่ายภาพด้วยเทคนิคฮาโดว์กราฟ และไม่ใช่เทคนิคฮาโดว์กราฟที่การถ่ายภาพใน 2 มุมมองคือ มุมมองปกติเช่นเดียวกับการใช้เทคนิคฮาโดว์กราฟและมุมมองในแนวแกน จากการถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูงร่วมกับการถ่ายภาพด้วยเทคนิคฮาโดว์กราฟ พบว่า ลำพุ่งของเหลวทั้ง 6 ชนิดที่ฉีดในอากาศ จะมีรูปร่างของลำพุ่งที่ไม่แตกต่างกันมากนัก และสังเกตพบการเกิด shock wave การเกิดการเปลี่ยนแปลงมุมของ shock wave การแตกตัวของลำพุ่ง การกระจายตัวเป็นฟอยละออง การระเหิดกลายเป็นไอของลำพุ่งอย่างเห็นได้ชัด โดยความเร็วสูงสุดของลำพุ่งน้ำ, น้ำทะเล, น้ำมันดีเซล, กลีโกลีน, แอลกอฮอล์ และ น้ำมันแก๊สโซลีน 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 ความเร็วสูงสุดของลำพุ่งน้ำ, น้ำทะเล, น้ำมันดีเซล, กลีโกลีน, แอลกอฮอล์ และ น้ำมันแก๊สโซลีน มีค่าเท่ากับ 374.24 m/s, 195.00 m/s, 576.41 m/s, 412.95 m/s, 292.51 m/s และ 111.84 m/s ตามลำดับ ซึ่งช้ากว่ากรณีที่ฉีดในอากาศเนื่องจากผลของแรงต้านทานในน้ำสูงกว่าในอากาศ และพบพฤติกรรมการขยายตัว การยุบตัวของ water vapor bubble, shock wave, compressed wave และ rebound shock wave ซึ่งเกิดจากการยุบตัวของ bubble อย่างชัดเจน ซึ่งเป็นคุณลักษณะที่ไม่พบเมื่อฉีดในอากาศ และเมื่อถ่ายภาพโดยไม่ใช้เทคนิคฮาโดว์กราฟ จะพบกลไกการเกิด bubble การขยายตัว การยุบตัว และการหายไปของ bubble ได้อย่างชัดเจนและเข้าใจง่าย แต่จะไม่สามารถสังเกตเห็นพฤติกรรมต่างๆ ของ shock wave และ rebound shock wave ในน้ำได้ นอกจากนี้เมื่อถ่ายภาพลำพุ่งในน้ำในมุมมองแนวแกนโดยไม่ใช้เทคนิคฮาโดว์กราฟ จะ

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

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 ± 30 m/s and 30° conical nozzle having orifice diameter of 0.7 mm were used for jet generation. Characteristics of 6 liquid types (water, sea water, diesel, kerosene, alcohol and gasoline) were described by visualization using a high-speed digital video camera with and without shadowgraph technique in normal and axial views. From shadowgraph images, the jet body of whole liquid jets was quite similar. Jet-generated shock wave, change in shock angle, break-up, atomization and vaporization of the jets were obviously observed. The maximum average jet velocities in air of water, sea water, diesel, kerosene, alcohol and gasoline were 1,669.03 m/s, 1,514.17 m/s, 1,453.95 m/s, 1,264.68 m/s, 1,548.58 m/s and 1,634.62 m/s, respectively, while they in water were 374.24 m/s, 195.00 m/s, 576.41 m/s, 412.95 m/s, 292.51 m/s and 111.84 m/s, respectively. The maximum average velocity of jets injected in water was slower than that in air because the hydrodynamic drag is much higher than the aerodynamic drag. Moreover, water-vapor bubble, expansion and contraction of the jet-induced bubble, shock wave in water, compressed wave and rebound shock wave being generated by water bubble collapse could be obviously observed. From the visualization without shadowgraph technique, the bubble generation, expansion, contraction and collapse of the bubble were clearly seen and easily interpreted, while the shock wave and rebound shock in water could not be observed with this visualization. Besides, the generation, expansion and

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

กิตติกรรมประกาศ

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

นายอนิรุต์ มัทธจักร์

15 สิงหาคม 2555

สารบัญ

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

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 คุณลักษณะของลำพุ่งของเหลวความเร็วสูง	37
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
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	87
5.1 สรุปผลการศึกษา	87
5.2 ข้อเสนอแนะ	88
เอกสารอ้างอิง	89
ภาคผนวก	93
ภาคผนวก ก การออกแบบชุดทดลอง	94
ภาคผนวก ข ขั้นตอนการทดลองยิงกระสุนปืนความเร็วสูง	96
ภาคผนวก ค ผลสำเร็จจากการดำเนินโครงการ	106

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ความเร็วเสียงในแก๊สอุดมคติ	5
2.2	ความเร็วเสียงในตัวกลางที่อุณหภูมิ 20 °C	7
2.3	ค่าคงที่ของก๊าซ	17
4.1	คุณสมบัติของของเหลวที่ใช้ในการทดลอง	50
4.2	สรุปผลการทดลองคุณลักษณะลำพุ่งความเร็วสูงในอากาศ	56
4.3	สรุปผลการทดลองคุณลักษณะลำพุ่งความเร็วสูงในน้ำ	83
ข.1	ความเร็วของกระสุนปืนจากการทดลอง laser 1 และ laser 2 ระยะห่าง Δs_1	102
ข.2	ความเร็วของกระสุนปืนจากการทดลอง laser 2 และ laser 3 ระยะห่าง Δs_2	104

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	(a) กระแสลมที่ค่าของ $M_a < 1$ และ (b) กระแสลมที่ค่าของ $M_a > 1$	9
2.2	คลื่นกระแทก (shock wave)	9
2.3	คลื่นกระแทกเป็นแนวโค้ง	10
2.4	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงสภาวะต่างๆ 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	พื้นฐานการจัดระบบชไลเรน (Schlieren)	19
2.16	หลักการทำงานของ Knife-edge	19
2.17	ผลจากการเปลี่ยนทิศทางของคมมีด	20
2.18	ระบบชไลเรนกับกระจกสะท้อน (Schlieren system with mirrors)	20
2.19	ระบบอินเทอเฟอโรมิเตอร์ขั้นพื้นฐานโดยใช้ beam splitter	21
2.20	Mach-Zehnder interferometer	21
2.21	การถ่ายภาพของการไหลเดียวกันด้วยเทคนิค (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	

Horizontal single stage powder gun (HSSPG)

30

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3	ขั้นตอนการยิงของชุดทดลอง HSSPG : (a) ก่อนจุดระเบิด, (b) การจุดระเบิด, (c) ดินปืนเผาไหม้หมด, (d) หลังจากดินปืนเผาไหม้หมด และ (e) การยิงกระสุนปืน
3.4	การระบายอากาศด้านหน้ากระสุนปืน
3.5	การวัดความเร็วกระสุนปืนด้วยเทคนิค time of flight method
3.6	ตัวอย่างสัญญาณที่วัดได้จาก laser beam ชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ($\Delta s_1 = 105$ mm) บนหน้าจอ oscilloscope เครื่องที่ 1
3.7	ตัวอย่างสัญญาณที่วัดได้จาก laser beam ชุดที่ 2 และชุดที่ 3 ($\Delta s_2 = 33$ mm) บนหน้าจอ oscilloscope เครื่องที่ 2
3.8	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของดินปืนและความเร็วของกระสุนปืนที่ระยะ Δs_1
3.9	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของดินปืนและความเร็วของกระสุนปืนที่ระยะ Δs_2
4.1	การขับลำพุ่งด้วยการกระแทก (Impact driven method)
4.2	(a) กระสุนปืน และ (b) หัวฉีดที่ใช้ในการทดลอง
4.3	การติดตั้งระบบถ่ายภาพด้วยเทคนิค Shadowgraph
4.4	การติดตั้งกล้องวิดีโอความเร็วสูงในมุมมองปกติโดยไม่มีการติดตั้งระบบการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph
4.5	การติดตั้งกล้องวิดีโอความเร็วสูงในแนวแกนโดยไม่มีการติดตั้งระบบการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph
4.6	ภาพถ่ายโดยเทคนิค shadowgraph ของลำพุน้ำในอากาศ (water jet in air, $V_{j, \max} = 1,669$ m/s, $Ma = 4.9$)
4.7	ความเร็วเฉลี่ยและระยะการเคลื่อนที่ของลำพุน้ำในอากาศ (Average jet velocity and jet penetration distance in air)
4.8	ภาพถ่ายโดยเทคนิค shadowgraph ของลำพุน้ำในน้ำ (water jet in water, $V_{j, \max} = 374$ m/s)
4.9	ภาพถ่ายโดยไม่ใช้เทคนิค shadowgraph ของลำพุน้ำในน้ำ
4.10	ระยะการเคลื่อนที่ของลำพุ่งและ bubble และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ของลำพุน้ำในน้ำ (jet and bubble penetration distance and bubble diameter of water jet in water)
4.11	ภาพถ่ายในแนวแกนโดยไม่ใช้เทคนิค shadowgraph ของลำพุน้ำในน้ำ

สารบัญรูป (ต่อ)

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

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
ก.1	ชุดปล่อยกระสุนปืน (launcher หรือ powder gun)	94
ก.2	ท่อส่งกระสุนปืน (launch tube)	94
ก.3	ท่อระบายความดัน (pressure relief section)	95
ก.4	ห้องทดสอบ (test chamber)	95
ข.1	ซังมวลของกระสุนปืน	97
ข.2	วัดขนาดของกระสุนปืน	97
ข.3	บรรจุกระสุนปืน	98
ข.4	บรรจุดินปืนและติดไฟรเมอร์	98
ข.5	ใช้สัญญาณ 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 ซึ่งถือเป็นการวิจัยเริ่มแรกเกี่ยวกับลำพุงความเร็วสูง (high-speed liquid jet) ที่เกิดจากเม็ดฝนปะทะกับพื้นผิวของตัวเครื่องบินหรือเครื่องบินระหว่างการเคลื่อนที่ในอากาศด้วยความเร็วสูงระหว่างฝนตก ต่อมาได้ศึกษาลำพุงความเร็วสูงในแง่มุมด้านวิศวกรรมต่างๆ เช่น การศึกษาเกี่ยวกับ cavitations [9-10] เครื่องดับเพลิง (fire extinguisher) เทคโนโลยีเกี่ยวกับการตัดโดยลำพุง (jet cutting technology) การทำสะอาดวัสดุโดยลำพุง (material cleaning by jets) การทำเหมืองแร่และการเจาะอุโมงค์โดยการกระแทกของลำพุงความเร็วสูง (mining and tunneling by means of high-speed jet impingements) [11-20] การฉีดน้ำมันในเครื่องยนต์ดีเซล การฉีดน้ำมันแก๊ซโซลีนในเครื่องยนต์แก๊ซโซลีน (direct injection gasoline engine, GDI engine) และเครื่องยนต์ SCRAM jet (Supersonic Combustion Ram Jet engine, SCRAM jet engine) [21-36]

จากงานวิจัยต่างๆ พบว่า ในมุมมองของการเผาไหม้ (viewpoint of combustion) ลำพุงน้ำมันความเร็วสูง มีส่วนช่วยให้การเผาไหม้มีประสิทธิภาพดีขึ้น เนื่องจากการแตกตัวเป็นฝอยละอองของน้ำมันและการผสมคลุกเคล้ากันกับอากาศดีขึ้น และในมุมมองของเทคโนโลยีการตัดโดยลำพุง (viewpoint of jet cutting technology) ลำพุงความเร็วสูงสามารถตัดวัสดุที่มีความหนาหรือความแข็งแรงได้เป็นอย่างดี และยังสามารถทำความสะอาดได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจาก Momentum energy ของลำพุงความเร็วสูงมีค่าสูงเพียงพอ อย่างไรก็ตาม สำหรับการผลิตลำพุงความเร็วสูงจนมีความเร็วอยู่ในช่วง supersonic หรือ hypersonic speed นั้น จะต้องใช้ความดันขับ (driving pressure) สูงมากถึงหลายร้อย MPa ซึ่งมีข้อจำกัดในด้านการผลิตและการเก็บความดันสูงดังกล่าวในถังเก็บความดัน pressure vessel จากข้อจำกัดดังกล่าว จึงมีการคิดค้นวิธีการผลิตลำพุงความเร็วสูงโดยวิธีที่เรียกว่า impact driven method หรือ Bowden and Brunton method [37,38] โดยวิธีนี้จะยิงกระสุนความเร็วสูง (high-speed projectile) เข้าไปกระแทกกับของเหลวซึ่งบรรจุอยู่ในหัวฉีด (nozzle) โมเมนตัมของกระสุนจะทำให้ความดันของของเหลวมีค่าสูงขึ้นจนกระทั่งความดันในระดับ GPa หลังจากนั้นของเหลวก็จะฉีดออกมาจากหัวฉีดด้วยความเร็วสูง ซึ่งเป็นการฉีดลำพุงจากการกระแทกของกระสุนนั่นเอง จากนั้นเป็นต้นมาการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับลำพุงความเร็วสูงจะใช้หลักการนี้ทั้งสิ้น

จากงานวิจัยต่างๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้นจะพบว่า มีเพียงการศึกษาเกี่ยวกับลำพุงความเร็วสูง (high-speed liquid jet) โดยฉีดเข้าไปในของไหลในสถานะแก๊ส (gas phase) เช่น อากาศเท่านั้น ซึ่งในปัจจุบัน มีนักวิจัยบางกลุ่มได้พยายามศึกษาการนำ high-speed jet มาประยุกต์ใช้กับการแพทย์ [39-41] เช่น การฉีดยาแบบไม่ใช้เข็ม (needleless) โดยใช้ลำพุงความเร็วสูงของตัวยาสอดเข้าไปในผิวหนังโดยตรง และ การรักษาการอุดตันของก้อนเลือดในเส้นเลือดในสมองโดยการฉีดลำ

พุ่งความเร็วสูงเข้าไปกระแทกทำลายเม็ดเลือด นอกจากนี้แล้วยังมีแนวคิดนำลำพุ่งไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้สมุทร [42-43] เช่น การตัดโครงสร้างใต้ทะเลโดยลำพุ่งความเร็วสูง (jet cutting marine structures) หรือการเจาะใต้ทะเล (jet drilling at the bottom of the sea) จากทิศทางการประยุกต์ใช้ในปัจจุบันพบว่า ไม่เพียงแต่ลำพุ่งความเร็วสูงที่ฉีดเข้าไปในของไหลสถานะแก๊ส (อากาศ) เท่านั้น แต่ยังมีคามพยายามนำไปประยุกต์ใช้ในกรณีที่ฉีดลำพุ่งความเร็วสูงภายใต้ condensed media เช่น น้ำ หรือน้ำทะเล เป็นต้น แต่คุณลักษณะสำคัญต่างๆ ของ ลำพุ่งความเร็วสูงที่ฉีดภายใต้ condensed media (น้ำ) ซึ่งประกอบไปด้วย ลักษณะของลำพุ่ง การแตกตัว (break up) การผสมกัน (mixing) ระหว่างลำพุ่งกับของเหลว ความเร็วของลำพุ่ง (jet velocity) ระยะการเคลื่อนที่พุ่งเข้าไปในของเหลว (penetration distance) และอื่นๆ ยังไม่มีงานวิจัยใดกล่าวถึงหรือรายงานมาก่อนเลย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดที่จะศึกษาและทำการทดลองเกี่ยวกับลำพุ่งความเร็วสูงกรณีฉีดใน 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) และคุณลักษณะที่แตกต่างของลำพุ่งความเร็วสูงเมื่อฉีดภายใต้ของไหลในสถานะแก๊ส (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 ผลิตลำพุ่งความเร็วสูงกรณีฉีดภายใต้ของไหลในสถานะแก๊ส (อากาศ) และใน condensed media (น้ำ)

1.3.3 ศึกษาลำพุ่งความเร็วสูงกรณีฉีดภายใต้ของไหลในสถานะแก๊ส (อากาศ) และใน condensed media (น้ำ)

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

1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

1.4.1 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องจากวารสารวิชาการทั้งในประเทศและต่างประเทศที่เกี่ยวข้องกับลำพ่นความเร็วสูงทั้งในอากาศและใน condensed media

1.4.2 ศึกษาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองยิงกระสุนความเร็วสูงเพื่อที่จะใช้สร้างลำพ่นความเร็วสูง

1.4.3 ทำการออกแบบและปรับปรุงชุดยิงกระสุนความเร็วสูงเพื่อให้เหมาะสมกับการทดลองยิงลำพ่นความเร็วสูงทั้งในกรณีฉีดอากาศและใน condensed media

1.4.4 ออกแบบการทดลอง จัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือวัดต่างๆ เช่น อุปกรณ์วัดความเร็ว ออสซิลโลสโคป เป็นต้น

1.4.5 ศึกษาสมรรถนะของชุดทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของกระสุนปืนกับน้ำหนักดินปืนที่ใช้ในการทดลอง

1.4.6 ทดลองผลิตลำพ่นความเร็วสูงกรณีฉีดในสถานะแก๊ส (อากาศ) และใน condensed media (น้ำ)

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

1.4.8 วิเคราะห์ผลการทดลอง

1.4.9 สรุปและเขียนรายงานผลการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

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

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

1.5.3 อาจจะค้นพบชนิดของลำพ่นที่เหมาะสมกับงานในแต่ละด้านทั้งในทางวิศวกรรม แพทย์ศาสตร์ หรืออื่นๆ

1.5.4 สามารถพัฒนาเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับงานด้านการแพทย์ อุตสาหกรรมได้สมุทรเทคโนโลยีการตัด (cutting technology) ในน้ำ และงานด้านอื่นๆที่เกี่ยวข้องได้จริง

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความเร็วเสียง (Speed of sound)

ความเร็วเสียง [44] คือ ระยะทางที่เสียงเดินทางไปในตัวกลางใดๆ ได้ในหนึ่งหน่วยเวลา โดยทั่วไปเสียงเดินทางในอากาศที่มีอุณหภูมิ 25°C ที่ความเร็วเท่ากับ 346 m/s และในอากาศที่อุณหภูมิ 20°C ที่ความเร็วเท่ากับ 343 m/s ความเร็วที่เสียงเดินทางได้นั้นอาจมีค่ามากขึ้นหรือน้อยลงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของตัวกลางเป็นหลัก และอาจได้รับอิทธิพลจากความชื้นบ้างเล็กน้อย แต่ไม่ขึ้นกับความดันอากาศ เนื่องจากการเดินทางของเสียงอาศัยการสั่นของโมเลกุลของตัวกลาง ดังนั้นเสียงจะเดินทางได้เร็วขึ้นหากตัวกลางมีความหนาแน่นมาก ทำให้เสียงเดินทางเร็วในของแข็ง แต่เดินทางไม่ได้ในอวกาศ เพราะอวกาศเป็นสุญญากาศจึงไม่มีโมเลกุลของตัวกลางอยู่ ความเร็วเสียง (C) โดยทั่วไปคำนวณได้จาก

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

เมื่อ

c คือ สัมประสิทธิ์ของความแข็งเกร็ง (coefficient of stiffness)

ρ คือ ความหนาแน่น

ดังนั้น ความเร็วเสียง จะเพิ่มขึ้นตามความแข็งเกร็งของวัสดุ และ ลดลงเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น

2.1.1 ความเร็วเสียงในแก๊ส

ค่า c ในตัวกลางสถานะแก๊สสามารถประมาณโดย

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

เมื่อ

γ คือ ดัชนีอะเดียบาติก (adiabatic index)

p คือ ความดัน

ดังนั้น ความเร็วเสียงในแก๊สสามารถคำนวณได้โดย

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

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)
 ปกติในทางอากาศพลศาสตร์ค่านี้หาจาก การหารค่าคงที่ของแก๊สสากล R (J/(mol.K)) ด้วย ค่ามวล
 โมล (molar mass)

γ คือ ค่าดัชนีอะเดียบาติก (Adiabatic index) มีค่าเท่ากับ 1.402 สำหรับ
 อากาศ บางครั้งเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ K (cappa)

T คือ ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) ที่สภาพบรรยากาศมาตรฐาน (Standard
 atmosphere)

ในกรณีของแก๊สในอุดมคติ ความเร็วเสียง C จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเท่านั้น โดยไม่ขึ้นอยู่กับ
 ความดัน สำหรับอากาศนั้นเกือบถือได้ว่าเป็นแก๊สในอุดมคติ อุณหภูมิของอากาศเปลี่ยนแปลงตาม
 ระดับความสูง 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

ของเหลวจะมีความแข็งแกร่งต่อแรงอัดเท่านั้นโดยไม่มี ความแข็งแกร่งเฉือน ดังนั้น ความเร็วของเสียงในของเหลวหาได้โดย

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

โดย

K คือ โมดูลัสของการอัดอะเดียบาติก (adiabatic bulk modulus)

2.1.3 ความเร็วเสียงในของแข็ง

ของแข็งนั้นมีค่าความแข็งแกร่งไม่เป็นศูนย์ทั้งต่อแรงบีบอัดหรือการเปลี่ยนปริมาตร (volumetric deformation) และแรงเฉือน (shear deformation) ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะกำเนิดคลื่นเสียงที่มีความเร็วต่างกันขึ้นกับรูปแบบของคลื่นในแท่งของแข็งซึ่งมีขนาดความหนา (หรือขนาดของตัวกลางในแนวตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของคลื่น) เล็กกว่าความยาวคลื่นมาก ความเร็วเสียงหาได้จาก

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

โดย

E คือ โมดูลัสของยัง

ρ คือ ความหนาแน่น

ดังนั้น ความเร็วเสียงในตัวกลางในแท่งจะมีค่าประมาณ 5,100 m/s ความเร็วของเสียงสามารถหาได้จากการแทนค่าโมดูลัสของยังด้วยโมดูลัสคลื่นหน้าราบ (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

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

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

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

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
พิวซี (อ่อน)	80
พิวซี (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 $^{\circ}\text{C}$ ความแม่นยำในการประมาณในช่วงของอุณหภูมิในช่วง -20°C ถึง 40°C จะมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 0.2% ในช่วงอุณหภูมิสูงกว่า หรือ ต่ำกว่านั้นความเร็วของเสียงจะประมาณจากสมการที่ 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 เลขมัคปกติจะใช้กับวัตถุที่เดินทางด้วยความเร็วสูงในของไหลและของเหลวที่ไหลด้วยความเร็วสูงในช่องแคบๆ หรืออุโมงค์ลม และเนื่องจากเป็นสัดส่วนของความเร็ว ดังนั้น เลขมัคจึงเทอมไม่มีหน่วย โดยที่สภาวะระดับน้ำทะเลมาตรฐาน มัค 1 เท่ากับความเร็ว 1,225 km/hr เนื่องจากความเร็วเสียงนั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น นอกจากนี้อาจพบว่าเลขมัคนั้นยังเป็นสัดส่วนของแรงเฉื่อย (แรงอากาศพลศาสตร์) 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

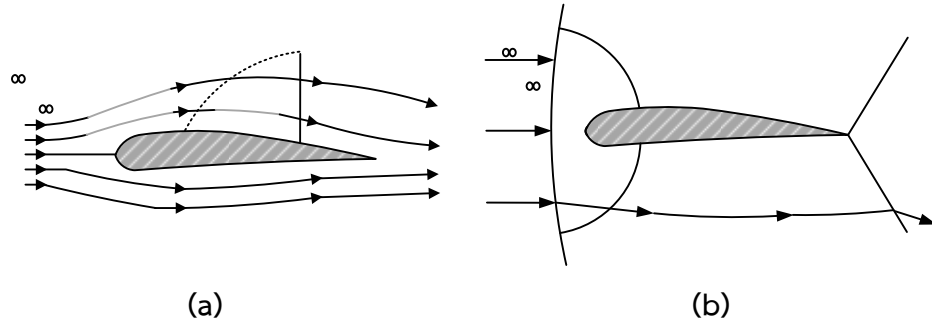
$M_a < 1$ เรียกว่า Subsonic เป็นช่วงของความเร็วที่ต่ำกว่าความเร็วเสียง

$M_a = 1$ เรียกว่า Sonic เป็นช่วงของความเร็วเสียง

$0.8 < M_a < 1.2$ เรียกว่า Transsonic เป็นช่วงของความเร็วยานเสียงเป็นความเร็วที่อยู่ประมาณความเร็วเสียง

$1.2 < M_a < 5$ เรียกว่า Supersonic เป็นช่วงของความเร็วที่เหนือหรือมากกว่าความเร็วเสียง

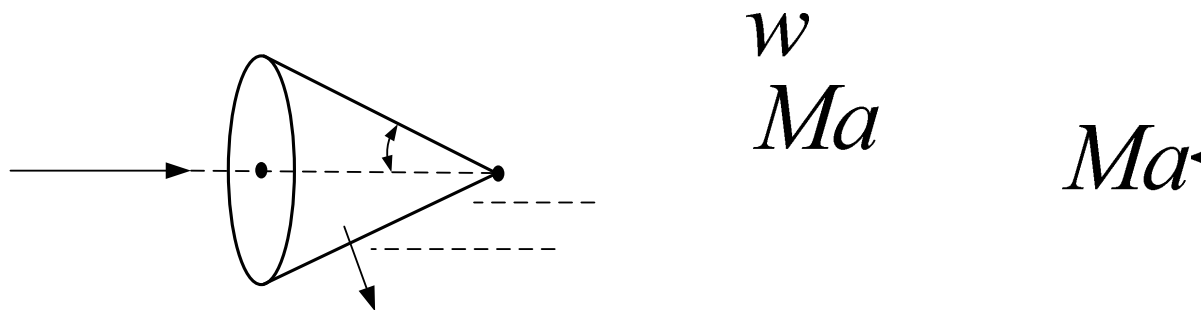
$M_a > 5$ เรียกว่า Hypersonic เป็นช่วงของความเร็วเหนือเสียงมาก มากกว่า 5 เท่าขึ้นไป



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

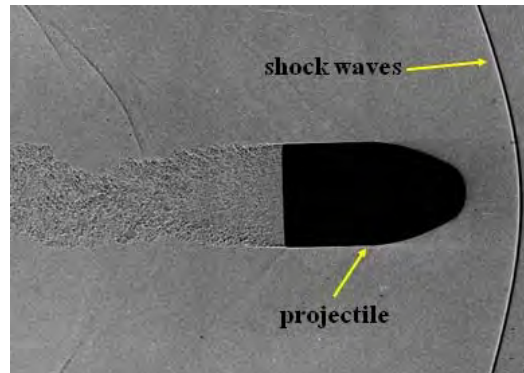
2.3 คลื่นกระแทก (shock wave)

คลื่นกระแทกเกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่ได้เท่ากับความเร็วของคลื่นหรือเร็วกว่า ซึ่งจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่คลื่นไม่สามารถที่จะเคลื่อนที่ออกไปจากแหล่งกำเนิดเสียงได้ โดยถ้าแหล่งกำเนิดเคลื่อนที่ได้เท่ากับความเร็วของคลื่น คลื่นจะเกิดการซ้อนทับกันและเสริมกันกลายเป็นแอมพลิจูดขนาดใหญ่เรียกว่า คลื่นกระแทก (shock wave) และเมื่อแหล่งกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่เร็วกว่าคลื่น คลื่นจะฟอร์มตัวเป็นรูปกรวยโดยมีมุม $\theta = \sin^{-1}(V/V_0)$ อัตราส่วน (V/V_0) เรียกว่า เลขมัค (Mach number) คลื่นกระแทกเกิดขึ้นได้บ่อยมากในสถานการณ์ต่างๆ กัน เช่น โซนิคบูม (Sonic boom) คือ คลื่นกระแทกประเภทหนึ่งของเครื่องบินที่บินด้วยความเร็วเหนือเสียง คลื่นที่เกิดหลังเรือเร็วก็เป็นคลื่นกระแทกอีกประเภทหนึ่ง นอกอวกาศก็สามารถเกิดคลื่นกระแทกได้ อย่างเช่น ลมสุริยะที่วิ่งด้วยความเร็วสูงเข้าชนสนามแม่เหล็กโลก เป็นต้น

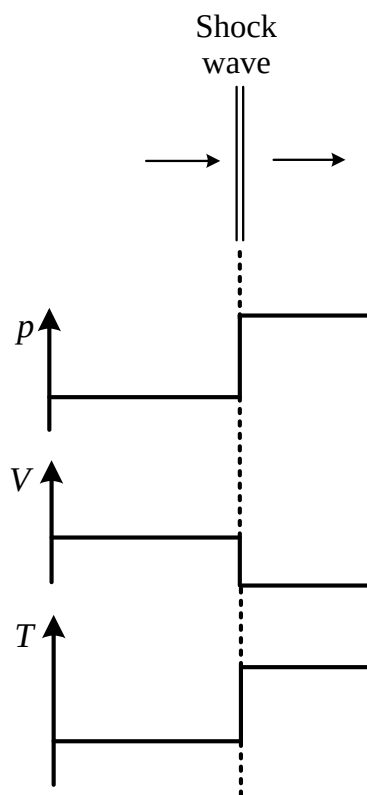


รูปที่ 2.2 คลื่นกระแทก (shock wave)

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

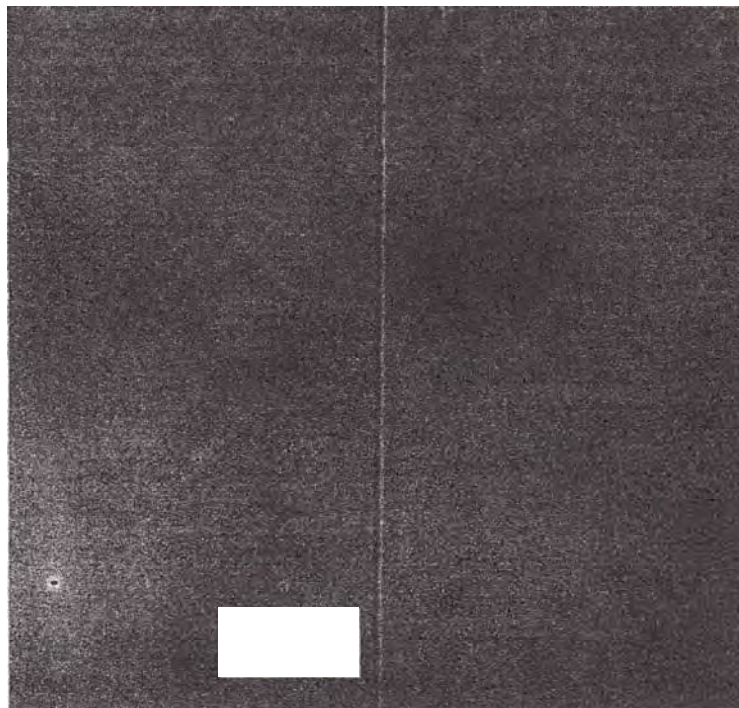


รูปที่ 2.3 คลื่นกระแทกเป็นแนวโค้ง [44]



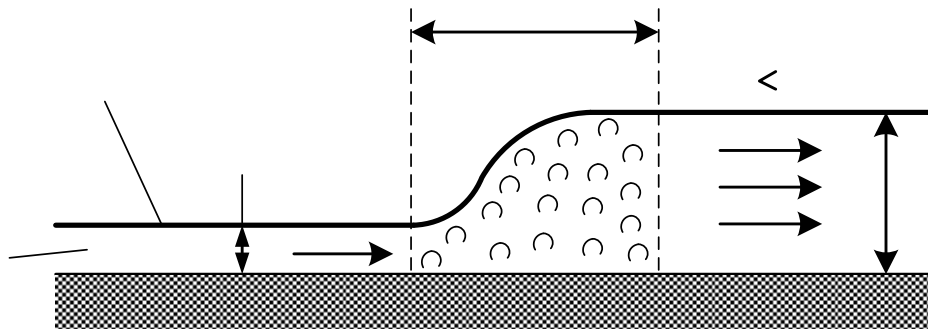
รูปที่ 2.4 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงสถานะต่างๆ ข้ามคลื่นกระแทกตั้งฉาก [45]

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



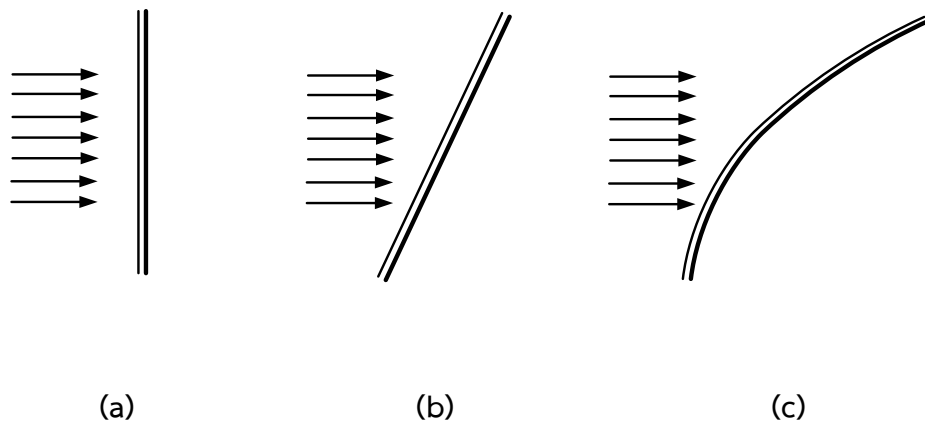
รูปที่ 2.5 ภาพถ่ายของ normal shock wave [45]

คลื่นกระแทกมีความคล้ายคลึงกับลักษณะของการเกิด Hydraulic jump ซึ่งจะเกิดขึ้นในการไหลแบบผิวอิสระ (free surface flow) ลักษณะการเกิด Hydraulic jump แสดงในรูปที่ 2.6 ตัวอย่างของการเกิด Hydraulic jump คือ การไหลของกระแสน้ำในเขื่อนหรือทำนบ



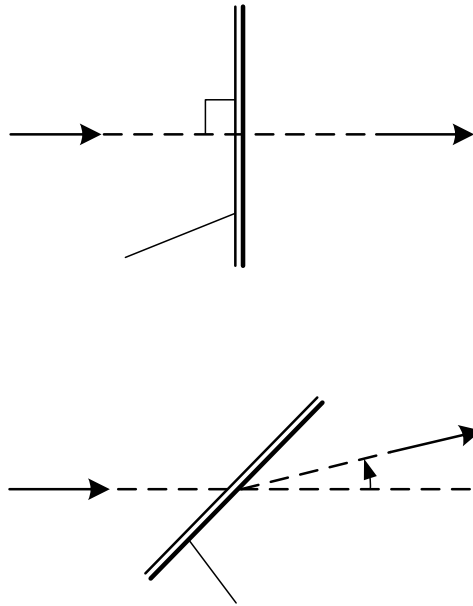
รูปที่ 2.6 Hydraulic jump [45]

โดยทั่วไปคลื่นกระแทกจะมีลักษณะโค้ง (curved shock wave or bow shock) แต่ก็มีจำนวนมากที่มีลักษณะตรงทำมุม 90° กับทิศทางการไหล (normal shock wave) และเอียงทำมุมกับทิศทางการไหล (oblique shock wave) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ในกรณีของ normal shock wave ความเร็วหน้าและหลังคลื่นกระแทกจะทำมุม 90° กับคลื่นกระแทก ในกรณีของ oblique shock wave เกิดจากการเปลี่ยนทิศของความเร็วหน้าคลื่นกระแทก ดังแสดงในรูปที่ 2.8 คลื่นกระแทกที่สมบูรณ์แบบอาจจะประกอบด้วย normal shock wave , curved shock wave และ oblique shock wave ดังแสดงในรูปที่ 2.9

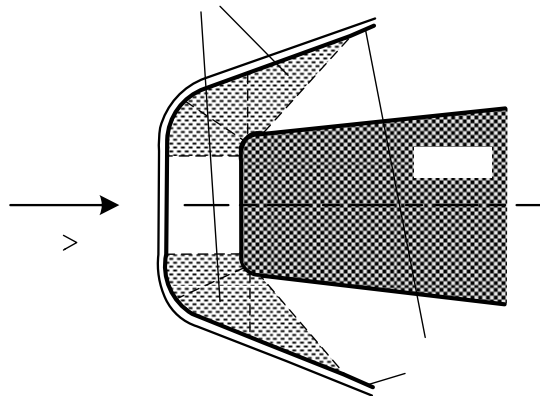


รูปที่ 2.7 (a) normal shock wave (b) curved shock wave และ (c) oblique shock wave

Liquid
flow



รูปที่ 2.8 การเปลี่ยนทิศของความเร็วด้านหน้าของ normal และ oblique shock wave [45]



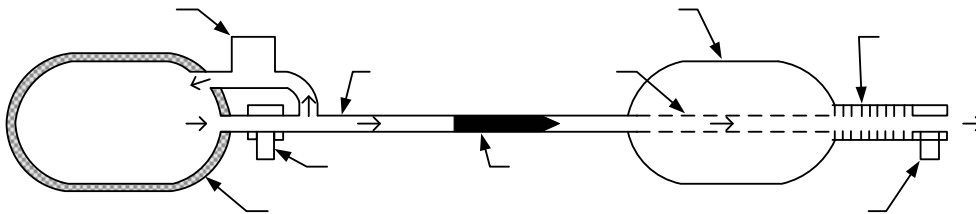
รูปที่ 2.9 shock wave ที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง [45]

2.4 ชุดยิงกระสุนความเร็วสูง

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

2.4.1 ชุดยิงกระสุนแบบใช้แก๊สเบา (light gas gun)

ชุดยิงกระสุนแบบนี้จะใช้แก๊สเบา (light gas) เช่น ไฮโดรเจน (H_2) หรือ ฮีเลียม (He) เป็นพลังงานในการขับ ดังนั้นชุดยิงชนิดนี้จึงเรียกว่า light gas gun โดยส่วนประกอบหลักของปืนชนิดนี้คือ ถังเก็บความดันสูง (high pressure reservoir) แผ่นฟิล์มบาง (diaphragm) และ ท่อปล่อยกระสุน (launch tube) หรือ ลำกล้องปืน (gun barrel) กระสุน (projectile) โดยทั่วไปจะสอดอยู่ทางออกของลำกล้องปืนติดกับแผ่น diaphragm แก๊สเบาที่ใช้เป็นตัวขับจะบรรจุอยู่ใน reservoir ซึ่งแก๊สดังกล่าวจะทำให้เพิ่มความร้อนและความดันได้จากหลายวิธีเช่น 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 หากประยุกต์กฎของการเคลื่อนที่ของนิวตัน 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

เพื่อให้่ายต่อการพิจารณาจะกำหนดให้ $\bar{P}$ มีค่าคงที่ตลอดการเคลื่อนที่ของกระสุนในลำกล้องปืน ซึ่งมีค่าเป็น

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

โดยสมการนี้จะมีค่าความผิดพลาดเนื่องมาจากสาเหตุหลักคือความเสียดทานระหว่างกระสุนกับภายในลำกล้องปืน และในความเป็นจริงค่าของ $\bar{P}$ จะมีค่าไม่คงที่เนื่องจากการเพิ่มปริมาตรมากขึ้นตามการเคลื่อนที่ของกระสุน ซึ่งความดัน $\bar{P}$ ดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับแก๊สเบาและความดันภายใน Pressure reservoir (P_0) ถ้าพิจารณาเป็นแก๊สอุดมคติ (idea 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

γ คือ Ratio of the specific heats

ถ้าสมการที่ 2.16 ใช้ในการหาค่าความเร็วแก๊สหลังกระสุนปืน จะได้อัตราส่วนของ P/P_0 จะขึ้นอยู่กับ

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

จากกระบวนการทำงานแก๊สจะขยายตัวจาก high pressure reservoir ซึ่งเป็นการแปลงพลังงานที่สะสมภายใน high pressure reservoir เพื่อไปขับหรือเร่งความเร็วของกระสุน ความเร็วสูงสุดของการไหลของแก๊สจะเกิดขึ้นเมื่อแก๊สแปลงพลังงานทั้งหมดที่มีให้กับการขับเคลื่อนหรือเร่งความเร็วของกระสุน ซึ่งความดันของแก๊สจะลดลงเป็นศูนย์ โดยที่ความเร็วจะคำนวณได้จาก

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

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

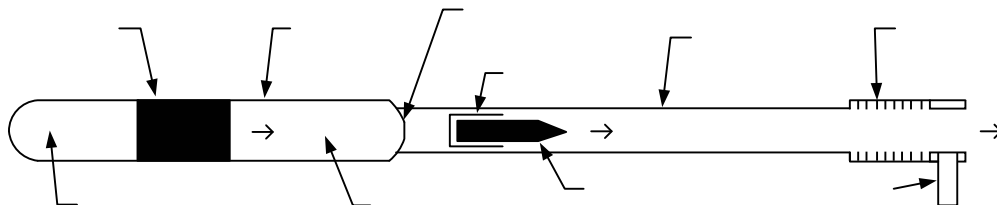
M_{mol} คือ มวลโมเลกุลของแก๊สภายใน pressure reservoir

R คือ universal gas constant

ซึ่งความสัมพันธ์นี้แสดงว่า light gas gun จะมีความเร็วสูงก็ต่อเมื่อใช้แก๊สที่มีค่ามวลโมเลกุลต่ำและแก๊สจะต้องมีอุณหภูมิสูง

2.4.2 ชุดยิงกระสุนแบบใช้แก๊สเบาแบบสองช่วง (two stage light gas gun)

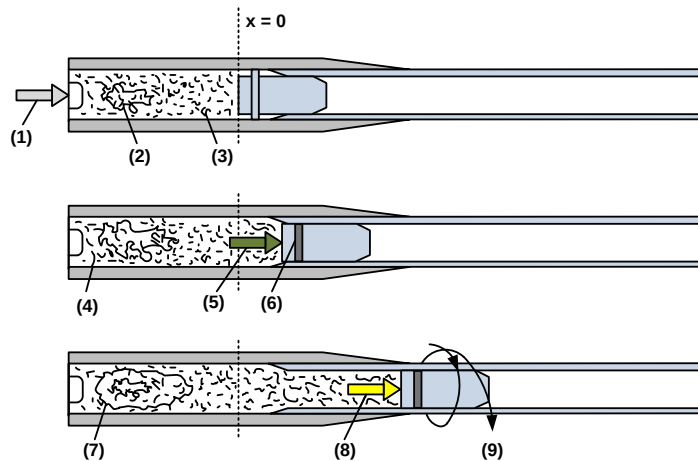
เมื่อใช้ลูกสูบ (piston) กดอัดให้แก๊สที่ใช้ขับเคลื่อน (driver gas) มีความดันและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ชุดยิงกระสุนแบบนี้จะเรียกว่า ชุดยิงกระสุนแบบใช้แก๊สเบาแบบสองช่วง (two stage light gas gun) ซึ่งเป็นปืนที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง ดังรูปที่ 2.11 แสดงส่วนประกอบพื้นฐานของ piston-powered two-stage light gas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



รูปที่ 2.11 แผนภาพส่วนประกอบของ two stage light gas gun

2.4.3 ชุดยิงกระสุนแบบใช้ดินปืน (powder gun)

ชุดยิงกระสุนชนิดนี้จะใช้ชุดปืนทดลองแทนแก๊สซึ่งมีหลักการทำงานคือ ใช้แรงของปืนในการขับเคลื่อนกระสุนโดยมีดินปืนเป็นเชื้อเพลิง



รูปที่ 2.12 แผนภาพการทำงานของ powder gun

จากรูปที่ 2.12 สามารถอธิบายการทำงานตามหมายเลขได้ดังนี้

- (1) เริ่มมีการจุดชนวนห้องเผาไหม้
- (2) เริ่มมีการเผาไหม้
- (3) มีแรงดันจากการเผาไหม้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว
- (4) ห้องเผาไหม้เกิดแรงดันประมาณ 14-68 MPa
- (5) กระสุนเริ่มมีการเคลื่อนที่จากอิทธิพลของแรงดัน
- (6) มีแรงต้านการเคลื่อนที่ของกระสุน
- (7) ความดันเริ่มสูงขึ้นจากอัตราการเผาไหม้ที่มากขึ้น
- (8) ลูกกระสุนเคลื่อนที่มากขึ้นและปริมาตรห้องเผาไหม้มากขึ้น
- (9) เกิดแรงหมุนตัวของกระสุนที่เกิดจากแรงดันสูงสุดจากการเผาไหม้สมบูรณ์

2.5 เทคนิคการถ่ายภาพ (visualization technique) [45]

เทคนิคการถ่ายภาพที่นิยมใช้ในการวิจัย สามารถแบ่งออกได้ 3 เทคนิค คือ

1. เทคนิคชาโดว์กราฟ (Shadowgraph technique)
2. เทคนิคชไลเรน (Schlieren technique)
3. เทคนิคอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์ (Interferometer technique)

โดยทั้ง 3 เทคนิคอาศัยหลักการหักเหของลำแสงเมื่อผ่านแก๊สที่มีความหนาแน่นเปลี่ยนแปลง โดยดัชนีการหักเหของแสงจะเป็นฟังก์ชันความหนาแน่นของแก๊สดังสมการที่ 2.20

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

หรือสามารถประมาณเป็นสมการเส้นตรง คือ

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

เมื่อ

ρ_s = ความหนาแน่นของแก๊สที่ 0°C ที่ความดันบรรยากาศ

β = เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของแก๊ส ดังตารางที่ 2.3

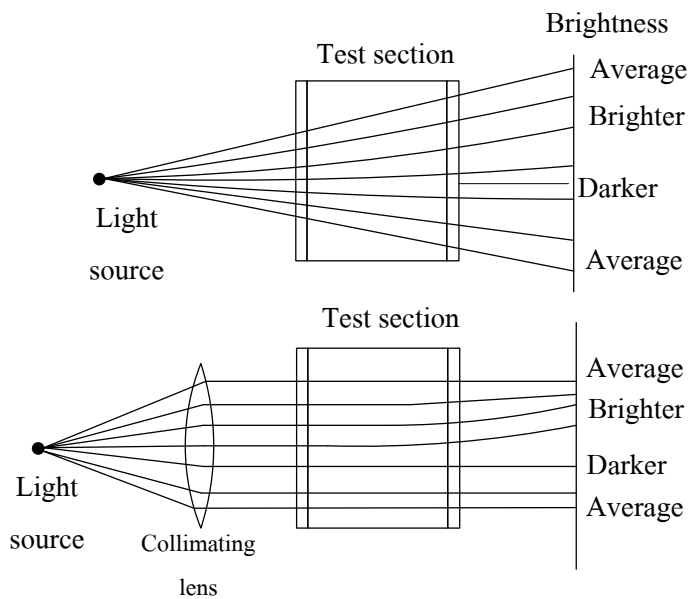
ตารางที่ 2.3 ค่าคงที่ของแก๊ส [45]

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

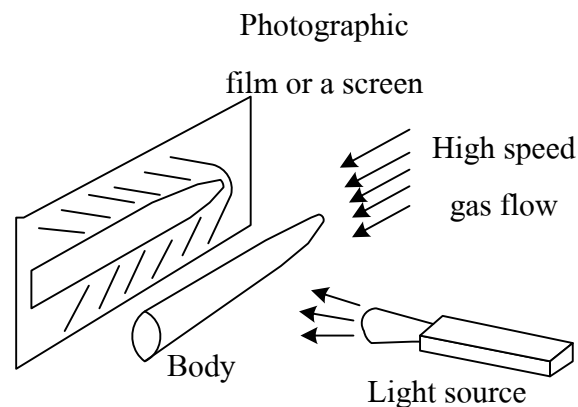
ดังนั้นหากพิจารณาว่า ความหนาแน่นของแก๊สเปลี่ยนแปลงไปในแนวแกน y ($d\rho/dy$) จะได้ว่า ดัชนีการหักเหของแสงก็จะเปลี่ยนแปลงในแนวแกน y (dn/dy) เช่นกัน โดยหลักการถ่ายภาพของแต่ละวิธีมีรายละเอียดดังนี้

2.5.1 การถ่ายภาพด้วยเทคนิคซาโดว์กราฟ (Shadowgraph technique)

เมื่อพิจารณาการฉายแสงผ่านแก๊สในห้องทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.13 ลำแสงจะเกิดการหักเหเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของแก๊ส ถ้าวางจอร์รับแสงเพื่อแสดงรูปที่เกิดจากการหักเหของแสงที่เคลื่อนที่ผ่านแก๊สมาจะพบว่า ลำแสงจะเกิดการหักเหโดยบางส่วนจะรวมกันแสงที่ปรากฏที่จอร์จะสว่างมากกว่าปกติ ในขณะที่เมื่อลำแสงกระจายออกจากกัน แสงที่ปรากฏจะมีมืด ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 เทคนิคการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph

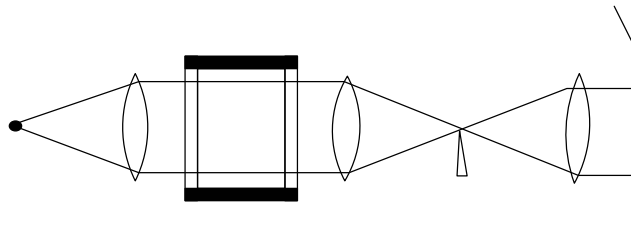


รูปที่ 2.14 การสร้างภาพด้วยเทคนิค Shadowgraph

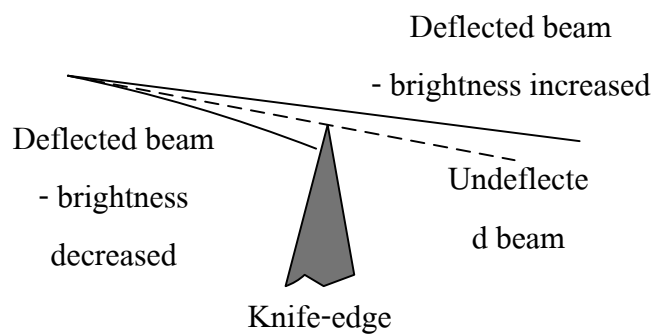
ถ้าพิจารณาการเบี่ยงเบนของลำแสงที่แสดงในรูปที่ 2.13 จะพบว่า ลำแสงที่ส่องผ่านแก๊สนั้น ถ้าไม่มีเลนส์ที่ทำให้แสงขนานกันภาพที่ปรากฏบนจอรับภาพจะมีขนาดที่ใหญ่กว่าขนาดของจริง ดังนั้น หากใช้เลนส์จะทำให้ภาพที่ขึ้นที่จอรับภาพมีขนาดเท่ากับขนาดจริง จากสมการของการหักเหของแสง ในสมการที่ 2.20 จะพบว่า การถ่ายภาพด้วยเทคนิค Shadowgraph จะไวต่อความหนาแน่นที่เปลี่ยนแปลงด้วยความสัมพันธ์ $d^2\rho/dy^2$ เช่นเดียวกับดัชนีหักเหของแสง d^2n/dy^2 โดยในธรรมชาตินั้นจะสามารถพบลักษณะของภาพแบบ Shadowgraph ได้ เช่น แสงแวววาวจากหลังคาที่ร้อนในฤดูร้อนทำให้เกิดภาพการไหลของความร้อนถึงแม้ว่าจะไม่มีควันทวีบริเวณหลังคาโดยภาพที่เห็นดังกล่าว คือ ภาพแบบ Shadowgraph โดยที่ดวงอาทิตย์ในภาพนี้เป็นแหล่งกำเนิดของแสง

2.5.2 การถ่ายภาพเทคนิคชไลเรน (Schlieren technique)

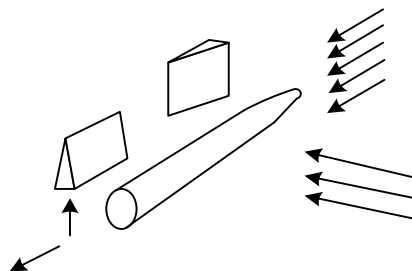
หลักการพื้นฐานของการถ่ายภาพด้วยเทคนิค Schlieren แสดงในรูปที่ 2.15 คือ เมื่อแสงจากแหล่งกำเนิดแสงเดินทางผ่านเลนส์ จะทำให้ลำแสงมีทิศทางขนานกันผ่านห้องทดสอบ จากนั้นจะส่องผ่านเลนส์อีกตัวซึ่งทำหน้าที่รวมแสงไปยังจุดโฟกัสซึ่ง ณ บริเวณนี้จะมี knife-edge วางติดตั้งอยู่ โดย Knife-edge จะทำหน้าที่ตัดแสงที่รบกวนออกไป ลำแสงที่ผ่าน Knife-edge จะสว่างมากขึ้นจึงทำให้รูปที่ปรากฏออกมามีความคมชัดมากขึ้น ดังรูปที่ 2.16 แสดงหลักการทำงานของ Knife-edge



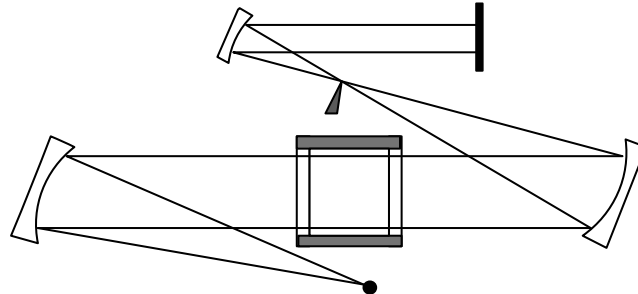
รูปที่ 2.15 พื้นฐานการจัดระบบชไลเรน (Schlieren)



รูปที่ 2.16 หลักการทำงานของ Knife-edge



รูปที่ 2.17 ผลจากการเปลี่ยนทิศทางของคมมีด

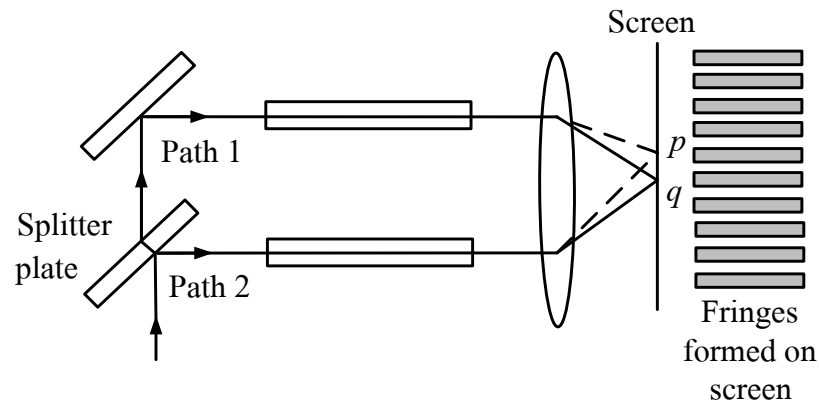


รูปที่ 2.18 ระบบไซเรนกับกระจกสะท้อน (Schlieren system with mirrors)

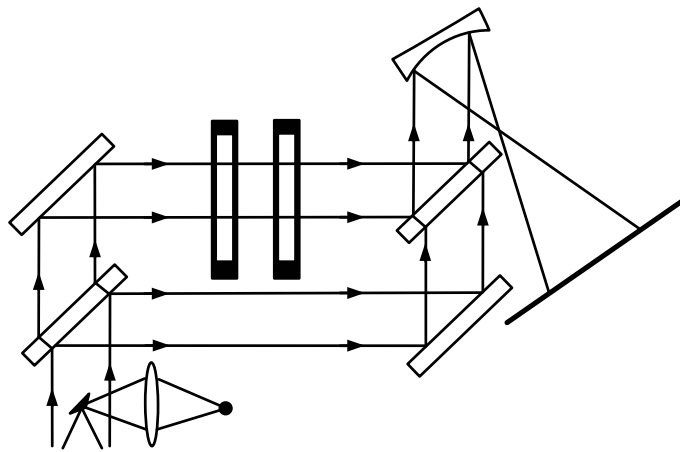
รูปที่ 2.17 แสดงผลจากการเปลี่ยนทิศทางของ knife-edge เมื่อต้องการสังเกตการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของแก๊สในแนวแกน y ให้ปรับ knife-edge ให้อยู่ในแนวแกน x และเมื่อต้องการสังเกตการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของแก๊สในแนวแกน x ให้ปรับ knife-edge ให้อยู่ในแนวแกน y นอกจากนี้จะใช้เลนส์ในการทำให้แสงที่ส่องผ่านห้องทดสอบขนานแล้วยังสามารถใช้กระจกโค้ง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

2.5.3 การถ่ายภาพด้วยเทคนิคอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์ (interferometer system)

จากรูปที่ 2.19 แสดงการแยกลำแสงเป็นสองทิศทางโดย splitter plate ซึ่ง splitter plate จะมีคุณสมบัติเป็นกระจกสามารถสะท้อนแสงบางส่วนที่ตกกระทบและสามารถส่งทะลุผ่านได้ในบางส่วน จึงทำให้เกิดการเดินทางของแสงออกเป็นสองเส้นทาง หากทำให้ลำแสงทั้งสองขนานกันดังรูป ซึ่งลำแสงสองลำมีระยะทางในการเดินทางต่างกัน จึงทำให้เฟสต่างกัน เมื่อนำลำแสงทั้งสองมาส่งผ่านเลนส์เพื่อรวมแสงจะทำให้เกิดบริเวณมืดและสว่างบนจอรับแสงที่เรียกว่า Fringes โดยหลักการดังกล่าวคือ หลักการพื้นฐานของการถ่ายภาพด้วยเทคนิคอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์



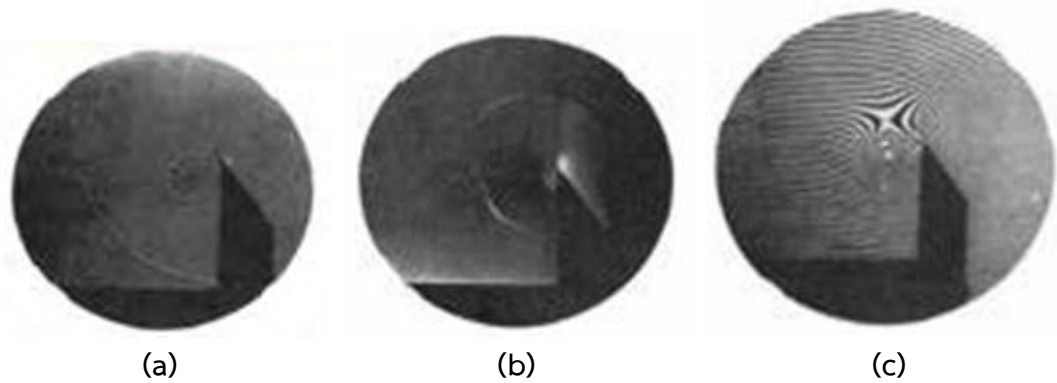
รูปที่ 2.19 ระบบอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์ขั้นพื้นฐานโดยใช้ beam splitter



รูปที่ 2.20 Mach-Zehnder interferometer.

หากเพิ่มลำแสงอีกคู่หนึ่งให้ส่องผ่านแก๊สที่มีความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงในห้องทดลองดังรูปที่ 2.20 ลำแสงดังกล่าวจะมีเวลาในการเดินทางที่แตกต่างกันออกไปเป็นผลให้รูปแบบ Fringes ที่เกิดขึ้นที่เกิดขึ้นแตกต่างกันไปด้วย เมื่อนำลำแสงทั้งสองฉายลงบนจอรับภาพ จะได้ภาพที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงการไหล ซึ่งเป็นหลักการที่เรียกว่า Mach-Zehnder interferometer โดยส่วนใหญ่ระบบอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์ มักจะใช้กระจกแทนการใช้เลนส์ด้วยเหตุผลเดียวกับรูปที่ 2.18

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



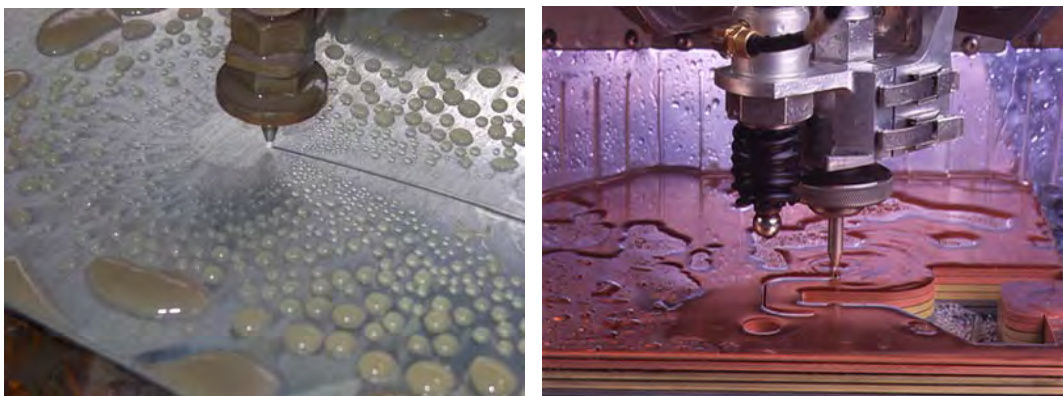
รูปที่ 2.21 การถ่ายภาพของการไหลเดียวกันด้วยเทคนิค (a) Shadowgraph photograph, (b) Schlieren photograph และ (c) Interferometer photograph [51]

2.6 การประยุกต์ใช้ High-speed liquid jet

ปัจจุบันได้มีการนำเอา high-speed liquid jet มาประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ ดังตัวอย่าง ดังนี้

2.6.1 Water jet cutting technology

ในงานด้าน water jet cutting พบว่า วัสดุที่หลุดออกเกิดจากการกัดเซาะของลำพุ่งความเร็วสูงที่ความเร็วเหนือเสียง (supersonic) ไม่ได้เกิดจากความดันแต่เกิดจากความเร็วของกระแสลำพุ่งกัดเซาะเอาอนุภาคหรือเกรนของวัสดุให้หายไป 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) เพื่อที่จะขจัดสิ่งสกปรกให้ออกไปได้อย่างรวดเร็ว แต่มีความแตกต่างจาก water jet cutting ตรงที่การใช้แรงดันในการผลิตลำพุ่งออกมาและลักษณะของหัวฉีดที่แตกต่างกัน โดยใช้แรงดันของน้ำอยู่ที่ประมาณ 1,500-3,500 psi ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.23



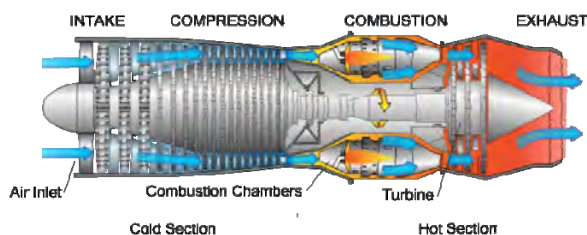
รูปที่ 2.23 Water jet cleaning technology [48]

2.6.3 Needleless technology

ปัญหาของเข็มฉีดยานั้นมีมากมาย โดยเฉพาะในประเทศกำลังพัฒนาและประเทศด้อยพัฒนา ไม่ว่าจะเป็นการขาดแคลนตัวอุปกรณ์เองขาดความพิถีพิถันเรื่องความสะอาดและสุขอนามัย ประมาณ 30% ของจำนวนครั้งที่มีการฉีดยานั้นไม่ปลอดภัย นอกจากนี้ยังมีรายงานการติดเชื้อจากเข็มฉีดยาที่ไม่สะอาด ส่งผลถึงขั้นเสียชีวิตอีกเป็นจำนวนมากถึง 1.3 ล้านคนทั่วโลก แต่ถึงอย่างไรเข็มฉีดยาก็ยังเป็นสิ่งจำเป็นในการป้องกัน (วัคซีน) และรักษาโรค ในบางประเทศด้อยพัฒนาที่มีอุปกรณ์ทางการแพทย์มีอยู่อย่างจำกัด ด้วยความรู้เท่าไม่ถึงการณ์และความเพิกเฉย เข็มฉีดยาถูกนำมาใช้ซ้ำกับผู้ป่วยหลายๆ คนโดยปราศจากการฆ่าเชื้อ (ที่ควรจะต้องผ่านความร้อน 121°C เป็นเวลา 20 นาที ในแต่ละครั้งที่นำมาใช้) นอกจากนี้เข็มที่ใช้แล้วยังถูกกำจัดอย่างไม่เหมาะสม ซึ่งที่มาของแนวคิดเข็มฉีดยาแบบไม่ต้องใช้เข็มหรือ needle-free injectors (NFIS) ซึ่งมีหลักการทำงานอย่างเดียวกันแต่ไม่ต้องพึ่งเข็มแต่ใช้หัวฉีด (nozzle orifice) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 76-360 ไมโครเมตร เป็นตัวลำเลียงยาแทน ซึ่งสามารถส่งผ่านตัวยาลงเข้าไปใต้ผิวหนัง ไปสู่ชั้นไขมันหรือกล้ามเนื้อได้อย่างง่ายดายด้วยความเร็ว 100 m/s (ขึ้นอยู่กับความหยาบและหนาของผิวหนัง รวมถึงบริเวณที่ฉีดด้วย) นอกจากนี้ การกำจัดก็เป็นเรื่องง่ายไม่ต้องใช้ถังเก็บขยะแหลมคม (sharps container) ไม่ต้องกังวลเรื่องการสเตอร์ไลส์ฆ่าเชื้อที่ไม่เหมาะสมหรือการใช้เข็มฉีดยาร่วมกัน



รูปที่ 2.24 Injectors injectors [49]



รูปที่ 2.25 Jet engine technology [50]

2.6.4 Jet engine technology

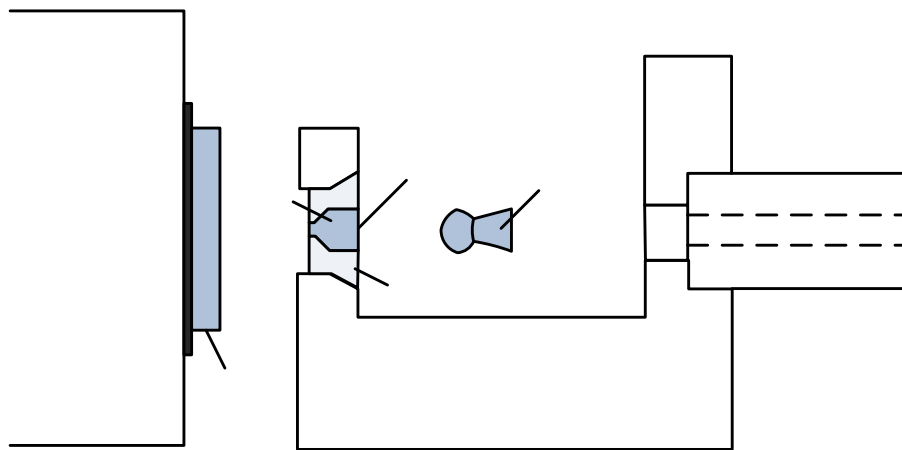
จากรูปที่ 2.25 แสดง Jet engine technology ซึ่งเครื่องยนต์ jet เป็นเครื่องจักรที่ถูกออกแบบมาเพื่อให้ผลิตหรือสร้างแก๊สที่มีความเร็วสูงไหลผ่านช่องที่กำหนด โดยเครื่องยนต์เริ่มต้นการหมุน compressor ด้วย starter อากาศจากภายนอกเครื่องยนต์ก็จะถูกดูดเข้าเครื่องยนต์ compressor ก็จะทำงานกับอากาศที่เข้ามาและก็จะส่งอากาศที่อัดผ่าน compressor นี้ต่อไปยังส่วนของห้องเผาไหม้ ซึ่งจะมีความดันเพิ่มขึ้นมากถึง 12 เท่าของอากาศก่อนที่จะผ่านเข้าเครื่องยนต์ ในส่วนของห้องเผาไหม้หัวจุดไฟ (igniter) ก็จะทำการจุดเครื่องยนต์ โดยจุดส่วนผสมของน้ำมันเชื้อเพลิงและอากาศในห้องเผาไหม้ หัวจุดไฟจะมีหนึ่งหรือสองหัว ซึ่งก็คล้ายกับหัวเทียนในรถยนต์ เมื่อเครื่องยนต์ติดหรือทำงานแล้วและ compressor หมุนด้วยความเร็วที่เพียงพอตามที่กำหนด แล้ว starter และ igniters ก็จะถูกปิดหรือเลิกใช้ ต่อจากนั้นเครื่องยนต์ก็จะทำงานด้วยตัวเอง โดยไม่ต้องได้รับความช่วยเหลือจาก starter และ igniters อีกต่อไป トラบเท่าที่น้ำมันเชื้อเพลิงและอากาศผสมในอัตราส่วนที่ถูกต้องยังไหลเข้าห้องเผาไหม้อย่างต่อเนื่องเพียง 25% ของอากาศ ที่มีส่วนใช้ในการเผาไหม้ที่ห้องเผาไหม้ส่วนอากาศที่เหลือก็จะผสมกับแก๊สไอเสียหรือแก๊สที่ผ่านการเผาไหม้เพื่อลดอุณหภูมิของแก๊สไอเสียหรือแก๊สที่ผ่านการเผาไหม้ก่อนที่แก๊สไอเสียจะเข้าไปยังส่วนของกังหัน (turbine) ส่วนของกังหันก็จะนำเอาพลังงานจากกระแสของแก๊สที่ไหลผ่านมาใช้ประโยชน์ พลังงานส่วนใหญ่ก็จะถูก

นำเอาไปใช้ในการหมุน compressor และอุปกรณ์ต่างๆ แรงขับของเครื่องยนต์ (thrust) ก็มาจากการเอามวลของอากาศจำนวนมากจากด้านหน้าของเครื่องแล้วก็ดันมันออกไปด้วยความเร็วที่สูงมาก เมื่อเทียบกับความเร็วเมื่อตอนที่เข้ามาที่ด้านหน้าหรือที่ compressor หากสามารถฉีดน้ำมันที่ความเร็วสูงมากเท่าใดก็จะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ดีขึ้นเท่านั้น 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) เข้าไปกระทบกับของเหลวปริมาตร 0.1 cm^3 ซึ่งบรรจุอยู่ในหัวฉีด (nozzle) ที่ทำด้วย stainless steel ถูกผนึกด้วยแผ่น Neoprene ดังแสดงในรูปที่ 2.28 จากการทดสอบพบว่า ลำพุ่งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1-2 mm เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ความดันของของเหลวนั้นจะมีค่าสูงขึ้นหลังจากนั้นของเหลวก็จะฉีดออกมาจากหัวฉีดด้วยความเร็วสูงที่ความเร็วเท่ากับ 1,200 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 ของลำพุน้ำมันดีเซลความเร็วเหนือเสียง โดยการผลิตลำพุงด้วยเทคนิค impact driven method โดยสามารถผลิตลำพุงได้ความเร็วสูงสุดเท่ากับ 4.5 km/s และทำการอธิบายคุณลักษณะของลำพุงที่ผลิตได้ด้วยการถ่ายภาพด้วยเทคนิค interferometer นอกจากนี้ยังได้ทำการเปรียบเทียบการผลิตลำพุงจากการกระแทก 2 วิธี คือ แบบกระแทกโดยตรง และแบบกระแทกผ่านตัวกลาง ซึ่งพบว่า ความเร็วของลำพุงที่ใช้วิธีแบบกระแทกผ่านตัวกลางจะช้ากว่าและจะใช้เวลามากกว่าแบบกระแทกแบบขับโดยตรง นอกจากนี้ยังพบการจุดติดไฟด้วยตัวเองสำหรับลำพุงน้ำมันดีเซลที่ความเร็วสูงกว่า 2 km/s จากภาพถ่าย

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

ในปี ค.ศ.2002, K. Pianthong และคณะ [51] ได้ศึกษาคุณลักษณะลำพุงความเร็วสูงของน้ำและน้ำมันดีเซล (high-speed liquid jet) จากชุดทดลองที่เรียกว่า vertical single-stage powder gun และศึกษาถึงอิทธิพลของความเร็วกระสุนปืน มวลของดินปืนและรูปทรงของหัวฉีด ที่มีผลต่อความเร็วลำพุง โดยจากภาพถ่ายด้วยเทคนิค Shadowgraph จะแสดงให้เห็นในแต่ละช่วงของการเกิดลำพุง จากผลการทดลองพบว่า สามารถผลิตลำพุงความเร็วสูงสุดที่ได้เท่ากับ 2,195 m/s และ 2,150 m/s จากลำพุงน้ำมันดีเซลและน้ำ ตามลำดับ เมื่อใช้หัวฉีดที่แข็งขึ้นความเร็วสูงสุดของลำพุงน้ำมันดีเซลก็จะมีค่าสูงขึ้นโดยมีค่าเท่ากับ 2,500 m/s และสังเกตเห็นลักษณะลำพุงเป็นละอองหยดน้อยกว่าอย่างเห็นได้ชัดและมีการกระจายเป็นไอรอบๆ แกนลำพุง ต่อมาในปี ค.ศ.2003, K. Pianthong และคณะ [52] ยังศึกษาคุณลักษณะลำพุงน้ำและดีเซลความเร็วสูงที่มีความเร็วเหนือเสียง (supersonic liquid jet) เพิ่มเติม โดยลำพุงความเร็วสูงถูกผลิตจากชุดทดลองที่เรียกว่า single-stage powder gun ที่สร้างขึ้นมาใช้งานในแนวตั้ง โดยในการศึกษานี้คุณลักษณะและพฤติกรรมของ supersonic liquid jet ถูกถ่ายภาพโดยใช้เทคนิค Shadowgraph และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างรูปทรงหัวฉีดที่ใช้กับพฤติกรรมของลำพุงที่ฉีดในอากาศที่ความเร็วประมาณ 2 km/s จากผลการทดลองพบว่า ลักษณะพฤติกรรมของลำพุง ลักษณะของ shock wave และรูปร่างของลำพุงเป็นผลมาจากรูปทรงของหัวฉีดที่แตกต่างกัน กระบวนการเกิดลำพุงแบบ pulse ถูกวิเคราะห์ในหัวฉีดโดยใช้การวิเคราะห์ที่ 1 มิติ ซึ่งพบว่ามีความสอดคล้องกับภาพถ่ายของลำพุงจาก shadowgraph image นอกจากนี้ยังใช้การคำนวณของไหลพลศาสตร์ (CFD) ในการจำลองการเกิดลำพุงและทำการเปรียบเทียบกันมุมของ shock wave ที่ได้กับการทดลอง ซึ่งพบว่า มีความสอดคล้องกันถึงแม้ว่ารูปร่างของลำพุงจะแตกต่างกันก็ตาม นอกจากนี้ยังทำการศึกษาการจุดติดไฟของลำพุงดีเซลความเร็วเหนือเสียงที่ความเร็ว 2

km/s ที่สภาวะอากาศปกติและอุณหภูมิ 110 °C โดยใช้ น้ำมันดีเซลที่ 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 แทรกอยู่ในหัวฉีด ซึ่งพบว่า ความดันที่เกิดขึ้นในการขับลำพุ่งค่าสูงถึง 1.24 GPa จากการกระแทกของกระสุนปืน ในการทดลองนี้ได้สร้างหัวฉีดอะคิลิคขนาด 10.6 mm × 10.6 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 น้ำมันก๊าดและน้ำมันเบนซิน โดยความเร็วที่ผลิตได้สูงสุดจะอยู่ในช่วง 1.3 km/s ถึง 2.3 km/s และพบว่า คุณลักษณะของลำพุ่งจะมีลักษณะแตกต่างกันเมื่อชนิดของลำพุ่งต่างกัน นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาการเกิด auto-ignition ของลำพุ่งน้ำมันในอากาศ จากการวัดความดันและจากการถ่ายภาพด้วยเทคนิค holographic interferometry ซึ่งไม่มีการเกิด auto-ignition ขึ้นเลย

ในปี พ.ศ.2550, วีระพันธ์ สีหนามและคณะ [54] ได้ศึกษาคุณลักษณะพื้นฐานของลำพุ่งเชื้อเพลิงความเร็วสูง โดยใช้การคำนวณของไหลพลศาสตร์ (CFD) ในการจำลองการฉีดของน้ำมันก๊าด โดยในแบบจำลองประกอบด้วยของไหล 2 ชนิด คือ น้ำมันก๊าด และอากาศ ความเร็วเริ่มแรกของเชื้อเพลิงอยู่ที่ 1,300 m/s โดยลำพุ่งจะพุ่งออกสู่อากาศที่อยู่นิ่ง โดยการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของไหลจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา ในการศึกษาที่น่าสนใจพิจารณาระยะเวลาการเคลื่อนที่ของลำพุ่งในอากาศและความเร็วของลำพุ่ง ผลจากการศึกษาพบว่า ผลการศึกษาจาก CFD และการทดลองให้ผลใกล้เคียงกัน โดยลำพุ่งจะมีความเร็วต่ำลงและระยะทางการเคลื่อนที่ในอากาศลดลงหลังจากลำพุ่งเคลื่อนที่ผ่านไป 200 μ s เนื่องจากการแตกเป็นฝอยละอองของลำพุ่ง นอกจากนี้แรงต้านจากอากาศก็เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ลำพุ่งมีความเร็วลดลงเช่นกัน ผลการศึกษาทำให้เข้าใจคุณลักษณะของลำพุ่งเชื้อเพลิงความเร็วสูงได้ดียิ่งขึ้นและข้อมูลที่ได้ถือเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการพัฒนาในระดับต่อไป

จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับลำพุ่งความเร็วสูงที่ผ่านมา พบว่า การศึกษาคุณลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูงนั้นจะเป็นการศึกษาในกรณีที่ฉีดลำพุ่งเข้าไปในอากาศหรือสถานะแก๊สเท่านั้น แต่การฉีดลำพุ่งเข้าไปใน condensed media นั้นยังมีการศึกษาน้อยมาก โดยในปี ค.ศ.1996, Hitoshi Soyama และคณะ [43] ได้ศึกษาคุณลักษณะของลำพุ่งที่ฉีดในน้ำโดยพบว่ามียุ่่ม cavitation เกิดขึ้นอย่างรุนแรงรอบๆลำพุ่ง 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

ความแตกต่างระหว่างลำพุงที่ฉีดในอากาศกับลำพุงที่ฉีดในน้ำ โดย cavitation ที่เกิดขึ้นจากลำพุงที่อยู่ในน้ำนำไปสู่พลังการกัดกร่อนจากการกระแทกโดยตรงของตัวลำพุงจะทำให้ความแข็งแรงของวัสดุลดลง ดังนั้นพฤติกรรมกระจายตัวของลำพุงความเร็วสูงที่อยู่ในน้ำสามารถนำมาอธิบายถึงการกัดกร่อนที่รุนแรงได้ เพื่อนำไปพิจารณาหาวิธีการที่จะทำให้พฤติกรรมกระจายตัวของลำพุงความเร็วสูงที่เกิดขึ้นนั้นนำมาใช้ประโยชน์มากที่สุด จากการทดลองสรุปได้ว่าลักษณะของลำพุงที่ฉีดในน้ำจะทำให้เกิดพฤติกรรม cavitation และคุณลักษณะของลำพุงที่ฉีดในน้ำจะแตกต่างกันมากกับลำพุงที่ฉีดในอากาศ แรงดันเฉียบพลันที่เกิดขึ้นรอบๆ ลำพุงที่ฉีดในน้ำมีค่าสูงสุด คือ horn nozzle และมีค่าต่ำสุดคือ canonical nozzle ผลลัพธ์ของพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจะไม่แน่นอนเนื่องมาจากรูปแบบของหัวฉีด

ในปี 2009, K. Otani และคณะ [55] ได้ศึกษาคุณลักษณะของลำพุงในน้ำโดยผลิตลำพุงจาก Ho: YAG Laser โดยศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการเจาะหินทรายใต้น้ำ ด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph จากรูปที่ได้พบว่า ความเร็วของลำพุงมีค่าประมาณ 40 m/s นอกจากนี้ยังวัดความดันกระแทกที่เกิดขึ้น โดยใช้ PVDF needle hydrophone พบว่าความดันของ shock wave มีค่าประมาณ 22.7 MPa และพบการยุบตัวของ water vapor bubble ที่ทำให้เกิด shock wave นอกจากนี้ยังพบว่าลำพุงที่ผลิตได้สามารถเจาะแผ่นหินทรายใต้น้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

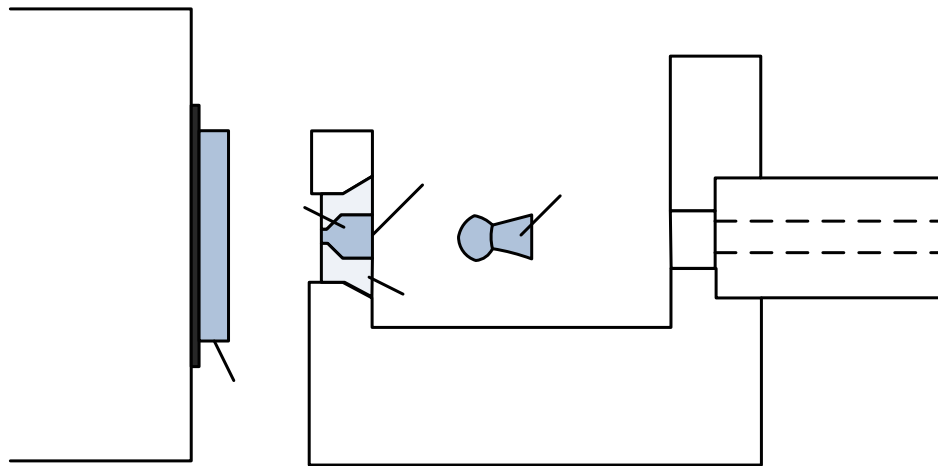
จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า ความเร็วของลำพุงในน้ำที่ศึกษานั้นมีความเร็วต่ำ เนื่องจากข้อจำกัดของเทคนิคในการผลิตลำพุง ดังนั้นคุณลักษณะของลำพุงความเร็วสูงใน condensed media จึงยังไม่ได้ทำการศึกษาและอธิบายอย่างชัดเจน

บทที่ 3

สมรรถนะของชุดทดลองยิงกระสุนความเร็วสูง

3.1 บทนำ

ในการศึกษานี้การผลิตลำพุ่งความเร็วสูงจะใช้เทคนิคที่เรียกว่า impact driven method หรือ Bowden and Brunton method ดังรูปที่ 3.1 [37] ซึ่งเรียกตามหลักการในการผลิตลำพุ่งจากการยิงกระสุนปืนความเร็วสูง (high-speed projectile) เข้าไปกระทบกับของเหลวซึ่งบรรจุอยู่ในหัวฉีด (nozzle) โมเมนต์ตัมของกระสุนปืนจะทำให้ความดันของของเหลวมีค่าสูงขึ้นจนกระทั่งความดันประมาณ GPa จากนั้นของเหลวก็จะฉีดออกมาจากหัวฉีดด้วยความเร็วสูง ซึ่งเป็นการฉีดลำพุ่งจากการกระทบของกระสุนนั่นเอง ซึ่งจะเห็นได้ว่า กระสุนปืนความเร็วสูงมีความจำเป็นสำหรับการผลิตลำพุ่งด้วยเทคนิค ซึ่งในการศึกษานี้จะยิงกระสุนปืนความเร็วสูงหรือผลิตลำพุ่งความเร็วสูงจากชุดทดลองที่เรียกว่า Horizontal Single Stage Powder Gun (HSSPG) ดังรูปที่ 3.2 โดยในบทนี้จะศึกษาถึงสมรรถนะของชุดทดลองและความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของดินปืนกับความเร็วของกระสุนปืนที่ผลิตได้เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการผลิตลำพุ่งในการศึกษานี้



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

3.2 ชุดทดลอง Horizontal single-state powder gun

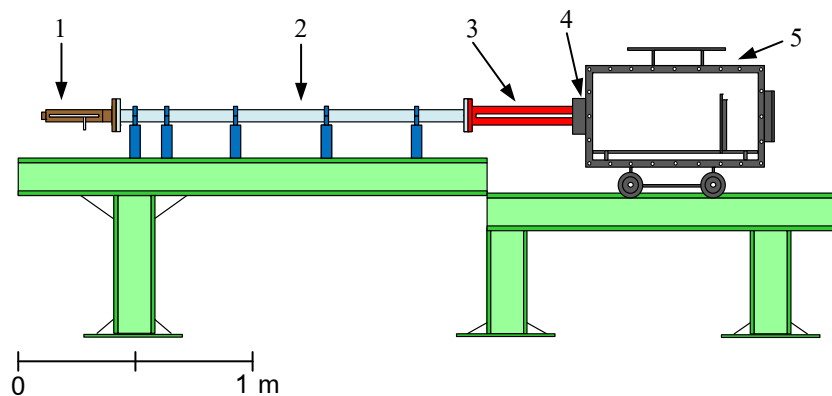
ดังรูปที่ 3.2 แสดงชุดทดลอง Horizontal Single Stage Powder Gun (HSSPG) ที่ถูกสร้างขึ้นในแนวนอน ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญ 5 ส่วน คือ

1. ชุดปล่อยกระสุนปืน (launcher หรือ powder gun) ทำหน้าที่คล้ายปืน โดยเป็นตัวขับเคลื่อนกระสุนปืนซึ่งแรงขับเคลื่อนเกิดจากการจุดระเบิดของดินปืนในห้องเผาไหม้ จะประกอบด้วยเข็มแทงชนวน (firing pin) ทำหน้าที่ที่กระแทกชนวน (primer) ที่อยู่ส่วนท้ายของปลอกกระสุนซึ่งบรรจุดินปืนภายใน โดยดินปืนที่ใช้เป็นชนิดที่มีควันน้อย (smokeless powder) โดยมีรายละเอียดการออกแบบดังแสดงในภาคผนวก ก

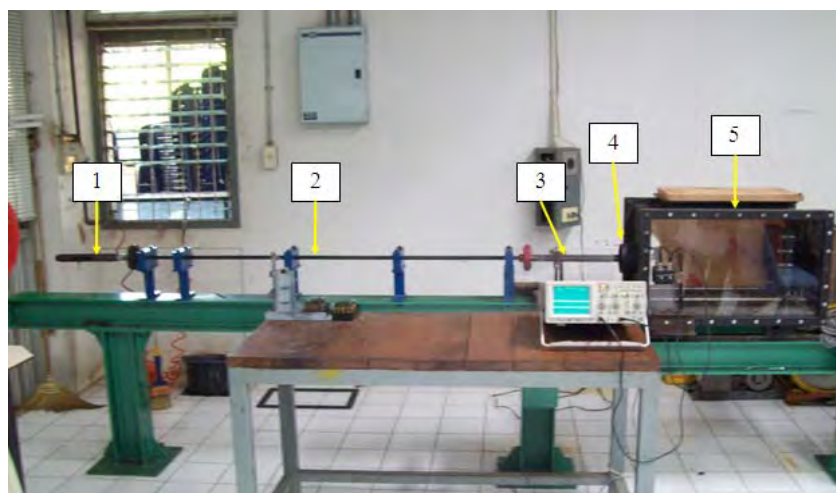
2. ท่อส่งกระสุนปืน (launch tube) ทำหน้าที่คล้ายลำกล้องปืน ใช้ควบคุมทิศทางการขับเคลื่อนกระสุนปืนและเพิ่มความเร็วของกระสุนปืนก่อนที่จะไปยังท่อระบายความดัน มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 8 mm ยาว 1.5 m ที่ส่วนปลายด้านหนึ่งของท่อจะยึดติดกับท่อระบายความดัน (pressure relief section)

3. ท่อระบายความดัน (pressure relief section) ทำหน้าที่ระบายแรงอัดอากาศที่อยู่ส่วนหน้าของกระสุนปืนที่ถูกอัดในท่อ เพื่อลดแรงต้านและแรงอัดภายในท่อส่งกระสุนปืนและป้องกันอากาศกระแทกบนของเหลวที่บรรจุในหัวฉีดก่อนการกระแทกของกระสุนปืน มีความยาว 40 cm เจาะเป็นช่องขนาด 3 mm ตามแนวยาวทั้ง 4 ด้าน

4. ส่วนประกอบหัวฉีด (nozzle assembly) ทำหน้าที่ยึดจับหัวฉีดไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ระหว่างทำการทดลอง ซึ่งถูกติดตั้งระหว่างห้องทดสอบกับท่อระบายความดัน



(a)



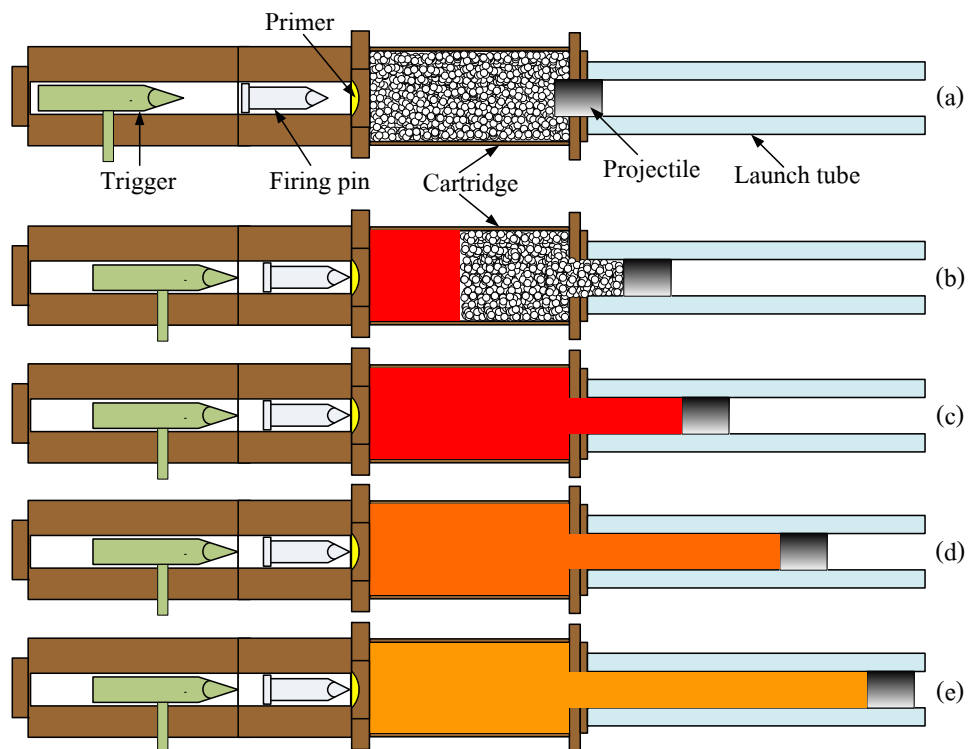
(b)

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

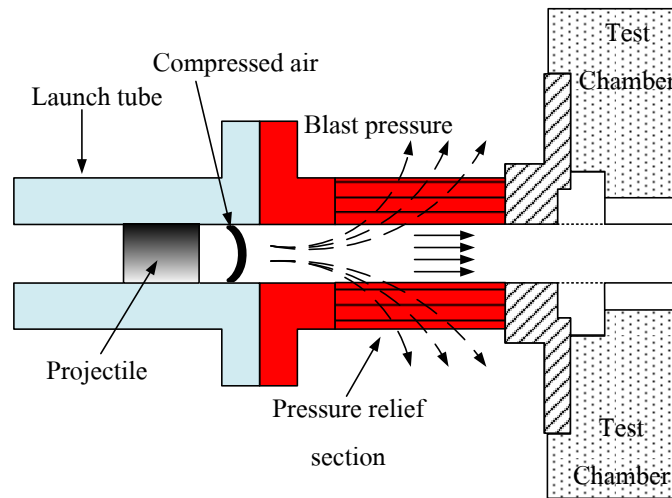
5. ห้องทดสอบ (test chamber) ได้ถูกออกแบบให้เป็นถังรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าหนา 5 mm มีขนาดกว้าง 39.5 cm ยาว 60 cm และสูง 35 cm ฝาด้านข้างทั้งสองด้านเป็นแผ่นอะคริลิกใส หนา 25 mm ใช้เป็นหน้าต่างสำหรับสังเกตพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในการเก็บข้อมูลการทดลอง

3.3 วิธีทำการทดลอง

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

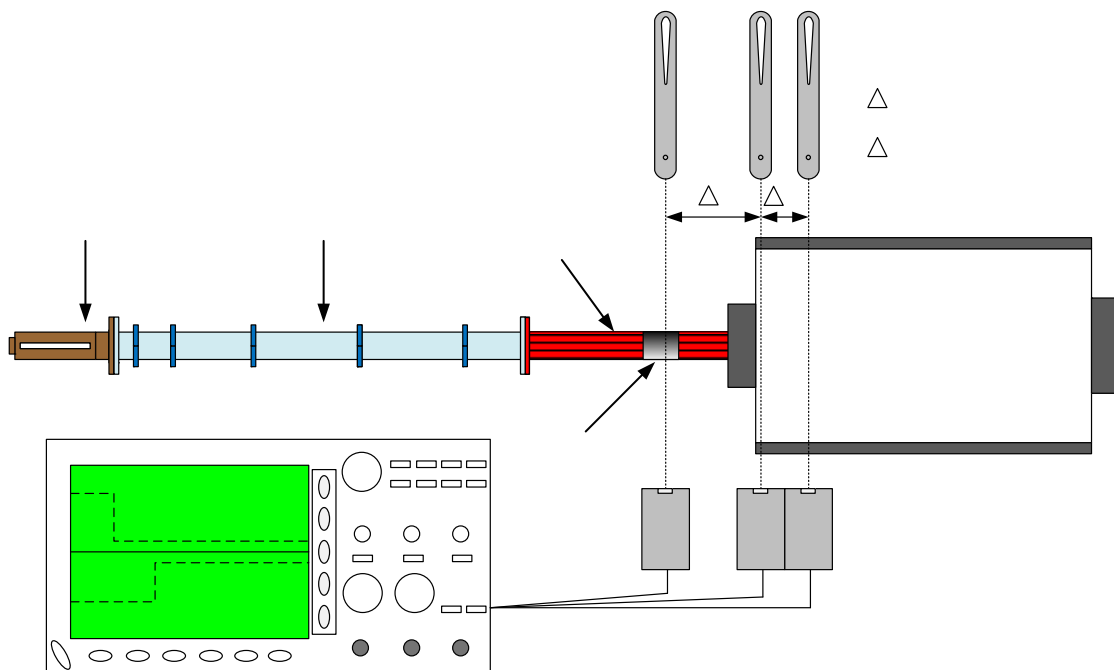


รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการยิงของชุดทดลอง HSSPG : (a) ก่อนจุดระเบิด, (b) การจุดระเบิด, (c) ดินปืนเผาไหม้หมด, (d) หลังจากดินปืนเผาไหม้หมด และ (e) การยิงกระสุนปืน



รูปที่ 3.4 การระบายอากาศด้านหน้ากระสุนปืน

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



รูปที่ 3.5 การวัดความเร็วกระสุนปืนด้วยเทคนิค time of flight method

3.4 การวัดความเร็วของกระสุนปืน

การวัดความเร็วของกระสุนปืนในการทดลองนี้ใช้หลักการการตัดเลเซอร์ของวัตถุ (laser beam interruption method) หรือ time of flight method โดยใช้ไดโอดกำเนิดแสงเลเซอร์ และไดโอดรับแสงจำนวน 3 ชุด โดยต่อสัญญาณ sensor เข้ากับ oscilloscope เพื่ออ่านสัญญาณไฟฟ้าจากไดโอดรับแสงและแสดงผลบนหน้าจอ ซึ่งเป็น dual trace oscilloscope (ออสซิลโลสโคปสองแชนแนล) 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 ซึ่งเทคนิคนี้สามารถวัดความเร็วของลำพุงได้เช่นกัน

เมื่อทำการทดลองยิงกระสุนปืนแล้ว sensor ก็จะสามารถจับสัญญาณของกระสุนปืนหรือลำพุงที่ออกจากหัวฉีดได้ โดยสัญญาณจะแสดงบนเครื่อง oscilloscope ดังรูปที่ 3.6 จากนั้นจะทำการวัดความแตกต่างของเวลาที่ส่วนหัวของกระสุนปืนที่ตัดแสงเลเซอร์ชุดที่ 1 และ 2 ซึ่งสามารถคำนวณหาความเร็วได้จากสมการ

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

เมื่อ

V คือ ความเร็ว

Δs คือ ระยะห่างของ laser beam ชุดที่ 1 กับ laser beam ชุดที่ 2

Δt คือ เวลาที่วัดได้จากเครื่อง oscilloscope

ตัวอย่างการคำนวณหาความเร็วของลูกกระสุนจากรูปที่ 3.6

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

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

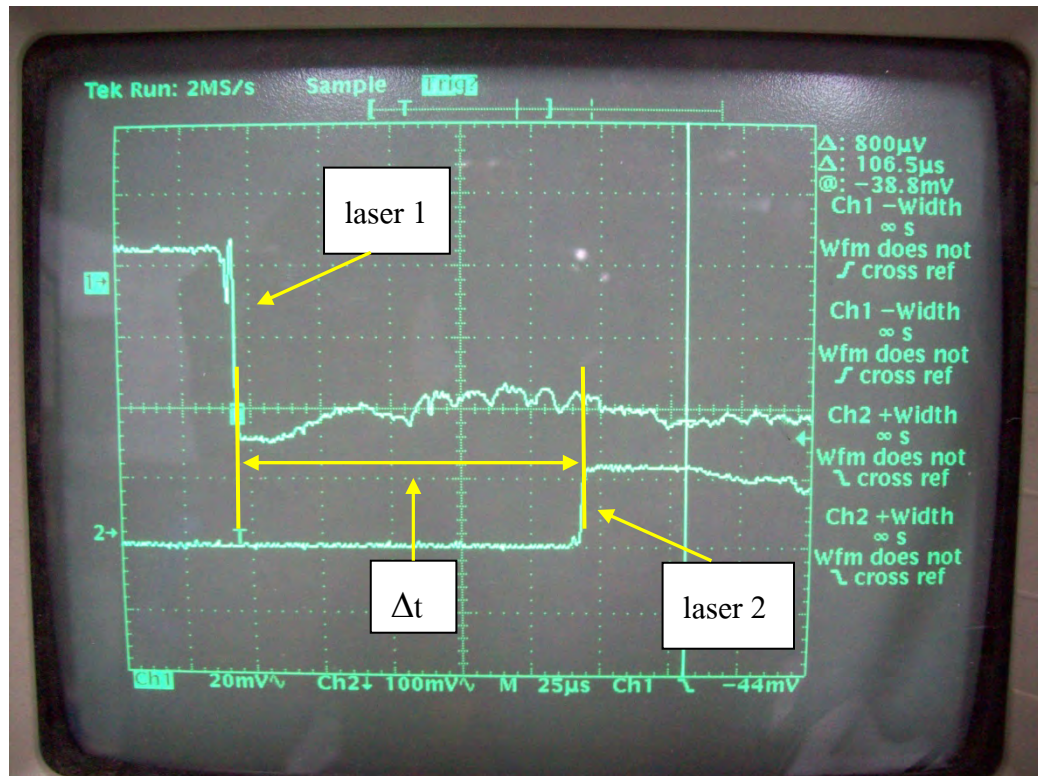
ดังนั้นความเร็วของกระสุนปืนเท่ากับ 804.6 m/s

ตัวอย่างการคำนวณหาความเร็วของลูกกระสุนจากรูปที่ 3.7

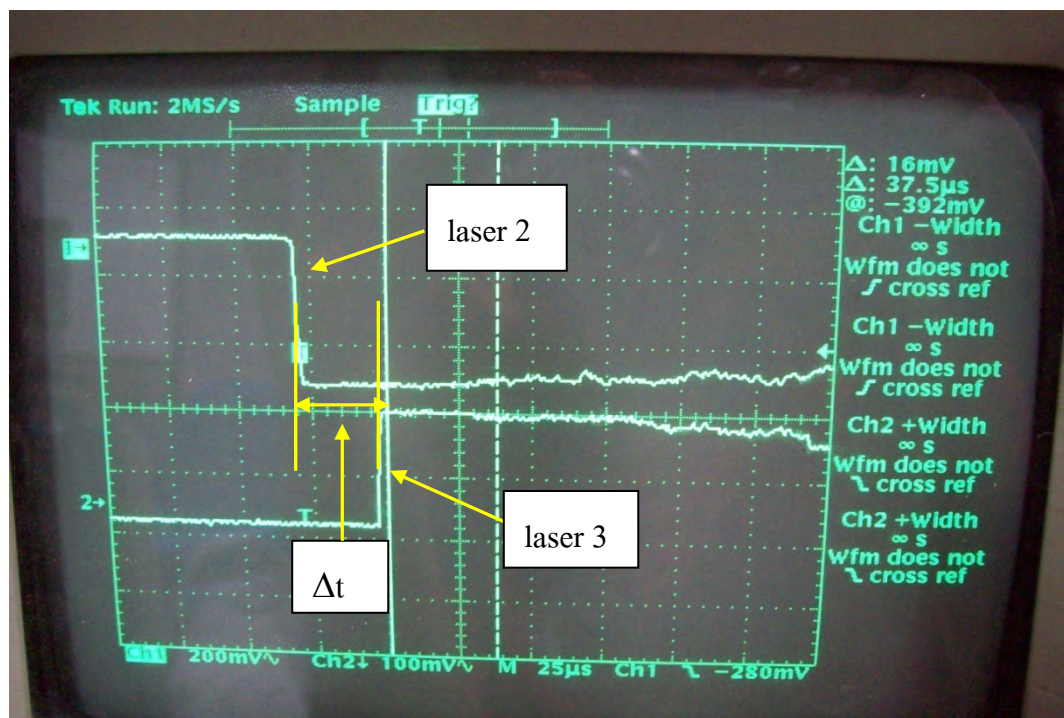
$$\text{จาก } V_2 = \frac{\Delta s_2}{\Delta t} ; \quad \text{จะได้ } V_2 = \frac{33 \times 10^3 \text{ m}}{(216 - 177) \times 10^6 \text{ s}}$$

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

ดังนั้นความเร็วของกระสุนปืนเท่ากับ 846.15 m/s



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



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

3.5 ผลการทดลอง

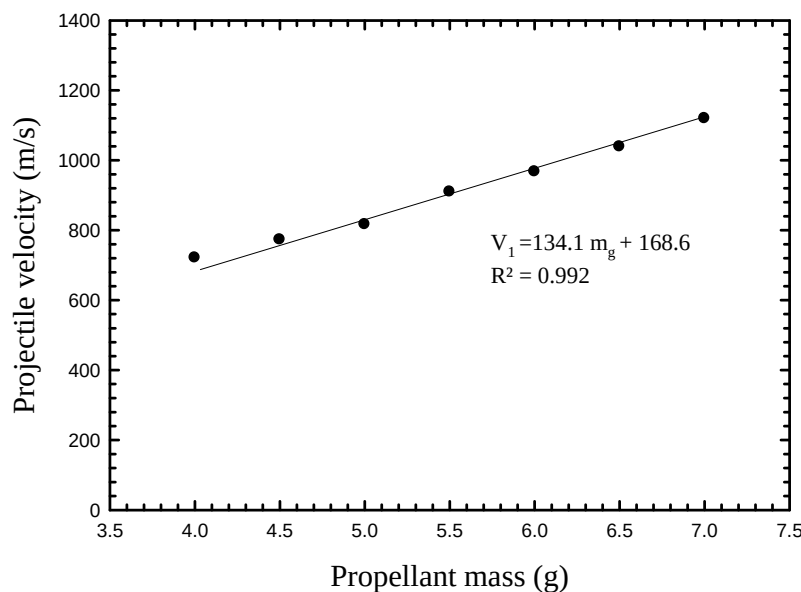
จากการทดลองเพื่อหาสมรรถนะในการผลิตความเร็วของกระสุนปืนของชุดทดลองโดยใช้ น้ำหนักดินปืน 4 g, 4.5 g, 5 g, 5.5 g, 6 g, 6.5 g และ 7 g จากการวัดความเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ใช้ laser 3 ชุด สามารถหาความสัมพันธ์ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของดินปืน (g) และความเร็วของกระสุนปืน (m/s) ที่ระยะ Δs_1 ได้ดังรูปที่ 3.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของดินปืนและความเร็วของกระสุนปืนที่ระยะ Δs_1 จากภาพแสดงว่าความเร็วของกระสุนปืนจะเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักของดินปืนเพิ่มขึ้น โดยที่ความเร็วต่ำสุดของกระสุนปืนเท่ากับ 721 m/s ที่น้ำหนักของดินปืนในการขับ 4 g และความเร็วสูงสุดของกระสุนปืนเท่ากับ 1,119 m/s ที่น้ำหนักของดินปืนในการขับ 7 g จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของดินปืนและความเร็วของกระสุนปืนสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

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

เมื่อ

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

m_g คือ น้ำหนักของดินปืน



รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของดินปืนและความเร็วของกระสุนปืนที่ระยะ Δs_1

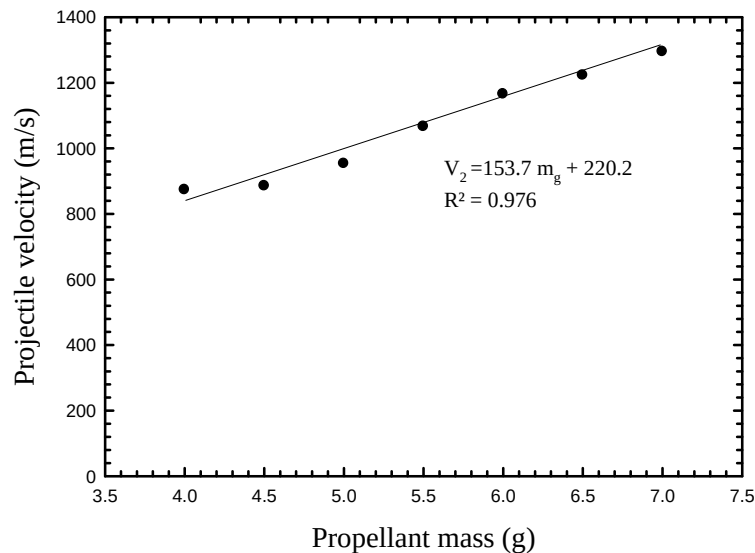
จากรูปที่ 3.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของดินปืนและความเร็วของกระสุนปืนที่ระยะ Δs_2 จากภาพแสดงว่าความเร็วของกระสุนปืนจะเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักของดินปืนเพิ่มขึ้น โดยที่ความเร็วต่ำสุดของกระสุนปืนเท่ากับ 873 m/s ที่น้ำหนักของดินปืนในการขับ 4 g และความเร็วสูงสุดของกระสุนปืนเท่ากับ 1,294 m/s ที่น้ำหนักของดินปืนในการขับ 7 g จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของดินปืนและความเร็วของกระสุนปืนสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

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

เมื่อ

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

m_g คือ น้ำหนักของดินปืน



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของดินปืนและความเร็วของกระสุนปืนที่ระยะ Δs_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 พบว่ากระสุนปืนมีความเร็วสูงขึ้นเมื่อดินปืนที่ใช้ในการทดลองมีน้ำหนักมากขึ้น โดยความเร็วต่ำสุดของกระสุนปืนเท่ากับ 721 m/s และ 873 m/s ที่ระยะ Δs_1 ในท่อส่งกระสุนปืน (launch tube) และที่ระยะ Δs_2 ในห้องทดสอบ (test chamber) ตามลำดับ และความเร็วสูงสุดของกระสุนปืนเท่ากับ 1,119 m/s และ 1,294 m/s ที่ระยะ Δs_1 ในท่อส่งกระสุนปืน (launch tube) และที่ระยะ Δs_2 ในห้องทดสอบ (test chamber) ตามลำดับ ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของดินปืนและความเร็วของกระสุนปืนที่ระยะ Δs_1 ในท่อส่งกระสุนปืน ได้เป็น $V_1 = 134.1m_g + 168.6$ และที่ระยะ Δs_2 ในห้องทดสอบ ได้เป็น $V_2 = 153.7m_g + 220.2$

บทที่ 4

คุณลักษณะของลำพุ่งของเหลวความเร็วสูง

4.1 บทนำ

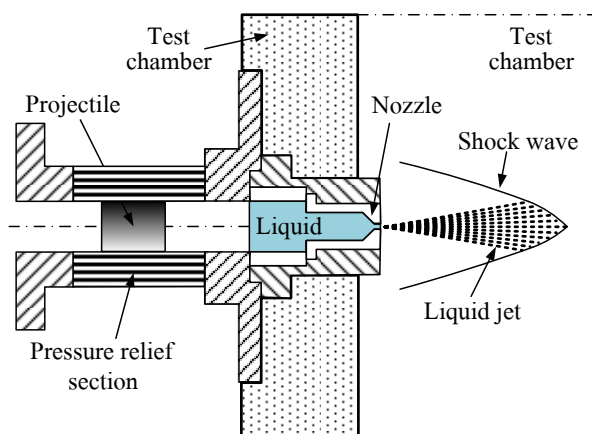
การวิจัยเกี่ยวกับลำพุ่งความเร็วสูง (high-speed jet) เริ่มมีการศึกษาจากปัญหาการชนของเม็ดฝน (rain impact) บนตัวเครื่องบินระหว่างการเคลื่อนที่ในขณะที่ฝนตก [1-8] จากนั้นเป็นต้นมาจึงมีการศึกษาเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมในหลายๆ ด้าน เช่น การตัดโดยลำพุ่ง การทำความสะอาดโดยลำพุ่ง การฉีดเชื้อเพลิงความเร็วสูง เป็นต้น [11-36] และยังนำมาประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ เช่น การฉีดยาโดยไม่ใช้เข็ม การรักษาการอุดตันของก้อนเลือดโดยลำพุ่ง เป็นต้น [39-41] จากการศึกษาต่างๆ พบว่า ลำพุ่งความเร็วสูงสามารถตัดวัสดุที่มีความหนา และความแข็งแรงได้เป็นอย่างดี และยังสามารถทำความสะอาดวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ลำพุ่งน้ำมันความเร็วสูงมีส่วนช่วยส่งเสริมการเผาไหม้ให้มีสมรรถนะดีขึ้น เนื่องจากการแตกตัวเป็นฝอยละอองของน้ำมันและการผสมคลุกเคล้ากันกับอากาศที่ดีขึ้น ซึ่งในปัจจุบันเริ่มมีการศึกษาการนำลำพุ่งความเร็วสูงมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้สมบูรณ์ เช่น การตัดโครงสร้างได้ทะลุ และการเจาะได้ทะลุด้วยลำพุ่งความเร็วสูงเนื่องจากเชื่อว่าลำพุ่งมีพลังงานสูงเพียงพอ [42-43] ดังเช่น งานวิจัยของ H. Soyama และคณะ [43] และ K. Otani และคณะ [55]

จากงานวิจัยที่ผ่านมา ความเร็วของลำพุ่งในน้ำที่ศึกษานั้นมีความเร็วต่ำ เนื่องจากข้อจำกัดของเทคนิคในการผลิตลำพุ่ง จึงทำให้คุณลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูงใน condensed media จึงยังไม่ได้ทำการศึกษาและอธิบายอย่างชัดเจน ดังนั้นในการศึกษานี้จึงทำการศึกษาคุณลักษณะของลำพุ่งของเหลวความเร็วสูงที่ฉีดในอากาศและใน condensed media (น้ำ) และทำการเปรียบเทียบคุณลักษณะของลำพุ่งที่เกิดขึ้นเมื่อของไหลที่ใช้ในการทดลองแตกต่างกันดังกล่าว โดยวิเคราะห์จากการถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูง (High-speed video camera) ร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph และการถ่ายภาพในแนวแกน

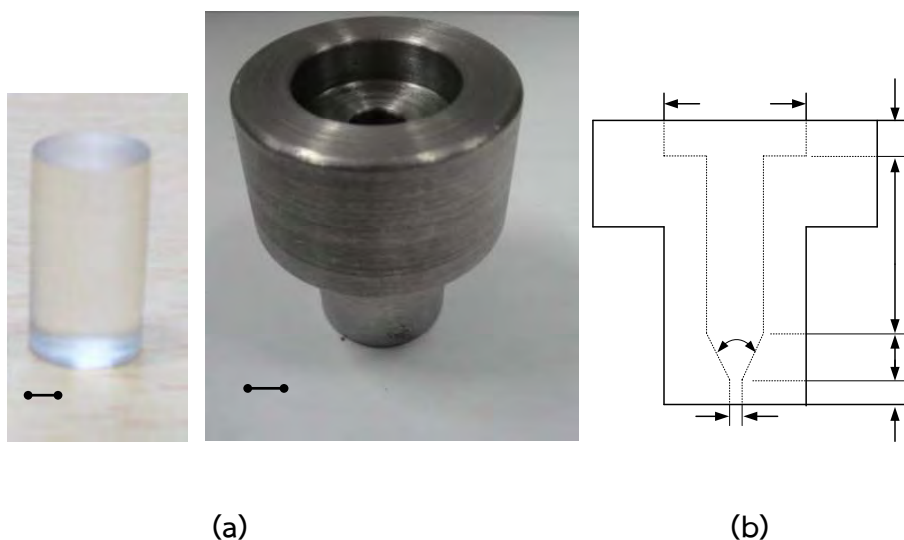
4.2 การผลิตลำพุ่งความเร็วสูง

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) ทรงกระบอกมีความยาว 15 mm ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8.05 mm ดังรูปที่ 4.2(a) และหัวฉีดที่ใช้ในการผลิตลำ

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



รูปที่ 4.1 การขับลำพุ่งด้วยการกระแทก (Impact driven method)

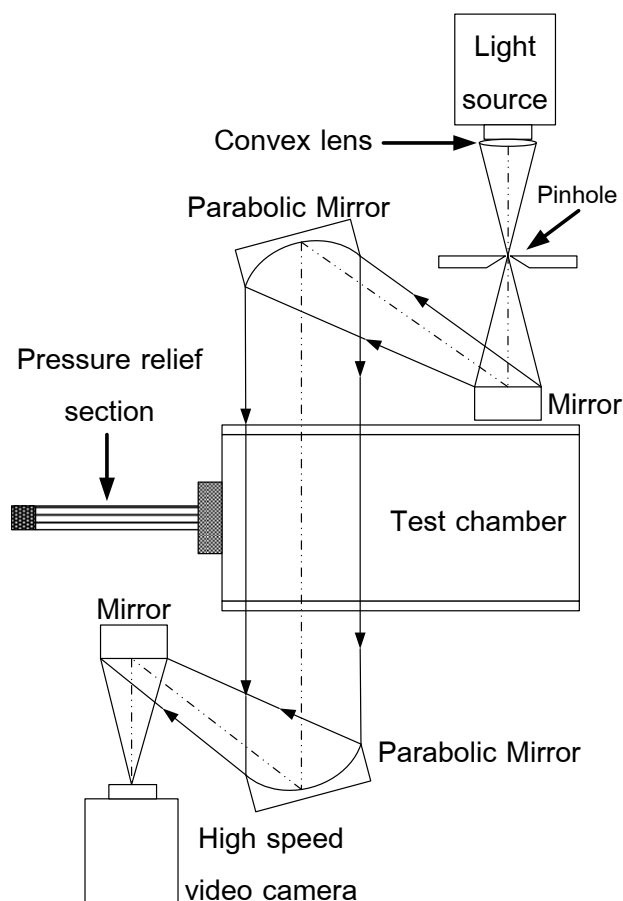


รูปที่ 4.2 (a) กระสุนปืน และ (b) หัวฉีดที่ใช้ในการทดลอง

4.3 การถ่ายภาพ (Visualization)

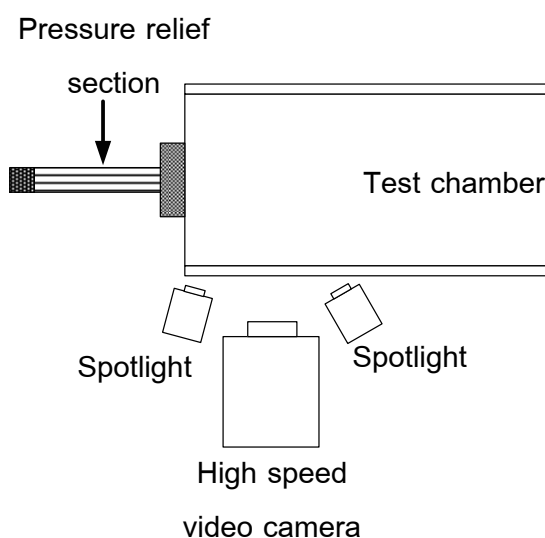
เนื่องจากพฤติกรรมของลำพุ่งที่เกิดขึ้นนั้นเป็นความเร็วระดับเหนือเสียง (supersonic) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในระดับไมโครวินาที (μs) ซึ่งไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าหรือจากกล้องถ่ายภาพทั่วไป ดังนั้นการศึกษานี้จึงใช้กล้องวิดีโอความเร็วสูง (high-speed digital

video camera) ยี่ห้อ photron รุ่น FASTCAM SA5 ที่ความเร็วของการถ่ายภาพเท่ากับ 30,000 fps และความเร็วชัตเตอร์ (shutter speed) 1 μ s โดยถ่ายภาพพร้อมกับเทคนิคการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph ดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยแหล่งกำเนิดแสง (light source) ในการศึกษาใช้หลอดซีนอน (xenon) 3500/4300 K ซึ่งจะส่องแสงออกมาผ่านเลนส์นูน (convex lens) เพื่อรวมแสงและส่องผ่านรูเข็ม (pinhole) ซึ่งทำหน้าที่ตัดแสงที่กระจายออกจากเลนส์นูน แสงจะกระทบกระจกผิวโค้ง (parabolic mirror) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 cm ความยาวโฟกัส 1.5 m ซึ่งทำหน้าที่จัดลำแสงให้ขนานผ่านห้องทดสอบ โดยแสงที่ผ่านห้องทดสอบหากมีพฤติกรรมการไหลที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของของไหลในห้องทดสอบแสงจะเกิดการหักเห โดยแสงที่หักเหจะกระทบกระจกผิวโค้งอีกบานเพื่อรวมแสง เนื่องจากพื้นที่ในห้องทดลองมีจำกัดจึงใช้กระจกเงา (plane mirror) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 19 cm จำนวน 2 บาน ช่วยในการสะท้อนแสงเพื่อลดระยะภายในห้องทดสอบ จากนั้นแสงจะฉายลงจอร์ับภาพของกล้องวิดีโอความเร็วสูงและจะถูกบันทึกภาพไว้

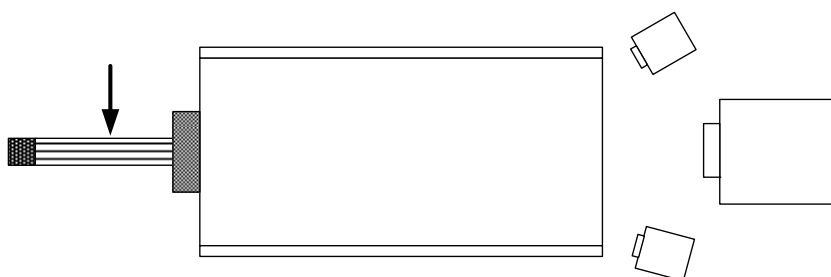


รูปที่ 4.3 การการติดตั้งระบบถ่ายภาพด้วยเทคนิค Shadowgraph

จากรูปที่ 4.4 แสดงการติดตั้งกล้องวิดีโอความเร็วสูงในมุมมองปกติโดยไม่มีการติดตั้งระบบการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph ซึ่งจะมีสปอร์ตไลท์ จำนวน 2 ตัวเป็นแหล่งกำเนิดแสงโดยพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจะถูกบันทึกโดยกล้องวิดีโอความเร็วสูงโดยตรง และรูปที่ 4.5 แสดงการติดตั้งกล้องวิดีโอความเร็วสูงในแนวแกนโดยไม่มีการติดตั้งระบบการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph ซึ่งจะมีสปอร์ตไลท์ จำนวน 2 ตัวเป็นแหล่งกำเนิดแสงโดยพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจะถูกบันทึกโดยกล้องวิดีโอความเร็วสูงโดยตรงเช่นกัน



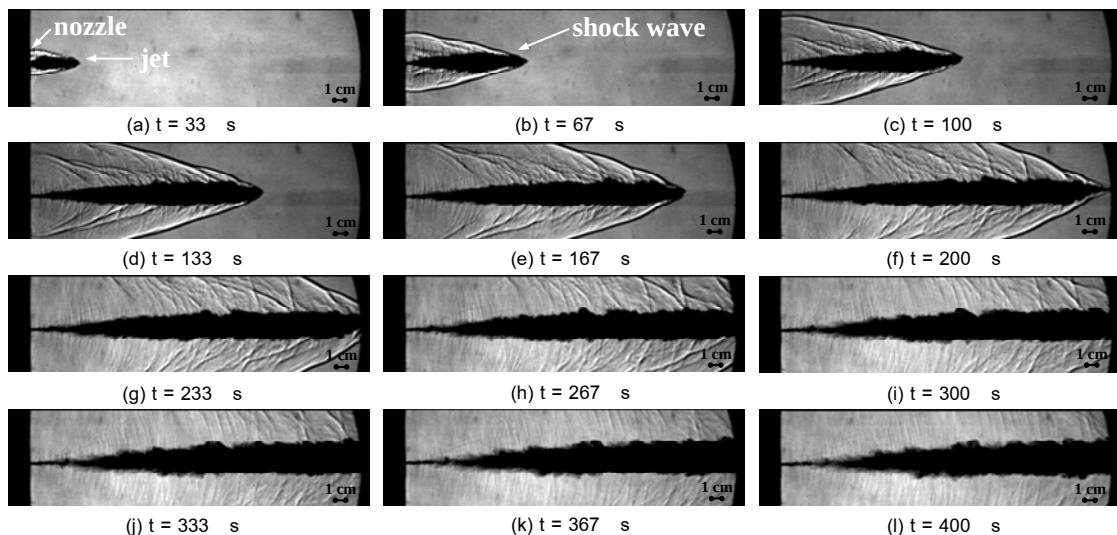
รูปที่ 4.4 การติดตั้งกล้องวิดีโอความเร็วสูงในมุมมองปกติโดยไม่มีการติดตั้งระบบการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph



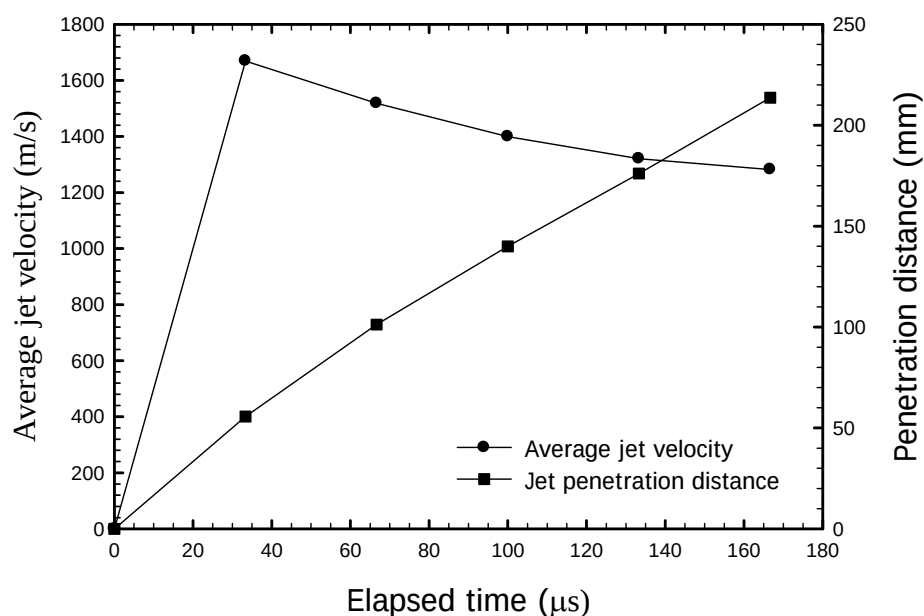
รูปที่ 4.5 การติดตั้งกล้องวิดีโอความเร็วสูงในแนวแกนโดยไม่มีการติดตั้งระบบการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph

4.4 คุณสมบัติของลำพุ่งความเร็วสูงในอากาศ

รูปที่ 4.6 แสดงภาพถ่ายโดยเทคนิค shadowgraph ของลำพุ่งน้ำในอากาศ (water jet in air) เนื่องจากจำนวนภาพที่ถ่ายได้จากกล้องวิดีโอความเร็วสูงมีจำนวนมาก ดังนั้น ในหัวข้อนี้จะแสดงภาพเพียง 12 ภาพในการอธิบายคุณลักษณะของลำพุ่งน้ำ จากภาพจะสังเกตเห็น ลำพุ่งน้ำที่ถูกฉีดออกมาจากหัวฉีด (nozzle) และ shock wave ซึ่งเกิดจากลำพุ่งรวมไปถึง much wave รอบๆ ลำพุ่งอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูปที่ 4.6(a-f) รูปร่างของลำพุ่งจะแคบและยาวซึ่งมีระยะการเคลื่อนที่มากกว่า 250 mm ก่อนที่จะสูญเสียโมเมนตัมและกระจายตัวเป็นฝอยละอองภายในห้องทดสอบดังรูปที่ 4.6(g-l) โดยการเคลื่อนที่ของลำพุ่งน้ำนี้จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเหนือเสียงดังจะสังเกตเห็น shock wave ที่เกิดขึ้น ซึ่งความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่งน้ำตลอดการเคลื่อนที่ผ่านห้องทดสอบระยะการเคลื่อนที่ 250 mm มีค่าเท่ากับ 1,127 m/s คิดเป็น Mach number (Ma) เท่ากับ 3.3 ในขณะที่ความเร็วของลำพุ่งที่ประมาณได้จากมุมของ shock wave มีค่า 992 m/s คิดเป็น Ma เท่ากับ 2.7 ซึ่งพบว่าความเร็วจากการวัดได้ในภาพถ่าย shadowgraph และการวัดจากมุมของ shock wave มีค่าต่างกัน เนื่องมาจากการประเมินจากมุมของ shock wave จะพิจารณาการเคลื่อนที่ของวัตถุซึ่งจะไม่คิดผลของการแตกตัวและการแพร่กระจายของวัตถุ รวมไปถึงจะไม่คำนึงถึงการแตกเป็นฝอยละอองของวัตถุ ซึ่งจะให้ผลที่ถูกต้องกับวัตถุที่แข็งแรง ในขณะที่การเคลื่อนที่ของลำพุ่งจะมีการแตกตัว (break up) การแตกเป็นฝอยละออง (atomization) และการระเหยกลายเป็นไอ (vaporization) จึงทำให้การวัดความเร็วกับผลจากวิเคราะห์โดย shock wave ให้ผลที่แตกต่างกัน โดยที่ความเร็วสูงสุดของลำพุ่งน้ำมีค่าประมาณ 1,669 m/s คิดเป็น Ma มีค่าเท่ากับ 4.9 ที่ $t = 33 \mu\text{s}$



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



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

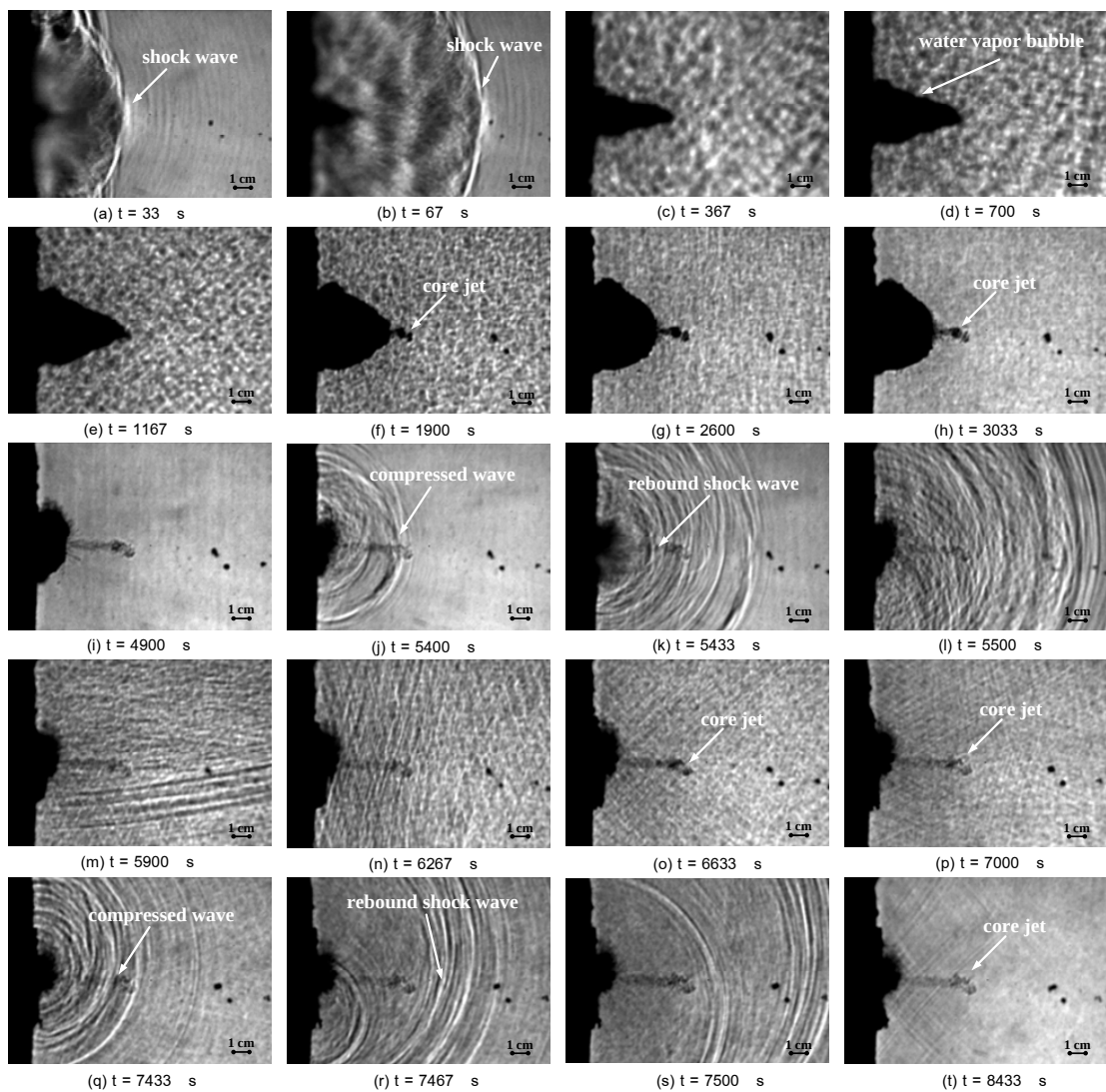
รูปที่ 4.7 แสดงความเร็วเฉลี่ยและระยะการเคลื่อนที่ของลำพ่นน้ำในอากาศ (Average jet speed and jet penetration distance in air) พบว่า ความเร็วจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งเวลา 33 μs จากนั้นความเร็วของลำพ่นจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจาก aerodynamic drag การแตกตัว (break up) การแตกเป็นฝอยละเอียด (atomization) และการระเหยกลายเป็นไอของลำพ่น (vaporization) โดยที่ความเร็วเฉลี่ยของลำพ่นน้ำสูงสุดเท่ากับ 1,669 m/s ที่เวลาเท่ากับ 67 μs จึงส่งผลให้ระยะการเคลื่อนที่ของลำพ่นน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นดังรูป

4.5 คุณสมบัติของลำพ่นความเร็วสูงในน้ำ

ในหัวข้อนี้อธิบายถึงคุณสมบัติของลำพ่นน้ำความเร็วสูงเมื่อฉีดในน้ำจากการถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูงร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพ Shadowgraph เนื่องจากจำนวนภาพที่ถ่ายได้จากกล้องวิดีโอความเร็วสูงมีจำนวนมาก ดังนั้น ในหัวข้อนี้จะแสดงภาพเพียง 20 ภาพในการอธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้น

รูปที่ 4.8 แสดงภาพถ่ายโดยเทคนิค shadowgraph ของลำพ่นน้ำในน้ำ (water jet in water) ทันทีที่กระสุนปืนกระแทกน้ำที่บรรจุภายในหัวฉีด ลำพ่นจะพุ่งออกมาด้วยความเร็วสูง (ความเร็วประมาณ 1,669 m/s ที่เวลา 33 μs ในอากาศ) จึงทำให้เกิด shock wave ภายในน้ำดังรูป

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



รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายโดยเทคนิค shadowgraph ของลำพุงน้ำในน้ำ
(water jet in water, $V_{j, \max} = 374 \text{ m/s}$)

จากนั้นจะเกิด water vapor bubble เนื่องจากการแตกตัวเป็นละออง (atomization) การกลายเป็นไอ (vaporization) ของลำพู่ และเกิดการขยายตัวอย่างรวดเร็ว (expansion) ดังรูปที่ 4.8(b-d) ซึ่งมีลักษณะเป็นวงรีสีดำเข้มดังรูปที่ 4.8(d) ถึงแม้ว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ water vapor bubble (bubble diameter) ในแนวตั้งของภาพจะขยายตัวขึ้นอย่างรวดเร็วแต่ยังช้ากว่าระยะการเคลื่อนที่ของ bubble (bubble penetration) ในแนวนอนของภาพ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่ของลำพู่ (jet penetration) เร็วกว่าการขยายตัวของ bubble ในแนวตั้ง

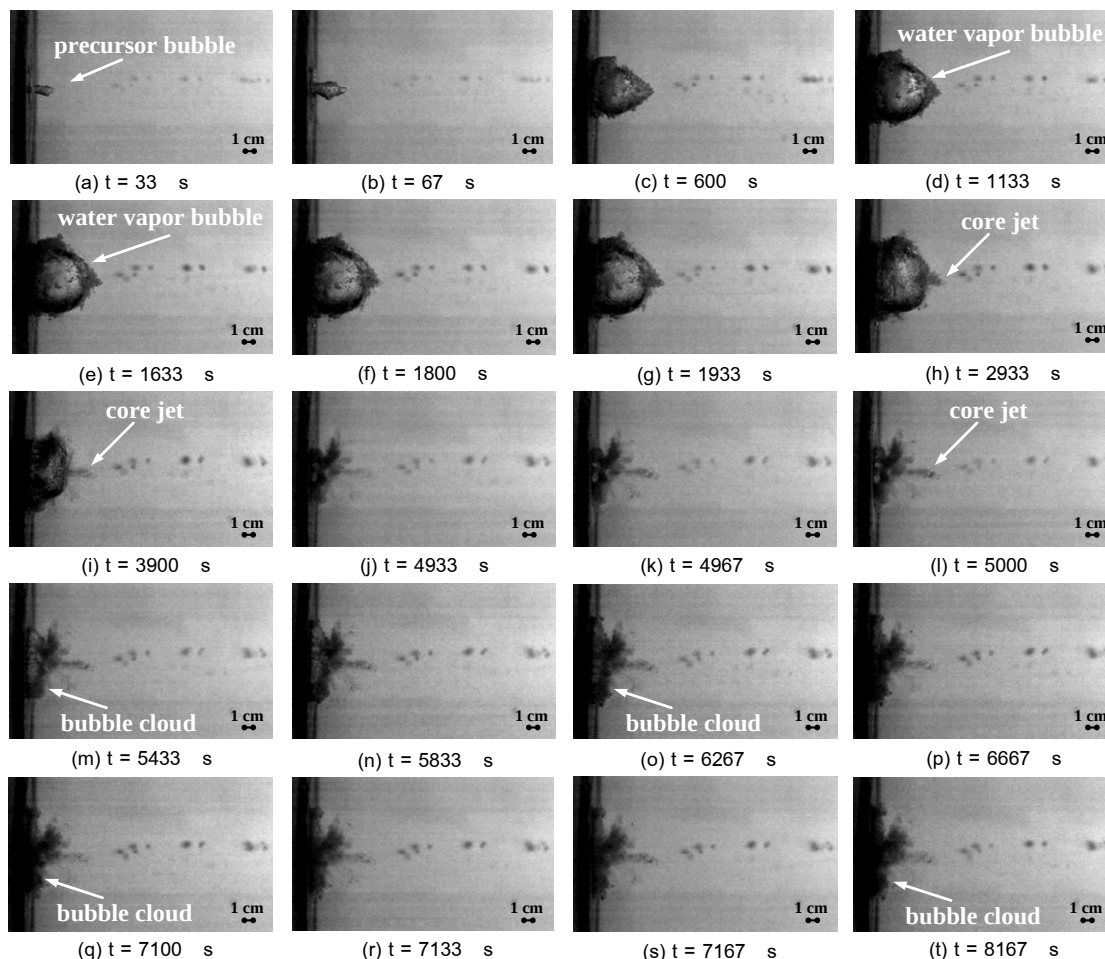
จากรูปที่ 4.8(e) พบว่า ระยะการเคลื่อนที่ของ bubble สูงสุดเท่ากับ 47.88 mm ที่เวลา 1,167 μ s แต่เส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ยังไม่ขยายตัวสูงสุด ยังคงขยายตัวอย่างต่อเนื่องรอบๆ ลำพู่ดังรูปที่ 4.8(f) หลังจากระยะการเคลื่อนที่ของ bubble มาถึงจุดสูงสุด bubble จะเริ่มยุบตัว ในขณะที่เส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble (ในแนวตั้ง) ยังขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

จากรูปที่ 4.8(g) พบว่า เส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะขยายตัวสูงสุดเท่ากับ 57.34 mm ที่เวลา 2,600 μ s คิดเป็นความเร็วในการขยายตัวเท่ากับ 22.05 m/s จากนั้น bubble จะเริ่มยุบตัวจึงทำให้สังเกตเห็นแกนของลำพู่ (core jet) ซึ่งเคลื่อนที่ไปข้างหน้าอย่างช้าๆ จนเกือบจะหยุดนิ่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.8(h,i) ซึ่งการยุบตัวของลำพู่ นั้นเกิดจากความดันของ bubble ต่ำกว่าความดันของน้ำภายในห้องทดสอบ โดยก่อนที่ bubble จะยุบตัวลดลงเกือบจะถึงค่าต่ำสุดดังรูปที่ 4.8(j) จะเกิด compressed wave ขึ้นเมื่อ bubble ยุบตัวลดลงต่ำสุดเท่ากับ 18.63 mm ที่เวลา 5,467 μ 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 แต่ก็เชื่อว่ากลไกดังกล่าวเกิดขึ้นอีกครั้งจริง จากการสังเกตเห็น compressed wave, rebound shock wave และ shock wave ที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.8(p-r) ดังนั้นพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในครั้งนี้อาจคล้ายกับพฤติกรรมการขยายตัวและยุบตัวของ water vapor bubble ที่เกิดขึ้นก่อนหน้านี้ (ดังแสดงในรูปที่ 4.8(a-j) โดยที่การเคลื่อนที่ของ rebound shock wave ที่เกิดขึ้นในครั้งนี้อาจมีความเร็วเท่ากับ 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

ครั้งนี้ได้ จากนั้น bubble จะลอยตัวขึ้นเนื่องจากแรงลอยตัว ในขณะที่ core jet จะละลายผสมรวมกับ น้ำภายในห้องทดสอบ ดังรูปที่ 4.8(s-t) เนื่องจากการสูญเสียแรงพลศาสตร์ (Dynamic force)



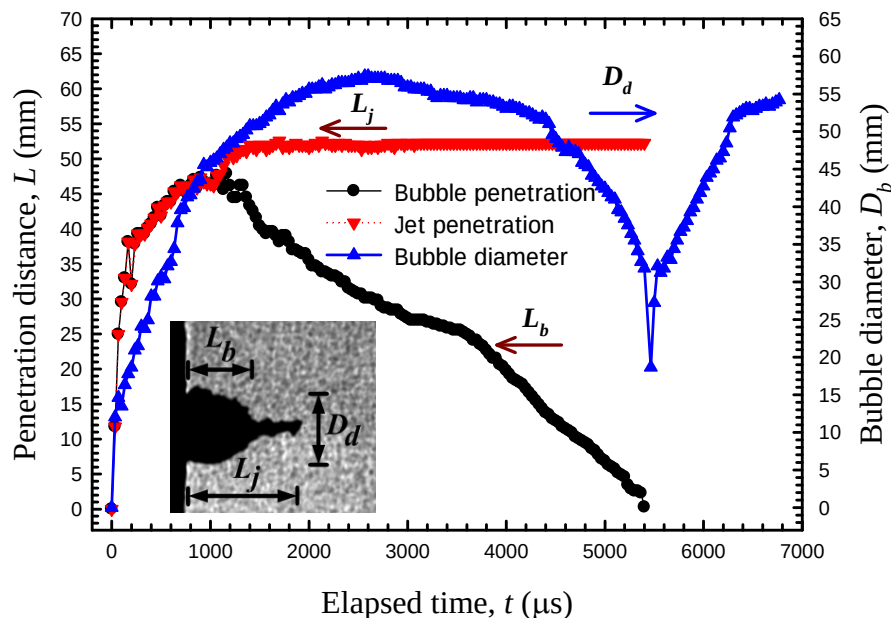
รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายโดยไม่ใช้เทคนิค shadowgraph ของลำพ่นน้ำในน้ำ

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

เมื่อกระสุนปืนกระแทกน้ำที่บรรจุภายในหัวฉีด ลำพ่นจะพุ่งออกมาด้วยความเร็วสูงและทำให้เกิด water vapor bubble โดยที่ความเร็วสูงสุดของลำพ่นมีค่าประมาณ 345 m/s ที่เวลา 33 μ s ดังรูปที่ 4.9(a) จากรูปที่ 4.9(b-d) จะสังเกตเห็นการเกิดและการขยายตัวของ bubble ซึ่ง bubble จะขยายตัวเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ หลังจากนั้น bubble จะเคลื่อนที่ถึงระยะการเคลื่อนที่สูงสุดเท่ากับ 44.14 mm ที่เวลา 1,633 μ s ดังรูปที่ 4.9(e) จากนั้น bubble จะเริ่มยุบตัวกลับและจะเริ่มสังเกตเห็นปลายของลำพ่น สังเกตได้จากรูปที่ 4.9(f)

จากรูปที่ 4.9(g) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของ bubble ในแนวตั้ง (D_y) ขยายตัวสูงสุดเท่ากับ 64.87 mm ที่เวลา 1,967 μs คิดเป็นความเร็วในการขยายตัวเท่ากับ 32.97 m/s จากนั้น bubble จะเริ่มยุบตัวและจะสังเกตเห็นแกนของลำพุงดังรูปที่ 4.9(h-j) จากรูปที่ 4.9(j-l) จะพบว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของ bubble จะยุบตัวลงต่ำสุดเท่ากับ 28.02 mm ที่เวลา 4,800 μs คิดเป็นความเร็วในการยุบตัวเท่ากับ 13.00 m/s และจะเห็นรูปร่างของ bubble เป็นเส้นหยัก

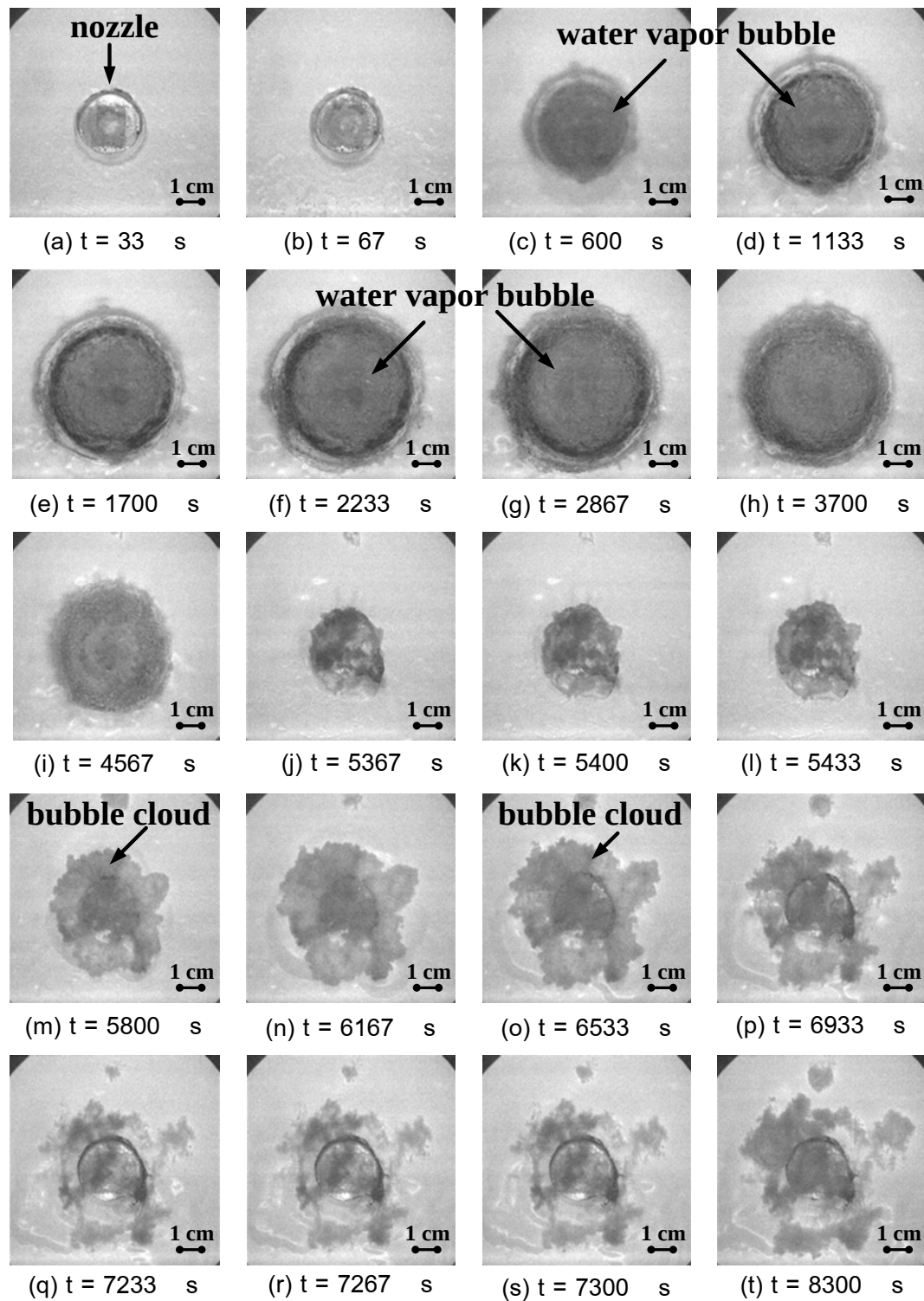
จากภาพถ่ายโดยเทคนิค shadowgraph ที่ผ่านมาในรูปที่ 4.8(m-r) นั้นกลไกการขยายตัวและยุบตัวนั้น ไม่สามารถอธิบายได้ เพราะรูปที่ได้จากเทคนิคการถ่ายภาพ shadowgraph สังเกตเห็นไม่ชัดเจน ซึ่งกลไกดังกล่าวสามารถอธิบายโดยรูปที่ 4.9(m-r) หลังจากที่ bubble ยุบตัวลงจนถึงค่าต่ำสุด bubble จะขยายตัวอีกครั้ง เนื่องจากการสะสมของความดันที่เพิ่มสูงขึ้นจากการยุบตัวของ bubble ซึ่ง bubble ได้ขยายตัวขึ้นอย่างรวดเร็วในแนวตั้ง แต่จะไม่เห็นการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าในแนวนอนอีก 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 แต่เนื่องจากการไม่ใช่เทคนิคการถ่ายภาพ shadowgraph จึงทำให้ไม่เห็น shock wave และ rebound shock wave ในน้ำ



รูปที่ 4.10 ระยะการเคลื่อนที่ของลำพุงและ bubble และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ของลำพุงน้ำในน้ำ (jet and bubble penetration distance and bubble diameter of water jet in water)

รูปที่ 4.10 แสดงระยะการเคลื่อนที่ของลำพุงและ bubble และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ของลำพุงน้ำในน้ำ จากภาพพบว่า ระยะการเคลื่อนที่ของลำพุงมีการเคลื่อนที่ไกลสุดเกิดขึ้นที่เวลา $3,067 \mu\text{s}$ ซึ่งมีระยะการเคลื่อนที่เท่ากับ 52.25 mm หลังจากนั้นลำพุงจะหยุดนิ่งไม่มีการเคลื่อนที่อีกและเมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของ bubble พบว่า bubble จะค่อยๆ เคลื่อนที่ไกลจากหัวฉีดมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป โดยมีการเคลื่อนที่ไกลสุดเกิดขึ้นที่เวลา $1,166 \mu\text{s}$ ซึ่งมีระยะการเคลื่อนที่เท่ากับ 47.88 mm จากนั้น bubble จะค่อยๆ ยุบตัวลงต่ำลงเนื่องจาก hydrodynamic drag ซึ่ง bubble ของน้ำจะยุบตัวลงในช่วงเวลา $1,166 - 5,467 \mu\text{s}$ ในขณะที่เส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะขยายตัวสูงสุดที่เวลา $2,600 \mu\text{s}$ ซึ่งมีขนาดสูงสุดเท่ากับ 57.34 mm จากนั้น bubble จะยุบตัวลงและจะเริ่มขยายตัวอีกครั้งที่เวลา $5,467 \mu\text{s}$

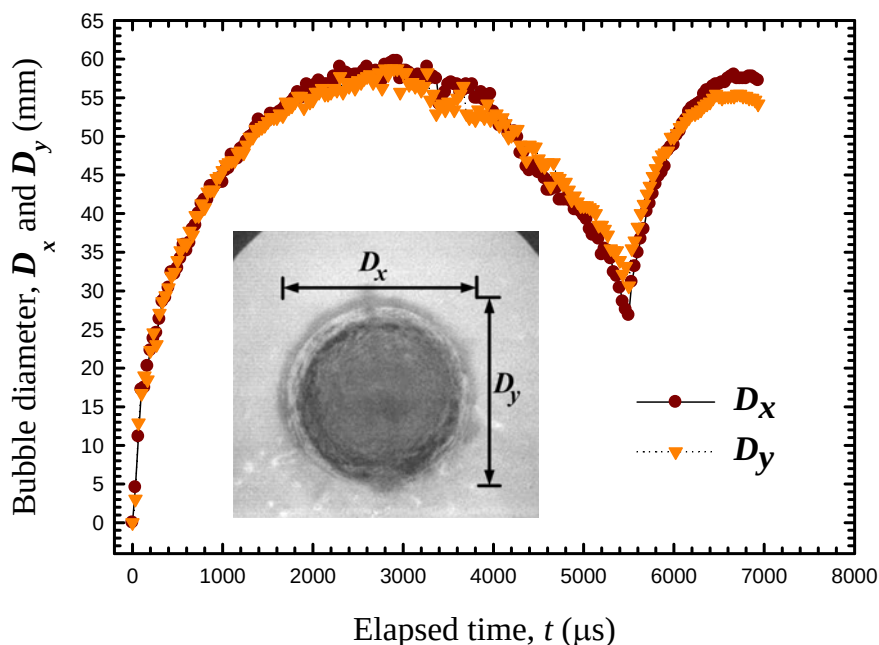
รูปที่ 4.11 แสดงภาพถ่ายในแนวแกนโดยไม่ใช้เทคนิค shadowgraph ของลำพุงน้ำในน้ำ เนื่องจากจำนวนภาพที่ถ่ายได้จากกล้องวิดีโอความเร็วสูงมีจำนวนมาก ดังนั้น จะแสดงภาพเพียง 20 ภาพในการอธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้น จากรูปที่ 4.11(a-f) พบว่า bubble นั้นเกือบจะกลมอย่างสมมาตรและขยายตัวขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ขยายตัวสูงสุดในแนวนอน (D_x) เท่ากับ 59.75 mm ที่เวลา $2,900 \mu\text{s}$ และในแนวตั้ง (D_y) เท่ากับ 58.74 mm ที่เวลา $2,867 \mu\text{s}$ ดังรูปที่ 4.11(g) จากนั้นจะเริ่มยุบตัวลงอย่างรวดเร็วจนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ลดลงต่ำสุดในแนวนอน (D_x) มีขนาด 26.83 mm และในแนวตั้ง (D_y) มีขนาด 30.63 mm ที่เวลา $5,500 \mu\text{s}$ 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 ของลำพ่นน้ำในน้ำ

μ

รูปที่ 4.12 แสดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของลำพุงในแนวนอน (D_x) และแนวตั้ง (D_y) ของลำพุงน้ำในน้ำ (bubble diameter D_x and D_y of water jet injected in water) เมื่อพิจารณาเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของ bubble ในแนวนอน (D_x) จะพบว่ามีความยาวที่มากกว่า bubble ในแนวตั้ง (D_y) จากนั้นจะค่อยๆ ขยายตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปโดยจะมีการขยายตัวใหญ่สุดที่เวลา 2,900 μs ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของ bubble ในแนวนอน (D_x) เท่ากับ 59.75 mm และในแนวตั้ง (D_y) เท่ากับ 58.74 mm ที่เวลาเท่ากับ 2,867 μs จากนั้น bubble จะยุบตัวลงจนถึงเวลาประมาณ 5,467 μs ซึ่งพบว่า bubble ในแนวนอน (D_x) จะมีขนาดเล็กกว่า bubble ในแนวตั้ง (D_y) เนื่องจากผลของความดันน้ำที่กระทำกับขอบของ bubble ที่ระดับความลึกของน้ำที่แตกต่างกันในแนวตั้ง (D_y) จึงทำให้ bubble ไม่มีรูปร่างเป็นวงกลมอย่างสมมาตร จากนั้นเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของ bubble จะยุบตัวลดลง ซึ่งการยุบตัวใช้เวลาในช่วง 2,900 - 5,467 μs จนถึงขนาดต่ำสุดที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 26.84 mm ในแนวนอน (D_x) และ 30.64 mm ในแนวตั้ง (D_y) จากนั้นเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของ bubble จะเริ่มขยายตัวอีกครั้ง โดยความเร็วของการขยายตัวของ bubble ในน้ำในช่วงเวลา 0 - 2,900 μs คิดเป็น 20.60 m/s ในแนวนอน (D_x) และในช่วงเวลา 0 - 2,867 μs คิดเป็น 20.48 m/s ในแนวตั้ง (D_y) และความเร็วของการยุบตัวที่ช่วงเวลา 2,900 - 5,500 μs คิดเป็น 12.66 m/s ในแนวนอน (D_x) และ 10.67 m/s ในแนวตั้ง (D_y)



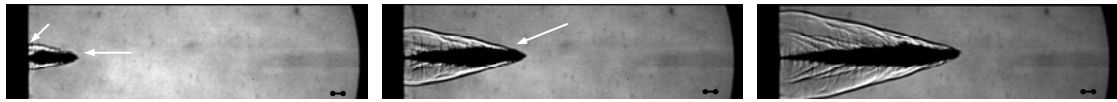
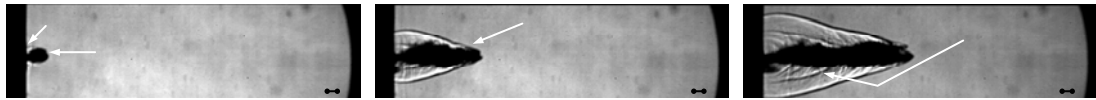
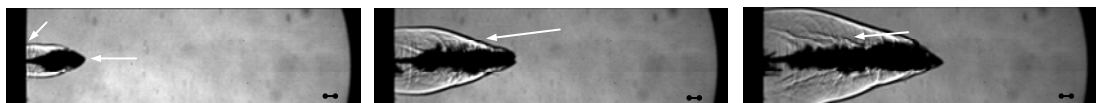
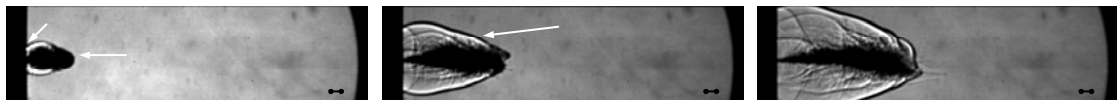
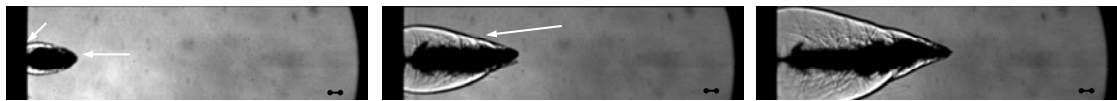
รูปที่ 4.12 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของลำพุงในแนวนอน (D_x) และแนวตั้ง (D_y) ของลำพุงน้ำในน้ำ (bubble diameter D_x and D_y of water jet injected in water)

4.6 อิทธิพลของชนิดลำพุงเมื่อฉีดในอากาศ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงอิทธิพลของชนิดของลำพุงต่อคุณลักษณะของลำพุงความเร็วสูงเมื่อฉีดในอากาศโดยของเหลวในการศึกษานี้ คือ น้ำ (water), น้ำทะเล (sea water), น้ำมันดีเซล (diesel), น้ำมันก๊าด (kerosene), แอลกอฮอล์ (alcohol) และน้ำมันแก๊สโซลีน (gasoline) โดยคุณสมบัติของของเหลวทั้ง 6 ชนิดแสดงดังตารางที่ 4.1 ในการอธิบายคุณลักษณะของลำพุงที่เกิดขึ้นจะการใช้การถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูงร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของของเหลวที่ใช้ในการทดลอง [58]

Liquid type	Molecular weight (g/mol)	Density at 20 ⁰ C (kg/m ³)	Kinematics viscosity 20 ⁰ C (cSt)	Surface tension at 20 ⁰ C (N/m)	Heat capacity at 40 ⁰ C (J/g ⁰ C)	Latent heat (kJ/kg)
Water (H ₂ O)	18	998	1.003	0.0728	4.19	2,257 (at 100 ⁰ C)
Sea water -	-	1025	1.044	0.07344	3.898	2,188.8 (at 100 ⁰ C)
Diesel (C ₁₄ H ₃₀)	198	840	1.8 - 4.0	0.0244	1.97	267.49 (at 170 ⁰ C)
Kerosene (C ₁₀ -C ₁₄)	170	810	1.5 - 2.5	0.0235	2.02	314.01 (at 117.8 ⁰ C)
Alcohol (CH ₃ OH)	32	785.1	1.6	0.022	2.3	896 (at 90 ⁰ C)
Gasoline (C ₅ H ₁₂)	114	750	0.5	0.02	2.1	318.66 (at 90 ⁰ C)

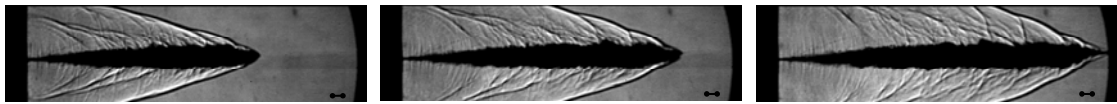
(a) water jet ($V_j, \max = 1,669 \text{ m/s}$, $\text{Ma} = 4.9$)(b) sea water jet ($V_j, \max = 1,514 \text{ m/s}$, $\text{Ma} = 4.4$)(c) diesel jet ($V_j, \max = 1,453 \text{ m/s}$, $\text{Ma} = 4.2$)(d) kerosene jet ($V_j, \max = 1,264 \text{ m/s}$, $\text{Ma} = 3.7$)(e) alcohol jet ($V_j, \max = 1,548 \text{ m/s}$, $\text{Ma} = 4.5$)(f) gasoline jet ($V_j, \max = 1,634 \text{ m/s}$, $\text{Ma} = 4.8$) $t = 33 \mu\text{s}$

รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิด เมื่อฉีดในอากาศ

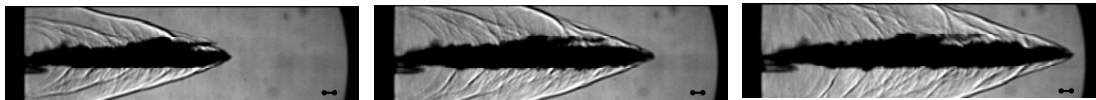
รูปที่ 4.13 แสดงภาพถ่ายด้วยเทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิด เมื่อฉีดในอากาศ เมื่อพิจารณาที่เวลาเท่ากับ 33-67 μs พบว่า ลำพุ่งน้ำ, น้ำทะเล, น้ำมันดีเซล และ น้ำมันแก๊สโซลีน จะมีลักษณะแคบเรียวแหลม ในขณะที่ลำพุ่งน้ำมันก๊าดและแอลกอฮอล์ จะมีลักษณะเรียวกว้างหรืออ้วนกว่า เนื่องจากลำพุ่งทุกชนิดนั้นเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ดังนั้นจึงสังเกตเห็น shock wave และ mach wave ที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาที่เวลาเท่ากับ 100 μs จะเริ่มสังเกตเห็น second shock wave เกิดขึ้นกับลำพุ่งน้ำ น้ำทะเล น้ำมันดีเซล และน้ำมันแก๊สโซลีน ซึ่งบ่งบอกว่า อาจมีลำพุ่งเกิดขึ้นอีกลำพุ่งจากการกระแทกของกระสุนปืนเพียงครั้งเดียว ซึ่งเป็นคุณลักษณะเฉพาะที่ได้

 $t = 33 \mu\text{s}$

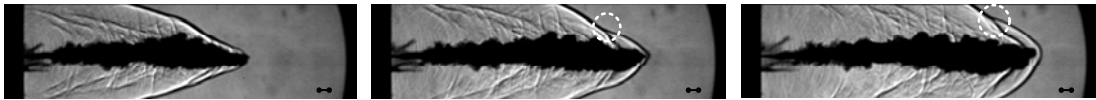
ถูกอธิบายไว้แล้วในการศึกษาของ K.Pianthong [52] ในขณะที่ไม่สามารถสังเกตพบในลำพุน้ำมันก๊าดและแอลกอฮอล์ นอกจากนี้ยังพบการแตกตัวที่รุนแรงสำหรับลำพุน้ำมันก๊าด



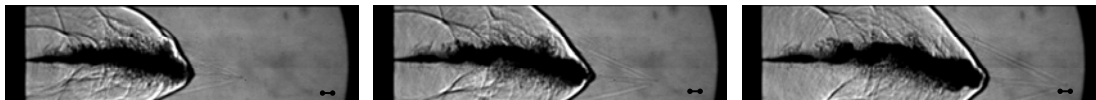
(a) water jet ($V_j, \max = 1,669 \text{ m/s}$, $\text{Ma} = 4.9$)



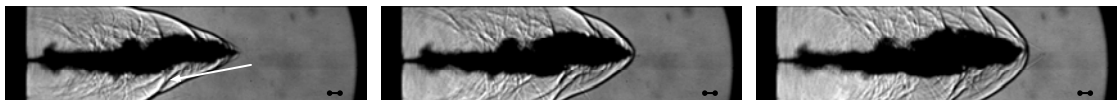
(b) sea water jet ($V_j, \max = 1,514 \text{ m/s}$, $\text{Ma} = 4.4$)



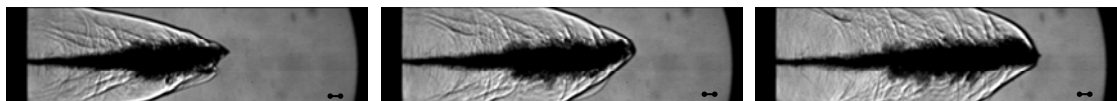
(c) diesel jet ($V_j, \max = 1,453 \text{ m/s}$, $\text{Ma} = 4.2$)



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



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

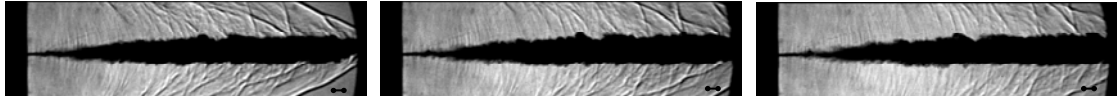


(f) gasoline jet ($V_j, \max = 1,634 \text{ m/s}$, $\text{Ma} = 4.8$)

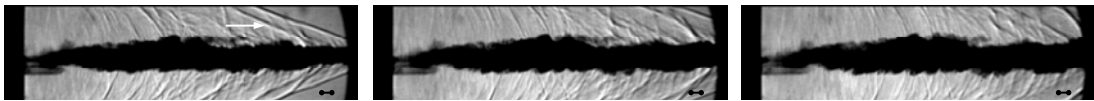
รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค Shadowgraph ของลำพุงความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิด เมื่อฉีดในอากาศที่ $t = 133 \mu\text{s}$

เมื่อพิจารณาที่เวลาเท่ากับ $133 - 200 \mu\text{s}$ พบว่า ลำพุงน้ำและน้ำทะเลยังคงมีลักษณะเรียวยาวแหลม ในขณะที่ลำพุงดีเซลเริ่มมีการชะลอความเร็วและมีขนาดลำพุงที่ใหญ่ขึ้น และเมื่อสังเกตที่ shock wave พบว่า มีการเปลี่ยนมุมของ shock wave (change in shock angle) ซึ่งเป็นการบ่งชี้ว่า การเคลื่อนที่ของลำพุงลำที่สองมีความเร็วสูงกว่าลำพุงลำที่หนึ่งและเกิดการแซงของลำพุงลำที่สอง และหากพิจารณาที่ลำพุงน้ำมันก๊าดจะพบการแตกตัวเป็นละอองอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ลำพุง

แอลกอฮอล์เริ่มมีความเร็วช้าลงซึ่งสังเกตจากมุมของ shock wave ที่เริ่มเปลี่ยนจาก oblique shock เป็น bow shock และเมื่อสังเกตลำพ่นน้ำมันแก๊สโซลีน จะพบการแตกตัวที่ชัดเจนขึ้นและมีการเคลื่อนที่ที่ช้าลง



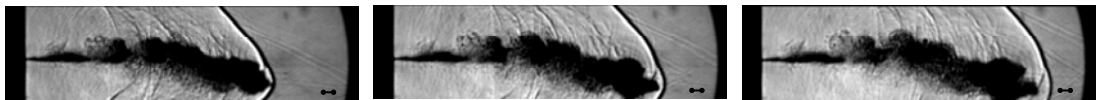
(a) water jet ($V_j, \max = 1,669 \text{ m/s}$, $\text{Ma} = 4.9$)



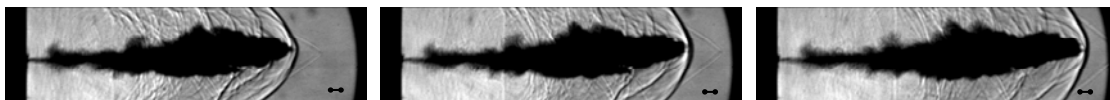
(b) sea water jet ($V_j, \max = 1,514 \text{ m/s}$, $\text{Ma} = 4.4$)



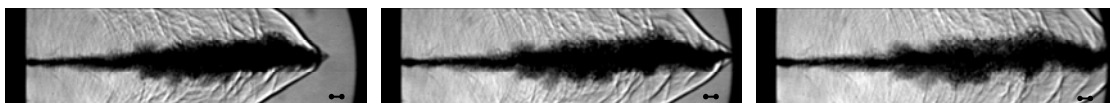
(c) diesel jet ($V_j, \max = 1,453 \text{ m/s}$, $\text{Ma} = 4.2$)



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



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



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

รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค Shadowgraph ของลำพ่นความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิด เมื่อฉีดในอากาศ (ต่อ)

เมื่อพิจารณาที่เวลาเท่ากับ $233 - 300 \mu\text{s}$ พบว่า ลำพ่นน้ำและน้ำทะเลยังคงมีลักษณะเรียวยาว **$t = 233 \mu\text{s}$** แหวมและยังไม่แสดงให้เห็นถึงการแตกตัวเป็นฝอยละออง แต่ลำพ่นลำที่สองเริ่มจะสังเกตเห็นได้ชัด สำหรับลำพ่นน้ำทะเล เมื่อพิจารณาลำพ่นน้ำมันดีเซลจะพบว่า ขนาดของลำพ่นมีขนาดใหญ่ขึ้น ในขณะที่

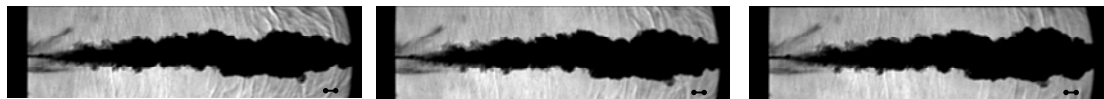
ที่การแตกตัวเป็นฝอยละอองอย่างรุนแรงเกิดขึ้นกับลำพุน้ำมันก๊าดและน้ำมันแก๊สโซลีน เมื่อสังเกตลำพุงแอลกอฮอล์จะพบว่า ลำพุงมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีความเร็วช้าลงเมื่อเทียบกับลำพุงชนิดอื่น



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



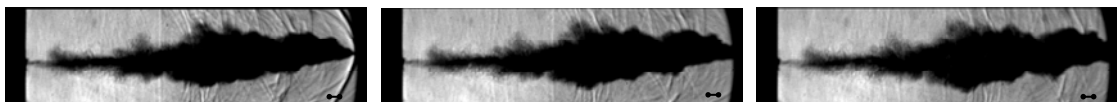
(b) sea water jet ($V_{j, \max} = 1,514 \text{ m/s}$, $Ma = 4.4$)



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



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



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

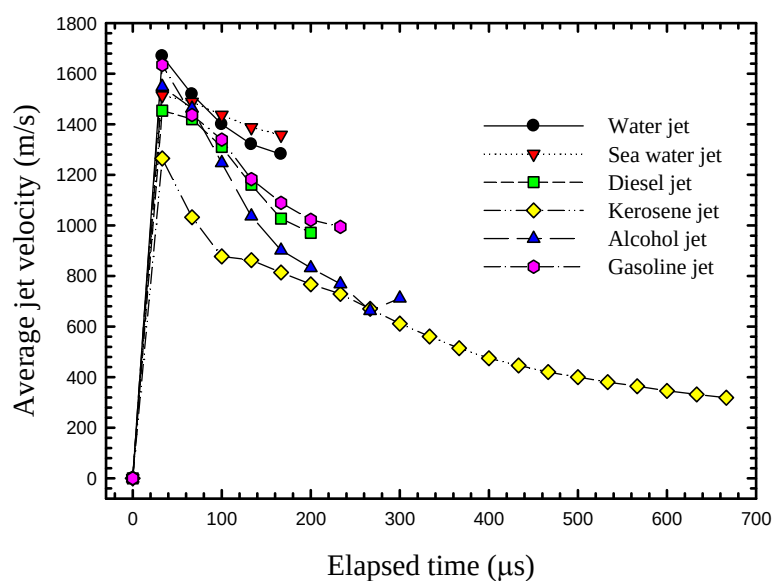


(f) gasoline jet ($V_{j, \max} = 1,634 \text{ m/s}$, $Ma = 4.8$)

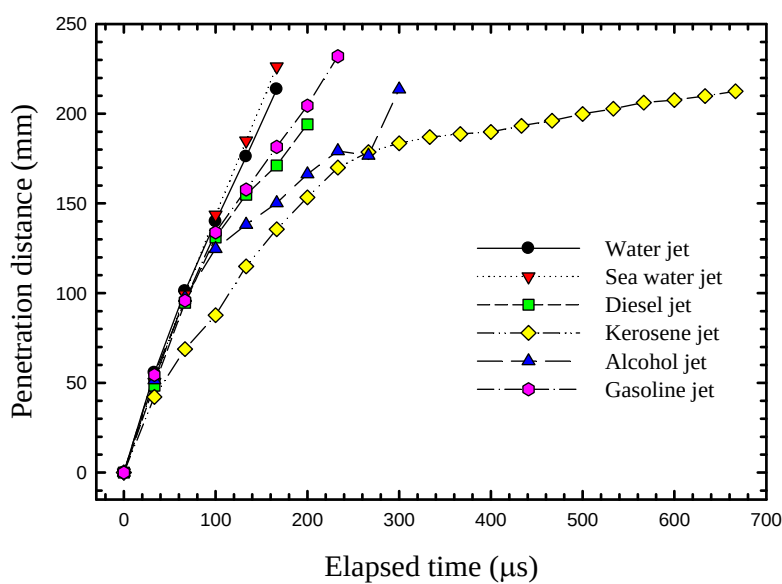
รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค Shadowgraph ของลำพุงความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิด เมื่อฉีดในอากาศที่ $t = 333 \mu\text{s}$

เมื่อพิจารณาที่เวลาเท่ากับ $333 - 400 \mu\text{s}$ พบว่า ลำพุงน้ำและน้ำทะเลยังคงมีลักษณะเรียวยาว แหลม ในขณะที่การแตกตัวเป็นฝอยละอองเกิดขึ้นกับลำพุงน้ำมันก๊าดและน้ำมันแก๊สโซลีนอย่างเห็นได้ชัด เมื่อพิจารณาลำพุงน้ำมันดีเซลและแอลกอฮอล์จะพบว่า ขนาดของลำพุงมีขนาดใหญ่ขึ้น ถึงแม้จะไม่แตกตัวเป็นฝอยละอองอย่างเห็นได้ชัดก็ตาม แต่จะสังเกตเห็นการแตกตัวที่ผิวด้านข้างของลำพุงทั้งสอง และเมื่อพิจารณาคูณสมบัติของของเหลวในตารางที่ 4.1 จะสังเกตพบ การแตกตัวเป็นฝอยละออง

ของลำพุงจะมีความสัมพันธ์กับความตึงผิว (surface tension) โดยค่าความตึงผิวของน้ำและน้ำทะเลมีค่าสูงจึงยังไม่พบการแตกตัวเป็นฝอยละอองในขณะที่น้ำมันดีเซล น้ำมันก๊าด แอลกอฮอล์และน้ำมันแก๊สโซลีนมีค่าความตึงผิวต่ำกว่าจึงทำให้พบการแตกตัวอย่างชัดเจน ในขณะที่คุณสมบัติอื่นๆ ของของเหลวยังไม่แสดงให้เห็นนัยสำคัญต่อคุณลักษณะของลำพุงอย่างชัดเจน



รูปที่ 4.14 ความเร็วเฉลี่ย (average jet velocity) ของลำพุงทั้ง 6 ชนิด



รูปที่ 4.15 ระยะการเคลื่อนที่ (penetration distance) ของลำพุงทั้ง 6 ชนิด

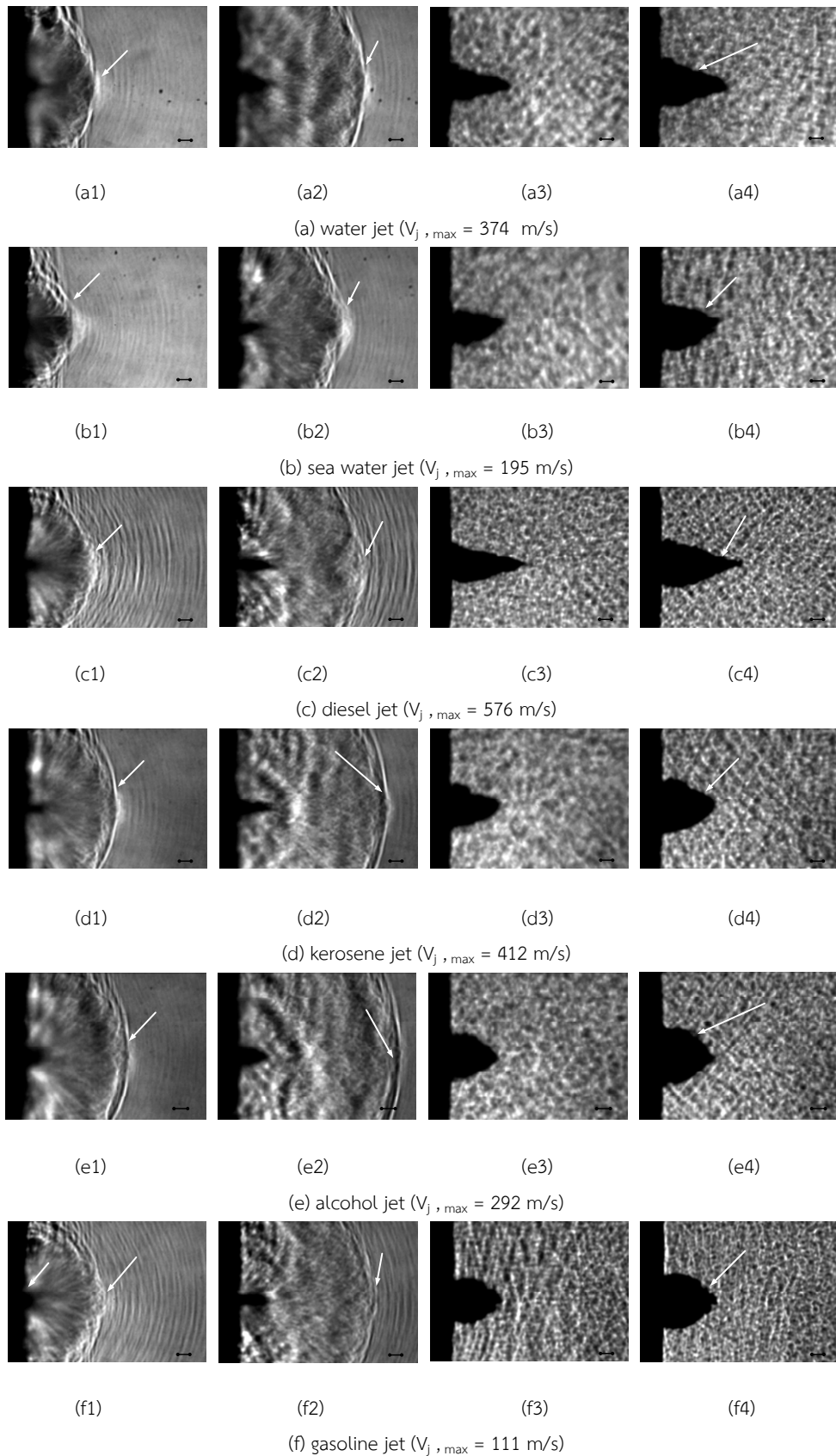
จากรูปที่ 4.14 แสดงความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด จากรูป พบว่า ความเร็วเฉลี่ยสูงสุดของลำพุ่งน้ำ, น้ำทะเล, น้ำมันดีเซล, น้ำมันก๊าด, แอลกอฮอล์ และน้ำมันแก๊สโซลีน มีค่าเท่ากับ 1,669.03 m/s, 1,514.17 m/s, 1,453.95 m/s, 1,264.68 m/s, 1,548.58 m/s และ 1,634.62 m/s ตามลำดับ ที่เวลาเท่ากับ 67 μ s จากนั้นความเร็วของลำพุ่งจะค่อยๆ ลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อพิจารณาคุณสมบัติของลำพุ่งจากตารางที่ 4.1 พบว่า คุณสมบัติทางกายภาพต่างๆ ไม่มีนัยสำคัญกับความเร็วของลำพุ่ง อาจเนื่องมาจากพลังงานจากการกระแทกของกระสุนปืนที่ของเหลวได้รับมีค่าสูงมากจนส่งผลให้อิทธิพลของคุณสมบัติทางกายภาพของของเหลวไม่มีนัยสำคัญกับความเร็ว ซึ่งความเร็วที่ผลิตได้ของแต่ละลำพุ่งมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ผลของความเร็วของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด จึงสอดคล้องกับระยะการเคลื่อนที่ของลำพุ่งโดยที่ลำพุ่งน้ำ, น้ำทะเล, น้ำมันดีเซล, น้ำมันก๊าด, แอลกอฮอล์ และน้ำมันแก๊สโซลีนเคลื่อนที่ได้ 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 และระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิดสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สรุปผลการทดลองคุณลักษณะลำพุ่งความเร็วสูงในอากาศ

Liquid type	Maximum average jet velocity (m/s)	Mach no.	Jet Penetration distance at 167 μ 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

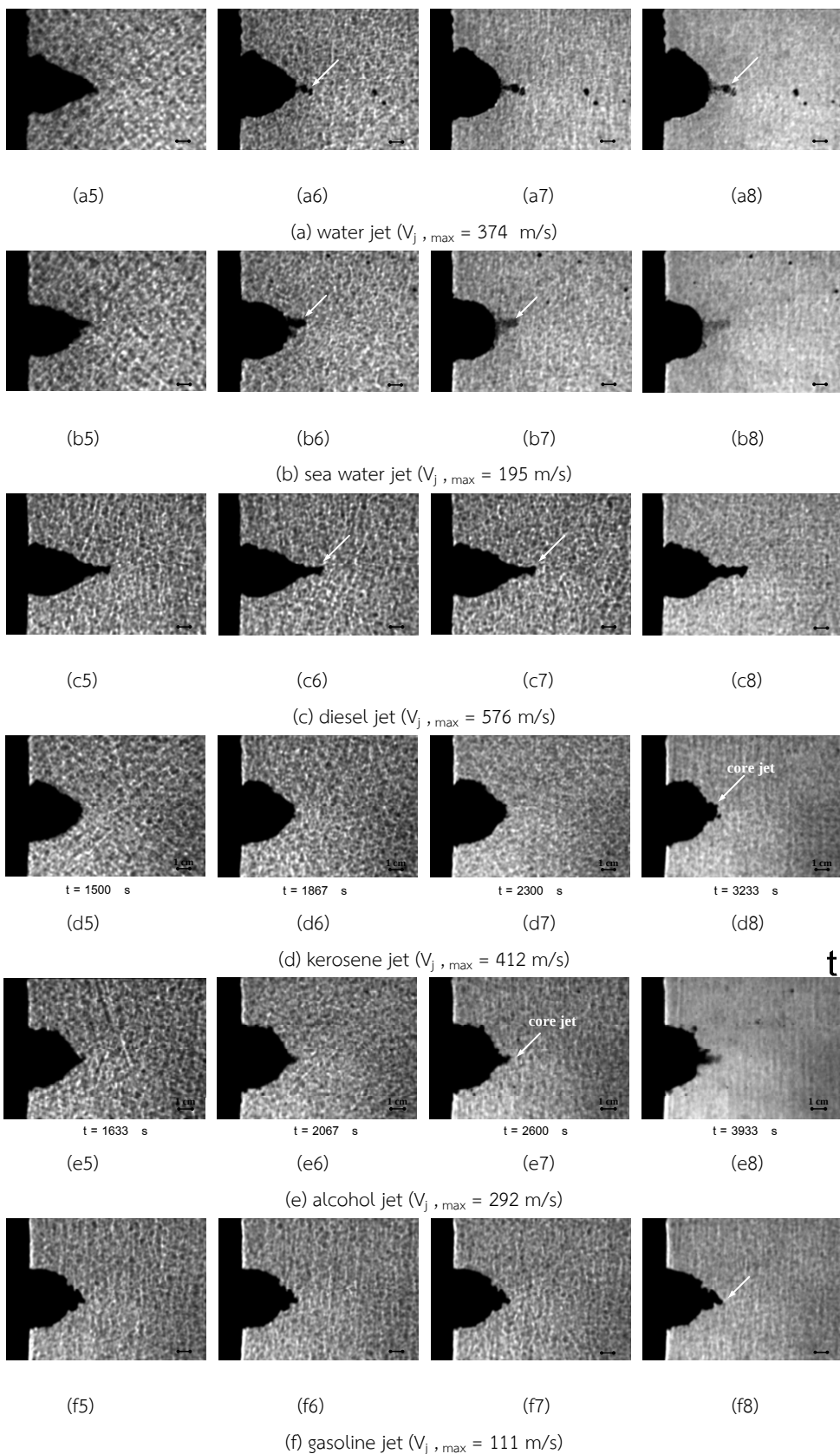
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงอิทธิพลของชนิดของลำพุ่งต่อคุณลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูงเมื่อฉีดในน้ำโดยของเหลวที่ใช้เป็นชนิดเดียวกับกรณีฉีดในอากาศ ในการอธิบายคุณลักษณะของลำพุ่งที่เกิดขึ้น จะใช้การถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูงร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพ Shadowgraph และไม่มีเทคนิค Shadowgraph ร่วมถึงการถ่ายภาพในแนวแกน



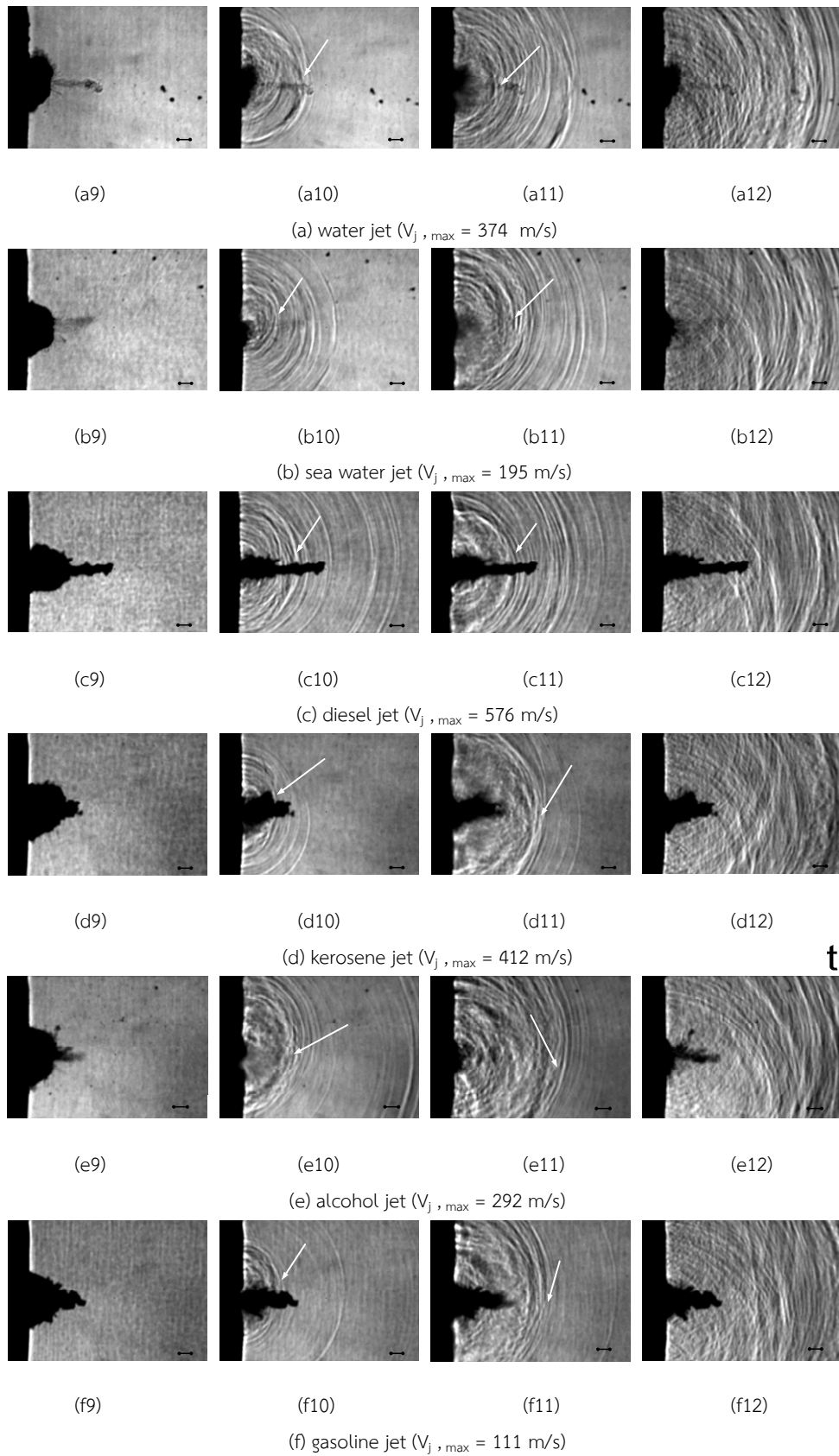
$t = 33 \mu s$

รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิดเมื่อฉีดในน้ำ

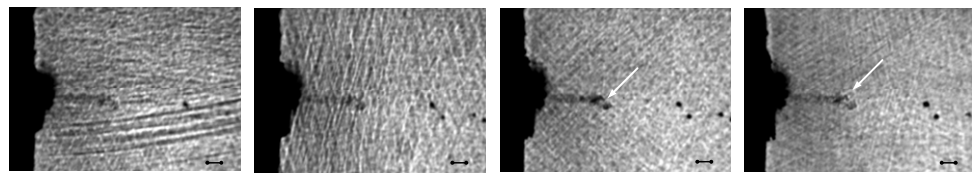
$t = 33 \mu s$



รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิดเมื่อฉีดในน้ำ (ต่อ)



รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิดเมื่อฉีดในน้ำ (ต่อ)

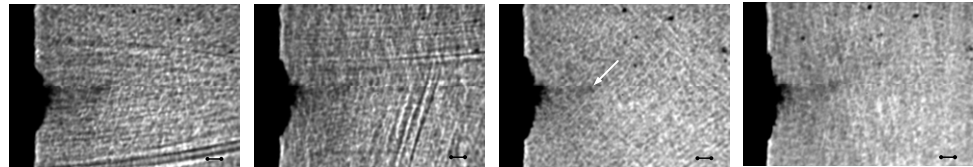


(a13)

(a14)

(a15)

(a16)

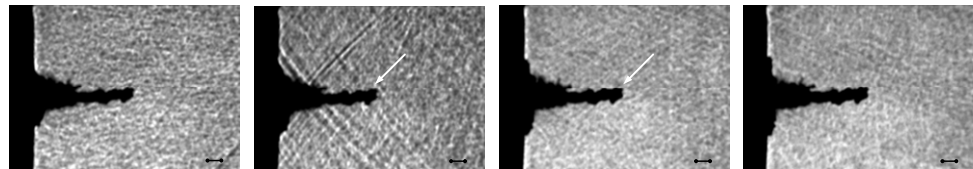
(a) water jet ($V_{j, \max} = 374 \text{ m/s}$)

(b13)

(b14)

(b15)

(b16)

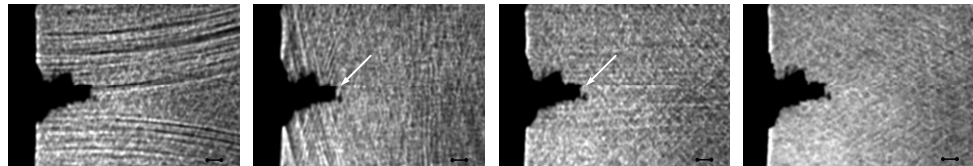
(b) sea water jet ($V_{j, \max} = 195 \text{ m/s}$)

(c13)

(c14)

(c15)

(c16)

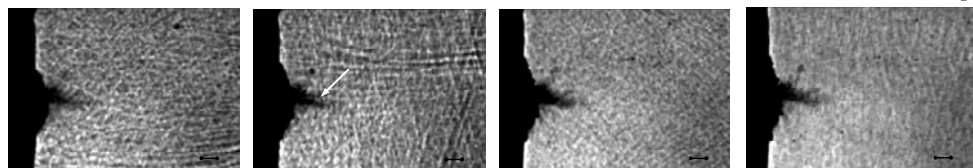
(c) diesel jet ($V_{j, \max} = 576 \text{ m/s}$)

(d13)

(d14)

(d15)

(d16)

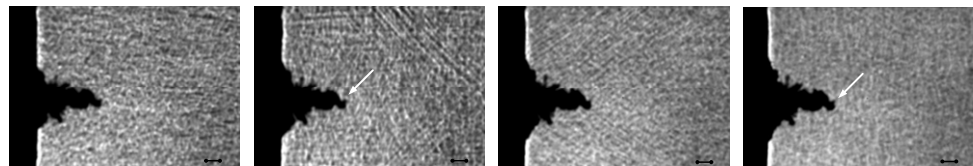
(d) kerosene jet ($V_{j, \max} = 412 \text{ m/s}$)

(e13)

(e14)

(e15)

(e16)

(e) alcohol jet ($V_{j, \max} = 292 \text{ m/s}$)

(f13)

(f14)

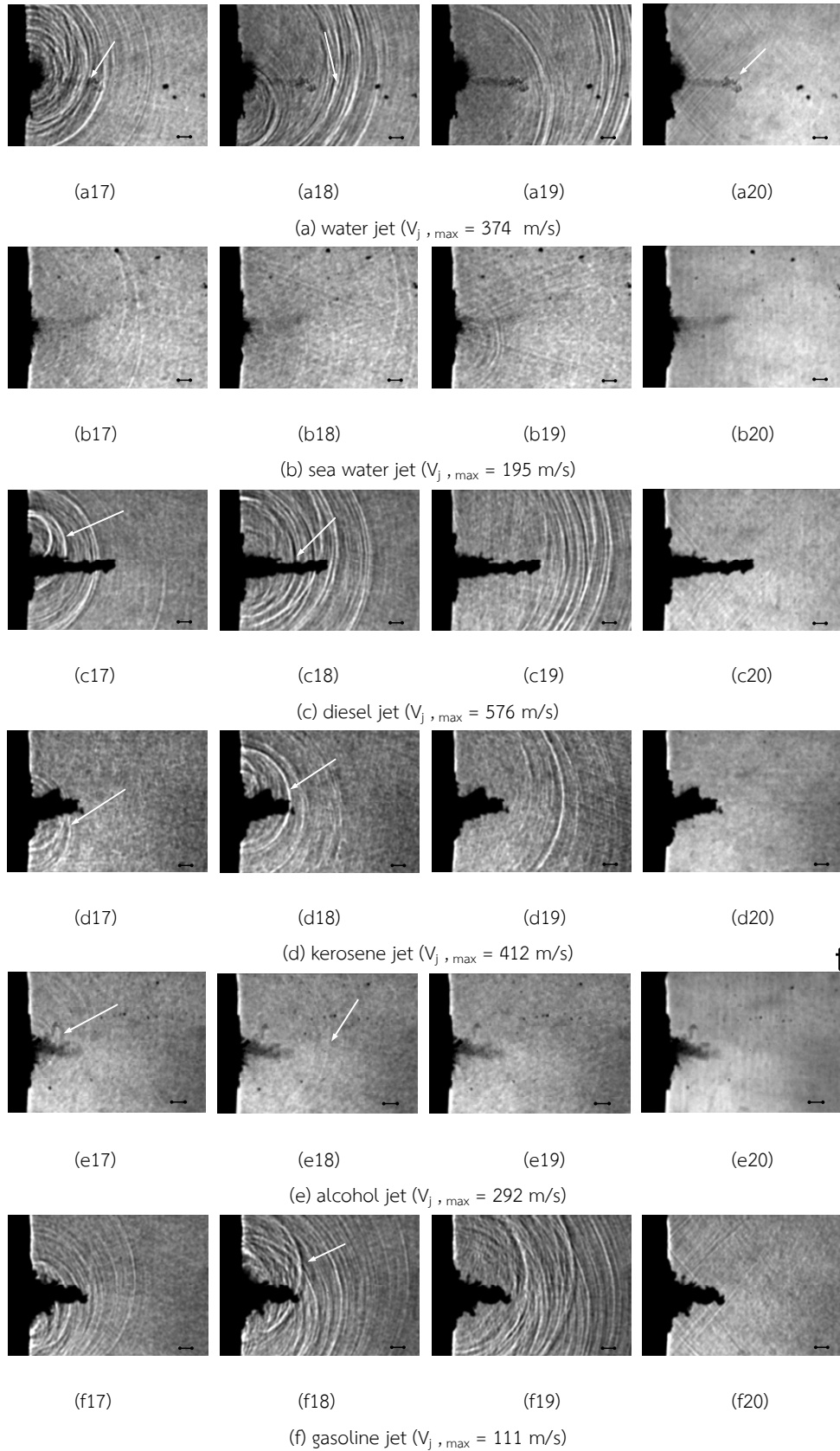
(f15)

(f16)

(f) gasoline jet ($V_{j, \max} = 111 \text{ m/s}$) $t = 5900 \mu\text{s}$

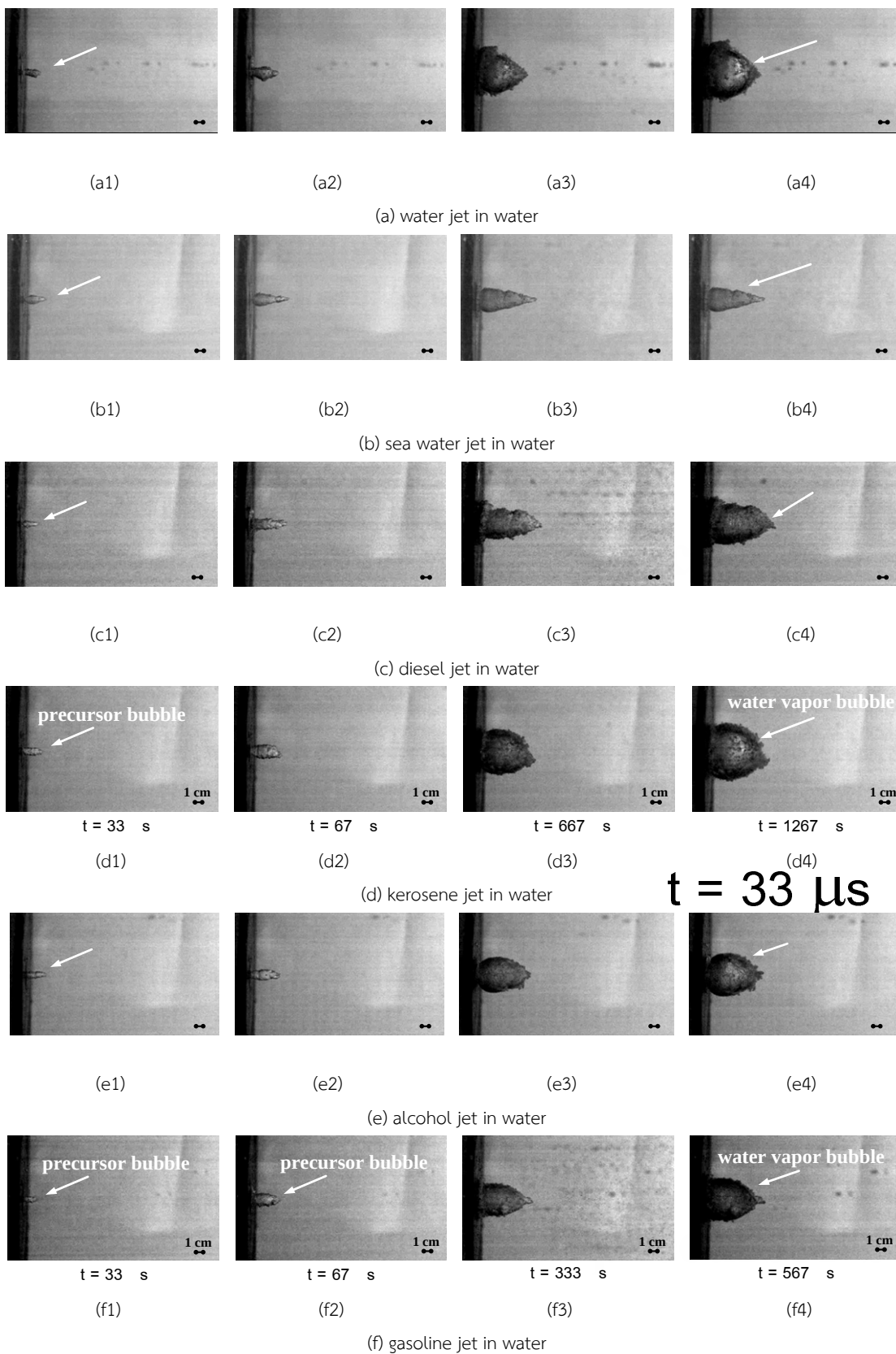
รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิดเมื่อฉีดในน้ำ (ต่อ)

 $t = 5700 \mu\text{s}$



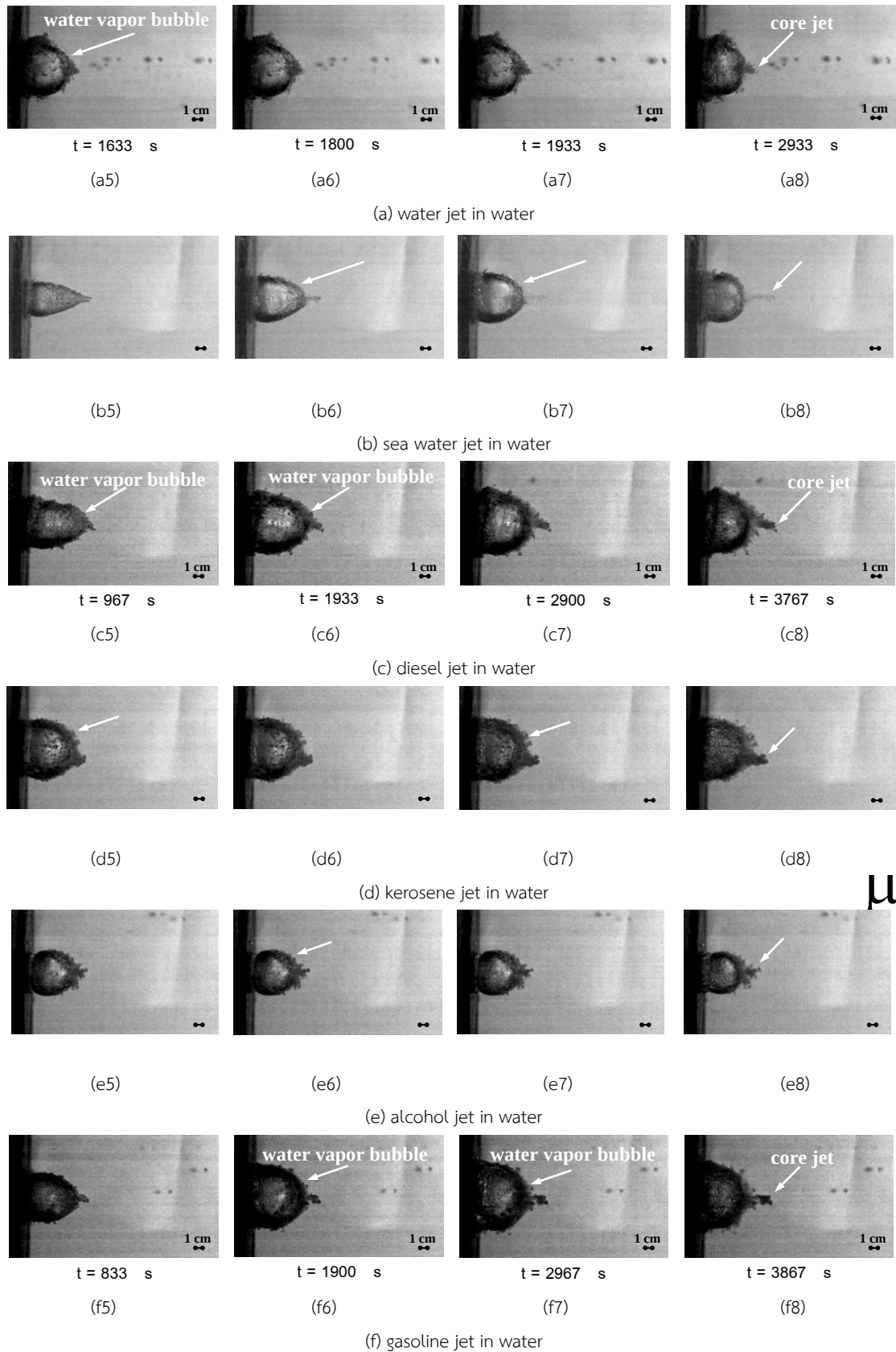
รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิดเมื่อฉีดในน้ำ (ต่อ)

รูปที่ 4.16 แสดงภาพถ่ายด้วยเทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิดเมื่อฉีดในน้ำ เมื่อพิจารณาเวลาเท่ากับ 33 - 67 μs พบ shock wave ในน้ำที่เกิดขึ้นจากลำพุ่งที่ฉีดออกมาจากหัวฉีดของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิดอย่างเห็นได้ชัด จากนั้นการอธิบายเปรียบเทียบลักษณะหรือพฤติกรรมที่เกิดขึ้นของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิดจะทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกันถึงแม้ว่าเวลาที่เกิดขึ้นของแต่ละลำพุ่งจะไม่เท่ากับก็ตาม เมื่อพิจารณารูปที่ 4.16(a3-f3) - 4.16(a4-f4) จะสังเกตเห็น water vapor bubble ที่เกิดจากลำพุ่งทั้ง 6 ชนิดจะมีลักษณะกลมคล้ายกัน ยกเว้นที่เกิดจากลำพุ่งน้ำมันก๊าด ซึ่งจะมีลักษณะเรียวยาวแหลมกว่าชนิดอื่นและ bubble จะขยายตัวในแนวนอนได้ไกลสุดดังรูปที่ 4.16(a5-f5) ซึ่งเมื่อพิจารณาที่เวลาจะพบว่า bubble ที่เกิดจากลำพุ่งน้ำทะเลจะใช้เวลาในการขยายตัวในแนวนอนน้อยที่สุดที่เวลา 1,067 μs หรือมีความเร็วในการขยายตัวในแนวนอนเร็วที่สุดในขณะที่ลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซลีนใช้เวลามากที่สุดที่เวลา 1,700 μs หรือมีความเร็วในการขยายตัวในแนวนอนช้าที่สุด จากนั้น bubble ทั้ง 6 ชนิดจะยุบตัวลงในแนวนอนดังรูปที่ 4.16(a6-f6) แต่จะยังคงขยายตัวในแนวตั้ง และขยายตัวใหญ่ที่สุดดังรูปที่ 4.16(a7-f7) ซึ่งพบว่า ลำพุ่งน้ำมันดีเซลกลับใช้เวลาในการขยายตัวในแนวตั้งน้อยที่สุดคือที่เวลา 1,833 μs หรือมีความเร็วในการขยายตัวในแนวตั้งเร็วที่สุดในขณะที่ลำพุ่งน้ำทะเลกลับใช้เวลามากที่สุดคือ 2,733 μs หรือความเร็วในการขยายตัวในแนวตั้งช้าที่สุด จากนั้น bubble ของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิดก็จะยุบตัวทั้งแนวนอนและแนวตั้งดังรูปที่ 4.16(a8-f8) - 4.16(a10-f10) โดยจะยุบตัวให้มีขนาดต่ำสุดในรูปที่ 4.16(a11-f11) ของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด โดยลำพุ่งดีเซลมีขนาดของ bubble เล็กที่สุดก่อน bubble ชนิดอื่นคือเกิดขึ้นที่เวลา 4,666 μs หรือความเร็วในการยุบตัวเร็วที่สุด ในขณะที่ bubble ของลำพุ่งน้ำเกิดขึ้นช้าที่สุดคือที่เวลา 5,433 μs หรือความเร็วในการยุบตัวช้าที่สุด และจากรูปนี้ยังสังเกตเห็นการเกิด rebound shock wave และ compressed wave นอกจากนี้ยังสังเกตเห็น core jet อย่างชัดเจนสำหรับลำพุ่งน้ำมันดีเซล น้ำมันก๊าด แอลกอฮอล์และน้ำมันแก๊สโซลีน เนื่องจากความหนาแน่นของลำพุ่งดังกล่าวทั้ง 4 ชนิดไม่เท่ากับ ความหนาแน่นของของเหลว (น้ำ) ที่บรรจุในห้องทดสอบ เมื่อใช้การถ่ายภาพด้วยเทคนิค Shadowgraph ในขณะที่ core jet ของลำพุ่งน้ำและน้ำทะเลไม่สามารถสังเกตเห็นได้ นอกจากนี้ยังพบว่า core jet ของลำพุ่งน้ำมันมีความยาวมากที่สุดเมื่อเทียบกับลำพุ่งชนิดอื่น จากนั้น bubble ของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิดก็จะแสดงพฤติกรรมการขยายตัวและยุบตัวของ bubble อีกครั้งเช่นเดียวกับที่กล่าวไว้แล้วดังรูปที่ 4.16(a12-f12) - 4.16(a16-f16) ซึ่งจะสามารถสังเกตได้จาก compressed wave และ rebound shock wave ที่เกิดขึ้นอีกครั้งดังในรูปที่ 4.16(a17-f17) - 4.16(a20-f20) ซึ่งพบว่าลำพุ่งน้ำมันก๊าดจะเกิดพฤติกรรมต่างๆ ได้เร็วที่สุดคือจะใช้เวลาเพียง 7,000 μs ในขณะที่ลำพุ่งแอลกอฮอล์เกิดได้ช้าที่สุดคือใช้เวลาทั้งสิ้น 7,567 μs

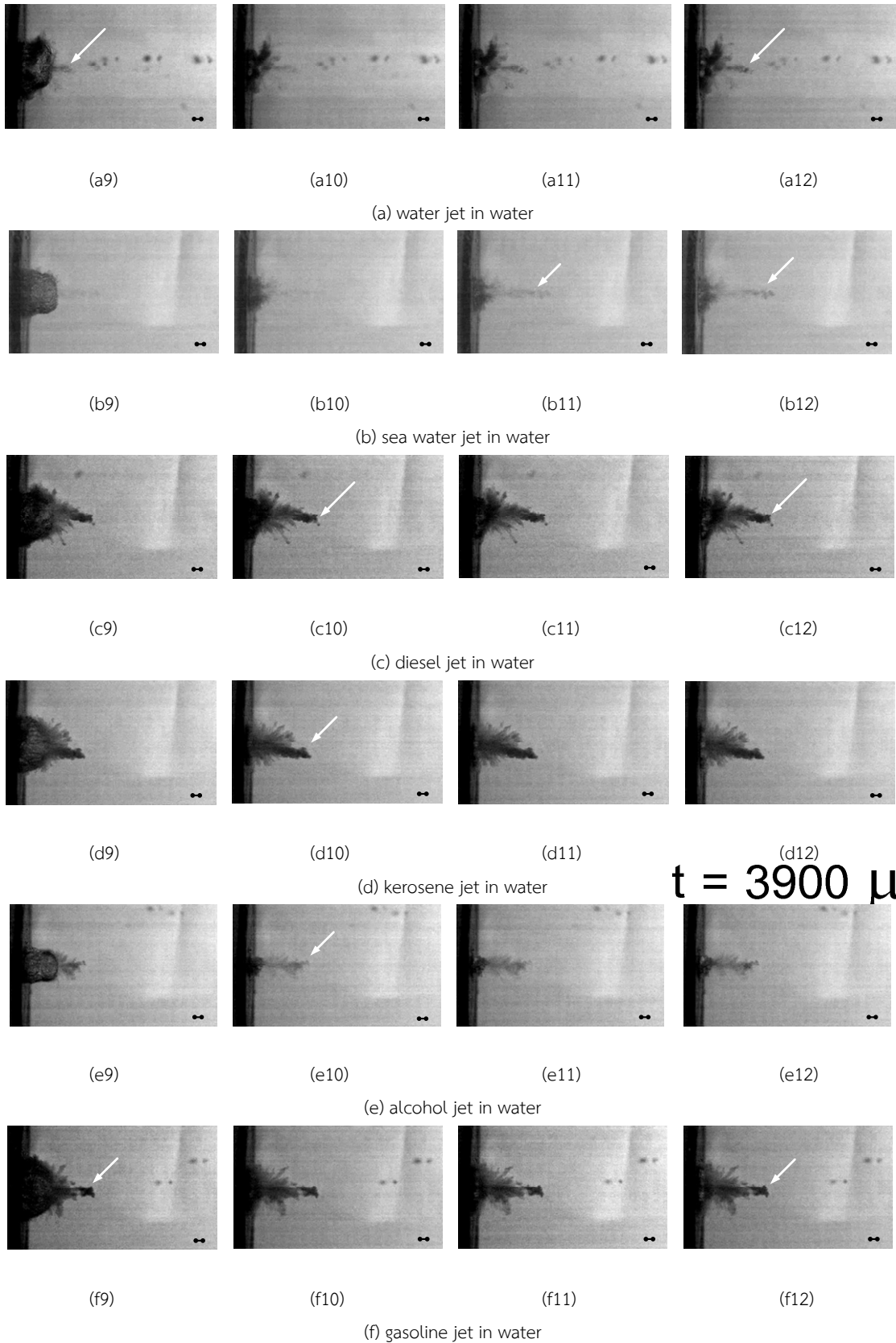


รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายโดยไม่ใช่เทคนิค shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิดเมื่อฉีดในน้ำ

t = 33 μ s

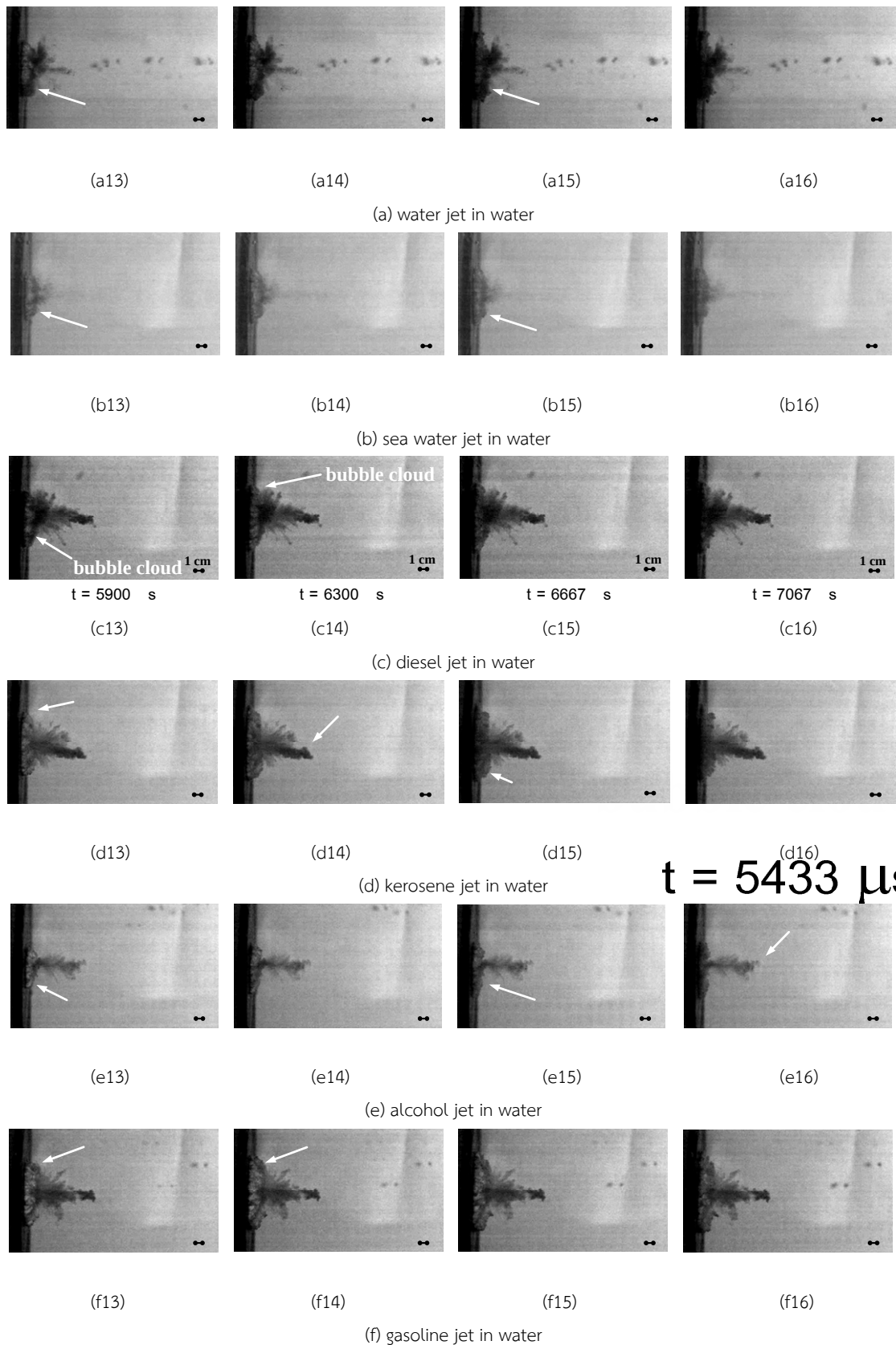


รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายโดยไม่ใช้เทคนิค shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิดเมื่อฉีดในน้ำ (ต่อ)



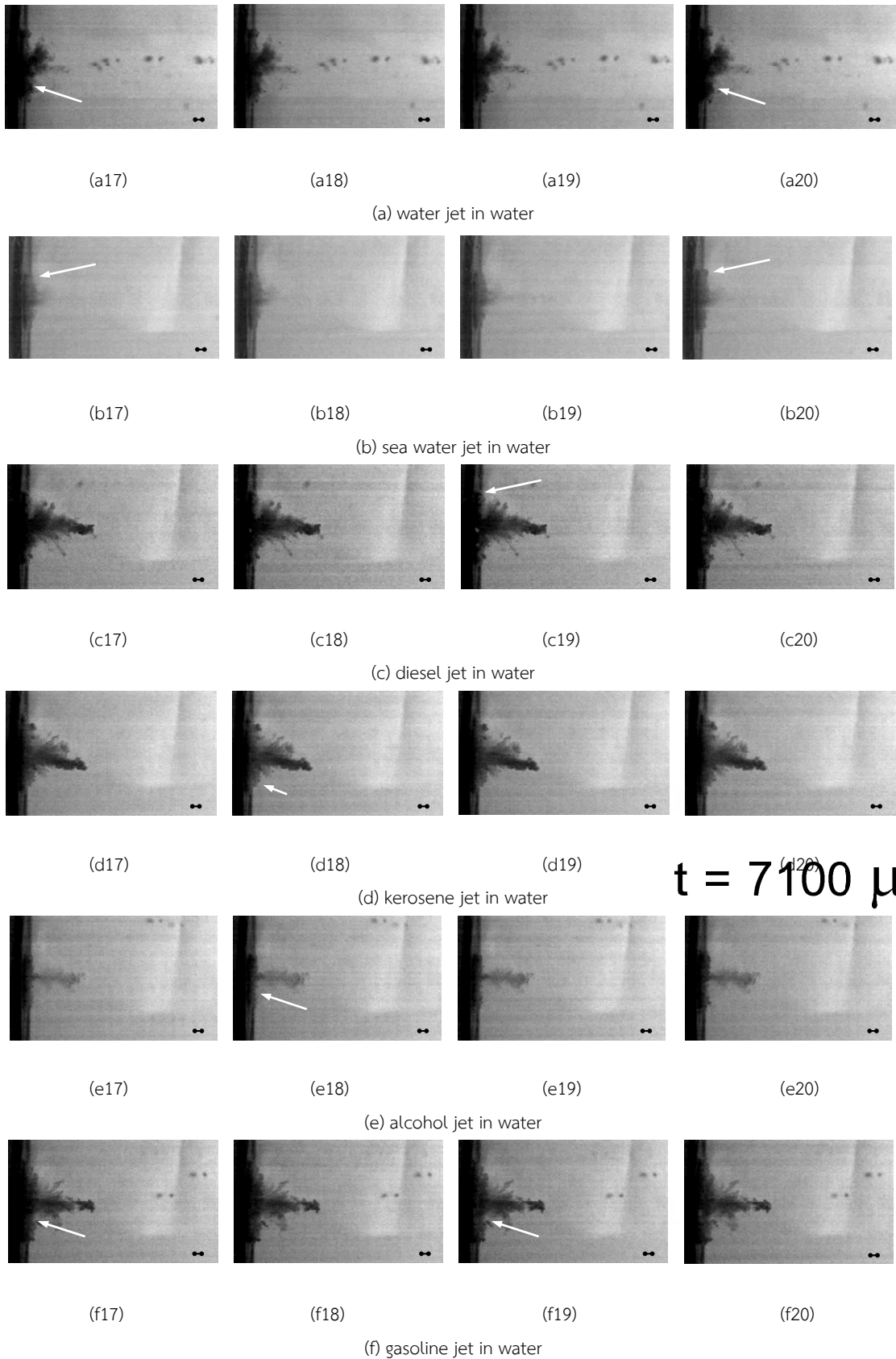
รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายโดยไม่ใช่เทคนิค shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิดเมื่อฉีดในน้ำ (ต่อ)

$$t = 3733 \mu s$$



รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายโดยไม่ใช่เทคนิค shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิดเมื่อฉีดในน้ำ (ต่อ)

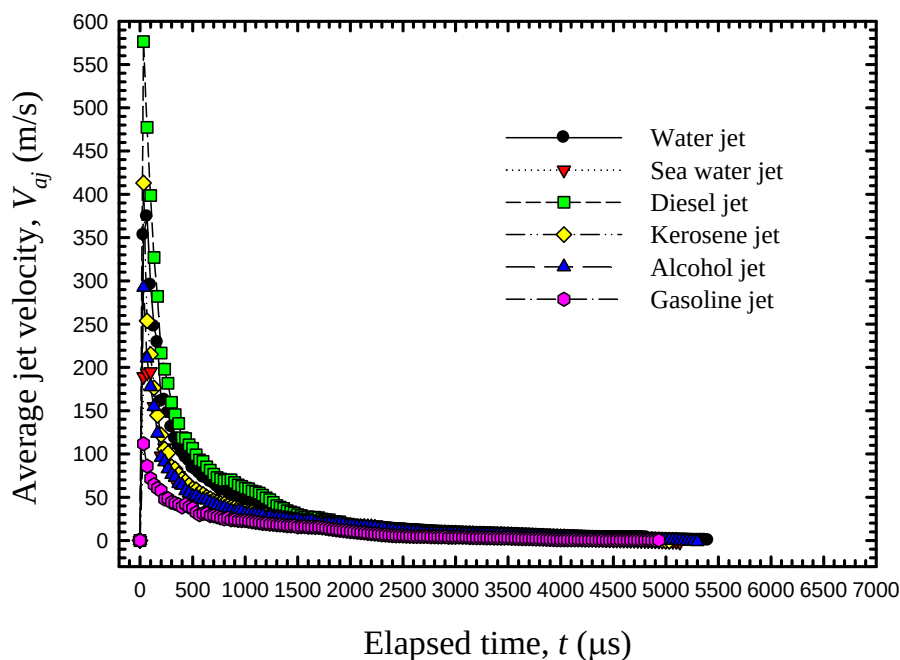
t = 5100 μ s



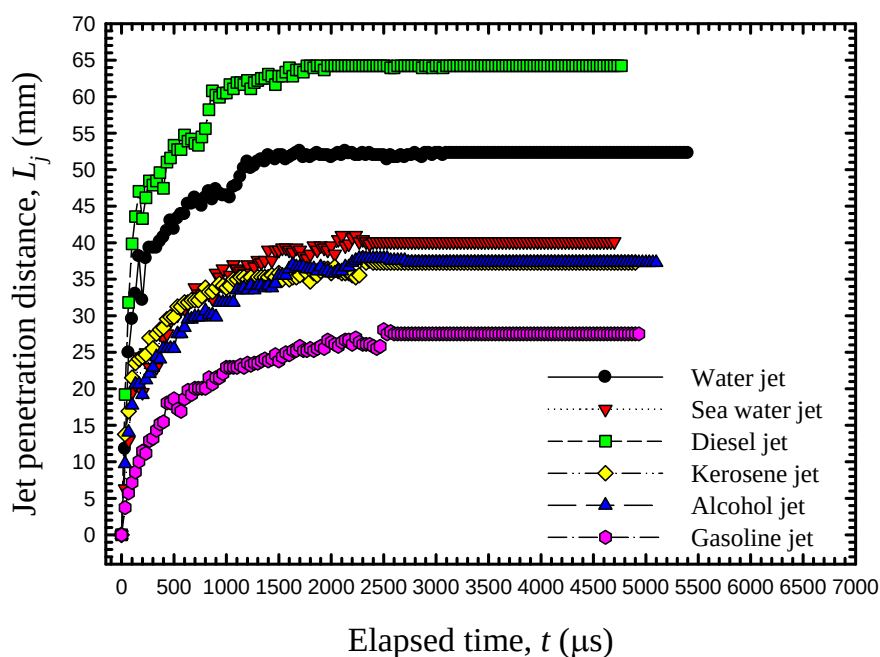
รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายโดยไม่ใช้เทคนิค shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิดเมื่อฉีดในน้ำ (ต่อ)

จากรูปที่ 4.17 แสดงภาพถ่ายโดยไม่ใช้เทคนิค shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิดเมื่อฉีดในน้ำ ถึงแม้ว่าเวลาที่เกิดขึ้นในแต่ละพฤติกรรมของลำพุ่งในรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 จะไม่เท่ากันก็ตาม แต่รูปที่ 4.17 มีประโยชน์ในการช่วยให้เห็นพฤติกรรมที่การขยายตัวและยุบตัวของ bubble ที่ไม่ชัดเจนจากภาพถ่ายแบบ Shadowgraph ทั้งนี้ภาพแต่ละภาพ เช่น รูปที่ 4.17(a1) ก็จะสามารถคล้อยกับรูปที่ 4.16(a1) เป็นเช่นนี้ทุก ๆ ภาพ

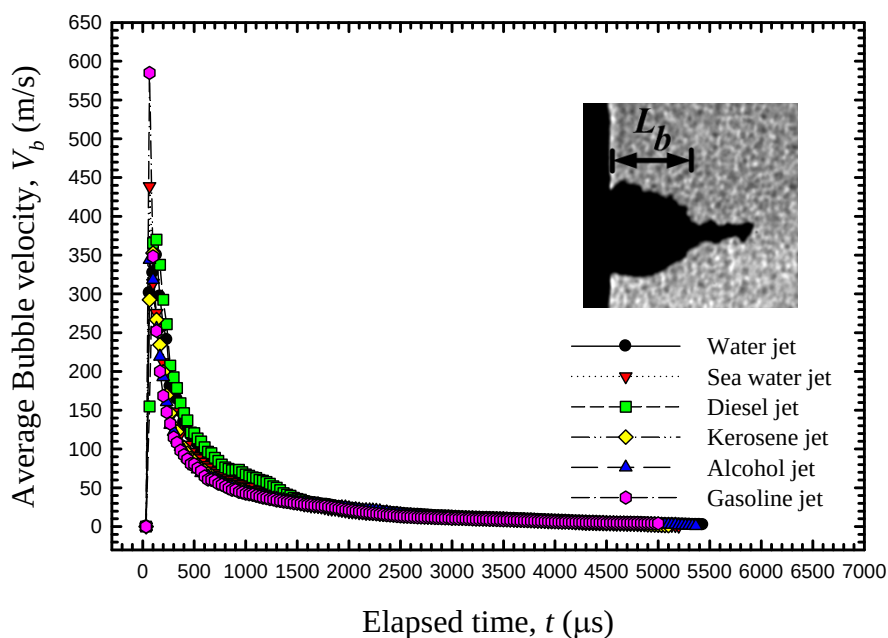
รูปที่ 4.18 ความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่งในน้ำ (average jet velocity in water) ทั้ง 6 ชนิดพบว่า ความเร็วเฉลี่ยสูงสุดของลำพุ่งน้ำมันดีเซลมีความเร็วสูงที่สุด รองลงมาคือ น้ำมันก๊าด, น้ำ, แอลกอฮอล์, น้ำทะเล และน้ำมันแก๊สโซลีน ตามลำดับ โดยมีความเร็วเท่ากับ 576.41 m/s, 412.95 m/s, 374.24 m/s, 292.51 m/s, 195.00 m/s และ 111.84 m/s ตามลำดับ โดยมีความเร็วสูงสุดที่เวลา 33 μ s จากนั้นความเร็วของลำพุ่งจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาผ่านไปเนื่องจาก hydrodynamic drag จากการพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิดจากตารางที่ 4.1 พบว่า ความเร็วเฉลี่ยสูงสุดของลำพุ่งจะมีความสัมพันธ์กับความหนืดจลน์ (Kinematics viscosity) คือ เมื่อความหนืดจลน์สูงขึ้นความเร็วเฉลี่ยสูงสุดก็จะมีค่าสูงขึ้น ถึงแม้ว่าลำพุ่งแอลกอฮอล์จะให้ผลที่ไม่เป็นไปตามความสัมพันธ์แต่ก็มีแนวโน้มที่สอดคล้องกับความสัมพันธ์ดังกล่าว จึงส่งผลกับระยะการเคลื่อนที่ของลำพุ่งสูงสุดของ น้ำ, น้ำทะเล, น้ำมันดีเซล, น้ำมันก๊าด, แอลกอฮอล์และน้ำมันแก๊สโซลีนตามลำดับ โดยมีค่าเท่ากับ 52.54 mm, 41.00 mm, 54.23 mm, 37.85 mm, 37.85mm และ 28.10 mm ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.18 ความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่งในน้ำ (average jet velocity in water) ทั้ง 6 ชนิด



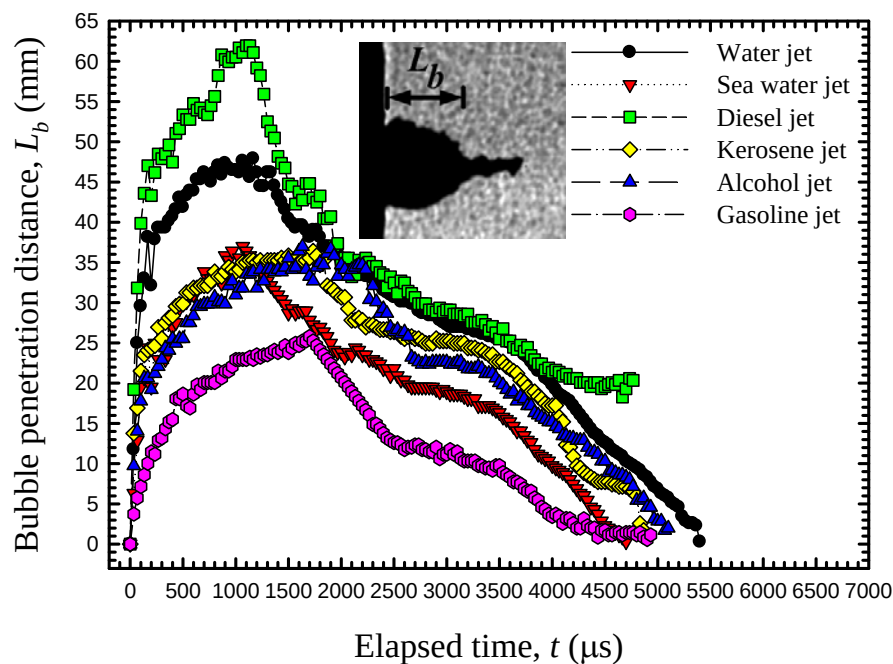
รูปที่ 4.19 ระยะการเคลื่อนที่ของลำพ่นในน้ำ (jet penetration distance in water) ทั้ง 6 ชนิด



รูปที่ 4.20 ความเร็วเฉลี่ยของ bubble (average bubble velocity) ที่เกิดจากลำพ่นทั้ง 6 ชนิด

จากรูปที่ 4.20 แสดงความเร็วเฉลี่ยของ bubble (average bubble velocity) ที่เกิดจากลำพ่นทั้ง 6 ชนิด พบว่า ความเร็วเฉลี่ยสูงสุดของ bubble ที่เกิดจากลำพ่นน้ำมันแก๊สโซลีนมีความเร็วสูง

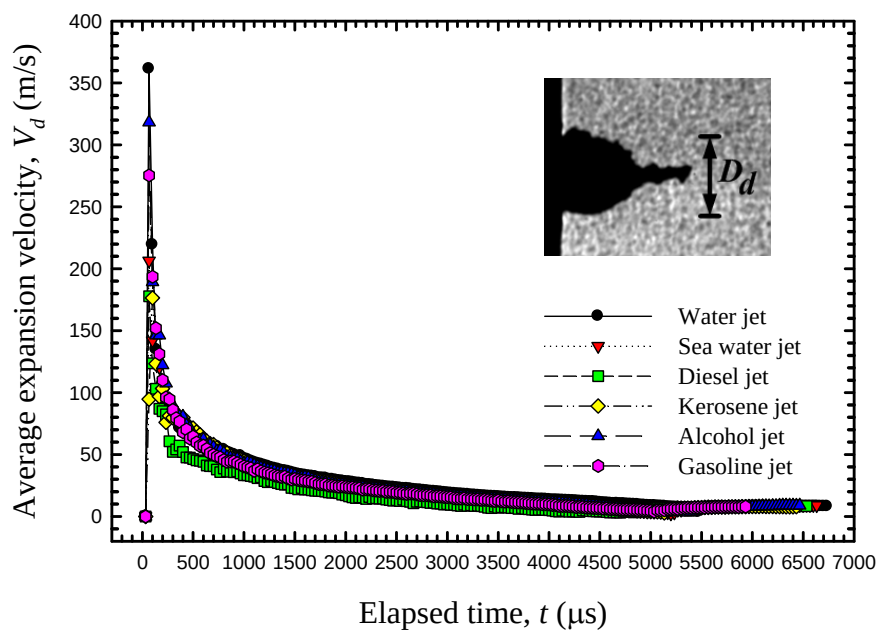
ที่สุด รองลงมาคือ น้ำทะเล, น้ำมันดีเซล, น้ำมันก๊าด, น้ำ และแอลกอฮอล์ ตามลำดับ โดยมีความเร็วอยู่ที่ 585.02 m/s, 438.76 m/s, 369.94 m/s, 352.73 m/s และ 344.13 m/s ตามลำดับ จากการพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพของลำพ่นทั้ง 6 ชนิดจากตารางที่ 4.1 พบว่า ความเร็วเฉลี่ยสูงสุดของลำพ่นจะมีความสัมพันธ์กับความตึงผิว (surface tension) คือ เมื่อความตึงผิวสูงขึ้นความเร็วเฉลี่ยก็จะมีค่าต่ำลง ถึงแม้ว่าลำพ่นน้ำทะเลและแอลกอฮอล์จะให้ผลที่ไม่เป็นไปตามความสัมพันธ์แต่ก็มีแนวโน้มที่สอดคล้องกับความสัมพันธ์ดังกล่าว จากนั้น bubble ก็จะถูกตัวลงเนื่องจากความดันภายใน bubble มีความดันต่ำลงและมีค่าต่ำกว่าความดันในห้องทดสอบ จากการพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพของลำพ่นทั้ง 6 ชนิดจากตารางที่ 4.1 พบว่า ความเร็วในการขยายตัวของ bubble ที่เกิดจากลำพ่นจะมีความสัมพันธ์กับความตึงผิว (surface tension) คือ เมื่อความตึงผิวลดลงความเร็วเฉลี่ยในการขยายตัวของ bubble ที่เกิดจากลำพ่นจะมีค่าสูงขึ้น ถึงแม้ว่า bubble ที่เกิดจากลำพ่นแอลกอฮอล์และน้ำทะเลจะให้ผลที่ไม่เป็นไปตามความสัมพันธ์แต่ก็มีแนวโน้มที่สอดคล้องกับความสัมพันธ์ดังกล่าว



รูปที่ 4.21 ระยะการเคลื่อนที่ของ bubble (bubble penetration distance; L_b) ที่เกิดจากลำพ่นทั้ง 6 ชนิด

จากรูปที่ 4.21 แสดงระยะการเคลื่อนที่ของ bubble (bubble penetration distance; L_b) ที่เกิดจากลำพ่นทั้ง 6 ชนิด พบว่า bubble ที่เกิดจากของลำพ่นน้ำ, น้ำทะเล, น้ำมันดีเซล, น้ำมันก๊าด, แอลกอฮอล์ และน้ำมันแก๊สโซลีน จะค่อยๆ เคลื่อนที่ไปข้างหน้า โดยระยะการเคลื่อนที่ของ bubble สูงสุดเกิดขึ้นที่เวลา 1,167 μ s, 1,067 μ s, 1,100 μ s, 1,500 μ s, 1,633 μ s และ 1,700 μ s ตามลำดับ ซึ่งระยะการเคลื่อนที่สูงสุดเท่ากับ 47.88 mm, 36.99 mm, 61.93 mm, 35.48 mm, 36.99 mm

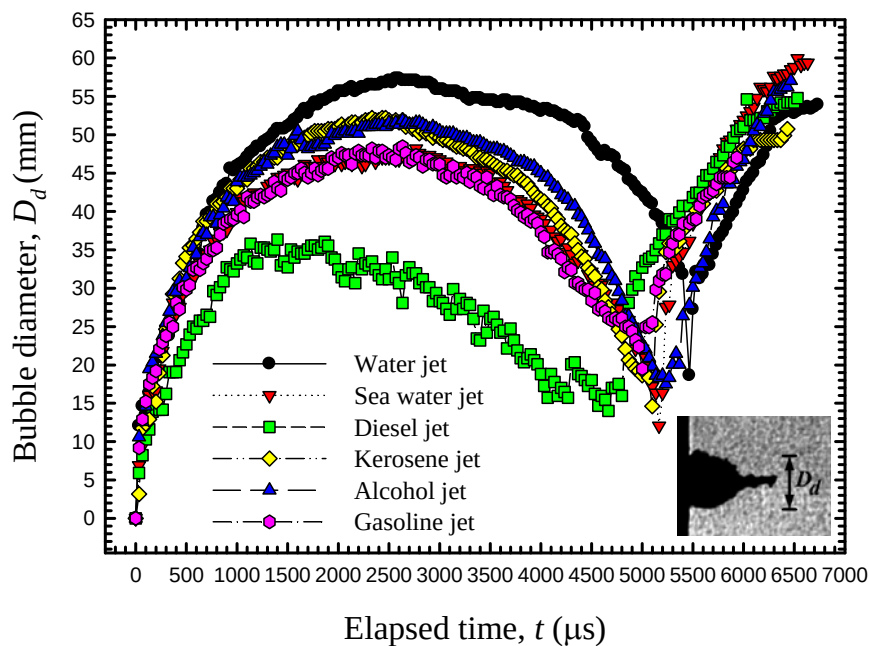
และ 25.80 mm ตามลำดับ หลังจากนั้น bubble จะค่อยๆ ยุบตัวลงจนถึงระยะต่ำสุด โดยพบว่า ระยะการเคลื่อนที่ของ bubble ที่เกิดจากลำพ่นน้ำมันดีเซลเคลื่อนที่ได้ไกลสุด รองลงมาคือ น้ำ, น้ำทะเลกับแอลกอฮอล์มีค่าเท่ากัน, น้ำมันก๊าด และน้ำมันแก๊สโซลีน ตามลำดับ จากการพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพของลำพ่นทั้ง 6 ชนิดจากตารางที่ 4.1 พบว่า ระยะการเคลื่อนที่ของ bubble ที่เกิดจากลำพ่นจะมีความสัมพันธ์กับความหนืดจลน์ (Kinematics viscosity) คือ เมื่อความหนืดจลน์สูงขึ้นระยะทางในการเคลื่อนที่ไกลขึ้น ถึงแม้ว่าลำพ่นน้ำมันก๊าดจะให้ผลที่ไม่เป็นไปตามความสัมพันธ์ แต่ก็มีแนวโน้มที่สอดคล้องกับความสัมพันธ์ดังกล่าว ซึ่งจะพบว่า ถึงแม้ว่าความเร็วในการขยายตัวเร็วก็ไม่แสดงว่ามีระยะทางในการเคลื่อนที่ไกลที่สุดเสมอไปดังรูปที่ 4.20 และรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.22 ความเร็วเฉลี่ยในการขยายตัวของ bubble (average expansion velocity of bubble) ของลำพ่นทั้ง 6 ชนิด

จากรูปที่ 4.22 แสดงความเร็วเฉลี่ยในการขยายตัวของ bubble (average expansion velocity of bubble) ของลำพ่นทั้ง 6 ชนิด พบว่า bubble ที่เกิดจากลำพ่นน้ำมีความเร็วสูงที่สุดในการขยายตัวเร็วที่สุด โดยจะเกิดขึ้นที่เวลาเท่ากับ 33 μ s รองลงมาคือ แอลกอฮอล์, น้ำมันแก๊สโซลีน, น้ำทะเล, น้ำมันดีเซลและน้ำมันก๊าด ตามลำดับ โดยมีความเร็วเท่ากับ 361.33 m/s, 318.32 m/s, 275.30 m/s, 206.47 m/s, 177.76 m/s และ 176.36 m/s ตามลำดับ และมีความเร็วในการขยายตัวเฉลี่ยของ bubble ที่เกิดจากลำพ่นน้ำมันก๊าดสูงที่สุด รองลงมา คือ ลำพ่นน้ำ, แอลกอฮอล์, น้ำมันดีเซล, น้ำมันแก๊สโซลีน และน้ำทะเล โดยมีค่าเท่ากับ 22.36 m/s, 22.05 m/s, 19.71 m/s,

19.31 m/s, 18.40 m/s และ 17.40 m/s ตามลำดับ จากการพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพของลำฟุ้งทั้ง 6 ชนิดจากตารางที่ 4.1 พบว่า ความเร็วเฉลี่ยสูงสุดของลำฟุ้งจะมีความสัมพันธ์กับความตึงผิว (surface tension) คือ เมื่อความตึงผิวสูงขึ้นความเร็วเฉลี่ยก็จะมีค่าต่ำลง ถึงแม้ว่าลำฟุ้งน้ำและน้ำมันแก๊สโซลีนจะให้ผลที่ไม่เป็นไปตามความสัมพันธ์แต่ก็มีแนวโน้มที่สอดคล้องกับความสัมพันธ์ดังกล่าว ในขณะที่ความเร็วเฉลี่ยในการยุบตัวของ bubble ที่เกิดจากลำฟุ้งน้ำทะเลมีความเร็วสูงที่สุด รองลงมาคือ น้ำมันก๊าด, น้ำ, แอลกอฮอล์, น้ำมันแก๊สโซลีน และน้ำมันดีเซล โดยมีค่าเท่ากับ 15.05 m/s, 13.57 m/s, 13.50 m/s, 13.23 m/s, 12.23 m/s และ 6.84 m/s ตามลำดับ

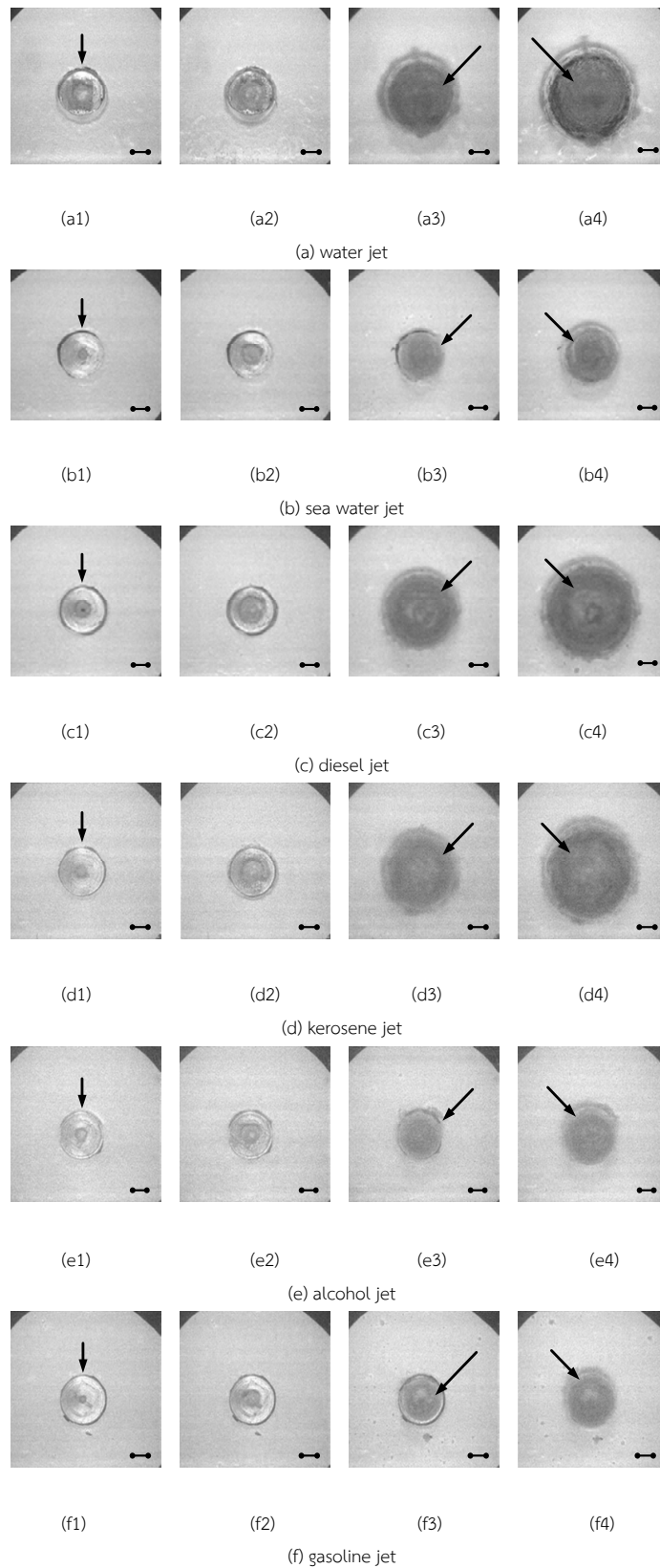


รูปที่ 4.23 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble (bubble diameter; D_d) ของลำฟุ้งทั้ง 6 ชนิด

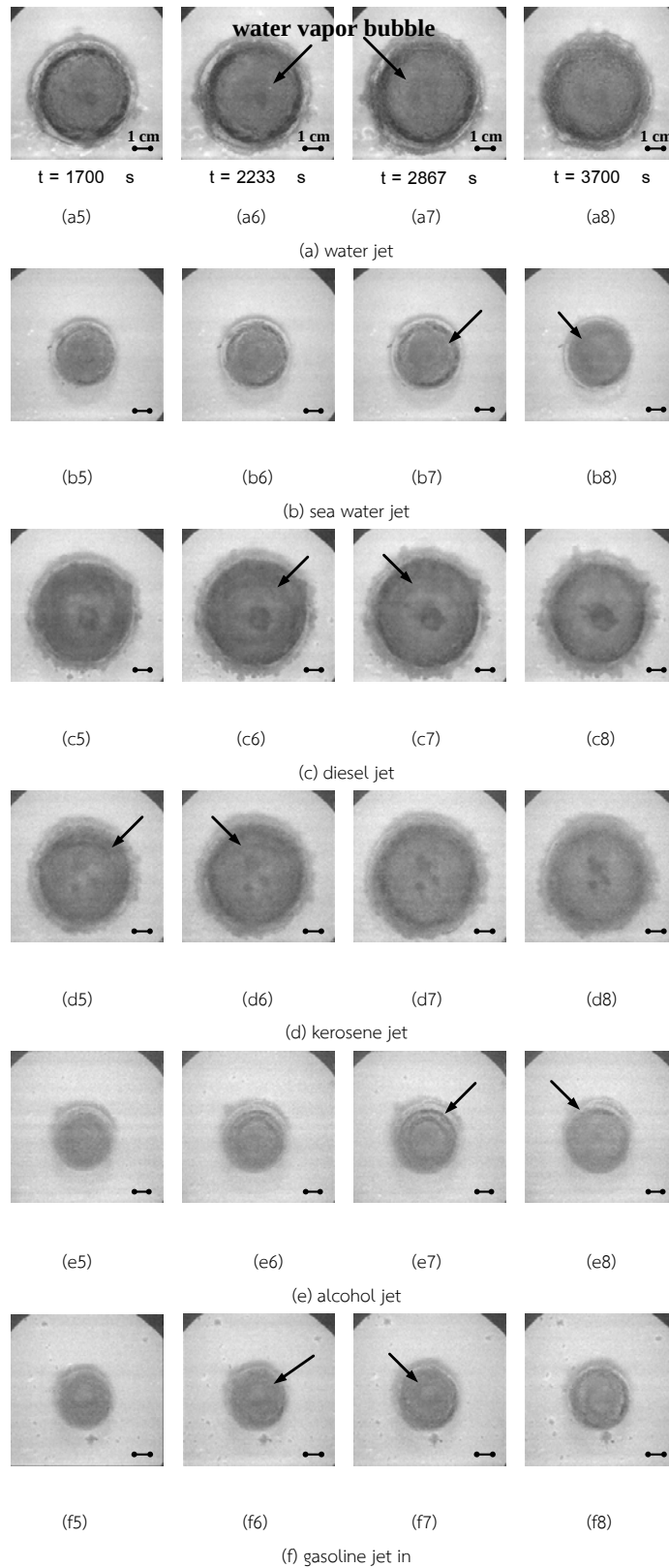
จากรูปที่ 4.23 แสดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble (bubble diameter; D_d) ของลำฟุ้งทั้ง 6 ชนิด พบว่า เส้นผ่าศูนย์กลาง bubble ที่กว้างที่สุดเกิดจากลำฟุ้งน้ำ รองลงมาคือ น้ำมันก๊าด, แอลกอฮอล์, น้ำมันแก๊สโซลีน, น้ำทะเล และน้ำมันดีเซลจะขยายตัวสูงสุดที่เวลา 2,567 μ s, 2,333 μ s, 2,633 μ s, 2,633 μ s, 2,600 μ s และ 1,867 μ s ตามลำดับ โดยมีขนาดใหญ่สุดเท่ากับ 57.34 mm, 52.18 mm, 51.90 mm, 48.17 mm, 48.46 mm และ 36.32 mm ตามลำดับ จากการพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพของลำฟุ้งทั้ง 6 ชนิดจากตารางที่ 4.1 พบว่า ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะมีความสัมพันธ์กับความตึงผิว (surface tension) คือ เมื่อความตึงผิวสูงขึ้นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ก็จะมีค่าต่ำลง ถึงแม้ว่าลำฟุ้งน้ำจะให้ผลที่ไม่เป็นไปตามความสัมพันธ์แต่ก็มีแนวโน้มที่สอดคล้องกับความสัมพันธ์ดังกล่าว จากนั้น bubble จะยุบตัวลงและจะเริ่มขยายตัวอีกครั้งที่เวลา 5,500 μ s, 5,167 μ s, 4,667 μ s, 5,100 μ s, 5,233 μ s และ 5,000 μ s ตามลำดับ โดย

พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ bubble ของลำพ่นน้ำมีขนาดใหญ่ที่สุด รองลงมาคือ น้ำมันก๊าด, แอลกอฮอล์, น้ำมันแก๊สโซลีน, น้ำทะเลและน้ำมันดีเซล ตามลำดับ จากการพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพของลำพ่นทั้ง 6 ชนิดจากตารางที่ 4.1 พบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ bubble ที่เกิดจากลำพ่นมีความสัมพันธ์กับความตึงผิว (surface tension) คือ เมื่อตึงผิวลดต่ำลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ bubble ที่เกิดจากลำพ่นจะมีขนาดต่ำลง ถึงแม้ว่า bubble ที่เกิดจากลำพ่นดีเซลและน้ำทะเลจะให้ผลที่ไม่เป็นไปตามความสัมพันธ์แต่ก็มีแนวโน้มที่สอดคล้องกับความสัมพันธ์ดังกล่าว

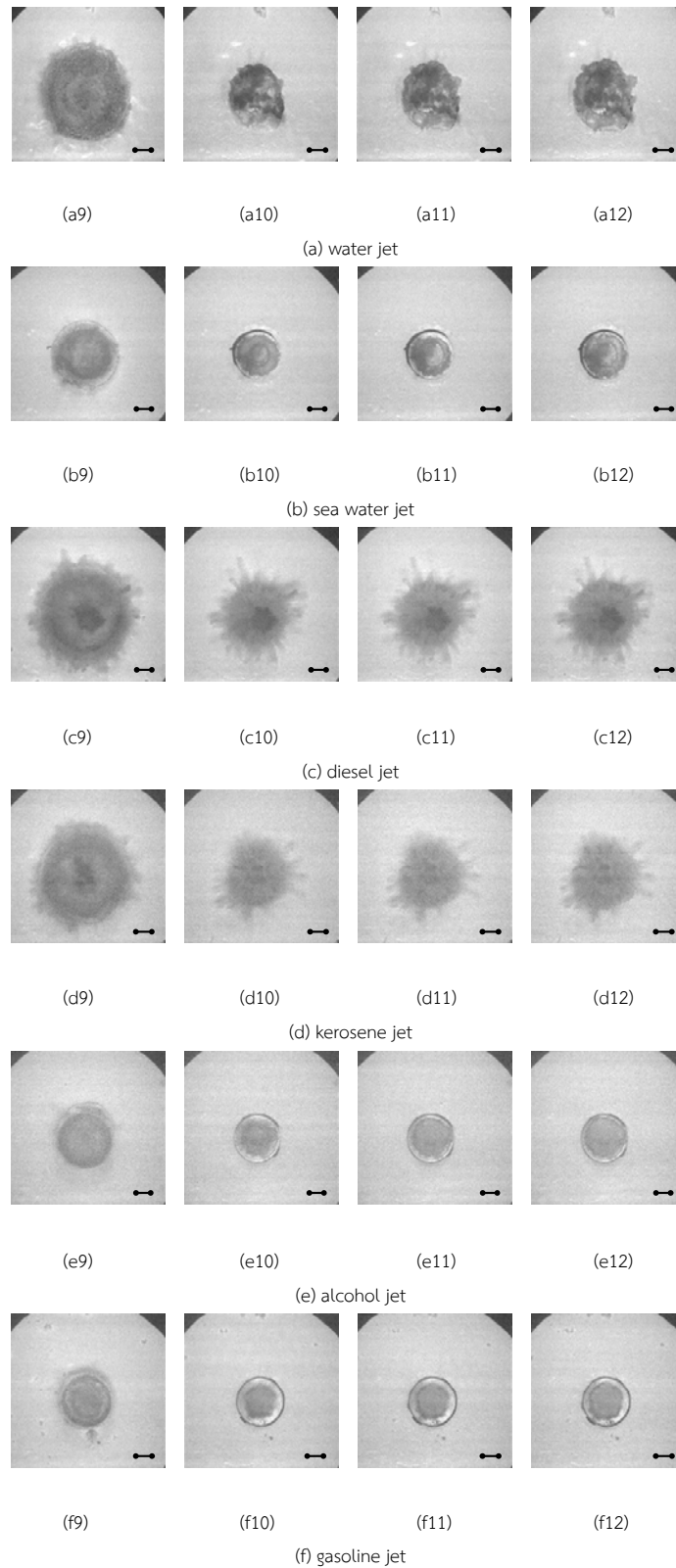
นอกจากการอธิบายคุณลักษณะของลำพ่นที่เกิดขึ้นจากการถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูงในมุมมองปกติโดยใช้และไม่ใช้เทคนิคการถ่ายภาพ Shadowgraph ดังที่กล่าวมาแล้ว ยังทำการถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูงในมุมมองในแนวแกนโดยไม่ใช้เทคนิคการถ่ายภาพ Shadowgraph เพื่อช่วยอธิบายคุณลักษณะของลำพ่นความเร็วสูงเมื่อฉีดในน้ำจากของเหลวทั้ง 6 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 4.24 จากภาพพบว่า ที่เวลาเท่ากับ 33-67 μs (รูปที่ 4.24(a1-f1) และ 4.24(a2-f2)) bubble ซึ่งเกิดจากของลำพ่นทั้ง 6 ชนิดจะมีลักษณะที่คล้ายกัน คือ เป็นลักษณะกลมเกือบสมมาตร และเมื่อพิจารณาที่รูปที่ 4.24(a3-f3) และ 4.24(a4-f4) จะสังเกตเห็น bubble ที่เป็นลักษณะกลมอย่างชัดเจน โดยที่ bubble ที่เกิดจากลำพ่นแต่ละชนิดจะมีขนาดแตกต่างกัน ซึ่ง bubble ที่เกิดจากลำพ่นน้ำ น้ำมันดีเซล และน้ำมันก๊าดจะมีขนาดใหญ่เท่าๆ กัน ขณะที่ bubble ที่เกิดจากลำพ่นน้ำทะเล แอลกอฮอล์และน้ำมันแก๊สโซลีนจะมีขนาดเล็กพอๆ กัน จากนั้น bubble ก็ขยายตัวขึ้น ดังรูปที่ 4.24(a5-f5) - 4.24(a6-f6) โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ bubble กว้างที่สุดดังรูปที่ 4.24(a7-f7) ซึ่งพบว่า ลำพ่นแอลกอฮอล์กับใช้เวลาในการขยายตัวน้อยที่สุดคือที่เวลา 1667 μs หรือมีความเร็วในการขยายตัวในแนวตั้งเร็วที่สุดถึงแม้ว่าขนาดของ bubble จะเล็กกว่า bubble ที่เกิดจากลำพ่นชนิดอื่นก็ตาม ในขณะที่ลำพ่นน้ำมันดีเซลกลับใช้เวลามากที่สุดคือ 2867 μs หรือมีความเร็วในการขยายตัวในช้าที่สุด จากนั้น bubble ของลำพ่นทั้ง 6 ชนิดก็จะยุบตัวลงดังรูปที่ 4.24(a8-f8) - 4.24(a11-f11) โดยจะยุบตัวให้มีขนาดต่ำสุดในรูปที่ 4.24(a12-f12) ของลำพ่นทั้ง 6 ชนิด โดยลำพ่นแก๊สโซลีนมีขนาดของ bubble เล็กที่สุดก่อน bubble ของลำพ่นชนิดอื่นคือเกิดขึ้นที่เวลา 3767 μs หรือความเร็วในการยุบตัวเร็วที่สุด ในขณะที่ bubble ของลำพ่นดีเซลเกิดขึ้นช้าที่สุดคือที่เวลา 6133 μs หรือความเร็วในการยุบตัวช้าที่สุด หลังจากเส้นผ่านศูนย์กลางของ bubble ลดขนาดถึงจุดต่ำสุด bubble จะแตกตัวเป็นกลุ่ม bubble (bubble cloud) ดังรูปที่ 4.24(a13-f13) - 4.24(a16-f16) และจะขยายตัวอย่างรวดเร็วเป็นลักษณะรูปวงแหวนรอบๆ หัวฉีด โดย bubble มีการยุบตัวอย่างช้าๆ ก่อนที่จะหายไปดังรูปที่ 4.24(a17-f17) - 4.24(a20-f20)



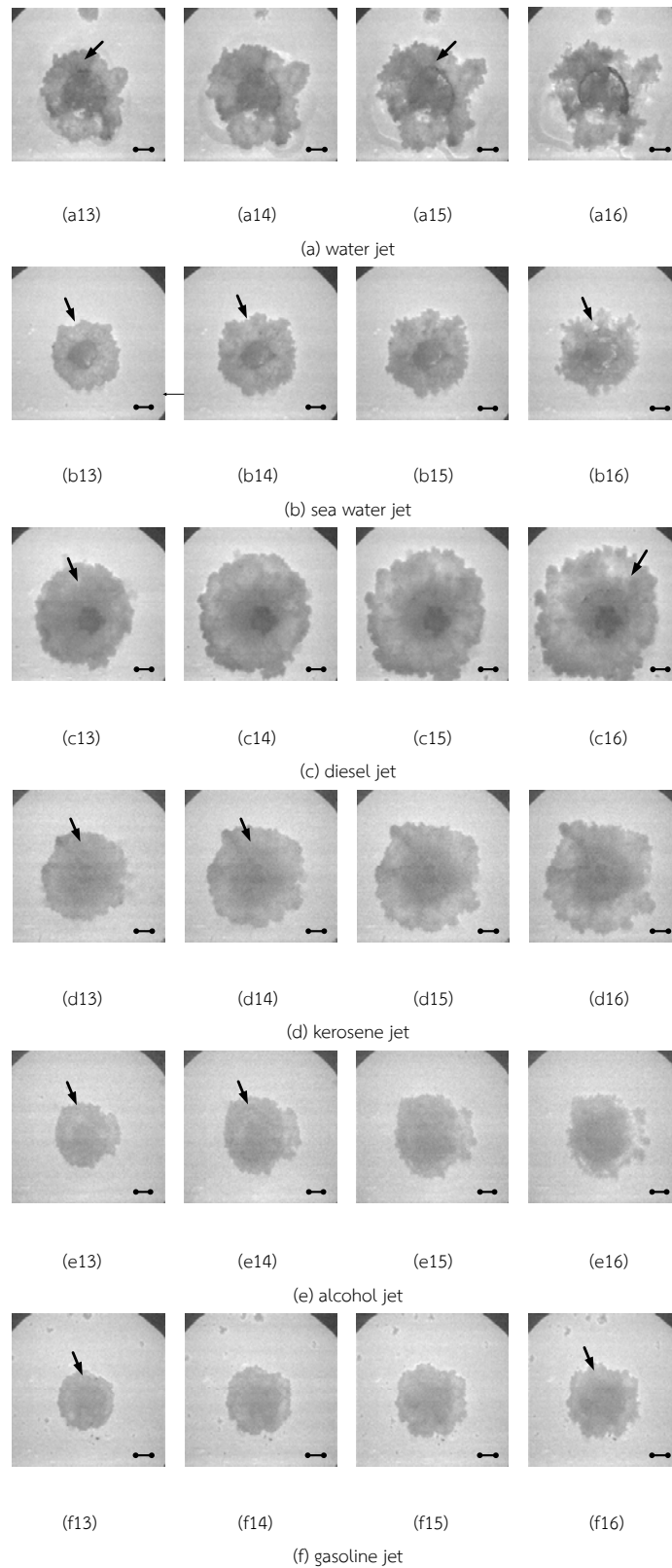
รูปที่ 4.24 ภาพถ่ายในแนวแกนโดยไม่ใช้เทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิด เมื่อฉีดในน้ำ



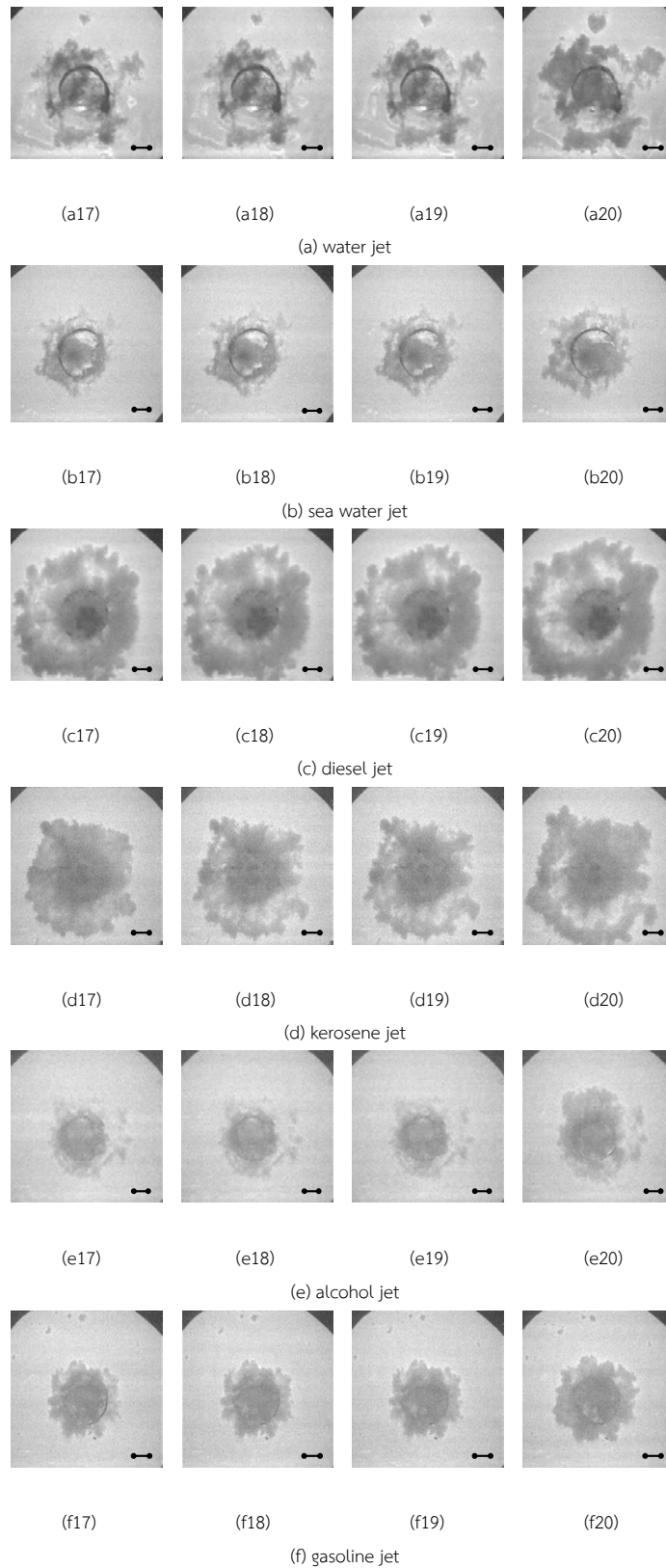
รูปที่ 4.24 ภาพถ่ายในแนวแกนโดยไม่ใช้เทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิด
เมื่อฉีดในน้ำ (ต่อ)



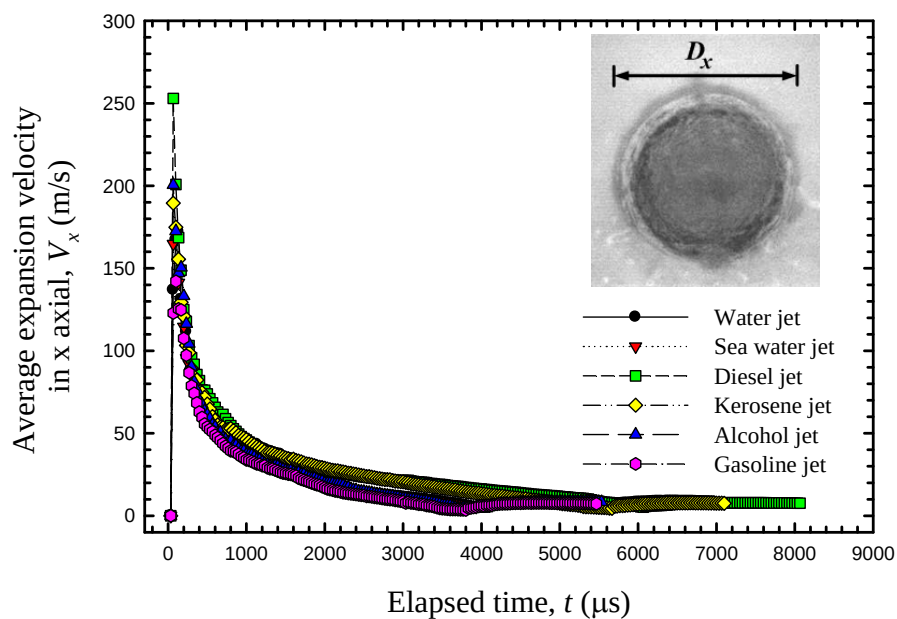
รูปที่ 4.24 ภาพถ่ายในแนวแกนโดยไม่ใช้เทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิด เมื่อฉีดในน้ำ (ต่อ)



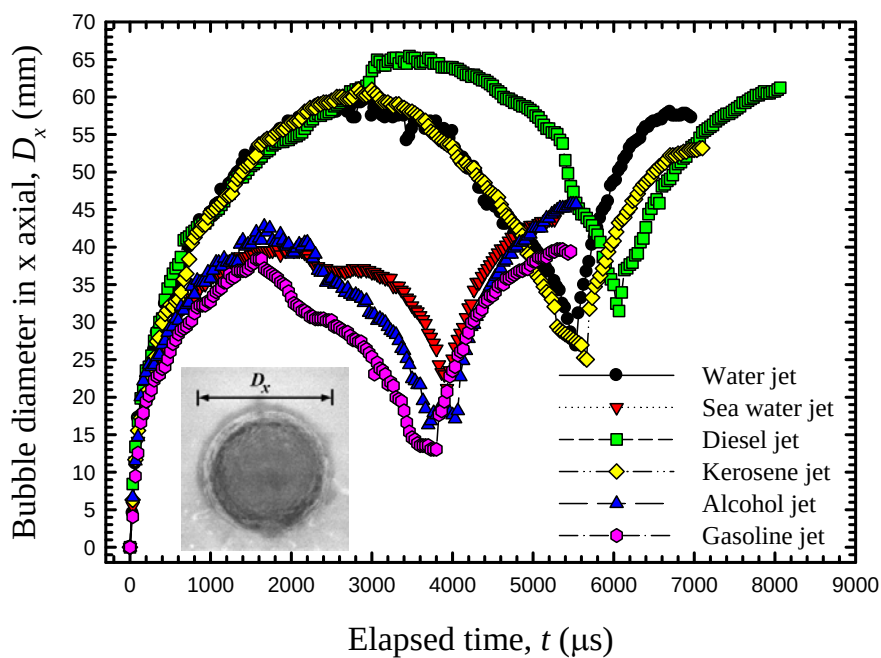
รูปที่ 4.24 ภาพถ่ายในแนวแกนโดยไม่ใช้เทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิด
เมื่อฉีดในน้ำ (ต่อ)



รูปที่ 4.24 ภาพถ่ายในแนวแกนโดยไม่ใช้เทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิด เมื่อฉีดในน้ำ (ต่อ)



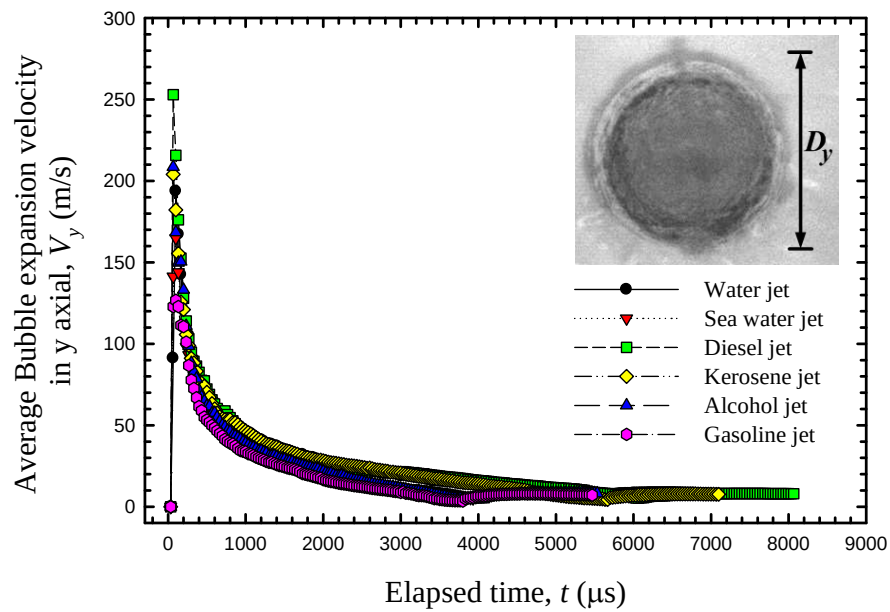
รูปที่ 4.25 ความเร็วในการขยายตัวของ bubble ในแนวนอน (average expansion velocity of bubble in x axial; V_x) ของลำพ่นทั้ง 6 ชนิด



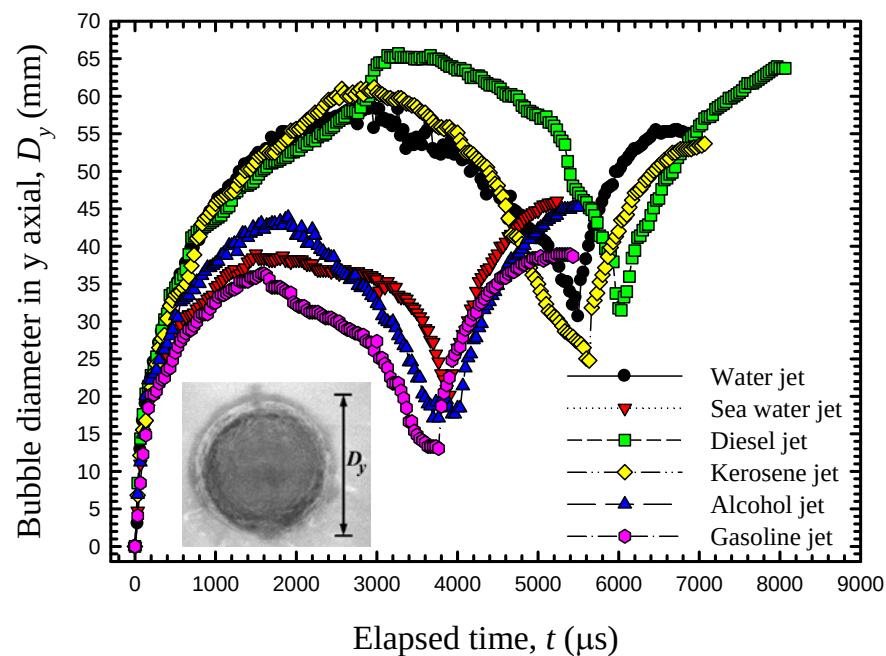
รูปที่ 4.26 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ในแนวนอน (bubble diameter in x axial; D_x) ของลำพ่นทั้ง 6 ชนิด

รูปที่ 4.25 แสดงความเร็วการขยายตัวของ bubble ในแนวนอน (average expansion velocity of bubble in x axial; V_x) ของลำพู่ทั้ง 6 ชนิด จากรูปพบว่า bubble ที่เกิดจากลำพู่ น้ำมันดีเซลมีความเร็วในการขยายตัวสูงสุด โดยจะเกิดขึ้นที่เวลาเท่ากับ 33 μs รองลงมาคือ แอลกอฮอล์, น้ำทะเล, น้ำ, น้ำมันแก๊สโซลีน และน้ำมันก๊าด ตามลำดับ โดยมีความเร็วเท่ากับ 252.88 m/s, 200.58 m/s, 172.63 m/s, 172.18 m/s, 142.04 m/s และ 89.44 m/s ตามลำดับ และมีความเร็วในการขยายตัวเฉลี่ยของ bubble ที่เกิดจากลำพู่ น้ำมันแอลกอฮอล์สูงที่สุด รองลงมา คือ น้ำมันแก๊สโซลีน น้ำทะเล น้ำ น้ำมันก๊าดและน้ำมันดีเซล โดยมีค่าเท่ากับ 26.29 m/s, 25.91 m/s, 22.49 m/s, 20.60 m/s, 20.54 m/s และ 20.16 m/s ตามลำดับ จากการพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพของลำพู่ทั้ง 6 ชนิดจากตารางที่ 4.1 พบว่า ความเร็วในการขยายตัวเฉลี่ยของ bubble ที่เกิดจากลำพู่มีความสัมพันธ์กับความตึงผิว (surface tension) คือ เมื่อความตึงผิวลดต่ำลงความเร็วในการขยายตัวของ bubble ที่เกิดจากลำพู่จะมีค่าสูงขึ้น ถึงแม้ว่า bubble ที่เกิดจากลำพู่ น้ำมันดีเซลและน้ำมันก๊าดจะให้ผลที่ไม่เป็นไปตามความสัมพันธ์แต่ก็มีแนวโน้มที่สอดคล้องกับความสัมพันธ์ดังกล่าว ในขณะที่ความเร็วเฉลี่ยในการยุบตัวของ bubble ที่เกิดจากลำพู่ น้ำมันก๊าดมีความเร็วสูงที่สุด รองลงมาคือ น้ำ, น้ำมันดีเซล, น้ำมันแก๊สโซลีน, แอลกอฮอล์ และน้ำทะเล โดยมีค่าเท่ากับ 13.48 m/s, 12.66 m/s, 12.03 m/s, 11.38 m/s, 10.69 m/s และ 8.70 m/s ตามลำดับ ด้วยเหตุผลเดียวกันกับความเร็วในการขยายตัวของ bubble ที่เกิดจากลำพู่ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

รูปที่ 4.26 แสดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ในแนวนอน (bubble diameter in x axial; D_x) ของลำพู่ทั้ง 6 ชนิด จากรูปพบว่า bubble ที่เกิดจากลำพู่จะค่อยๆ ขยายตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป โดยจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble กว้างที่สุดเกิดจากลำพู่ น้ำมันดีเซล น้ำมันก๊าด, น้ำ, แอลกอฮอล์ และน้ำมันแก๊สโซลีน ที่เวลา 3,233 μs , 2,967 μs , 2,900 μs , 1,633 μs , 1,767 μs และ 1,500 μs ตามลำดับ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ในแนวนอน (D_x) เท่ากับ 65.19 mm, 60.95 mm, 59.75 mm, 42.78 mm, 39.75 mm และ 38.87 mm ตามลำดับ จากการพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพของลำพู่ทั้ง 6 ชนิดจากตารางที่ 4.1 พบว่า ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ที่เกิดจากลำพู่มีความสัมพันธ์กับความตึงผิว (surface tension) คือ เมื่อความตึงผิวลดต่ำลงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ที่เกิดจากลำพู่จะมีค่าสูงขึ้น ถึงแม้ว่า bubble ที่เกิดจากลำพู่ น้ำและน้ำมันแก๊สโซลีนจะให้ผลที่ไม่เป็นไปตามความสัมพันธ์แต่ก็มีแนวโน้มที่สอดคล้องกับความสัมพันธ์ดังกล่าว จากนั้น bubble จะค่อยๆ ยุบตัวลง ซึ่งการยุบตัวของ bubble จนถึงขนาดต่ำสุดที่เวลา 6,000 μs , 5,467 μs , 5,600 μs , 3,867 μs , 4,000 μs และ 3,733 μs สำหรับ bubble ที่เกิดจากลำพู่ น้ำมันดีเซล น้ำ, น้ำมันก๊าด, น้ำทะเล, แอลกอฮอล์ และน้ำมันแก๊สโซลีน โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่ำสุดเท่ากับ 31.48 mm, 26.83 mm, 25.01 mm, 21.18 mm, 13.11 mm และ 13.05 mm ตามลำดับ จากนั้นเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะขยายตัวขึ้นอีกครั้ง



รูปที่ 4.27 ความเร็วในการขยายตัวของ bubble ในแนวตั้ง (average expansion velocity of bubble in y axial D_y) ของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด



รูปที่ 4.28 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ในแนวตั้ง (bubble diameter in y axial; D_y) ของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด

รูปที่ 4.27 แสดงความเร็วในการขยายตัวของ bubble ในแนวตั้ง (average expansion velocity of bubble in y axial D_y) ของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด จากรูปพบว่า bubble ที่เกิดจากลำพุ่งน้ำมันดีเซลมีความเร็วในการขยายตัวสูงสุด โดยจะเกิดขึ้นที่เวลาเท่ากับ 33 μs รองลงมาคือ แอลกอฮอล์, น้ำมันก๊าด, น้ำ, น้ำทะเล และน้ำมันแก๊สโซลีน ตามลำดับ โดยมีความเร็วเท่ากับ 252.88 m/s, 208.60 m/s, 204.02 m/s, 193.71 m/s, 164.78 m/s และ 126.69 m/s ตามลำดับ และมีความเร็วในการขยายตัวเฉลี่ยของ bubble ที่เกิดจากลำพุ่งน้ำมันแอลกอฮอล์สูงที่สุด รองลงมา คือ น้ำมันแก๊สโซลีน, น้ำทะเล, น้ำ, น้ำมันก๊าด และน้ำมันดีเซล โดยมีค่าเท่ากับ 23.34 m/s, 23.18 m/s, 21.50 m/s, 20.48 m/s, 20.62 m/s และ 20.10 m/s ตามลำดับ จากการพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิดจากตารางที่ 4.1 พบว่า ความเร็วในการขยายตัวเฉลี่ยของ bubble ที่เกิดจากลำพุ่งมีความสัมพันธ์กับความตึงผิว (surface tension) คือ เมื่อความตึงผิวลดต่ำลงความเร็วในการขยายตัวของ bubble ที่เกิดจากลำพุ่งจะมีค่าสูงขึ้น ถึงแม้ว่า bubble ที่เกิดจากลำพุ่งน้ำมันดีเซลและน้ำมันก๊าดจะให้ผลที่ไม่เป็นไปตามความสัมพันธ์แต่ก็มีแนวโน้มที่สอดคล้องกับความสัมพันธ์ดังกล่าว ในขณะที่ความเร็วเฉลี่ยในการยุบตัวของ bubble ที่เกิดจากลำพุ่งน้ำมันก๊าดมีความเร็วสูงที่สุด รองลงมาคือ น้ำมันดีเซล แอลกอฮอล์ น้ำ น้ำมันแก๊สโซลีน และน้ำทะเล โดยมีค่าเท่ากับ 13.66 m/s, 12.36 m/s, 11.60 m/s, 10.67 m/s, 10.58 m/s และ 8.75 m/s ตามลำดับ ด้วยเหตุผลเดียวกันกับความเร็วในการขยายตัวของ bubble ที่เกิดจากลำพุ่ง ดังได้กล่าวมาแล้ว

รูปที่ 4.28 แสดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ในแนวตั้ง (bubble diameter in y axial; D_y) ของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด จากรูปพบว่า bubble ที่เกิดจากลำพุ่งจะค่อยๆ ขยายตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป โดยจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble กว้างที่สุดเกิดจากลำพุ่งน้ำมันดีเซล น้ำมันก๊าด, น้ำ, แอลกอฮอล์ และน้ำมันแก๊สโซลีน ที่เวลา 3,261 μs , 2,967 μs , 2,867 μs , 1,867 μs , 1,800 μs และ 1,567 μs ตามลำดับ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ในแนวนอน (D_x) เท่ากับ 65.69 mm, 61.20 mm, 58.74 mm, 43.58 mm, 38.70 mm และ 36.33 mm ตามลำดับ จากการพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิดจากตารางที่ 4.1 พบว่า ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ที่เกิดจากลำพุ่งมีความสัมพันธ์กับความตึงผิว (surface tension) คือ เมื่อความตึงผิวลดต่ำลงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ที่เกิดจากลำพุ่งจะมีค่าสูงขึ้น ถึงแม้ว่า bubble ที่เกิดจากลำพุ่งน้ำมันน้ำและน้ำมันแก๊สโซลีนจะให้ผลที่ไม่เป็นไปตามความสัมพันธ์แต่ก็มีแนวโน้มที่สอดคล้องกับความสัมพันธ์ดังกล่าวจากนั้น bubble จะค่อยๆ ยุบตัวลง ซึ่งการยุบตัวของ bubble จนถึงขนาดต่ำสุดที่เวลา 6,000 μs , 5,467 μs , 5,600 μs , 3,867 μs , 4,000 μs และ 3,733 μs สำหรับ bubble ที่เกิดจากลำพุ่งน้ำมันดีเซล น้ำ, น้ำมันก๊าด, น้ำทะเล, แอลกอฮอล์ และน้ำมันแก๊สโซลีน โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่ำสุดเท่ากับ 31.48 mm, 30.63 mm, 24.77 mm, 20.13 mm, 18.45 mm และ 13.05 mm ตามลำดับ จากนั้นเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะขยายตัวขึ้นอีกครั้ง โดยการวิเคราะห์ผลการทดลองของลำพุ่งความเร็วสูงในน้ำสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สรุปผลการทดลองคุณลักษณะลำพุ่งความเร็วสูงในน้ำ

Liquid type	Jet		Bubble in normal view						Bubble in axial view					
	$V_{aj, m}$ (m/s)	$L_{j, m}$ (mm)	$L_{b, m}$ (mm)	$V_{b, e}$ (m/s)	$V_{b, c}$ (m/s)	$D_{d, m}$ (mm)	$V_{d, e}$ (m/s)	$V_{d, c}$ (m/s)	$D_{x, m}$ (mm)	$D_{y, m}$ (mm)	$V_{x, e}$ (m/s)	$V_{x, c}$ (m/s)	$V_{y, e}$ (m/s)	$V_{y, c}$ (m/s)
Water	374.24	52.54 @ 1,700 μs	47.88 at t = 1,167 μs	41.02	11.03	57.34 at t = 2,600 μs	22.05	13.50	59.75 at t = 2,900 μs	58.74 at t = 2,867 μs	20.60	12.66	20.48	10.67
Sea water	195.00	41.00 at t = 2,100 μs	36.99 at t = 1,067 μs	34.66	10.10	48.17 at t = 2,767 μs	17.40	15.05	39.75 at t = 1,767 μs	38.70 at t = 1,800 μs	22.49	8.70	21.50	8.75
Diesel	576.41	54.23 at t = 1,767 μs	61.93 at t = 1,100 μs	56.30	11.34	36.06 at t = 1,867 μs	19.31	6.84	65.19 at t = 3,233 μs	65.69 at t = 3,261 μs	20.16	12.03	20.10	12.36

ตารางที่ 4.3 สรุปผลการทดลองคุณลักษณะลำพุ่งความเร็วสูงในน้ำ (ต่อ)

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

หมายเหตุ

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

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

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

$V_{b, e}$ คือ ความเร็วในการขยายตัวเฉลี่ยของ bubble ในมุมมองปกติ, m/s (Average expansion velocity of bubble in normal axial)

$V_{b, c}$ คือ ความเร็วในการยุบตัวเฉลี่ย bubble ในมุมมองปกติ, m/s (Average contraction velocity of bubble in normal axial)

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

$V_{d, e}$ คือ ความเร็วในการขยายตัวเฉลี่ยของ bubble ในแนวตั้ง, m/s (Average expansion velocity of bubble in y axial)

$V_{d, c}$ คือ ความเร็วในการยุบตัวเฉลี่ยของ bubble ในแนวตั้ง, m/s (Average contraction velocity of bubble in y axial)

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

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

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

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

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

$V_{y, c}$ คือ ความเร็วในการยุบตัวเฉลี่ยของ bubble ในแนวแกน y จากมุมมองในแนวแกน, m/s (Average contraction velocity of bubble in x axial)

4.8 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาคุณลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูงของน้ำ (water), น้ำทะเล (sea water), น้ำมันดีเซล (diesel), น้ำมันก๊าด (kerosene), แอลกอฮอล์ (alcohol) และน้ำมันแก๊สโซลีน (gasoline) ที่ฉีดในอากาศและ condensed media (น้ำ) ด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูงร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph และไม่ใช่เทคนิค Shadowgraph รวมถึงการถ่ายภาพในแนวแกนโดยไม่ใช้เทคนิค Shadowgraph พบว่า

1. จากภาพถ่าย Shadowgraph ของลำพุ่งน้ำในอากาศ แสดงให้เห็นการเกิด Shock wave ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของลำพุ่งด้วยความเร็วสูงอย่างชัดเจน โดยลำพุ่งน้ำมีความเร็วสูงสุดเท่ากับ 1,699 m/s ($Ma = 4.9$) และยังพบการเกิด second shock wave และ change in shock angle ซึ่งเกิดจาก second jet นอกจากนี้ยังพบกลไกการแตกตัว (break up) การแตกเป็นฝอยละออง (atomization) และการระเหยกลายเป็นไอ (vaporization) อย่างชัดเจน

2. จากภาพถ่าย Shadowgraph ของลำพุ่งน้ำในน้ำ แสดงให้เห็นการเกิด bubble ที่เกิดจากลำพุ่งน้ำในน้ำ รวมไปถึงกลไกการขยายตัวและยุบตัวของ bubble ซึ่งสามารถอธิบายได้จากปรากฏการณ์ของ cavitations นอกจากนี้ยังสังเกตเห็น shock wave, compressed wave, rebound shock wave จากการยุบตัวของ bubble ในน้ำ และจากภาพถ่ายโดยไม่ใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph และการถ่ายภาพในแนวแกนช่วยให้สังเกตและเข้าใจพฤติกรรมต่างๆ ของ bubble ได้อย่างชัดเจน

3. จากภาพถ่ายของลำพุ่งชนิดต่างๆ ในอากาศ พบว่า ลำพุ่งน้ำและน้ำทะเลมีลักษณะเรียวยาวและมีขนาดแคบ โดยไม่แสดงให้เห็นถึงกลไกการแตกตัวเป็นฝอยละอองตลอดการทดลอง ในขณะที่ลำพุ่งน้ำมันดีเซลและแอลกอฮอล์จะมีขนาดใหญ่กว่ามีพื้นผิวที่ขรุขระกว่าแต่ก็ยังไม่แสดงให้เห็นถึงการแตกตัวเป็นฝอยละอองอย่างชัดเจน โดยการแตกตัวเป็นฝอยละอองที่รุนแรงเกิดขึ้นกับลำพุ่งน้ำมันก๊าดและน้ำมันแก๊สโซลีน ซึ่งเป็นผลมาจากความตึงผิว (surface tension) ของน้ำมันก๊าดและน้ำมันแก๊สโซลีนที่ต่ำที่สุด โดยการแตกตัวจะยิ่งรุนแรงเมื่อความตึงผิวของของเหลวต่ำลง จากการตรวจวัดความเร็วพบว่า ลำพุ่งน้ำมีความเร็วเฉลี่ยสูงสุดสูงที่สุดเมื่อเทียบกับทุกชนิดโดยมีความเร็วเท่ากับ 1,669.03 m/s ($Ma = 4.9$) ในขณะที่ลำพุ่งน้ำมันก๊าดมีความเร็วเฉลี่ยสูงสุดต่ำสุดเมื่อเทียบกับทุกชนิดโดยมีความเร็วเท่ากับ 1,264 m/s ($Ma = 3.7$) เนื่องมาจากความตึงผิวของน้ำมันค่าสูงกว่าของน้ำมันก๊าด โดยความเร็วของลำพุ่งสูงขึ้นเมื่อค่าความตึงผิวของของเหลวสูงขึ้น

4. จากภาพถ่ายของลำพุ่งชนิดต่างๆ ในน้ำ พบว่า bubble ที่เกิดจากลำพุ่งทั้ง 6 ชนิดจะมีลักษณะเป็นทรงกลมคล้ายกัน แต่มีขนาดและความเร็วในการเกิดพฤติกรรมต่างๆ แตกต่างกันไปสรุปในตารางที่ 4.3 และจากการพิจารณาพบว่า ความหนืดจลน์ (Kinematics viscosity) และความตึงผิว (Surface tension) เป็นคุณสมบัติทางกายภาพของของเหลวที่สำคัญต่อคุณลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูงในน้ำ

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

การศึกษาคูณลักษณะของลำพุงของเหลวความเร็วสูงที่ฉีดในอากาศและใน condensed media (น้ำ) ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้การผลิตลำพุงด้วยเทคนิคที่เรียกว่า impact driven method จากชุดทดลอง Horizontal Single Stage Powder Gun (HSSPG) ซึ่งมีสมรรถนะในการผลิตความเร็วของกระสุนปืนได้สูงสุดที่ 1,294 m/s โดยใช้ดินปืนน้ำหนัก 7 g และมีความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของดินปืนกับความเร็วของกระสุนปืนในห้องทดสอบคือ $V_2 = 153.7m_g + 220.2$ โดยการศึกษาที่ใช้ความเร็วของกระสุนปืนในการผลิตลำพุงเท่ากับ 950 ± 30 m/s ที่ดินปืนหนัก 5 g ซึ่งลำพุงจะถูกฉีดออกมาจากหัวฉีดที่มีลักษณะทรงกรวย (conical nozzle) มุม 30° ขนาดรูคอคอด (orifice) เท่ากับ 0.7 mm โดยคุณลักษณะของลำพุงที่เกิดขึ้นนั้นได้ถูกอธิบายจากการถ่ายภาพใน 3 ลักษณะคือ 1) การถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูง (High-speed digital video camera) ร่วมกับการถ่ายภาพด้วยเทคนิค Shadowgraph 2) การถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูงในมุมมองปกติโดยไม่ใช้เทคนิค Shadowgraph และ 3) การถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูงในแนวแกนโดยไม่ใช้เทคนิค Shadowgraph ซึ่งจากภาพถ่ายของลำพุงน้ำ (water), น้ำทะเล (sea water), น้ำมันดีเซล (diesel), น้ำมันก๊าด (kerosene), แอลกอฮอล์ (alcohol) และน้ำมันแก๊สโซลีน (gasoline) ที่ฉีดในอากาศและ condensed media (น้ำ) สามารถสรุปได้ดังนี้

1. จากภาพถ่าย Shadowgraph ของลำพุงน้ำในอากาศ แสดงให้เห็นการเกิด Shock wave ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของลำพุงด้วยความเร็วสูงอย่างชัดเจน โดยลำพุงน้ำมีความเร็วสูงสุดเท่ากับ 1,699 m/s ($Ma = 4.9$) และยังพบการเกิด second shock wave และ change in shock angle ซึ่งเกิดจาก second jet นอกจากนี้ยังพบกลไกการแตกตัว (break up) การแตกเป็นฝอยละเอียด (atomization) และการระเหยกลายเป็นไอ (vaporization) อย่างชัดเจน

2. จากภาพถ่าย Shadowgraph ของลำพุงน้ำในน้ำ แสดงให้เห็นการเกิด bubble ที่เกิดจากลำพุงน้ำในน้ำ รวมไปถึงกลไกการขยายตัวและยุบตัวของ bubble ซึ่งสามารถอธิบายได้จากปรากฏการณ์ของ cavitations นอกจากนี้ยังสังเกตเห็น shock wave, compressed wave, rebound shock wave จากการยุบตัวของ bubble ในน้ำ และจากภาพถ่ายโดยไม่ใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph และการถ่ายภาพในแนวแกนช่วยให้สังเกตและเข้าใจพฤติกรรมต่างๆ ของ bubble ได้อย่างชัดเจน

3. จากภาพถ่ายของลำพุงชนิดต่างๆ ในอากาศ พบว่า ลำพุงน้ำและน้ำทะเลมีลักษณะเรียวยาวและมีขนาดแคบ โดยไม่แสดงให้เห็นถึงกลไกการแตกตัวเป็นฝอยละเอียดตลอดการทดลอง ในขณะที่ลำพุงน้ำมันดีเซลและแอลกอฮอล์จะมีขนาดที่ใหญ่กว่ามีพื้นผิวที่ขรุขระกว่าแต่ก็ยังไม่แสดงให้เห็น

เห็นถึงการแตกตัวเป็นฝอยละเอียดอย่างชัดเจน โดยการแตกตัวเป็นฝอยละเอียดที่รุนแรงเกิดขึ้นกับลำพ่นน้ำมันก๊าดและน้ำมันแก๊สโซลีน ซึ่งเป็นผลมาจากความตึงผิว (surface tension) ของน้ำมันก๊าดและน้ำมันแก๊สโซลีนที่ต่ำที่สุด โดยการแตกตัวจะยิ่งรุนแรงเมื่อความตึงผิวของของเหลวต่ำลง จากการตรวจวัดความเร็วพบว่า ลำพ่นน้ำมันมีความเร็วเฉลี่ยสูงสุดสูงที่สุดเมื่อเทียบกับทุกชนิดโดยมีความเร็วเท่ากับ 1,669.03 m/s ($Ma = 4.9$) ในขณะที่ลำพ่นน้ำมันก๊าดมีความเร็วเฉลี่ยสูงสุดต่ำสุดเมื่อเทียบกับทุกชนิดโดยมีความเร็วเท่ากับ 1,264 m/s ($Ma = 3.7$) เนื่องมาจากความตึงผิวของน้ำมันค่าสูงกว่าของน้ำมันก๊าด โดยความเร็วของลำพ่นสูงขึ้นเมื่อค่าความตึงผิวของของเหลวสูงขึ้น

4. จากภาพถ่ายของลำพ่นชนิดต่างๆ ในน้ำ พบว่า bubble ที่เกิดจากลำพ่นทั้ง 6 ชนิดจะมีลักษณะเป็นทรงกลมคล้ายกัน แต่มีขนาดและความเร็วในการเกิดพฤติกรรมต่างๆ แตกต่างกันไปสรุปในตารางที่ 4.3 และจากการพิจารณาพบว่า ความหนืดจลน์ (Kinematics viscosity) และความตึงผิว (Surface tension) เป็นคุณสมบัติทางกายภาพของของเหลวที่สำคัญต่อคุณลักษณะของลำพ่นความเร็วสูงในน้ำ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรผลิตกระสุนปืนให้ได้ขนาดและน้ำหนักที่เท่ากันทุกการทดลอง เนื่องจากจะมีผลกับความเร็วของกระสุนปืนและความเร็วของลำพ่นที่ผลิตได้
2. ควรมีการศึกษาเกี่ยวกับชุดทดลองที่สามารถยิงกระสุนปืนได้อย่างต่อเนื่องและลดเวลาในการประกอบชุดทดลอง
3. ควรมีการศึกษาเกี่ยวกับความดันกระแทกของลำพ่นกรณีฉีดในน้ำ เพื่อนำไปสู่การประยุกต์ใช้จริงกับการเจาะหรือตัดโครงสร้างได้ทะเล
4. ควรมีการศึกษาคูณลักษณะของลำพ่นชนิดอื่นๆ หรือของไหลชนิดอื่นเช่น Non-Newtonian fluid กรณีฉีดในอากาศและในน้ำ

เอกสารอ้างอิง

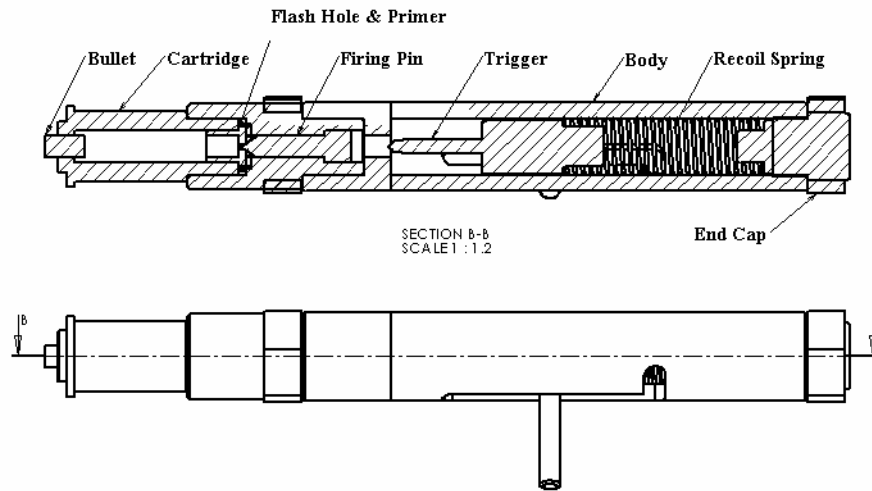
- [1] Methven, T.J., Fairhead, B. “A correlation between rain erosion of perspex specimens in flight and on a ground rig”. Wear 2 (6), 498 (1959)
- [2] Methven, T.J., Fairhead, B. “A correlation between rain erosion of perspex specimens in flight and on ground rig”. Wear 3 (6), 485 (1960)
- [3] King, R.B. “Rain erosion IV An assessment of various materials”. Wear 4 (4), 328 (1961)
- [4] Springer, G.S. “Erosion by liquid impact”. Wiley, New York (1976)
- [5] Adler, W.F., Hooker S.V. “Rain erosion mechanisms in brittle materials”. Wear 50 (1), 11-38 (1978)
- [6] Zwaag, V.D., Field, J.E. “Rain erosion damage in brittle materials”. Eng Fracture Mech 17 (4), 367-379 (1983)
- [7] Adler, W.F. “Waterdrop impact modeling”. Wear 186-187, 341-351 (1995)
- [8] Westmark, C., Lawless, G.W. “A discussion of rain erosion testing at the United States Air Force rain erosion test facility”. Wear 186-187 (2), 384-387 (1995)
- [9] Lesser, M., Field, J. “Studies in shock waves, liquid impact, jets and cavitation”. Proc 1st ISSW In: Takayama, K., (ed.), 61-72 (1991)
- [10] Bourne, N.K., Field; J.E. “A high-speed photographic study of cavitation damage”. J App Physics 78, 4423-4427 (1995)
- [11] Bowden, F.P. Field, J.E. “The brittle fracture of solids by liquid-impact, by solid impact, and by shock”. Proc Royal Soc London 282, 331-352 (1964)
- [12] Reichman, J.M., Cheung, J.B. “An oscillating water jet deep-kerfing technique”. Int J Rock mech. Min. Sci. & Geomech. 15, 135-144 (1978)
- [13] Vijay, M.M., Brierley, W.H. “Cutting cleaning and fragmentation of materials with high pressure liquid jets”. Proc 1st U.S. water jet conference, 272-288 (1981)
- [14] Kobayashi, R., Arai, T., Yamada, H. “Structure of a high-speed water jet and the damage process of metals in jet cutting technology”. JSME Int J Series B 31, 53-57 (1988)
- [15] Shi, H.H., Dear, J.P. “Oblique High-speed liquid-solid impact”. JSME Int J Series I 35 (1992)
- [16] Shi, H.H., Field, J.E., Pickles, C.S.J. “High speed liquid impact onto wetted solid surfaces”. J Fluids Eng 116, 345-348 (1994)

- [17] Yamauchi, Y., Soyama, H., Adachi, Y., Sato, K., Shindo, T., Oba, R., Oshima, R., Yamabe, M. "Suitable region of high-speed submerged water jets for cutting and peening". *JSME Int J Series B* 38, 31–38 (1995)
- [18] Lesser, M. "Thirty years of liquid impact research: a tutorial review". *Wear* 186-187, 28–34 (1995)
- [19] Obara, T., Bourne, N.K., Field, J.E. "Liquid-jet impact on liquid and solid surfaces". *Wear* 186-187 (2), 388-394 (1995)
- [20] Shi, H.H., Takayama, K., Nagayasu, N. "The Measurement of impact pressure and solid surface response in liquid-solid impact up to hypersonic range". *Wear* 186-187, 352-359 (1995)
- [21] Nakahira, T., Komori, M., Nishida, N., Tsujimura, K. "A study of shock wave generation around high pressure fuel spray in a diesel engine". *Proc 2nd ISSW In: Takayama, K., (ed.), 1271–1276 (1991)*
- [22] Shi, H.H., Takayama, K., Onodera, O. "Supersonic diesel fuel injection through a single-hole nozzle in a compact gas gun (part 2)", *JSME Int J Series B* 37 (3), 509-516 (1994)
- [23] Akiyama, H., Nishimura, H., Ibaraki, Y., Iida, N. "Study of diesel spray combustion and ignition using high-pressure fuel injection and a micro-hole nozzle with a rapid compression machine: improvement of combustion using low cetane number fuel". *JSAE Review* 19, 319–327 (1998)
- [24] Lee, S., Tanaka, D., Kusaka, J., Daisho, Y. "Effects of diesel fuel characteristics on spray and combustion in a diesel engine". *JSAE Review* 23 (4), 407-414 (2002)
- [25] Shimotani, K., Oikawa, K., Horada, O. Kagawa, Y. "Characteristics of gasoline in-cylinder direct injection engine". *JSAE Review* 17 (3), 267-272 (1996)
- [26] Kamura, H., Takada, K. "Development of in-cylinder gasoline direct injection engine". *JSAE Review* 19 (2), 175-180 (1998)
- [27] Alle, J., Hargrave, G. "Fundamental study of in-nozzle fluid flow and its effect on liquid jet break-up in Gasoline Direct injectors". *ILASS Europ 2000*, I4.2-I4.5 (2000)
- [28] Lee, K.H., Lee, C.H., Lee, C.S. "An experimental study on the spray behavior and fuel distribution of GDI injectors using the entropy analysis and PIV method". *Fuel* 83 (7-8), 971-980 (2004)
- [29] Billig, F. S. "Research on supersonic combustion". *J Propulsion and Power* 9 (4), 499–514 (1993)

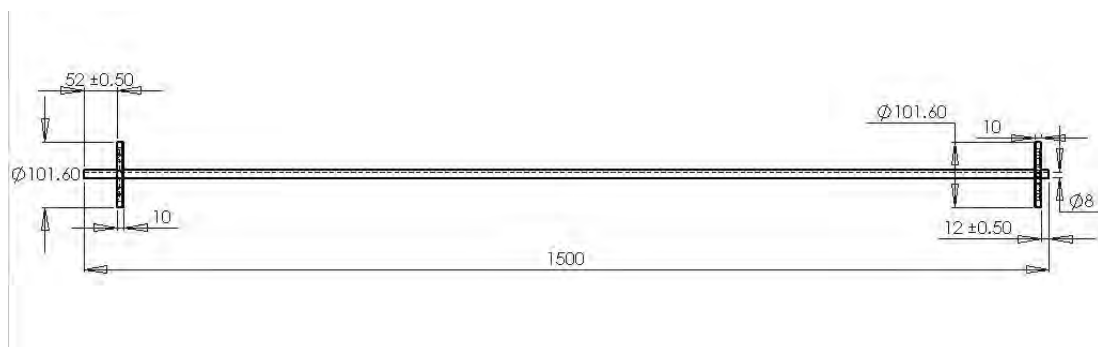
- [30] Ferri, A. "Review of problems in application of supersonic combustion". *J Royal Aero Soc* 68, 575–597 (1964)
- [31] Rubins, P.M. "Review of shock-induced supersonic combustion research and hypersonic applications". *J Propulsion and Power* 10 (5), 593–601 (1994)
- [32] Adelberg, M. "Breakup rate and penetration of a liquid jet in a gas stream". *AIAA J* 5 (8), 1408–1415 (1967)
- [33] Catton, I., Hill, D.E., McRae, R.P. "Study of liquid jets penetration in a hypersonic stream". *AIAA J* 6 (11), 2084–2089 (1968)
- [34] Kolpin, M.A., Horn, K.P., Reichenbach, R.E. "Study of penetration of a liquid injection into a supersonic flow". *AIAA J* 6 (5), 853–858 (1968)
- [35] Horn, K.P., Reichenbach, R.E. "Further experiments on spreading References 205 of liquids injected into a supersonic flow". *AIAA J* 7 (2), 358–359 (1969)
- [36] Edelman, R.B., Schmotolocha, S., Slutsky, S. "Combustion of liquid hydrocarbons in a high-speed air stream". *AIAA J* 9 (7), 1357–1364 (1971)
- [37] Bowden, F.P., Brunton, J.H. "Damage to solids by liquid impact at supersonics speeds". *Nature* 181, 873–875 (1958)
- [38] Bowden, F.P., Brunton, J.H. "The deformation of solids by liquid impact at supersonic speeds". *Proc Royal Society London* 263 (series A), 433–450 (1961)
- [39] Ohki, T., Nakagawa, A., Tominaga, T., Takayama, K. "Experimental application of Pulsed Ho: YAG laser-induced liquid jet as a novel device for rigid neuroendoscope". *Laser Surg Med* 34, 227 (2004),
- [40] Nakagawa, A., Hirano, T., Komatsu, M., Sato, M., Uenohara, H., Ohgawa, H., Kusada, Y., Shirane, R., Takayama, K., Yoshimoto, T. "Holmium: YAG laser-induced liquid jet knife: possible novel method for dissection". *Lasers Surg Med* 31, 125 (2002)
- [41] Hirano, T., Uenohara, H., Komatsu, M., Nakagawa, A., Satoh, M., Ohyama, H., Takayama, K., Yoshimoto, T. "Holmium YAG laser-induced liquid jet dissector: A novel prototype device for dissection organs without impairing vessels". *Minim Invas Neurosurg* 46, 121 (2003)
- [42] Iwasaki, M. "Application of Water Jet for Drilling Rocks Undersea". *Turbomachinery* 17 (12), 761–767 (1989) (In Japanese)
- [43] Soyama H., Yanauchi Y., Sato K., Ikohagi T., Oba R. and Oshima R. "High-Speed Observation of Ultrahigh-Speed Submerged Water Jets", *Experimental Thermal and Fluid Science* 12:411–4162, 1996

- [44] คณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ฟิสิกส์ 1. กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538
- [45] Patrick H. Oosthuizen and William E. Carscallen. Compressible fluid flow. USA :McGRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS, 1997
- [46] <http://www.optaminerals.com/Water-Jet-Cutting/>
- [47] <http://www.hayes-stolz.com/lwjpages/lwjhome.html>
- [48] http://www.acp-micron.com/5699_CO2-Schneestrahle-Reinigung.html?lang=1
- [49] http://www.planebuzz.com/2008/06/oil_goes_on_a_tear_jet_fuel_fo.html
- [50] http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Jet_engine.svg
- [51] Pianthong K., Zakrzewski S., Behnia M. and Milton B.E. “Supersonic liquid jets: Their generation and shock wave characteristics”, Shock Waves 11: 457–466, 2002
- [52] Pianthong K., Zakrzewski S., Behnia M. and Milton B.E. “Characteristics of impact driven supersonic liquid jets”, Experimental Thermal and Fluid Science 27 589–598, 2003
- [53] Matthujak A., Hosseini S. H. R., Takayama K., Sun M. and Voinovich P. “High speed jet formation by impact acceleration method”, Shock Waves 16: 405–419, 2007
- [55] Ohtani, K. Numata, D. Takayama, K. Kobayashi, T. Okatsu, K. “Experimental study of underwater rock drilling using a pulsed Ho : YAG laser-induced jets”. Shock wave 19, 403–412 (2009)
- [54] วิระพันธ์ สีหนาม , วุฒิชัย สิทธิวงษ์, กุลเชษฐ์ เพียรทอง และ อนิรุตต์ มัทธูจาร์. “การจำลองคุณลักษณะเบื้องต้นของลำพุ่งเชื้อเพลิงความเร็วสูง”. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21, 2550.

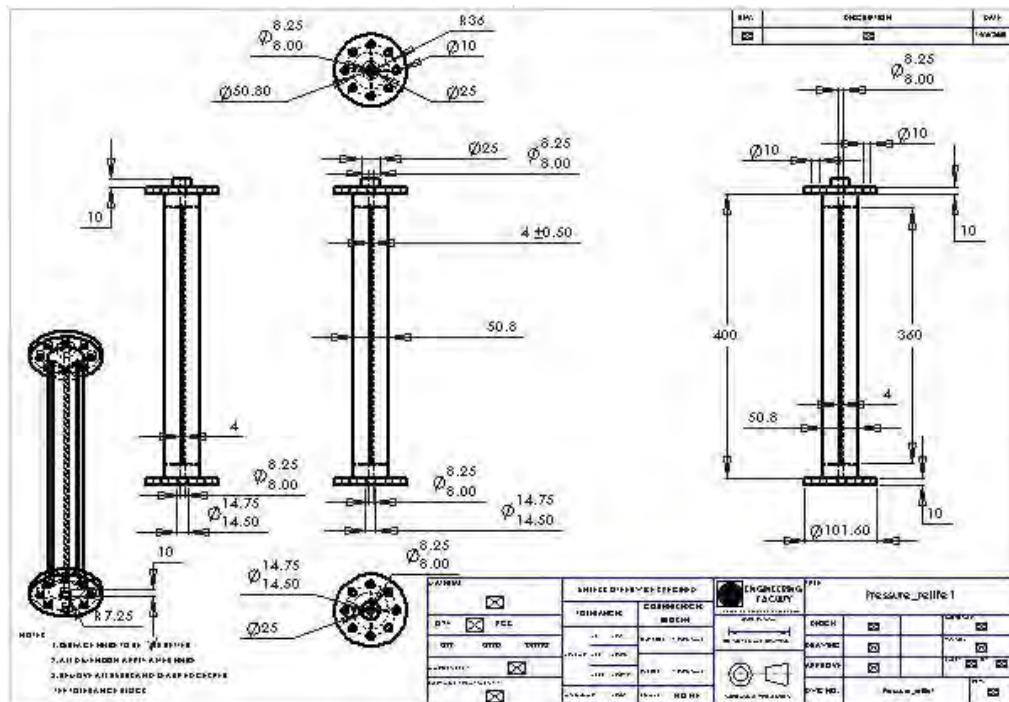
ภาคผนวก ก
การออกแบบชุดทดลอง



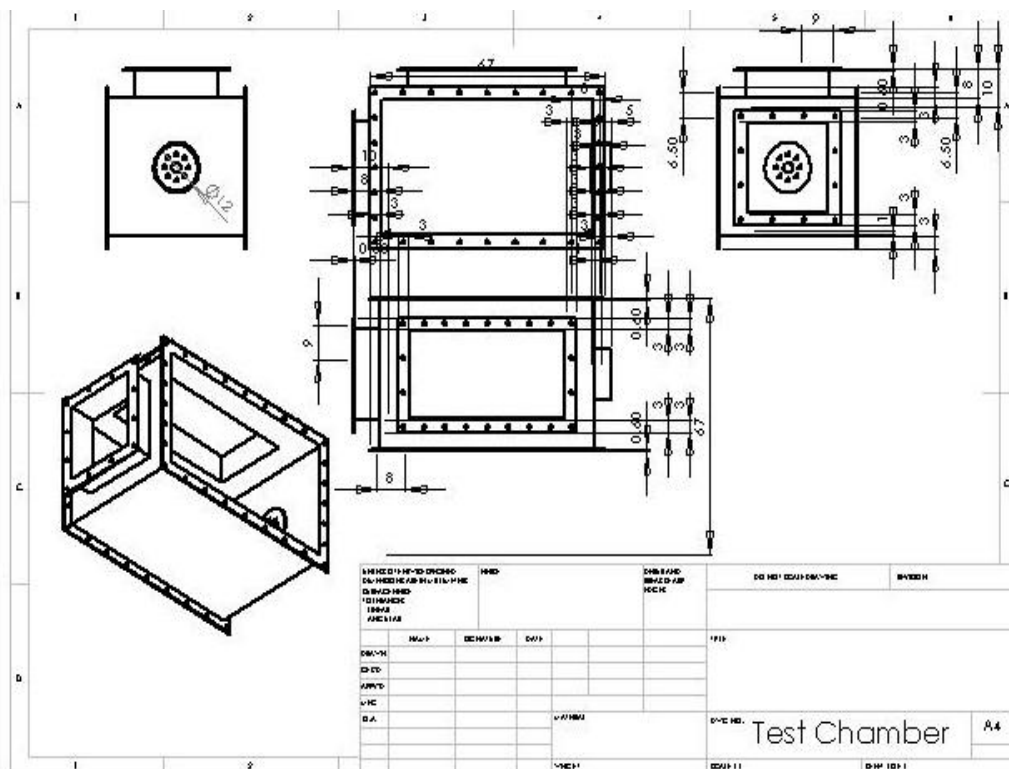
รูปที่ ก.1 ชุดปล่อยกระสุนปืน (launcher หรือ powder gun)



รูปที่ ก.2 ท่อส่งกระสุนปืน (launch tube)



รูปที่ ก.3 ท่อระบายความดัน (pressure relief section)



รูปที่ ก.4 ห้องทดสอบ (test chamber)

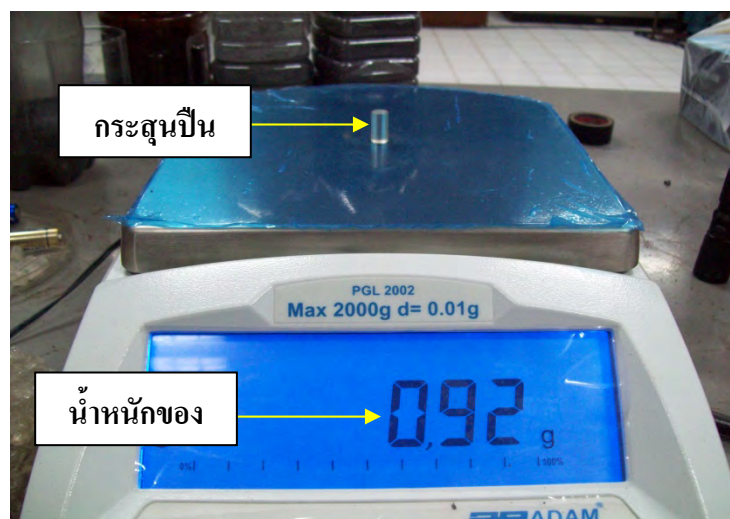
ภาคผนวก ข
ขั้นตอนการทดลองยิงกระสุนปืนความเร็วสูง

ข.1 วิธีการทดลองยิงกระสุนปืนความเร็วสูง

การทดลองยิงกระสุนความเร็วสูงเพื่อใช้ในการผลิตลำพุ่งความเร็วสูงนั้นในแต่ละขั้นตอนการทดลองผู้ทำการทดลองต้องคำนึงถึงความความปลอดภัยและความละเอียดรอบคอบ ซึ่งมีรายละเอียดในการทำการทดลองดังนี้

ข.1.1 การชั่งมวลของกระสุนและการวัดขนาดของกระสุนปืน

เนื่องจากมวลของกระสุนปืนและขนาดของกระสุนปืนที่แตกต่างกันนั้นอาจมีผลทำให้ความเร็วของกระสุนปืนที่ได้จากการทดลองมีความแตกต่าง ดังนั้นในการทดลองแต่ละครั้งจึงต้องมีการชั่งและการวัดกระสุนปืนทุกครั้ง ดังรูปที่ ข.1 และ ข.2



รูปที่ ข.1 ชั่งมวลของกระสุนปืน



รูปที่ ข.2 วัดขนาดของกระสุนปืน

ข.1.2 การบรรจุกระสุนปืน

เมื่อทำการวัดขนาดและชั่งมวลของกระสุนปืนแล้ว จากนั้นทำการบรรจุกระสุนปืนโดยในการบรรจุไม่สามารถบรรจุกระสุนเข้ากับปลอกกระสุนได้โดยง่าย ดังนั้นจึงต้องมีเครื่องช่วยบรรจุกระสุนปืน โดยการอัดให้เหลือกระสุนพ้นจากปลอกกระสุน 5 mm. ดังรูปที่ ข.3



(a) ก่อนการบรรจุกระสุน



(b) หลังจากการบรรจุกระสุน

รูปที่ ข.3 บรรจุกระสุนปืน

ข.1.3 การบรรจุดินปืน

หลังจากบรรจุกระสุนเสร็จแล้ว ขั้นตอนการบรรจุดินปืนทำได้โดยการชั่งน้ำหนักดินปืนด้วยเครื่องชั่งดิจิตอลและใส่ไพโรเมอร์ (แก๊ป) โดยการติดด้วยเทปใส ดังรูปที่ ข.4



รูปที่ ข.4 บรรจุนปืนและติดไฟรเมอร์

ข.1.4 การเช็คสัญญาณ laser beam และ oscilloscope

เมื่อเสร็จขั้นตอนต่างๆที่ผ่านมาแล้ว ก่อนที่จะทำการประกอบชุดปืนเข้ากับชุดทดลองต้องมีการเช็คสัญญาณ laser beam และ oscilloscope ทุกครั้งโดยการยิงกระสุนปืนด้วยปืนลม ดังรูปที่ ข.5



รูปที่ ข.5 เช็คสัญญาณ laser beam และ oscilloscope

ข.1.5 ประกอบชุดปืน

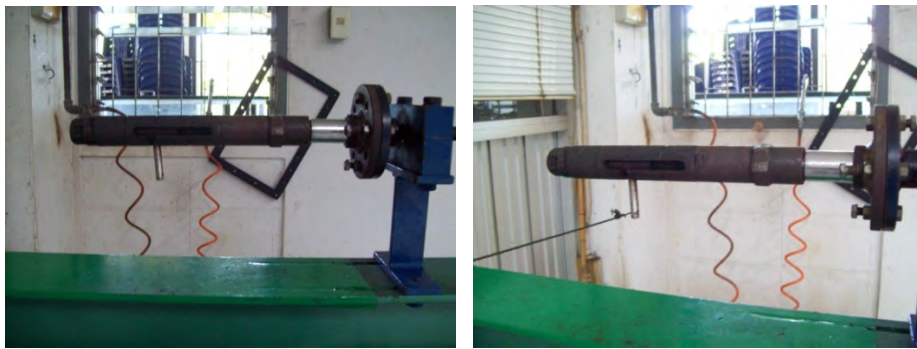
จากนั้นก็ทำการประกอบชุดปืนเข้ากับชุดทดลองโดยประกอบปลอกกระสุนเข้ากับหน้าแปลนของลำกล้องก่อน แล้วจึงประกอบชุดปืนที่ใช้ในการจุดชนวน ดังรูปที่ ข.6



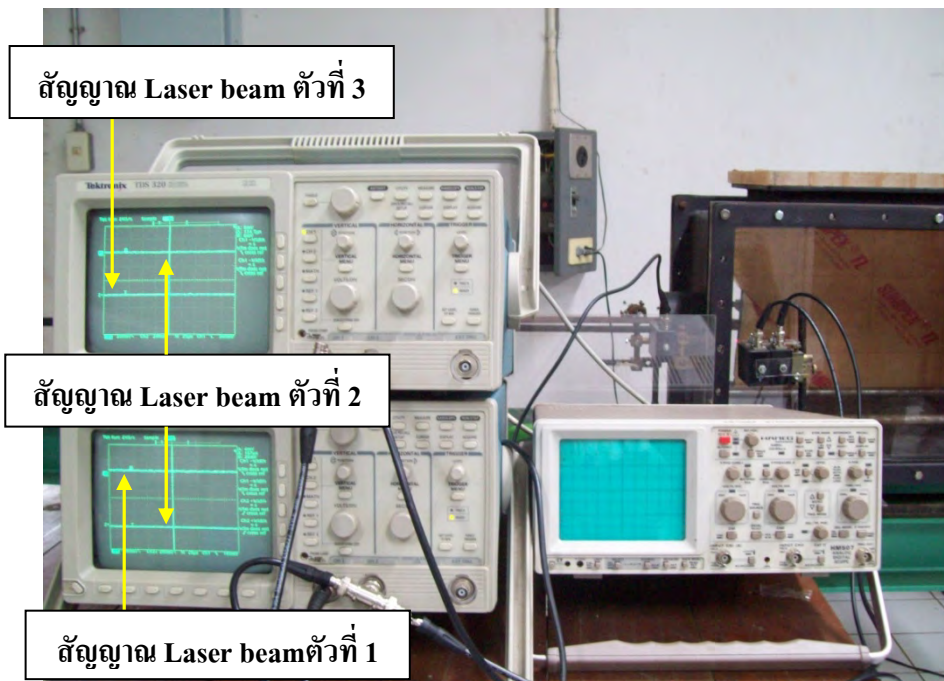
รูปที่ ข.6 การประกอบชุดปืน

ข.1.6 การยิง

เนื่องจากในขั้นตอนการยิงนั้นเป็นขั้นตอนที่มีความอันตรายสูงและต้องใช้ความระมัดระวัง ดังนั้นในการยิงจึงใช้ตะขอเกี่ยวโกปิ่นที่ร้อยด้วยเชือกเพื่อทำการที่จะลั่นโกปิ่นที่ระยะห่างจากชุดทดลองประมาณ 4-5 m. ดังรูปที่ ข.7 เป็นการสิ้นสุดการทดลอง จากนั้นทำการตรวจวัดความเร็วด้วย oscilloscope ดังรูปที่ ข.8

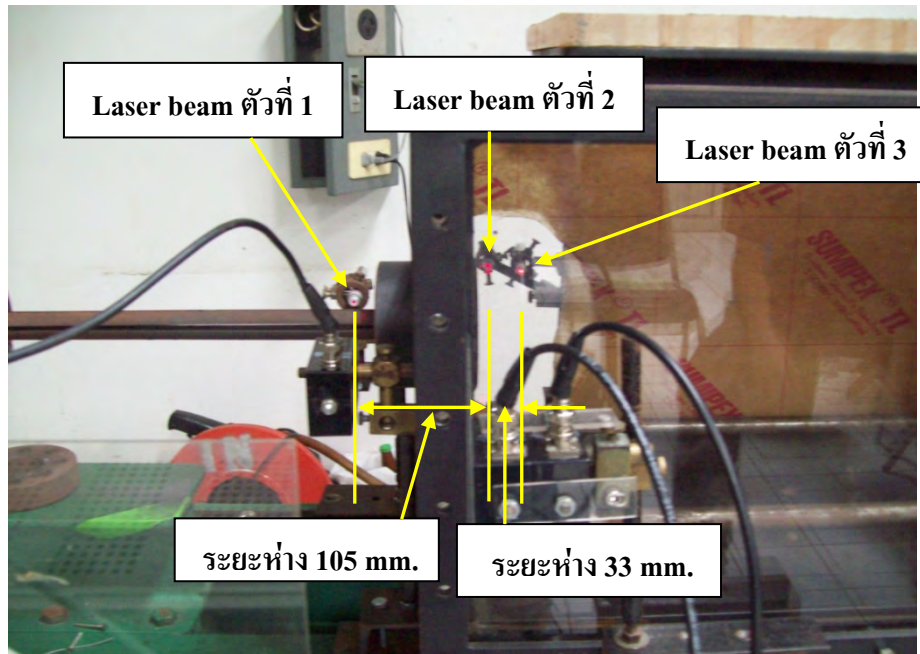


รูปที่ ข.7 การยิง



(a) ตำแหน่ง laser beam บนหน้าจอ oscilloscope

รูปที่ ข.8 (a) ตำแหน่ง laser beam บนหน้าจอ oscilloscope และ (b) ตำแหน่งติดตั้ง laser beam



(b) ตำแหน่งติดตั้ง laser beam

รูปที่ ข.8 (a) ตำแหน่ง laser beam บนหน้าจอ oscilloscope และ (b) ตำแหน่งติดตั้ง laser beam (ต่อ)

ตารางที่ ข.1 ความเร็วของกระสุนปืนจากการทดลอง laser 1 และ laser 2 ระยะห่าง Δs_1

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

ตารางที่ ข.1 ความเร็วของกระสุนปืนจากการทดลอง laser 1 และ laser 2 ระยะห่าง Δs_1 (ต่อ)

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

ตารางที่ ข.2 ความเร็วของกระสุนปืนจากการทดลอง laser 2 และ laser 3 ระยะห่าง Δs_2

มวลของดินปืน (g)	ครั้งที่	มวลของกระสุน (g)	ขนาดของกระสุน (mm)	Δt (μs)	Δs (mm)	Δv (m/s)
4.0	1	0.92	8.00	37	33	891.89
	2	0.92	8.00	37	33	891.89
	3	0.92	8.00	39.5	33	835.4
ค่าเฉลี่ย						<u>873.08</u> +18.81 -37.64
4.5	1	0.92	8.00	39	33	846.15
	2	0.92	8.00	36	33	916.67
	3	0.92	8.00	37	33	891.89
ค่าเฉลี่ย						<u>884.90</u> +31.77 -38.75
5.0	1	0.92	8.00	35.5	33	929.58
	2	0.92	8.00	35	33	942.86
	3	0.92	8.00	33.5	33	985.07
ค่าเฉลี่ย						<u>952.50</u> +32.57 -22.92
5.5	1	0.92	8.00	32	33	1,031.25
	2	0.92	8.00	29.5	33	1,118.64
	3	0.92	8.00	31.5	33	1,047.62
ค่าเฉลี่ย						<u>1,065.8</u> +52.8 -34.59
6.0	1	0.92	8.00	27.5	33	1,200
	2	0.92	8.00	28	33	1,178.57
	3	0.92	8.00	29	33	1,137.93
ค่าเฉลี่ย						<u>1,172.1</u> +27.83 -34.24

ตารางที่ ข.2 ความเร็วของกระสุนปืนจากการทดลอง laser 2 และ laser 3 ระยะห่าง Δs_2 (ต่อ)

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

ภาคผนวก ค
ผลสำเร็จจากการดำเนินโครงการ

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] Matthujak, A., Kachaeamnitpor, C., Sittiwong, W., Seehanam, W. and Pianthong, K.: Characteristics of High-Speed liquid jets in water. The 1st International Conference on Mechanical Engineering (TSME-ICoME), Ubon Ratchathani, Thailand, 20th – 22nd October, 2010, paper no. AME004
- [2] A. Matthujak, C. Kachaeamnitpor, W. Sittiwong, W. Seehanam, K. Pianthong and K. Takayama, “Effects of different liquid properties on the characteristics of high-speed liquid jets injected in water,” The International Conference of Experiment Mechanics 2010 (ICEM 2010), paper page no. 132, Malaysia, 28 November - 1 October 2010.
- [3] ชัยเดช เกษมนิมิตรพร , อนิรุตต์ มัทธจักร , วุฒิชัย สิทธิวงษ์ และ กุลเชษฐ์ เพียรทอง “คุณลักษณะของลำพุ่งน้ำความเร็วสูงที่ฉีดในของเหลว” วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, ปีที่ 6, ฉบับที่ 2, 2554, 1-10