สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	II
Abstract	III
กิตติกรรมประกาศ	IV
สารบัญ	V
สารบัญตาราง	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)

หน้า

บทที่ 4 ผลการทดลอง 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 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ 45
5.1 สรุปผลการศึกษา 45
5.2 ข้อเสนอแนะ 46

เอกสารอ้างอิง 47
ภาคผนวก 51
ภาคผนวก ก การออกแบบชุดทดลอง 52
ภาคผนวก ข รูปอุปกรณ์การทดลอง 56
ภาคผนวก ค รอยเสียหายจากการกระแทกของลำพุ่ง 60
ภาคผนวก ง ตารางบันทึกผลการทดลอง 66
ภาคผนวก จ ประวัตินักวิจัย 97
ภาคผนวก ฉ ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ 116

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ความเร็วเสียงในแก๊สอุดมคติ	5
2.2	ความเร็วเสียงในตัวกลางที่อุณหภูมิ 20 ℃	7
2.3	ค่าคงที่ของก๊าซ	17
4.1	คุณสมบัติทางกายภาพของของเหลวที่ใช้ในการทดลอง	39
ง.1	ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำเมื่อฉีดในอากาศ ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 5 bar	67
ง.2	ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำมันดีเซลเมื่อฉีดในอากาศ ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 5 bar	68
ง.3	ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำมันก๊าดเมื่อฉีดในอากาศ ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 5 bar	69
ง.4	ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซลีนเมื่อฉีดในอากาศ ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 5 bar	70
ง.5	ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งแอลกอฮอล์เมื่อฉีดในอากาศ ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 5 bar	71
ง.6	ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำเมื่อฉีดในอากาศ ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 8 bar	72
ง.7	ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำมันดีเซลเมื่อฉีดในอากาศ ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 8 bar	73
ง.8	ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำมันก๊าดเมื่อฉีดในอากาศ ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 8 bar	74
ง.9	ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซลีนเมื่อฉีดในอากาศ ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 8 bar	75
ง.10	ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งแอลกอฮอล์เมื่อฉีดในอากาศ ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 8 bar	76
ง.11	ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำเมื่อฉีดในอากาศ ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 10 bar	77
ง.12	ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำมันดีเซลเมื่อฉีดในอากาศ ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 10 bar	78
ง.13	ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำมันก๊าดเมื่อฉีดในอากาศ ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 10 bar	79

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

ง.14 ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซลีนเมื่อฉีดในอากาศ ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 10 bar 80
ง.15 ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งแอลกอฮอล์เมื่อฉีดในอากาศ ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 8 bar 81
ง.16 ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำเมื่อฉีดในน้ำ ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 5 bar 82
ง.17 ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำมันดีเซลเมื่อฉีดในน้ำ ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 5 bar 83
ง.18 ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำมันก๊าดเมื่อฉีดในน้ำ ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 5 bar 84
ง.19 ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซลีนเมื่อฉีดในน้ำ ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 5 bar 85
ง.20 ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งแอลกอฮอล์เมื่อฉีดในน้ำ ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 5 bar 86
ง.21 ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำเมื่อฉีดในน้ำ ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 8 bar 87
ง.22 ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำมันดีเซลเมื่อฉีดในน้ำ ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 8 bar 88
ง.23 ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำมันก๊าดเมื่อฉีดในน้ำ ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 8 bar 89
ง.24 ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซลีนเมื่อฉีดในน้ำ ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 8 bar 90
ง.25 ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งแอลกอฮอล์เมื่อฉีดในน้ำ ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 8 bar 91
ง.26 ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำเมื่อฉีดในน้ำ ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 10 bar 92
ง.27 ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำมันดีเซลเมื่อฉีดในน้ำ ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 10 bar 93
ง.28 ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำมันก๊าดเมื่อฉีดในน้ำ ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 10 bar 94

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

ง.29 ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซลีนเมื่อฉีดในน้ำ ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 10 bar 95
ง.30 ผลการทดลองความดันกระแทกของลำพุ่งแอลกอฮอล์เมื่อฉีดในน้ำ ที่ความดันอากาศอัดเท่ากับ 10 bar 96

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	(a) กระแสลมที่ค่าของ M_a <1 และ (b) กระแสลมที่ค่าของ M_a >1	8
2.2	คลื่นกระแทก (shock wave)	9
2.3	คลื่นกระแทกเป็นแนวโค้ง	9
2.4	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงสภาวะต่างๆ ข้ามคลื่นกระแทกตั้งฉาก	10
2.5	ภาพถ่ายของ normal shock wave	10
2.6	Hydraulic jump	11
2.7	(a) normal shock wave (b) curved shock wave และ (c) oblique shock wave	11
2.8	การเปลี่ยนทิศของความเร็วด้านหน้าของ normal และ oblique shock wave	12
2.9	shock wave ที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง	12
2.10	แผนภาพส่วนประกอบของ Single-stage light gas gun	13
2.11	แผนภาพส่วนประกอบของ two stage light gas gun	15
2.12	แผนภาพการทำงานของ powder gun	16
2.13	เทคนิคการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph	17
2.14	การสร้างภาพด้วยเทคนิค Shadowgraph	18
2.15	พื้นฐานการจัดระบบชไรเรน (Schlieren)	18
2.16	หลักการทำงานของ Knife-edge	19
2.17	ผลจากการเปลี่ยนทิศทางของคมมีด	19
2.18	ระบบชไรเรนกับกระจกสะท้อน (Schlieren system with mirrors)	19
2.19	ระบบอินเทอเฟอโรมิเตอร์ขั้นพื้นฐานโดยการใช้ beam splitter	20
2.20	Mach-Zenhnder interferometer	20
2.21	การถ่ายภาพของการไหลเดียวกันด้วยเทคนิค (a) Shadowgraph photograph, (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
2.27	การปรับเทียบความดันกระแทก	26
3.1	Impact driven method หรือ Bowden and Brunton method	27
3.2	แผนภาพ horizontal single stage gas gun	28

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	ปั๊มลมโรตารี่ 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	รอยเสียหายจากการยิงในอากาศ ที่ระยะห่างจากหัวฉีด 15 mm ครั้งที่ 1	61
ค.2	รอยเสียหายจากการยิงในอากาศ 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	รอยเสียหายจากการยิงในอากาศ ที่ระยะห่างจากหัวฉีด 20 mm ครั้งที่ 3	62
ค.6	รอยเสียหายจากการยิงในอากาศ ที่ระยะห่างจากหัวฉีด 30 mm ครั้งที่ 1	62
ค.7	รอยเสียหายจากการยิงในอากาศแบบ ที่ระยะห่างจากหัวฉีด 30 mm ครั้งที่ 2	63
ค.8	รอยเสียหายจากการยิงในอากาศ ที่ระยะห่างจากหัวฉีด 40 mm ครั้งที่ 1	63
ค.9	รอยเสียหายจากการยิงในอากาศ ที่ระยะห่างจากหัวฉีด 40 mm ครั้งที่ 2	63
ค.10	รอยเสียหายจากการยิงในอากาศ ที่ระยะห่างจากหัวฉีด 50 mm ครั้งที่ 1	64
ค.11	รอยเสียหายจากการยิงในอากาศ ที่ระยะห่างจากหัวฉีด 50 mm ครั้งที่ 2	64
ค.12	รอยเสียหายจากการยิงในอากาศ ที่ระยะห่างจากหัวฉีด 50 mm ครั้งที่ 3	64
ค.13	รอยเสียหายจากการยิงในน้ำ ที่ระยะห่างจากหัวฉีด 30 mm ครั้งที่ 2	65
ค.14	รอยเสียหายจากการยิงในน้ำ ที่ระยะห่างจากหัวฉีด 40 mm ครั้งที่ 4	65