

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการศึกษาคุณลักษณะการกระแทกของลำพุ่งความเร็วสูงภายในของเหลว Investigation on Characteristics of High-Speed Jet Impact in Liquid

คณะผู้วิจัย

รศ.ดร.อนิรุตต์ มัทธุจักร์
 รศ.ดร.กุลเซษฐ์ เพียรทอง
 นายชัยเดช เกษมนิมิตพร

สังกัด

คณะวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2554 และ 2555

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย ม.อบ. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

้งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณลักษณะ การกระแทก ของลำพุ่งของเหลวความเร็วสูงที่ฉีดใน ของเหลว (น้ำ) และในอากาศ ซึ่งการผลิตลำพุ่งความเร็วสูงในงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิคที่เรียกว่า การขับลำพุ่ง ด้วยการกระแทก (Impact driven method) ในชุดทดลองที่เรียกว่า Horizontal Single Stage Gas Gun (HSSGG) โดยเทคนิคนี้จะอาศัยกระสุนปืน ความเร็วสูงกระแทกกับของเหลวซึ่งบรรจุอยู่ในหัวฉีด ซึ่งการวิจัยนี้ ้จะใช้ความเร็วของกระสุนปืน เท่ากับ 185, 223 และ 239 m/s และหัวฉีดทรงกรวยมุม 30° ขนาดรูคอคอดที่ ทางออกเท่ากับ 1 mm ในการผลิตลำพุ่ง โดยทำการศึกษาคุณลักษณะการกระแทกของลำพุ่งของเหลว 5 ชนิด ้คือ น้ำ, น้ำมันดีเซล, น้ำมันก๊าด, น้ำมันแก๊สโซลีน และแอลกอฮอล์ จากการตรวจวัดความดันการกระแทก ของ ้ลำพุ่งด้วยชุดวัดความดันซึ่งได้ทำการออกแบบ สร้างและสอบเทียบ โดยประกอบไปด้วย เปียโซอิเล็กทริกฟิล์ม (Piezoelectricpolyvinylideni fluoride film, PVDF) และยังสามารถตรวจวัดความเร็วของลำพุ่งก่อนการ กระแทกได้ในเวลาเดียวกันโดยความเร็วที่วัดได้จะทำการคำนวณหาความดันโดยใช้สมการ Water hammer เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบอีกด้วย จากผลการทดลอง พบว่า 1) ความดันกระแทกที่วัดได้จากชุดวัด ความดันและจากการคำนวณโดยสมกา ร Water hammer มีค่าใกล้เคียงกันทุกลำพุ่งในกรณีฉีดในอากาศ 2) ้ลำพุ่งที่ฉีดในอากาศจะมีความดันกระแทกสูงกว่าเมื่อฉีดในน้ำ ทุกลำพุ่งและทุกระยะห่างจากหัวฉีด 3) เมื่อ ระยะห่างจากหัวฉีดมากขึ้น ความดันกระแทกของลำพุ่งจะมีค่าลดลง 4) ลำพุ่งน้ำจะมีความดันกระแทกสูงสุด ้เมื่อฉีดในอากาศ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 699.55 MPa ส่วนเมื่อฉีดในน้ำลำพุ่งน้ำมันดีเซลมีความดันกระแทกสูงที่สุด ซึ่ง มีค่าเท่ากับ 583.05 MPa และลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซลีนจะมีความดันกระแทกต่ำที่สุดทั้งกรณีฉีดในอากาศและใน ้น้ำ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 232.32 และ 123.26 MPa ตามลำดับ 5) คุณสมบัติทางกายภาพที่ มีผลต่อความดัน กระแทกคือ ความหนาแน่นและน้ำหนักโมเลกุลของของเหลว 6) เมื่อความเร็วของกระสุนที่ใช้ในการผลิตลำพุ่ง เพิ่มสูงขึ้น ความดันกระแทกของลำพุ่งจะมีค่าสูงขึ้น โดยความดันกระแทกสูงสุดของทุกลำพุ่งจะเกิดจาก ้ความเร็วกระสุน (V_p) เท่ากับ 239 m/s และมีความดันกระแทกต่ำสุดที่ความเร็วกระสุน (V_p) เท่ากับ 185 m/s และ 7) ลำพุ่งที่ฉีดทั้งในอากาศและในน้ำมีพลังงานเพียงพอที่จะทำให้เกิดความเสียหายบนพื้นผิว PMMA

ABSTRACT

The objective of this research is to study on the impact characteristics of high-speed liquid jet injected in liquid (water) and ambient air. The high-speed liquid jets were generated using impact driven method in a Horizontal Single Stage Gas Gun (HSSGG). 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 185, 223 and 239 m/s and 30 $^{\circ}$ conical nozzle having orifice diameter of 1 mm were used for jet generation. Characteristics of 5 liquid types being water, diesel, kerosene, gasoline and alcohol were described by impact pressure using PVDF pressure sensor, which designed, manufactured and calibrated, and by measuring jet velocity for calculation from water hammer equation. The impact pressures obtained from PVDF pressure sensor and water hammer equation were compared. From the results, it was found that 1) The impact pressures obtained from PVDF pressure sensor were similar to that water hammer for all jets injected in air 2) The impact pressure of jets injected in air were higher than that in water for all jets and all stand-off distances 3) The impact pressure decreased as the stand-off distance increased 4) The maximum impact pressure of the jet injected in air and water are water jet, being 699.55 MPa, and diesel jet, being 583.05, respectively. The minimum impact pressure of the jet injected in both air and water is gasoline jet, being 232.32 and 123.26 MPa, respectively. 5) Density and molecular weight of liquid are the significantly physical property for the impact pressure of the jet. 6) The impact pressure increased as the projectile velocity increased. The maximum and the minimum impact pressure were generated by projectile velocity of 239 m/s and 185 m/s, respectively, and 7) The jets injected in both air and water have enough energy for damage of PMMA surface.

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ นาย ปกรณ์ เหง้าเกษ นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี และขอขอบคุณ ดร .วุฒิชัย สิทธิ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ เกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล อีสาน วิทยาเขตสุรินทร์ ที่ช่วยดำเนินการทำงานทดลองและรวบรวมผลการทดลองตลอดระยะเวลาที่ ทำการวิจัย โครงการวิจัยนี้ได้รับเงินอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

คณะผู้วิจัย

สารบัญ

	หน้า
าเหลือย่าวการเกโทย	п
Abstract	
กอรถุงประกาศ	III IV/
สารนักเ	IV V
สารนักเตาราง	v VII
สารบัญรูป	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ความเร็วเสียง Speed of sound	4
2.2 เลขมัค Mach number	8
2.3 คลื่นกระแทก shock wave	9
2.4 ชุดยิงกระสุนความเร็วสูง	12
2.5 เทคนิคการถ่ายภาพ visualization technique	16
2.6 การประยุกต์ใช้ High-speed liquid jet	21
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ High-speed liquid jet	24
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีทำการทดลอง	27
3.1 ชุดทดลอง Horizontal Single State Gas Gun (HSSGG)	27
3.2 การวัดความเร็วของกระสุนปืน	30
3.3 การผลิตลำพุ่งความเร็วสูง High-speed jet generation	31
3.4 การวัดความดันกระแทก Impact pressure	32
3.5 การวัดความเร็วของลำพุ่ง	33

สารบัญ (ต่อ)

0 0 0 I O
หนา

บทที่ 4 เ	งลการทดลอง	35
4.	1 การเปรียบเทียบความดันกระแทกจากชุดวัดความดันกระแทกกับสมการ	
	Water hammer กรณีฉีดในอากาศ	35
4.	2 อิทธิพลของความเร็วในการกระแทกของกระสุนปืนกรณีฉีดในอากาศ	38
4.	3 อิทธิพลของชนิดของเหลวของลำพุ่งกรณีฉีดในอากาศ	38
4.	4 การเปรียบเทียบความดันกระแทกในอากาศและน้ำ	39
4.	5 อิทธิพลของความเร็วในการกระแทกของกระสุนปืนกรณีฉีดในน้ำ	41
4.	6 อิทธิพลของชนิดของเหลวของลำพุ่งกรณีฉีดในน้ำ	43
บทที่ 5 ส	<i>า</i> รุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	45
5.	1 สรุปผลการศึกษา	45
5.	2 ข้อเสนอแนะ	46
เอกสารอ้	้างอิง	47
ภาคผนว	ก	51
ภา	าคผนวก ก การออกแบบชุดทดลอง	52
ภา	าคผนวก ข รูปอุปกรณ์การทดลอง	56
ภา	าคผนวก ค ร [้] อยเสียหายจากการกระแทกของลำพุ่ง	60
ภา	าคผนวก ง ตารางบันทึกผลการทดลอง	66
ภา	าคผนวก จ ประวัตินักวิจัย	97
ภา	เคผนวก ฉ ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่	116

หน้า

สารบัญตาราง

ตารางที่

2.1	ความเร็วเสียงในแก๊สอุดมคติ	5
2.2	ความเร็วเสียงในตัวกลางที่อุณหภูมิ 20 °C	7
2.3	ค่าคงที่ของก๊าซ	17
4.1	คุณสมบัติทางกายภาพของของเหลวที่ใช้ในการทดลอง	39
٩.1	ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำเมื่อฉีดในอากาศ	
	ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 5 bar	67
٩.2	ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำมันดีเซลเมื่อฉีดในอากาศ	
	ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 5 bar	68
٩.3	ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำมันก๊าดเมื่อฉีดในอากาศ	
	ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 5 bar	69
٩.4	ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซลีนเมื่อฉีดในอากาศ	
	ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 5 bar	70
٩.5	ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งแอลกอฮอล์เมื่อฉีดในอากาศ	
	ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 5 bar	71
٩.6	ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำเมื่อฉีดในอากาศ	
	ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 8 bar	72
.7	ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำมันดีเซลเมื่อฉีดในอากาศ	
	ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 8 bar	73
۹.8	ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำมันก๊าดเมื่อฉีดในอากาศ	
	ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 8 bar	74
٩.9	ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซลีนเมื่อฉีดในอากาศ	
	ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 8 bar	75
.10	ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งแอลกอฮอล์เมื่อฉีดในอากาศ	
	ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 8 bar	76
.11	ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำเมื่อฉีดในอากาศ	
	ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 10 bar	77
٩.12	ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำมันดีเซลเมื่อฉีดในอากาศ	
	ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 10 bar	78
٩.13	ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำมันก๊าดเมื่อฉีดในอากาศ	
	ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 10 bar	79

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
গ.14	ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซลีนเมื่อฉีดในอากาศ	
	ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 10 bar	80
۹.15	ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งแอลกอฮอล์เมื่อฉีดในอากาศ	
	ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 8 bar	81
.16	ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำเมื่อฉีดในน้ำ	
	ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 5 bar	82
.17	ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำมันดีเซลเมื่อฉีดในน้ำ	
	ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 5 bar	83
.18	ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำมันก๊าดเมื่อฉีดในน้ำ	
	ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 5 bar	84
٩.19	ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซลีนเมื่อฉีดในน้ำ	
	ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 5 bar	85
٩.20	ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งแอลกอฮอล์เมื่อฉีดในน้ำ	
	ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 5 bar	86
٩.21	ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำเมื่อฉีดในน้ำ	
	ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 8 bar	87
٩.22	ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำมันดีเซลเมื่อฉีดในน้ำ	
	ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 8 bar	88
٩.23	ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำมันก๊าดเมื่อฉีดในน้ำ	
	ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 8 bar	89
.24	ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซลีนเมื่อฉีดในน้ำ	
	ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 8 bar	90
٩.25	ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งแอลกอฮอล์เมื่อฉีดในน้ำ	
	ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 8 bar	91
٩.26	ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำเมื่อฉีดในน้ำ	
	ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 10 bar	92
.27	ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำมันดีเซลเมื่อฉีดในน้ำ	
	ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 10 bar	93
٩.28	ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำมันก๊าดเมื่อฉีดในน้ำ	
	ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 10 bar	94

การศึกษาคุณลักษณะการกระแทกของลำพุ่งความเร็วสูงภายในของเหลว | ${f IX}$

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
<u> </u> .29	ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซลีนเมื่อฉีดในน้ำ	
	ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 10 bar	95
۹.30	ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งแอลกอฮอล์เมื่อฉีดในน้ำ	
	ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 10 bar	96

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า (a) กระแสลมที่ค่าของ $\mathbf{M}_a\!<\!\!1$ และ (b) กระแสลมที่ค่าของ $\mathbf{M}_a\!>\!\!1$ 2.1 8 คลื่นกระแทก (shock wave) 2.2 9 คลื่นกระแทกเป็นแนวโค้ง 2.3 9 ้ลักษณะการเปลี่ยนแปลงสภาวะต่างๆ ข้ามคลื่นกระแทกตั้งฉาก 2.4 10 ภาพถ่ายของ normal shock wave 2.5 10 2.6 Hydraulic jump 11 (a) normal shock wave (b) curved shock wave และ 2.7 (c) oblique shock wave 11 การเปลี่ยนทิศของความเร็วด้านหน้าของ normal และ oblique shock wave 2.8 12 shock wave ที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง 2.9 12 แผนภาพส่วนประกอบของ Single-stage light gas gun 2.10 13 2.11 แผนภาพส่วนประกอบของ two stage light gas gun 15 แผนภาพการทำงานของ powder gun 2.12 16 2.13 เทคนิคการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph 17 การสร้างภาพด้วยเทคนิค Shadowgraph 2.14 18 พื้นฐานการจัดระบบชไรเรน (Schlieren) 2.15 18 หลักการทำงานของ Knife-edge 2.16 19 ผลจากการเปลี่ยนทิศทางของคมมีด 2.17 19 ระบบชไรเรนกับกระจกสะท้อน (Schlieren system with mirrors) 2.18 19 ระบบอินเทอเฟอโรมิเตอร์ขั้นพื้นฐานโดยการใช้ beam splitter 2.19 20 Mach-Zenhnder interferometer 2.20 20 การถ่ายภาพของการไหลเดียวกันด้วยเทคนิค (a) Shadowgraph photograph, 2.21 (b) Schlieren photograph และ (c) Interferometer photograph 21 2.22 Water jet cutting technology 22 2.23 Water jet cleaning technology 22 2.24 Injectors injectors 23 2.25 Jet engine technology 23 2.26 Bowden and Brunton method 25 การปรับเทียบความดันกระแทก 2.27 26 3.1 Impact driven method หรือ Bowden and Brunton method 27 3.2 แผนภาพ horizontal single stage gas gun 28

การศึกษาคุณลักษณะการกระแทกของลำพุ่งความเร็วสูงภายในของเหลว | ${f XI}$

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.3	ตัวอย่างกระสุน (projectile) ที่ใช้ในการทดลอง	28
3.4	ส่วนประกอบของกลไกการยิงกระสุน (a) ก่อนการยิง (b) หลังการยิง	29
3.5	ขั้นตอนการยิงกระสุน	29
3.6	ไดอะแกรมการวัดความเร็วของกระสุนปืน	30
3.7	ตัวอย่างการแสดงผลของ digital oscilloscope	
	ในการวัดความเร็วของกระสุนปืน	30
3.8	การผลิตลำพุ่งความเร็วสูง (High-speed liquid jet generation)	31
3.9	รูปทรงของหัวฉีด (Nozzle geometry)	31
3.10	การวัดความเร็วและความดันกระแทกของลำพุ่ง	32
3.11	ตัวอย่างสัญญาณการกระแทกของลำพุ่งน้ำในอากาศที่ระยะ 4 cm	
	จากปลายหัวฉีดที่ถูกบันทึกโดยออสซิโลสโคป	33
4.1	การเปรียบเทียบความดันกระแทกของลำพุ่งที่วัดจากชุดวัดความดันกับสมการ	
	Water hammer ที่ความเร็วกระแทกของกระสุนเท่ากับ 223 m/s	
	กรณีฉีดในอากาศ	35
4.2	อิทธิพลของความเร็วของกระสุนปืนต่อความดันกระแทกของลำพุ่งกรณีฉีดในอากาศ	37
4.3	อิทธิพลของชนิดของเหลวของลำพุ่งต่อความดันกระแทก	
	ที่ความเร็วของกระสุนเท่ากับ 223 m/s กรณีฉีดในอากาศ	39
4.4	การเปรียบเทียบความดันกระแทกของลำพุ่ง	
	เมื่อฉีดในอากาศและน้ำที่ความเร็วของกระสุนเท่ากับ 223 m/s	40
4.5	อิทธิพลของความเร็วการกระแทก	
	ของกระสุนปืนต่อความดันกระแทกของลำพุ่งในน้ำ	42
4.6	อิทธิพลของชนิดของเหลวของลำพุ่งต่อความดันกระแทก	
	ในน้ำที่ความเร็วกระแทกของกระสุนปืนเท่ากับ 223 m/s กรณีฉีดในน้ำ	43
ก.1	ฐานตั้ง Horizontal single stage gas gun	53
ก.2	รายละเอียดของฐานตั้ง Horizontal single stage gas gun	53
ก.3	Test chamber	54
ก.4	รายละเอียด Test chamber	54
ก.5	ตัวจับยึด Launch tube	55
ก.6	รายละเอียดตัวจับยึด Launch tube	55
ข.1	Horizontal single stage gas gun	57

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
ข.2	กระสุนปืน	57
ข.3	เลเซอร์	57
ข.4	ตัวรับสัญญาณเลเซอร์	58
ข.5	ออสซิลโลสโคป รุ่น GWINSTER GDS 2102	58
ข.6	ปั้มลมโรตารี่ PUMA รุ่น XM-2525 Puma 3Hp ขนาดถังลม 260x700	
	แรงอัด 8 bar แรงลม 260 L/min	58
ข.7	เครื่องชั่งดิจิตอล รุ่น GPS-3001 พิกัดกำลัง 3000 g ความละเอียด 0.1 g	59
ข.8	หัวฉีด	59
ข.9	ชุดวัดความดันจากการกระแทก	59
ค.1	รอยเสียหายจากการยิ่งในอากาศ ที่ระยะห่างจากหัวฉีด 15 mm ครั้งที่ 1	61
ค.2	รอยเสียหายจากการยิ่งในอากาศ ที่ระยะห่างจากหัวฉีด 15 mm ครั้งที่ 2	61
ค.3	รอยเสียหายจากการยิงในอากาศ ที่ระยะห่างจากหัวฉีด 20 mm ครั้งที่ 1	61
ค.4	รอยเสียหายจากการยิงในอากาศ ที่ระยะห่างจากหัวฉีด 20 mm ครั้งที่ 2	62
ค.5	รอยเสียหายจากการยิ่งในอากาศ ที่ระยะห่างจากหัวฉีด 20 mm ครั้งที่ 3	62
ค.6	รอยเสียหายจากการยิงในอากาศ ที่ระยะห่างจากหัวฉีด 30 mm ครั้งที่ 1	62
ค.7	รอยเสียหายจากการยิ่งในอากาศแบบ ที่ระยะห่างจากหัวฉีด 30 mm ครั้งที่ 2	63
ค.8	รอยเสียหายจากการยิ่งในอากาศ ที่ระยะห่างจากหัวฉีด 40 mm ครั้งที่ 1	63
ค.9	รอยเสียหายจากการยิ่งในอากาศ ที่ระยะห่างจากหัวฉีด 40 mm ครั้งที่ 2	63
ค.10	รอยเสียหายจากการยิ่งในอากาศ ที่ระยะห่างจากหัวฉีด 50 mm ครั้งที่ 1	64
ค.11	รอยเสียหายจากการยิ่งในอากาศ ที่ระยะห่างจากหัวฉีด 50 mm ครั้งที่ 2	64
ค.12	รอยเสียหายจากการยิ่งในอากาศ ที่ระยะห่างจากหัวฉีด 50 mm ครั้งที่ 3	64
ค.13	รอยเสียหายจากการยิงในน้ำ ที่ระยะห่างจากหัวฉีด 30 mm ครั้งที่ 2	65
ค.14	รอยเสียหายจากการยิงในน้ำ ที่ระยะห่างจากหัวฉีด 40 mm ครั้งที่ 4	65

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

แรกเริ่มนักวิจัยให้ความสนใจศึกษาเกี่ยวกับลำพุ่งความเร็วสูง (high-speed liquid jet) เนื่องจาก ปัญหาการชนของเม็ดฝน (rain impact) กับยานยนต์ความเร็วสูง [1-8] ต่อมาได้ศึกษาลำพุ่งความเร็วสูงใน แง่มุมด้านวิศวกรรมอื่นๆ เช่น การศึกษาเกี่ยวกับ cavitation [9, 10] เครื่องดับเพลิง (fire extinguisher) เทคโนโลยีเกี่ยวกับการตัดโดยลำพุ่ง (jet cutting technology) การทำสะอาดวัสดุโดยลำพุ่ง (material cleaning by jets) การทำเหมืองแร่และการเจาะอุโมงค์โดยการกระแทกของลำพุ่งความเร็วสูง (mining and tunneling by means of high-speed jet impingements) [11-20] การฉีดน้ำมันในเครื่องยนต์ดีเซล [21-24] การฉีดน้ำมันแก็ซโซลีนในเครื่องยนต์แก๊ซโซลีน (direct injection gasoline engine, GDI engine) [25-28] และเครื่องยนต์ SCRAM jet (Supersonic Combustion Ram Jet engine, SCRAM jet engine)



รูปที่ 1 shadowgraph image of high-speed water jet injected into ambient air at jet velocity of 1,345 m/s (Mach number = 3.56) [37, 38]

จากงานวิจัยต่างๆ พบว่า ในแง่มุมของการเผาไหม้ (viewpoint of combustion) ลำพุ่งน้ำมันความเร็ว สูง มีส่วนช่วยให้การเผาไหม้มีสถรรนะดี ขึ้น เนื่องจากการแตกตัวเป็นฝอยละอองของน้ำมันและการผสม คลุกเคล้ากันกับอากาศดีขึ้น และในมุมมองของเทคโนโลยีการตัดโดยลำพุ่ง (viewpoint of jet cutting technology) ลำพุ่งความเร็วสูงสามารถตัดวัสดุที่มีความหนาหรือความแข็งแรงได้เป็นอย่างดี และยังสามารถ ทำความสะอาดวั สดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจาก Momentum energy ของลำพุ่งความเร็วสูงมีค่าสูง เพียงพอ อย่างไรก็ตาม สำหรับการผลิตลำพุ่งความเร็วสูงจนมีความเร็วอยู่ในช่วง supersonic หรือ hypersonic speed นั้น จะต้องใช้ความดันขับ (driving pressure) สูงมากถึงหลายร้อย MPa มีข้อจำกัดใน ด้านการผลิตและการเก็บความดันดังกล่าวในถังเก็บความดัน pressure vessel จากข้อจำกัดดังกล่าว จึงมีการ คิดค้นวิธีการผลิตลำพุ่งความเร็วสูงโดยวิธีที่เรียกว่า impact acceleration method หรือ Bowden and Brunton method [37, 38] จากนั้นเป็นต้นมาการศึกษาที่เกี่ ยวข้องกับลำพุ่งความเร็วสูง จะใช้หลักการนี้ ทั้งสิ้น

จากงานวิจัยต่างๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้นจะพบว่า มีเพียงการศึกษาเกี่ยวกับลำพุ่งความเร็วสูง (highspeed liquid jet) โดยฉีดเข้าไปในของไหลในสถานะแก็ส (gas phase) เช่น อากาศ เท่านั้น ดังรูปที่ 1 ซึ่งใน ปัจจุบัน มีนักวิจัยบางกลุ่มได้พยายามศึกษาการนำลำพุ่งความเร็วสูงมาประยุกต์ใช้กับด้านการแพทย์ [39-41] เช่น การฉีดยาแบบไม่ใช้เข็ม (needleless) โดยใช้ลำพุ่งความเร็วสูงของตัวยาฉีดเข้าไปในผิวหนังโดยตรง และ การรักษาการอุดตันของก้อนเลือดในเส้นเลือดในสมองโดยก ารฉีดลำพุ่งความเร็วสูงเข้าไปกระแทกทำลายเม็ด เลือด นอกจากนี้แล้วยังมีแนวคิดนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมใต้สมุทร [42, 43] เช่น การตัดโครงสร้างใต้ ทะเลโดยลำพุ่งความเร็วสูง (jet cutting marine structures) หรือการเจาะใต้ทะเล (jet drilling at the bottom of the sea) จากทิศทางการประยุกต์ใช้ในปัจจุบันพบว่า ไม่เพียงแต่ลำพุ่งความเร็วสูงที่ฉีดเข้าในไป ในของไหลสถานะแก็ส (อากาศ) เท่านั้น แต่ยังมีความพยายามนำไปประยุกต์ใช้ในกรณีที่ฉีดลำพุ่งความเร็วสูง ในของไหลสถานะแก็ส (อากาศ) เท่านั้น แต่ยังมีความพยายามนำไปประยุกต์ใช้ในกรณีที่ฉีดลำพุ่งความเร็วสูง ในของไหลในสถานะของเหลว (liquid phase) เช่น น้ำ เป็นต้น แต่คุณลักษณะที่สำคัญของลำพุ่งความเร็วสูงที่ ฉีดในของเหลวซึ่งประกอบไปด้วย คุณลักษณะของการกระแทกของลำพุ่ง รูปร่างของลำพุ่ง ความเร็วของลำพุ่ง (jet velocity) ระยะการพุ่งเข้าไปในของเหลว (penetration distance) และอื่นๆ ยังไม่มีงานวิจัยใดกล่าวถึง หรือรายงานมาก่อนเลย

ผู้ขอทุนวิจัยหวังจะใช้ความรู้เกี่ยวกับลำพุ่งความเร็วสูง (high-speed liquid jet) ที่ผู้ขอทุนวิจัยได้ศึกษา มาในระดับปริญญาเอก เข้ามาช่วยอธิบายคุณลักษณะการกระแทกและพฤติกรรมต่างๆ ของลำพุ่งความเร็วสูง กรณีที่ฉีดในของเหลว (น้ำ) ซึ่งเชื่อว่า องค์ความรู้ใหม่ที่จะได้รับหลังเสร็จสิ้นงาน วิจัยนี้จะเป็นข้อมูลสำคัญใน การประยุกต์ใช้ในงานด้านการแพทย์ต่างๆ อาทิ การออกแบบอุปกรณ์ทางการแพทย์ในการผลิตลำพุ่งความเร็ว สูงที่มีศักยภาพเพียงพอในการรักษาการอุดตันของเม็ดในเส้นเลือดและอื่นๆ รวมไปถึงเป็นข้อมูลสำคัญในการ บ่งบอกศักยภาพของลำพุ่งความเร็วสูง และการป ระยุกต์ใช้งานได้จริงในอุตสาหกรรมใต้สมุทรหรือการ ประยุกต์ใช้ในเทคโนโลยีเกี่ยวกับการตัดโดยลำพุ่ง (jet cutting technology) การทำสะอาดวัสดุโดยลำพุ่ง (material cleaning by jets) ในน้ำหรือของเหลวชนิดอื่นๆ ในอนาคตอันใกล้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.ออกแบบ ปรับปรุงและทดสอบชุดทดลองยิงกระสุนความเร็วสูง (high-speed projectile) เพื่อให้มี ความเหมาะสมในการผลิตลำพุ่งความเร็วสูง (high-speed jet) โดยวิธี impact acceleration method

2. ผลิตลำพุ่งความเร็วสูง (high-speed liquid jet) เมื่อฉีดในของเหลว (น้ำ)

 อธิบายคุณลักษณะการกระแทกและพฤติกรรมต่างๆ ของลำพุ่งความเร็วสูง เมื่อฉีดในของเหลว (น้ำ) และคุณลักษณะที่แตกต่างของลำพุ่งความเร็วสูงเมื่อฉีดภายใต้ของไหลในสถานะแก็ส (อากาศ)

 4. ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อคุณลักษณะการกระแทกของลำพุ่งความเร็วสูง เมื่อฉีดใน ของเหลว (น้ำ)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.ออกแบบ ปรับปรุงสมรรถนะ (ballistic performance) และทดสอบชุดทดลองยิงกระสุนความเร็วสูง (high-speed projectile) ที่ใช้ในการผลิตลำพุ่งความเร็วสูง (high-speed jet) โดยวิธี impact acceleration method ให้มีความเหมาะสมกับกรณีฉีดในของเหลว (น้ำ)

 ทดลองฉีดลำพุ่งความเร็วสูงเข้าไปในอากาศเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานของคุณลักษณะของลำพุ่ง ความเร็วสูง

3. ทดลองฉีดลำพุ่งความเร็วสูงในของเหลว (น้ำ) โดยในการทดลองนั้นมีตัวแปร (parameters) หลักใน การศึกษา คือ ความเร็วในการกระแทกของกระสุนความเร็วสูง (projectile impact velocity) ชนิดของ ของเหลวของลำพุ่ง (type of liquid jet) ซึ้งชนิดของของเหลว เช่น น้ำ น้ำมัน เป็นต้น และพารามิเตอร์ที่ สนใจ คือ ความดันของการกระแทกของลำพุ่ง (impact pressure) หรือโมเมนต์ตัมของลำพุ่ง ลักษณะการ กระแทกของลำพุ่ง และรอยเสียหายวัสดุที่เกิดจากลำพุ่งความเร็วสูงในของเหลว

1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

1. ทำการสำรวจผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature survey) อย่างละเอียด

 ทำการออกแบบ ปรับปรุงสมรรถนะ (ballistic performance) และทดสอบชุดทดลองยิ่งกระสุน ความเร็วสูง (high-speed projectile) ที่ใช้ในการผลิตลำพุ่งความเร็วสูง (high-speed jet) โดยวิธี impact acceleration method

3. ทดสอบผลิตลำพุ่งความเร็วสูงกรณีฉีดลำพุ่งความเร็วสูงเข้าไปในอากาศ

4. สรุปผลการทดลอง กรณีฉีดลำพุ่งความเร็วสูงเข้าไปในอากาศ

5. ทดสอบผลิตลำพุ่งความเร็วสูงกรณีฉีดลำพุ่งเข้าไปในของเหลว (น้ำ)

6. กำหนด parameters ต่างๆ ชนิดของเหลวของลำพุ่ง ความเร็วของกระสุนปืน ที่มีอิทธิพลต่อ คุณลักษณะการกระแทกของลำพุ่งความเร็วสูง

7. อาจจะมีการแก้ไขปรับปรุงในหลายๆ จุด และทดสอบเพิ่มเติม

8. สรุปผลการศึกษา

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. รู้ถึงคุณลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูง (high-speed jet) เมื่อฉีดในของเหลว (น้ำ)

2. รู้ถึงตัวแปร (parameters) ต่างๆ ที่มีผลต่อคุณลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูง (high-speed jet) เมื่อฉีดในของเหลว (น้ำ)

3. อาจจะค้นพบ nozzle geometries ที่แปลกใหม่ที่เหมาะกับงานในแต่ละด้านทั้งในทางวิศวกรรม แพทย์ศาสตร์ หรืออื่นๆ

 สามารถพัฒนาเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับงานด้านการแพทย์ อุตสาหกรรมใต้สมุทร เทคโนโลยีการตัด (cutting technology) ในน้ำ และงานด้านอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องได้จริง

5. ได้วารสารวิชาการในประเทศหรือต่างประเทศอย่างน้อย 1 ฉบับ หรือการเผยแพร่ในการประชุม วิชาการในประเทศหรือต่างประเทศอย่างน้อย 2 ฉบับ

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความเร็วเสียง (Speed of sound)

ความเร็วเสียง [44] คือ ระยะทางที่เสียงเดินทางไปในตัวกลางใดๆ ได้ในหนึ่งหน่วยเวลา โดยทั่วไป เสียงเดินทางในอากาศที่มีอุณหภูมิ 25℃ ที่ความเร็วเท่ากับ 346 m/s และในอากาศที่อุณหภูมิ 20℃ ที่ ความเร็วเท่ากับ 343 m/s ความเร็วที่เสียงเดินทางได้นั้นอาจมีค่ามากขึ้นหรือน้อยลงขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิของ ตัวกลางเป็นหลัก และอาจได้รับอิทธิ พลจากความชื้นบ้างเล็กน้อย แต่ไม่ขึ้นกับ ความดันอากาศ เนื่องจากการ เดินทางของเสียงอาศัยการสั่นของโมเลกุลของตัว กลาง ดังนั้นเสียงจะเดินทางได้เร็วขึ้นหากตัวกลางมี ความ หนาแน่นมาก ทำให้เสียงเดินทางเร็วในของแข็ง แต่เดินทางไม่ได้ในอวกาศ เพราะอวกาศเป็น สุญญากาศจึงไม่มี โมเลกุลของตัวกลางอยู่ความเร็วเสียง (*C*) โดยทั่วไปคำนวณหาได้จาก

$$C = \sqrt{\frac{c}{\rho}} \tag{2.1}$$

เมื่อ

c คือ สัมประสิทธิ์ของความแข็งเกร็ง (coefficient of stiffness)

 คือ ความหนาแน่น

้ดังนั้น ความเร็วเสียง จะเพิ่มขึ้นตามความแข็งเกร็งของวัสดุ และ ลดลงเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น

2.1.1 ความเร็วเสียงในแก๊ส

ค่า c ในตัวกลางสถานะแก๊สสามารถประมาณโดย

$$c = \gamma p \tag{2.2}$$

เมื่อ

arsigma คือ ดัชนีอะเดียบาติก (adiabatic index) p คือ ความดัน

ดังนั้น ความเร็วเสียงในแก๊สสามารถคำนวณได้โดย

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

ในกรณี แก๊สในอุดมคติ (Ideal gas) จะได้

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

เมื่อ

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (gas constant) (287.05 J/(kg.K) สำหรับอากาศ) ปกติ ในทางอากาศพลศาสตร์ค่านี้หาจาก การหารค่าคงที่ของ แก๊สสากล *R* (J/(mol.K)) ด้วย ค่ามวลโมล (molar mass)

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

T คือ ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) ที่สภาพบรรยากาศมาตรฐาน (Standard atmosphere)

ในกรณีของแก้สในอุดมคติความเร็วเสียง C จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเท่านั้น โดยไม่ขึ้น อยู่กับความ ดัน สำหรับอากาศนั้นเกือบ ถือได้ว่าเป็น แก๊สในอุดมคติอุณหภูมิของอากาศเปลี่ยนแปลงตามระดับความสูง เป็นผลให้ความเร็วของเสียงที่ระดับความสูงต่างๆ นั้นแตกต่างกัน ดังแสดงในตางรางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความเร็วเสียงในแก๊สอุดมคติ [44]

ระดับความสูง	อุณหภูมิ	m/s	km/h	mph	knot
ระดับน้ำทะเล	15 ℃ (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

ของเหลวจะมีความแข็งเกร็งต่อแรงอัดเท่านั้น โดยไม่มีความแข็งเกร็งต่อแรงเฉือน ดังนั้นความเร็วของ เสียงในของเหลวหาได้โดย

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

เมื่อ

K คือ โมดูลัสของการอัดอะเดียบาติก (adiabatic bulk modulus)

2.1.3 ความเร็วเสียงในของแข็ง

ของแข็งนั้นมีค่าความแข็งเกร็งไม่เป็นศูนย์ ทั้งต่อแรงบีบอัด หรือการเปลี่ยนปริมาตร (volumetric deformation) และแรงเฉือน (shear deformation) ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะกำเนิดคลื่นเสียงที่มีความเร็ว ต่างกันขึ้นกับรูปแบบของคลื่นในแท่งของแข็งซึ่งมีขนาดความหนา (หรือขนาดของตัวกลางในแนวตั้งฉากกับ การเคลื่อนที่ของคลื่น) เล็กกว่าความยาวคลื่นมาก ความเร็วเสียงหาได้จาก

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

โดย

E คือ โมดูลัสของยัง ho คือ ความหนาแน่น

ดังนั้น ความเร็วเสียงในตัวกลางในเหล็กจะมีค่าประมาณ 5,100 m/s ความเร็วของเสียงสามารถหาได้ จากการแทนค่าโมดูลัสของยังด้วยโมดูลัสคลื่นหน้าราบ (plane wave modulus) ซึ่งหาได้จาก โมดูลัสของยัง และ อัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's ratio)

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

ดังนั้น ความเร็วของเสียง

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

สำหรับคลื่นตามขวาง (transverse wave) นั้นโมดูลัสของยัง E จะถูกแทนด้วยค่าโมดูลัสของแรง เฉือน (shear modulus) G

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

จะเห็นได้ว่า ความเร็วของเสียงในของแข็ง จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของตัวกลางเท่านั้น โดยไม่ ขึ้นกับอุณหภูมิของแข็ง เช่น เหล็ก สามารถนำคลื่นด้วยความเร็วที่สูงกว่าอากาศมาก

ในตัวกลางที่ไม่มีการกระจาย (non-dispersive medium) ความเร็วเสียงไม่ขึ้นกับความถี่ ดังนั้น ความเร็วในการส่งถ่ายพลังงานและความเร็วในการเคลื่อนที่ของเสียงนั้นมีค่าเท่ากันในย่านความถี่เสียงที่มนุษย์ สามารถได้ยินนั้น อากาศมีคุณสมบัติเ ป็นตัวกลางที่ไม่มีการกระจาย แต่จะสังเกตว่า *CO*₂ ในอากาศนั้นเป็น ตัวกลางที่มีการกระจายและทำให้เกิดการกระจายสำหรับคลื่นเสียงความถี่สูง (28 KHz) ในตัวกลางที่มีการ กระจาย (dispersive medium) ความเร็วเสียงจะขึ้นกับความถี่ องค์ประกอบที่แต่ละความถี่จะเดินทางด้วย ความเร็วเฟส (phase velocity) ที่แตกต่างกัน ส่วนพลังงานของเสียงจะเดินทางด้วยความเร็วที่ความเร็วกลุ่ม (group velocity) ตัวอย่างของตัวกลางที่มีการกระจาย คือ น้ำ

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

ตารางที่	2.2	ความเร็วเสียงในตัวกลางที่อุณหภูมิ	20	°C [44]
		1 1		

2.1.4 ความเร็วเสียงในอากาศ

ความเร็วของเสียงในอากาศโดยประมาณหาได้จาก

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

โดยที่ *t* คือ อุณหภูมิ ในหน่วย [°]C ความแม่นยำในการประมาณในช่วงของอุณหภูมิในช่วง -20 °C ถึง 40 °C จะมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 0.2% ในช่วงอุณหภูมิสูงกว่า หรือ ต่ำกว่านั้นความเร็วของเสียง

จะประมาณจากสมการที่ 2.11 และตัวอย่างความเร็วเสียงในตัวกลางต่างๆ แสดงในตารางที่ 2.2

$$C_{air} = 331.5\sqrt{1 + \frac{t}{273}} \tag{2.11}$$

2.2 เลขมัค (Mach number)

เลขมัค (Mach number) คือ สัดส่วนของ ความเร็ววัตถุต่อความเร็วเสียง เลขมัคปกติจะใช้กับวัตถุที่ เดินทางด้วยความเร็วสูงในของไหลและของเห ลวที่ไหลด้วยความเร็วสูงในช่องแคบๆ หรือ อุโมงค์ลม และ เนื่องจากเป็นสัดส่วนของความเร็ว ดังนั้น เลขมัคจึงเป็นเทอมไม่มีหน่วย โดยที่สภาวะระดับน้ำทะเลมาตรฐาน มัค 1 เท่ากับความเร็ว 1,225 km/hr เนื่องจากความเร็วเสียงนั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น นอกจากนี้อาจ พบว่าเลขมัคนั้นยังเป็นสัดส่วนของแรงเฉื่อย (แรงอากาศพลศาสตร์) ต่อแรงยืดหยุ่น (elastic force)

$$\mathbf{M}_a = \frac{V}{V_0} \tag{2.12}$$

เมื่อ

 \mathbf{M}_{a} คือ เลขมัค (Mach number)

V คือ ความเร็ววัตถุ

 V_0 คือ ความเร็วของเสียงในตัวกลาง

หากนิยามความเร็วตาม Mach number จะสามารถแบ่งประเภทของความเร็วเป็นช่วงได้ดังนี้

 $\mathbf{M}_a < 1$ เรียกว่า Subsonic เป็นช่วงของความเร็วที่ต่ำกว่าความเร็วเสียง

M_a =1 เรียกว่า Sonic เป็นช่วงของความเร็วเสียง

 $0.8 < {
m M}_a < 1.2$ เรียกว่า Transsonic เป็นช่วงของความเร็วย่านเสียงเป็นความเร็วที่อยู่ประมาณ ความเร็วเสียง

1.2 < M_a < 5 เรียกว่า Supersonic เป็นช่วงของความเร็วที่เหนือหรือมากว่าความเร็วเสียง

 $\mathbf{M}_a > 5$ เรียกว่า Hypersonic เป็นช่วงของความเร็วเหนือเสียงมาก มากกว่า 5 เท่าขึ้นไป



ร**ูปที่ 2.1** (a) กระแสลมที่ค่าของ \mathbf{M}_a <1 และ (b) กระแสลมที่ค่าของ \mathbf{M}_a >1

2.3 คลื่นกระแทก (shock wave)

คลื่นกระแทกเกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่ได้เท่ากับความเร็วของคลื่นหรือเร็วกว่า ซึ่งจะ ทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่สันคลื่นไม่สามารถที่จะเคลื่อนที่ออกไปจากแหล่งกำเนิดเสียง ได้ โดยถ้าแหล่งกำเนิด เคลื่อนที่ได้เท่ากับความเร็วของคลื่น สันคลื่นจะเกิดการซ้อนทับกันและเสริมกันกลายเป็นแอมพลิจูดขนาดใหญ่ เรียกว่า คลื่นกระแทก (shock wave) และเมื่อแหล่งกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่เร็วกว่าคลื่น สันคลื่นจะฟอร์มตัวเป็น รูปกรวยโดยมีมุม $\theta = \sin^{-1}(V/V_0)$ อัตราส่วน (V/V_0) เรียกว่า เลขมัค (Mach number) คลื่นกระแทก เกิดขึ้นได้บ่อยมากในสถานการณ์ต่างๆ กัน เช่น โซนิกบูม (Sonic boom) คือ คลื่นกระแทกประเภทหนึ่งของ เครื่องบินที่บินด้วยความเร็วเหนือเสียง คลื่นที่เกิดหลังเรือเร็วก็เป็นคลื่นกระแทกอีกประเภทหนึ่ง นอกอวกาศก็ สามารถจะเกิดคลื่นกระแทกได้อย่างเช่น ลมสุริยะที่วิ่งด้วยความเร็วสูงเข้าชนสนามแม่เหล็กโลก เป็นต้น



ร**ูปที่ 2.2** คลื่นกระแทก (shock wave)

เมื่อแหล่งกำเนิดเสียงเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วเสียง (*V* = *V*₀ หรือ Mach no เท่ากับ 1) หน้าคลื่นทางขวาจะถูกอัดกันอยู่ทางด้านหน้าเป็นแนวเส้นโค้ง ทำให้หน้าคลื่นเกิดการแทรกสอดแบบเสริม กัน ความดันของคลื่นเพิ่มขึ้นอย่างมาก เรียกว่า คลื่นกระแทก (shock wave) ตัวอย่างคลื่นกระแทกแสดง ดัง รูปที่ 2.3 เป็นการเคลื่อนที่ของกระสุนปืนที่วิ่งด้วยความเร็วสูง



รูปที่ 2.3 คลื่นกระแทกเป็นแนวโค้ง [44]

การศึกษาคุณลักษณะการกระแทกของลำพุ่งความเร็วสูงภายในของเหลว | ${f 10}$



รูปที่ 2.4 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงสภาวะต่างๆ ข้ามคลื่นกระแทกตั้งฉาก [45]



ร**ูปที่ 2.5** ภาพถ่ายของ normal shock wave [45]

จากข้อมูลที่ได้จากการวิจัยต่างๆ พบว่า ภายใต้บางสภาวะมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดการ เปลี่ยนแปลงของการไหลขึ้นเกือบจะทันที โดยมีการลดลงของความเร็วและการเพิ่มขึ้นของความดันอย่าง ฉับพลันตลอดช่วงการเปลี่ยนแปลงของการไหลนั้น การที่จะเกิดบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบอย่างฉับพลัน (region of sharp change) ของของไหลได้นั้นความเร็วเริ่มต้นของของไหลจะต้องมีค่าเท่ากับความเร็วเสียง บริเวณที่มีความบางมากๆ ที่อยู่ระหว่างการเปลี่ยนแปลงจากสภาวะของการไหลที่มีความเร็วเหนือเสียงและ ความดันต่ำไปยังสภาวะที่มีความเร็วต่ำและความดันสูง เรียกว่า คลื่นกระแทก (shock wave) คลื่นกระแทกที่ มีลักษณะเป็นเส้นตรงทำมุมตั้งฉากกับทิศทางการไหลเรียกว่า คลื่นกระแทกตั้งฉาก (normal shock wave) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.4 และภาพถ่ายของ normal shock wave แสดงดังรูปที่ 2.5

คลื่นกระแทกมีความคล้ายคลึงกับลักษณะของการเกิด Hydraulic jump ซึ่งจะเกิดขึ้นในการไหล แบบผิวอิสระ (free surface flow) ลักษณะการเกิด Hydraulic jump แสดงดังรูปที่ 2.6 ตัวอย่างของการเกิด Hydraulic jump คือ การไหลของกระแสน้ำในเขื่อนหรือทำนบ



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

โดยทั่วไปคลื่นกระแทกจะมีลักษณะโค้ง (curved shock wave or bow shock) แต่ก็มีจำนวน มากที่มีลักษณะตรงทำมุม 90° กับทิศทางการไหล (normal shock wave) และเอียงทำมุมกับทิศทางของ การไหล (oblique shock wave) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ในกรณีของ normal shock wave ความเร็วหน้าและ หลังคลื่นกระแทกจะทำมุม 90[°] กับคลื่นกระแทก ในกรณีของ oblique shock wave เกิดจากการเปลี่ยนทิศ ของความเร็วหน้าคลื่นกระแทก ดังแสดงใน รูปที่ 2.8 คลื่นกระแทกที่สมบูรณ์แบบอาจจะประกอบด้วย normal shock wave , curved shock wave และ oblique shock wave ดังแสดงในรูปที่ 2.9



ร**ูปที่ 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 อย่างไรก็ตามในหัวข้อนี้จะพูดถึงชนิดของชุดยิงที่ใช้กันมากในงานวิจัยปัจจุบันโดยจะจำแนกชนิดของชุดยิงหรือ ปืนออกตามแหล่งพลังงานของตัวขับดันกระสุนซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.4.1 ชุดยิงกระสุนแบบใช้แก็สเบา (light gas gun)

ชุดยิงกระสุนแบบนี้จะใช้แก๊สเบา (light gas) เช่น ไฮโดรเจน (*H*₂) หรือ ฮีเลียม (*He*) เป็นพลังงานใน การขับ ดังนั้นชุดยิงชนิดนี้จึงเรียกว่า light gas gun โดยส่วนประกอบหลักของปืนชนิดนี้คือ ถังเก็บความดันสูง (high pressure reservoir) แผ่นฟิล์มบาง (diaphragm) และ ท่อปล่อยกระสุน (launch tube) หรือ ลำกล้องปืน (gun barrel) กระสุนปืน (projectile) โดยทั่วไปจะสอดอยู่ทางออกของลำกล้องปืนติดกับแผ่น diaphragm แก็สเบาที่ใช้เป็นตัวขับจะบรรจุอยู่ภายใน reservoir ซึ่งแก๊สดังกล่าวจะทำให้เพิ่มความร้อนและ ความดันได้จากหลายวิธีเช่น จากการเผาไหม้ (combustion) จากแหล่งความร้อนภายนอก (external heat) จากการชาร์จประจุ (electric charge) จาก shock wave และจากการดันตัวของ piston (piston compress) ทันทีที่ความดันของแก็สเบาเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั้งความดันแผ่น diaphragm ทนรับไม่ได้ แผ่น diaphragm จะขาดความดันภายใน high pressure reservoir จะขับหรือเร่งความเร็วของกระสุน ดังรูปที่ 2.10 หากประยุกต์กฎของการเคลื่อนที่ของนิวตัน จะสามารถหาความเร็วที่เกิดขึ้นในลำกล้องปืนได้

$$m\frac{dv_{\rm p}}{dt} = m\frac{dv_{\rm p}}{dx}v_{\rm p} = PA \tag{2.13}$$

เมื่อ

m คือ น้ำหนักของกระสุน
 v_p คือ ความเร็วของกระสุน ณ ตำแหน่ง *x* ใดๆ
 P คือ ความดัน
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของลำกล้องปืน



รูปที่ 2.10 แผนภาพส่วนประกอบของ Single-stage light gas gun

หากอินทิเกรตตลอดความยาวของลำกล้องปืน (L) จะได้

การศึกษาคุณลักษณะการกระแทกของลำพุ่งความเร็วสูงภายในของเหลว | 14

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

เมื่อ

 v_0 คือ ความเร็วของกระสุนที่ทางออกของลำกล้องปืน

เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาจะกำหนดให้ \overline{P} มีค่าคงที่ตลอดการเคลื่อนที่ของกระสุนในลำกล้องปืน ซึ่งมีค่าเป็น

$$v_o = \sqrt{2\overline{P}\frac{AL}{m}} \tag{2.15}$$

โดยสมการนี้จะมีค่าความผิดพลาดเนื่องมาจากสาเหตุหลักคือความเสียดทานระหว่างกระสุน ปืนกับ ภายในลำกล้องปืน และในความเป็นจริงค่าของ \overline{P} จะมีค่าไม่คงที่เนื่องจากการเพิ่มปริมาตรมากขึ้นตามการ เคลื่อนที่ของกระสุน ซึ่งความดัน \overline{P} ดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับแก๊สเบาและความดันภายใน Pressure reservoir (P_0) ถ้าพิจารณาเป็นแก็สอุดมคติ (idea gas) ซึ่งมีค่าความดันเป็น P_0 และความเร็วเสียง (sound speed) เป็น C ดังนั้นความดันของ P ในขณะแก็สขยายตัวจะมีความสัมพันธ์เป็น

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

เมื่อ

 v_{g} คือ ความเร็วของการขยายของแก็ส

 γ คือ Ratio of the specific heats

ถ้าสมการที่ 2.16 ใช้ในการหาค่าความเร็วแก็สหลังกระสุนปืน จะได้อัตราส่วนของ P/P_0 จะขึ้นอยู่กับ

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

จากกระบวนการทำงานแก็สจะขยายตัวจาก high pressure reservoir ซึ่งเป็นการแปลงพลังงานที่ สะสมภายใน high pressure reservoir เพื่อไปขับหรือเร่งความเร็วของกระสุน ความเร็วสูงสุดของการไหล ของแก็สจะเกิดขึ้นเมื่อแก็สแปลงพลังงานทั้งหมดที่มีให้กับการขับดันหรือเร่งความเร็วของกระสุน ปืน ซึ่งความ ดันของแก็สจะลดลงเป็นศูนย์ โดยที่ความเร็วจะคำนวณได้จาก

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

ค่าความเร็วสูงสุดที่ทางออก คือ Escape velocity (v_{esc}) มีค่าเท่ากับ

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

เมื่อ

 T_0 คือ อุณหภูมิภายใน pressure reservoir

 M_{mol} คือ มวลโมเลกุลของแก็สภายใน pressure reservoir

R คือ universal gas constant

ซึ่งความสัมพันธ์นี้แสดงว่า light gas gun จะมีความเร็วสูงก็ต่อเมื่อใช้แก็สที่มีค่ามวลโมเลกุลต่ำและ แก็สจะต้องมีอุณหภูมิสูง

2.4.2 ชุดยิ่งกระสุนแบบใช้แก็สเบาแบบสองช่วง (two stage light gas gun)

เมื่อใช้ลูกสูบ (piston) กดอัดให้แก็สที่ใช้ขับกระสุน (driver gas) มีความดันและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ชุด ยิงกระสุนแบบนี้จะเรียกว่า ชุดยิงกระสุนแบบใช้แก็สเบาแบบสองช่วง (two stage light gas gun) ซึ่งเป็นปืน ที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง ดัง รูปที่ 2.11 แสดงส่วนประกอบพื้นฐานของ piston-powered two-stage light gas gun โดยที่แก็สเบาถูกบรรจุอยู่ภายในท่อที่มีผนังหนาและเรียบซึ่งโดยทั่วไปจะถูกเรียกว่า pump tube โดยที่ด้านหนึ่งจะถูกปิดโดยลูกสูบ (piston) และอีกด้านหนึ่งจะปิดโดย steel diaphragm



ร**ูปที่ 2.11** แผนภาพส่วนประกอบของ two stage light gas gun

2.4.3 ชุดยิงกระสุนแบบใช้ดินปืน (powder gun)

ชุดยิงกระสุนชนิดนี้จะใช้ชุดปืนทดลองแทนแก๊สซึ่งมีหลักการทำงานคือ ใช้แรงของปืนในการขับ กระสุนปืนโดยมีดินปืนเป็นเชื้อเพลิง

จากรูปที่ 2.12 สามารถอธิบายการทำงานตามหมายเลขได้ดังนี้

- (1) เริ่มมีการจุดชนวนห้องเผาไหม้
- (2) เริ่มมีการเผาไหม้
- (3) มีแรงดันจากการเผาไหม้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว
- (4) ห้องเผาไหม้เกิดแรงดันประมาณ 14-68 MPa

- (5) กระสุนปืนเริ่มมีการเคลื่อนที่จากอิทธิพลของแรงดัน
- (6) มีแรงต้านการเคลื่อนที่ของกระสุนปืน
- (7) ความดันเริ่มสูงขึ้นจากอัตราการเผาไหม้ที่มากขึ้น
- (8) กระสุนปืนเคลื่อนที่มากขึ้นและปริมาตรห้องเผาไหม้มากขึ้น
- (9) เกิดแรงหมุนตัวของกระสุนปืนที่เกิดจากแรงดันสูงสุดจากการเผาไหม้สมบูรณ์



รูปที่ 2.12 แผนภาพการทำงานของ powder gun

2.5 เทคนิคการถ่ายภาพ (visualization technique) [45]

เทคนิคการถ่ายภาพที่นิยมใช้ในการวิจัย สามารถแบ่งออกได้ 3 เทคนิค คือ

- 1. เทคนิคชาโดวกราฟ (Shadowgraph technique)
- 2. เทคนิคชไรเรน (Schleren technique)
- 3. เทคนิคอินเทอเฟอโรมิเตอร์ (Interferometer technique)

โดยทั้ง 3 เทคนิคอาศัยหลักการหักเหของลำแสงเมื่อผ่านแก๊สที่มีความหนาแน่นเปลี่ยนแปลง โดยดัชนี การหักเหของแสงจะเป็นฟังก์ชั่นความหนาแน่นของแก๊สดังสมการที่ 2.20

n = function (
$$\rho$$
) (2.20)

หรือสามารถประมาณเป็นสมการเส้นตรง คือ

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

เมื่อ

ρ_s = ความหนาแน่นของแก๊สที่ 0° C ที่ความดันบรรยากาศ
 β = เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของแก๊ส ดังตารางที่ 2.3

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

ตารางที่ 2.3 ค่าคงที่ของแก๊ส [45]

ดังนั้นหากพิจารณาว่า ความหนาแน่นของ แก๊สเปลี่ยนแปลงไปในแนวแกน y (*d p* / *dy*) จะได้ว่า ดัชนีการหักเหของแสงก็จะเปลี่ยนแปลงในแนวแกน y (*dn* / *dy*) เช่นกัน โดยหลักการถ่ายภาพของแต่ละวิธีมี รายละเอียดดังนี้

2.5.1 การถ่ายภาพด้วยเทคนิคชาโดวกราฟ (Shadowgraph techniqud)

เมื่อพิจารณาการฉายแสงผ่านแก๊สในห้องทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.13 ลำแสงจะเกิดการหักเหเนื่องจาก การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของ แก๊ส ถ้าวางจอรับแสงเพื่อแสดง รูปที่เกิดจากการหักเหของแสงที่เคลื่อนที่ ผ่านแก๊สมาจะพบว่า ลำแสงจะเกิดการหักเหโดยบางส่วนจะรวมกันแสงที่ปรากฏที่จอจะสว่างมากกว่าปกติ ในขณะที่เมื่อลำแสงกระจายออกจากกัน แสงที่ปรากฏจะมืด ดังแสดงในรูปที่ 2.13







ร**ูปที่ 2.14** การสร้างภาพด้วยเทคนิค Shadowgraph

ถ้าพิจารณาการเบี่ยงเบนของลำแสงที่แสดงใน รูปที่ 2.13 จะพบว่า ลำแสงที่ส่องผ่าน แก๊สนั้น ถ้าไม่มี เลนส์ที่ทำให้แสงขนานกันภาพที่ปรากฏบนจอรับภาพจะมีขนาดที่ใหญ่กว่าขนาดของจริง ดังนั้นหากใช้เลนส์จะ ทำให้ภาพที่ขึ้นที่จอรับภาพมีขนาดเท่ากับขนาดจริง จากสมการของการหักเหของแสงในสมการที่ 2.20 จะ พบว่า การถ่ายภาพ ด้วยเทคนิค Shadowgraph จะไวต่อความหนาแน่นที่เปลี่ยน แปลงด้วย ความสัมพันธ์ $d^2\rho/dy^2$ เช่นเดียวกับดัชนีหักเหของแสง d^2n/dy^2 โดยในธรรมชาตินั้นจะสามารถ พบลักษณะของภาพ แบบ Shadowgraph ได้ เช่น แสงแวววาวจากหลังคาที่ร้อนในฤดูร้อนทำให้เกิดภาพการไหลของความร้อน ถึงแม้ว่าจะไม่มีควันบริเวณหลังคา โดยภาพที่เห็นดังกล่าว คือ ภาพแบบ Shadowgraph โดยที่ดวงอาทิตย์ใน ภาพนี้เป็นแหล่งกำเนิดของแสง

2.5.2 การถ่ายภาพเทคนิคชไรเรน (Schlieren technique)

หลักการพื้นฐานของ การถ่าย ภาพด้วยเทคนิค Schlieren แสดงใน รูปที่ 2.15 คือ เมื่อ แสงจาก แหล่งกำเนิดแสงเดินทางผ่านเลนส์ จะทำให้ลำแสงมีทิศทางขนานกันผ่านห้องทดสอบ จากนั้นจะส่องผ่านเลนส์ อีกอันซึ่งทำหน้าที่รวมแสงไปยังจุดโฟกัสซึ่ง ณ บริเวณนี้จะมี knife-edge วางติดตั้งอยู่ โดย Knife-edge จะ ทำหน้าที่ตัดแสงที่รบกวนออกไป ลำแสงที่ผ่าน Knife-edge จะสว่างมากขึ้นจึงทำให้ รูปที่ปรากฏออกมานั้นมี ความคมชัดมากขึ้น ดังรูปที่ 2.16 แสดงหลักการทำงานของ Knife-edge



รูปที่ 2.15 พื้นฐานการจัดระบบชไรเรน (Schlieren)







รูปที่ 2.17 ผลจากการเปลี่ยนทิศทางของคมมีด



ร**ูปที่ 2.18** ระบบชไรเรนกับกระจกสะท้อน (Schlieren system with mirrors)

รูปที่ 2.17 แสดงผลจากการเปลี่ยนทิศทางของ knife-edge เมื่อต้องการสังเกตการเปลี่ยนแปลงความ หนาแน่นของ แก๊สในแนวแกน y ให้ปรับ knife-edge ให้อยู่ในแนวแกน x และเมื่อ ต้องการสังเกตการ เปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของ แก๊สในแนวแกน x ให้ปรับ knife-edge ให้อยู่ในแนวแกน y นอกจากจะใช้ เลนส์ในการทำให้แสงที่ส่องผ่านห้องทดสอบขนานแล้วยังสามารถใช้กระจกโค้ง (Parabolic mirror) ได้ซึ่งจะ สามารถช่วยลดขนาดพื้นที่ที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในรูปที่ 2.18

2.5.3 การถ่ายภาพด้วยเทคนิคอินเทอเฟอโรมิเตอร์ (interferometer system)

จากรูปที่ 2.19 แสดงการแยกลำแสงเป็นสองทิศทาง โดย splitter plate ซึ่ง splitter plate จะมี คุณสมบัติเป็นกระจกสามารถสะท้อนแสงบางส่วนที่ตกกระทบและสามารถส่องทะลุผ่านได้ในบางส่วน จึงทำให้ เกิดการเดินทางของแสงออกเป็นสองเส้นทาง หาก ทำให้ลำ แสงทั้งสองขนานกัน ดังรูป ซึ่ง ลำแสงสองลำมี ระยะทางในการเดินทางต่างกัน จึงทำให้เฟสต่างกัน เมื่อนำลำแสงทั้งสองมาส่องผ่านเลนส์เพื่อรวมแสง จะทำให้ เกิดบริเวณมืดและสว่างบนจอรับแสง ที่เรียกว่า Fringes โดยหลักการดังกล่าวคือ หลักการพื้นฐานของการ ถ่ายภาพด้วยเทคนิคอินเทอเฟอโรมิเตอร์



ร**ูปที่ 2.19** ระบบอินเทอเฟอโรมิเตอร์ขั้นพื้นฐานโดยการใช้ beam splitter



รูปที่ 2.20 Mach-Zenhnder interferometer.

หากเพิ่มลำแสง อีกคู่หนึ่งให้ส่องผ่าน แก๊สที่มีความหนาแน่นเปลี่ยนแปลง ในห้องทดสองดังรูปที่ 2.20 ลำแสงดังกล่าวจะมี เวลาในการเดินทาง ที่แตกต่างกัน ออกไป เป็นผลให้รูปแบบ Fringes ที่เกิดขึ้นที่เกิดขึ้น แตกต่างกันไปด้วย เมื่อนำลำแสงทั้งสองฉายลงบนจอรับภาพ จะได้ภาพที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงการไหล ซึ่ง เป็นหลักการที่เรียกว่า Mach-Zenhnder interferometer โดยส่วนใหญ่ระบบอินเทอเฟอโรมิเตอร์ มักจะใช้ กระจกแทนการใช้เลนส์ด้วยเหตุผลเดียวกับรูปที่ 2.18

รูปที่ 2.21 แสดงภาพถ่ายจากเทคนิคการถ่ายภาพต่างกันจากการสังเกตพฤติกรรม การไหลในเงื่อนไข เดียวกัน ซึ่งจะพบว่า ภาพถ่ายด้วย เทคนิค Shadowgraph จะสังเกตพฤติกรรมการไหลได้ไม่ชัดเจนเท่ากับ ภาพถ่ายด้วยเทคนิค Schlieren ในขณะที่ภาพถ่ายด้วยเทคนิค Interferometer จะสังเกตพฤติกรรมการไหล ได้จาก Fringes ในภาพได้อย่างชัดเจน



ร**ูปที่ 2.21** การถ่ายภาพของการไหลเดียวกันด้วยเทคนิค (a) Shadowgraph photograph,

(b) Schlieren photograph และ (c) Interferometer photograph [51]

2.6 การประยุกต์ใช้ High-speed liquid jet

้ ปัจจุบันได้มีการนำเอาhigh-speed liquid jet มาประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆดังตัวอย่าง ดังนี้

2.6.1 Water jet cutting technology

ในงานด้าน water jet cutting พบว่า วัสดุที่หลุดออกเกิดจากการกัดเซาะของลำพุ่งความเร็วสูงที่ ความเร็วเหนือเสียง (supersonic) ไม่ได้เกิดจากความดันแต่เกิดจากความเร็วของกระแส ลำพุ่งกัดเซาะเอา อนุภาคหรือเกรนของวัสดุให้หายไป โดยความเร็วของลำพุ่งจะเกิดจากความดันที่อยู่ภายในหัวฉีด ซึ่งหัวฉีดจะมี ขนาดเล็กมาก โดยทั่วไปความดันที่ใช้ในอุตสาหกรรมจะมีความดันประมาณ 40 ksi ซึ่งทำให้ได้ลำพุ่งที่ ความเร็วเท่ากับ 2 มัค และที่ความดันประมาณ 60 ksi จะให้ความเร็วของน้ำที่ประมาณ Mach no เท่ากับ 3 ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.22 การศึกษาคุณลักษณะการกระแทกของลำพุ่งความเร็วสูงภายในของเหลว | 22



รูปที่ 2.22 Water jet cutting technology [46, 47]

2.6.2 Water jet cleaning technology

ในงานด้าน water jet cleaning จะเป็นเทคโนโลยีที่ประยุกต์ใช้ลำพุ่งความเร็วสูงเพื่อทำความสะอาด วัสดุมีหลักการคล้ายกับ water jet cutting โดยการใช้ความเร็วของลำพุ่งที่ความเร็วเหนือเสียง (supersonic) เพื่อที่จะขจัดสิ่งสกปรกให้ออกไปได้อย่างรวดเร็ว แต่มีความแตกต่างจาก water jet cutting ตรงที่การใช้ แรงดันในการผลิตลำพุ่งออกมาและลักษณะของหัวฉีดที่แตกต่างกัน โดยใช้แรงดันของน้ำอยู่ที่ประมาณ 1,500-3,500 psi ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 Water jet cleaning technology [48]

2.6.3 Needleless technology

ปัญหาของเข็มฉีดยานั้นมีมากมาย โดยเฉพาะในประเทศกำลังพัฒนาและประเทศด้อยพัฒนา ไม่ว่าจะ เป็นการขาดแคลนตัวอุปกรณ์เองขาดความพิถีพิถันเรื่องความสะอาดและสุขอนามัย ประมาณ 30% ของ จำนวนครั้งที่มีการฉีดยานั้นไม่ปลอดภัย นอกจากนี้ยังมีรายงานการติดเชื้อจากเข็มฉีดยาที่ไม่สะอาด ส่งผลถึง ขั้นเสียชีวิตอีกเป็นจำนวนมากถึง 1.3 ล้านคนทั่วโลก แต่ถึงอย่างไรเข็มฉีดยาก็ยังเป็นสิ่งจำเป็นในการป้องกัน

การศึกษาคุณลักษณะการกระแทกของลำพุ่งความเร็วสูงภายในของเหลว | 23

(วัคซีน) และรักษาโรค ในบางประเทศด้อยพัฒนาที่มีอุปกรณ์ทางการแพทย์มีอยู่อย่างจำกัด ด้วยความ รู้เท่าไม่ถึงการณ์และความเพิกเฉย เข็มฉีดยาถูกนำมาใช้ช้ำกับผู้ป่วยหลายๆ คนโดยปราศ จากการฆ่าเชื้อ (ที่ควรจะต้องผ่านความร้อน 121 °C เป็นเวลา 20 นาที ในแต่ละครั้งที่นำมาใช้) นอกจากนี้เข็มที่ใช้แล้วยังถูก กำจัดอย่างไม่เหมาะสม ซึ่งที่มาของแนวคิดเข็มฉีดยาแบบไม่ต้องใช้เข็มหรือ needle-free injectors (NFIS) ซึ่งมีหลักการทำงานอย่างเดียวกันแต่ไม่ต้องพึ่งเข็มแต่ใช้หัวฉีด (nozzle orifice) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 76-360 ไมโครมิเตอร์ เป็นตัวลำเลียงยาแทน ซึ่งสามารถส่งผ่านตัวยาเข้าไปใต้ผิวหนัง ไปสู่ชั้นไขมันหรือ กล้ามเนื้อได้อย่างง่ายดายด้วยความเร็ว 100 m/s (ขึ้นอยู่กับความหยาบและหนา ของผิวหนัง รวมถึงบริเวณที่ ฉีดด้วย) นอกจากนี้ การกำจัดก็เป็นเรื่องง่ายไม่ต้องใช้ถึงเก็บขยะแหลมคม (sharps container) ไม่ต้องกังวล เรื่องการสเตอริไลส์ฆ่าเชื้อที่ไม่เหมาะสมหรือการใช้เข็มฉีดยาร่วมกัน



รูปที่ 2.24 Injectors injectors [49]



ร**ูปที่ 2.25** Jet engine technology [50]

2.6.4 Jet engine technology

จากรูปที่ 2.25 แสดง Jet engine technology ซึ่งเครื่องยนต์ jet เป็นเครื่องจักรที่ถูกออกแบบมา เพื่อให้ผลิตหรือสร้างแก๊สที่มีความเร็วสูงไหลผ่านช่องที่กำหนด โดยเครื่องยนต์เริ่มต้นการหมุน compressor ด้วย starter อากาศจากภายนอกเครื่องยนต์ก็จะถูกดูดเข้าเครื่องยนต์ compressor ก็จะทำงานกับอากาศที่ เข้ามาและก็จะส่งอากาศที่อัดผ่าน compressor นี้ ต่อไปยังส่วนของห้องเผาไหม้ ซึ่งจะมีความดันเพิ่มขึ้นมาก ถึง 12 เท่าของอากาศ ก่อนที่จะผ่านเข้าเครื่องยนต์ ในส่วนของห้องเผาไหม้หัวจุดไฟ (igniter) ก็จะทำการจุด เครื่องยนต์ โดยจุดส่วนผสมของน้ำมันเชื้อเพลิงและอากาศในห้องเผาไหม้ หัวจุดไฟจะมีหนึ่งหรือสองหัว ซึ่งก็ คล้ายกับหัวเทียนในรถยนต์ เมื่อเครื่องยนต์ติดหรือทำงานแล้วและ compressor หมุนด้วยความเร็วที่เพียงพอ ตามที่กำหนด แล้ว starter และ igniters ก็จะถูกปิดหรือเลิกใช้ ต่อจากนั้นเครื่องยนต์ ก็จะทำงานด้วยตัวเอง โดยไม่ต้องได้รับความช่วยเหลือจาก starter และ igniters อีกต่อไปตราบเท่าที่น้ำมันเชื้อเพลิงและอากาศผสม ในอัตราส่วนที่ถูกต้องยังไหลเข้าห้ องเผาไหม้อย่างต่อเนื่องเพียง 25% ของอากาศ ที่มีส่วนใช้ในการเผาไหม้ที่ ห้องเผาไหม้ส่วนอากาศที่เหลือก็จะผสมกับ แก๊สไอเสียหรือ แก๊สที่ผ่านการเผาไหม้เพื่อลดอุณหภูมิของ แก๊สไอ เสียหรือ แก๊สที่ผ่านการเผาไหม้ก่อนที่ แก๊สไอเสียจะเข้าไปยังส่วนของกังหัน (turbine) ส่วนของกังหันก็จะ นำเอาพลังงานจากกระแสของแก๊สที่ไหลผ่านมาใช้ประโยชน์ พลังงานส่วนใหญ่ก็จะถูกนำเอาไปใช้ในการหมุน compressor และอุปกรณ์ต่างๆ แรงขับของเครื่องยนต์ (thrust) ก็มาจากการเอามวลของอากาศจำนวนมาก จากด้านหน้าหรือที่ compressor หากสามารถฉีดน้ำมันที่ความเร็วสูงมากเท่าใดก็จะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ดีขึ้น เท่านั้น ส่งผลให้เครื่องเบินที่ติดตั้งเครื่องยนต์ Jet สามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยความเร็วสูงขึ้นนั่นอง

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ High-speed liquid jet

ปัจจุบันได้มีนักวิจัยจำนวนมากได้พยายามศึกษาเกี่ยวกับลำพุ่งความเร็วสูงโดยศึกษาเกี่ยวกับ คุณลักษณะและความเร็วของลำพุ่งซึ่งมีรายละเอียดพอสังเขปดังนี้

ในปี ค.ศ.1958, Bowden, F.P. และ Brunton, J.H. [37] ได้คิดค้นเทคนิคใหม่ในการผลิตลำพุ่ง ความเร็วสูง โดยวิธีนี้จะยิงกระสุนความเร็วสูง (high-speed projectile) เข้าไปกระแทกกับของเหลวปริมาตร 0.1 cm³ ซึ่งบรรจุอยู่ในหัวฉีด (nozzle) ที่ทำด้วย stainless steel ถูกผนึกด้วยแผ่น Neoprene ดังแสดงใน รูปที่ 2.26 จากการทดสอบพบว่า ลำพุ่งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1-2 mm เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ความดันของ ของเหลวนั้นจะมีค่าสูงขึ้นหลังจากนั้นของเหลวก็จะฉี ดออกมาจากหัวฉีดด้วยความเร็วสูง ที่ความเร็ว เท่ากับ 1,200 m/s โดยการผลิตลำพุ่งความเร็วสูงด้วยเทคนิคนี้ถูกเรียกว่า impact driven method หรือเรียกตาม ชื่อนักวิจัยว่า Bowden and Brunton method ดังแสดงในรูปที่ 2.26 ซึ่งจากนั้นเป็นต้นมา เทคนิคนี้ เป็นที่ นิยมใช้ในการผลิตลำพุ่งความเร็วสูงในงานวิจัยต่างๆ

ในปี ค.ศ.1995 T. Obara, และคณะ [19] ได้ทดลองการกระแทกของลำพุ่งบนพื้นผิวของเหลวและ ของแข็ง ซึ่งพบว่า ความเสียหายที่เกิดขึ้นนั้นจะเกิดจาก cavitation และ การกัดกร่อน ในการทดลองนี้ใช้ลำ พุ่งของเหลวขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 mm จากชุดทดลอง single impact jet ความเร็วในการ กระแทกมีค่า เท่ากับ 600 m/s ลำพุ่งจะกระแทกบนพื้นผิวของน้ำและ polymethyl-methacrylate (PMMA) ที่วางห่าง 15 mm ที่ทางออกหัวฉีด และวัดความดันโดยใช้ Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Film ปรากกฎการณ์ที่ เกิดขึ้นในการ กระแทก จะจะถูกถ่ายภาพโดยใช้ image-converter high-speed ซึ่งพบการเกิด shock wave, cavitation และฟองอากาศ จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การ กระแทกระหว่างลำพุ่งกับ พื้นผิวน้ำ จะทำให้เกิด cavitation ซึ่งจะเกิดขึ้นและยุบตัวอย่างรวดเร็ว โดยเป็นส่วนที่ทำให้เกิดความเสียหายบนวัสดุ ้ส่วนลำพุ่งที่กระแทกบนพื้นผิวของ PMMA ความเสียหายนั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดของลำพุ่ง นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าความดันที่วัดโดยใช้ PVDF นั้นจะสอดคล้องกับสมการ water-hammer



รูปที่ 2.26 Bowden and Brunton method [37]

ในปี ค.ศ.1996 Hitoshi Soyama และคณะ [51] ได้ศึกษาคุณลักษณะของลำพุ่งที่ฉีดในน้ำโดยพบว่า มีกลุ่ม cavitation เกิดขึ้นอย่างรุนแรงรอบๆลำพุ่ง ซึ่งคุณลักษณะของลำพุ่งถูกถ่ายภาพโดยใช้วิธี shadowgraph-type และ reflective-type ร่วมกับแหล่งกำเนิดแสง xenon flash ในการทดลองนี้ใช้หัวฉีด 3 แบบ คือ horn nozzle, canonical nozzle และ cylindrical nozzle ลำพุ่งที่ถูกถ่ายภาพได้จะนำมา ศึกษาอย่างละเอียด และทำการวัดความดันซึ่งจะวัดโดยวิธีการใช้แผ่นที่ไวต่อความดัน (pressure-sensitive film) ผลกระทบของการฉีดแรงดันและการออกแบบหัวฉีดจะทำให้เข้าใจมากขึ้น จากภาพแสดงให้เห็นความ แตกต่างระหว่างลำพุ่งที่ฉีดในอากาศกับลำพุ่งที่ฉีดในน้ำ cavitation ที่เกิดขึ้นจากลำพุ่งที่อยู่ในน้ำนำไปสู่พลัง การกัดกร่อนจากการปะทะโดยตรงของตัวลำพุ่งจะทำให้ความแข็งแรงของวัสดุลดลง ดังนั้นพฤติกรรมกระจาย ตัวของลำพุ่งความเร็วสูงที่อยู่ในน้ำสามารถนำมาอธิบายถึงการกั ดกร่อนที่รุนแรงได้ เพื่อนำไปพิจารณาหา วิธีการที่จะทำให้พฤติกรรมกระจายตัวของลำพุ่งความเร็วสูงที่เกิดขึ้นนั้นนำมาใช้ประโยชน์มากที่สุด จากการ ทดลองสรุปได้ว่าลักษณะของลำพุ่งที่ฉีดในน้ำจะทำให้เกิดพฤติกรรม cavitation และคุณลักษณะของลำพุ่งที่ ฉึดในน้ำจะแตกต่างกันมากบอำพุ่งที่ฉีดในอากาศ แรงดันเฉียบพลันที่เกิดขึ้นรอบๆลำพุ่งที่ฉิดในน้ำค่าสูงสุด คือ horn nozzle และค่าต่ำสุด คือ canonical nozzle ผลลัพธ์ของพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจะไม่แน่นอนนั้น เนื่องมาจากจากรูปแบบของหัวฉีด

ในปี พ.ศ.2552 วุฒิชัย สิทธิวงษ์ และคณะ[52] ได้ศึกษาการปรับเทียบและวัดแรงกระแทก (Impact pressure) ลำพุ่งของน้ำความเร็วสูงที่ระดับความเร็วเหนือเสียง โดยลำพุ่งความเร็วสูงจะใช้วิธีกำเนิดขึ้นด้วย การส่งถ่ายโมเมนตั้มของกระสุนปืน (projectile) ที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงเข้ากระแทกน้ำที่บรรจุอยู่ในชุด หัวฉีด ความเร็วของลำพุ่งที่ใช้ในการทดลองจะมีความเร็วอยู่ในช่วง 1,240 – 2,290 m/s โดยเกิดจากชุด ทดลองที่สร้างขึ้นจากหลักการทำงานของปืนที่ขับด้วยดินปืนซึ่งจะถูกเรียกว่า Horizontal Single Stage Powder Gun (HSSPG) กับหัวฉีด 3 แบบ ที่มีขนาดรูฉีด 0.7 mm แต่มีรูปทรงภายในแตกต่างกัน. ลำพุ่ง ความเร็วสูงของน้ำจะพุ่งเข้ากระแทกแผ่นอะคริลิกแล้ววัดแรงกระแทกของลำพุ่งโดยใช้เปียโซอิเล็กทริกฟิล์ม (Piezoelectric polyvinylidenifluoride (PVDF) film) จากผลการทดลองพบว่า ความดันกระแทกมี ค่าสูงสุดประมาณ 3.4 MPa ที่ระยะ 3 cm จากปลายหัวฉีด



ร**ูปที่ 2.27** การปรับเทียบความดันกระแทก [52]

ในปี ค.ศ.2009, K. Otani และคณะ [53] ได้ศึกษาคุณลักษณะของลำพุ่งในน้ำโดยผลิตลำพุ่งจาก Ho:YAG Laser โดยศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการเจาะหินใต้น้ำ ด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงร่วมกับ เทคนิคการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph จากภาพที่ได้พบว่า ความเร็วของลำพุ่งมีค่าประมาณ 40 m/s นอกจากนี้ยังวัดความดันกระแทกที่เกิดขึ้น โดยใช้ PVDF needle hydrophone พบว่า ความดันของ shock wave มีค่าประมาณ 22.7 MPa และพบการยุบตัวของ water vapor bubble ที่ทำให้เกิด shock wave นอกจากนี้ยังพบว่าลำพุ่งที่ผลิตได้สามารถเจาะแผ่นหินทรายใต้น้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากงานวิจัยที่ผ่าน มา พบว่า ความเร็วของลำพุ่งในน้ำที่ศึกษานั้นมีความเร็วต่ำ เนื่องจาก ข้อจำกัดของเทคนิคในการผลิตลำพุ่ง ดังนั้นคุณลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูงในของเหลวจึงยังไม่ได้ทำการศึกษาและอธิบายอย่างชัดเจน

บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีทำการทดลอง

3.1 ชุดทดลอง Horizontal Single State Gas Gun (HSSGG)

ในการศึกษานี้การผลิตลำพุ่งความเร็วสูงจะใช้เทคนิค ที่เรียกว่า impact driven method หรือ Bowden and Brunton method ดังรูปที่ 3.1 [37] ซึ่งเรียกตามหลักการในการผลิตลำพุ่งจากการ ยิงกระสุน ปืนความเร็วสูง (high-speed projectile) เข้าไปกระแทกกับของเหลวซึ่งบรรจุอยู่ในหัวฉีด (nozzle) โมเมนต์ ตัมของกระสุนปืนจะทำให้ความดันของของเหลวมีค่าสูงขึ้นจนกระทั่งความดันประมาณ GPa จากนั้นของเหลว ก็จะฉีดออกมาจากหัวฉีดด้วยความเร็วสูง ซึ่งเป็นการฉีดลำพุ่งจากการกระแทกของกระสุนนั้นเอง ซึ่งจะเห็นได้ ว่า กระสุนปืนความเร็วสูงมีความจำเป็นสำหรับการผลิตลำพุ่งด้วยเทคนิค ซึ่งในการศึกษานี้จะยิงกระสุนปืน ความเร็วสูงหรือผลิตลำพุ่งความเร็วสูงจากชุดทดลองที่เรียกว่า Horizontal Single Stage Gas Gun (HSSGG) ดังรูปที่ 3.2



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

รูปที่ 3.2 แสดงแผนภาพชุดยิงกระสุน horizontal single stage gas gun (HSSGG) โดยมี ส่วนประกอบหลักคือ ถังเก็บความดัน (high pressure reservoir) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 7.62 cm และยาว 21 cm มีปริมาตรภายใน 9.58 x 10^{-4} m³ ทำมาจากเหล็ก ซึ่งทำหน้าที่ในการบรรจุแก๊สที่ใช้เป็นต้น กำลังในการขับกระสุน ปืน โดยถูกต่อเข้ากับเลาปืน (launch tube) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 10 mm และยาว 1.1 m ทำมาจากท่อไร้ตะเข็บ (seamless pipe) โดยอีกด้านต่อเข้ากับท่อระบายความดัน (pressure relief section) ซึ่งถูกออกแบบให้ช่วยลดแรงอัดอากาศหรือ blast wave ที่อยู่ส่วนหน้าของ กระสุนที่ถูกอัดในเลาปืน เพื่อลดแรงต้านและแรงอั ดภายใน มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 10 mm ความ ยาว 15 cm เจาะรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 mm จำนวน 4 รูตามแนวยาว และเจาะจำนวน 3 แถวตามเส้น รอบวงของท่อ โดยต่อเข้ากับห้องทดสอบ (test chamber) ซึ่งเป็นห้องปิด (ไม่เป็นระบบปิดอย่างสมบูรณ์) รูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด 40 cm x 50 cm x 60 cm ทำมาจากเหล็ก และใช้ High Density Polythylene (HDPE) ทำเป็นหน้าต่างทั้งสองด้านเพื่อใช้ในการสังเกตและตรวจสอบพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในการทดลอง ด้าน ปลายของห้องทดสอบมี projectile dump tank ซึ่งใช้หยุดการเคลื่อนที่ของกระสุน โดยกระสุน ปืน (projectile) ที่ใช้ในการศึกษานี้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกทำมาจาก Polymethyl methacrylate (PMMA) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 9.9 mm สูง 15 mm โดยมีน้ำหนัก 1.4 g ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 แผนภาพ horizontal single stage gas gun



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างกระสุน (projectile) ที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองนี้ใช้อากาศอัด (compressed air) จากปั้มลม (air compressor) เป็นต้นกำลังในการ ขับดันกระสุน โดยจะถูกบรรจุเข้าไปภายในถังเก็บความดัน (high pressure reservoir) ก่อนการทดลองหรือ การยิงในแต่ละครั้ง โดยส่วนประกอบของกลไกการยิงกระสุนที่ต่อเข้ากับถังเก็บความดันแสดงดังรูปที่ 3.4 ก่อนการทดลองหรือการยิงกระสุน ในรูปที่ 3.5a ลูกสูบ (piston) จะถูกติดตั้งให้ปิดช่องผ่านของ อากาศอัดจากถังเก็บความดัน (high pressure reservoir) โดยมีกลไก ล็อกตำแหน่งของลูกสูบให้ หยุดนิ่งไม่ให้การเคลื่อนที่ก่อนการยิงกระสุน จากนั้นทำการติดตั้งกระสุน ปืนที่ปลายเลาปืนด้านที่ต่อกับชุด กลไกการยิง จากนั้นจึงจ่ายอากาศอัดเข้าไปยังถังเก็บความดัน ตามความดันที่ต้องการทดสอบ การยิงกระสุน จะเริ่มจากการกดไกปืน (trigger) ดังรูปที่ 3.5b ซึ่งจะเป็นการปลดล็อกกลไกล็อกการเคลื่อนที่ของลูกสูบ ความ ดันของอากาศอัด (หรือเรียกว่า driving pressure) จะขับดันลูกสูบให้เปิดช่องทางออกของถังเก็บความดัน เพื่อเพิ่มความเร็วในการเปิดช่องทางออกของอากาศอัดที่ถังเก็บความดัน จึงได้ออกแบบและติดตั้ง คอยล์สปริง (spring) (ดังรูปที่ 3.4) เพื่อช่วยให้ลูกสูบเปิดช่องทางออกของอากาศอัดให้รวดเร็วยิ่งขึ้น จากนั้นอากาศอัด ดังกล่าวจะขับดันกระสุนให้เคลื่อนที่ออกจากเลาปืนเข้าไปยังห้องทดสอบเพื่อตรวจวัดความเร็วของกระสุนหรือ ศึกษาพฤติกรรมต่างๆ ต่อไป



รูปที่ 3.4 ส่วนประกอบของกลไกการยิงกระสุน



(a) ก่อนการยิง



(b) หลังการยิง

รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการยิงกระสุน

การศึกษาคุณลักษณะการกระแทกของลำพุ่งความเร็วสูงภายในของเหลว | 30



3.2. การวัดความเร็วของกระสุนปืน

รูปที่ 3.6 ไดอะแกรมการวัดความเร็วของกระสุนปืน



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างการแสดงผลของ digital oscilloscope ในการวัดความเร็วของกระสุนปืน

การวัดความเร็วของกระสุน ปืนจะใช้หลักการที่เรียกว่า การตัดเลเซอร์ของวัตถุ (laser beam interruption) หรือ time of flight method ซึ่งเป็นวิธีการหาระยะเวลาแตกต่างที่กระสุน ปืนรบกวน ลำแสงเลเซอร์ (laser beam) ชุดที่ 1 และชุดที่ 2 โดยในการศึกษานี้ลำแสงของเลเซอร์มีระยะห่างกัน 30 mm ดังรูปที่ 3.6 ซึ่งใช้ photo diode จะทำหน้าที่เป็นตัวรับลำแสงเลเซอร์ โดยการทดลองนี้จะใช้เลเซอร์และ photo diode จำนวน 2 ชุดในแต่ละระยะ (range) โดยทำการวัด 3 ระยะ (range) คือ ระยะ I จะใช้เลเซอร์ ชุดที่ 4 ดัง

รูป ซึ่งมีหลักการวัดความเร็วคือ หากลำแสงเล เซอร์ไม่ถูกรบกวน photo diode จะรับแสงและจะส่งสัญญาณ การรับลำแสงเลเซอร์มายัง digital oscilloscope แต่หากถูกรบกวนหรือมีการบังลำแสงเลเซอร์ไม่ให้ photo diode รับลำแสง สัญญาณที่แสดงผลบน digital oscilloscope จะตกลงมาที่จุดอ้างอิง (set point) โดยการ บังแสงเลเซอร์ในการทดลองนี้จะเกิดขึ้นเมื่อกระสุนเคลื่อนที่ผ่าน ดังตัวอย่างการแสดงผลของ digital oscilloscope ในการวัดความเร็วของกระสุนปืนในรูปที่ 3.7

3.3 การผลิตลำพุ่งความเร็วสูง (High-speed jet generation)

ในการศึกษานี้การผลิตลำพุ่งความเร็วสูงจะใช้เ ทคนิค impact driven method [37] ดังรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.8 โดยที่เทคนิคนี้จะยิงกระสุนปืนความเร็วสูง (high-speed projectile) ในชุดทดลอง Horizontal Single Stage Gas Gun (HSSGG) ซึ่งรายละเอียดรวมถึงสมรรถนะของชุดยิงได้กล่าวไว้แล้วใน ตอนต้น โดยใน การศึกษานี้ใช้กระสุนปืนที่ทำมาจาก Polymethyl methacrylate (PMMA) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 9.9 mm สูง 15 mm โดยมีน้ำหนัก 1.4 g ดังรูปที่ 3.3 และหัวฉีดที่ใช้ในการผลิตลำพุ่งความเร็วสูง ทำมาจากเหล็ก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่บรรจุของเหลว ขนาด D = 10 mm มุม 30° ขนาดของรูหัวฉีด d = 0.1 mm และ ความยาวของรูหัวฉีด l = 3 mm ดังรูปที่ 3.9







รูปที่ 3.9 รูปทรงของหัวฉีด (Nozzle geometry)

3.4 การวัดความดันกระแทก (Impact pressure)

ลำพุ่งความเร็วสูง ที่ถูกผลิตโดยชุด Horizontal Single-stage Gas Gun (HSSGG) จะเป็นลำพุ่งแบบ impulsive jet โดยทันทีที่ลำพุ่งกระแทกลงบนพื้นผิวของแข็งใดๆ ความดันกระแทกของลำพุ่งจะมีค่าสูงใน เวลาอันสั้น ซึ่ง ความดันที่เกิดขึ้นเป็นความดันแบบไดนามิ ค (Dynamic pressure) หรือความดัน ค้อนน้ำ (water-hammer pressure) ซึ่งจะมีค่าสูงในระดับหลาย MPa ไป จนถึง GPa ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะวัด ความดันดังกล่าวโดยใช้วิธีหรือเครื่องมือวัดแบบทั่วไป

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงออกแบบ สร้างและสอบเทียบ ชุดวัดความดันกระแทกดังกล่าวเพื่อให้สามารถ การวัดความดัน ที่มีค่า สูง ขนาดนี้ได้ โดยชุดวัดความดันจะประกอบไปด้วย เปียโซอิเล็กทริกฟิล์ม (Piezoelectricpolyvinylideni fluoride film, PVDF) โดยมี Polymethyl Methacrylate (PMMA) หนา 6 mm และยางหนา 8 mm เป็นตัวรองรับ ทั้งหมดประกอบรวมกันและมี PMMA หนา 8 mm ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 75 mm รองรับอีกครั้ง ดังรูปที่ 3.12 โดยตัวตรวจจับความดันกระแทกหลักจะเป็น PVDF ที่ มีความยืดหยุ่น มีความหนา 28 μm ฉาบด้วยโพลิเมอร์และมี Ag-ink เป็นชั่วไฟฟ้า



รูปที่ 3.10 การวัดความเร็วและความดันกระแทกของลำพุ่ง

จากดังรูปที่ 3.10 แสดงการติดตั้งชุดวัดความดันกระแทก เมื่อลำพุ่งของของเหลวกระแทก บนพื้นผิว ของชุดวัดความดัน PVDF จะแปลงค่าความดันที่ได้ เป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งจะถูกบันทึกไว้โดยออสซิโลสโคป (oscilloscope) ดังรูปที่ 3.13 จากนั้นจะนำค่าแรงดันที่ได้ (V) มาทำการคำนวณหาความดันกระแทกจาก สมการที่ได้จากการสอบเทียบดังสมการที่ 3.1 โดยในการงานวิจัยนี้การปรับเปลี่ยนระยะการกระแทกของ ลำพุ่ง (stand-off distance) ทำได้โดยปรับเปลี่ยนระยะของชุดวัดความดัน

$$P = (17,975V \times 2,614.4) \times (7.894757 \times 10^{-3})$$
(3.1)

เมื่อ

- P คือ ความดันกระแทกของลำพุ่ง (Impact pressure of the jet, MPa)
- V คือ แรงดันไฟฟ้าจากชุดวัดความดันกระแทก

(voltage signal from PVDF pressure sensor, Voltage).



รูปที่ 3.11 ด้วอย่างสัญญาณการกระแทกของลำพุ่งน้ำในอากาศที่ระยะ 4 cm จากปลายหัวฉีดที่ถูกบันทึกโดย ออสซิโลสโคป

3.5 การวัดความเร็วของลำพุ่ง

ในงานวิจัยนี้ความเร็วของลำพุ่งจะถูกวัดด้วยวิธี การตัดเลย์เซอร์ของวัตถุ (laser beam interruption หรือ time of flight method) โดยใช้ไดโอดกำเนิดแสงเลย์เซอร์ ยิงตั้งฉากกับเส้นทางของลำพุ่งดังรูปที่ 3.10 โดยแสงเลเซอร์จะอยู่ด้านหน้าของชุดวัดความดัน 5 mm เมื่อลำพุ่งตัดผ่านแสงเลเซอร์แล้วกระแทกที่ชุดวัด ความดัน สัญญาณการรบกวนเลย์เซอร์และสัญญาณการกระแทกของลำพุ่งจะถูกบันทึกไว้บนออสซิโลสโคปดัง รูปที่ 3.11 จากช่วงเวลาระหว่างสัญญาณการรบกวนเลย์เซอร์บลาหุ่ง (V_j) ได้จากสมการที่ 3.2

$$V_j = \frac{\Delta s}{\Delta t} \tag{3.2}$$

เมื่อ

โดยเทคนิคการวัดความกันกระแทกของลำพุ่งและความเร็วของลำพุ่งแบบนี้ได้ถูกออกแบบ และสร้าง ขึ้นเฉพาะเพื่องานวิจัยนี้ ทั้งความดันกระแทกและความเร็วของลำพุ่ง ที่วัดได้เพื่อนำใช้ในการคำนวณความดัน กระแทกจากสมการ Water hammer ดังสมการที่ 3.3 [19] จะสามารถวัดได้ในการทดลองเดียวกันซึ่งถือว่า ของได้เปรียบของเทคนิคนี้ ดังนั้นความดันที่ได้จากการวัดโดยชุดวัดความดันและจากการคำนวณด้วยสมการ water hammer จึงสามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้โดยตรง

$$P = \rho C V \tag{3.3}$$

เมื่อ

ho คือ ความหนาแน่นของของไหลความเร็วสูง (kg/m³)

C คือ ความเร็วเสียงของของไหลความเร็วสูง (Sound of Speed, m/s)

V คือ ความเร็วของของไหลความเร็วสูง (m/s)

บทที่ 4 ผลการทดลอง

4.1.การเปรียบเทียบความดันกระแทกจากชุดวัดความดันกระแทกกับสมการ Water hammer กรณีฉีด ในอากาศ



ร**ูปที่ 4.1** การเปรียบเทียบความดันกระแทกของลำพุ่งที่วัดจากชุดวัดความดันกับสมการ Water hammer ที่ ความเร็วกระแทกของกระสุนเท่ากับ 223 m/s กรณีฉีดในอากาศ



(d) ลำพุ่งแอลกอฮอล์ (alcohol jet)

รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบความดันกระแทกของลำพุ่งที่วัดจากชุดวัดความดันกับสมการ Water hammer ที่ ความเร็วของกระสุนเท่ากับ 223 m/s กรณีฉีดในอากาศ (ต่อ)

รูปที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบความดันกระแทกของลำพุ่งที่วัดจากชุดวัดความดัน (PVDF pressure sensor) กับสมการ Water hammer ที่ความเร็วของกระสุนเท่ากับ 223 m/s (จากอากาศอัดความดัน 8 bar) กรณีฉีดในอากาศ และเมื่อพิจารณาในรูปที่ 4.1a ลำพุ่งน้ำ (water jet) พบว่า เมื่อระยะห่างจากหัวฉีด (stand-off distance) เพิ่มมากขึ้นความดันกระแทก (impact pressure) ของลำพุ่งน้ำมีค่าลดลงทั้งที่วัดได้ ้จากชุดวัดความดันกระแทกและสมการ Water hammer เนื่องจากความเร็วของลำพุ่งจะมีค่าลดลงเมื่อ เคลื่อนที่ห่างออกไป ซึ่งเป็นพฤติกรรมปกติทั่วไป โดยเป็นในลักษณะเดียวกัน ทั้ง 4 ชนิดของลำพุ่ง คือ ลำพุ่ง ้น้ำมันดีเซล (diesel jet) ลำพุ่งน้ำมันก๊าด (kerosene jet) ลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซลีน (gasoline jet) และลำพุ่ง แอลกอฮอล์ (alcohol jet) ดังแสดงในรูปที่ 4.1b-d ตามลำดับ โดยความดันกระแทกที่วัดโดยชุดความดัน กระแทกจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 699.55, 662.37, 606.60, 559.50 และ 699.55 MPa ที่ระยะห่างจากหัวฉีด 1 cm สำหรับลำพุ่งน้ำ (water jet) ลำพุ่งน้ำมันดีเซล (diesel jet) ลำพุ่งน้ำมันก๊าด (kerosene jet) ลำพุ่ง น้ำมันแก๊สโซลีน (gasoline jet) และลำพุ่งแอลกอฮอล์ (alcohol jet) ตามลำดับ และมีค่าความดันกระแทก ต่ำสุดเท่ากับ 300.48, 387.24, 301.72, 232.32 และ 332.71 MPa ที่ระยะห่างจากหัวฉีด 5 cm ตามลำดับ ้นอกจากนี้ยังพบว่า ความดันกระแทกที่วัดได้จากชุดวัดความดันจะใกล้เคียงกับที่คำนวณจากสมการ Water แต่ส่วนใหญ่แล้วจะมีค่าสูงกว่าเล็กน้อย ซึ่งความแตกต่างกันนี้อาจเนื่องจากในสมการ Water hammer hammer ไม่ได้พิจารณาถึงผลของพฤติกรรมทั่วๆ ไปของลำพุ่งเช่น การแตกตัวเป็นฝอยละออง (break-up and atomization) การสเปรย์ เป็นต้น จึงทำให้เกิดความแตกต่างกันเล็กน้อยดังรูป ดังนั้นชุดวัดความดันให้ค่าการ ้ วัดความดันที่ถูกต้องใกล้เคียงกับทฤษฎีของWater hammer โดยผลการพิจารณาจากนี้ต่อไปจะใช้เพียงผลการ ้วัดความดันกระแทกจากชุดวัดความดันเพื่อใช้ในการแสดงผลและอธิบายอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ เท่านั้น



(d) ลำพุ่งแอลกอฮอล์ (alcohol jet)

รูปที่ 4.2 อิทธิพลของความเร็วของกระสุนปืนต่อความดันกระแทกของลำพุ่งกรณีฉีดในอากาศ

4.2 อิทธิพลของความเร็วในการกระแทกของกระสุนปืนกรณีฉีดในอากาศ

รูปที่ 4.2 อิทธิพลของความเร็วของกระสุน ปืนต่อความดันกระแทกของลำพุ่ง กรณีฉีดในอากาศ พบว่า เมื่อความเร็วของกระสุน ปืนที่ใช้ในการผลิตลำพุ่งมีค่าสูงมากขึ้น ความดันกระแทกของลำพุ่งก็มีค่ามากขึ้นทุก ชนิดของลำพุ่งและ ทุกระยะห่างจากหัวฉีดดังรูปที่ 4.2a-d เนื่องจากว่า เมื่อความเร็วของกระสุน ปืนมากขึ้นจะ ทำให้มีพลังงานโมเมนตัม (momentum energy) สูงขึ้น และเมื่อกระสุนกระแทกกับของเห ลวที่บรรจุใน หัวฉีดจะทำให้เกิดการถ่ายเทโมเมนตัมดังกล่าวไปยังของเหลวส่งผลให้ของเหลวมีความเร็วที่ฉีดออกจากหัวฉีด ที่ความเร็วสูงขึ้น จึงส่งผลให้เกิ ดความดันกระแทกสูงขึ้นตามไปด้วย ดังสมการ Water hammer ดังนั้น ความเร็วของกระสุนที่ใช้ในการผลิตลำพุ่งจะเป็นตัวแปรหลักที่สำคัญต่อความดันกระแทกของลำพุ่ง โดยความ ดันกระแทกสูงสุดมีค่าเท่ากับ 755.32, 734.25, 668.56, 648.74 และ 734.25 MPa ที่ความเร็วกระสุน ปืน (V_p) เท่ากับ 239 m/s (จากอากาศอัดความดัน 10 bar)ระยะห่างจากหัวฉีดเท่ากับ 1 cm สำหรับลำพุ่งน้ำ (water jet) ลำพุ่งน้ำมันดีเซล (diesel jet) ลำพุ่งน้ำมันก๊กด (kerosene jet) ลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซลีน (gasoline jet) และลำพุ่งแอลกอฮอล์ (alcohol jet) ตามลำดับ และมีความดันกระแทกต่ำสุดเท่ากับ 224.88, 182.75, 149.28, 143.08 และ 202.58 MPa ที่ระยะ 5 cm ความเร็วกระสุนปืน (V_p) เท่ากับ 185 m/s (จากอากาศ อัดความดัน 5 bar) ตามลำดับ

4.3 อิทธิพลของชนิดของเหลวของลำพุ่งกรณีฉีดในอากาศ

รูปที่ 4.3 แสดงอิทธิพลของชนิดของเหลวของลำพุ่งต่อความดันกระแทกที่ความเร็วของกระสุนเท่ากับ 223 m/s (จากอากาศอัดความดัน 8 bar) กรณีฉีดในอากาศ โดยการทดลองแต่ละระยะ ห่างจากหัวฉีด จะ ทดลองซ้ำกันไม่น้อยกว่าสามครั้งและหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้งหมด ซึ่งพบว่า เมื่อระยะห่าง จากหัวฉีดเพิ่มขึ้นความเร็วของลำพุ่งจะมีค่าลดลงโดยจะเกิดขึ้นในลักษณะเดียวกันทุกลำพุ่ง เพราะเมื่อ ระยะห่าง จากหัวฉีดเพิ่มขึ้นความเร็วของลำพุ่งจะมีค่าลดลงโดยจะเกิดขึ้นในลักษณะเดียวกันทุกลำพุ่ง เพราะเมื่อ ระยะห่าง จากหัวฉีดเพิ่มขึ้นความเร็วของลำพุ่งจะมีค่าลดลงเนื่องจากผลของแรงต้านทางพลศาสตร์ (Aerodynamic drag) และเมื่อพิจารณาจากทุกระยะ ห่างจากหัวฉีด จะพบว่าลำพุ่งน้ำจะมีค่าสูงที่สุด ที่ทุกระยะห่างจากหัวฉีด (ยกเว้นที่ 4 และ 5 cm) เนื่องจากผลของความหนาแน่นของน้ำมีค่าสูงที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และลำพุ่ง น้ำมันแก๊สโซลีนฉะมีค่าต่ำที่สุดที่ทุกระยะห่างจากหัวฉีด (ยกเว้นที่ 4 cm) เนื่องจากผลของน้ำหนักโมเลกุลของ น้ำมันแก๊สโซลีนมีค่าต่ำที่สุด โดยลำพุ่งน้ำจะมีค่าความดันกระแทกสูงที่สุดเท่ากับ 699.55 MPa ที่ระยะห่าง จากหัวฉีด 1 cm และลำพุ่งน้ำมันดึเซล ลำพุ่งน้ำมันก๊กด และลำพุ่งแอลกอฮอล์ จะมีค่าอยู่ระหว่างความ ดันกระแทกของลำพุ่งน้ำมันดึเซล ลำพุ่งน้ำมันก๊กด และลำพุ่งแอลกอฮอล์ จะมีค่าอยู่ระหว่างความ ดันกระแทกของลำพุ่งน้ำมันดัสโซลีนอย่างไม่มีมีนัยสำคัญ กัน อาจเนื่องมาจากคุณสมบัติทางกายภาพ



รูปที่ 4.3 อิทธิพลของชนิดของเหลวของลำพุ่งต่อความดันกระแทกที่ความเร็วของกระสุนเท่ากับ 223 m/s กรณีฉีดในอากาศ

ตารางที่ 4.1	คณสมบัติทางกายภาพข	เองของเหลวที่ใช้ในการทดลอง
VI 10 INVI 4.1	I BRODIN OF MINING TO AT IMIC	

ชนิดของ	น้ำหนักโมเลกุล	ความหนาแน่น	ความหนืดจลน์	ความตึงผิว	ความร้อนแฝง
ของเหลว	(g/mol)	ที่ 20 [°]	ที่ 20°	ที่ 20°	(KJ/Kg)
		(Kg/m ³)	(cSt)	(N/m)	
น้ำ	18	998	1.003	0.0728	2,257 (at 100°C)
น้ำมันดีเซล	198	840	1.8 - 4.0	0.0244	267.49 (at 170°C)
น้ำมันก๊าด	170	810	1.5 – 2.5	0.0235	314.01 (at 117.8°C)
น้ำมันแก๊สโซลีน	32	785.1	1.6	0.0220	896 (at 90°C)
แอลกอฮอล์	114	750	0.5	0.0200	318.66 (at 90°C)

4.4 การเปรียบเทียบความดันกระแทกในอากาศและน้ำ

รูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบความดันกระแทกของลำพุ่งเมื่อฉีดในอากาศและน้ำ ที่ความเร็วของ กระสุนเท่ากับ 223 m/s พบว่า เมื่อระยะห่างจากหัวฉีดเพิ่มขึ้นความดันกระแทกทั้งเมื่อฉีดในอากาศและในน้ำ



รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบความดันกระแทกของลำพุ่งเมื่อฉีดในอากาศและน้ำที่ความเร็วของกระสุนเท่ากับ 223 m/s

จะมีค่าลดลงโดยจะเกิดขึ้นในลักษณะเดียวกันทุกลำพุ่ง เพราะเมื่อระยะห่างจากหัวฉีดเพิ่มขึ้นความเร็วของลำ พุ่งจะมีค่าลดลงเนื่องจากผลของแรงต้านทางพลศาสตร์ (Aerodynamic drag) และแรงต้านทานของน้ำ (Hydrodynamic drag) และเมื่อพิจารณาที่ทุกลำพุ่งและทุกระยะห่างจากหัวฉีดพบว่า ลำพุ่งที่ฉีดในอากาศจะ มีความดันกระแทกสูงกว่าเมื่อฉีดในน้ำ เนื่องมาจาก แรงต้านทานของน้ำ (Hydrodynamic drag) จะมีค่าสูง กว่าแรงต้านทางพลศาสตร์ (Aerodynamic drag) (จาก Drag= $\frac{1}{2}C_{D}\rho V^{2}A$ ซึ่ง ρ ของน้ำมีค่าเป็น 1,000 เท่าของอากาศ) จึงส่งผลทำให้ความเร็วของลำพุ่งเมื่อฉีดในน้ำจะมีความเร็วช้ากว่าเมื่อฉีดในอากาศ (ยกเว้นลำ พุ่งน้ำมันดีเซลที่ระยะ 2 และ 3 cm) และเมื่อพิจารณาลำพุ่งเมื่อฉีดในน้ำที่ระยะห่างจากหัวฉีด 1 cm พบว่า มี ความดันกระแทกต่ำกว่าที่ระยะ 2 cm อันเนื่องจากว่า ลำพุ่งเมื่อฉีดในน้ำจะต้องการระยะห่างจากหัวฉีด พอสมควรในการเร่งความเร็ว ซึ่งแตกต่างจากการฉีดในอากาศ จึงทำให้ความดันสูงสุดของลำพุ่งเมื่อฉีดในน้้า เกิดขึ้นที่ระยะห่าง 2 cm แทนที่จะเป็นที่ระยะ 1 cm เช่นเดียวกับกรณีที่ฉีดในอากาศ

4.5 อิทธิพลของความเร็วในการกระแทกของกระสุนปืนกรณีฉีดในน้ำ

รูปที่ 4.5 อิทธิพลของความเร็วการกระแทกของกระสุนปืนต่อความดันกระแทกของลำพุ่ง ในน้ำ พบว่า เมื่อความเร็วของกระสุน ปืนที่ใช้ในการผลิตลำพุ่งมีค่าสูงมากขึ้น ความดันกระแทกของลำพุ่งก็มีค่ามากขึ้นทุก ชนิดของลำพุ่งและทุกระยะห่างจากหัวฉีดดังรูปที่ 4.5a-d เนื่องจากว่า เมื่อความเร็วของกระสุนมากขึ้นจะทำ ให้มีพลังงานโมเมนตัม (momentum energy) สูงขึ้น และเมื่อกระสุน ปืนกระแทกกับของเหลวที่ บรรจุใน ้หัวฉีดจะทำให้เกิดการถ่ายเทโมเมนตัมดังกล่าวไปยังของเหลวส่งผลให้ของเหลวมีความเร็วที่ฉีดออกจากหัวฉีด ที่ความเร็วสูงขึ้น จึงส่งผลให้เกิดความดันกระแทกสูงขึ้นตามไป ดังนั้น ความเร็วของกระสุน ปืนที่ใช้ในการผลิต ้ลำพุ่งจะเป็นตัวแปรหลักที่สำคัญต่อความดันกระแทกข องลำพุ่ง และเมื่อพิจารณาที่ความเร็วของกระสุน ปืน ใดๆ กับว่า ความดันกระแทกจะมีค่าเพิ่มขึ้น จากระยะห่างจากหัวฉีดจาก 1 ไป 2 cm ด้วยเหตุผลเดียวกับที่ ้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ผ่านมา และความดันกระแทกจะมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างจากหัวฉีดเพิ่มขึ้นจาก 2 ไป 5 cm ซึ่งเป็นพฤติกรรมปกติดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว แต่มีประเด็นที่น่าสนใจคือ เมื่อความเร็วของกระสุน ปืนสูงขึ้น ความชั้นของความดันที่ระยะ 1 ไป 2 cm และจาก 2 ไป 5 cm จะมีความชั้นมากขึ้น แสดงให้เห็นว่า เมื่อ ้ความเร็วของกระสุนปืนสูงขึ้นจะทำให้ความเร็วของลำพุ่งซึ่งมีผลต่อความดันกระแทกมีค่าสูงขึ้น แต่ก็จะมีอัตรา การลดลงของความเร็วหรือความดันกระแทกของลำพุ่งมากขึ้นด้วยเช่นกัน โดยความดันกระแทกสูงสุดมีค่า เท่ากับ 804.89, 767.71, 584.29, 726.81 และ 595.44 MPa ที่ความเร็วกระสุน (V_p) เท่ากับ 239 m/s ระยะห่างจากหัวฉีดเท่ากับ 2 cm สำหรับลำพุ่งน้ำ (water jet) ลำพุ่งน้ำมันดีเซล (diesel jet) ลำพุ่ง ้น้ำมันก๊าด (kerosene jet) ลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซลีน (gasoline jet) และลำพุ่งแอลกอฮอล์ (alcohol jet) ตามลำดับ และมีความดันกระแทกต่ำสุดเท่ากับ 176.55, 141.85, 115.82, 89.80 และ 110.86 MPa ที่ระยะ 5 cm ความเร็วกระสุน (V_p) เท่ากับ 185 m/s ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 อิทธิพลของความเร็วการกระแทกของกระสุนปืนต่อความดันกระแทกของลำพุ่งในน้ำ



4.6 อิทธิพลของชนิดของเหลวของลำพุ่งกรณีฉีดในน้ำ

รูปที่ 4.6 อิทธิพลของชนิดของเหลวของลำพุ่งต่อความดันกระแทกในน้ำที่ความเร็วกระแทกของกระสุนปืน เท่ากับ 223 m/s กรณีฉีดในน้ำ

รูปที่ 4.6 แสดงอิทธิพลของชนิดของเหลวของลำพุ่งต่อความดันกระแทกที่ความเร็วของกระสุน ปืน ้เท่ากับ 223 m/s กรณีฉีดในน้ำ พบว่า เมื่อระยะ ห่างจากหัวฉีดเพิ่มขึ้นความดันกระแทกจะมีค่าลดลงโดยจะ ้เกิดขึ้นในลักษณะเดียวกันทุกลำพุ่ง ยกเว้นที่ระยะห่างจากหัวฉีดจาก 1 ไป 2 cm ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ ้ที่ผ่านมา เพราะเมื่อระยะห่างจากหัวฉีดเพิ่มขึ้นความเร็วของลำพุ่งจะมีค่าลดลงเนื่องจากผลของแรงต้านของน้ำ (Hydrodynamic drag) และเมื่อพิจารณาจากทุกระยะ ห่างจากหัวฉีด จะพบว่าลำพุ่งดีเซลจะมีค่าสูงที่สุด ที่ทุก ระยะห่างจากหัวฉีด เนื่องจากผลของ น้ำหนักโมเลกุล ของน้ำมันดีเซลมีค่าสูงที่สุดดังแสดงในตารางที่ 4.1 และ ้ลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซลีนจะมีค่าต่ำที่สุด ที่ทุกระยะห่างจากหัวฉีด เนื่องจากผลของน้ำหนักโมเลกุลของน้ำมันแก๊ส โซลีนมีค่าต่ำที่สุด โดยลำพุ่งน้ำจะมีค่าความดันกระแทกสูงที่สุดเท่ากับ 583.05 MPa ที่ระยะห่างจากหัวฉีด 2 cm และลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซลีนจะมีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 123.26 MPa ที่ระยะห่างจากหัวฉีด 5 cm ส่วนความ ้ดันกระแทกของลำพุ่งน้ำ ลำพุ่งน้ำมันก๊าด และลำพุ่งแอลกอฮอล์ จะมีค่าอยู่ระหว่างความดันกระแทกของลำ พุ่งน้ำมันดีเซลและลำพุ่งแก๊สโซลีนอย่างไม่มีนัยสำคัญกัน อาจเนื่องมาจากคุณสมบัติทางกายภาพของลำพุ่งทั้ง 3 ชนิดมีค่าใกล้เคียงกันในทุกๆ คุณสมบัติทั้งน้ำหนักโมเลกุล ความหนาแน่ น ความหนืดจลน์ และความตึงผิว โดยเฉพาะลำพุ่งแอลกอฮอล์ที่มีลักษณะความดันกระแทกที่แตกต่างจากลำพุ่งชนิดอื่ น และเมื่อพิจารณาที่ ระยะห่างจากหัวฉีดช่วงระยะ 1 ไป 2 cm และช่วงระยะ 2 ไป 5 cm พบว่า ความชั้นของความดันกระแทกใน ้แต่ละระยะของลำพุ่งจะมีความชั้นน้อยลง เมื่อความดันค่าความดันกระแทกของลำพุ่งมีค่าต่ำลงคือ ความชั้น

ของช่วงระยะ 1 ไป 2 cm และ ช่วงระยะ 2 ไป 5 cm ของลำพุ่งน้ำมันดีเซลจะมีความชันสูงที่สุด โดยมีค่า ความดันกระแทกสูงที่สุด รองลงมาคือ ความชันของลำพุ่งน้ำ ลำพุ่งน้ำมันก๊าด น้ำมันแก๊สโซลีน และ แอลกอฮอล์ ตามลำดับ ด้วยเหตุผมดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ผ่านมา

บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

การศึกษาคุณลักษณะการกระแทกของลำพุ่งความเร็วสูงภายในของเหลว (น้ำ) ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้การผลิตลำพุ่ง ด้วยเทคนิคที่เรียกว่า impact driven method จากชุดทดลอง Horizontal Single Stage Gas Gun (HSSGG) ซึ่งมีสมรรถนะในการผลิตความเร็วของกระสุนปืนได้สูงสุดที่ 239 m/s โดยใช้อากาศอัดความดัน 10 bar โดยการศึกษานี้ใช้ความเร็วของกระสุนป็นการผลิตลำพุ่งเท่ากับ 185, 223 และ 239 m/s ที่ความดันของอากาศอัดเท่ากับ 5, 8 และ 10 bar ตามลำดับ ซึ่งลำพุ่งจะ ถูกฉีดออกมาจากหัวฉีดที่มีลักษณะ ทรงกรวย (conical nozzle) มุม 30° ขนาดรูคอคอด (orifice) เท่ากับ 1 mm โดยความดันกระแทก ของลำพุ่ง จะทำการตรวจวัดด้วยชุดวัดความดันซึ่งได้ทำการ ออกแบบ สร้างและสอบเทียบ โดยประกอบไปด้วย เปียโซอิเล็กทริกฟิล์ม (Piezoelectricpolyvinylideni fluoride film, PVDF) และยังสามารถตรวจวัดความเร็วของลำพุ่ง ก่อนการกระแทกได้ในเวลาเดียวกันโดยความเร็วที่วัดได้จะทำการคำนวณหาความดันโดยใช้สมการ Water hammer เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบอีกด้วย โดยชนิดลำพุ่งที่ได้ทำการตรวจวัด ได้แก่ ลำพุ่งน้ำ (water jet) ลำพุ่งน้ำมันดีเซล (diesel jet) ลำพุ่งน้ำมันก๊กด (kerosene jet) ลำพุ่งน้ำมัน แก๊สโซลีน (gasoline jet) และลำพุ่งแอลกอฮอล์ (alcohol jet) โดยได้ทำการวัดความดันทั้งในอากาศ และของเหลวคือ น้ำ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ในกรณีฉีดลำพุ่งในอากาศ พบว่า ความดันกระแทกที่วัดได้จากชุดวัดความดันและจากการ คำนวณโดยสมการ Water hammer มีค่าใกล้เคียงกันทุกลำพุ่ง

 เมื่อพิจารณาที่ทุกลำพุ่งและทุกระยะห่างจากหัวฉีดพบว่า ลำพุ่งที่ฉีดในอากาศจะมีความ ดันกระแทกสูงกว่าเมื่อฉีดในน้ำ เนื่องมาจาก แรงต้านทานของน้ำ (Hydrodynamic drag) จะมีค่าสูง กว่าแรงต้านทางพลศาสตร์ (Aerodynamic drag)

 3. ในกรณีฉีดลำพุ่งในอากาศ พบว่า เมื่อระยะห่างจากหัวฉีดมากขึ้น ความดันกระแทกของลำ พุ่งจะมีค่าลดลง โดยความดันกระแทกที่ระยะ 1 cm จะมีความดันกระแทกสูงสุดทุกลำพุ่ง และเมื่อ ฉีด ลำพุ่งในน้ำพบว่า ความดันกระแทกจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างจากหัวฉีดเพิ่มขึ้นในช่วงระยะ 1 ถึง 2 cm และความดันกระแทกจะมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างจากหัวฉีดเพิ่มขึ้นที่ช่วงระยะ 2 ถึง 5 cm โดย ความดันกระแทกของลำพุ่งจะมีค่าสูงสุดที่ระยะ 2 cm ทุกลำพุ่ง

ลำพุ่งน้ำจะมีความดันกระแทกสูงสุด เมื่อฉีดในอากาศ ส่วน เมื่อฉีดในน้ำลำพุ่งน้ำมันดีเซลมี
 ความดันกระแทกสูงที่สุด และลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซลีนจะมีความดันกระแทกต่ำที่สุดทั้งกรณีฉีดในอากาศ

และในน้ำ โดยคุณสมบัติทางกายภาพที่ มีผลต่อความดันกระแทกคือ ความหนาแน่นและ น้ำหนัก โมเลกุลของของเหลว

5. เมื่อความเร็วของกระสุนปืนที่ใช้ในการผลิตลำพุ่งเพิ่มสูงขึ้น ความดันกระแทกของลำพุ่งจะ มีค่าสูงขึ้น โดยความดันกระแทกสูงสุดของทุกลำพุ่งจะเกิดจากความเร็วกระสุน (V_p) เท่ากับ 239 m/s ระยะห่างจากหัวฉีดเท่ากับ 1 cm และ 2 cm กรณีฉีดในอากาศและในน้ำ ตามลำดั บ และมีความดัน กระแทกต่ำสุดที่ความเร็วกระสุน (V_p) เท่ากับ 185 m/s ระยะห่าง 5 cm กรณีฉีดทั้งในอากาศและใน น้ำ

 ลำพุ่งที่ฉีดทั้งในอากาศและในน้ำมีพลังงานเพียงพอที่จะทำให้เกิดความเสียหายบนพื้นผิว PMMA

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรผลิตกระสุนปืนให้ได้ ขนาดและน้ำหนักที่เท่ากัน ทุกการทดลอง เนื่องจากจะ มีผลกับ
 ความเร็วของกระสุนปืนและความเร็วของลำพุ่งที่ผลิตได้

 ควรมีการศึกษาเกี่ยวกับชุดทดลอง ที่สามารถยิงกระสุนปืนได้อย่างต่อเนื่อง และลดเวลาใน การประกอบชุดทดลอง

 ควรมีการศึกษาคุณลักษณะของลำพุ่งชนิดอื่นๆ 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 incylinder 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] Hirono, T., Uenohara, H., Komatsu, M., Nakagawa, A., Satoh, M., Ohyama, H., Takayama, K., Yoshimoto, T. "Holmium YAG laser-induced liquid jet dissector: A novel prototype device for dissection organs without impairing vessels". Minim Invas Neurosurg 46, 121 (2003)

[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-Schneestrahl-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] 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, vol.12, pp 411-416 (1996)

[52] วุฒิชัย สิทธิวงษ์, วิระพันธ์ สีหานาม ,กุลเซษฐ์ เพียรทอง, อนิรุตต์ มัทธุจักร และ Eric Yeo.การ ปรับเทียบชุดทดลองสำหรับการศึกษาการกระแทกความเร็วสูง .การประชุมวิชาการเครือข่าย วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22,2551.

[53] Ohtani, K. Numata, D. Takayama, K. Kobayashi, T. Okatsu, K. "Experimental study of underwater rock drilling using a pulsed Ho : YAG laser-indued jets". Shock wave 19, 403-412 (2009)