



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาคูณลักษณะพื้นฐานของลำพุงเชื้อเพลิงเหลวที่มีความเร็ว
มากกว่าเสียง และความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้กับหัวฉีดของ
เครื่องยนต์โดยการทดลอง

โดย

กุตเชษฐ์ เพียรทอง และ คณะ

เมษายน 2553



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาคุณลักษณะพื้นฐานของลำพ่นเชื้อเพลิงเหลวที่มีความเร็วมากกว่าเสียง
และความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้กับหัวฉีดของเครื่องยนต์โดยทำการทดลอง
(Fundamental study on characteristic of high-speed liquid fuel spray and its
application in engine fuel injection: the experimental investigation)

คณะผู้วิจัย

1. นายกุลเชษฐ์ เพียรทอง สังกัด คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
2. นายประชาสันติ ไตรยสุทธิ์ สังกัด คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
3. นายชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ สังกัด คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
4. นายวุฒิรัช สิทธีวงษ์ สังกัด คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
5. นายวิระพันธ์ สีหามาม สังกัด คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ประจำปีงบประมาณ 2551

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ รวมทั้งการจัดทำรูปเล่มรายงานการวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ขอขอบคุณนักศึกษาผู้ช่วยงานวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ช่วยสร้างชุดทดลอง ทำการทดลอง และรวบรวมผลการทดลอง อย่างขมักเขม้น ตลอดระยะในการทำวิจัยที่ผ่านมา การวิจัยครั้งนี้ ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี คณะผู้วิจัยขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

คณะผู้วิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	3
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ความเร็วเสียง	10
2.2 คลื่นซอร์ค	14
2.3 เลขเลขมัค	15
2.4 ชุดปล่อยกระสุนความเร็วสูง	16
2.5 การประยุกต์ใช้ลำพุ่งความเร็วสูง	21
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	24
2.7 การวัดความเร็วของลำพุ่ง	47
2.8 ผลกระทบของรูปทรงหัวฉีดที่มีต่อความเร็วของการฉีด	48
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย	
3.1 การสร้างลำพุ่งความเร็วสูงด้วยวิธี Projectile impact driven	58
3.2 ชุดกำเนิดลำพุ่งความเร็วสูง	59
3.3 การเปรียบเทียบความเร็วลูกปืน	62
3.4 การวัดความเร็วของลูกปืนและลำพุ่ง	64
3.5 รูปร่างของหัวฉีด	66

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6 ระบบถ่ายภาพลำพุงความเร็วสูง	67
3.7 วิธีการทดสอบ	69
บทที่ 4 ผลการวิจัย	
4.1 ปริมาณดินฟ้ากับความเร็วของลูกปืนและลำพุง	75
4.2 ปริมาณดินปืนและรูปทรงของหัวฉีดกับความเร็วของลำพุง	79
4.3 คุณลักษณะของลำพุงความเร็วสูง	81
บทที่ 5 สรุป	
5.1 สรุปผลการศึกษา	98
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	100
เอกสารอ้างอิง	102
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ผลงานตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	
ภาคผนวก ข ประวัติคณะผู้วิจัย	
ภาคผนวก ค ความเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิ	

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความเร็วเสียงในก๊าซ	12
2.2 ความเร็วเสียงในตัวกลาง ที่อุณหภูมิ 20 °C	14
2.3 ค่าดัชนีแปรและอัตราความเร็วสูงสุดในการฉีดของเหลว	56
2.4 อัตราความเร็วในการฉีดของเหลวโดยหัวฉีดรูโคงและหัวฉีดแข็ง	56
3.1 Main propellant combinations	63

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 สภาพของห้องผสมก่อนและหลังการเกิด HSLF	1
2.1 Trend of injection pressure and droplet size diameter in diesel engine	8
2.2 Bow shock wave ahead of supersonic diesel fuel jets	8
2.3 Various stages of the World fastest bio-diesel fuel jets	9
2.4 Various stages of supersonic gasoline fuel jets	9
2.5 Detach shock wave	15
2.6 กระแสลมที่ต่ำของ $Ma < 1$ และ กระแสลมที่ต่ำของ $Ma > 1$	16
2.7 แผนภาพส่วนประกอบของ Single stage light gas gun	17
2.8 แผนภาพส่วนประกอบของ two stage light gas gun	19
2.9 แผนภาพการทำงานของ Powder gun	20
2.10 Jet cutting technology	21
2.11 Water jet cleaning technology	22
2.12 Needles free jet injection device	23
2.13 วิธีการผลิตการฉีดของเหลวแบบ Supersonic ของ Bowden และ Brinton	26
2.14 การติดตั้งวิธีทำให้เกิดการฉีดแบบ hypersonic ในการศึกษาของ O'Keefe	27
2.15 การประคั้นรู้การฉีดของเหลวโดยอาศัยการสั่นสะเทือน	28
2.16 การประกอบชิ้นส่วนของหัวฉีดในการศึกษาของ Shi	28
2.17 ระบบกลไกของการฉีดของเหลวในอัตราความเร็วสูงจากปากของหัวฉีด	30
2.18 การแสดงลักษณะการฉีดของเหลวในอัตราความเร็วสูง ตอนต้น	31
2.19 รูปแสดงลักษณะการฉีดของเหลวในอัตราความเร็วสูง ตอนท้าย	32
2.20 ความหนาของแผ่นกระแทก 3 mm ระยะ 45 mm	37
2.21 รูปแสดงของหัวฉีดน้ำแบบ Supersonic แบบต่ำด้วยกลไกที่มีความเร็วสูง	41
2.22 รูปถ่ายของการฉีดในลักษณะพุ่งด้วยอัตราความเร็ว 9.2 m/s	42
2.23 การฉีดเชื้อเพลิงดีเซลแบบ Supersonic จากการถ่ายภาพภายในเนื้อหาน	42

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.24 การฉีดน้ำ ที่ความเร็ว 2,000 m/s	43
2.25 projectile impacts driven method	45
2.26 การติดตั้งชุดทดลองสำหรับการวัดความเร็วของลำพุ่ง	46
2.27 สัญญาณของ Oscilloscope จากการวัดความเร็วของการฉีดเชื้อเพลิงดีเซล	47
2.28 โครงสร้างและการวัดขนาดของหัวฉีดหลักอ่อนทรงกรวยตรง	48
2.29 หัวฉีดแบบ exponential และ hyperbolic	50
2.30 หัวฉีดทรงกรวยตรง	51
2.31 ผลของขนาดหัวฉีดต่อความเร็วการฉีดลำพุน้ำจากหัวฉีดหลักอ่อนทรงกรวยตรง	52
2.32 ผลของขนาดหัวฉีดต่อความเร็วการฉีดลำพุ่งดีเซลจากหัวฉีดหลักอ่อนทรงกรวยตรง	53
2.33 ผลของอัตราส่วน L/d ต่อความเร็วในการฉีดน้ำจากหัวฉีดหลักอ่อนทรงกรวยตรง	53
2.34 ผลของอัตราส่วน L/d ต่อความเร็วในการฉีดดีเซลจากหัวฉีดหลักอ่อนทรงกรวยตรง	54
2.35 ผลของมุมกรวยหัวฉีดต่อความเร็วในการฉีดน้ำและดีเซลด้วยหัวฉีดหลักอ่อนทรงกรวย	54
2.36 ผลกระทบของมวลกระสุนต่ออัตราความเร็วในการฉีดน้ำจากหัวฉีดหลักอ่อนทรงกรวย	55
2.37 ความเสียหายของหัวฉีดแข็งที่อิงได้เพียงครั้งเดียว	57
3.1 การสร้างลำพุ่งความเร็วสูง	58
3.2 The Horizontal Single Stage Powder Gun (HSSPG)	59
3.3 Gun powder chamber	60
3.4 Launch Tube	60
3.5 Generation of slow jet caused by a precursor blast wave	61
3.6 Pressure relief section	61
3.7 Test Chamber	62
3.8 Projectiles made from PMMA and HDPE	63
3.9 วิธี Laser beam interruption	64
3.10 สัญญาณแสดงเมื่อถูกปืนวิ่งผ่านชุด Sensor ที่วัดได้โดย Oscilloscope	65
3.11 Liquid jet velocity measurement arrangement	66
3.12 โครงร่างของหัวฉีดที่ใช้ในการทดลอง	66
3.13 รูปทรงของหัวฉีดที่ใช้ในการทดลอง	67

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 Parabolic mirrors	68
3.15 Light Source	68
3.16 กล้องวัดโดยความเร็วสูง	68
3.17 Z-type shadowgraph system	69
3.18 มวลของลูกปืน	70
3.19 ขนาดของลูกปืน	70
3.20 บรรจุลูกกระสุน	71
3.21 บรรจุดินน้ำมันและหัวจุดระเบิด	71
3.22 ตรวจสอบสัญญาณ Laser beam และ Oscilloscope	72
3.23 การประกอบชุดปืน	72
3.24 สัญญาณที่วัดได้จาก Laser beam ระยะห่าง 105 mm	73
3.25 สัญญาณที่วัดได้จาก Laser beam ระยะห่าง 33 mm	74
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลดินขับ (Black Powder) กับ ความเร็ว projectile	76
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลดินขับ (Smokeless Powder) กับ ความเร็ว projectile	76
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลดินขับต่างชนิด กับ ความเร็ว projectile	77
4.4 ภาพถ่ายการเคลื่อนที่ของลูกปืน จากกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง 66.67 micro-sec ด้วยภาพ	78
4.5 ความเร็วของลูกปืนที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงดินปืน	78
4.6 รูปทรงของหัวฉีด	79
4.7 The effect of nozzle shape and propellant mass on water jet velocities	80
4.8 ภาพถ่าย การเคลื่อนที่ของลำพุ่งของน้ำจากกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง	80
4.9 Comparison of fuel jets velocity	81
4.10 Jatropha curcas oil jets	82
4.11 Supersonic ethanol-95% (E95) jets	83
4.12 Effect of temperature on diesel fuel jets velocity	84
4.13 Effect of temperature on diesel fuel jets penetration distance	84
4.14 Comparison of diesel fuel jets between the results from test chamber temperature	85

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 Effect of pressure on supersonic diesel fuel jets velocity	86
4.16 Effect of pressure on diesel fuel jets penetration distance	86
4.17 Comparison of diesel fuel jets between the results from test chamber pressure	87
4.18 Jet tip explosion	88
4.19 Plots of penetration distance of fuel jets and average jet velocity: T130°C, Patm	89
4.20 Plots of penetration distance of fuel jets and average jet velocity: T130°C, Patm	90
4.21 Plots of penetration distance of fuel jets and average jet velocity: T130°C, Patm	90
4.22 Diesel fuel jet and shock wave at M= 2.1	92
4.23 Jatropha curcas oil jet and shock wave at M= 2.5	93
4.24 Bio-diesel jet and shock wave at M= 2.7	94
4.25 single-hole diesel nozzle	95
4.26 Plots of penetration distance of fuel jets and average jet velocity: single-hole nozzle	96
4.27 Shadowgraph photographs of high-speed fuel jet from a diesel nozzle	97

รายงานการวิจัยเรื่อง	การศึกษาคุณลักษณะพื้นฐานของลำพู่เชื้อเพลิงเหลวที่มีความเร็วมากกว่าเสียง และเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้กับหัวฉีดของเครื่องยนต์โดยทำการทดลอง
หัวหน้าโครงการวิจัย	รศ.ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง
ผู้ร่วมโครงการวิจัย	ผศ. ดร.ประชาสันติ ไตรยสุทธิ์ ผศ. ดร.ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ นายวุฒิชัย สิทธิวงษ์ นายวิระพันธ์ สีหานาม
คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปีงบประมาณ	2551
งบประมาณที่ได้รับ	690,000 บาท
คำสำคัญ	High-speed liquid fuel spray, projectile impact driven method, shock wave

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณลักษณะของลำพู่ความเร็วสูง (high-speed diesel fuel jets) เมื่ออุณหภูมิและความดันในห้องทดสอบเพิ่มขึ้น โดยใช้การถ่ายภาพความเร็วสูงและเทคนิค shadowgraph การทดลองจะทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ในช่วง 30 – 150 °C ความดันภายในห้องทดสอบ ในช่วง 1 – 8.2 bar เปรียบเทียบความเร็วและระยะแหวกอากาศ (penetration distance) ของลำพู่เชื้อเพลิงดีเซลความเร็วสูงกับสภาวะบรรยากาศ (30 °C, 1 bar) ลำพู่เชื้อเพลิงดีเซลที่ความเร็วสูงจะผลิตจากวิธีการที่เรียกว่า “Projectile impact driven” ความเร็วของลูกปืน (Projectile) ประมาณ 800 m/s หัวฉีดทรงกรวยมุม 30° ขนาดคอคออด (orifice diameter) 0.7 mm

จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิมีผลต่อความเร็วและระยะแหวกอากาศของลำพู่ของเชื้อเพลิงดีเซลคือ ที่อุณหภูมิ 30 °C ความดันบรรยากาศ ลำพู่ของน้ำมันดีเซลมีความเร็วสูงสุดประมาณ 1,400 m/s และระยะแหวกอากาศ ได้ 230 mm ที่เวลา 299 μs กรณีที่อุณหภูมิห้องทดสอบสูงขึ้น ความเร็วเริ่มต้นของลำพู่จะต่ำลง เกิดการแตกตัว (atomization) ของเม็ดเชื้อเพลิงอย่างชัดเจน ส่วนกรณีที่เพิ่มความดันในห้องทดสอบ ความเร็วของลำพู่จะลดลงอย่างต่อเนื่อง

Title	Fundamental study on characteristic of high-speed liquid fuel spray and its application in engine fuel injection: the experimental investigation
Head of Project	Assoc. Prof. Dr. Kulachate Pianthong
Co-researchers	Asst. Prof. Dr. Prachasanti Thaiyasuit Asst. Prof. Dr. Chawalit Thinvongpituk Mr. Wuttichai Sittiwong Mr. Wirapan Seehanam
Faculty of Engineering	Ubon Ratchathani University
In Finance Year	690,000 Bath
Keyword	High-speed liquid fuel spray, projectile impact driven method, shock wave

Abstract

This study investigates on characteristics of high-speed diesel fuel jets affected by the increase of temperature and pressure in the test chamber. The horizontal single stage powder gun was constructed to generate high speed liquid jet by the method called “projectile impact driven method”. In experiments, projectile velocity around 800 m/s and nozzle with 30° of conical angle and 0.7 mm of orifice diameter are used, and high speed video camera and optical system with shadowgraph technique were used to capture the dynamics characteristics of the jets. The high speed diesel fuel jets are injected into test chamber in which temperature and pressure were varied over range of 30 – 150 °C and 1 - 8.2 bar respectively.

From experimental results, it is found that at room condition (30°C, 1 bar) the maximum average jet velocity and jet penetration distance are around 1,400 m/s and 230 mm respectively, and these are lower than that at the high temperature and pressure condition. In addition, intensive atomization of high speed diesel jets can be observed from the results at higher temperature inside test chamber.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในอดีตมีการนำเอาลำพู่ของของเหลวที่มีความเร็วสูง (high-speed liquid jet) มาประยุกต์ใช้กับงานหลายๆอย่าง เช่น การตัดโลหะ การเจาะรูโคงค์ การทำเหมืองแร่ และการทำความสะอาด [1-3] และในปัจจุบันก็ยังมีการศึกษาและพัฒนาต่อไป เมื่อไม่นานมานี้ มีการตั้งข้อสังเกตว่า การนำเอาคุณสมบัติของลำพู่ มาใช้กับการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ จะก่อให้เกิดประโยชน์เป็นอย่างมากเช่นกัน เนื่องจากลำพู่เชื้อเพลิง (fuel jet) ที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง (มากกว่าเสียงขึ้นไ) จะทำให้เกิดการเสียดสี (shear) กับอากาศรอบข้าง และเกิดการแตกตัว (atomization) ของน้ำมันเชื้อเพลิง เกิดการผสมกวนคล้า (mixing) เป็นอย่างดี ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ สูงกว่าการฉีดน้ำมันด้วยความเร็วและแรงดันปกติ เป็นผลให้มลพิษในไอเสียลดลง (โดยเฉพาะ CO , CO HC และ smoke particulate) [4-15] กำลังและแรงบิด ของเครื่องยนต์ก็น่าจะเพิ่มขึ้นด้วย

การศึกษาลักษณะของการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงที่ความเร็วสูง (high-speed liquid fuel jets: HSLFJ) นี้ โดยทฤษฎีแล้วจะเป็นประโยชน์ ต่อเครื่องยนต์ที่ต้องการเผาไหม้อย่างรวดเร็วและรุนแรง เช่น Supersonic Combustion Ram Jet (SCRAM jet) หรือเครื่องยนต์ที่มีการเผาไหม้ที่ระดับความเร็วมากกว่าเสียง และเครื่องยนต์เซลลวมรรถนะสูง (high performance diesel engine) อีกทั้งในการฉีดน้ำมันที่มีความเร็วสูงนี้จะทำให้เกิดคลื่นช็อค (shock wave) นำหน้าลำพู่ น้ำมัน ซึ่งจะเป็นการเหนี่ยวนำ (shock induced heating) ความร้อนมาอุ่น และระเหยละอองน้ำมัน ช่วยให้การเผาไหม้ให้ดีขึ้นด้วย [4,5,7,15]



รูปที่ 1.1 สภาพของห้องทดสอบก่อนและหลังการ เกิด HSLFJ. K. Pianthong *et al.* [21]

ปัจจุบันมีแนวคิดในการบรรจุ หรือโยน (charge) เชื้อเพลิงเหลวเข้าไปในกระบอกสูบของเครื่องยนต์แบบใหม่ที่เรียกว่า “Homogeneous charge compression ignition (HCCI)” ซึ่งถือว่าเป็นองค์ความรู้ใหม่สำหรับเครื่องยนต์แบบสันดาปภายใน (internal combustion engine) และมีข้อดีหลาย

อย่างเช่น มลพิษของไอเสียที่ลดลง (โดยเฉพาะ NO_x และฝุ่นละออง (particulate) ลดลงเกิน 50%) และสามารถเผาไหม้ได้ดี ที่ช่วงเชื้อเพลิงในการเผาไหม้น้อย (lean combustion) ซึ่งจะทำให้ประหยัดน้ำมันได้มากกว่าการ charge น้ำมันเชื้อเพลิงแบบปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม HCCI ก็ยังมีปัญหาที่มากที่จะต้องแก้ไข คือ การควบคุมการเผาไหม้ ให้ได้จังหวะที่แน่นอน และ การทำงานที่ภาระงานสูงสุดและภาระงานที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว (operation at full load and suddenly varied load) HCCI ยังไม่สามารถทำงานได้ดี จึงยังไม่มีการนำมาใช้จริงในเครื่องยนต์ปัจจุบัน หากมองในแง่ของ HCCI แล้ว HSLFJ ก็คือการนำ HCCI แบบกลายๆ ผู้เสนอโครงการขอเรียกว่า Virtual HCCI (VHCCI) ซึ่งเป็นการนำข้อดีของ HCCI มาใช้โดยไม่จำเป็นต้องทำการดัดแปลงอุปกรณ์ และ ปรับปรุงทฤษฎีการเผาไหม้ใหม่ รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างของห้องทดสอบ (test chamber) ก่อนและหลังการ เกิด HSLFJ จะเห็นว่าเกิดละอองน้ำมันที่เป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) หากเกิดการป้อนเชื้อเพลิง (fuel charge) ลักษณะเช่นนี้ในกระบอกสูบ ประสิทธิภาพการเผาไหม้ และคุณภาพของไอเสียจะดีขึ้นมาก

ดังนั้น โครงการนี้ จะมุ่งศึกษาคุณลักษณะของน้ำมันเชื้อเพลิงเหลว ที่ความเร็วสูง แรงดันหัวฉีดสูงๆ (เท่าที่ชุดทดลองจะทำได้ ประมาณ 2000 m/s) และที่ความเร็วสูงกว่าที่มีอยู่เครื่องยนต์จริงในปัจจุบัน เพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบ หัวฉีด กระบอกสูบ และการเผาไหม้สำหรับเครื่องยนต์ในอนาคต โดยจะใช้วิธีการยิงลูกปืน ไปกระแทกน้ำมันที่อยู่ในหัวฉีด แล้วเกิดลำพุ่งเชื้อเพลิง ที่ความเร็วสูงมากๆ ซึ่งเครื่องยนต์ในปัจจุบันไม่สามารถทำได้ และเน้นที่การศึกษาคุณลักษณะของลำพุ่ง โดยใช้กล้องวิดีโอความเร็วสูง

หมายเหตุ ปัจจุบัน เครื่องยนต์ทุกรุ่น มีแนวโน้มที่จะใช้แรงดันและความเร็วของ Spray (หรือ jet) น้ำมัน สูงขึ้นเรื่อยๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. สร้างชุดทดลองและอุปกรณ์พื้นฐาน สำหรับการศึกษา HSLFJ
2. ศึกษาพฤติกรรมและสมรรถนะของชุดทดลอง และเปรียบเทียบค่าต่างๆ
3. ศึกษาคุณลักษณะพื้นฐานของ HSLFJ ที่เกิดจากการก่อกวนด้วย วิธี "projectile impact driven" กับหัวฉีดรูปร่างต่างๆ ที่แรงดันและความเร็วต่างๆ
4. ศึกษาการเกิดกำเนิดการเผาไหม้จากการเหนี่ยวนำของคลื่น ของน้ำมัน ดีเซล ที่สภาวะ อุณหภูมิ และความดันต่ำ
5. วิเคราะห์ความถี่ไปได้และพัฒนาการนำ HSLFJ ไปสู่การใช้งานจริง
6. ได้ชุดยิงลูกปืน (launcher) ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการทดสอบที่เกี่ยวข้องกับลำพุ่งความเร็วสูงที่แน่นอนอื่น

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. สร้างชุดยิงลูกปืนที่มีความเร็วกระพอก อย่างน้อย 800 m/s และอุปกรณ์ประกอบที่จำเป็น อื่นๆ
2. ทำการปรับเทียบ (calibration) เพื่อหากราฟสมรรถนะ (performance charts) ของชุดยิงลูกปืน เพื่อเป็นตัวแปรตั้งต้นในการทดลอง
3. ศึกษาเกี่ยวกับคุณลักษณะทั่วไป ของลำพุ่งเชื้อเพลิงที่ถูกสร้างด้วยวิธี “projectile impact method” ที่ความเร็วสูง และหัวฉีดรูปร่างต่างๆ โดยเน้นที่แรงดันและความเร็วลำพุ่งที่สูงกว่าเครื่องยนต์จริงเล็กน้อย เช่น 800-1200 m/s และใช้หัวฉีดที่คล้ายกับหัวฉีดในเครื่องยนต์มากขึ้น
4. การศึกษาคุณลักษณะของลำพุ่งใช้วิธีวัดความเร็ว ด้วยหลักการตัดแสงเลเซอร์ (laser beam interruption method) และถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูง (high-speed video camera)
5. วิเคราะห์ คุณลักษณะของลำพุ่ง และวิเคราะห์ ประเมิน และแนะแนวทางในการพัฒนา HSLFJ ไปสู่การใช้งานจริง

1.4 ระเบียบวิธีการวิจัย

1. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องของ
2. ศึกษาวิธีการออกแบบสร้างชุดกำเนิดลำพุ่งความเร็วสูงโดยวิธี “projectile impact driven method”
3. ออกแบบ สร้าง ทดสอบ และปรับปรุง ชุดทดลองการกำเนิดลำพุ่งความเร็วสูง
4. ออกแบบ สร้างทดสอบ และ ปรับปรุง ชุดเครื่องวัดความเร็วของลูกปืนและลำพุ่งของเหลว โดยวิธี “Laser beam interruption method”
5. ออกแบบ สร้าง ทดสอบและปรับปรุง ชุดถ่ายภาพ (visualization) ด้วยวิธี shadowgraph
6. กำหนดลำพุ่งเชื้อเพลิงความเร็วสูง วัดความเร็ว ถ่ายภาพโดยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง
7. วิเคราะห์และสรุปผล
8. เขียนรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ผลการศึกษานี้เกี่ยวกับลำพุ่งเชื้อเพลิงที่ความเร็วและความดันที่สูงกว่าปกติที่เครื่องยนต์ทำได้ เพื่อเป็นพื้นฐานการออกแบบเครื่องยนต์ในอนาคต
2. เป็นการศึกษาพื้นฐานเพื่อให้ข้อมูลงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง เช่น สถาบันหรือบริษัท ยานยนต์ต่างๆ และหน่วยงานอื่นที่เกี่ยวกับเครื่องยนต์ SCRAMJET

3. เป็นการศึกษาเพื่อยืนยันและขยายผล จากทฤษฎีหรือสมมติฐาน ที่น่าจะเป็นจริงได้เกี่ยวกับการเผาไหม้ด้วยการเหนี่ยวนำจากคลื่นซ็อกซ์ของลำพุ่งความเร็วสูง
4. เป็นการศึกษาที่เป็นเทคนิคที่เฉพาะ (unique technique) และเป็นองค์ความรู้ใหม่ สามารถเป็นผลงานวิจัยระดับนานาชาติได้
5. หน่วยงานที่สนใจสามารถนำผลที่ได้ไปใช้ประโยชน์ได้ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมเกี่ยวกับการเผาไหม้ หน่วยงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับลำพุ่งความเร็วสูง

บทที่ 2

บททวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบัน ในอุตสาหกรรมยานยนต์ แนวโน้มในการพัฒนาหัวฉีด (injector) ของเครื่องยนต์ทั้ง diesel (เครื่องยนต์ดีเซล) และ gasoline (เครื่องยนต์เบนซิน) มีแนวโน้มที่จะเพิ่มแรงดันของหัวฉีด ให้สูงขึ้นเพื่อเพิ่มความละเอียดของฝอยน้ำมัน (spray or jet) เพื่อการคลุกเคล้าที่ดีของน้ำมันเชื้อเพลิงกับอากาศ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้และลดมลพิษทางไอเสีย รวมทั้งเป็นการประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิงอีกด้วย (เนื่องจากให้ความร้อนเท่าเดิมโดยปริมาณน้ำมันที่ใช้้น้อยกว่าเดิม) ปัจจุบัน (ปี 2548) เครื่องยนต์ดีเซลชนิด common rail ได้พัฒนา ให้มีแรงดันสูงขึ้นเป็น 180 MPa หรือ 1800 bar ซึ่งสูงกว่าเครื่องยนต์ในอดีตประมาณ 10 เท่าและความเร็วของ spray (หรือ jet) น้ำมัน อยู่ที่ประมาณ 300 m/s เครื่องยนต์ GDI (gasoline direct injection) ซึ่งจะฉีดน้ำมันเข้ากระบอกสูบโดยตรง คล้ายกับเครื่องยนต์ดีเซล มีแรงดันหัวฉีดอยู่ที่ประมาณ สูงกว่า 5 MPa ซึ่งเพิ่มจากอดีตประมาณ 2 เท่า เครื่องยนต์ GDI ขณะนี้เริ่มเป็นที่นิยมและได้รับการยอมรับว่าช่วยประหยัดน้ำมันและลดมลภาวะได้ดี [16-17]

หมายเหตุ ปัจจุบัน หัวฉีดน้ำมันในเครื่องยนต์ดีเซล สามารถทำได้สูงสุดที่ความดันประมาณ 300 MPa ที่ความเร็วลำพู่ 700 m/s

ในการศึกษาเกี่ยวกับลำพู่ความเร็วสูง ที่ระดับความดันที่สูงมาก กว่าที่เครื่องยนต์จะทำได้ ต้องใช้เทคนิคการทดลองแบบพิเศษ นั่นคือการใช้ลูกปืนกระแทก (projectile impact driven method) และผลัดดัน (compress) น้ำมันให้ออกมาจากหัวฉีด (nozzle) ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้กันอยู่ในกลุ่มวิจัยเล็กๆ [1,4,6] แต่เป็นวิธีที่ให้แรงดันและความเร็ว ของลำพู่เชื้อเพลิง ที่สูงมาก ที่ความเร็วกระแทกของลูกปืน 1000 m/s แรงดันในหัวฉีดอาจจะสูง 2 GPa (20,000 bar) และความเร็วสูง ถึงระดับ hypersonic (ความเร็วสูงกว่า 1800 m/s) ในสภาวะอากาศปกติ [5,23-24]

จากการศึกษาของนักวิจัยบางกลุ่ม [4-5] อ้างว่า ถ้าน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีความเร็วสูงมากๆ (สูงกว่า 2000 m/s) ไปในอากาศที่สภาวะความดันและอุณหภูมิปกติ น้ำมันเชื้อเพลิงอาจจะเกิดการติดไฟได้เอง (auto-ignition) โดยไม่ต้องให้ความร้อนจากภายนอกเลย แต่ความร้อนนั้นมาจากการเหนี่ยวนำของคลื่นช็อคกิ้ง (shock induced heating) อย่างไรก็ตามการเกิดของปรากฏการณ์นี้ เป็นเพียงการกล่าวอ้าง ควรจะต้องมีการศึกษาเพื่อยืนยัน ในรายละเอียดต่อไป จากการศึกษาในเบื้องต้นของ Painthong [7,21,25,26] น้ำมันเชื้อเพลิงไม่น่าจะติดไฟได้โดยความร้อนจากคลื่นช็อคกิ้ง (shock heating) ที่ความเร็วนี้ และที่สภาวะอากาศปกติ แต่ถ้ามีการเพิ่มอุณหภูมิหรือแรงดันในห้องเผาไหม้

ให้สูงขึ้น (แต่ไม่ต้องสูงเหมือนในเครื่องยนต์) น้ำมันอาจจะติดไฟได้เองง่ายขึ้นและต่อเนื่อง ประเด็นนี้เป็นประเด็นที่ควรจะมีการศึกษาต่อไป คุณสมบัติของลำพุ่งความเร็วสูง ที่สร้างโดยใช้ความเร็วกระแทกต่างๆ และใช้หัวฉีด รูปร่างต่างก็ให้ผลการทดลองที่น่าสนใจ และถื่นประเด็นที่จะต้องศึกษาอีกต่อไป [27-29]

ปัจจุบัน งานวิจัยเกี่ยวกับการฉีดน้ำมัน (หรือของเหลว) ที่ระดับความเร็วมากกว่าเสียง (supersonic และ hypersonic โดยวิธี projectile impact driven) มีการศึกษาอยู่เพียงแค่สองสถาบันเท่านั้นในโลก คือ ที่ School of Mechanical and Manufacturing Engineering, The University of New South Wales (UNSW), Australia และที่ Interdisciplinary Shock Wave Research Center (ISWRC), Institute of Fluid Science (IFS), Tohoku University, Japan โดยนักวิจัยหลัก คือ Dr. Kulachate Piantong (ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง) ซึ่งทำงานวิจัยนี้เป็นวิทยานิพนธ์ปริญญาเอก ที่ UNSW และโครงการร่วมมือ หลังจบปริญญาเอก ที่ ISWRC ผู้สนับสนุนงานวิจัยและที่ปรึกษา คือ Prof. Brian Milton (UNSW) และ Prof. Kazuyoshi Takayama (ISWRC)

จากการศึกษามาก่อนหน้านี้เป็นเวลามากกว่า 8 ปี มีการค้นพบข้อมูลผลการทดลองที่แปลกใหม่และน่าสนใจหลายประการ (ดังได้เสนอในการสัมมนาวิชาการและวารสารระดับนานาชาติ ดังที่แสดงในรายการของบทความวิจัย ของ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง โดยส่วนใหญ่จะสนใจที่คุณลักษณะและพฤติกรรมของลำพุ่ง ที่ความเร็วสูงมากๆ: hypersonic) ทั้งที่ยังมีประเด็นที่น่าสนใจและควรจะศึกษา คือ (1) คุณลักษณะพื้นฐาน (fundamental characteristics) ของของลำพุ่ง ที่ความเร็วสูงในระดับนี้ ซึ่งยังมีน้อยมากในปัจจุบัน (2) ที่ระดับความเร็ว และความดันที่สูงกว่าในเครื่องยนต์ปกติเล็กน้อย เพื่อเป็นการเสนอข้อมูลให้กับอุตสาหกรรมหรือผู้ผลิตเทคโนโลยีด้านพ่นเชื้อเพลิงและการเผาไหม้ เป็นข้อมูลในการออกแบบหรือพัฒนาเครื่องยนต์ (3) การศึกษาที่ระดับความเร็วสูง (สูงกว่า 2500 m/s) เพื่อพิสูจน์การเผาไหม้จากการเหนี่ยวนำของคลื่นช็อค และการเผาไหม้ที่ความเร็วสูง (supersonic combustion) ก็ควรจะดำเนินการควบคู่กันไป

ลำพุ่งของเหลวความเร็วสูงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานหลายประเภทในปัจจุบัน ได้แก่ อุตสาหกรรมขึ้นรูปวัสดุ การเผาไหม้ของเครื่องยนต์ หรือแม้แต่ในทางการแพทย์ ซึ่งแต่ละประเภทการใช้งานต้องการคุณลักษณะของลำพุ่งแตกต่างกันออกไป เช่น การเจาะหรือการตัดวัสดุหิน ความดันสร้างลำพุ่งจะอยู่ในช่วง 50 – 500 MPa โดยมีความเร็ว 300 – 1,000 m/s [1 และ 2] เทคโนโลยีการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ ประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับความเร็วของการฉีดน้ำมัน เชื่อว่าหากสามารถฉีดน้ำมันด้วยความเร็วสูงมาก ได้ ประสิทธิภาพการเผาไหม้ยังดีและเป็นการลดมลภาวะจากการเผาไหม้ด้วย [3]

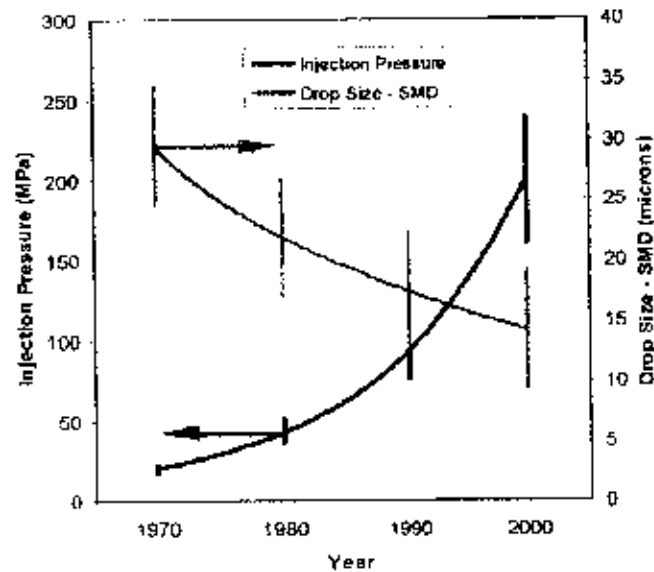
ทางการแพทย์ ยังนำเทคโนโลยีลำพุ่งของเหลวถูกศึกษาและพัฒนาเพื่อนำส่งยาเข้าสู่ร่างกายแทนเข็ม พบว่าความเร็วและความดันน้อยสุดในการเจาะผิวหนัง ประมาณ 150 m/s และ 140 MPa ตามลำดับ [4 และ 5] ซึ่งความเร็วของลำพุ่งจะต้องมากขึ้นตามเป้าหมายในการฉีด นอกจากการประยุกต์ใช้งานดังที่กล่าวไว้ ลำพุ่งความเร็วสูงยังถูกนำไปใช้กับ อุตสาหกรรมเจาะน้ำมัน เจาะอุโมงค์ หรือแม้แต่การฉีดพ่นต่างๆด้วยเช่นกัน

จะเห็นได้ว่าเทคโนโลยีของลำพุ่งความเร็วสูงมีบทบาทต่อการพัฒนาในงานหลายประเภท ดังที่กล่าวไว้ ดังนั้นความเข้าใจคุณลักษณะของลำพุ่ง จึงมีความสำคัญ และนอกจากนั้นแล้ว การเพิ่มความเร็วลำพุ่งให้สูงขึ้นมีความสำคัญต่อการพัฒนาเทคโนโลยีเหล่านี้แน่นอนยากหลีกเลี่ยงไม่ได้

การศึกษาเพื่อเพิ่มความเร็วของลำพุ่งให้สูงกว่าความเร็วเสียง (ระดับ supersonic หรือ hypersonic) F. P. Bowden และ J. H. Brunton [6] ศึกษาศักยภาพกระแทกบนวัสดุของลำพุ่งความเร็วสูง ซึ่งใช้หลักการ “จับลำพุ่งด้วยการกระแทก (impact driven method)” โดยลำพุ่งที่ได้มีความเร็วสูงถึง 1200 m/s จากนั้นด้วยหลักการเดียวกัน K. Piantong และคณะ [7-10] ศึกษาการฉีดเชื้อเพลิงที่ความเร็ว 1500 – 2,500 m/s เพื่อศึกษาคุณลักษณะของลำพุ่งกับการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากลำพุ่งความเร็วสูงถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานหลายประเภท จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาคุณลักษณะที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ในด้านอื่นๆ ด้วย

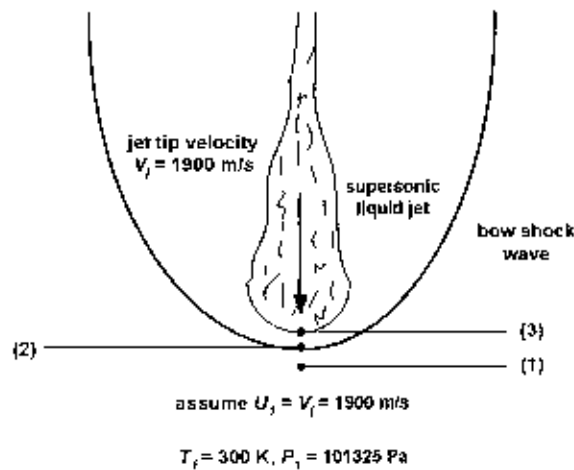
เกี่ยวกับลำพุ่งเชื้อเพลิงความเร็วสูง เนื่องจากการศึกษาที่ค่อนข้างใหม่และมีกลุ่มนักวิจัยที่ทำเรื่องนี้น้อยมาก ทฤษฎีของการพ่นเชื้อเพลิงด้วยความดันสูง ยังไม่มีแต่สามารถอ้างอิงได้บ้าง จากทฤษฎีของการพ่นและแตกตัว (spray and atomization) ที่ใช้กันในงานอุตสาหกรรม การค้นพบและข้อมูลจากการทดลองต่างๆ ในปัจจุบัน ยังมีไม่มากพอที่จะเป็นทฤษฎีได้

สมมติฐาน จากทฤษฎีการพ่นและแตกตัวของเชื้อเพลิง บอกว่าเมื่อพ่นเชื้อเพลิง ถูกฉีดออกมาด้วยความดันสูงขึ้นขนาดของเม็ดอนุภาค (sauter mean diameter, SMD) ก็จะเล็กลง ทำให้เกิดการระเหยตัว (evaporate) ของน้ำมันเชื้อเพลิงได้ดีขึ้นด้วย การฉีดเชื้อเพลิง ออกมาด้วยความเร็ว และรุนแรงนี้ จะเหนี่ยวนำ (induced) ให้เกิดการผสมคลุกเคล้ากัน (mixing) กันระหว่างอากาศและน้ำมันได้ดีมากขึ้น เพราะเกิดแรงเฉือนหรือเฉียดสี (shear) ที่ผิวขอบของลำพุ่งน้ำมันกับอากาศรุนแรง (strong shear layer) เมื่อเกิดการจุดติดไฟ การเผาไหม้ของส่วนผสมก็จะดีขึ้น (รวดเร็วและทั่วถึง) และให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงขึ้น ดังนั้น จะทำให้ประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิงได้ และลดภาวะจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ขึ้น ก็จะน้อยกว่าการเผาไหม้ที่เป็นอยู่ปกติด้วย

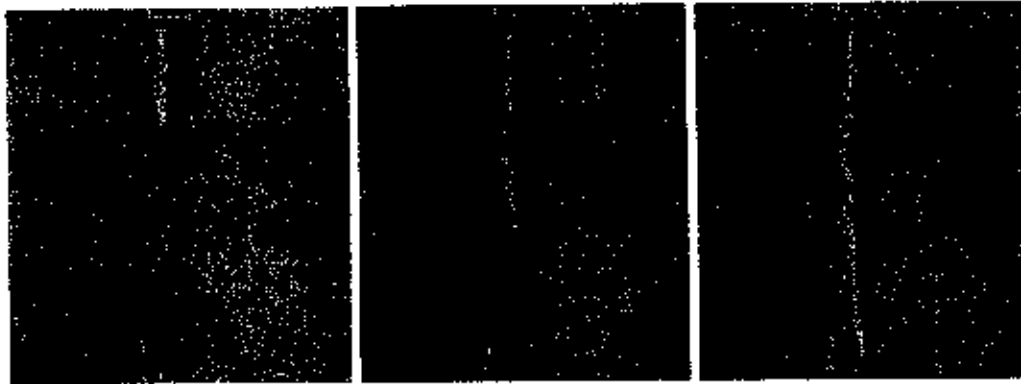


รูปที่ 2.1 Trend of injection pressure and droplet size diameter in diesel engine [30]

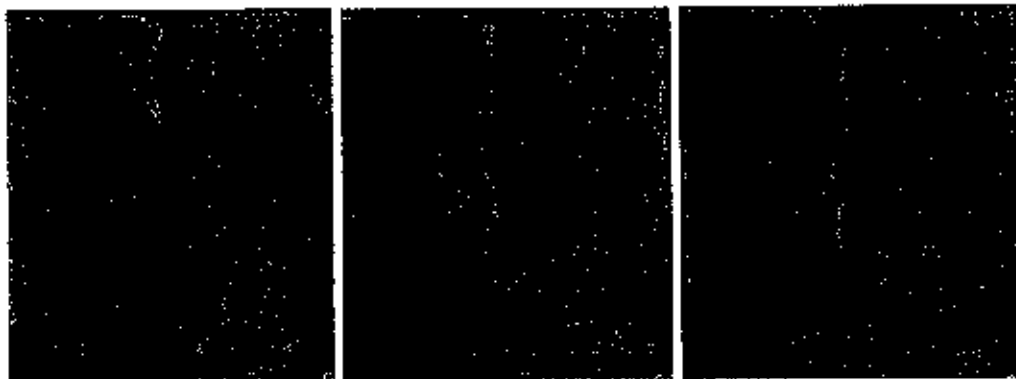
ตัวอย่างของแนวโน้มของการพัฒนาเครื่องยนต์ดีเซล และแรงดันให้หัวฉีดและขนาดของ SMD [30] แสดงในรูปที่ 2.1 ถ้าลำพ่นเชื้อเพลิง มีดที่ความเร็วสูงมากขึ้นไปอีก (โดยใช้เทคนิคการสร้างลำพ่นด้วย impact driven method) ลำพ่นเชื้อเพลิงที่ได้มีความเร็วในระดับเหนือความเร็วเสียง (supersonic/hypersonic) จะทำให้เกิดคลื่นช็อค นำหน้าลำพ่นเชื้อเพลิงและความร้อนเพิ่มขึ้นจากคลื่นช็อค (shock heating) ตามทฤษฎีของคลื่นช็อค อุณหภูมิและความดัน หลังคลื่นช็อคจะเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนหลายเท่า (ขึ้นอยู่กับเลข Mach ของลำพ่นเชื้อเพลิง และอุณหภูมิบรรยากาศ) จะทำให้เกิดการระเหย (evaporate) ที่ดี และอาจจะเกิดการติดไฟโดยอัตโนมัติ (auto-ignition) ได้



รูปที่ 2.2 Bow shock wave ahead of supersonic diesel fuel jets



รูปที่ 2.3 Various stages of the World fastest bio-diesel fuel jets [37]



รูปที่ 2.4 Various stages of supersonic gasoline fuel jets [37]

ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เมื่อใช้ กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง จะเห็นว่า บริเวณ 1 (region 1) ที่มีอุณหภูมิ 300 K และ ความดัน 1 atm (1.01325 bar) เมื่อลำพ่น มีความเร็วเท่ากับ 1900 m/s บริเวณ 2 (region 2) บริเวณหลังคั่นช็อคจะมีอุณหภูมิ 2034 K และความดัน 35 MPa [7,21] อุณหภูมินี้ อาจจะทำให้ น้ำมันดีเซล คัดไฟเพนได้ถึงจะไม่ติดไฟ ก็จะช่วยให้ความวีย่นแก่ spray ทำให้เกิดการระเหยตัว (evaporate) ได้ดีขึ้น ส่วนบริเวณ 3 (region 3) จะมีอุณหภูมิต่ำลงมาตามระยะห่างและถ้าใช้ทฤษฎีของคลื่นช็อค อุณหภูมิและความดันในบริเวณ 2 (region 2) จะเท่ากับ 1130 K และ 0.95 MPa เท่านั้นซึ่งก็จะช่วยทำให้เกิดการผสมที่ดีได้ ค่าตัวเลขที่บอกมานั้นเป็นค่าทางทฤษฎี (โดยการคำนวณจากสมการพื้นฐาน) เท่านั้น และเป็นการยากที่จะวัดจากการทดลอง หากมีการใช้ CFD มาช่วยในการ คำนวณ หรือ ทำนายตัวเลขเหล่านี้ ก็จะเป็นประโยชน์ อย่างมาก ในการออกแบบ หรือ พัฒนากลไกที่เกี่ยวข้องลำพ่นที่อิงถึงความเร็วสูงต่อไป [31-34] รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างของน้ำมัน bio-diesel ที่ผลิตจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว ที่ความเร็วประมาณ 1400 m/s (หมายเหตุ: เป็นลำพ่นน้ำมัน bio-diesel ที่ความเร็วสูงที่สุดในโลก ณ เวลาปัจจุบัน) หลังจาก กระบวนการเกิดลำพ่นแล้ว น้ำมัน

แตกกระจายเป็นละออยคืดมาก แต่ความยาวของพ่นน้ำมันมากเกินไป อาจจะไม่เหมาะที่จะใช้งานกับเครื่องยนต์ขนาดเล็ก หรือไม่ก็ต้องออกแบบหัวฉีดใหม่ สิ่งเหล่านี้คงจะมีการศึกษาต่อไป [35-37] ส่วนรูปที่ 2.4 เป็นลำพ่นของ gasoline ที่ความเร็วประมาณ 900 m/s ทั้งๆ ที่ทำการทดลองที่สภาวะใกล้เคียงกันกับ รูปที่ 2.3 แต่ผลที่ได้ค่อนข้างต่างกัน

2.1 ความเร็วเสียง (Speed of sound)

ระยะทางที่เสียงเดินทางไปในตัวกลางใดๆ ได้ในหนึ่งหน่วยเวลา โดยทั่วไปเสียงเดินทางในอากาศที่มีอุณหภูมิ 25°C (298 K) ได้ประมาณ 346 m/s และในอากาศที่อุณหภูมิ 20°C ได้ประมาณ 343 m/s ความเร็วที่เสียงเดินทางได้นั้นอาจมีค่ามากขึ้นหรือน้อยลงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของตัวกลางเป็นหลัก และอาจได้รับอิทธิพลจากความชื้นบ้างเล็กน้อย แต่ไม่ขึ้นกับความดันอากาศ เนื่องจากการเดินทางของเสียงอาศัยการสั่นของโมเลกุลของตัวกลาง ดังนั้นเสียงจะเดินทางได้เร็วขึ้นหากตัวกลางมีความหนาแน่นมาก ทำให้เสียงเดินทางเร็วในของแข็ง แต่เดินทางไม่ได้ในอวกาศ เพราะอวกาศเป็นสุญญากาศจึงไม่มีโมเลกุลของตัวกลางอยู่ ความเร็วเสียง c โดยทั่วไปคำนวณหาได้จาก

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

โดย

C คือ สัมประสิทธิ์ของความแข็งเกร็ง (coefficient of stiffness)

ρ คือ ความหนาแน่น

ดังนั้น ความเร็วเสียง จะเพิ่มขึ้นตามความแข็งเกร็งของวัสดุ และ ลดลงเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น

2.1.1 ความเร็วเสียงในก๊าซ

ในก๊าซ ค่า K สามารถประมาณโดย

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

โดย

γ คือ ดัชนีอะเดียแบติก (Adiabatic index) บางครั้งใช้สัญลักษณ์ κ

P คือ ความดัน

ดังนั้น ความเร็วเสียงในก๊าซสามารถคำนวณได้โดย

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

ในกรณี ก๊าซในอุดมคติ (Ideal gas) จะได้

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

โดย

R (287.05 J/(kg.K) สำหรับอากาศ) คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (gas constant) สำหรับอากาศ ปกติ ในทางอากาศพลศาสตร์คำนวณได้จาก การหารค่าคงที่ของก๊าซสากล R (J/(mol.K) ด้วย ค่ามวลโมล (molar mass) ของอากาศ

Gamma (γ) คือ ค่า ดัชนีอะเดียมาติก (adiabatic index) (เท่ากับ 1.402 สำหรับอากาศ) บางครั้งเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ κ (cappa)

T คือ ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน) (นิวตัน นั้นค้นพบวิธีการหาค่าความเร็วเสียงก่อน พัฒนาการของ อุณหพลศาสตร์ และได้ใช้การคำนวณแบบอุณหภูมิเสมอ (isothermal) แทนที่จะเป็นแบบอะเดียมาติก (adiabatic) ซึ่งทำให้สูตรของนิวตันนั้นขาดตัวคูณ) ที่สภาพบรรยากาศมาตรฐาน (standard atmosphere)

$T_0 = 273.15 \text{ K}$ (0 °C หรือ 32 °F) ความเร็วเสียง 331.5 m/s (1,087.6 ft/s หรือ 1,193 km/h หรือ 741.5 mph หรือ 43.9 knot)

$T_{20} = 293.15 \text{ K}$ (20 °C หรือ 68 °F) ความเร็วเสียง 343.4 m/s (1,126.6 ft/s หรือ 1,236 km/h หรือ 768.2 mph หรือ 667.1 knot)

$T_{25} = 298.15 \text{ K}$ (25 °C หรือ 77 °F) ความเร็วเสียง 346.3 m/s (1,136.2 ft/s หรือ 1,246 km/h หรือ 774.7 mph หรือ 672.7 knot)

ในกรณีของก๊าซในอุดมคติ ความเร็วเสียง c ขึ้นกับอุณหภูมิเท่านั้น โดยไม่ขึ้นกับความดัน อากาศนั้นก็จะถือได้ว่าเป็นก๊าซในอุดมคติ อุณหภูมิของอากาศเปลี่ยนแปลงตามระดับความสูง เป็นผลให้ความเร็วของเสียงที่ระดับความสูงต่างๆ นั้นแตกต่างกัน

ตารางที่ 2.1 ความเร็วเสียงในก๊าซ

ระดับความสูง	อุณหภูมิ	m/s	km/h	mph	knot
ระดับน้ำทะเล	15 °C (59 °F)	340	1,225	761	661
11,000 m -20,000 m	-57 °C (-70 °F)	295	1,062	660	573
29,000 m	-48 °C (-53 °F)	301	1,083	673	585

2.1.2 ความเร็วเสียงในของเหลว

ของเหลวจะมีความแข็งแกร่งต่อแรงอัดเท่านั้น โดยไม่มีความแข็งแกร่งต่อแรงเฉือน ดังนั้นความเร็วของเสียงในของเหลวหาได้โดย

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

โดย

K คือ โมดูลัสของการอัดกะเดียบาติก (adiabatic bulk modulus)

2.1.3 ความเร็วเสียงในของแข็ง

ของแข็งนั้นมีค่าความแข็งแกร่งไม่เป็นศูนย์ ทั้งต่อแรงบีบอัด หรือ การเปลี่ยนปริมาตร (Volumetric deformation) และแรงเฉือน (shear deformation) ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะกำเนิดคลื่นเสียงที่มีความเร็วต่างกันขึ้นกับรูปแบบของคลื่นในแท่งของแข็งซึ่งมีขนาดความหนา (หรือขนาดของลวดภายในแนวตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของคลื่น) เล็กกว่าความยาวคลื่นมาก ความเร็วเสียงหาได้จาก

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

โดย

E คือ โมดูลัสของยัง
ρ คือ ความหนาแน่น

ดังนั้น ในหลักความเร็วของเสียงจะมีค่าประมาณ 5,100 m/s ความเร็วของเสียงสามารถหาได้จากการแทนค่าโมดูลัสของยังด้วยโมดูลัสคลื่นหน้าราบ (plane wave modulus) ซึ่งหาได้จากโมดูลัสของยัง และ อัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's ratio)

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

ดังนั้น ความเร็วของเสียง

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

สำหรับคลื่นตามขวางนั้น โมดูลัสของยัง E จะถูกแทนด้วยค่าโมดูลัสของแรงเฉือน (Shear modulus) G

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

จะเห็นได้ว่า ความเร็วของเสียงในของแข็งขึ้นกับความหนาแน่น ของตัวกลางเท่านั้น โดยไม่ขึ้นกับอุณหภูมิของแข็ง เช่น เหล็ก สามารถนำคลื่นด้วยความเร็วที่สูงกว่าอากาศมาก

ในตัวกลางที่ไม่มีการกระจาย (non-dispersive medium) ความเร็วเสียงไม่ขึ้นกับความถี่ ดังนั้นความเร็วในการส่งถ่ายพลังงาน และ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของเสียง นั้นมีค่า เท่ากัน ในย่านความถี่เสียงที่เราสามารถได้ยินนั้น อากาศมีคุณสมบัติเป็นตัวกลางที่ไม่มีการกระจาย โปรดสังเกตว่า CO_2 ในอากาศนั้นเป็นตัวกลางที่มีการกระจายและทำให้เกิดการกระจายสำหรับคลื่นเสียงความถี่สูง (28KHz) ในตัวกลางที่มีการกระจาย (dispersive medium) ความเร็วเสียงจะขึ้นกับความถี่ องค์ประกอบที่แต่ละความถี่จะเดินทางด้วยความเร็วเฟส (phase velocity) ที่แตกต่างกัน ส่วนพลังงานของเสียงจะเดินทางด้วยความเร็วที่ความเร็วกลุ่ม (group velocity) ตัวอย่างของตัวกลางที่มีการกระจาย คือ น้ำ

2.1.4 ความเร็วเสียงในอากาศ

ความเร็วของเสียงในอากาศโดยประมาณหาได้จาก

$$c_s \approx (331.5 + 0.6T) \quad (2.10)$$

โดยที่ T คือ อุณหภูมิ ในหน่วย °C ความแม่นยำในการประมาณในช่วงของอุณหภูมิในช่วง -20°C ถึง 40°C จะมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 0.2% ในช่วงอุณหภูมิสูงกว่า หรือ ต่ำกว่านั้นความเร็วของเสียงจะประมาณ โดย

$$c_{so} = 331.5 \sqrt{1 + \frac{t}{273}} \text{ m/s}$$

(2.11)

ตัวอย่างความเร็วเสียงในตัวกลางต่าง ๆ

ตารางที่ 2.2 ความเร็วเสียงในตัวกลาง ที่อุณหภูมิ 20 °C

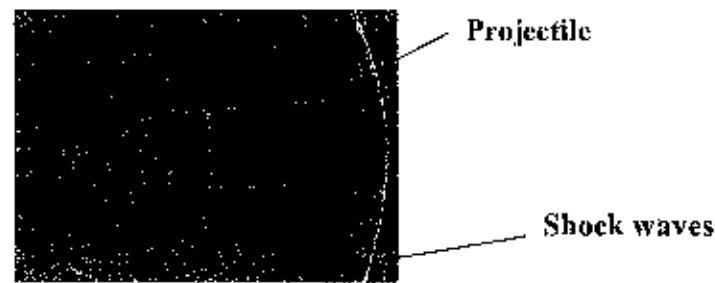
ชนิดวัสดุ	ความเร็ว (m/s)
อากาศ	343
น้ำ	1,480
น้ำแข็ง	3,200
แก้ว	5,300
เหล็ก	5,200
ตะกั่ว	1,200
ไทเทเนียม	4,950
ฟิวซี (อ่อน)	80
ฟิวซี (แข็ง)	1,700
คอนกรีต	3,100

2.2 คลื่นช็อก (Shock waves)

คลื่นช็อก (shock wave) เกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่ได้เท่ากับความเร็วของคลื่นหรือเร็วกว่า จะเกิดปรากฏการณ์ที่ว่าคลื่นไม่สามารถที่จะเคลื่อนที่ออกไปจากแหล่งกำเนิดเสียง โดยด้านหลังกำเนิดเคลื่อนที่ได้เท่ากับความเร็วของคลื่น คลื่นจะเกิดการซ้อนกันเสริมกันกลายเป็น amplitude ขนาดใหญ่เรียกว่าคลื่นช็อก และเมื่อแหล่งกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่เร็วกว่าคลื่น หันคลื่นจะฟอร์มตัวเป็นรูปกรวยโดยมุม $\theta = \sin^{-1}(V/V_0)$ อัตราส่วน (V/V_0) เรียกว่า เลขแมค (Mach number) คลื่นช็อกเกิดขึ้นได้บ่อยมากในสถานการณ์ต่างๆ กัน ดังเช่น Sonic boom คือ คลื่นช็อก ประเภทหนึ่งของเครื่องบินที่วิ่งเร็วเหนือเสียง คลื่นที่เกิดหลังเรือเร็วก็เป็น

คลื่นช็อค อีกาประเภทหนึ่ง นอกอวกาศ ก็สามารถจะเกิด คลื่นช็อคได้ อย่างเช่น ลมสุริยะที่วิ่งด้วยความเร็วสูงเข้าชนสนามแม่เหล็กโลกเป็นต้น

เมื่อแหล่งกำเนิดเสียงเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่าเสียง ($v_s = v$ หรือ 1 Mach) หน้าคลื่นทางขวาจะถูกอัดกันอยู่ทางด้านหน้าเป็นแนวเส้นโค้ง ทำให้หน้าคลื่นเกิดการแทรกสอดมาเบเสริมกัน ความดันของคลื่นเพิ่มขึ้นอย่างมากมาย เรียกว่า คลื่นช็อค (shock wave) รูปที่ 2.5 คือลูกปืนที่วิ่งด้วยความเร็วสูง



รูปที่ 2.5 Detach shock wave

2.3 เลขมัค (Mach number)

เลขเลขมัค (Ma) คือสัดส่วนของความเร็วต่อความเร็วเสียง เลขเลขมัคปกติจะใช้กับวัตถุที่เดินทางด้วยความเร็วสูงในของเหลว และของเหลวที่ไหลด้วยความเร็วสูงในช่องแคบๆ หรืออุโมงค์ลม และเนื่องจากเป็นสัดส่วนของความเร็วของค่า เลขเลขมัค จึงไม่มีหน่วย ที่สภาวะระดับทะเลมาตรฐาน มัค 1 เท่ากับความเร็ว 1,225 km/hr (761.2 mile/hr ในบรรยากาศ) เนื่องจากความเร็วเสียงนั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความจริงที่แท้จริงของวัตถุที่เดินทางเท่ากับ มัค 1 จึงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของของไหลที่อยู่ล้อมรอบ นอกจากนี้เรายังอาจเห็นได้ว่า เลขเลขมัค นั้นยังเป็นสัดส่วนของแรงเฉื่อย (อ้างถึงแรงอากาศพลศาสตร์) ต่อแรงยืดหยุ่น (elastic force) เลขเลขมัค ตั้งชื่อตาม Ernst Mach นักฟิสิกส์และนักปรัชญาชาวออสเตรีย

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

เมื่อ M_a คือ Mach number

V คือ ความเร็วของแหล่งกำเนิดเสียง

V_0 คือ ความเร็วของเสียงในอากาศ

จากรูปที่ 2.6 หากนิยามความเร็วตาม เลขเลขมัค จะสามารถแบ่งประเภทของความเร็วเป็นช่วงได้ดังนี้

$Ma < 1$ เรียกว่า subsonic เป็นช่วงของความเร็วที่ต่ำกว่าความเร็วเสียง

$Ma = 1$ เรียกว่า sonic เป็นช่วงของความเร็วเสียง ($Ma = 1$)

$0.8 < Ma < 1.2$ เรียกว่า Transonic เป็นช่วงของความเร็วผ่านเสียงเป็นความเร็วที่อยู่

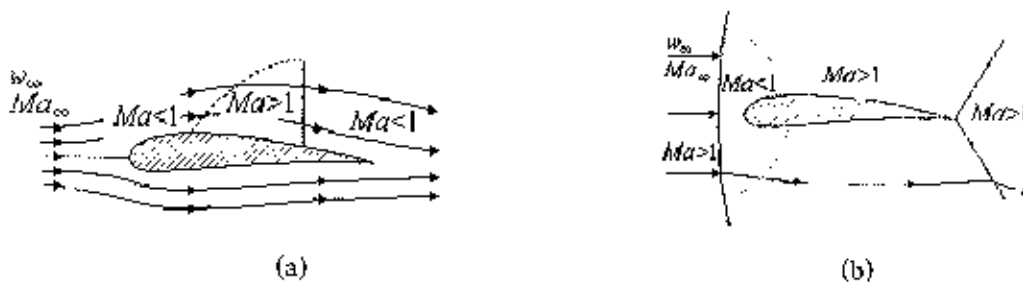
ประมาณความเร็วเสียง

$1.2 < Ma < 5$ เรียกว่า supersonic เป็นช่วงของความเร็วที่เหนือหรือมากกว่าความเร็วเสียง

$Ma > 5$ เรียกว่า hyper sonic เป็นช่วงของความเร็วโพ้นความเร็วเสียง มากกว่า 5 เท่าเสียง

ขึ้นไป

* เสียงเดินทางในอากาศ ประมาณ 1,100 ft/s *



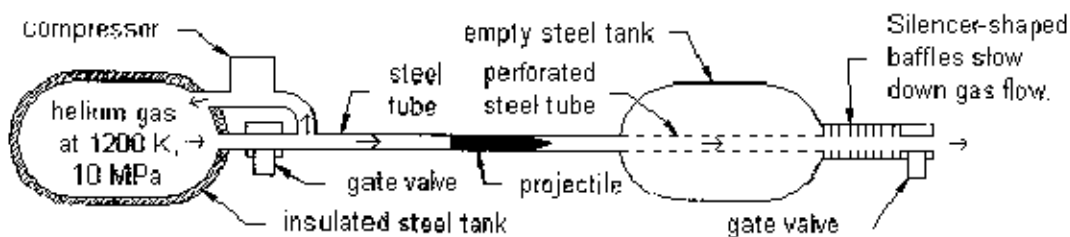
รูปที่ 2.6 (a) กระแสลมที่ค่าของ $Ma < 1$ และ (b) กระแสลมที่ค่าของ $Ma > 1$

2.4 ชุดปล่อยกระสุนความเร็วสูง

ปัจจุบันงานวิจัยในด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรม ชุดปล่อยกระสุน (launcher) หรืออาจเรียกว่า ปืน (gun) มีมากมายหลายแบบ เช่น ชุดปล่อยแบบ electrostatic และ electromagnetic ชุดปล่อยแบบใช้การระเบิด (explosive propulsion) ชุดปล่อยแบบ plasma เป็นต้น แต่ละแบบจะมีความเหมาะสมในแต่ละงานวิจัยอย่างไรก็ตามในบทความนี้จะพูดถึงชนิดของชุดปล่อยที่ใช้กันมากในงานวิจัยปัจจุบัน โดยจะจำแนกชนิดของชุดปล่อยหรือปืนออกตามแหล่งของตัวขับเคลื่อนกระสุน

2.4.1 ชุดปล่อยกระสุนแบบใช้แก๊สเบา (light gas gun)

ชุดปล่อยกระสุนแบบนี้จะใช้แก๊สเบา (light gas) เช่น ไฮโดรเจน (H_2) หรือ ฮีเลียม (He) เป็นตัวขับเคลื่อน ดังนั้นชุดปล่อยชนิดนี้จึงเรียกว่า light gas gun โดยส่วนประกอบหลักของปืนชนิดนี้คือ ถังเก็บความดันสูง (high pressure reservoir) แผ่นฟิล์มบาง (diaphragm) และท่อปล่อยกระสุน (launch tube) หรือ ลำกล้องปืน (gun barrel) กระสุน (projectile) โดยทั่วไปจะสอดอยู่ทางออกของลำกล้องปืนติดกับแผ่น diaphragm แก๊สเบาที่ใช้เป็นตัวขับเคลื่อนจะบรรจุอยู่ภายในถังเก็บ (reservoir) ซึ่งแก๊สดังกล่าวจะทำให้เพิ่มความร้อนและความดันได้จากหลายวิธีเช่น จากการเผาไหม้ (combustion) จากแหล่งความร้อนภายนอก (external heat) จากการชาร์จประจุ (electric charge) จากคลื่นช็อค และจากการดันตัวของแท่งกด (piston compress) ทันทีที่ความดันของแก๊สเบาเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งความดันแผ่น diaphragm ทนรับไม่ได้ แผ่น diaphragm จะขาด ความดันภายใน ถังเก็บจะขึ้นหรือเร่งความเร็วของกระสุน รูปที่ 2.7 แสดงแผนภาพส่วนประกอบของ single stage light gas gun หากประยุกต์กฎของการเคลื่อนที่ของนิวตัน จะสามารถหาความเร็วที่เกิดขึ้นในลำกล้องปืนได้



รูปที่ 2.7 แผนภาพส่วนประกอบของ Single stage light gas gun

$$m \frac{dv}{dt} = m \frac{dv}{dx} v = PA \quad (2.13)$$

เมื่อ m คือ น้ำหนักของกระสุน

v 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 ความเร็วของกระสุนที่ทางออกของลำกล้องปืนเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาจะกำหนดให้ $\bar{P}$ มีค่าคงที่ตลอดการเคลื่อนที่ของกระสุนในลำกล้องปืน ซึ่งมีค่าเป็น

$$v_0 = \sqrt{2\bar{P} \frac{AL}{m}} \quad (2.15)$$

โดยสมการนี้จะมีค่าความผิดพลาดเนื่องมาจากสาเหตุหลักคือความเสียสทานระหว่างกระสุนกับภายในลำกล้องปืน และในความเป็นจริงค่าของ $\bar{P}$ จะมีค่าไม่คงที่เนื่องจากการเพิ่มปริมาตรมากขึ้นตามการเคลื่อนที่ของกระสุน ซึ่งความดัน $\bar{P}$ ดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับแก๊สเบาและความดันภายในความดันดั้งเดิม (Pressure reservoir, P_0) ถ้าพิจารณาเป็นแก๊สอุดมคติ (idea gas) ซึ่งมี ค่าความดันเป็น P_0 และความเร็วเสียง (sound speed) เป็น a_0 ดังนั้นความดันของ P ในขณะที่แก๊สขยายตัวจะมีความสัมพันธ์เป็น

$$P = P_0 \left(1 - \frac{v}{\left(\frac{2}{\gamma} - 1 \right) a_0} \right)^{\frac{2\gamma}{\gamma-1}} \quad (2.16)$$

เมื่อ v คือ ความเร็วของการขยายของแก๊ส

γ คือ ratio of the specific heats

ถ้าสมการที่ 2.16 ใช้ในการหาความเร็วแก๊สหลังกระสุน จะได้อัตราส่วนของ P/P_0 จะขึ้นอยู่กับ

$$\frac{v(\gamma-1)}{2a_0} \quad (2.17)$$

จากกระบวนการทำงานแก๊สจะขยายตัวจากถังเก็บ ซึ่งเป็นการแปลงพลังงานที่สะสมภายในถัง เพื่อไปจับหรือเร่งความเร็วของกระสุนความเร็วสูงสุดของการไหลของแก๊สจะเกิดขึ้นเมื่อแก๊สแปลงพลังงานทั้งหมดที่มีไว้สำหรับการขับเคลื่อนหรือเร่งความเร็วของกระสุน ซึ่งความดันของแก๊สจะลดลงเป็นศูนย์ โดยที่ความเร็วจะคำนวณได้จาก

$$v_{esc} = \left(\frac{2}{\gamma-1} \right) a_0 \quad (2.18)$$

ถ้าความเร็วสูงสุดที่ทางออก คือ Escape velocity (v_{esc}) มีค่าเท่ากับ

$$v_{esc} = \left(\frac{2}{\gamma - 1} \right) a_0 = \frac{2}{\gamma - 1} \sqrt{\frac{\gamma R T_0}{M}} \quad (2.19)$$

เมื่อ T_0 คือ อุณหภูมิภายในถังเก็บ

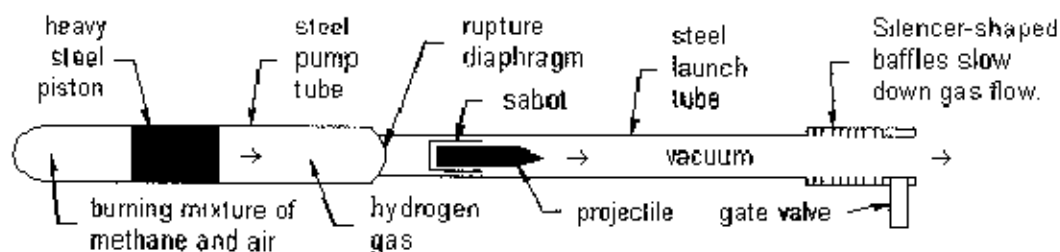
M คือ มวลโมเลกุลของแก๊สภายในถังเก็บ

R คือ universal gas constant

ซึ่งความสัมพันธ์นี้แสดงว่า light gas gun จะมีความเร็วสูงก็ต่อเมื่อใช้แก๊สที่มีค่ามวลโมเลกุลต่ำและแก๊สจะต้องมีอุณหภูมิสูง

2.4.2 ชุดปล่อยกระสุนแบบใช้แก๊สแบบสองช่วง (two stage light gas gun)

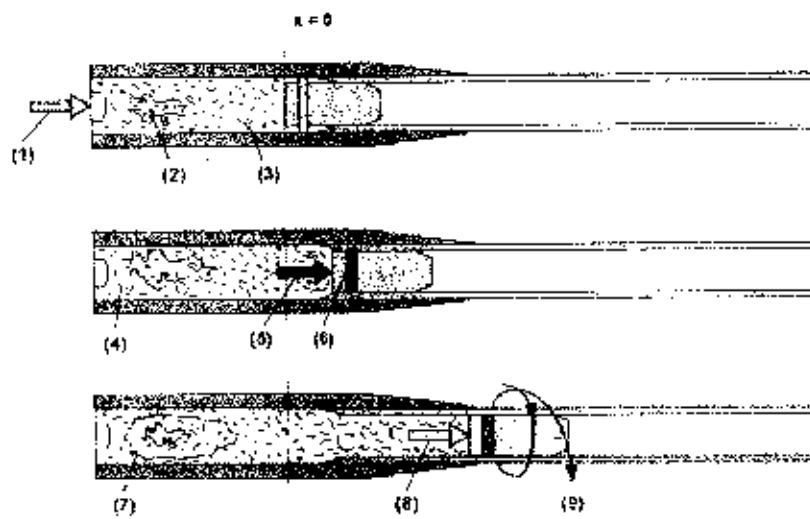
เมื่อใช้ลูกสูบ (Piston) กดอัดให้แก๊สที่ใช้ขับเคลื่อน (driver gas) มีความดันและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ชุดปล่อยกระสุนแบบนี้จะเรียกว่า ชุดปล่อยกระสุนแบบใช้แก๊สแบบสองช่วง (two stage light gas gun) ซึ่งเป็นปืนที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง ดังรูปที่ 2.8 แสดงส่วนประกอบพื้นฐานของ piston-powered two-stage light gas gun โดยที่แก๊สจะถูกบรรจุอยู่ภายในท่อที่มีผนังหนาและเรียวยาวโดยทั่วไปจะถูกเรียกว่าท่อปั๊ม (pump tube) โดยที่ด้านหนึ่งจะถูกปิดโดยลูกสูบ (piston) และอีกด้านหนึ่งจะปิดโดย diaphragm แบบแผ่นโลหะ



รูปที่ 2.8 แผนภาพส่วนประกอบของ two stage light gas gun

2.4.3 ชุดปล่อยกระสุนแบบใช้ดินปืน (powder gun)

ชุดปล่อยกระสุนแบบนี้จะใช้ดินปืนทดลงแทนแก๊สซึ่งมีหลักการทำงานคือใช้แรงของก๊าซในการขับเคลื่อนกระสุนโดยมีดินปืนเป็นเชื้อเพลิง



รูปที่ 2.9 แผนภาพการทำงานของ Powder gun

จากรูปที่ 2.9 สามารถอธิบายการทำงานตามหมายเลขได้ดังนี้

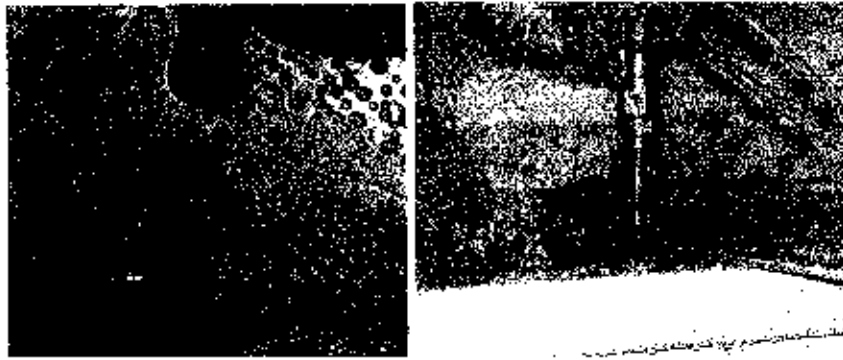
- 1) เริ่มมีการจุดชนวนห้องเผาไหม้
- 2) เริ่มมีการเผาไหม้
- 3) มีแรงดันจากการเผาไหม้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว
- 4) ห้องเผาไหม้เกิดแรงดันประมาณ 14-68 MPa
- 5) กระสุนเริ่มมีการเคลื่อนที่จากอิทธิพลของแรงดัน
- 6) มีแรงต้านการเคลื่อนที่ของกระสุน
- 7) ความดันเริ่มสูงขึ้นจากอัตราการเผาไหม้ที่มากขึ้น
- 8) ลูกกระสุนเคลื่อนที่มากขึ้นและปริมาตรห้องเผาไหม้มากขึ้น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

เปลี่ยนแปลงตามเวลาศึกษาเปรียบเทียบรูปคลื่นของสัญญาณทั้งสองได้อย่างมีประสิทธิภาพและยังสามารถแสดงรูปคลื่นที่เป็นผลรวมของสัญญาณทั้งสองได้อีกด้วย

2.5 การประยุกต์ใช้ลำพุ่งความเร็วสูง

2.5.1 เทคโนโลยีตัดวัสดุด้วยลำพุ่ง (Jet cutting technology)

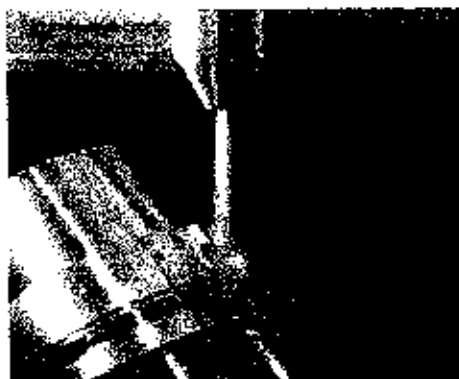
ในงานตัดวัสดุ (jet cutting) สิ่งที่ทำให้วัสดุหลุดออกไป สามารถอธิบายได้ในรูปของการกัดเซาะของลำพุ่งความเร็วสูง ที่เกิดจากความเร็วเหนือเสียง (supersonic) ไม่ได้เกิดจากความดัน แต่เกิดจากความเร็วของกระแสที่กัดเซาะเอาอนุภาคหรือเกรนของวัสดุให้หายไป ซึ่งจะเกิดจากการเปลี่ยนความดันให้กลายเป็นความเร็วด้วยลักษณะของโครงสร้างของหัวฉีด ซึ่งหัวฉีดจะมีรูซึ่งมีขนาดเล็กมากเอาไว้ให้น้ำออกมา ซึ่งโดยทั่วไปความดันที่ใช้คือความดันประมาณ 40,000 psi นั้นจะให้ความเร็วของน้ำเท่ากับ 2 มัค และที่ความดันประมาณ 60,000 psi จะให้ความเร็วของน้ำที่ประมาณ 3 มัค ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 Jet cutting technology

2.5.2 เทคโนโลยีทำความสะอาดด้วยลำพุ่งน้ำ

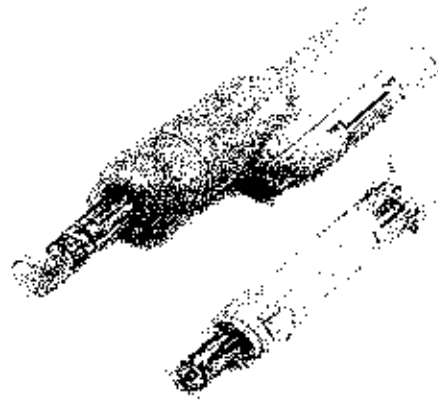
ในงานของเทคโนโลยีทำความสะอาดด้วยลำพุ่งน้ำ เป็นเทคโนโลยีที่ประยุกต์ใช้ลำพุ่งความเร็วสูงเพื่อทำความสะอาดวัสดุมีหลักการคล้ายกับการตัดวัสดุด้วยลำพุ่ง โดยการใช้ความเร็วของลำพุ่งที่ความเร็วเหนือเสียง (supersonic) เพื่อที่จะขจัดสิ่งสกปรกให้ออกไปได้อย่างรวดเร็ว แต่มีความแตกต่างจากการตัดวัสดุ ตรงที่ใช้แรงดันของน้ำเพื่อผลิตลำพุ่งออกมาและลักษณะของหัวฉีดที่แตกต่างกัน โดยใช้แรงดันของน้ำอยู่ที่ประมาณ 1,500-3,500 psi ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 Water jet cleaning technology

2.5.3 เทคโนโลยีนำส่งยาด้วยลำพุ่งความเร็วสูง (Needle less technology)

ปัญหาของเข็มฉีดยานั้นมีมากมายเสียทีเดียว โดยเฉพาะในประเทศกำลังพัฒนาและประเทศด้อยพัฒนา ไม่ว่าจะเป็นการขาดแคลนตัวอุปกรณ์เองขาดความพิถีพิถันเรื่องความสะอาดและสุขอนามัยประมาณ 30% ของจำนวนครั้งที่มีการฉีดยานั้นไม่ปลอดภัย นอกจากนี้ยังมีรายงานการติดเชื้อจากเข็มฉีดยาที่ไม่สะอาด ส่งผลถึงขั้นเสียชีวิตอีกเป็นจำนวนมากถึง 1.3 ล้านคนทั่วโลก แต่ถึงอย่างไรเข็มฉีดยาก็ยังเป็นสิ่งจำเป็นในการป้องกัน (วัคซีน) และรักษาโรค ในบางประเทศด้อยพัฒนาที่มีอุปกรณ์ทางการแพทย์มีอยู่อย่างจำกัด ด้วยความรู้เท่าไม่ถึงการณ์และความเพิกเฉย เข็มฉีดยาถูกนำมาใช้ซ้ำกับผู้ป่วยหลายคนโดยปราศจากการฆ่าเชื้อ (ที่ควรจะต้องผ่านความร้อน 121°C เป็นเวลา 20 นาที ในแต่ละครั้งที่นำมาใช้) นอกจากนี้เข็มที่ใช้แล้วยังถูกกำจัดอย่างไม่เหมาะสมทางออกก็คือ ที่มาของแนวคิดเข็มฉีดยาแบบไม่ต้องใช้เข็ม (Needle-free injectors, NFIS) ซึ่งมีหลักการทำงานอย่างเดียวกัน แต่ไม่ต้องพองเข็มแต่ใช้หัวฉีด (nozzle orifice) ดังรูปที่ 2.12 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ตั้งแต่ 76-360 ไมโครเมตร เป็นตัวลำเลียงยาแทน ซึ่งสามารถส่งผ่านด้วยยาเข้าไปได้ ผิวหนัง ไปสู่ชั้นไขมันหรือกล้ามเนื้อได้อย่างง่ายดายด้วยความเร็ว 100 m/s (ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นและขนาดของผิวหนัง รวมถึงบริเวณที่ฉีดด้วย) นอกจากนี้การกำจัดก็เป็นเรื่องง่ายไม่ต้องใช้หน่วยเก็บขยะแหลมคม (sharps container) ไม่ต้องกังวลเรื่องการติดเชื้อไวรัสที่ไม่เหมาะสมหรือการใช้เข็มฉีดยาร่วมกัน



รูปที่ 2.12 Needle free jet injection device

2.5.4 เทคโนโลยีเครื่องยนต์ลำพู่ (Jet engine technology)

เครื่องยนต์ลำพู่ เป็นเครื่องจักรที่ถูกออกแบบมา เพื่อให้ผลิตหรือสร้างก๊าซที่มีความเร็วสูง ไหลผ่านช่องที่กำหนด เครื่องยนต์เริ่มต้นการหมุนเครื่องอัดไอ (compressor) ขาอากาศภายนอก ด้วยเปิด เครื่องยนต์ก็จะถูกดูดเข้าเครื่องยนต์เครื่องอัดไอ ก็จะทำงานกับอากาศที่เข้ามาและก็จะส่ง อากาศที่อัดผ่านเครื่องอัดไอ นี้ต่อไปยังส่วนของห้องเผาไหม้ ซึ่งจะมี ความดันเพิ่มขึ้นมาก ถึง 12 เท่า ของอากาศ ก่อนที่จะผ่านเข้าเครื่องยนต์ ในส่วนของห้องเผาไหม้หัวจุดไฟ (Igniter) ก็จะทำการ จุดเครื่องยนต์ โดยจุดส่วนผสมของน้ำมันเชื้อเพลิงและอากาศในห้องเผาไหม้ หัวจุดไฟจะมีหนึ่ง หรือ สองหัว ซึ่งก็คล้ายกับหัวเทียนในรถยนต์ เมื่อเครื่องยนต์ติดหรือทำงานแล้วและเครื่องอัดไอ หมุนด้วยความเร็วที่เพียงพอตามที่กำหนดแล้ว Starter และหัวจุดไฟ ก็จะถูกปิดหรือเลิกใช้ ต่อจากนั้นเครื่องยนต์ ก็จะทำงานของมันเอง โดยไม่ต้องได้รับความช่วยเหลือ จาก Starter และ หัวจุดไฟ อีกต่อไป ควบคู่กับที่น้ำมันเชื้อเพลิงและอากาศผสมในอัตราส่วนที่ถูกต้อง ยังไหลเข้าห้องเผาไหม้อย่างต่อเนื่องเพียง 25% ของอากาศ ที่มีส่วนใช้ในการเผาไหม้ที่ห้องเผาไหม้ส่วนอากาศที่เหลือ ก็จะผสมกับก๊าซไอเสียหรือก๊าซที่ผ่านการเผาไหม้ เพื่อการลดอุณหภูมิของก๊าซไอเสียหรือก๊าซที่ ผ่านการเผาไหม้ก่อนที่ก๊าซไอเสียจะเข้าไปยังส่วนของกังหัน (turbine) ส่วนของกังหันก็จะนำเอา พลังงานจากกระแสของก๊าซที่ไหล พลังงานส่วนใหญ่ก็จะถูกนำไปใช้ในการหมุนเครื่องอัด และ อุปกรณ์ต่างๆ แรงขับของเครื่องยนต์ (thrust) ก็มาจากการแฉกมวลของอากาศ ซึ่ง น วน ม าก จาก ด้านหน้าของเครื่องแล้วก็ดันมันออกไปด้วยความเร็วที่สูงมากๆเมื่อเทียบกับความเร็วเมื่อตอนที่เข้า มาที่ด้านหน้า หรือที่เครื่องอัดไอ

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับลำพุงความเร็วสูง

ปัจจุบันยังได้มีนักวิจัยจำนวนมากได้พยายามศึกษาเกี่ยวกับลำพุงความเร็วสูงโดยศึกษาเกี่ยวกับคุณลักษณะและความเร็วของลำพุงเพื่อการประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ เกือบเวลานับสิบปีแล้วที่นักวิจัยจำนวนมากได้ศึกษาถึงลักษณะของการฉีดของเหลวอัตราความเร็วสูงและความเกี่ยวข้องปฏิสัมพันธ์กัน ซึ่งจัดว่าเป็นประโยชน์ในหลายๆด้าน อาทิเช่น เทคโนโลยีของการตัด การทำเหมืองแร่ การเจาะอุโมงค์ การกัดเซาะด้วยของเหลวในอัตราความเร็วสูง เครื่องยนต์ที่มีการฉีดพ่นในทิศทางตรง เครื่องยนต์เจ็ทที่มีการเผาไหม้ในอัตราที่เร็วกว่าเสียง (SCRAM) และการศึกษาของกระบวนการเผาไหม้ในลักษณะที่มีการพ่น อย่างไรก็ตามการฉีดที่มีความเร็วสูงมากๆ นั้นต่างก็มีลักษณะที่เข้าใจยาก ซึ่งนี่อาจจะเป็นสาเหตุยากต่อการผลิตและนำไปใช้ได้อย่างง่าย วิธีการใช้ซึ่งเป็นกุญแจได้ถูกนำมาศึกษาในการไหลด้วยอัตราความเร็วสูงอีกครั้ง ซึ่งเทคนิคที่ทำให้เกิดการฉีดของเหลวด้วยความเร็วสูงโดยเฉพาะอย่างยิ่งด้วยระบบ hypersonic ได้มีการนำมาทดสอบ นับว่าเป็นข้อมูลที่มีประโยชน์ในการทดสอบที่มีการกำหนดสัญลักษณ์และวิธีการทดลองในโครงการนี้ ลักษณะของการฉีดของเหลวที่มีความเร็วสูงนั้นนับว่ามีความสำคัญอย่างยิ่ง งานเขียนของการศึกษาเนื่องการฉีดของเหลวที่มีความเร็วสูงในครั้งก่อนๆ ได้ถูกนำมาพบทวนอีกครั้ง เพื่อเป็นประโยชน์ในการนำมาตรวจสอบโดยการ ใช้การฉีดเชื้อเพลิงในอัตราความเร็วสูงของเครื่องยนต์สี่เซลล์หรือเครื่องยนต์เจ็ทแบบ scram ดังนั้นกระบวนการเผาไหม้ของเครื่องยนต์โดยอัตโนมัติของการฉีดเชื้อเพลิงนั้นได้นำมาทดสอบ รวมไปถึงการศึกษากระบวนการเผาไหม้ต่างๆที่ได้นำมาพิสูจน์ด้วย

2.6.1 การฉีดของเหลวในอัตราความเร็วสูง

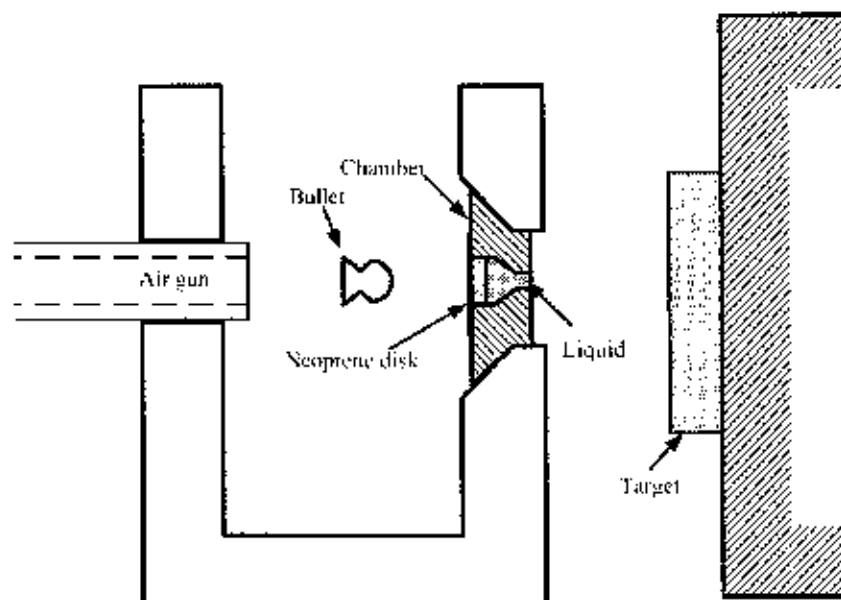
เมื่อไม่กี่สัปดาห์มานี้ได้มีการศึกษาถึงลักษณะของการฉีดของเหลวด้วยอัตราความเร็วสูงกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งสามารถนำไปใช้กับเทคโนโลยีต่างๆ มากมาย เช่น การชะของฝนโดยเครื่องบินที่มีความเร็วสูง การกัดเซาะด้วยไฟฟ้ของกังหันน้ำ การทำความสะอาด และการทำเหมืองแร่ ยิ่งไปกว่านั้นการศึกษาดังกล่าวนั้นอาจจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนากระบวนการเผาไหม้ด้วยการฉีดที่ใช้ระบบ Supersonic (scram) และเครื่องยนต์สี่เซลล์ที่มีการฉีดในทิศทางตรง อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้ก็มีข้อจำกัดของอัตราความเร็วในแต่ละองค์ประกอบด้วย แต่ทว่าการศึกษาข้อมูลพื้นฐานของกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ในแต่ละองค์ประกอบนั้นสำคัญประโยชน์ที่ได้นั้นจะเห็นการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการเผาไหม้และยกระดับการควบคุมการปล่อยออกมาจากการทำให้เป็นอนุภาคเล็กๆ ซึ่งการที่จะทำให้เกิดการฉีดของเหลวที่มีความเร็วสูง และวิธีการใช้ทั้งในทางอย่างประสพผลสำเร็จได้โดยส่งผลต่อการขึ้นเสถียรอย่างสูงซึ่งเป็นเหตุทำให้เกิดการฉีดของเหลวแบบ hypersonic ในบทความนี้ได้กล่าวถึงวิธีการทำให้เกิดลักษณะกระบวนการหรือปัญหาที่อาจเกิดในการทดลองของการฉีดของเหลวในอัตราความเร็วสูง

2.6.1.1 วิธีการทำให้เกิดการเดือดของเหลวในอัตราความเร็วสูง หากย้อนกลับไปที่เมื่อ

ช่วงปี 1950 ปัญหาการกัดเซาะของฝนน้ได้เริ่มกระตุ้นนักวิจัยหันมาสนใจในการทำงานด้านวิศวกรรม ซึ่งปรากฏการณ์นี้เป็นเหตุให้เกิดการทำลายพื้นผิวดินเช่น หอยของน้ำที่พุ่งผ่านเครื่องบินในระหว่างที่มีการบินในอัตราเร็วสูง การทำลายนี้อาจจะเกิดจากผิวของเครื่องบินและใบพัดของเครื่องยนต์ การศึกษาผลกระทบของของเหลวกับของแข็งในอัตราที่เร็วขึ้นจัดว่าเป็นเรื่องยากในการทดลอง เนื่องจากสาเหตุดังกล่าวไม่ได้ก่อให้เกิดการเดือดของเหลวด้วยอัตราที่เร็วสูงในแบบ Supersonic และ hypersonic

เทคนิคของการทดลองที่เป็นแบบแผนนั้นไม่ได้ถูกนำมาใช้ให้เกิดอัตราความเร็วที่สูง ดังนั้นวิธีการแบบเปียโนวูธได้ถูกพัฒนาในการเพิ่มให้การค้นคว้านั้นมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ในปี ค.ศ. 1955 เจนคินส์ได้พยายามศึกษาผลกระทบของของเหลวในอัตราที่เร็วสูงเป็นครั้งแรกโดยการเผาไหม้ของกระสุนยิงของแข็ง (จากปืนอัลคม) ที่ส่งผลต่อการลอบตัวของหยดน้ำเล็กๆในอากาศ หยดน้ำได้แตกอยู่โดยเทคนิคไฮแมงมุมและทำให้เกิดอัตราความเร็วของกระสุนเร็วถึง 240 m/s กระสุนยิงก็จะลดความเร็วลงและหยุดโดยแท่งกุด เพื่อจะได้ไม่มีการทำลายเกิดขึ้น ซึ่งการทำลายของพื้นผิวด้านหน้าซึ่งผลกระทบของหยดน้ำจะได้นำมาศึกษาในครั้งต่อมา

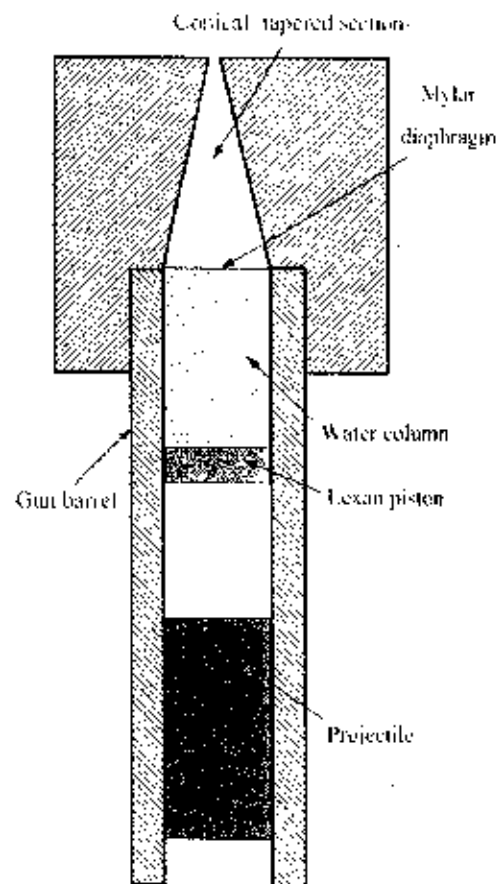
วิธีนี้ได้ถูกนำมาใช้จนถึงปี ค.ศ. 1958 Bowden และ Brunton ได้คิดค้นเทคนิคใหม่ที่ทำให้เกิดการสันสะเทือน ด้วยหัวฉีดของเหลวในอัตราที่สูงซึ่งเป็นวิธีการแลกเปลี่ยนการเคลื่อนไหวย่างง่าย ปืนอัลคมไรเฟิลที่มีพลังสูงนั้นได้มีการเผาไหม้แล้วไปกระทบกับแผ่นยางสังเคราะห์และจากนั้นจะดันน้ำออกอย่างรวดเร็วที่บรรจุไว้ตรงปากกระบอกฉีด อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำนี้ประกอบไปด้วย เครื่องฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงที่ไม่เป็นสนิม ดังรูป 2.13 ที่มีความจุของเหลวอยู่ 0.1 cm³ ที่สามารถถูกปิดด้วยแผ่นยางสังเคราะห์นีโอพรีน กระบอกสูบของเหลวมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1-2 mm ในกระบวนการเผาไหม้อย่างรวดเร็วนั้นทำได้โดยกระสุนจากปืนอัลคมไรเฟิลที่มีแรงดันสูงได้ดันถูกกระสุนออกอย่างแรงไปยังแผ่นยางนีโอพรีนภายในหัวฉีด ซึ่งของเหลวที่มีการบีบอัดแรงดันอย่างสูงนั้นได้ทะลุผ่านปลายท่อจนไปถึงปลายหัวฉีดราวกับการฉีดหรือถูกสูบที่มีอัตราความเร็วสูง โดยหัวสูบนี้อัตราความเร็วถึง 1,200 m/s ของการพ่นน้ำจากปากกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1mm



รูปที่ 2.13 วิธีการผลิตการฉีดของเหลวแบบ Supersonic ของ Bowden และ Bruntton

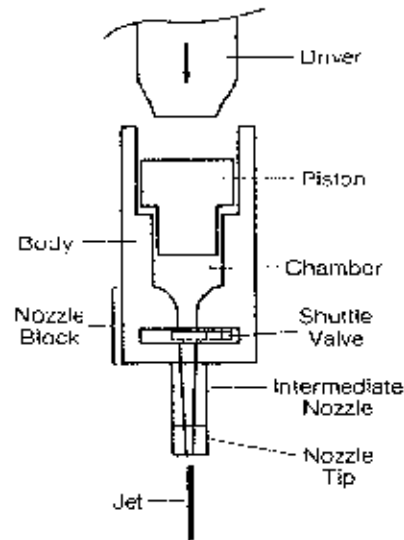
A: เป่าหม้อ, B: ชุดทดลอง, C: ของเหลว, D: แผ่นยางนีโอพรีน, E: กระสุนโลหะ

O'Keefe และคณะได้นำกฎของ Bowden และ Bruntton มาใช้ในการฉีดน้ำจนประสบความสำเร็จที่มีอัตราความเร็วสูงถึง 4.58 km/s โดยแนวทางการพุ่งได้ถูกทำขึ้นอย่างเนวตรงที่จะทะลุผ่านภาพรจบกั้นในส่วนที่เป็นรูปทรงกรวยอย่างรวดเร็วภายในลำกล้องกระสุนปืน Lucite ที่มีการขับออกมา ก่อนที่จะมีการติดไฟนั้น แนวลำพุ่งแต่ละแนวจะถูกทำภายในภาชนะรูปทรงกระบอกภายในโดยกระสุน Lexan ที่มีขนาดเหมาะสม ซึ่งกระบังลม Mylar ที่มีความหนา 1 mm ที่อยู่ระหว่างช่องกับกระสุนและแนวลำพุ่งได้ถูกนำมาใช้เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ การยิงกระสุนด้วยอัตราความเร็วจาก $0.714 - 1.90 \text{ km/s}$ ได้มีเผาไหม้จากปืนที่มีดินปืนที่ไม่มีควันภายในส่วนที่เป็นทรงกรวยที่หมุนเกลียวในทิศทางตรงไปยังปลายภาชนะทรงกระบอกของปืน ซึ่งการเร็วลงทั้งหมดมีการทำมุมครึ่งเดียวเพียง 1.5° และเส้นผ่านศูนย์กลางที่กว้างได้เข้าคู่กับภาชนะทรงกระบอกของปืน แต่มีความยาวแตกต่างกันดังนี้อัตราส่วนของพื้นที่ก็ย่อมแตกต่างกัน การติดตั้งการทดสอบของ O'Keefe ได้แสดงดังรูปที่ 2.14



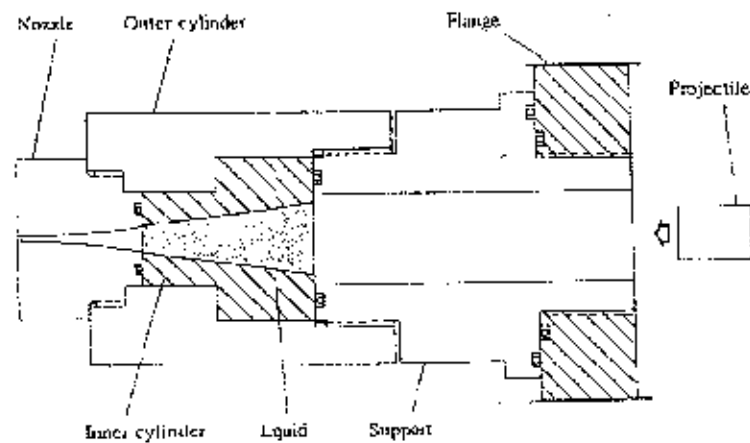
รูปที่ 2.14 การติดตั้งวิธีทำให้เกิดการฉีดแบบ hypersonic ในการศึกษาของ O'Keefe

ตั้งแต่ที่ทฤษฎีของ Bowden-Branton และ O'Keefe ประสบความสำเร็จนั้นทำให้มีการนำ กระสุนยิงมาใช้ในการฉีดของเหลวในอัตราที่เร็วสูง นักวิจัยยังคงใช้วิธีนี้อยู่ถึงแม้ว่าการทำจะ ค่อนข้างแตกต่างโดยขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ อีกเทคนิคหนึ่งในการฉีดของเหลวแบบ hypersonic นั้น คือ ทฤษฎีของ Edney โดยที่ Edney ไม่ได้ใช้ปืนและกระสุนแต่วิธีของเขาที่ทำเช่นเดียวกับ หลักการของ Bowden และ Branton's ซึ่งหลักการของ Edney นั้นใช้ลูกสูบที่มีความเร็วสูงอยู่ที่ ราวๆ 500 m/s โดยการกดของอากาศสูงถึง 300 bar การสร้างแบบทดสอบนี้ก็มีความคล้ายคลึงกับ ของ O'Keefe ที่มีการสูบน้ำเข้าไปปิดที่ทางเข้าของปากกระบอกฉีด จนทำให้เกิดการฉีดน้ำแบบ hypersonic ด้วยความเร็วสูงถึง 3.5 km/s โดยที่เป็นการประมาณว่ามีความดันถึง 1.8 GPa ในช่องของ หัวฉีด ซึ่งเงื่อนไขที่นำสังเกตทางเรขาคณิตของหัวฉีดที่มีการฉีดในอัตราที่สูงมากเป็นพิเศษ ผลกระทบ ดังกล่าวทำให้เป็นที่น่าสนใจในการศึกษาของ Edney ยังได้พิสูจน์ถึงวิธีการสั้นสะท้อนนั้นทำให้เกิดการฉีดน้ำแบบ Supersonic ในลักษณะความดันสูงที่มีการนิ่งอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเขาได้ใช้ การ ประคัมรู้การฉีดแบบสั้นสะท้อนมาทำให้เกิดหัวฉีดดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การประดิษฐ์การฉีดของเหลวโดยอาศัยการสั่นสะเทือน

พลังงานของการสั่นสะเทือนได้ถูกสะสมจนเป็นพลังงานจลน์และได้อำออกไปยังน้ำโดยจากแรงกระทบ การประดิษฐ์นี้ได้นำมาใช้งานครั้งแรกในวิธีการยิงเดี่ยวโดยการหย่อนก้อนของแข็งในแนวตั้งตรงจากตัวเก็บของแข็ง จากนั้นก็มีการพยายามที่จะทำซ้ำหลายครั้ง โดยวิธีการสั่นสะเทือนของตัวเก็บ ซึ่งทำให้เกิดความสับสนระหว่างอัตราความเร็วของการฉีดน้ำและพลังงานการสั่นสะเทือนขึ้น จนได้มีการฉีดในอัตราที่เร็วที่สุดอยู่ที่ 2.185 km/s



รูปที่ 2.16 การประกอบชิ้นส่วนของหัวฉีดในการศึกษาของ Shi [6]

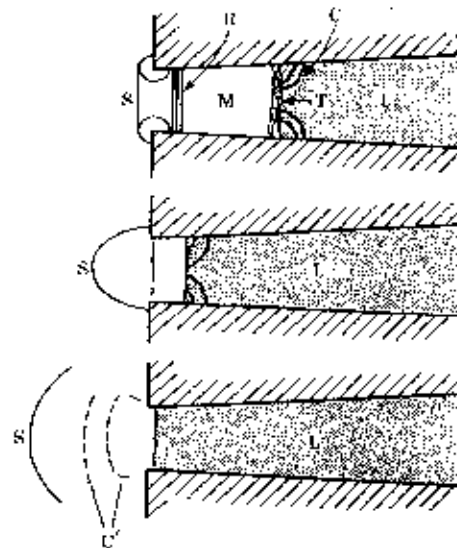
เมื่อปี 1992 Shi และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาการฉีดของเหลวในอัตราที่เร็วสูง ไม่ว่าจะเกินวิธีการทำให้เกิดการฉีด การแสดงตอบกลับของของเหลวและของแข็ง คลื่นของการฉีด และการติดไฟอย่างเหมาะสมของดีเซล Supersonic เป็นเหตุให้เกิดเทคนิคการทดลองและการผลิตมากมาย อย่างไรก็ตามหนึ่งในเทคนิคของ Shi ที่ประสบความสำเร็จมากที่สุดคือการใช้หัวฉีดที่มีการเบนเข้าหากันที่ทำมาจากไทเทเนียม โดยที่กระสุนจะถูกทำให้ติดไฟและกระทบในลักษณะทางตรงบนพื้นผิวของของเหลวด้านหลัง หัวฉีดนั้นมีรูปร่างในลักษณะของไฮเปอร์-โบลิกและเชื่อมติดกับกระบอกสูบภายในที่ไม่เป็นสนิมที่สามารถเปลี่ยนได้ โดยที่มีอัตราความเร็วสูงสุดที่ 4.5 km/s การประกายขึ้นผ่านต่างๆของหัวฉีดปรากฏดังรูปที่ 2.16 แม้ว่าหัวฉีดนั้นทำมาจากไทเทเนียม แต่ก็ไม่สามารถทนต่อความกดดันที่สูงๆได้ ดังนั้นจากแรงปะทะของกระสุนยิง หัวฉีดจะถูกทำลายไปหลังจากการทดลองยิงสองถึงสามครั้ง เมื่อการเคลื่อนไหวยังได้มีการโยกย้ายดังที่กระสุนยิงปะทะกับลูกสูบที่เป็นทองเหลืองที่พื้นผิวของเหลวตอนหลังได้ถูกใช้ขึ้น อัตราความเร็วของการฉีดของเหลวนี้พบว่ามีค่าว่าการกระแทกในทิศทางตรง

อีกวิธีหนึ่งในการทำให้เกิดการฉีดของเหลวในอัตราที่เร็วขึ้นคือการสูบในความดันสูง ซึ่งวิธีนี้ได้มีการนำมาศึกษากันอย่างกว้างขวางเกี่ยวกับการฉีดในด้านการตัดและเทคโบลอจีการทำเหมืองแร่ โดยที่การสูบน้ำสามารถผลิตได้อย่างต่อเนื่องและบางครั้งก็เกิดการฉีดของเหลวในอัตราที่เร็วในลักษณะที่สั่นสะเทือน ซึ่งการฉีดในลักษณะดังกล่าวได้เกิดขึ้นจากการสูบของลูกสูบจนเกิดความดันน้ำโดยการอัดของลูกสูบซึ่งกันและกัน จนเกิดความดันสูงถึง 70 MPa และมีอัตราความเร็วของการฉีดสูงสุดที่ 1,500 m/s อย่างไรก็ตามอัตราความเร็วนี้สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อใช้หัวฉีดที่มีช่องเล็กมาก (0.2-0.3 mm) และเมื่อมีการยุบตัวจนเป็นหลุมในปากกระบอกฉีด ทั้งนี้ทั้งนั้นความดันสูงและการสูบของลูกสูบไม่สามารถผลิตการฉีดของเหลวได้เทียบเท่ากับวิธีการใช้การขับเคลื่อนแนวกระสุนยิง

การฉีดแบบ hypersonic สามารถผลิตได้ด้วยอีกเทคนิคหนึ่งที่เรียกว่า “หัวระเบิดคลื่นระเบิดที่สามารถจะเกิดได้ตามทิศทางที่กำหนดไว้” การฉีดจากลักษณะดังกล่าวในแนวทางตรงนั้นได้เกิดขึ้นจากการหลุดตัวของเส้นแบ่งรอยแยกที่มีคลื่นเสียงระเบิดตลอดการระเบิดในบริเวณรอบๆ วิธีนี้ได้นำมาใช้ให้เกิดเป็นโพรงเส้นยาว จนทำให้เกิดการฉีดของเหลวในลักษณะเส้นยาวแบบ hypersonic อย่างไรก็ตามถ้ามีการบรรจุของเหลวในเส้น การฉีดแบบ hypersonic ก็จะเกิดขึ้น การฉีดแบบ hypersonic ที่เกิดจากการระเบิดของการประดิษฐ์หัวระเบิดคลื่นระเบิดได้นำมาใช้ในการแทงทะลุเป้าหมายในด้านการทหารและความมั่นคงเกี่ยวข้องกับประชาชน

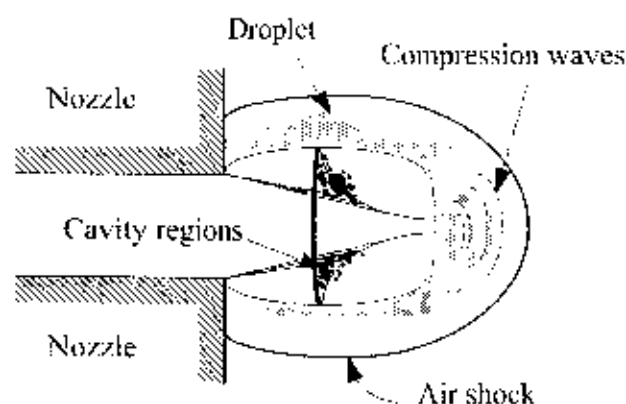
การสำรวจนี้ได้แสดงให้เห็นว่าการฉีดของเหลวแบบ hypersonic หรือ supersonic นั้นสามารถทำได้ด้วยวิธีและการติดตั้งที่แตกต่างกัน โดยที่จะต้องมีความรู้พื้นฐานในการติดตั้งและการออกมาอย่างเหมาะสม ซึ่งสิ่งเหล่านี้ล้วนเป็นประโยชน์มากมายโดยเฉพาะอย่างยิ่งวิธีที่ทำให้เกิดการฉีดของเหลวแบบ supersonic

2.6.1.2 ลักษณะพิเศษของการฉีดของเหลวในอัตราความเร็วสูง แม้ว่าการศึกษาการฉีดของเหลวในอัตราความเร็วสูง นั้นจะเป็นประโยชน์ในหลายๆอย่างที่เกี่ยวข้องกับมัน แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นก็ยังมีความจำกัดในการใช้งาน ซึ่งข้อมูลเท็จจริงของลักษณะของการฉีดของเหลวในอัตราความเร็วสูงนั้นมีความสำคัญ ในส่วนนี้จะกล่าวถึงระบบกลไกรวมทั้งลักษณะพิเศษของการฉีดของเหลวในอัตราความเร็วสูง



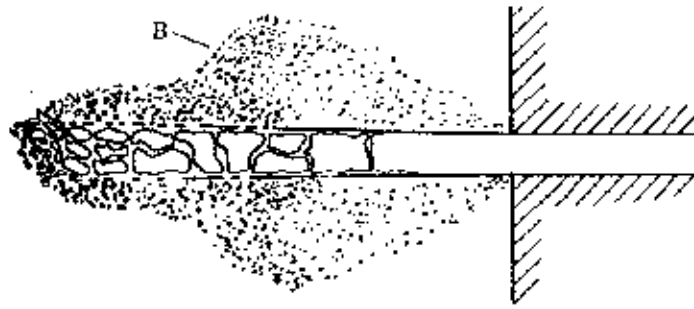
รูปที่ 2.17 ระบบกลไกของการฉีดของเหลวในอัตราความเร็วสูงจากปากของหัวฉีด C,T: บริเวณการฉีดด้านหน้า, L: น้ำ, M: บริเวณของอากาศและหยดน้ำที่อัดตัว, R: คลื่นที่ลดอากาศ, S: การกระแทก, C': คลื่นความดัน

ในส่วนคนท้ายของกระบวนการการฉีดของเหลวในอัตราความเร็วสูงนั้นเกิดขึ้นได้โดยการประติบัติด้วยวิธีการปะทะของกระสุนยิง ที่ได้มีการอธิบายของ Field และ Lesser ดังรูปที่ 2.17 ที่เก็บของเหลวได้ถูกกระแทกด้วยกระสุนยิง จนมีการบีบของน้ำในปากกระบอกฉีดในลักษณะที่บรรจบกัน ผลลัพธ์ที่ได้คือส่วนที่เล็กๆของการพุ่งน้ำในครั้งแรกจะส่งไปยังช่องด้วยความหนาแน่นสูงและอัตราความเร็วสูง การเพิ่มความหนาแน่นในที่เก็บของเหลวนั้นประมาณว่าอยู่ระหว่าง 1.05 - 1.20 ครั้งในความหนาแน่นครั้งแรก



รูปที่ 2.18 การแสดงลักษณะการฉีดของเหลวในอัตราความเร็วสูงหลังจากที่ออกจากหัวฉีดใน
คอนตัน [12]

S: การสั่นสะเทือนของอากาศ, C: หลุม, C': คลื่นความดัน, D: การปกคลุมของหยดน้ำ
เล็กๆ บริเวณที่ใกล้ทางออกของหัวฉีดนั้นคือส่วนที่เก็บของเหลวที่มีการเพิ่มขึ้นนั้นได้ถูกทำให้
เกิดขึ้นก่อนโดยคลื่นการสั่นสะเทือนของอากาศที่ล้อมรอบอยู่ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความดันสูงที่อยู่
ระหว่างความสั่นสะเทือนและส่วนหน้าของของเหลว บริเวณที่ใกล้ส่วนหน้าของของเหลวนี้จะมี
อากาศที่มีการบีบตัวนั้นจะผสมไปกับหยดของของเหลวเล็กๆ อีกทั้งการบีบตัวของของเหลว
นำไปสู่การทำให้เกิดความกดดันภายในอย่างมากในส่วนด้านหน้าของการเก็บของเหลวที่มีการ
เพิ่มขึ้น เมื่อการสั่นสะเทือนของอากาศได้ส่งไปยังหัวฉีดซึ่งกระทบกับคลื่นที่เบาบางย้อนกลับไปยัง
ด้านหน้าของของเหลว ส่งผลให้เกิดอากาศและหยดเล็กๆ พุ่งออกมา เมื่อของเหลวได้ออกจากช่อง
แล้วแรงบีบทั้งหมดก็ย้อนกลับมาด้วย การดันตัวในครั้งต่อมาที่สั่นไปตามความสั่นสะเทือนของบริเวณที่
มีอากาศ จากนั้นก็จะค่อยๆ ผ่านจากส่วนกลางของบริเวณล้อมรอบของเหลวต่อจากนั้นก็จะมี
ความดันของของเหลวออกไปยังสภาพที่มีอยู่จนเป็นลักษณะของการฉีดตามมาภายหลัง
การแสดงของรูปที่ 2.18 นั้นเป็นการฉีดของเหลวในอัตราความเร็วสูงอย่างทันทีทันใดหลังจากที่
ออกจากหัวฉีด การฉีดที่เป็นหลักนั้นถูกล้อมรอบด้วยหยดน้ำเล็กๆ ที่ได้แตกสลายและถูกเสริมหน้า
ด้วยคลื่นความสั่นสะเทือนในลักษณะโค้งและซอกของคลื่นที่มีการบีบตัว จนมีหยดของเหลวออกมา
ในบริเวณดังกล่าว การเคลื่อนย้ายของคลื่นที่มีความเบาบางลงภายในแกนของของเหลวตรงมุนนั้น
ได้เพิ่มการแตกสลายของของเหลวภายในที่เก็บของเหลวเล็กๆ



รูปที่ 2.19 รูปแสดงลักษณะการงอกของเมล็ดในอัตราความเร็วสูงในตอนท้ายหลังจากออกจากหัวฉีด (B: การกระจายของหยดเล็กๆจากความดันของอากาศ)

รูปที่ 2.19 ได้แสดงถึงลักษณะการงอกในช่วงท้ายตรงในระยะตรงหัวฉีดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 – 20 mm จากผลลัพธ์ทางทฤษฎีและการทดลองนั้น Field และ Lesser ได้อธิบายไว้ว่าแกนกลางของของเหลวที่พุ่งออกมาจะไม่มีความสอดคล้องกันอย่างสมบูรณ์ เนื่องจากกระบวนการลดความดันทำให้เกิดการสลายตัวจนเป็นความหนาแน่นมากตรงเห็นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดแกนหลักของของเหลวถูกล้อมรอบโดยการปกคลุมของหยดของเหลวเล็กๆ (ดังสัญลักษณ์ B) ที่ได้รับการพัฒนาแบบไดนามิก สัญลักษณ์ B นั้นเกี่ยวข้องกับผลกระทบของการดีดอากาศ โดยการใช้วิธีการแบบฟูลคอสและทฤษฎีที่ของเทเลอร์นั้นทำให้ขนาดของหยดของเหลวนี้ใหญ่ประมาณ 2 – 10 μm

ระบบกลไกของการลดอนุภาคการงอกของเหลวให้เล็กลงนั้นได้มีการศึกษาทางการทดลองกระบวนการนี้เกี่ยวข้องกับทรงเรขาคณิตของหัวฉีดที่ทำให้เกิดการลดขนาดของอนุภาค โดยเฉพาะมุมของการฉีดที่เอียงที่นำสังเกตของทางออกของหัวฉีด จากการประเมินของทฤษฎีที่ทำให้อนุภาคของการฉีดลดลงนั้นแสดงให้เห็นว่าผลกระทบของวิธีการเคลื่อนไหวของอากาศ การไหลทะลักของของเหลว ผลกระทบของการเพิ่มสมรรถนะของอัตราความเร็วในการฉีดและการเคลื่อนตัวของความดันของของเหลว ซึ่งสิ่งเหล่านี้ไม่สามารถอธิบายผลลัพธ์ทางการทดลองได้เพียงอย่างเดียว โดยระบบกลไกที่รวมกับความเกี่ยวเนื่องของวิธีการเคลื่อนไหวของอากาศในของเหลวในด้านผลกระทบของทรงเรขาคณิตของหัวฉีดนั้นอาจจะมีความเกี่ยวข้องในทางการศึกษา แต่จากกระบวนการการศึกษาเรื่องของรูปทรงของหัวฉีดนั้นได้ระบุไว้ว่าส่งผลต่อการทำให้เกิดอนุภาคที่เล็กลงได้

ความไม่เสถียรในการฉีดของเหลวในอัตราความเร็วสูงนั้นได้มีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง โดยได้มีการทดสอบความสัมพันธ์กันของการเคลื่อนไหวของอากาศระหว่างการฉีดและเครื่องฉีดรอบ ผลปรากฏว่ากระบวนการสลายตัวประกอบกับความไม่เสถียรในลักษณะเล็กน้อยนั้นทำให้มีการรบกวนของแกนกลางเพิ่มมากขึ้นโดยทำให้เกิดการแตกสลายของการฉีดจนเป็นแนวของหยดเล็กๆ จากการทดลองพบว่าความไม่เสถียรและการทำให้เป็นอนุภาคเล็กๆของการฉีดของเหลวทำให้เกิดการไหลเวียนของอากาศที่อัดกัน ซึ่งมีหน่วยวัดตั้งแต่ 0.50 ถึง 1.50 นับว่าเป็นความไม่เสถียรที่รุนแรงเนื่องจากจำนวนหน่วยเกือบเท่ากับ 1 หน่วยวัด โดยการแตกตัวของหยดของเหลวภายใต้สภาพที่มีการเร่งอัตราความเร็วนั้นแสดงให้เห็นถึงอัตราเร่งเฉื่อยนั้นทำให้หยดการสั่นสะเทือนและเป็นเสียงเดียวในเวลาเดียวกัน ครั้นต่อมาถึงแม้ว่าการตอบกลับนั้นไม่เสถียร แต่ก็ทำให้เกิดการผิดรูปโดยจากการกระจายความดันของการเคลื่อนไหวอากาศที่ยังเหลือค้างอยู่

การศึกษากการฉีดของเหลวในอัตราความเร็วสูงเพื่อความเข้าใจที่ดียิ่งขึ้นหรือการปรับปรุงในการฉีดในทิศทางตรงด้วยเครื่องฉีดดีเซลนั้นจัดว่ามีความสำคัญในการศึกษาเช่นกัน เป็นที่รู้กันดีอยู่แล้วว่าการเพิ่มความดันในการฉีดเชื้อเพลิงนั้น การเพิ่มปริมาณหรืออัตราความเร็วในการฉีด ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นที่น่าสนใจที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้ของเครื่องฉีดดีเซล เนื่องจากจะมองเห็นว่ามีขนาดเล็กและมีภาระพร้อมทั้งมีการผสมกันอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นการใช้เชื้อเพลิงและการปล่อยก๊าซออกมาจนหมดโดยเฉพาะที่เป็นควันนั้นจะมีจำนวนที่ลดลง Hiroyasu ได้ศึกษาถึงการลดการเผาไหม้ของเครื่องฉีดและลักษณะของการเผาไหม้ในสภาพที่เสถียรและกระบวนการที่ทำให้เกิดละออง อีกทั้งยังได้อธิบายถึงระยะของการสลายตัวของเม็ด การแทรกซึมของละอองและการรบกวนของหยดเล็กๆในการฉีด จากข้อมูลการทดลองการฉีดพ่นดีเซลนั้น Hiroyasu ได้แสดงการทดลองให้เห็นถึงระยะของการสลายตัวของดีเซล L_b พร้อมทั้งยังได้แนะนำหลักฐานที่ยืนยันในการสลายตัวอย่างสมบูรณ์ ดังนี้

$$L_b = 0.7D(1 + 0.4\frac{r}{D})(\frac{P_c}{\rho_f V_f^2})^{0.05}(\frac{L}{D})^{0.13}(\frac{\rho_f}{\rho_a})^{0.5} \quad (2.20)$$

โดยที่ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด, L คือความยาวของหัวฉีด, r คือเส้นรัศมีของหัวฉีด, P_c คือความดันของอากาศ, ρ_a คือ ความหนาแน่นของอากาศ, ρ_f คือความหนาแน่นของเชื้อเพลิง, V_f คืออัตราความเร็วในการฉีดช่วงแรก อีกทั้งเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ย SMD สามารถคำนวณได้จากองค์ประกอบของลักษณะการฉีด ดังนี้

$$\bar{X}_{32} = 2.33 \times 10^{-3} (\Delta P)^{-0.145} (\rho_a)^{0.121} Q^{0.131} \quad (2.21)$$

ΔP คือความแตกต่างระหว่างความดันในการฉีดและความดันล้อมรอบ โดยกำหนดให้ Q คือ ปริมาณของเชื้อเพลิงที่ถูกส่งไป โดยมีสมการการหาขนาดของการฉีดได้ดังนี้

$$\theta = 83.5 \left(\frac{L}{D} \right)^{0.22} \left(\frac{D}{D_0} \right)^{0.15} \left(\frac{\rho_a}{\rho_f} \right)^{0.20} \quad (2.22)$$

กำหนดให้ ρ_f คือเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกของหัวฉีด การคำนวณการแทรกซึมของการฉีดมีอยู่ 2 ส่วน ดังนี้

$$S = 0.39 \left(\frac{2\Delta P}{\rho_f} \right)^{0.5} \quad \text{when} \quad 0 < t < t_b \quad (2.23)$$

$$S = 2.95 (Dt)^{0.5} \left(\frac{2\Delta P}{\rho_f} \right)^{0.25} \quad \text{when} \quad t < t_b \quad (2.24)$$

$$t_b = 28.65 \frac{\rho_f D}{(\rho_a \Delta P)^{0.5}} \quad (2.25)$$

กำหนดให้ t_b คือเวลาที่ปลายตัวของการฉีด และ t คือเวลาของการแทรกซึมของการฉีด

จากการศึกษาถึงกระบวนการแตกตัวและกลไกในการสร้างละอองโดยการฉีดของเหลวใน อัตราความเร็วสูง (โดยมีความเร็วสูงถึง 200 m/s) นั้น กระบวนการแตกตัวสามารถวัดได้โดยวิธีการ ทางไฟฟ้า ซึ่งจากระยะของการแตกตัวได้แบ่งองค์ประกอบของอัตราความเร็วในการฉีดออกเป็น 6 ลักษณะด้วยกันคือ 1. การเปลี่ยนแปลงของระยะการแตกตัวนั้นไม่ติดขัด 2. การเปลี่ยนรูปของการแตกตัวที่ไม่สม่ำเสมอเป็นในลักษณะของการไหลเป็นคลื่น 3. การทำให้ระยะที่แตกตัวออกมา อย่างไม่สม่ำเสมอเป็นในลักษณะของสายละออง 4. ระยะของการแตกตัวนั้นมีค่าน้อยสุดในสาย ละออง 5. การไหลในลักษณะที่เป็นคลื่นนั้นมีการกระจายออกอย่างราบเรียบไปยังส่วนของหัวฉีด ความเร็วสูงเพื่อที่ว่าหัวฉีดจะได้ไม่ต้องมาทำให้เป็นการฉีดแบบละอองเอง 6. ระยะของการแตกตัว ได้กระจายออกอย่างไม่สม่ำเสมอโดยมีลักษณะเป็นคลื่นและหัวฉีดก็ไม่สามารถพัฒนาทำให้เกิด การฉีดในลักษณะที่เป็นละอองได้

ลักษณะของการไหลและเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กที่สุดในการพ่น รูปทรงกรวยมีลักษณะที่เป็นมุมกว้างนั้นเกี่ยวข้องกับการทำก่อนการผสมในกระบวนการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซล โดยที่การฉีดพ่นรูปทรงกรวยที่ไม่เสถียรในอากาศนั้นได้นำมาวิเคราะห์โดยใช้เครื่องวัดคือปเปอร์ (PDA) เป็นเครื่องวัดอัตราความเร็วลม พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กที่สุดและอัตราความเร็วของการพ่นจนสมบูรณ์นั้น ไม่ตรงกัน และเมื่อเปรียบเทียบกับกรวยกระจายของการฉีดในความดันที่เสถียรนั้นมีความผิดปกติ แต่ก็มีความปกติได้ถ้าการฉีดพ่นนั้นได้แบ่งออกเป็นส่วนๆ ผลกระทบของการเกิดฟองอากาศในการทำให้เป็นละอองด้วยการฉีดดีเซลในทิศทางตรงได้มีการนำมาศึกษาขึ้น ผลปรากฏว่าฟองอากาศในรูของหัวฉีดนั้นอันเหตุทำให้เกิดตะกอมของการฉีดอย่างรวดเร็วในด้านที่ออก ซึ่งถือว่าเป็นข้อดีอย่างหนึ่ง โดยที่ฟองอากาศนี้ผลิตจากฟองที่มีคุณสมบัติเหมือนกันมากกว่าเกิดจากที่ว่าง

จากการวิเคราะห์ของการระเหยและการไหลทะลักของการฉีดนั้นพบว่า มีสาเหตุมาจากการฉีดละอองในความดันสูง อีกทั้งยังมีการวิเคราะห์ถึงโครงสร้างของหัวฉีดเชื้อเพลิงดีเซลกับเครื่องยนต์ที่เหมือนดีเซล พบว่าโครงสร้างของหัวฉีดดีเซลนั้นอาจจะเคยมีการนำมาใช้ในแบบของหลักฐานในการศึกษาเครื่องยนต์ดีเซลที่แท้จริง

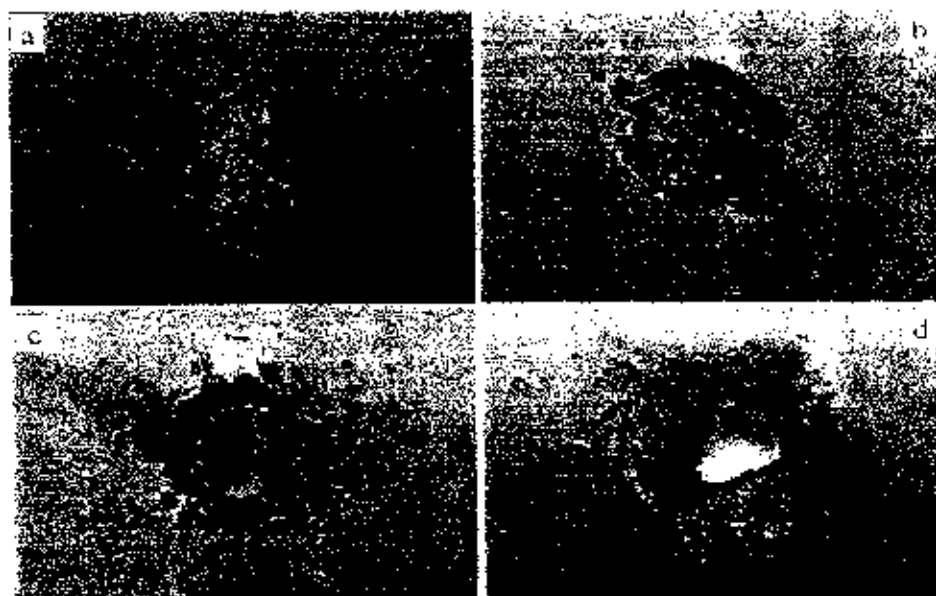
Nakahira ได้ผลิตหัวฉีดเชื้อเพลิงดีเซลในแบบ Supersonic ในระดับต่ำ (บรรจุแก๊สในโตรเจน 2 MPa ในถึงความดันสูง) และเขายังได้ศึกษาถึงประโยชน์จากคลื่นสะท้อนตัว ผลปรากฏว่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบ SMD ของหยดเล็กๆในการฉีดเชื้อเพลิงนั้นเล็กลงเมื่อความดันในการฉีดสูง เพื่อที่ว่าคลื่นมีความสัมพันธ์กันได้พอดีกับหัวฉีด Nishida และทีมงานยังได้ศึกษาถึงมุมในการฉีด รูปร่างของการฉีด อัตราความเร็วในการซึม และค่า SMD ของการฉีดเชื้อเพลิงดีเซลด้วยความดันที่สูงมาก (มากถึง 300 MPa) การศึกษานี้ได้ยืนยันถึงค่า SMD และมุมในการฉีดที่มีการลดลงจากการที่ได้เพิ่มความดันในการฉีด (จากสูตรของ Hiroyasu ในสมการที่ 2.21 และ 2.22) อีกทั้งได้มีสังเกตคลื่นของมัค (Mach) จากทฤษฎีของการฉีดเมื่ออัตราความเร็วที่เพิ่มในการฉีดนั้นเร็วกว่าความเร็วของเสียงในอากาศที่ล้อมรอบอยู่ (1.2 MPa และ 298 K)

2.6.1.3 การกระทบของของเหลวไปยังของแข็งจากอัตราความเร็วสูง ปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่งในการศึกษาถึงหัวฉีดของเหลวในอัตราความเร็วสูงนั้นคือการเปลี่ยนรูปของของแข็งหรือการตอบสนองจากการกระทบของหัวฉีด ที่เกิดขึ้นเช่นเดียวกับการชะน้ำของเครื่องปั้นในอัตราความเร็วสูง การชะของใบพัดกังหันหรือเทค โนโลยีในการตัดหัวฉีด จนทำให้มีการเปลี่ยนรูปออกเป็น 5 ลักษณะตรงพื้นผิวด้านบนของของแข็งหลังจากการกระทบของหัวฉีดในอัตราความเร็วสูง แบบแรกคือมีการแตกร้าวตรงพื้นผิวในลักษณะเป็นเส้นรอบวง แบบที่สองมีการไหลได้พื้นผิวและมีการแตกร้าว แบบที่สามมีการเปลี่ยนรูปของพลาสติกที่มีน้ำหนักมาก แบบที่สี่การเปลี่ยนรูปมีลักษณะ

แบบถูกตัดออกบริเวณผิวรอบนอกของส่วนที่มีการกระทบ และแบบสุดท้ายคือมีการแตกร้าว ซึ่งลักษณะของการเปลี่ยนรูปร่างขึ้นอยู่กับลักษณะทางกลไกของของแข็งและอัตราความเร็วของการกระทบ อีกทั้งยังมีการศึกษาถึงการแตกร้าวในลักษณะที่เปราะของของแข็งที่ได้มีการกระทบของเหลว พบว่าการผลิตความสั่นสะเทือนที่สั้นและชัดเจนนั้นเกี่ยวกับประเด็นต่างๆมากมายเปรียบได้กับการผลิตจากการระเบิดของดินปืนระเบิดอันเล็กบนพื้นผิว

Hirano พบว่าอัตราความเร็วในการกระจายตัวนั้นเร็วกว่าอัตราการหยุดลงเมื่อหัวฉีดนั้นมีการกระทบบนพื้นผิวของแข็งอย่างเต็มที่ เนื่องจากลักษณะของการไหลในการกระจายของหัวฉีดในขั้นตอนแรกนั้นเป็นลักษณะที่ชั่วครว จากการศึกษาอย่างละเอียดของ Field และ Lesser นั้นพบว่าการอัดแน่นนั้นเป็นปัญหาจากการกระทบของเหลวในวิถีที่มีความเร็วสูงอย่างแบบ Supersonic แต่ต่ำกว่าแบบ hypersonic ซึ่งปัญหาและทฤษฎีต่างๆได้มีการนำมาตรวจสอบเพื่อความเข้าใจมากยิ่งขึ้นในเรื่องต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการกระทบของของเหลว การพัฒนาการสั่นสะเทือนและสภาพที่มีการปลีกตัวแยกออกมาซึ่งเป็นผลมาจากการกระทบของของเหลวไปยังของแข็งและความสั่นสะเทือนที่ทำให้เกิดการแตกสลายจนเป็นโพรงจากการกระทำของหัวฉีดของเหลวที่มีอัตราความเร็วสูงนั้นได้มีนามาอธิบายขึ้น Shi และทีมงานได้ทำการทดสอบอัตราความเร็วของคลื่นความสั่นสะเทือนและแรงดันในการกระทบของน้ำที่มีอัตราความเร็วสูงไปยังของแข็ง แนะนำว่าเมื่อมีอัตราความเร็วของน้ำที่มีการกระทบในปริมาณมาก (มากกว่า 1,500 m/s) การอัดตัวของของเหลว และการเปลี่ยนรูปของวัตถุนั้นควรจะมีการคำนวณของแรงดันในการกระทบและอัตราความเร็วของคลื่นความสั่นสะเทือนรวมอยู่ไปด้วย

ซึ่งเทคโนโลยีในการตัดหัวฉีดนั้นจัดว่าเป็นสิ่งที่น่าสนใจอีกอย่างหนึ่งในเรื่องของหัวฉีดของเหลวที่มีอัตราความเร็วสูง จึงได้มีการนำมาศึกษากันอย่างกว้างขวางเป็นเวลาหลายปี โดยการศึกษาที่ยังได้รวมถึงวิธีของการทำให้เกิดหัวฉีดของเหลวที่มีความเร็วสูง อัตราความเร็วของการฉีดและลักษณะเฉพาะต่างๆ อาทิเช่นผลกระทบของทรงเรขาคณิตของปากหัวฉีดเกี่ยวกับโครงสร้างและความแข็งแรง แรงดันของการกระทบ สมรรถนะในการตัด และอื่นๆ ตัวอย่างเช่น จากการศึกษาของฉีด ที่พบว่าการทำลายบริเวณพื้นผิวของของแข็งหลังจากการกระทบโดยการฉีดน้ำแบบ Hypersonic ดังรูปที่ 2.20 ซึ่งมีอัตราความเร็วในการฉีดที่แตกต่างกัน การทำลายหรือการเปลี่ยนรูปร่างบนพื้นผิวของของแข็งมีความแตกต่างกัน อีกทั้งยังเป็นที่น่าสังเกตอีกว่าระยะห่างกระรูกของหัวฉีดนั้นส่งผลต่อการทำลายได้



รูปที่ 2.20 ความหนาของแผ่นกระแทก 3 mm ระยะ 45 mm a) 2,727 m/s b) 3,529 m/s
c) 4,111 m/s d) 4,545 m/s

2.6.1.4 การศึกษาเกี่ยวกับตัวเลขและการวิเคราะห์ ถึงแม้ว่าวิธีที่ทำให้เกิดหัวฉีดของเหลวแบบ Supersonic ได้มีการกล่าวไว้โดย Bowden และ Brunton's เมื่อ 1958 นั้น แต่ก็ยังมีการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับวิเคราะห์และการคำนวณอีกด้วย

ในการศึกษาของ O'Keefe นั้น ได้กล่าวถึงการเคลื่อนที่ของแนวลำพุ่งที่ได้มาบรรจบกันเกี่ยวกับความสำคัญอย่างหนึ่ง นั่นคือสมการที่ไม่แน่นอนเกี่ยวกับการไหลของของเหลวที่มีการอัดตัวที่มีอัตราส่วนแปรผันของพื้นที่ในส่วนที่ตัดตามขวาง จากการทำกันแบบยูเลอร์เรียน (ดูรูปที่ 2.14 ประกอบ)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\rho u}{A} \frac{\partial A}{\partial x} = 0 \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \quad (2.27)$$

$$\frac{dP}{dt} - c^2 \frac{d\rho}{dt} \quad (2.28)$$

สมการลักษณะพิเศษทางด้านกายภาพ ดังนี้

$$\frac{dx}{dt} = u \pm c \quad (2.29)$$

และสมการในลักษณะที่มีความสอดคล้องกัน

$$du = \pm \frac{1}{\rho c} \left(\frac{\partial P}{\partial c} \right)_x dc \mp \frac{1}{A} \frac{dA}{dx} dt \quad (2.30)$$

กำหนดให้ ρ คือ ความหนาแน่น, P คือ ความดัน, u คือ อัตราความเร็ว, c คือ อัตราความเร็วของเสียง, A คือพื้นที่ส่วนที่ตัดตามขวาง และส่วนที่เหลือนั้นเป็นสมการของแนวของลูกสูบและความดันบนหลังของลูกสูบ

$$\frac{dx}{dt} = u \quad (2.31)$$

$$P = P_0 - \frac{m_p}{A} \frac{du}{dt} \quad (2.32)$$

กำหนดให้ m_p คือ มวลของลูกสูบ, P_0 คือความดันอากาศที่อยู่หลังลูกสูบส่วนเส้นแบ่งคั่นขวานั้น กำหนดให้เป็นสมการของพื้นผิวว่างเปล่าและความดันของตัวเอง

$$\frac{dx}{dt} = u \quad (2.33)$$

$$P_f = 0 \quad (2.34)$$

กำหนดให้ P_f คือ ความดันของพื้นผิวที่ว่างสมการของของเหลวจากการเสนอของ Taft

$$P = 2.94 \left\{ \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{1.17} - 1 \right\} \quad (2.35)$$

ความดันสูงสุดในส่วนที่มีการเวียนลึกลงสามารถนำมาคำนวณได้ ตัวอย่างเช่น ในกรณีของอัตราส่วนพื้นที่ของหัวฉีดเป็น 12:1 และอัตราความเร็วของการกระทบเป็น 1.22 km/s โดยมีความดันสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 0.82 GPa

ต่อมา Smith ได้ใช้วิธีที่มีลักษณะพิเศษที่คล้ายกับการศึกษาของ O'Keefe โดยได้เปลี่ยนแนวความคิดของคลื่นของหัวฉีดที่ทำเป็นมุมฉากในลักษณะที่มีการมาบรรจบกัน (เป็นทรงกรวยครึ่งหนึ่งที่ทำมุม 60°) อย่างไรก็ตาม ความแน่นอนในสมการของ O'Keefe ที่เกี่ยวกับขงเหลวซึ่งมีความแตกต่างกันเล็กน้อยดังนี้

$$\frac{P + B}{P_0 + B} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^n \quad (2.36)$$

กำหนดให้ $n = 7$, $P_0 = 101325 \text{ Pa}$ และ $\rho_0 = 1,000 \text{ kg/m}^3$ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ B ได้มาจากสมการด้านล่างนี้ โดยกำหนดให้ $C_{\text{jet}} = 1,500 \text{ m/s}$

$$C = \sqrt{\frac{dP}{d\rho}} = \sqrt{\frac{n(P_0 + B)}{\rho_0} \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{n-1}} \quad (2.37)$$

แม้ว่าจะมีการศึกษาที่อัตราความเร็วของการกระทบที่ต่ำ (40 m/s) ได้นำมาพิจารณา แต่ก็มีการสะท้อนกลับของคลื่นการสั่นสะเทือนสองอย่างของหัวฉีดอย่างชัดเจน (วัดได้โดยเครื่องมือรับแรงดันที่ได้ติดตั้งไว้ตรงผนังของหัวฉีด) ดังนั้นจากการคำนวณของความดันสูงสุดทั้งสองอย่างทำให้คาดว่าน่าจะทำให้เกิดโพรงของหัวฉีด อย่างไรก็ตามในบางครั้งไม่เสมอหรือสองของความดันสูงสุดสามารถพบได้จากการวัดในการทำการทดลอง ความดันที่สูงสุดที่ 100 MPa ได้ถูกวัดในการที่มีช่องของหัวฉีดขนาด 1 mm

การวิเคราะห์ของกระบวนการทำให้เกิดหัวฉีดของเหลวแบบ Supersonic เบื้องต้นของเวทย์เพลอฟกีและคูลีได้มีการรายงานขึ้นโดยโรห์มิง การวิเคราะห์ของพวกเขาเกี่ยวข้องกับทฤษฎีการไหลที่ไม่คงที่และไม่ได้มีการขัดตัวในการเคลื่อนที่ของส่วนที่เป็นของเหลวเปล่าๆที่ทะลุไปยังปลายของหัวฉีด รูปแบบของแอส-แกรนเจียนของสมการที่สงวนไว้ของมวลและพลังงานในส่วนหนึ่งของเหลวทั้งหมดในลักษณะที่ไม่คงที่ได้มาจากสมการของเบอร์นูลลีที่วิเคราะห์ จากการรายงานของ Glenn ได้อ้างถึงการพัฒนาความดันของหัวฉีดที่ได้นำมาเปรียบเทียบกับสูตรที่มีการทดสอบปรากฏว่ามีแนวโน้มของความดันในแรงดันที่มากที่สุดแบบทันทีทันใดนั้นแทบจะมีความเหมือนกัน อย่างไรก็ตามความดันที่แรงสุดนั้นทำให้เกิดผลที่ตามมาแตกต่างกัน ในส่วนของสูตรที่ไม่ได้มีการกักเก็บความดันสูงสุดทำให้เกิดการปล่อยตัวออกมา ในขณะที่สูตรที่มีการกักเก็บยังมีการสร้างความดันขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเริ่มมีการปล่อยตัวออกมาในภายหลัง ผลกระทบของการกักเก็บของเหลวนั้นทำให้เกิดอัตราความเร็วสูงสุดของหัวฉีดที่ต่ำกว่า 15%

Pater ยังได้รายงานถึงสูตรที่เกี่ยวกับการวิเคราะห์ของอุปกรณ์หัวฉีดที่มีการสันสะเทือนแบบผลึกออก สูตรของของเหลวที่ไม่ได้มีการกดตัวนั้นได้ถูกพัฒนาขึ้นและยังนำมาใช้เป็นตัวช่วยในการออกแบบอุปกรณ์เกี่ยวกับการตัดของหัวฉีดในเวลาต่อมา อัตราความเร็วของหัวฉีดของเหลว นั้นสามารถคำนวณได้จากองค์ประกอบของพลังงานจลน์ที่นำเข้าหรือพลังงานของหัวฉีดที่เพิ่มมากขึ้น (E_j) อย่างไรก็ตามสูตรที่มีผลออกมาคล้ายกันย่อมเกี่ยวข้องกับกรณีที่มีความแน่นอน และค่าที่มากของอัตราส่วนพื้นที่ของหัวฉีด อัตราความเร็วของหัวฉีดของเหลว (V_j) ดังสมการด้านล่าง

$$V_j = \sqrt{\frac{2E_j}{\rho S A_p}} \quad (2.38)$$

กำหนดให้ S ความยาวของระยะชัก, A_p คือ พื้นที่ของส่วนที่ตัดตามขวางของลูกสูบ และ ρ คือความหนาแน่นของของเหลว

Atanov ได้พัฒนาสูตรการคำนวณถึงความเป็นไปได้ของอัตราความเร็วสูงสุดของหัวฉีดของเหลวที่มีการสันสะเทือนจากการสร้างหัวฉีดแบบเป็นกลน้ำ โดยได้อาศัยกฎความเฉื่อยของการเพิ่มความเร็วของของเหลวและรูปแบบเฉพาะของความดันพลังงานของหัวฉีดที่สูงกว่าความดันคงที่ภายในปากกระบอกฉีด พบว่าสูตรการคำนวณที่ได้มีการพัฒนานั้นสามารถนำมาคำนวณได้ดีกว่า

Lesser ได้สรุปกระบวนการเบื้องต้นของการทำให้เกิดหัวฉีดแบบ Supersonic จากวิธีการกระทบของกระสุนยิง โดยเรียกชื่อว่าจะไรก็ได้ที่สามารถทำความเข้าใจของขั้นต้นที่สำคัญของการกระทบของของเหลวในอัตราความเร็วสูง โดยให้ชื่อและเรียกว่าทฤษฎีของคลื่นนำของเสียงหรือทฤษฎีแก๊ส (GAS) นั่นเอง สมการเบื้องต้นที่เกี่ยวกับการสันสะเทือนของการนำเสียงได้มาจากการให้ทฤษฎีของ Bowden และ Brumton's (วิธีการกระทบของการยิงกระสุน) Lesser ได้แนะนำสมการการคำนวณอัตราความเร็วของหัวฉีดน้ำดังนี้

$$V_j = \frac{4V}{1 + B/A} \quad (2.39)$$

กำหนดให้ V คือ อัตราความเร็วของการกระทบของการยิงกระสุน, A คือ พื้นที่ส่วนตัดตามขวางของโพรงหัวฉีด และ B คือช่องของหัวฉีด



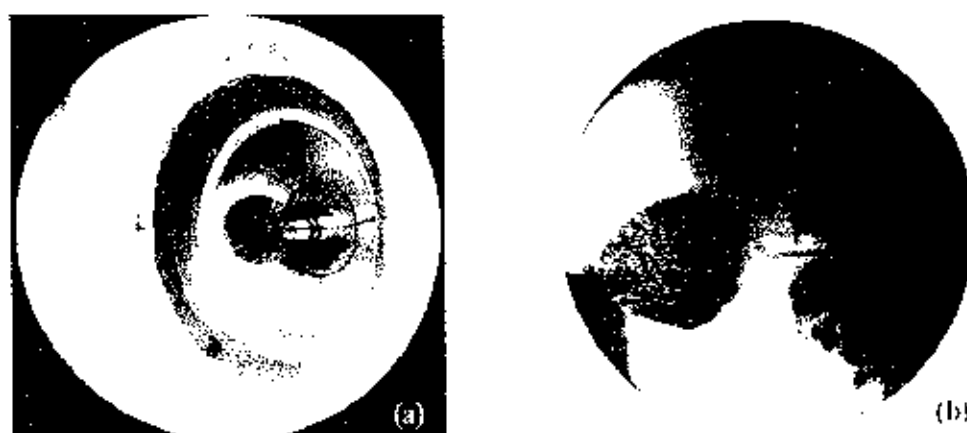
รูปที่ 2.21 รูปแสดงของหัวฉีดน้ำแบบ Supersonic แบบดำด้วยกล้องที่มีความเร็วสูง

(a) มีอัตราความเร็ว 620 m/s (b) มีอัตราความเร็ว 770 m/s

2.6.1.5 รูปของหัวฉีดของเหลวที่มีความเร็วสูง การศึกษาถึงลักษณะพิเศษของการ หัวฉีดของเหลวที่มีอัตราความเร็วสูงนั้นจำเป็นต้องมีเทคนิคทางการมองรูปมาเกี่ยวข้องด้วย เนื่องจากเวลาที่เกิดการฉีดนั้นสั้น ในส่วนนี้จะนำเสนอถึงเทคนิคการใช้รูปมาศึกษาถึงหัวฉีดที่มีความเร็วสูง

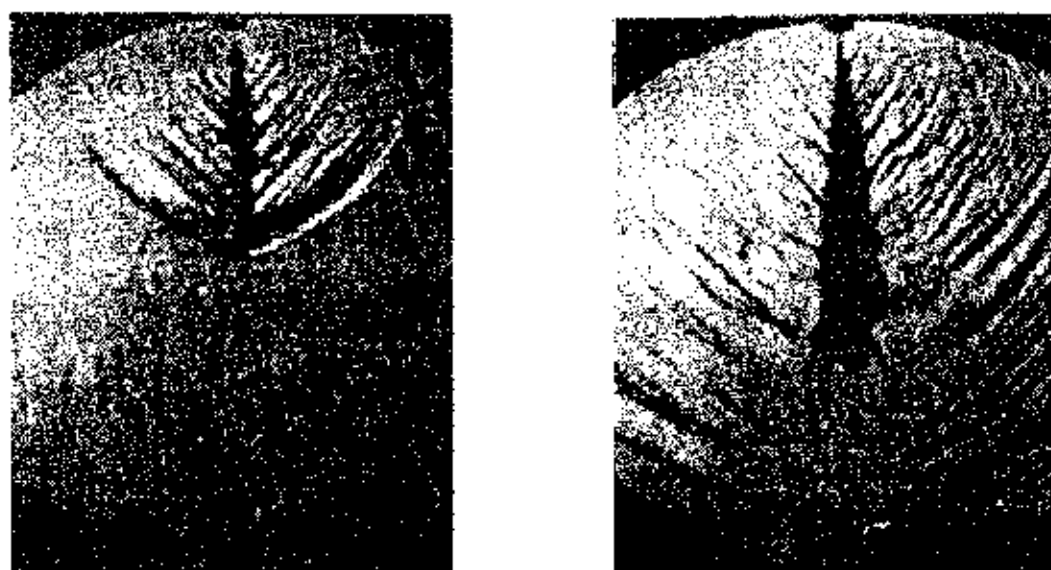
ซึ่งการศึกษาของ Bowden และ Branton's นั้นได้มีการนำวิธีใช้รูปถ่ายมาศึกษาร่วมด้วย โดยใช้ทั้งการวัดอัตราความเร็วและการใช้รูปถ่าย การถ่ายรูปด้วยความเร็วสูงนั้นใช้เวลาการถ่ายรูปไปหนึ่งรูปครึ่งต่อหนึ่งส่วนล้านวินาที เท่ากับการถ่ายหนึ่งครั้งจะได้รูปถึงล้านรูปในหนึ่งวินาที แสงที่ใช้ถ่ายนั้นใช้หลอดไฟที่มีก๊าซซีนอนเข้มข้น ดังตัวอย่างของรูปการฉีดของเหลวแบบ Supersonic จากการศึกษาของ Bowden และ Branton's ของรูปที่ 2.21 โดยกล้องที่มีความเร็วสูงได้นำมาใช้คำนวณหาอัตราความเร็ว (ตำแหน่งและเวลา) กันอย่างแพร่หลาย และการใช้รูปในการศึกษาประกอบในการศึกษาเรื่องอื่นๆด้วย

การนำคุณลักษณะของการกดชัตเตอร์และความสว่างของแสงที่สัมพันธ์กันนั้นทำให้เกิดกล้องที่มีการสลับกระแสนของรูปหลายๆ เฟรม ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่ต่อเนื่องของปรากฏการณ์ที่เร็วมาก ซึ่งต้องมีความเที่ยงตรงในการทำสูง ตัวอย่างเช่น รูปของหัวฉีดที่มีพุ่งโจมตีด้วยอัตราความเร็ว 9.2 m/s ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 รูปถ่ายของการฉุดในลักษณะพุ่งด้วยอัตราความเร็ว 9.2 m/s

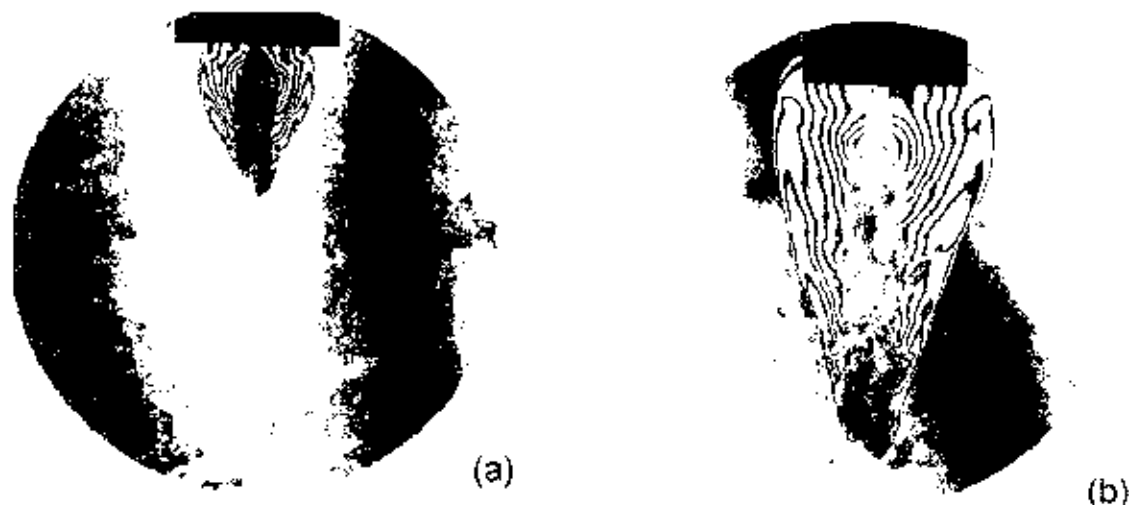
(a) คือ 24 μ s หลังการระเบิด และ (b) คือ 53.5 μ s หลังการระเบิด



รูปที่ 2.23 การฉุดเชิงเพิงคัสเซอเนบ Supersonic จากการถ่ายภาพภายในเนื้อหิน

รูปเจ้านั้นจัดว่าเป็นวิธีที่ง่ายได้ผลในการใช้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาการไหลที่มีการอัดในการใช้รูปประกอบมาเป็นเวลานาน ซึ่งนักวิจัยจำนวนมากได้นำไปใช้ในการศึกษาถึงการฉุดของเหลวที่มีอัตราความเร็วสูง นอกจากนั้นหลักฐานชิ้นหนึ่งจากรูปถ่ายของการฉุดคือคลื่นความดันสะเทือนที่เกิดขึ้นขณะที่ได้ถ่าย

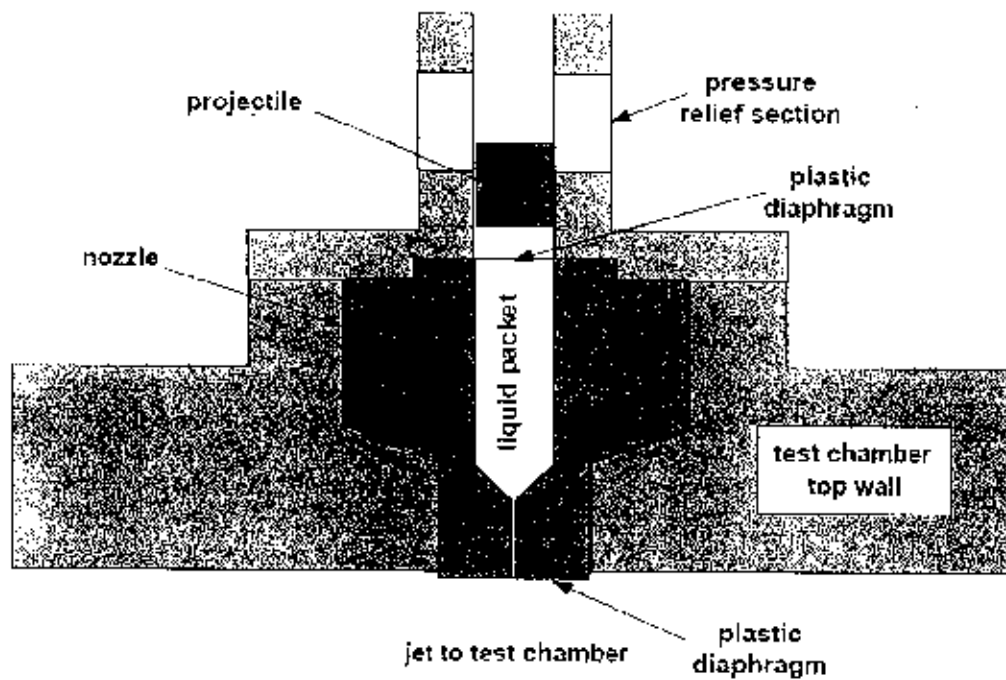
Nishida และทีมงานได้ประสบความสำเร็จจากการใช้วิธีการแตกของเนื้อหินจากการฉีดซีเมนต์แบบSupersonic ซึ่งเส้นมีครอบบการฉัดนั้นสามารถมองเห็นได้ชัดเจนกว่ารูปเจาะ รูปที่ 2.23 ได้แสดงให้เห็นถึงรูปการแตกของเนื้อหินในลักษณะของการฟันและคลื่นมักโดยรอบ ซึ่งการวัดความยาวของคลื่นแสงจากงานเขียนทั้งหมดนั้นได้นำมาใช้ในการศึกษาของ Shi ที่ว่าการฉัดน้ำในแบบ Supersonic นั้นทำให้เกิดผลดังรูปที่ 2.24 ซึ่งสามารถมองเห็นความหนาแน่นภายในได้



รูปที่ 2.24 การฉัดน้ำ ที่ความเร็ว 2,000 m/s (a) คือ ปรากฏการณ์ช่วงต้น และ (b) คือ ปรากฏการณ์ช่วงท้าย

(1) ผลกระทบของรูปทรงหัวฉีดที่มีผลต่ออัตราความเร็วของการฉีดของเหลวหลังจากที่ได้มีการจัดเตรียมการทดสอบนั้นก็ยังมีอีกขั้นตอนหนึ่งที่ทำให้เกิดการฉีดของเหลวแบบ Supersonic ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มอัตราความเร็วให้ได้เต็มกำลังมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เมื่อขั้นตอนนี้เสร็จสิ้นก็จะทำให้ส่งผลในการศึกษาถึงการทำให้เกิดความเหมาะสมและการยกระดับของการฉีดไฟอย่างอัตโนมัติโดยเชื้อเพลิงดีเซลตามมา ในส่วนของบทนี้ ได้อธิบายถึงวิธีการที่ทำให้เกิดการฉีดของเหลวแบบ Supersonic ซึ่งได้ขยับไปถึงการออกแบบของหัวฉีดที่ใช้ในการทดลองด้วย โดยรูปทรงของหัวฉีดที่หลากหลายแบบได้ถูกนำมาศึกษาค้นคว้าถึงความเกี่ยวข้องกับอัตราความเร็วของการฉีด ตลอดจนผลกระทบของความหนาแน่นของผิวหัวฉีดที่มีผลต่ออัตราความเร็วของการฉีด ในตอนท้ายมีการอธิบายถึงผลลัพธ์จากการทำการทดลอง เช่น ผลของเส้นผ่านศูนย์กลางของปากหัวฉีด, L/d , แลบนังรูปของมุมทรงกรวยในอัตราความเร็วของการฉีดของเหลว ซึ่งของเหลวที่นำมาใช้ในการทดลองคือน้ำและเชื้อเพลิงดีเซล

(2) วิธีการทำให้เกิดการฉีกของเหลวแบบ Supersonic วิธีการขับเคลื่อนแบบการปะทะโดยพุ่งไปด้านหน้า จากรูปที่ 2.25 เป็นภาพการติดตั้งการทดลอง ซึ่งคล้ายกับวิธีการของ Bowden-Hrunto แต่ต่างกันตรงที่มีการอธิบายถึงส่วนที่มีการผ่อนความดันที่ได้แทนการปล่อยกระสุนอย่างอิสระก่อนที่จะมีการปะทะ โดยการกระทบอย่างแรงนั้นอาศัยการใช้ชุดปล่อยลูกกระสุนปืน (ปืนที่จ้ำด้วยดินปืน) ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางของกระสุนที่ 8.025 mm การยิงกระสุนสามารถทำได้โดยใช้เครื่องมือที่หลากหลายและมีรูปร่างเป็นทรงกระบอก มีความยาว 10 mm โดยใช้โฟลต์คาร์บอนและโพลีทีลินที่มีความหนาแน่นสูงเป็นวัสดุหลักๆ หัวฉีดที่นำมาศึกษาทำมาจากเหล็กอ่อน การยิงนั้นมีการเผาไหม้ในลักษณะแนวตั้งลงโดยผ่านท่อระบายความดัน ที่ได้มีการออกแบบมาให้มีคลื่นที่ลดลงซึ่งตรงข้ามของการยิงกระสุน หัวฉีดมีการเชื่อมต่อกับทางออกของท่อระบายความดันโดยตรง ซึ่งอยู่ที่ผนังด้านบนของห้องทดสอบ การกระทบอย่างแน่นหนาแน่นจัดว่าเป็นสิ่งที่จำเป็น การยิงผิดพลาดเล็กน้อยๆ (การยิงกระสุนในทางครึ่งลูกกระสุนจะเคลื่อนที่ไปชนที่ขอบทางเข้าของหัวฉีด) จะมีน้อยลงในการเคลื่อนไหวยาวในช่วงแรกของการยิง ดังนั้นการเชื่อมต่อระหว่างช่องระบายความดันกับทางเข้าของหัวฉีดมันจะเป็นสิ่งที่ต้องใช้ความระมัดระวังอย่างยิ่งในการออกแบบเพื่อลดปัญหาอื่นๆ ตามมา ของเหลวที่เก็บไว้ภายในหัวฉีดนั้นทำได้จากการใช้กระบังลมพลาสติก (เทปขาวบางๆ) ที่ได้ปัดผืนไว้ตรงด้านบนสุดและด้านท้ายสุดของหัวฉีด กระบังลมพลาสติกนี้บางมากและมีความทนทานต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับกระบังลมแบบกระแทกจากการยิง ด้วยเหตุนี้ จึงเป็นเหตุผลที่ได้มองข้ามความสูญเสียของการเคลื่อนไหวยาวจากการยิง เนื่องจากความทนทานของกระบังลมพลาสติก การเคลื่อนไหวยาวอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาสั้นๆ ทำให้ลูกกระสุนเคลื่อนที่ไปชนของเหลวที่อยู่ภายในหัวฉีดอย่างแรง ทำให้ลูกกระสุนเกิดการถ่ายเทโมเมนตัมให้กับของเหลว ทำให้เกิดความดันสูงขึ้นจากนั้นความดันสูง (ระดับ GPa) ทำให้เกิดการขับเคลื่อนของเหลวให้ทะลุผ่านรูของหัวฉีดในการฉีดด้วยความเร็วสูง ในระหว่างกระบวนการทำให้เกิดการฉีกนั้นอาจจะทำให้เกิดคลื่นสะท้อนย้อนกลับภายในช่องของหัวฉีด อย่างไรก็ตามเป็นที่สังเกตได้ว่าเหตุการณ์ดังกล่าวนั้นเกิดขึ้นได้ขึ้นอยู่กับอัตราความเร็วของการกระแทกจากการยิงและความยาวของของเหลว ในตอนท้ายสุดการยิงก็จะหยุดหักตรงช่องของหัวฉีด

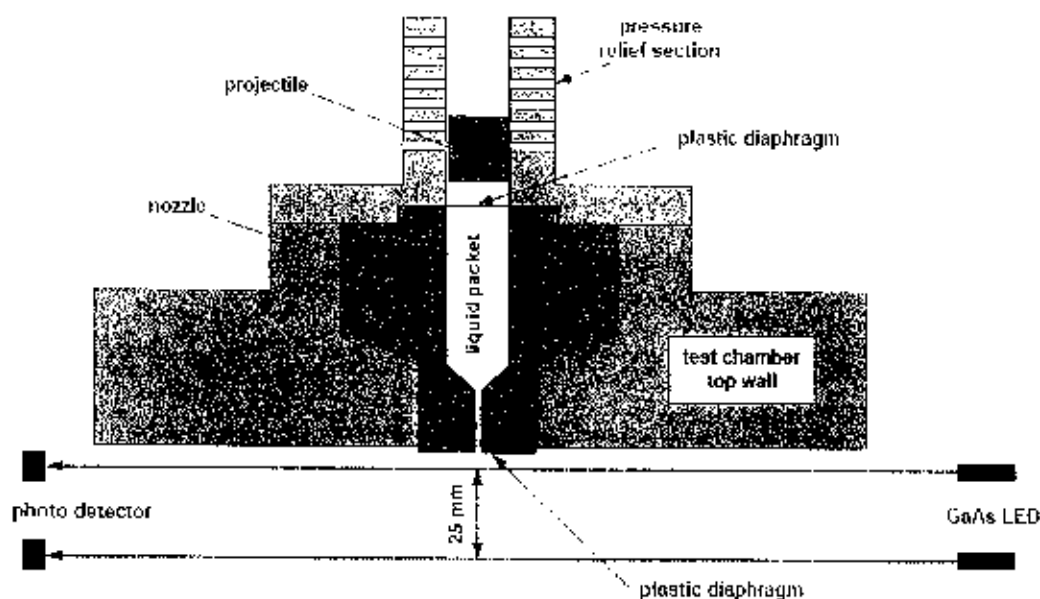


รูปที่ 2.25 projectile impacts driven method

โดยการวินิจฉัยในทางทฤษฎีของอัตราความเร็วของการฉีดของเหลวนั้นได้ถูกทำให้สมบูรณ์แล้ว ทำให้ได้รู้ถึงแนวคิดที่ว่าอัตราความเร็วในการฉีดของเหลวนั้นควรบรรจุจากอะไรในการติดตั้งการทดสอบ

2.7 การวัดความเร็วของการลำพุ่ง

จากการอธิบายเกี่ยวกับการฉีดของเหลวระดับ Supersonic นั้นสามารถทำให้สำเร็จได้โดยวิธีการขับเคลื่อนแบบกระสุนยิง ซึ่งการติดตั้งในการทดลองดังกล่าวได้แสดงให้เห็นในรูปที่ 2.26 อีกครั้งหนึ่ง โดยหัวฉีดรูปทรงกรวยทางด้านหน้านั้นเชื่อมต่อกับช่องระบายความดันโดยตรงของเหลวได้ถูกเก็บไว้ในหัวฉีดโดยการใช้กระโถนพลาสติกที่ปิดตรงหัวและท้ายของหัวฉีด ซึ่งกระบังลมนี้บางมากและมีความทนทานต่ำหากเทียบกับการเคลื่อนไหวของการกระแทกด้วยการยิง ดังนั้นจึงไม่มีผลต่อความสูญเสียการเคลื่อนไหวของการยิง การทดลองนี้ได้ใช้ช่องระบายความดันซึ่งมีความยาว 15 cm จาก 40% ของช่องระบาย

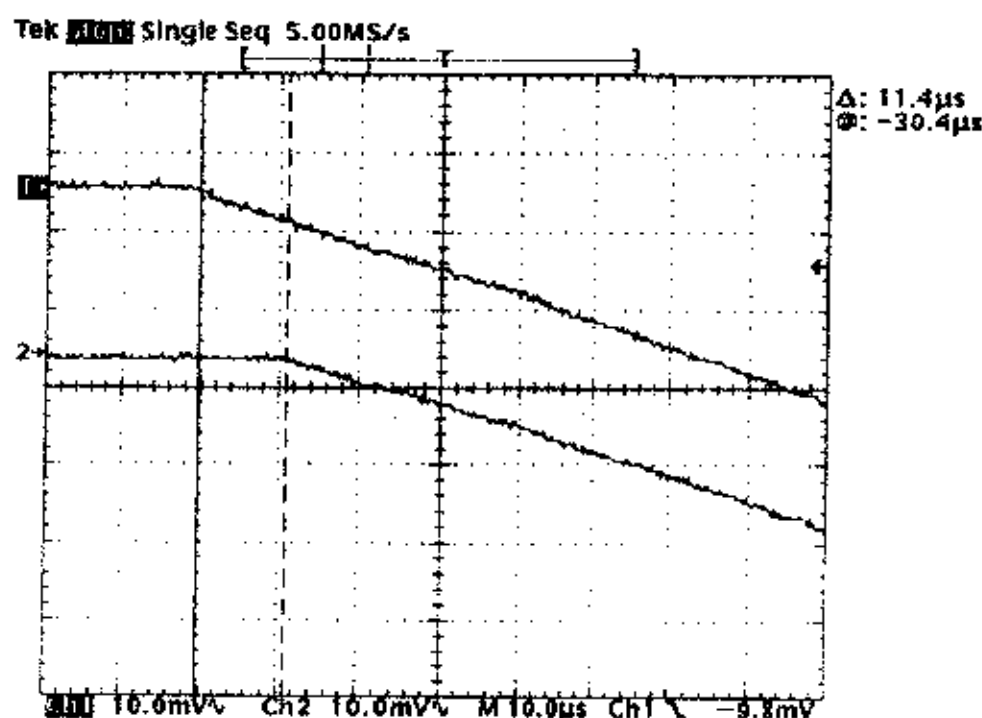


รูปที่ 2.26 การติดตั้งชุดทดลองสำหรับการวัดความเร็วของลำพุ่ง

อัตราการเร็วของการฉีดของเหลววัดได้โดยวิธีการตัดลำแสงเลเซอร์ของวัตถุ ซึ่งการทดลองนี้ได้ใช้ระยะการติดตั้งระหว่างลำแสงเลเซอร์แรกและลำแสงเลเซอร์ที่สองที่ได้มีการลดลงถึง 25 mm ซึ่งระยะทางที่นอกออกไปจากลำแสงแรกถึงช่องของหัวฉีดเป็น 3 mm ดังนั้นอัตราการเร็วของการฉีดของเหลว (V_j) สามารถวัดได้ดังนี้

$$V_j = \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{0.025}{\Delta t} \quad (2.40)$$

กำหนดให้ ΔS คือระยะการติดตั้งของลำแสงเลเซอร์ทั้งสอง 25 mm หรือ 0.025 m และ Δt คือเวลาของการยิงของเหลวในระยะ ΔS ตัวอย่างเช่น ผลลัพธ์ของตัวอย่างจากภาพแสดงคลื่นกระแสไฟฟ้า สำหรับการวัดอัตราการเร็วของการฉีดเชื้อเพลิงดีเซลได้แสดงดังรูปที่ 2.27 โดยที่ $\Delta t = 11.4 \mu s$ ดังนั้นอัตราการเร็วของการฉีดของเหลวเป็น 2,193 m/s



รูปที่ 2.27 แสดงสัญญาณของ Oscilloscope จากการวัดความเร็วของการฉีดเชื้อเพลิงดีเซล

2.8 ผลกระทบของรูปทรงของหัวฉีดที่มีต่อความเร็วของการฉีด

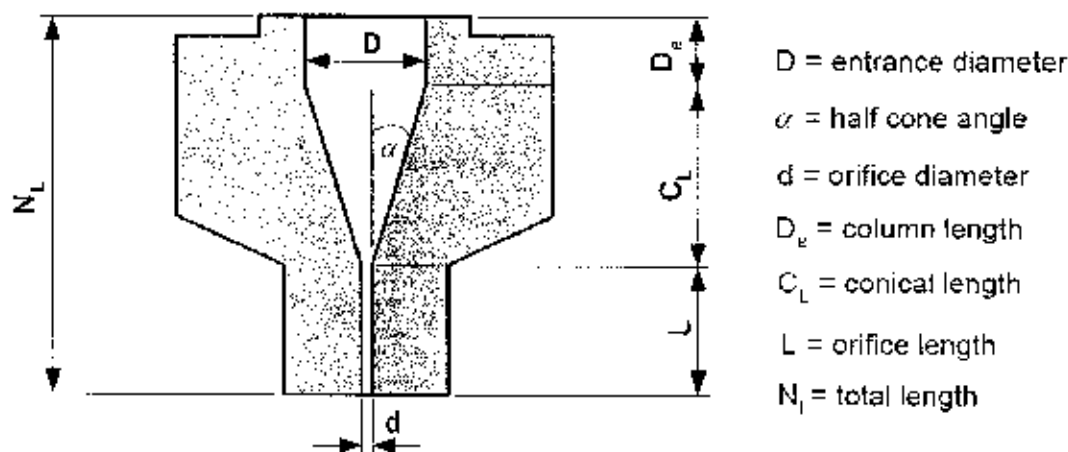
ในส่วนนี้ได้มีการอธิบายถึงความพยายามในการที่ทำให้เกิดอัตราความเร็วของการฉีดของเหลวสูงสุดในการจัดเตรียมการทดสอบ ของเหลวที่ใช้ในการทดสอบเป็นน้ำและเชื้อเพลิงดีเซล รูปทรงของหัวฉีดเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอัตราความเร็วในการฉีด ในสภาพที่มีความดันเฉพาะ ดังนั้น ผลกระทบจากรูปทรงของหัวฉีดที่มีผลต่ออัตราความเร็วในการฉีดของเหลวได้ถูกนำมาทดสอบขึ้น นอกจากนั้นก็หาค่าผลของการเคลื่อนไหวแรงปะทะในตอนต้นคือปริมาณของการยิงและอัตราความเร็ว ได้มีการทดสอบขึ้นในการวัดอัตราความเร็วของการฉีดของเหลว

2.8.1 การออกแบบหัวฉีด

ในการศึกษาถึงผลกระทบของรูปทรงหัวฉีดที่มีต่ออัตราความเร็วของการฉีด ของเหลวนี้ มีการออกแบบ 2 ลักษณะด้วยกันคือ แบบแรกเป็นหัวฉีดทรงกรวยตรง และแบบที่สองเป็นหัวฉีดที่มีรูปร่างเป็นสามเหลี่ยม หัวฉีดทั้งสองแบบนี้ทำมาจากเหล็กอ่อน โดยแบบจำลองที่เสริมมาจึงเป็นหัวฉีดทรงกรวยตรงที่มีความแข็งแรงได้ผลิตขึ้นเพื่อทดสอบว่าลักษณะเฉพาะของวัสดุพื้นผิวหัวฉีด (หรือผนังช่อง) ส่งผลกระทบต่ออัตราความเร็วของการฉีดของเหลวหรือไม่

2.8.2 หัวฉีดเหล็กอ่อนทรงกรวยตรง

รูปที่ 2.28 ได้แสดงถึงรูปที่ของหัวฉีดทรงกรวยตรง โดยมีการบอกองค์ประกอบที่สำคัญที่ส่งผลต่ออัตราความเร็วในการฉีดของเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง หัวฉีดที่ทำมาจากเหล็กอ่อนนั้น ซึ่งทางเทคนิคทางกลที่มีการปล่อยอิเล็กตรอน (EDM) ได้เคยถูกเจาะในการเกิดเป็นทรงกรวย



รูปที่ 2.28 โครงสร้างและการวัดขนาดของหัวฉีดเหล็กอ่อนทรงกรวยตรง

เส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้าของหัวฉีด (D) ในการศึกษาหัวฉีด เส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้าของหัวฉีดได้ถูกปรับให้ไว้ใน 8.1 มม เนื่องจากต้องทำให้เข้ากับขนาดของกระสุนซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.03 มม เส้นผ่านศูนย์กลางได้ถูกออกแบบอย่างชำนาญ นี่เชื่อว่าขนาดนั้นเป็นสิ่งที่ต้องระมัดระวังมากที่สุด ถ้า D มีขนาดใหญ่กว่านี้ หลังจากการกระแทกของการยิงอาจทำให้ของเหลวกระเด็นขึ้นได้ ความดันของของเหลวในหัวฉีดจะลดลงและอัตราความเร็วในการฉีดก็จะลดน้อยลงไปด้วย อย่างไรก็ตามถ้ามีขนาดเล็กเกินไป (ประมาณ 8.03 มม) ทำให้ขนาดทางเข้าของหัวฉีดนั้นมีขนาดเล็กกว่าขนาดของลูกกระสุน ซึ่งส่งผลให้กระสุนติดกับขอบทางเข้าของหัวฉีดและทำให้สูญเสียการเคลื่อนที่ได้ อีกทั้งยังทำให้เกิดอัตราความเร็วของการฉีดที่ไม่แน่นอนได้

มุมทรงกรวยครึ่งหนึ่งของหัวฉีด (α) จัดว่าเป็นองค์ประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งของการส่งผลต่อการเกิดอัตราความเร็วของการฉีดของเหลว ผนังที่มีการเรียวลงหรือเป็นลักษณะบรรจบกันนั้นจะมีลักษณะเหมือนหลอดทดลองและการเร่งความเร็วของของเหลวนั้นมีลักษณะเหมือนการดันของเหลวให้ออกทางออกของหัวฉีด โดยการศึกษาหัวฉีด มุมทรงกรวยครึ่งหนึ่งได้เปลี่ยนแปลงลงจาก 7° ถึง 30° อีกทั้งส่วนที่เบานี้เข้าหากันนั้นทำงานในลักษณะที่เป็นเครื่องกันชนเพื่อชะงักการยิงหลังจากเราปล่อยของเหลวออกมาทั้งหมด

เส้นผ่านศูนย์กลางของปากหัวฉีด (d) จัดว่าเป็นปัจจัยที่ไม่แน่นอนมากที่สุดของการฉีดของเหลว ด้วยความเร็วสูง สำหรับการไหลของการฉีดที่ไม่คงที่นั้น ดังสมการความต่อเนื่อง อัตราความเร็วของการฉีดของเหลวจะสูงขึ้นเมื่อปากของหัวฉีดเล็กลง ในการศึกษครั้งนี้ เส้นผ่านศูนย์กลางของปากหัวฉีดสามขนาดได้ถูกนำมาทดลองขึ้น คือ ขนาด 0.5 mm, 0.7 mm และ 1.0 mm

ความยาวของปากหัวฉีด (L) ในด้านนี้เป็นความยาวตรงของส่วนของปากหัวฉีดหลังส่วนที่มีการเรียวเล็กน้อย องค์ประกอบของมันคือ การเร่งให้ของเหลวกลายเป็นไอด้วยความเร็วที่เสมอกันมากขึ้น ดังนั้นการฉีดของเหลวที่ออกจากปากของหัวฉีดนั้นมีลักษณะเป็นแนวตรงที่เสมอกันมากขึ้น ความยาวของปากหัวฉีดนั้นได้มีการอธิบายในบทสรุปของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดคือ L/d ซึ่ง L/d นั้นส่งผลกระทบต่อมุมของการฉีดเมื่อของเหลวนั้นออกจากหัวฉีด ดังนั้นจึงส่งผลต่ออัตราความเร็วของการฉีดของเหลว จากการทดลองดังกล่าว ค่า L/d นั้นแปรเป็น 2 ถึง 6 ค่า เปลี่ยนแปลงอื่นๆ เช่น N_L , C_L , D_L นั้นไม่ได้ถูกนำมากล่าวถึง ค่าเหล่านี้อาจจะแปรเปลี่ยนไปในแต่ละการทดลอง (α , d , L/d) แต่ต้องรักษาให้คงที่เพื่อแสดงว่าแนวของของเหลวนั้นจะได้เปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อย จากการทดลองนั้นพบว่า D_L ต้องไม่เท่ากับศูนย์ มิฉะนั้นการฉีดแบบวิธีกระสุนจะไม่สามารถขับเคลื่อนไปได้อย่างต่อเนื่องหลังจากการปะทะ ในการทดลองนี้แนวของของเหลวจะมีค่าราวๆ $0.85 - 0.90 \text{ cm}^3$

2.8.3 หัวฉีดที่มีลักษณะโค้ง

หัวฉีดที่มีรูปร่างโค้งนั้นได้เป็นสิ่งที่ถูกคิดถึงมากที่สุดในการศึกษาเกี่ยวกับเทคโนโลยีการตัดของการฉีด ซึ่งจัดว่าเป็นการฉีดของเหลวในอัตราความเร็วสูงและยังทำให้เกิดความดันที่คงที่สูงสุดภายในหัวฉีด หัวฉีดทั้งสองลักษณะได้มีการออกแบบขึ้น ลักษณะหนึ่งได้มีการอธิบายโดยวอยเซอร์ไพเฟสก็และได้มีการพัฒนาขึ้นโดยคูเลอร์ หัวฉีดอีกลักษณะหนึ่งเป็นหัวฉีดที่เป็นรูปทรงกรวยที่มีส่วนตัด ซึ่งประดิษฐ์โดยเกล็นน์และทีมงาน โดยมีการอธิบายสมการของโครงสร้างภายในของหัวฉีดทั้งสองแบบดังนี้

หัวฉีดแบบ Exponential

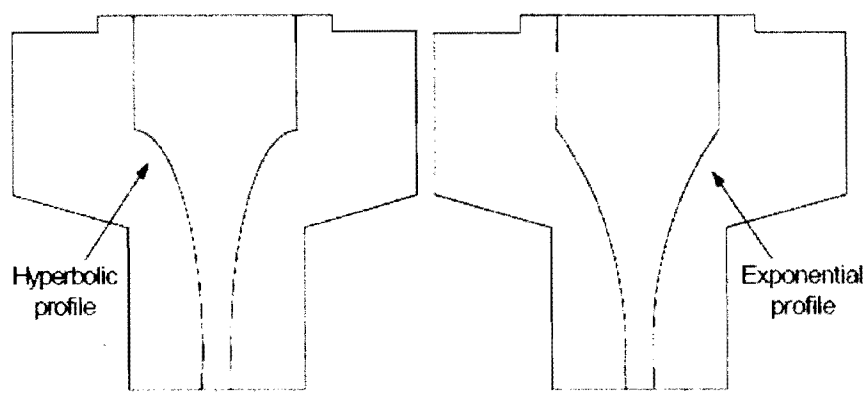
$$A(x) = A(0) \exp \left| -\frac{x}{L} \ln R \right| \quad (2.41)$$

หัวฉีดแบบ Hyperbolic

$$A(x) = A(o) \left| \frac{x}{L} (\sqrt{R} - 1) + 1 \right|^{-2}$$

(2.42)

กำหนดให้ x คือระยะความยาวของหัวฉีด, L คือความยาวทั้งหมดของหัวฉีด $A(x)$ คือพื้นที่ของส่วนที่แบ่งตามเส้นทแยงมุมในส่วนของ x , $A(o)$ คือพื้นที่ของส่วนที่แบ่งตามเส้นทแยงมุมของทางเข้า ($x=0$) และ R คืออัตราส่วนของพื้นที่ของหัวฉีดที่เท่ากับ $(A(0)/A(L))$



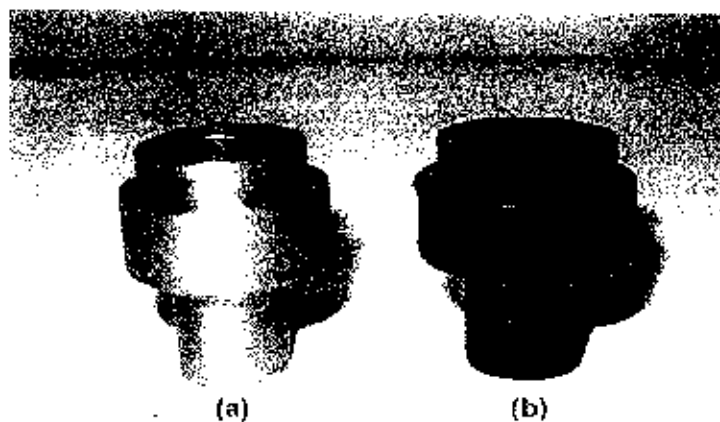
รูปที่ 2.29 หัวฉีดแบบ exponential และ hyperbolic

จากสมการทั้งสองแบบ ได้มีการผลิตขึ้นของหัวฉีดทั้งสองแบบ โดยวิธี EDM ที่เคยถูกใช้แล้ว ในการกัดเซาะด้านในของหัวฉีด หัวฉีดที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางของปากเท่ากับ 1.0 mm เท่านั้นที่สามารถทำได้ เนื่องจากความยากในการจัดเตรียมของท่อนทองแดง (สำหรับ EDM) เพื่อให้หัวฉีดมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กลง รูปที่ 2.29 แสดงให้เห็นถึงรูปร่างของหัวฉีด หัวฉีดทั้งสองอย่างนี้ยังมีความยาว D_c ที่ทางเข้าของหัวฉีดก่อนที่จะเริ่มมีลักษณะโค้ง หัวฉีดแบบ hyperbolic มีเส้นเนินลาดที่สูงกว่าจากตอนต้นของส่วนที่แคบและยาวตลอดทางออกของหัวฉีด ในขณะที่หัวฉีดแบบ exponential นั้นมีเส้นที่เรียวเล็กลง

2.8.4 หัวฉีดแข็งทรงกรวย

หัวฉีดที่แข็งทรงกรวยถูกผลิตขึ้นเพื่อทดสอบว่าความทนทานของพื้นผิวหัวฉีดนั้นส่งผลต่ออัตราความเร็วของการฉีดของเหลว รูปทรงภายในของหัวฉีดนั้นคล้ายกับการออกแบบของหัวฉีดทรงกรวยเหล็กอ่อน (ในส่วน ของ 2.9.3.1.1) หัวฉีดที่แข็งนั้นทำมาจากเหล็ก Bohler K110 (เหมือนกับ วัสดุ AISI D2) Bokler K110 คือเหล็กคาร์บอนสูง (มีคาร์บอนอยู่ 55%) กับโครเมียม

12% และแนวยาเคมี 1% หัวฉีดถูกทำให้แข็งเกร็งโดยน้ำมันที่ให้ความร้อนที่อุณหภูมิถึง $1,000^{\circ}\text{C}$ ในเวลา 40 นาที ซึ่งกระบวนการทำให้แข็งนั้นไม่ได้ดำเนินขึ้นเนื่องจากกระบวนการนี้ลดความแข็งแรงของพื้นผิวของหัวฉีด ความแข็งแรงของพื้นผิวนั้นลดลงจาก 25 HRC ถึง 50 HRC หลังจากกระบวนการทำให้แข็ง ที่ได้เปรียบเทียบกับ 15-20 HRC ของหัวฉีดเหล็กอ่อน รูปที่ 2.30 แสดงให้เห็นถึงรูปร่างนอกของหัวฉีดทรงกรวยทั้งเหล็กอ่อนและเหล็กแข็งที่มีคาร์บอนสูง



รูปที่ 2.30 หัวฉีดทรงกรวยตรง (a) คือเหล็กอ่อน (b) คือ เหล็กแข็งคาร์บอนสูง

2.8.5 ผลลัพธ์ของอัตราความเร็วของการฉีด

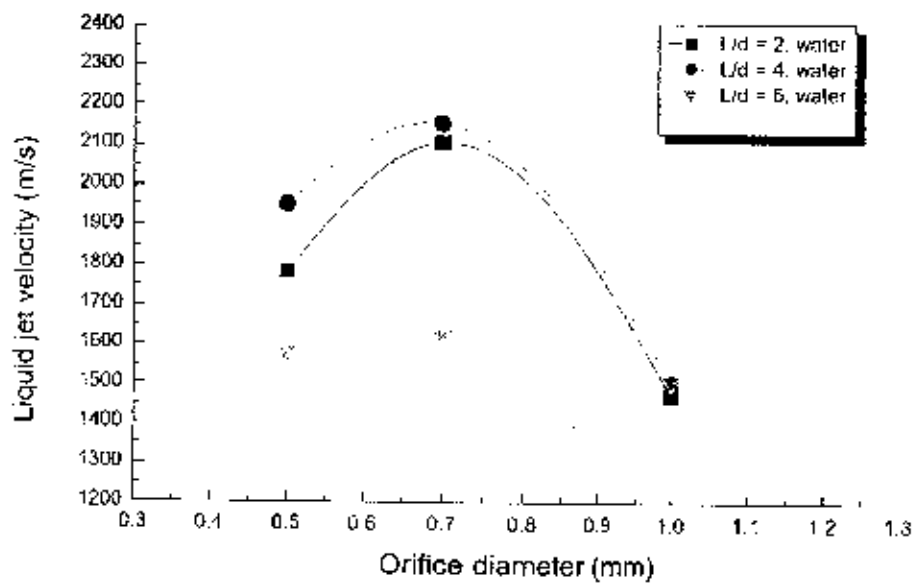
ผลลัพธ์จากการทดลองสิ่งที่ส่งผลกระทบต่อของรูปทรงหัวฉีดที่มีต่ออัตราความเร็วในการฉีดของเหลว ซึ่ง ได้รวมถึงอัตราความเร็วในการฉีดจากหัวฉีดเหล็กอ่อนทรงกรวย หัวฉีดรูปทรงโค้ง และหัวฉีดแข็งทรงกรวยตรง ในการทดลองทั้งหมดนี้ มีการสันนิษฐานว่ารูปแบบการกระแทกนั้นเหมือนกัน นั่นคืออัตราความเร็วของการกระแทก 1,100 m/s ของกระสุนโพลีคาร์บอเนต (PC) โดยมีพลังขับเคลื่อนถึง 0.83 g

2.8.6 หัวฉีดเหล็กอ่อนทรงกรวยตรง

สำหรับหัวฉีดทรงกรวยตรงนั้น ขอบเขตในการกำหนดที่จะศึกษาได้ถูกพิจารณาในการทดลองคือเส้นผ่านศูนย์กลางปากหัวฉีด (d), มุมทำรูปทรงกรวย (α) และอัตราส่วนของความยาวตรงของปากกับเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/d) โดยใช้ทั้งน้ำมันและเชื้อเพลิงดีเซลในการทดลองดังกล่าว

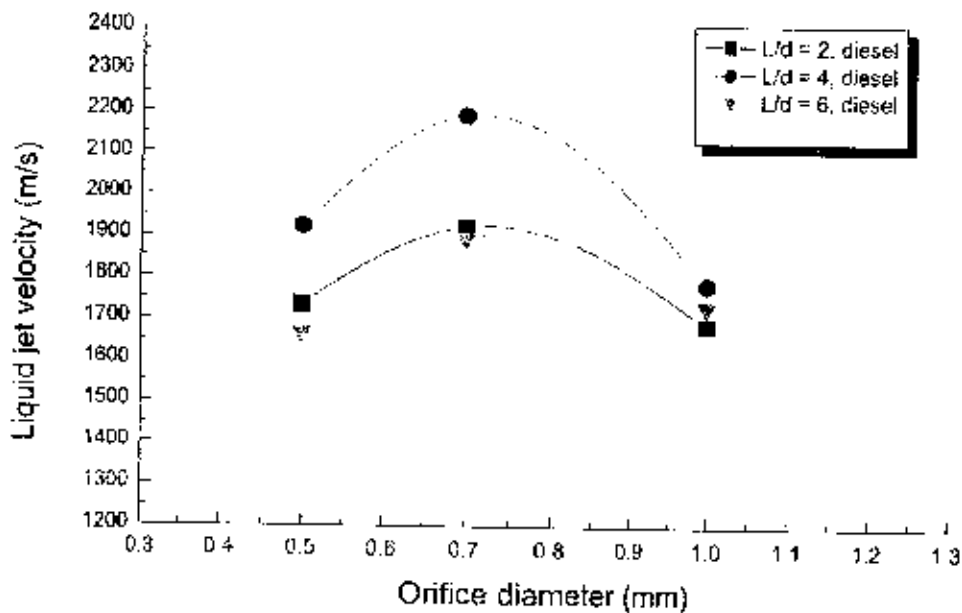
รูปที่ 2.31 เป็นการแสดงถึงอัตราความเร็วของการฉีดน้ำจากเส้นผ่านศูนย์กลางทั้งสามแบบ คือ 0.5, 0.7 และ 1.0 mm ในขณะที่รูปที่ 2.32 แสดงถึงการเปรียบเทียบของการฉีดด้วยเชื้อเพลิง

ได้สังเกตเห็นผ่านศูนย์กลางแต่ละปากของหัวฉีดนั้นมียาค่าอัตราส่วน L/d ที่ได้กำหนดไว้ จุดที่น่าสนใจจุดหนึ่งคือปากหัวฉีดที่มีขนาด 0.7 mm ที่ทำให้เกิดการฉีดที่มีความเร็วมากกว่าหัวฉีดที่มีขนาด 0.5 mm ในอัตราส่วน L/d ของของเหลวทั้งสองอย่าง อย่างไรก็ตามหัวฉีดที่มีขนาด 0.5 mm นั้นยังทำให้การฉีดนั้นเร็วกว่าหากเทียบกับหัวฉีดที่มีขนาด 1.0 mm สังเกตได้ว่าอัตราความเร็วของการฉีดของของเหลวแต่ละอย่างนั้นได้กำหนดค่าโดยเฉลี่ยจากการทดลองทั้งสามครั้ง

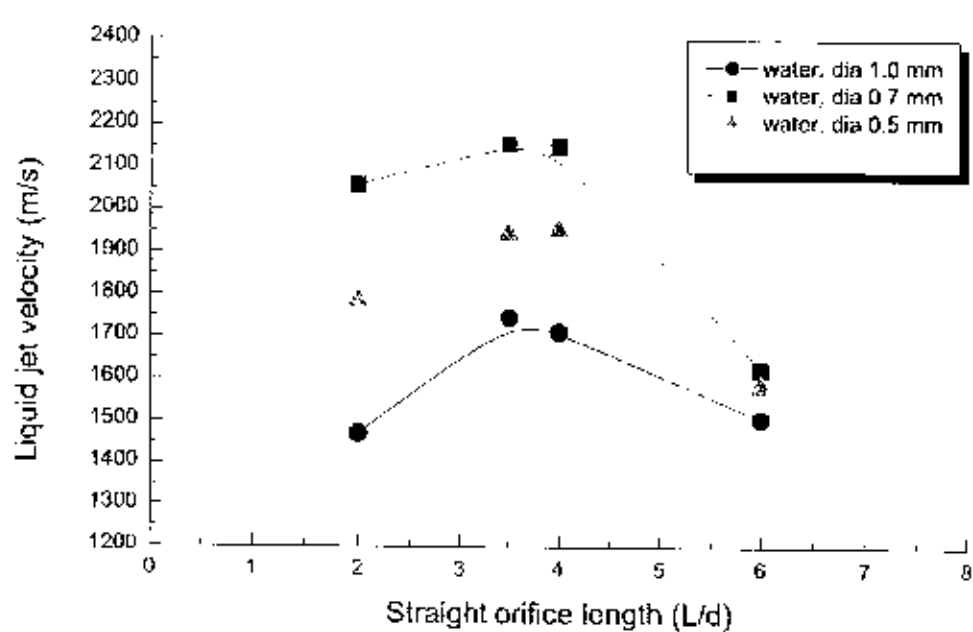


รูปที่ 2.31 ผลของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดที่มีต่อความเร็วของการฉีดถ้าพ่นน้ำจากหัวฉีดหลักย้อน

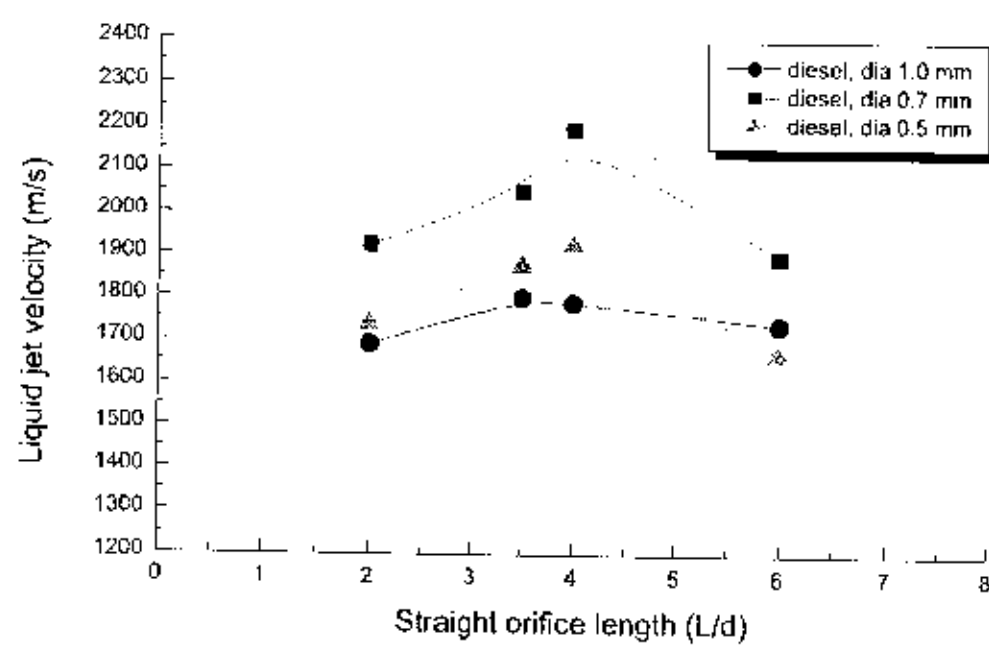
ทรงกรวยตรง



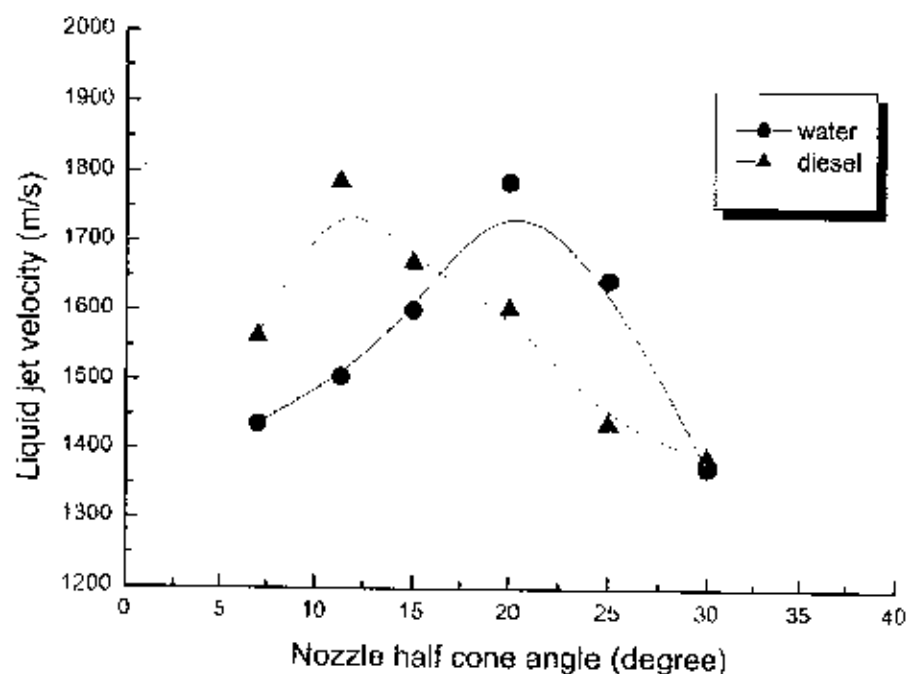
รูปที่ 2.32 ผลของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดที่มีต่อความเร็วการฉีดน้ำมันดีเซลจากหัวฉีดหลักก่อนทรงกรวยตรง



รูปที่ 2.33 ผลของอัตราส่วน L/d ที่มีต่อความเร็วในการฉีดน้ำมันจากหัวฉีดหลักก่อนทรงกรวยตรง



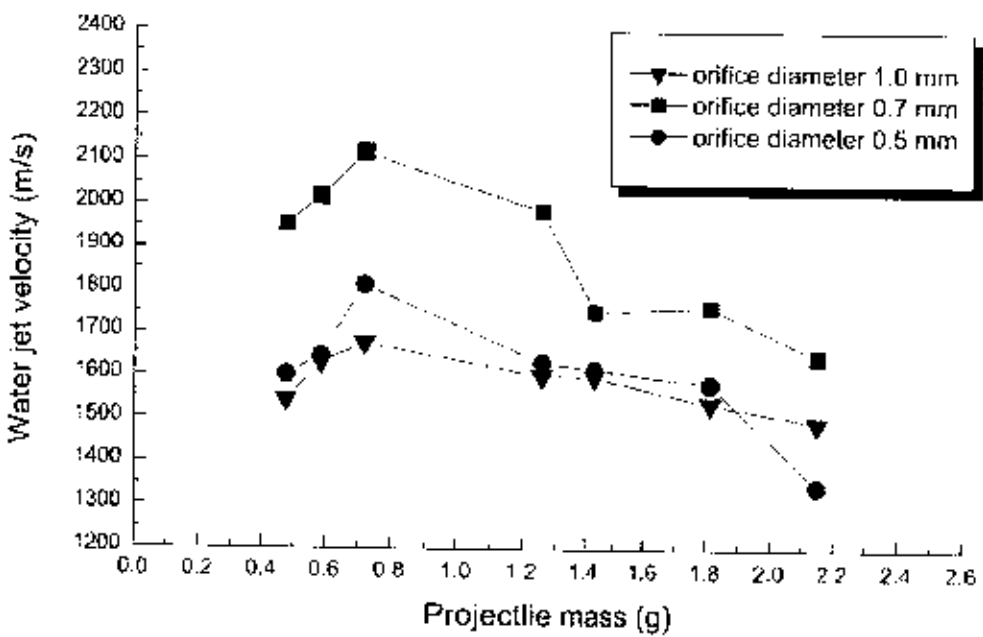
รูปที่ 2.34 ผลกระทบของอัตราส่วน L/d ที่มีต่ออัตราความเร็วในการฉีดด้วยเชื้อเพลิงดีเซลจากหัวฉีดหลักก่อนทรงกรวยตรง



รูปที่ 2.35 ผลกระทบของมุมทรงกรวยของหัวฉีดที่มีต่ออัตราความเร็วในการฉีดน้ำและเชื้อเพลิงดีเซลด้วยหัวฉีดเหล็กกึ่งมนทรงกรวย

ผลกระทบของอัตราส่วน L/d ที่มีต่ออัตราความเร็วในการฉีดน้ำและเชื้อเพลิงดีเซลนั้นได้แสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.33 และ 2.34 ตามลำดับ รูปทั้งสองได้แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วน L/d ที่ดีที่สุดเป็น 3.5 ในการฉีดน้ำที่เร็วที่สุดจากเส้นผ่านศูนย์กลางแต่ละหัวฉีด ในขณะที่ผลที่ดีที่สุดในการฉีดเชื้อเพลิงดีเซลอัตราส่วน L/d อยู่ที่ 4 ซึ่งสิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วน L/d ส่งผลกระทบต่ออัตราความเร็วในการฉีดด้วยเชื้อเพลิงดีเซลน้อยกว่าอัตราความเร็วในการฉีดด้วยน้ำ จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วขึ้นจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วน L/d แต่ละอัน

รูปที่ 2.35 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเร็วในการฉีดของเหลวและมุมทรงกรวยครึ่งหนึ่งของหัวฉีดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของปากหัวฉีดที่ 1.0 mm และมีอัตราส่วน L/d ที่แน่นอนอยู่ที่ 3.5 ผลปรากฏว่าอัตราความเร็วสูงสุดของของเหลวแต่ละชนิดนั้นมีมุมทรงกรวยที่แตกต่างกันไป ซึ่งหัวฉีดที่ทำมุม 12° ทำให้การฉีดเชื้อเพลิงดีเซลมีอัตราความเร็วสูงสุด โดยที่การฉีดน้ำที่มีอัตราความเร็วสูงสุดนั้นมีหัวฉีดทำมุมที่ 20°



รูปที่ 2.36 ผลกระทบของมวลกระสุนที่มีต่ออัตราความเร็วในการฉีดน้ำจากหัวฉีดเหล็กอ่อนทรงกรวยตรง

ผลกระทบของมวลกระสุน (เช่น วัสดุที่ใช้ทำกระสุน) ที่มีต่ออัตราความเร็วในการฉีดของเหลว ซึ่งมีมวล 0.83 g ที่ได้แสดงในรูปที่ 2.36 โดยได้มีการเปรียบเทียบของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดที่แตกต่างกันทั้งสามแบบ มวลของกระสุนแต่ละแบบนั้น การฉีดที่เร็วที่สุดเกิดจากแบบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของปากหัวฉีดอยู่ที่ 0.7 mm จากการทดลองพบว่ากระสุนที่น้ำหนักมากที่สุดไม่จำเป็นที่จะมีการฉีดที่เร็วที่สุด แม้ว่าจะมีโมเมนตัมที่สูงที่สุด อัตราความเร็วในการยิงนั้นจัดว่าเป็นองค์ประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งในการศึกษาครั้งนี้ น้ำหนักของกระสุนที่เหมาะสมที่สุดคือ 0.6-0.7 g ในทุกๆเส้นผ่านศูนย์กลางของปากหัวฉีด

ตารางที่ 2.3 ค่าผันแปรและอัตราความเร็วสูงสุดในการฉีดของเหลว

Liquid	Nozzle Configuration				Jet velocity(m/s)
	d(mm)	Cone angle(°)	L/d	Volume(cm ³)	
water	0.7	35-40	3.0-3.5	0.90	2155
diesel	0.7	20-25	3.5-4.0	0.90	2193

กล่าวโดยสรุปคือ อัตราความเร็วและค่าผันแปรโดยหัวฉีดเหล็กอ่อนทรงกรวยตรงได้สรุปไว้ดังตารางที่ 2.3 อัตราความเร็วของของเหลวทั้งสองชนิดมีอัตราความเร็วของการยิงที่ 1,100 m/s โดยกระสุนเป็นโพลีคาร์บอเนตน้ำหนัก 0.60 g

2.8.7 หัวฉีดที่มีรูปร่างโค้งและหัวฉีดแข็งทรงกรวยตรง

ตารางที่ 2.4 เป็นการวัดอัตราความเร็วของหัวฉีดที่มีรูปร่างโค้งและหัวฉีดแข็งทรงกรวยตรง ผลปรากฏว่าหัวฉีดรูปโค้งนั้นสามารถเพิ่มอัตราความเร็วในการฉีดของเหลวทั้งสองได้เล็กน้อยเมื่อเทียบกับหัวฉีดทรงกรวยเมื่อมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน เช่นเดียวกับหัวฉีดทรงกรวยในทุกการศึกษาที่อัตราความเร็วในการฉีดเชื้อเพลิงมีค่าสูงกว่า (50 m/s) อัตราความเร็วในการฉีดน้ำ

ตารางที่ 2.4 อัตราความเร็วในการฉีดของเหลวโดยหัวฉีดรูปโค้งและหัวฉีดแข็ง

Nozzle	Water Jet Velocity (m/s)	Diesel fuel jet velocity (m/s)
Exponential (d=1.0mm)	1820	1850
Hyperbolic (d=1.0mm)	1880	1850
Hardened (d=1.0mm)	2315	2350
Hardened (d=0.7 mm)	2430	2500



รูปที่ 2.37 ความเสียหายของหัวฉีดแข็งที่ยิงเพียงครั้งเดียว

อัตราความเร็วในการฉีดได้มีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากหัวฉีดแข็ง โดยที่มีอัตราความเร็วสูงกว่าการฉีดของเหลวจากการใช้หัวฉีดเหล็กอ่อนทรงกรวยที่ 350-450 m/s อัตราความเร็วสูงสุดอยู่ที่ 2,500 m/s จากเส้นผ่านศูนย์กลางปากหัวฉีดที่ 0.7 mm ผลดังกล่าวสามารถบอกได้ว่าความแข็งแรงของพื้นผิวของหัวฉีดนั้นสามารถส่งผลกระทบต่ออัตราความเร็วในการฉีดของเหลวได้ อย่างไรก็ตามหลังจากการยิงแต่ละนัดพบว่าหัวฉีดนั้นมีการแตก พื้นที่ระหว่างส่วนที่เป็นกรวยและปากของ

หัวฉีดนั้นมีการแยกและแตกเป็นชั้นเล็กๆ ซึ่งเป็นกรณีให้เห็นว่าการสะสมของความดันในช่องหัวฉีดนั้นต้องมีค่าสูง นอกจากนี้หัวฉีดแข็งยังทนทานและเปราะมาก ดังนั้นจึงแตกหักถึงจากที่มีลาวาดันสูงมาก ดังเช่นที่มีการแสดงรูปที่ 2.37 ของหัวฉีดแข็งที่มีการแตก

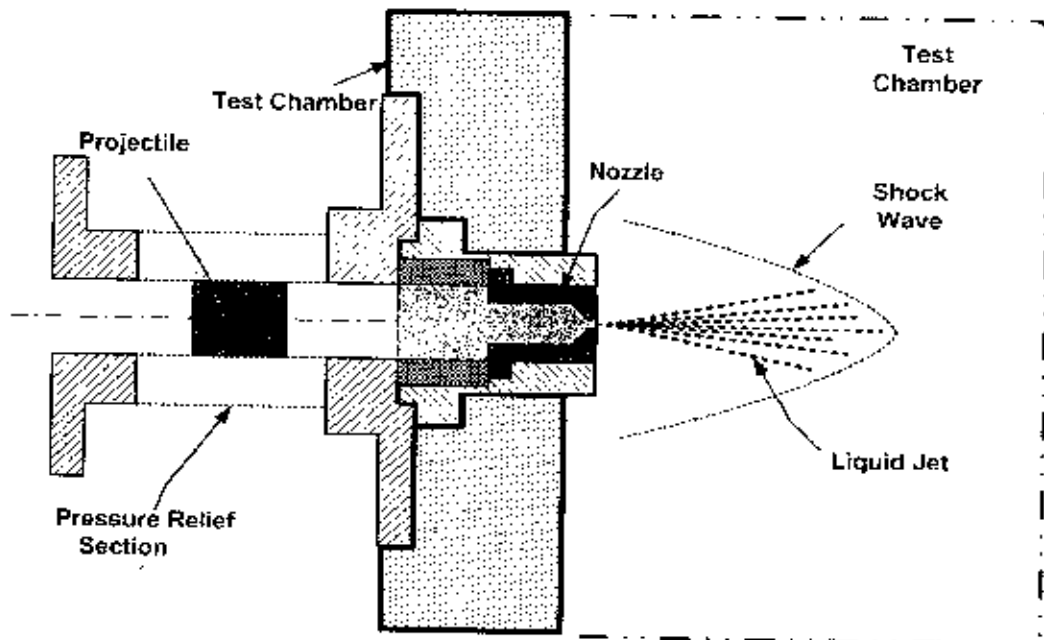
บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

ในการศึกษาคุณลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูงนั้น จำเป็นจะต้องรู้ถึงประสิทธิภาพของชุดทดลองที่จะใช้ในการผลิตลำพุ่งความเร็วสูง ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาเกี่ยวกับชุดทดลองดังต่อไปนี้

3.1 การสร้างลำพุ่งความเร็วสูงด้วยวิธี Projectile impact driven

การวิจัยนี้จะกำเนิดลำพุ่งความเร็วสูงโดยใช้หลักการการถ่ายเทโมเมนตัมจากลูกปืนที่มีความเร็วสูงไปยังของเหลวที่ถูกบรรจุในหัวฉีด ของเหลวที่อยู่ในหัวฉีดจะถูกกระแทกและฉีดออกมาด้วยความเร็วสูง ซึ่งวิธีนี้เรียกว่า projectile impact driven ซึ่งเป็นวิธีการที่คิดค้นโดย Bowden และ Bruntun ดังรูปที่ 3.1



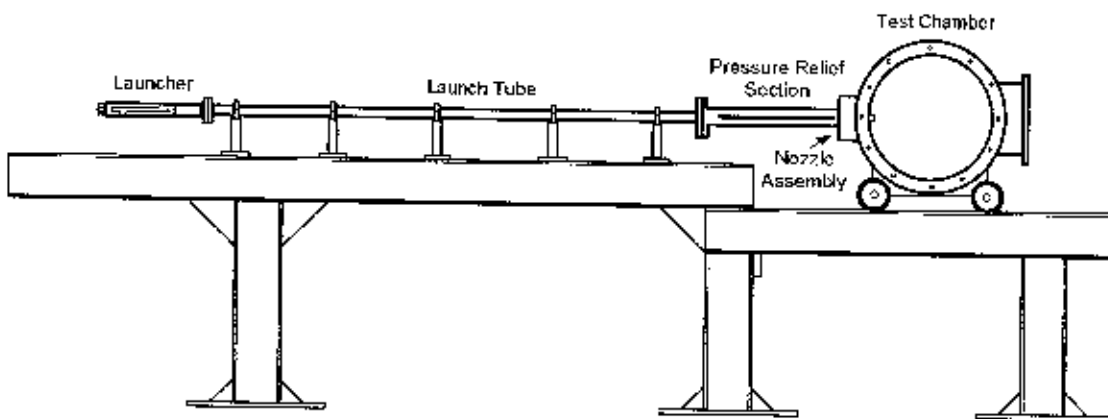
รูปที่ 3.1 การสร้างลำพุ่งความเร็วสูง

ด้วยวิธีการของ Bowden และ Bruntun นี้ ผู้วิจัยได้ออกแบบ สร้าง ทดสอบ และปรับปรุงชุดกำเนิดลำพุ่งความเร็วสูงที่เรียกว่า Horizontal Single Stage Powder Gun (HSSPG) ด้วยวิธีนี้ ลูกปืนจะถูกขับเคลื่อนการระเบิดของดินปืนภายในปลอกลูกปืน (cartridge) ของตัวส่ง (launcher) ด้วย

ความเร็วสูงไปตามท่อส่งลูกปืนหรือลำกล้องปืน (Launch Tube) เข้ากระแทกของเหลวที่ถูกบรรจุในหัวฉีดส่วนปลายของท่อส่งลูกปืน เมื่อของเหลวในหัวฉีดถูกกระแทกด้วยความเร็วสูง โมเมนตัมจากลูกปืนจะส่งถ่ายไปยังของเหลวและฉีดออกมาในห้องทดสอบ (test chamber) ด้วยความเร็วที่สูง

3.2 ชุดกำเนิดลำพุ่งความเร็วสูง (Horizontal Single Stage Powder Gun)

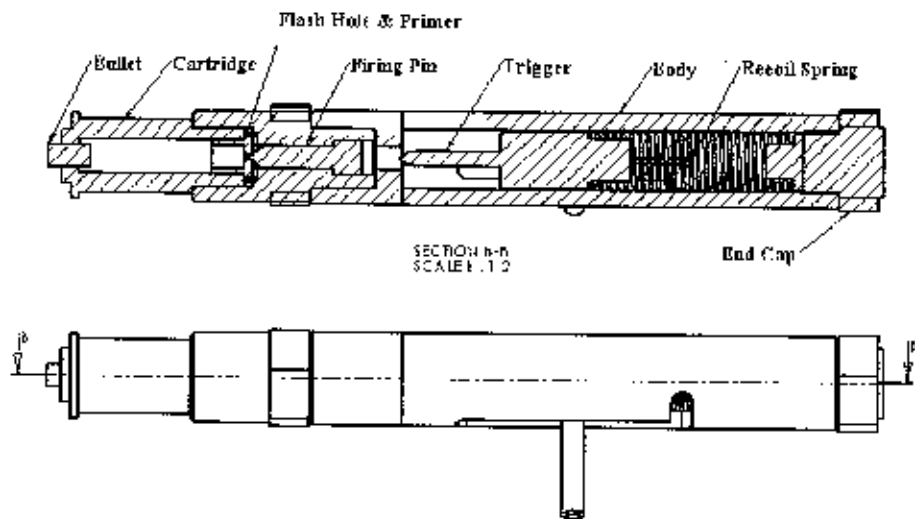
ชุดทดลองที่ใช้ในการทดลองผลิตลำพุ่งความเร็วสูงประกอบด้วย 5 ส่วนที่สำคัญ คือ ตัวส่งลูกปืน (launcher หรือ powder gun) ท่อส่งลูกปืน (launch tube หรือ gun barrel) ท่อปล่อยแรงดัน (pressure relief section) หัวฉีดและส่วนประกอบ (nozzle assembly) และห้องทดสอบ (test chamber) ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 The Horizontal Single Stage Powder Gun (HSSPG)

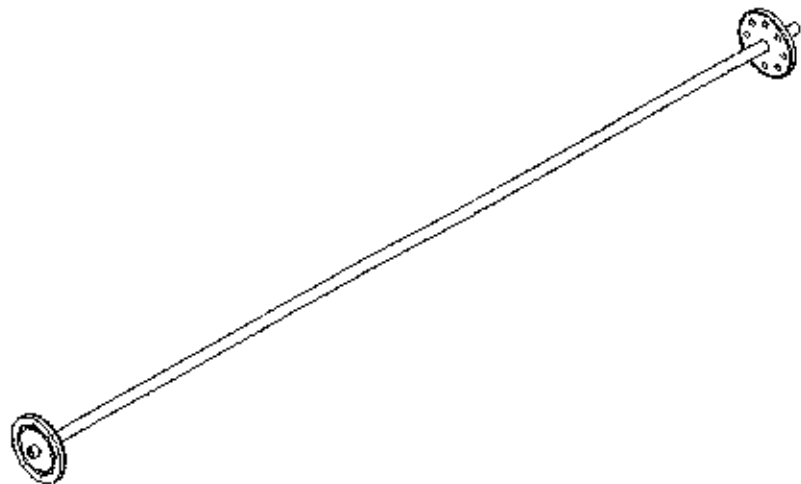
รายละเอียดของชุดทดลองยิงกระสุนความเร็วสูงมีส่วนประกอบดังนี้

ตัวส่งลูกปืน (launcher หรือ powder gun) คือ ชุดส่งลูกปืนที่ใช้แรงขับจากการระเบิดของดินปืนชนิดแข็ง (Solid propellant) ที่จุดกรรณาไหมด้วยเข็มแทงฉนวน กระบอกบรรจุดินปืนสามารถบรรจุดินปืนได้สูงสุด 7 g ดังแสดงในรูปที่ 3.3



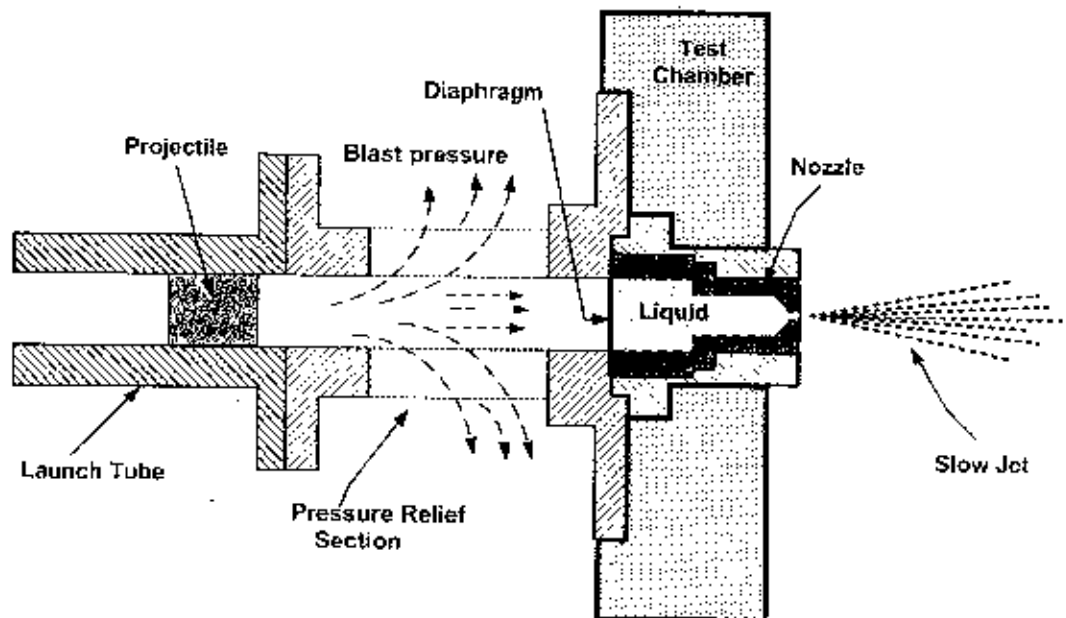
รูปที่ 3.3 Gun powder chamber

ท่อส่งลูกปืน คือ ท่อส่งลูกปืนหรือลำกล้องของปืนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm ยาว 1500 mm ปลายด้านหนึ่งยึดติดกับตัวส่งลูกปืน และปลายอีกด้านยึดติดกับท่อปล่อยแรงดัน (Pressure relief section) ดังรูปที่ 3.4



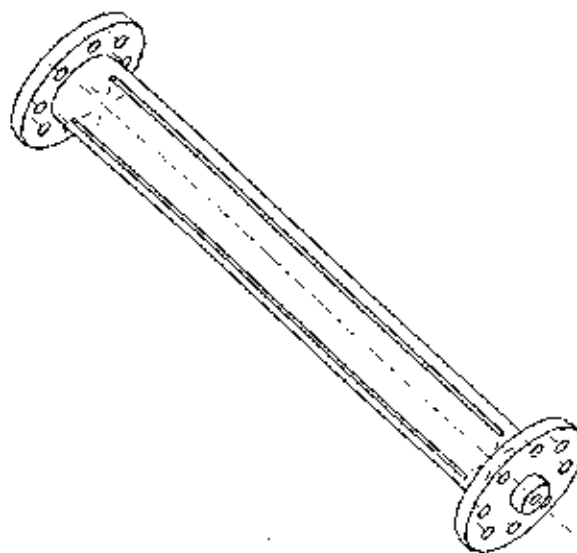
รูปที่ 3.4 Launch Tube

ท่อปล่อยแรงดัน ถูกติดตั้งไว้ส่วนปลายท่อส่งลูกปืน ทำหน้าที่ระบายแรงอัดของอากาศหรือคลื่นลม (blast wave) ที่อยู่ข้างหน้าลูกปืน เพื่อป้องกันไม่ให้อากาศที่อัดตัวมีผลล้าพ่วงก่อนที่ลูกปืนจะกระแทกของเหลวในหัวฉีด เป็นสาเหตุของการเกิดล้าพ่วงช้า ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 Generation of slow jet caused by a precursor blast wave

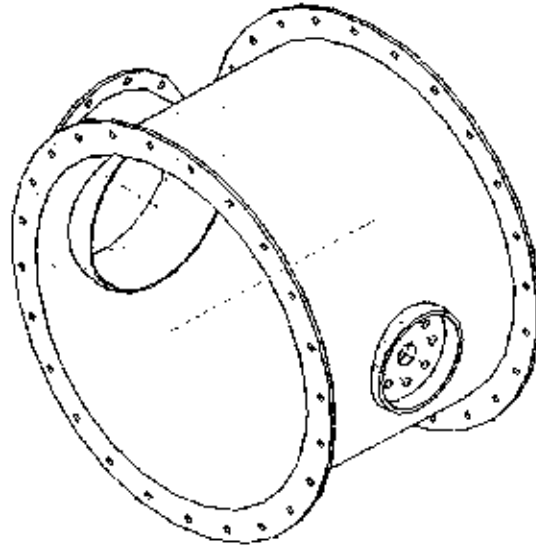
รูปที่ 3.6 แสดง ท่อปล่อยแรงดันซึ่งมีลักษณะเป็นท่อส่งที่จะเจาะช่องระบายอากาศขนาด 4 mm ยาวตลอดท่อส่งทั้งสี่ด้าน



รูปที่ 3.6 Pressure relief section

ส่วนประกอบ (nozzle assembly) คือ ส่วนที่อยู่ระหว่างท่อปล่อยแรงดัน กับห้องทดสอบ ส่วนนี้จะเป็นส่วนที่ประกอบกับหัวฉีด

ห้องทดสอบ เป็นห้องที่ลำพุ่งความเร็วสูงถูกฉีดเข้ามา ถูกสร้างให้เป็นลักษณะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 400 mm กว้าง 300 mm ด้านหนึ่งของส่วนโค้งยึดกับท่อปล่อยแรงดัน ผาด้านข้างทั้งสองปิดด้วยแผ่น Polymethyl methacrylate (PMMA) สีใส ความหนา 20 mm เพื่อใช้สำหรับดูพฤติกรรมและคุณลักษณะของลำพุ่ง ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 Test Chamber

3.3 การปรับเทียบความเร็วลูกปืน (Ballistic calibration)

ลูกปืนที่ถูกขับจากแรงระเบิดของดินปืนในปลอกลูกปืนเพื่อใช้ขับลำพุ่งให้เกิดความเร็วสูงได้ตามที่ตั้งวัตถุประสงค์ไว้จะ เป็นการเปลี่ยนพลังงานที่ได้จากการเผาไหม้ดินปืนเป็นพลังงานจลน์ แต่พลังงานที่ได้จากการเผาไหม้ไม่สามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ได้ทั้งหมด จะสูญเสียพลังงานไปกับความร้อนที่ผนังห้องเผาไหม้ แก๊สที่รั่วระหว่างลูกปืนกับผนังปลอกลูกปืน และแรงเสียดทานระหว่างลูกปืนกับท่อนั่ง เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตาม พลังงานของลูกปืนที่ปลายท่อนั่ง (Muzzle energy) สามารถพอหาได้จาก

$$E = 0.5mv^2$$

(3.1)

เมื่อ E คือ พลังงานจลน์

m เป็นมวลของลูกปืน (g)

v เป็นความเร็วของลูกปืน (m/s)

การเพิ่มหรือลดพลังงานจลน์จะมีผลโดยตรงต่อความเร็วของลูกปืนและลำฟุ้งของเหลว ซึ่งจากสมการ 3.1 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มหรือลดพลังงานจลน์จะทำได้โดยการเปลี่ยนแปลง

- (a) มวลหรือความหนาแน่นของลูกปืน
- (b) ความเร็วของลูกปืน : ชนิดของดินปืน ปริมาณของดินปืน

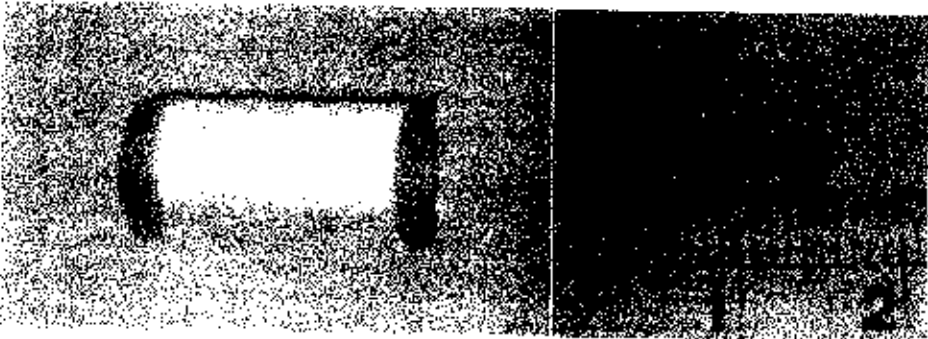
ในการศึกษาครั้งนี้จะใช้มวลของลูกปืนที่ค่าเดียวแต่จะทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณของดินปืนในปลอกลูกปืนเพื่อเปรียบเทียบหาความเร็วของลูกปืนกับลำฟุ้ง โดยจะเพิ่มปริมาณดินปืนที่ทำกรทดสอบจาก 3 g ถึง 7 g ที่มีค่าความร้อนของดินปืนตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 Main propellant combinations

Notation	Main propellant	heating value
SP1	SLP	2,101.10 cal/g
SP2	BP	1,097.45 cal/g

SP : solid propellant, SLP : smokeless powder, BP: black powder

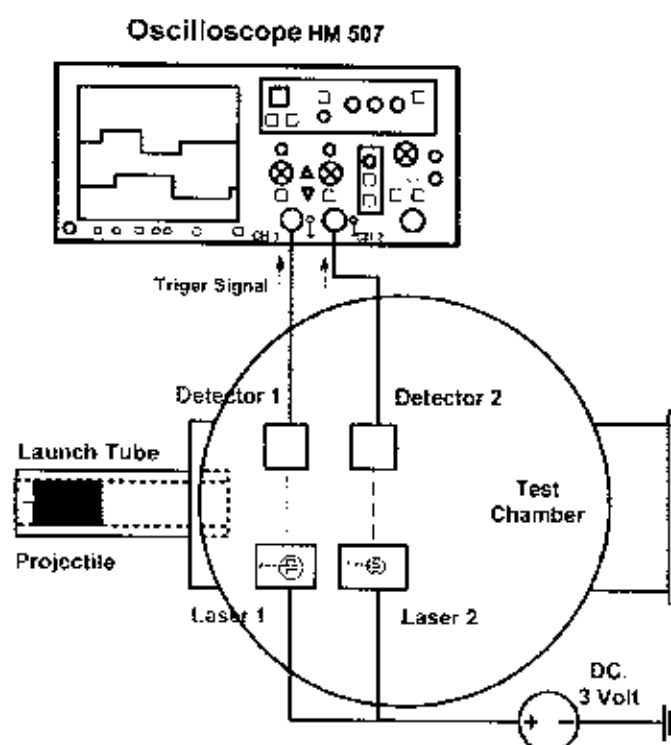
ส่วนของลูกปืนหรือ Projectile ที่ใช้ในการทดสอบทำจาก high density polyethylene (HDPE) และ polymethyl methacrylate (PMMA) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm ยาว 15 mm ที่ความหนาแน่น 0.95 g/cm³ และ 1.1 g/cm³ ตามลำดับ ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 projectiles made from PMMA and HDPE

3.4 การวัดความเร็วของลูกปืนและลำฟุ้ง (Ballistic calibration)

ในการทดลอง ความเร็วของลูกปืนจะถูกวัดโดยวิธีการที่เรียกว่าหลักการตัดแสงเลเซอร์ (Laser beam interruption) ซึ่งวิธีการวัดและเครื่องมือจะแสดงดังรูปที่ 3.9

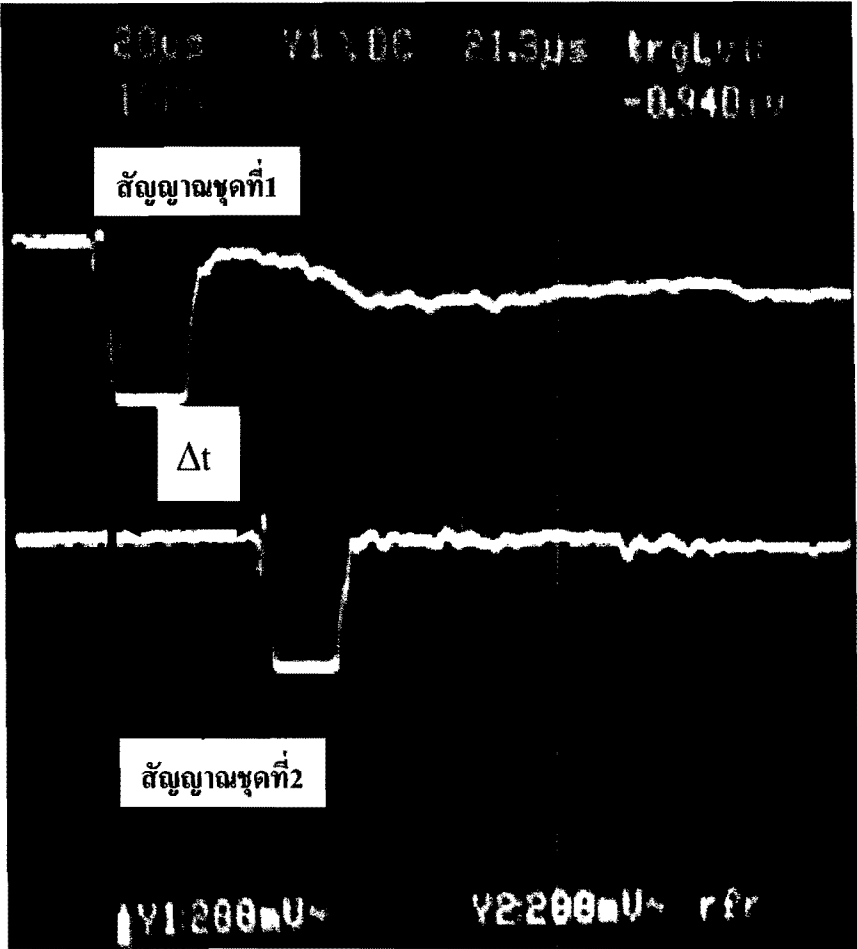


รูปที่ 3.9 วิธี Laser beam interruption

ตามรูปที่ 3.9 หลักการตัดแสงเลเซอร์ จะประกอบด้วย

- Digital Oscilloscope แบบ 2 channel
- Laser diode ขนาด กำลัง 3.2 mW ความยาวคลื่นแสง 650 nm
- ตัวจับสัญญาณแสง (Photo detector)

โดยที่ Oscilloscope และ Sensor สามารถวัดความเร็วได้โดยการส่งสัญญาณจากตัวจับสัญญาณแสง (photo detector) เข้ากับออสซิลโลสโคปสองช่องสัญญาณ (dual trace oscilloscope) ใช้กับ ตัวจับสัญญาณแสง 1 กับ 2 โดยในการทดลองครั้งนี้ได้จับวางระยะห่างของเซ็นเซอร์ ชุด 1 กับชุดที่ 2 ไว้ที่ระยะ 33 mm เมื่อลูกปืนตัดแสงเลเซอร์ทั้งสอง ความถี่แสงที่จับสัญญาณทดลอง Oscilloscope จะจับสัญญาณไฟฟ้าที่ลดลงได้ และได้เวลาที่ลูกปืนวิ่งตัดชุดเซ็นเซอร์ (sensor) ทั้ง 2 ดังรูปที่ 3.10



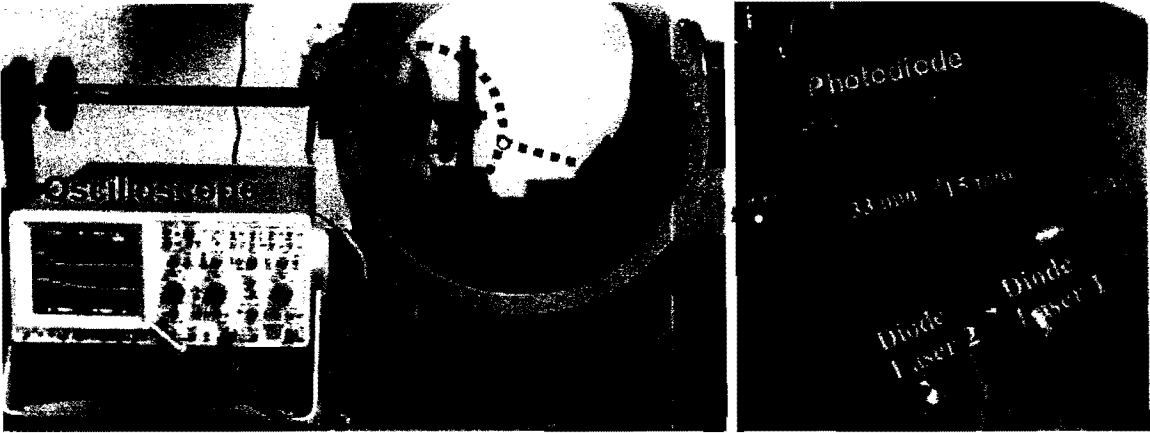
รูปที่ 3.10 สัญญาณลดลงเมื่อถูกปืนวิ่งผ่านชุดชุดเซ็นเซอร์ ที่วัดได้โดย Oscilloscope

จากเวลาที่ลูกปืนวิ่งผ่านชุดเซ็นเซอร์ ทั้งสองที่วัดได้จาก Oscilloscope และระยะห่างของชุดเซ็นเซอร์ทั้งสอง สามารถหาความเร็วเฉลี่ยของลูกปืนได้จาก

$$v_p = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{0.033}{\Delta t} \tag{3.2}$$

เมื่อ Δs ระยะห่างของชุดเซ็นเซอร์ ทั้งสองซึ่งกรณีนี้เป็น 0.033 m และ Δt เป็นเวลาที่ลูกปืนวิ่งตัดชุดเซ็นเซอร์ทั้งสอง

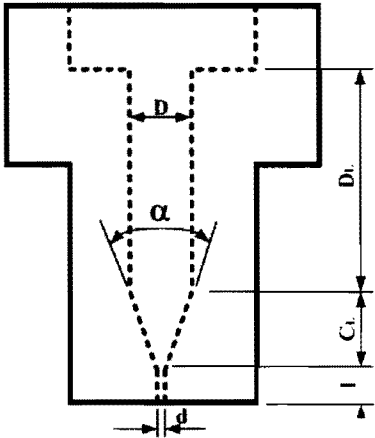
ในกรณีของการวัดความเร็วของลำพู่ยังคงใช้ หลักการตัดแสงเลเซอร์ โดยที่ Laser ตัวที่1 วางห่างจากหัวฉีด 15 mm และตัวที่ 2 วางห่างจากตัวที่ 1 เป็นระยะ 33 mm ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 Liquid jet velocity measurement arrangement

3.5 รูปร่างของหัวฉีด (Nozzle geometries)

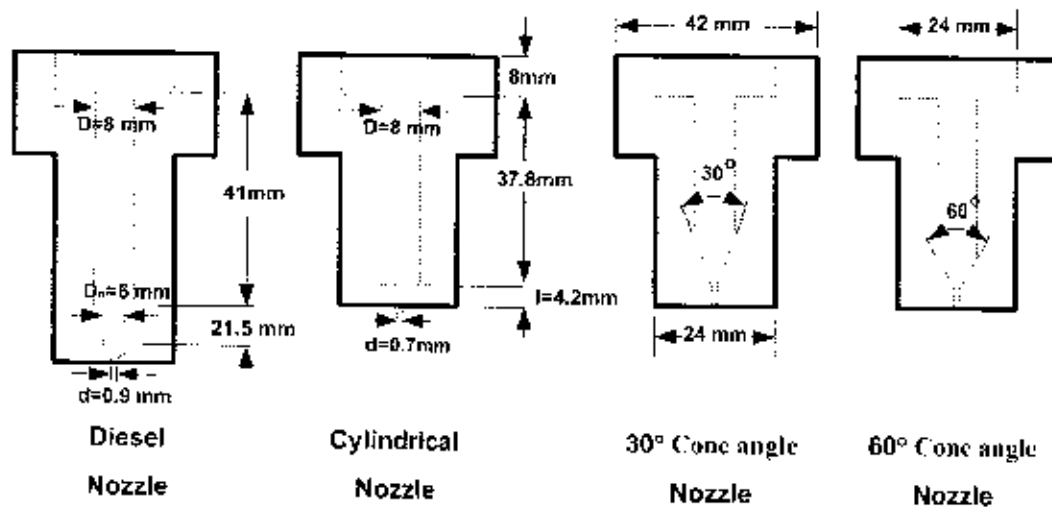
ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการออกแบบหัวฉีดเพื่อใช้สำหรับการทดลอง ซึ่งหัวฉีดเป็นส่วนที่มีผลต่อคุณลักษณะของลำพู่เป็นอย่างมาก ในการวิจัยนี้หัวฉีดที่ใช้จะเป็นหัวฉีดชนิดรูเดี่ยว (Single hole) ดังรูปที่ 3.12



Nozzle Configuration					
Nozzle type	D (mm)	d (mm)	l (mm)	l/d	α (°)
A	0.8	0.7	4.2	6	30
B	0.8	0.7	4.2	6	60
C	0.8	0.7	4.2	6	180
D	0.8 / 0.6	0.9	0	0	56

รูปที่ 3.12 โครงร่างของหัวฉีดที่ใช้ในการทดลอง

ลักษณะรูปร่างของหัวฉีดที่ใช้ในการทดลองจะเป็นชนิดรูเดี่ยว (Single-hole) แบ่งเป็น 4 กลุ่ม มีขนาดของรูฉีด (Orifice diameter) นุ่มภายใน ที่แตกต่างกันดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 รูปทรงของหัวฉีดที่ใช้ในการทดลอง

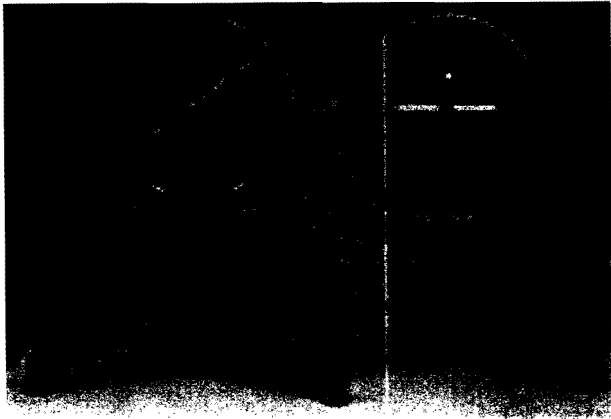
3.6 ระบบถ่ายภาพลำพุ่งความเร็วสูง (Visualization of high-speed liquid jets)

เทคนิคที่ใช้สำหรับการถ่ายภาพของลำพุ่งความเร็วสูงเพื่อให้มองเห็นพฤติกรรมของลำพุ่งความเร็วสูงมีหลายเทคนิค เช่น Schlieren technique, shadowgraph technique เป็นต้น เทคนิคเหล่านี้หากใช้ร่วมกับกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงแล้วไม่เพียงแต่จะเห็นภาพลำพุ่งความเร็วสูงแล้ว ยังเห็นพฤติกรรมของคลื่นช็อค ที่ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าหรือกล้องถ่ายภาพได้

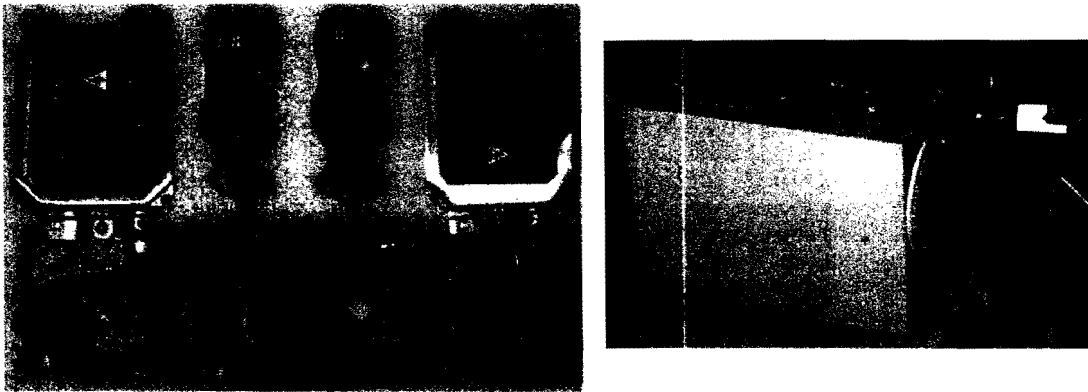
สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้เทคนิค Shadowgraph และการจัดวางอุปกรณ์สำหรับถ่ายภาพเป็นแบบระบบ Z-type shadowgraph ซึ่งประกอบด้วยกระจกเว้า (parabolic mirrors) จำนวน 2 แผ่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 mm และความยาวโฟกัส 1500 mm ดังแสดงรูปที่ 3.14 แหล่งกำเนิดแสง (Light source) xenon 35 W 6000k ดังแสดงรูปที่ 3.15 และ กล้องถ่ายภาพความเร็วสูงที่มีความสามารถในการบันทึกภาพที่ 7,500 f/s (1024 pixels x 1024 pixels) ถึง 1,000,000 f/s ดังแสดงรูปที่ 3.16

การจัดวางอุปกรณ์แบบ Z-type shadowgraph system โดยจัดวางกระจกทั้งสองบาน แรกในระยะโฟกัสจากแหล่งกำเนิดแสง เป็นมุมไม่เกิน 3° โดยให้ลำแสงขนานกันผ่าน test chamber และกระจกวางห่างจากห้องทดสอบ เท่ากับ โฟกัสของกระจก วางกระจกบานที่สองรับลำแสงจากบานแรกในอีกด้านของห้องทดสอบ ในตำแหน่งเดียวกับกระจกบานแรก ลำแสงจากกระจกบานที่สองจะรวมกันที่ด้านหลังโฟกัสของกล้องวิดีโอความเร็วสูงดังรูปที่ 3.17

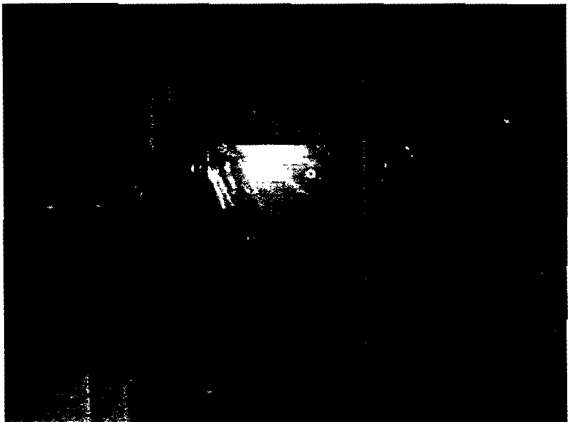




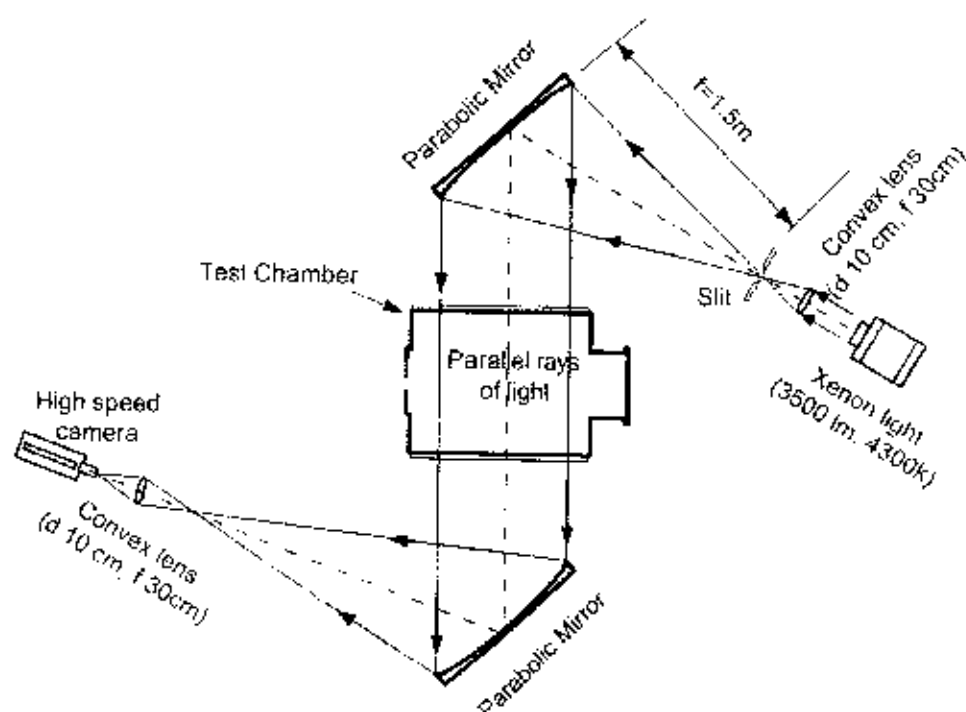
รูปที่ 3.14 Parabolic mirrors



รูปที่ 3.15 Light Source



รูปที่ 3.16 กล้องวิดีโอความเร็วสูง

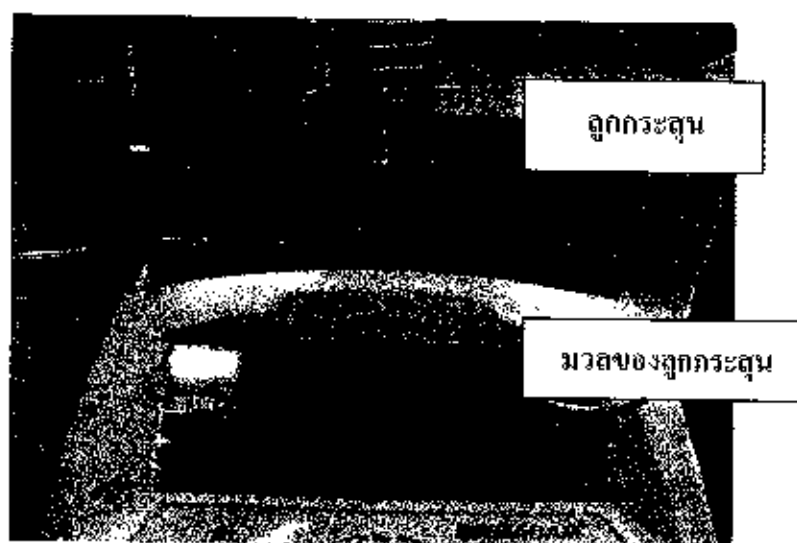


รูปที่ 3.17 Z-type shadowgraph system

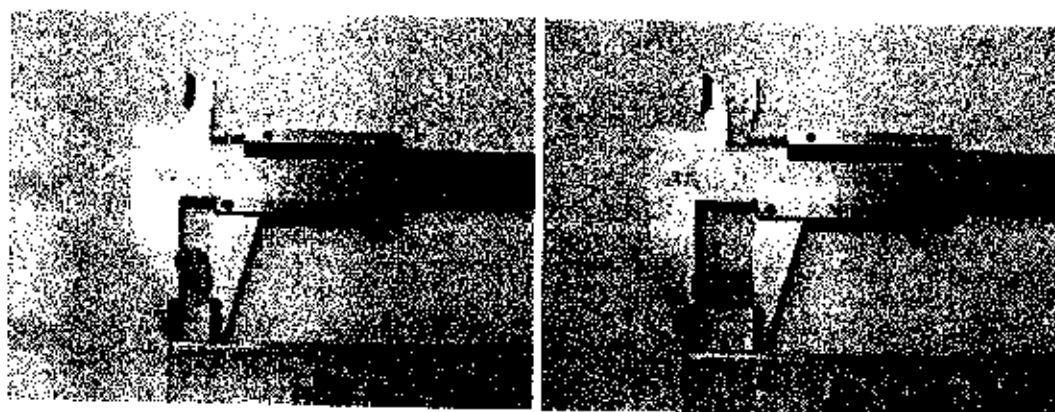
3.7 วิธีการทดลอง

การทดลองยังกระสุนความเร็วสูงเพื่อที่จะผลิตลำพุ่งความเร็วสูงนั้นในแต่ละขั้นตอนการทดลองผู้ทำการทดลองต้องคำนึงถึงความรอบคอบและความละเอียดสูงดังนั้นในการทดลองแต่ละครั้งจึงมีขั้นตอนดังนี้

1) การชั่งมวลของกระสุนและการวัดขนาดของลูกกระสุน เนื่องจากมวลของลูกกระสุนและขนาดของลูกกระสุนที่แตกต่างกันนั้นอาจมีผลทำให้ความเร็วของลูกกระสุนที่ได้จากการยิงมีความแตกต่างดังนั้นในการทดลองแต่ละครั้งจึงต้องมีการชั่งและการวัดลูกกระสุนทุกครั้ง โดยในการทดสอบจะให้กระสุนที่ทำมาจาก PMMA ซึ่งมีลักษณะทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 mm ยาว 15 mm

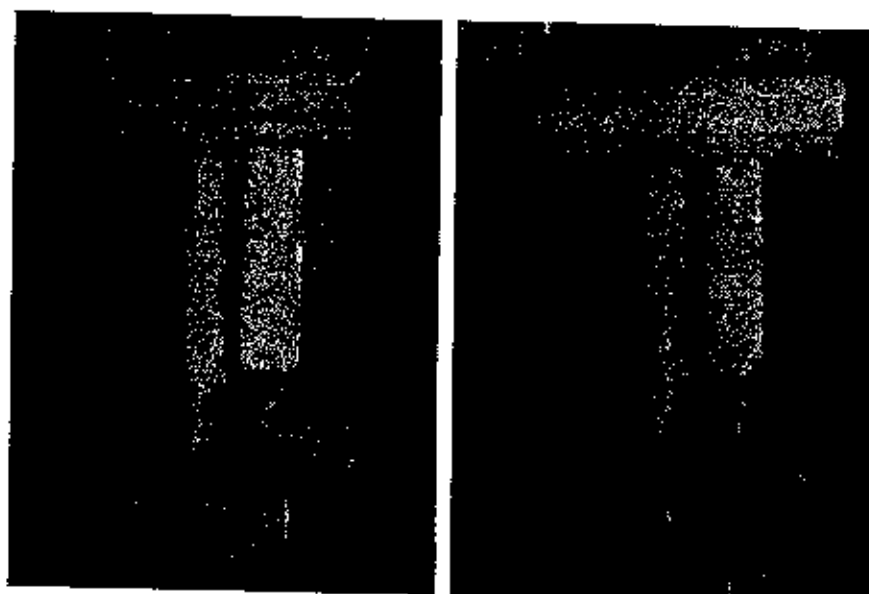


รูปที่ 3.18 มวลของลูกปืน



รูปที่ 3.19 ขนาดของลูกปืน

2) การบรรจุลูกปืน เมื่อทำการวัดขนาดและชั่งมวลของกระสุนแล้ว จะเป็นขั้นตอนในการบรรจุลูกกระสุน โดยในการบรรจุไม่สามารถบรรจุกระสุนเข้ากับปลอกกระสุนได้โดยง่าย ดังนั้นจึงต้องมีเครื่องช่วยบรรจุลูกกระสุนโดยการอัด โดยอัดให้เหลือกระสุนพ้นจากปลอกกระสุน 5 mm

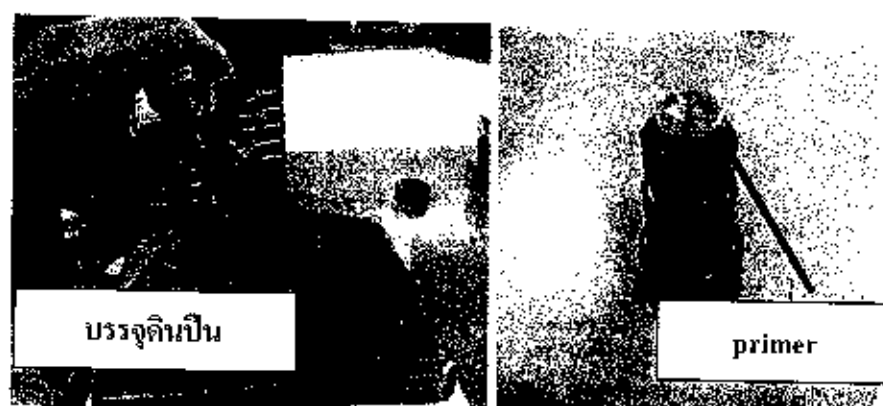


(a) ก่อนการบรรจุกระสุน

(b) หลังจากการบรรจุกระสุน

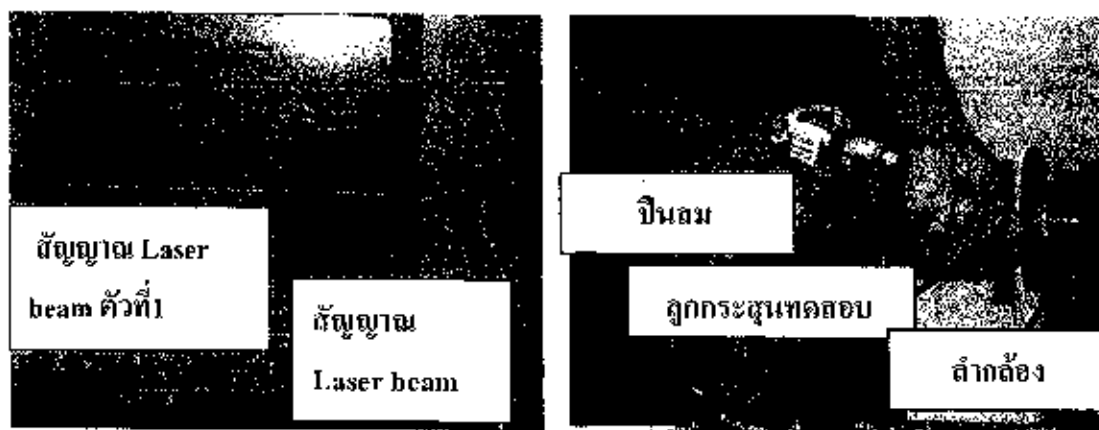
รูปที่ 3.20 บรรจุลูกกระสุน

3) การบรรจุดินปืน หลังจากบรรจุกระสุนเสร็จแล้วจะเป็นขั้นตอนการบรรจุดินปืนโดยการ
 ชั่งด้วยเครื่องชั่งดิจิทัลและใส่หัวจุดระเบิด (primer) โดยการติดด้วยเทปใส



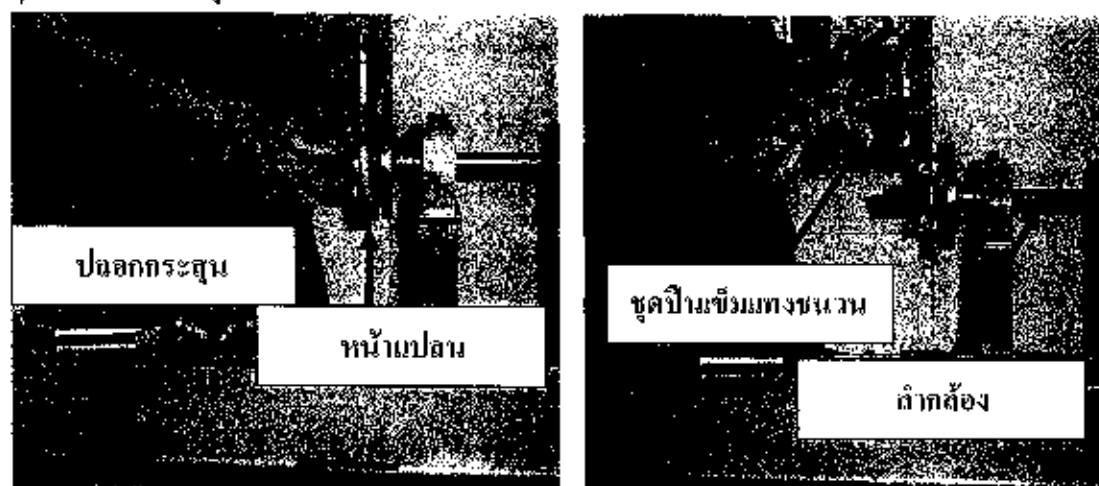
รูปที่ 3.21 บรรจุดินปืนและหัวจุดระเบิด (primer)

4) การตรวจสอบสัญญาณลำแสงเลเซอร์ และ oscilloscope เมื่อเสร็จขั้นตอนต่างๆที่ผ่าน
 มาแล้วก่อนที่จะทำการประกอบชุดปืนเข้ากับชุดทดลองต้องมีการเช็คสัญญาณลำแสงเลเซอร์ และ
 oscilloscope ทุกครั้งว่าเครื่องทำงานหรือไม่โดยการยิงกระสุนด้วยปืนลม



รูปที่ 3.22 ตรวจสอบสัญญาณด้านแสงเลเซอร์ และ Oscilloscope

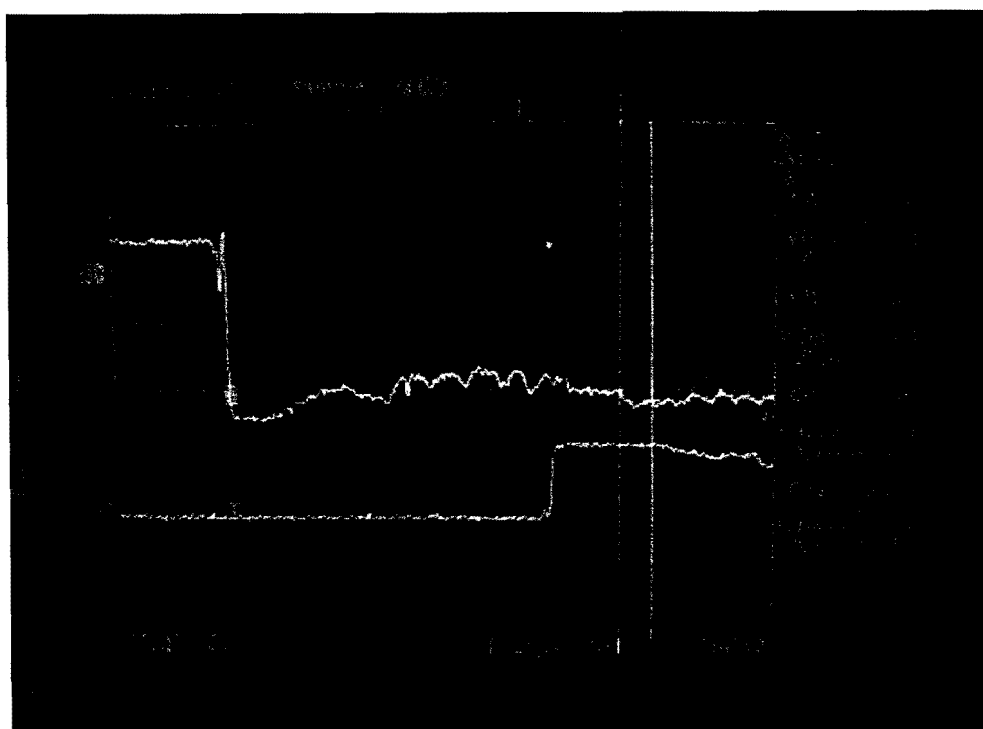
5) ประกอบชุดปืน หลังจากตรวจสอบสัญญาณเรียบร้อยแล้ว จากนั้นก็ทำการประกอบชุดปืนเข้ากับชุดทดลองโดยใส่ ถอดปลอกกระสุนเข้าที่หน้าแปลนของถ้ำกลิ้งก่อนแล้วจึงประกอบชุดปืนที่ใช้ในการวัดขนาด



รูปที่ 3.23 การประกอบชุดปืน

6) การคำนวณความเร็วเมื่อทำการทดลองยิงแล้วเซ็นเซอร์ ก็จะสามารถจับสัญญาณของลูกกระสุนหรือลำพุ่งที่ออกมาหัวนี้ได้ โดยสัญญาณจะแสดงบนเครื่อง Oscilloscope และสามารถคำนวณหาความเร็วได้จากสมการ 3.3

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (3.3)$$

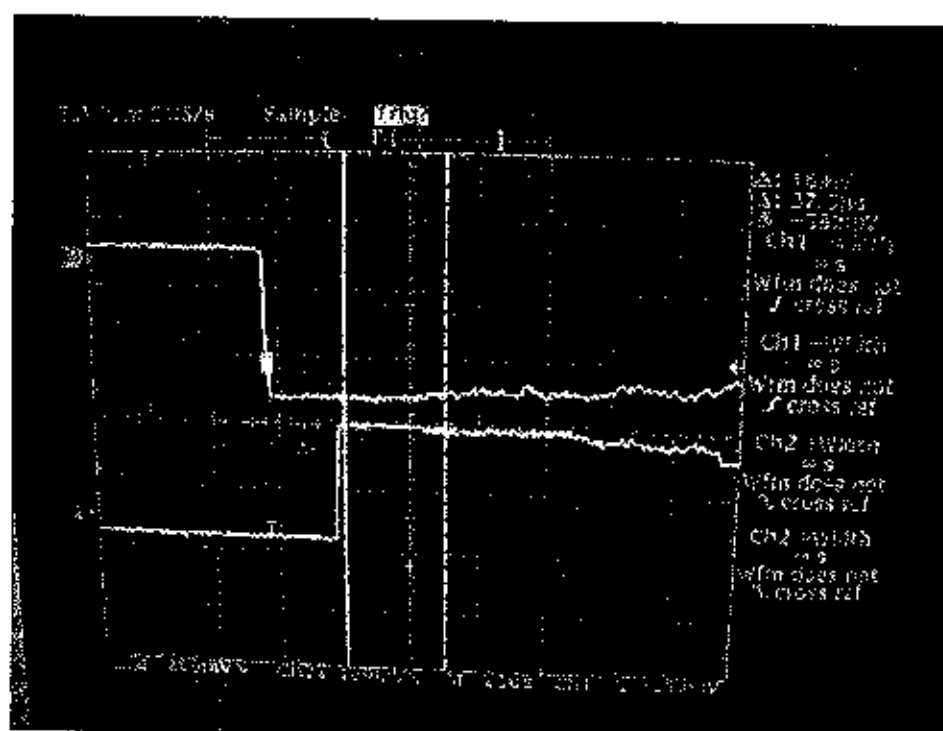


รูปที่ 3.24 สัญญาณที่วัดได้จากลำแสงเลเซอร์ ระยะห่าง 105 mm

ตัวอย่างการคำนวณหาความเร็วของลูกกระสุนจากรูปที่ 3.13

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

$$\therefore v = 804.6 \text{ m/s}$$



รูปที่ 3.25 สัญญาณที่วัดได้จากเส้นสแกนเซอร์ ระยะห่าง 33 mm

ตัวอย่างการคำนวณหาความเร็วของลูกกระสุนจากรูปที่ 3.25

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

$$\therefore v = 846.15 \text{ m/s}$$

บทที่ 4

ผลการวิจัย

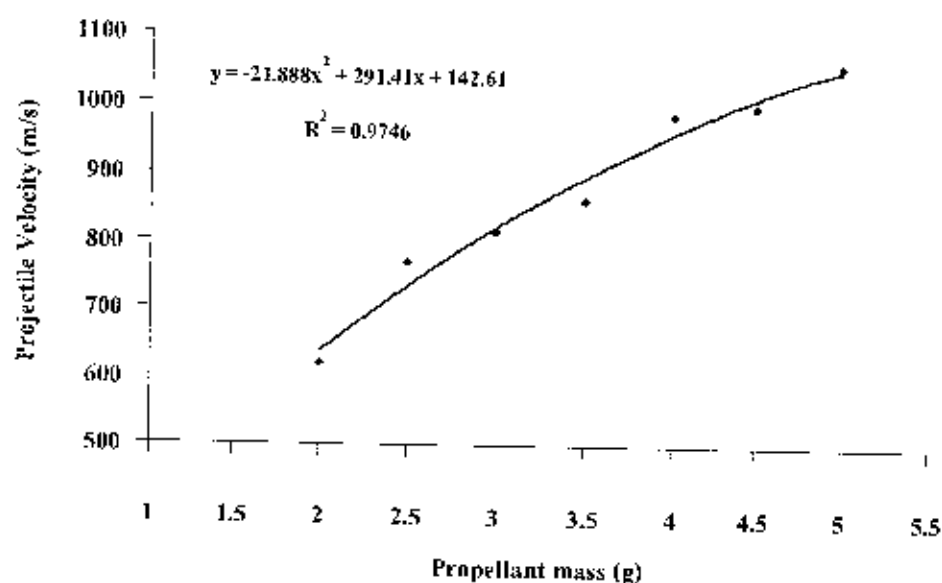
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลของการทดลองทั้งหมดเริ่มจากการปรับเทียบปริมาณดินปืนกับความเร็วของลูกปืนและลำพู่เชื้อเพลิงด้วยวิธีหลักการตัดแสงเลเซอร์ (Laser beam interruption) นอกจากนี้ยังได้ถ่ายภาพการเคลื่อนที่ของลูกปืน ลำพู่ความเร็วสูงของเชื้อเพลิงหลายชนิด กับหัวฉีดที่มีลักษณะหลายแบบ ที่อุณหภูมิของทดสอบและอุณหภูมิต่างๆ ด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง (High speed video camera) ซึ่งสามารถถ่ายภาพด้วยความเร็วได้สูงสุดถึง 1,000,000 fps เพื่อศึกษาพฤติกรรมและวัดความเร็วของลูกปืนและลำพู่ขณะเคลื่อนที่ในห้องทดสอบ

4.1 ปริมาณดินปืนกับความเร็วของลูกปืนและลำพู่

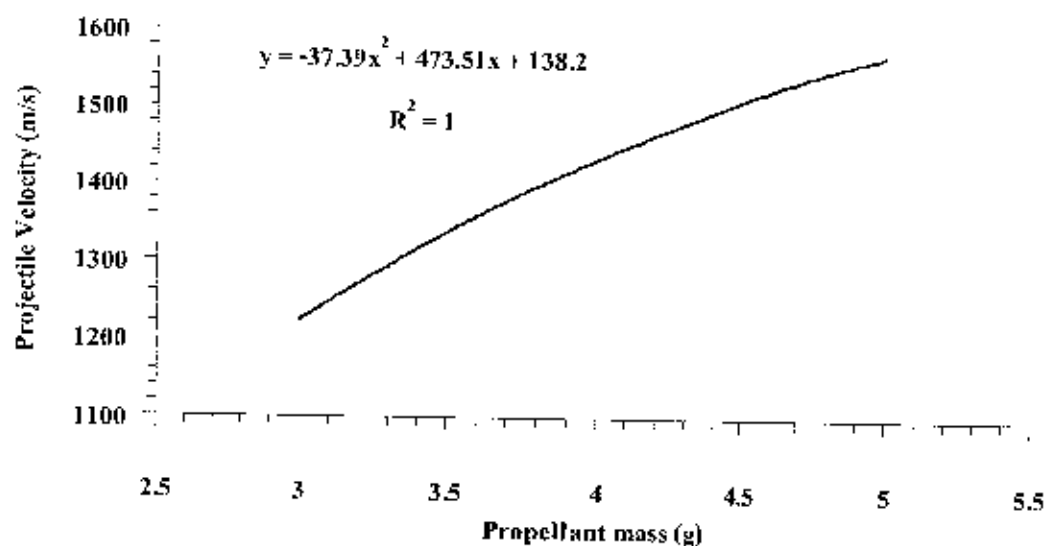
เมื่อทำการเก็บข้อมูล โดยวัดความเร็วของลูกปืนที่เปลี่ยนไปกับปริมาณของดินปืนที่เติมแต่ละครั้งในการยิง เริ่มตั้งแต่ 2-7 g จากดินปืนไร้ควัน (smokeless powder) และดินปืนดำ (Black powder) พบว่าดินปืนจะสามารถทำการขับเคลื่อนได้ต้องใช้ ดินปืนปริมาณ 2 g ขึ้นไปหากน้อยกว่านั้นไม่สามารถขับเคลื่อนได้ ทั้งนี้ห่อบรรจุดินปืนสามารถบรรจุดินปืนได้สูงสุด 7 g ในช่วงที่ทำการศึกษา

จากรูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณดินปืนชนิดดินปืนดำกับความเร็วของลูกปืน (Muzzle speed) รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วลูกปืนจาก HDPE น้ำหนัก 0.78 g ของแท่งบรรจุดินปืน (cartridge) ขนาด 5 g กับดินปืนดินปืนไร้ควันจาก 3 – 5 g นอกจากนี้ยังหาความสัมพันธ์ของความเร็วของลูกปืน มวลของดินปืน, มวลของลูกปืนดังรูปที่ 4.3 จากรูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของปริมาณดินปืนชนิดดินปืนดำ กับความเร็วของลูกปืน (Muzzle speed) จากปริมาณดินปืน 2 – 5 g พบว่าความเร็วของลูกปืนมีความเร็วต่ำสุดที่ปริมาณดินปืน 2 g ที่ความเร็วประมาณ 600 m/s และความเร็วของลูกปืนมีความเร็วสูงสุดที่ปริมาณดินปืน 5 g ประมาณ 1,000 m/s

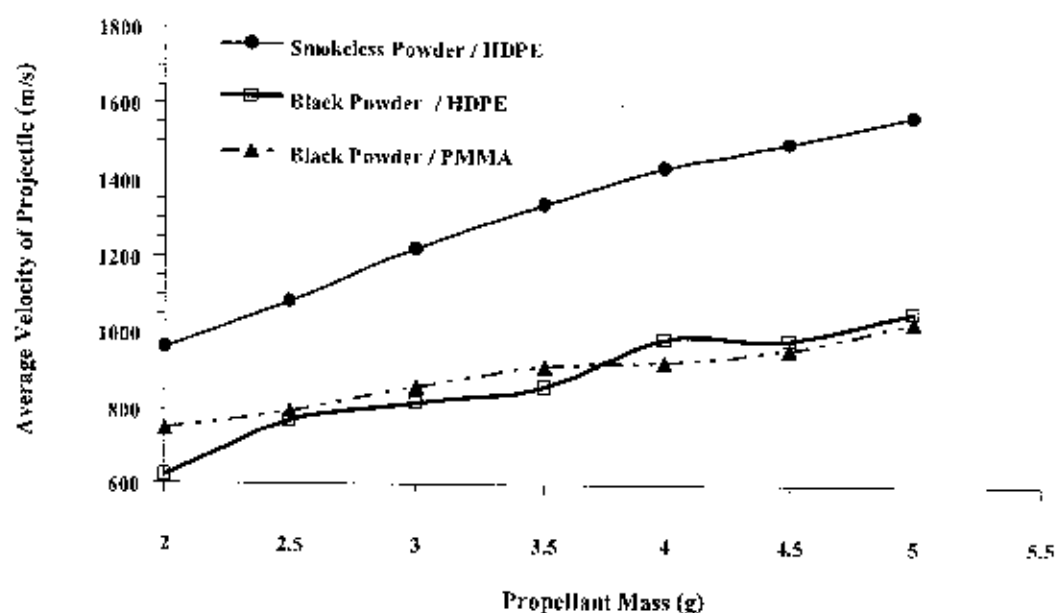
จากรูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของปริมาณดินปืนชนิดไร้ควันกับความเร็วของลูกปืน (Muzzle speed) จากปริมาณดินปืน 3 – 5 g พบว่าความเร็วของลูกปืนมีความเร็วต่ำสุดที่ปริมาณดินปืน 3 g ที่ความเร็วประมาณ 1,200 m/s และความเร็วของลูกปืนมีความเร็วสูงสุดที่ปริมาณดินปืน 5 g ประมาณ 1,600 m/s จากรูปที่ 4.1 กับ 4.2 ชนิดของดินปืนดำกับไร้ควัน ซึ่งจะเห็นว่าดินปืนแบบไร้ควันจะทำให้ความเร็วของลูกปืนมากที่สุดที่ทุกๆ ปริมาณดินปืน



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลดินปืนดำ (Black powder) กับ ความเร็วลูกปืน



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลดินปืนไร้ควัน (Smokeless powder) กับ ความเร็ว ลูกปืน



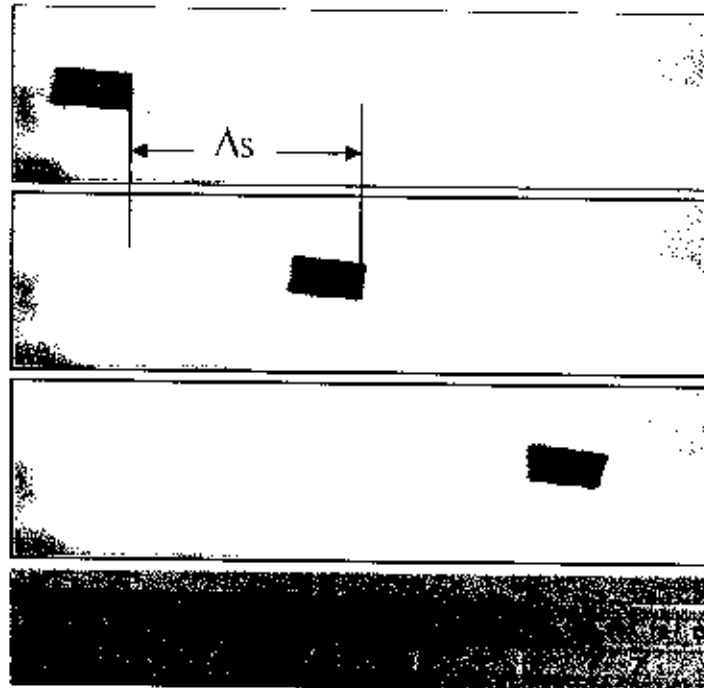
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลดินปืนต่างชนิด กับความเร็วลูกปืน ที่ทำจาก HDPE กับ PMMA (มวลต่างกัน)

จากรูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลดินปืนไร้ควัน (Smokeless powder) กับความเร็วลูกปืนของลูกปืนที่ทำจาก HDPE ทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm ความยาว 15 mm มวล 0.78 g กับ PMMA มวล 0.92 g ที่ขนาดเดียวกันกับ HDPE พบว่าความเร็วของลูกปืนต่างชนิดกันแต่ดินปืนชนิดกันมีความเร็วไม่แตกต่างกันมาก แต่ชนิดของดินปืนจะมีผลต่อความเร็วของลูกปืนมากกว่าอย่างชัดเจน

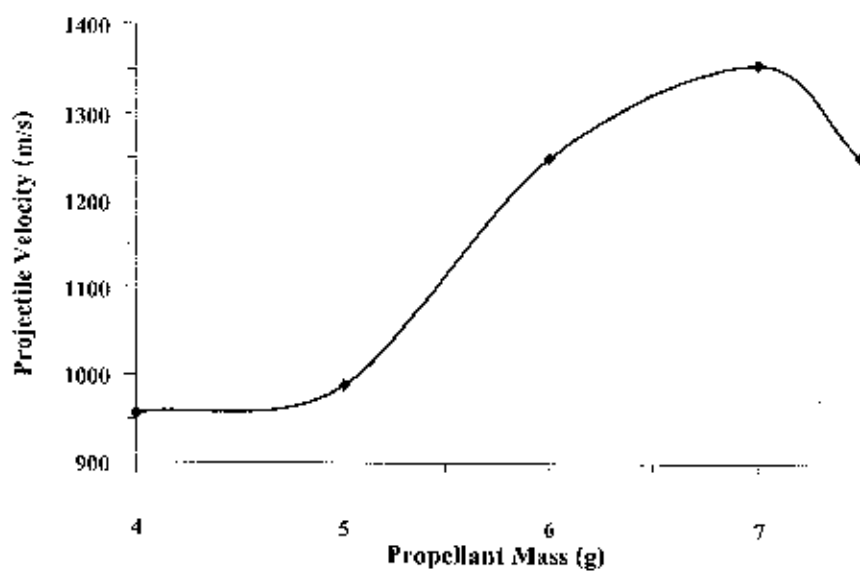
ความเร็วของลูกปืนที่วัดได้จากหลักการวัดแสงเลเซอร์ จะถูกวัดเทียบกับความเร็วที่วัดได้จากภาพที่ถ่ายด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงดังแสดงในรูปที่ 4.4

จากการทดลองทดลองเบื้องต้นพบว่าความเร็วของลูกปืนจากดินปืนไร้ควัน มีความเร็วที่สูงกว่าแบบดินปืนดำ และความเร็วของลูกปืนจะเพิ่มขึ้นถ้าเพิ่มปริมาณดินปืน จึงทำการทดลองโดยใช้ PMMA เป็นลูกปืนและดินปืนแบบไร้ควัน ทำการทดลองตั้งแต่ 4 -7.5 g ดังผลการทดลองในรูปที่ 4.5

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าความเร็วสูงสุดของลูกปืนจะค่าประมาณ 1,200 m/s ที่ปริมาณดินปืน 7 g และต่ำสุดประมาณ 900 m/s ที่ปริมาณดินปืน 4 g เมื่อเพิ่มปริมาณดินปืนขึ้นอีก ความเร็วของลูกปืนจะลดลง ซึ่งปริมาณดินปืนมากเกินไปทำให้พื้นที่ในท้องเผาไหม้เหลือน้อย ดินปืนเผาไหม้ไม่ทัน



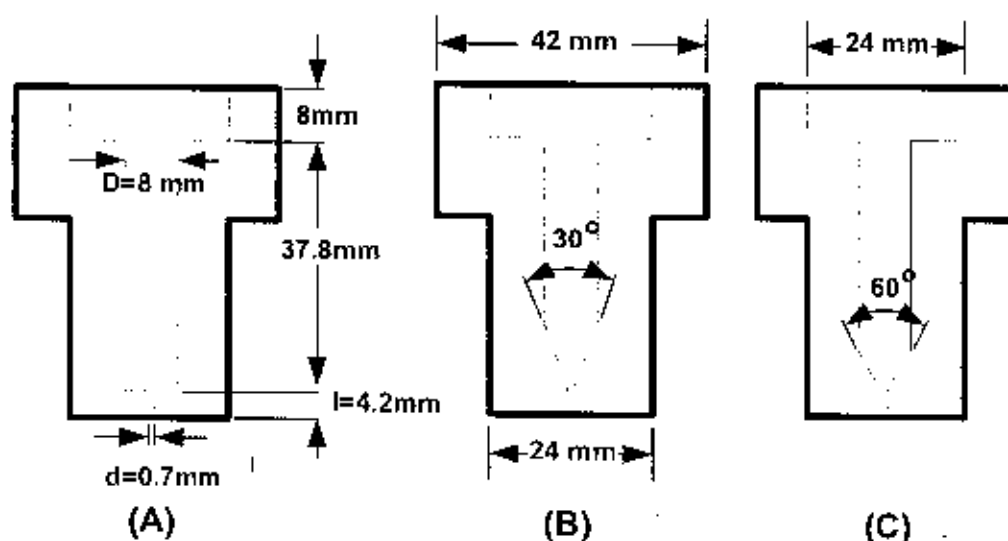
รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายการเคลื่อนที่ของลูกปืน จากกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง 66.67 μs ต่อภาพ, คำนวณจุด
ดินดำ, หนัก 3 μ



รูปที่ 4.5 ความเร็วของลูกปืนที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงมวลดินปืน

4.2 ปริมาณดินปืนและรูปทรงของหัวฉีดกับความเร็วยิงลำพุ่ง

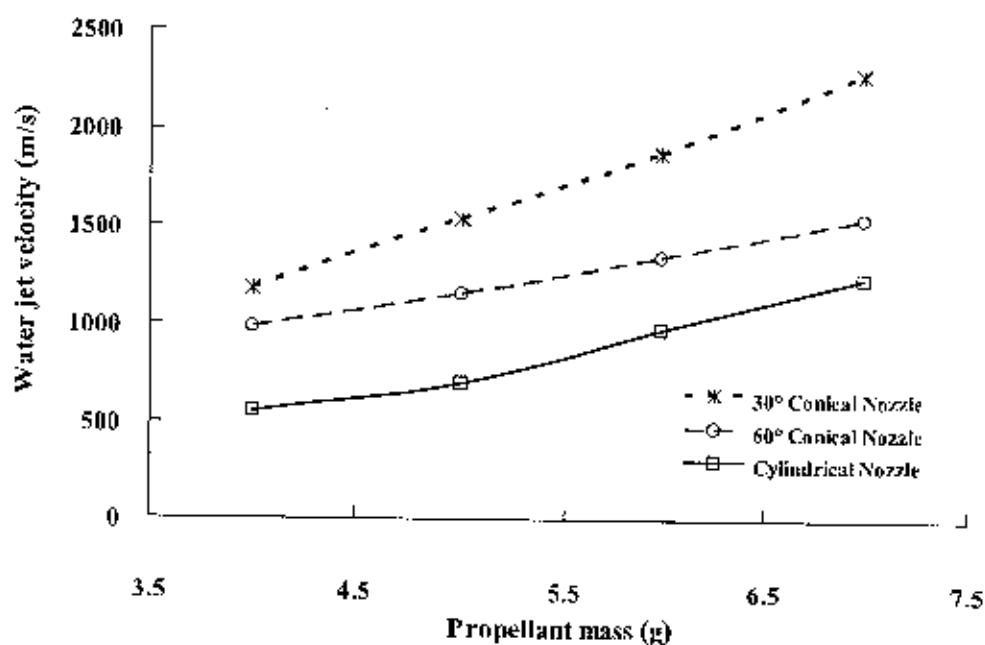
การทดลองในเบื้องต้นเพื่อหาความเร็วยิงของลำพุ่งจะใช้วิธีการทั้งการตัดสเล็คเซอร์ และ กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง โดยการวัดความเร็วยิงของลำพุ่งจะทดสอบกับหัวฉีด 3 รูปทรงดังรูป 4.6 และ ปริมาณดินปืน ที่ 4-7 g



รูปที่ 4.6 รูปทรงของหัวฉีด (A) ทรงกระบอก (B) แบบกรวยมุม 30° และ (C) แบบกรวยมุม 60°

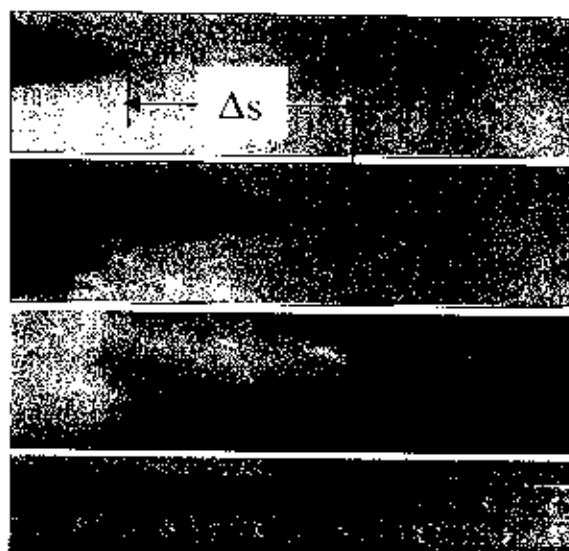
จากผลการทดลองที่ความเร็วยิงของดินปืน (956 – 1,358) ที่ได้จากมวลของดินปืนชนิดไรต์วีน ที่ 4-7 g ให้ปริมาณดินปืน 7 g ที่ให้ลูกปืนมีความเร็วสูงสุด (1,358 m/s Vp) ทำการทดลองหาความเร็วยิงของลำพุ่งน้ำจากหัวฉีดรูปร่างต่างๆ เพื่อให้ได้ค่าความเร็วยิงสูงสุดของลำพุ่ง ดังรูปที่ 4.7 ผลของความเร็วยิงของลำพุ่งน้ำที่เกิดจากหัวฉีด 3 รูปร่างคือ แบบกรวยมุม 30° และ 60° และ ทรงกระบอก (cylindrical nozzle) ถ้าการเปลี่ยนแปลงปริมาณดินปืน

จากรูปที่ 4.7 พบว่า ความเร็วยิงของลำพุ่งน้ำสูงสุดที่ ประมาณ 2,200 m/s จากหัวฉีดแบบกรวยมุมภายใน 30° ส่วนความเร็วยิงสูงสุดของลำพุ่งน้ำจากหัวฉีดแบบกรวยที่มีมุมภายใน 60° และ หัวฉีดทรงกระบอกมีความเร็ว 1,549 m/s และ 1,241 m/s ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 The effect of nozzle shape and propellant mass on water jet velocities

ความเร็วของลำพุ่งของน้ำที่วัดได้จากหลักการตัดแสงเลเซอร์ จะถูกวัดให้สัมพันธ์กับความเร็วที่วัดได้จากภาพที่ถ่ายด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ภาพถ่าย การเคลื่อนที่ของลำพุ่งของน้ำจากกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง

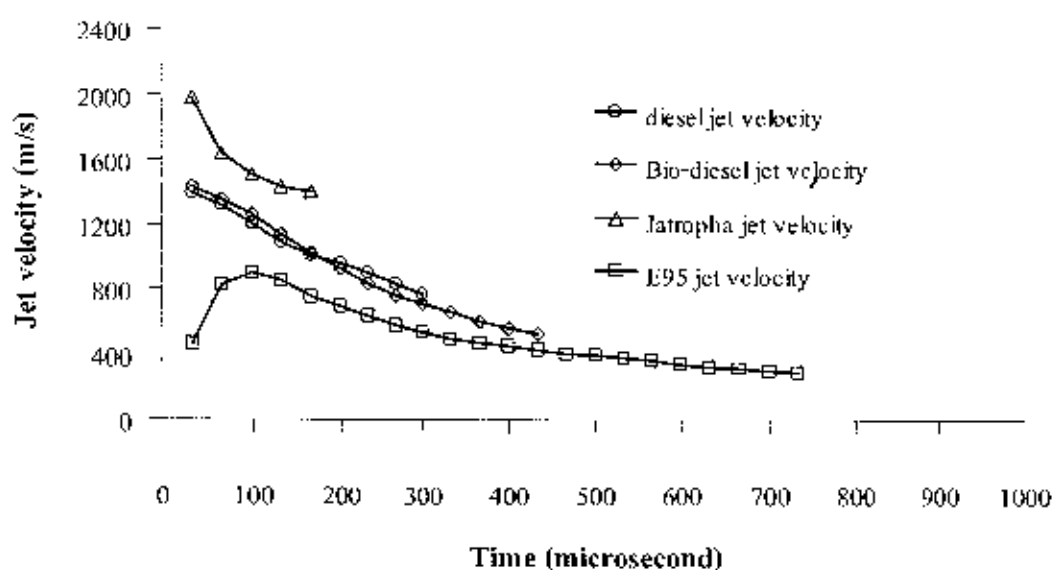
จากรูปที่ 4.8 เมื่อทำการถ่ายภาพด้วยกล้องความเร็วสูง ที่ความเร็ว 15,000 fps พบการเคลื่อนที่ของลำพู่ น้ำ โดยเวลาของแต่ละภาพใช้ห่างกัน 66.7 μ s ระยะห่างของลำพู่วัดได้ตามภาพ โดยเทียบกับความยาวไม้บรรทัด ที่ติดตั้งก่อนทำการถ่าย ซึ่งจากรูปก็การคำนวณพบว่าความเร็วพบว่าความเร็วเฉลี่ยของลำพู่ประมาณ 1,350 m/s จากความเร็วลูกปืนที่วัดได้ในตอนต้น 833 m/s ซึ่งใกล้เคียงกับการวัดด้วยวิธีหลักการดัดแสงมาก

ต่อจากนี้ผลการทดลองจะใช้หัวฉีดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอขวด (orifice (d) 0.7 mm บุมภายใน (OL) 30° ความยาว orifice (l) 3.0 mm และอัตราส่วนของความยาว orifice ต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง orifice (l/d) เป็น 4.2 mm ปริมาณคินป็น 3 μ

4.3 คุณสมบัติของลำพู่ความเร็วสูง

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงผลที่ได้จากการทดลองด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงร่วมกับ Z-type shadowgraph system ของเชื้อเพลิงเหลวหลายชนิด ในสภาวะของห้องทดสอบที่แตกต่างกันทางอุณหภูมิ และความดัน และหัวฉีดที่มีรูปร่างต่างกัน เพื่อหาคุณสมบัติของของเหลวที่ถูกฉีดด้วยความเร็วสูง โดยเน้นให้ลำพู่เชื้อเพลิงความเร็วสูงมีความเร็วสูงกว่าความเร็วของเชื้อเพลิงที่ฉีดในใญ่จุ่มเล็กน้อย (ประมาณ 700 m/s)

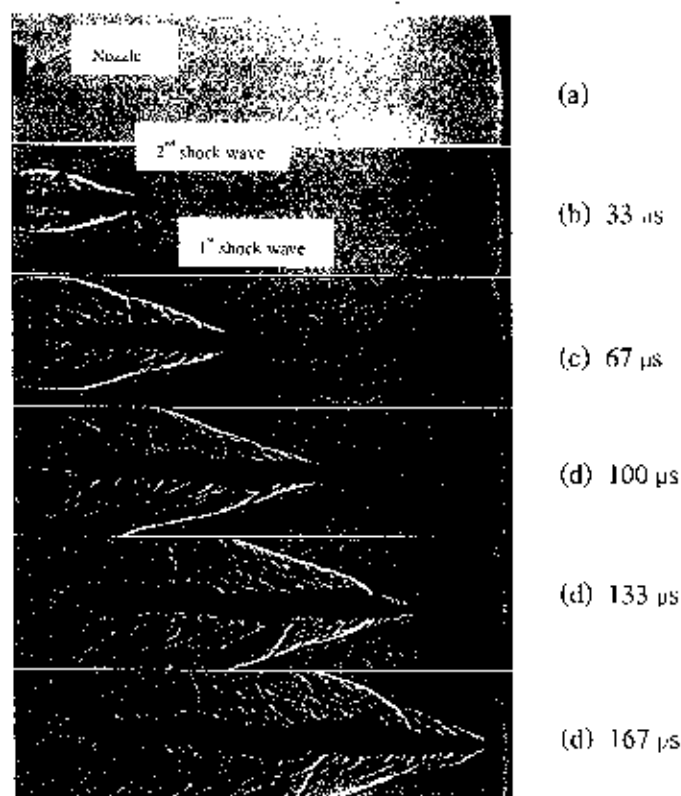
4.3.1 ผลของความเร็วของลำพู่เชื้อเพลิงต่างๆ ที่อุณหภูมิบรรยากาศ (30°C) และความดันบรรยากาศ



รูปที่ 4.9 Comparison of fuel jets velocity

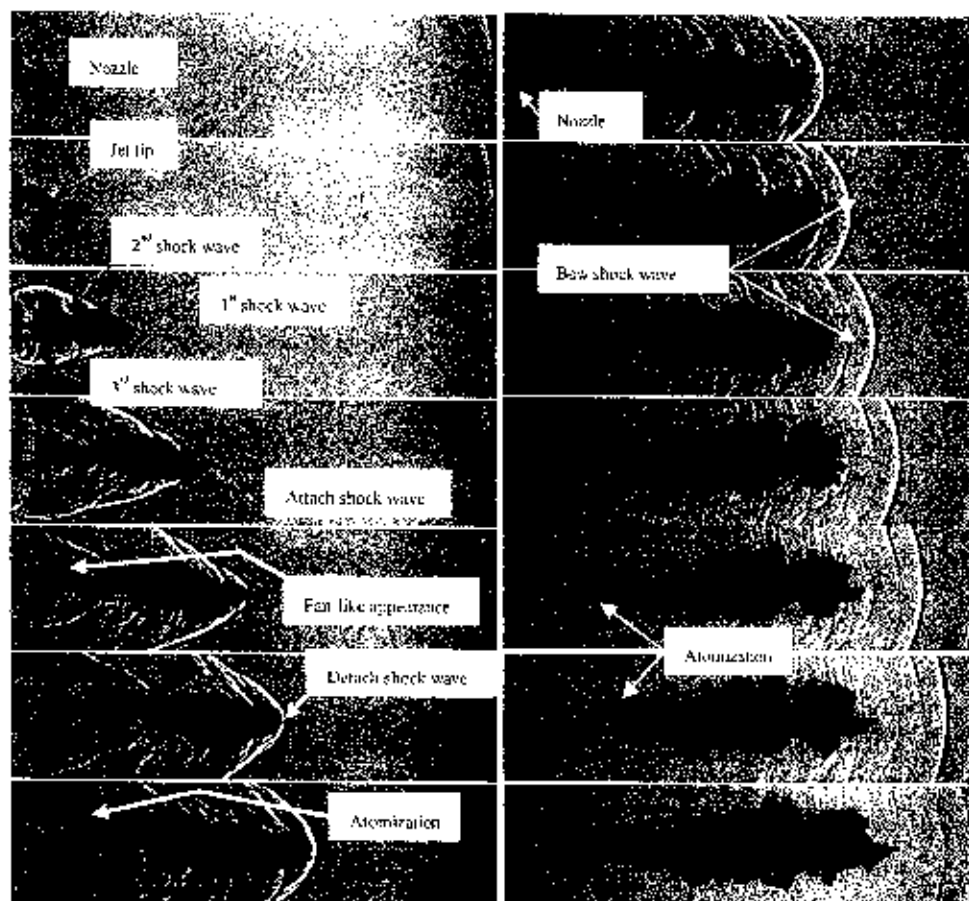
จากรูปที่ 4.9 เปรียบเทียบผลของความเร็วของลำพุ่งเชื้อเพลิง 4 ชนิด คือ ดีเซล (Diesel) ไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว (bio-diesel) ฝักระต่าย (jatropha curcas oil) และ E95 (ethanol 95%) โดยใช้หัวฉีดขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางคอขวด (d) 0.7 mm มุมภายใน (α) 30 ° ความยาว orifice (l) 3.0 มม และอัตราส่วนของความยาว orifice ต่อ เส้นผ่านศูนย์กลางคอขวด (l/d) เป็น 4.2 mm ปริมาณน้ำมัน 3 g โดยภาพถ่ายกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงร่วมกับ 7-type shadowgraph system ดังรูปที่ 4.10 และ รูปที่ 4.11

ผลการทดลองพบว่าลำพุ่งของน้ำมันเชื้อเพลิงจากฝักระต่ายมีความเร็วสูงที่สุด ($\sim 2,000$ m/s) ทำให้เส้นกราฟข้อมูลสั้น เนื่องจากระยะเวลาการถ่ายภาพจากหัวฉีดและการเคลื่อนที่ของลำพุ่งในถังทดสอบอยู่ที่ประมาณ 230 mm ความเร็วสูงสุดของน้ำมันดีเซลมีค่าสูงสุดที่ประมาณ 1,400 m/s ความเร็วสูงสุดของไบโอดีเซลประมาณ 1,400 m/s ส่วนความเร็วสูงสุดของลำพุ่งเชื้อเพลิงที่มีค่าต่ำสุดคือ E95 ประมาณ 900 m/s ผลของความเร็วที่แตกต่างกันเนื่องจากคุณสมบัติของเชื้อเพลิง เช่น ฝักระต่ายมีค่าความหนืด (Viscosity: 50.7 CS) ความหนาแน่น (Density: 0.92 g/cm^3) สูงกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่นมาก ทำให้ลำพุ่งแตกตัวได้ยากดังรูปที่ 4.11 ความเร็วของลำพุ่งจึงสูง ส่วน E95 จะเห็นว่าความเร็วต่ำเนื่องจากสามารถแตกตัวได้ง่ายกว่าซึ่งจะเห็นได้ชัดจากภาพถ่ายว่า E95 จะเกิดการแตกตัวของเชื้อเพลิงดีกว่า ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.10 Jatropha curcas oil jets

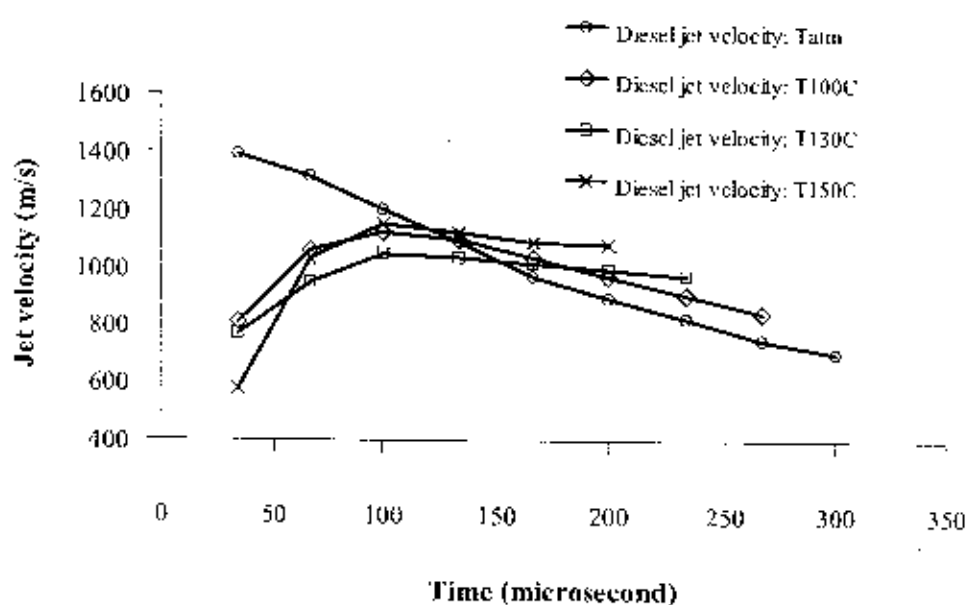
จากรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าบริเวณโดยรอบของลำพุ่งของสบูดำไม่มีการแตกตัว ลำพุ่ง และคลื่นช็อก มีลักษณะเป็นเส้นและมุมที่แหลม ปลายลำพุ่ง (jet tip) กับคลื่นช็อกเป็น attach-shock แสดงให้เห็นว่าลำพุ่งมีความเร็วที่สูง



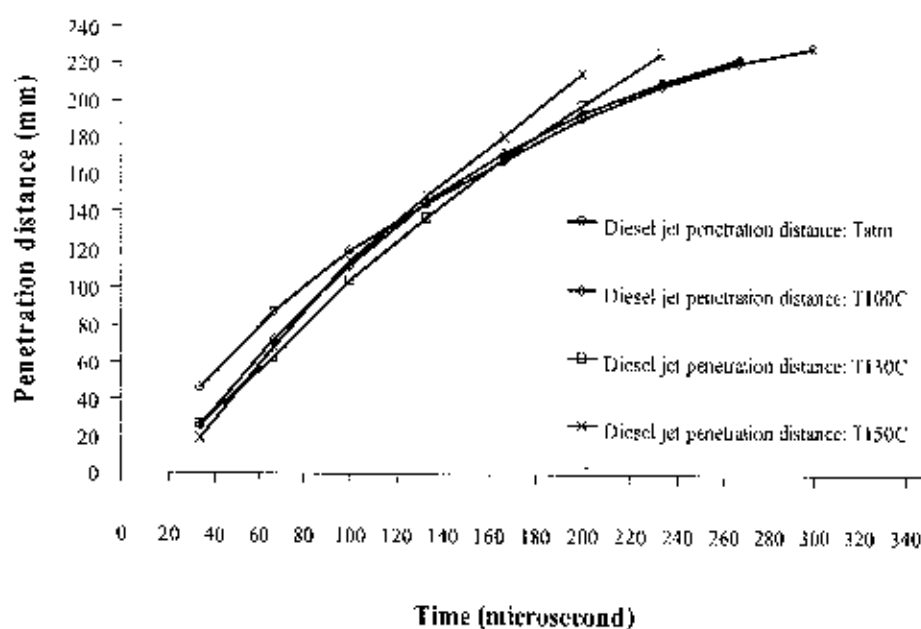
รูปที่ 4.11 Supersonic ethanol-95% (E95) jets

4.3.2 คุณลักษณะของลำพุ่งน้ำมันดีเซลที่อุณหภูมิบรรยากาศ (30°C), 100°C , 130°C และ 150°C , ที่ความดันบรรยากาศ

จากรูปที่ 4.12 ความเร็วของลำพุ่งน้ำมันดีเซลที่อุณหภูมิต่างๆ ในความดันบรรยากาศ และรูปที่ 4.13 ระยะแทรก (Penetration distance) ของลำพุ่งดีเซลที่อุณหภูมิต่างๆ ในความดันบรรยากาศ จะเห็นได้ว่าความเร็วของลำพุ่งที่ความดันบรรยากาศมีค่าสูงสุด (ประมาณ $1,400\text{ m/s}$) และความเร็วจะลดลงอย่างค่อนเนื่อง ส่วนในกรณีในห้องทดสอบถูกปรับให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ผลของความเร็วของลำพุ่งเริ่มต้นจะเปลี่ยนไป) คือความเร็วเริ่มต้นจะมีค่าต่ำและเพิ่มความเร็วขึ้นจนถึงความเร็วสูงสุดที่ได้แล้วถึงจะลดลง โดยที่อุณหภูมิยังเพิ่มขึ้นความเร็วเริ่มต้นของลำพุ่งยังลดลง

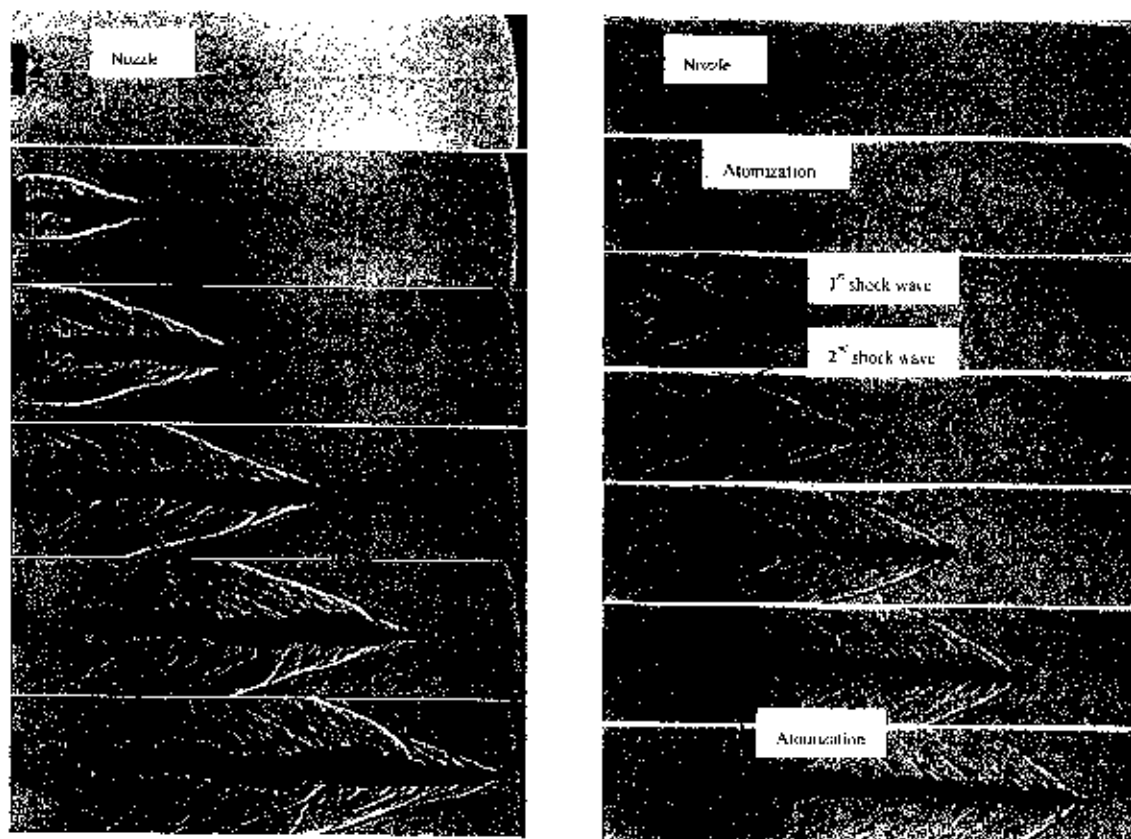


รูปที่ 4.12 Effect of temperature on diesel fuel jets velocity



รูปที่ 4.13 Effect of temperature on diesel fuel jets penetration distance

ส่วนของ ระยะแหวกของลำพ่นน้ำมันดีเซลนั้นจะมีค่าใกล้เคียงกันแต่อุณหภูมิของห้องทดสอบยังมีผลต่อระยะที่ลำพ่นของน้ำมันดีเซลคือ อุณหภูมิเพิ่มขึ้นระยะแหวกลดลง



(a) High speed diesel jets: $T=30^{\circ}\text{C}$, P_{atm}

(b) High speed diesel jets: $T=150^{\circ}\text{C}$, P_{atm}

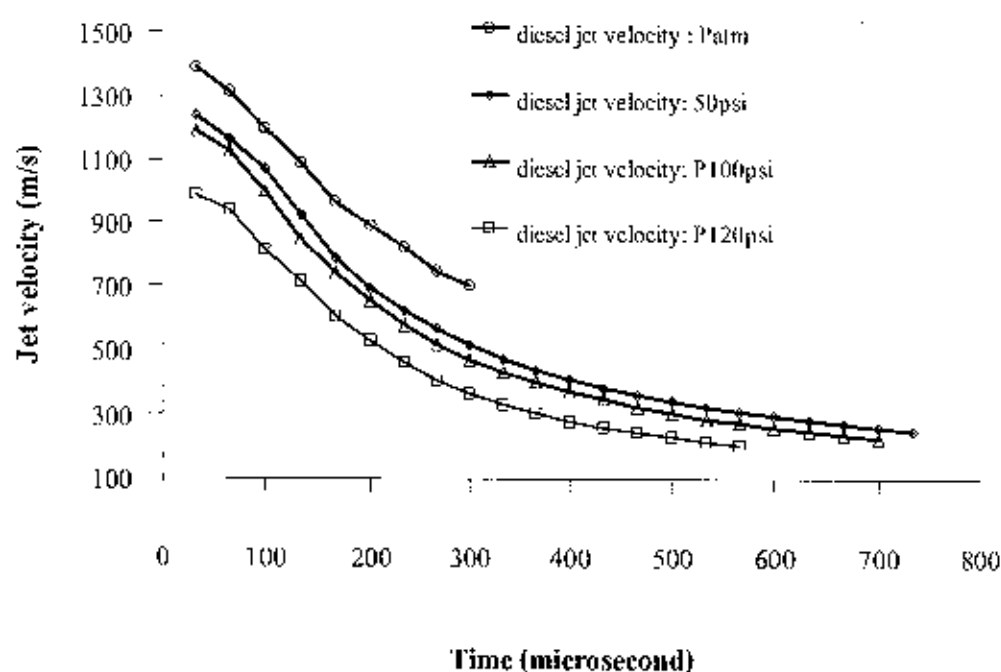
รูปที่ 4.14 Comparison of diesel fuel jets between the results from test chamber temperature; (a) atmosphere temperature 30°C and (b) 150°C

จากรูปที่ 4.14 เปรียบเทียบลำพ่นน้ำมันเชื้อเพลิงความเร็วสูงที่ห้องทดสอบ 30°C (รูปที่ 4.14a) กับ 150°C (รูปที่ 4.14b) และความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิห้องทดสอบ 150°C จะเห็นได้ว่าความเร็วของลำพ่นน้ำมันเชื้อเพลิงมีความเร็วที่ลดลงไม่มาก ซึ่งสังเกตได้จากระยะของลำพ่น และมุมของคลื่นซ็อกเพิ่มขึ้น นอกจากนี้สิ่งที่เกิดขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของห้องทดสอบคือ ลำพ่นเชื้อเพลิงจะแตกตัวตั้งแต่เริ่มต้น และนี่เป็นสาเหตุของความเร็วเริ่มต้นที่ต่ำกว่าลำพ่นที่ความดันบรรยากาศ

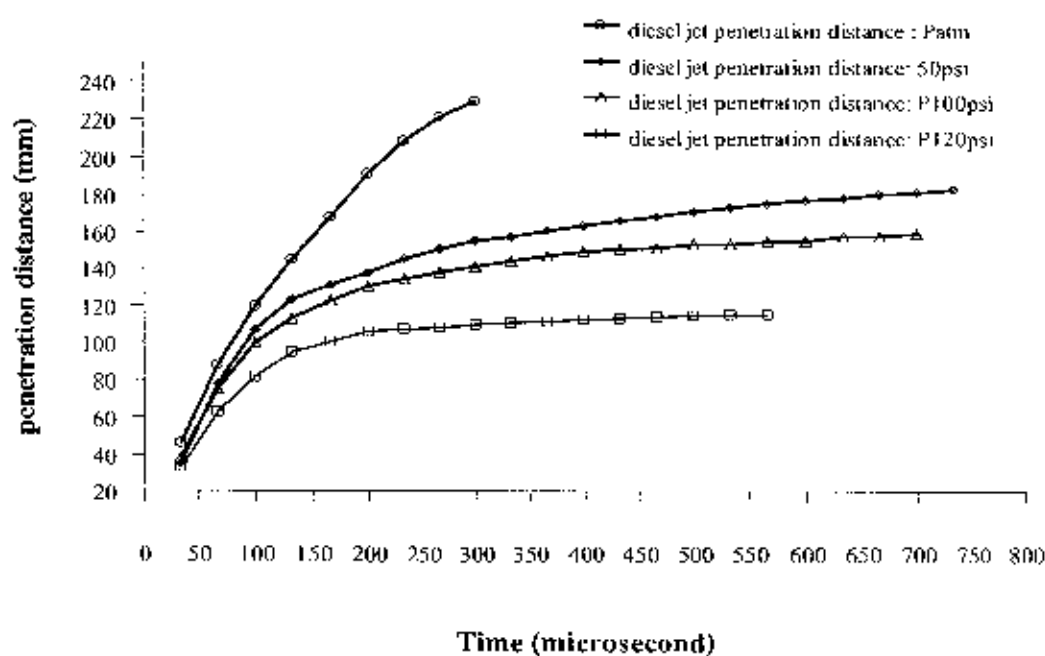
4.3.3 คุณสมบัติของลำพ่นน้ำมันดีเซลที่อุณหภูมิบรรยากาศ (30°C) และที่ความดันบรรยากาศ, 50 psi, 80 psi และ 120 psi

จากรูปที่ 4.15 และ 4.16 เป็นผลของความเร็วและระยะแนวลำพ่นเชื้อเพลิงที่ความเร็วสูงโดยใช้หัวฉีดขนาด 0.7 mm มุม 30° 1/d เป็น 4.2 mm และดินปืน 3 g ที่ถูกฉีดเข้าไปใน

ห้องทดสอบอุณหภูมিবรรยากาศ (30°C) และเปลี่ยนแปลงความดันจากความดันบรรยากาศ เป็น 50 psi, 80 psi, 120 psi

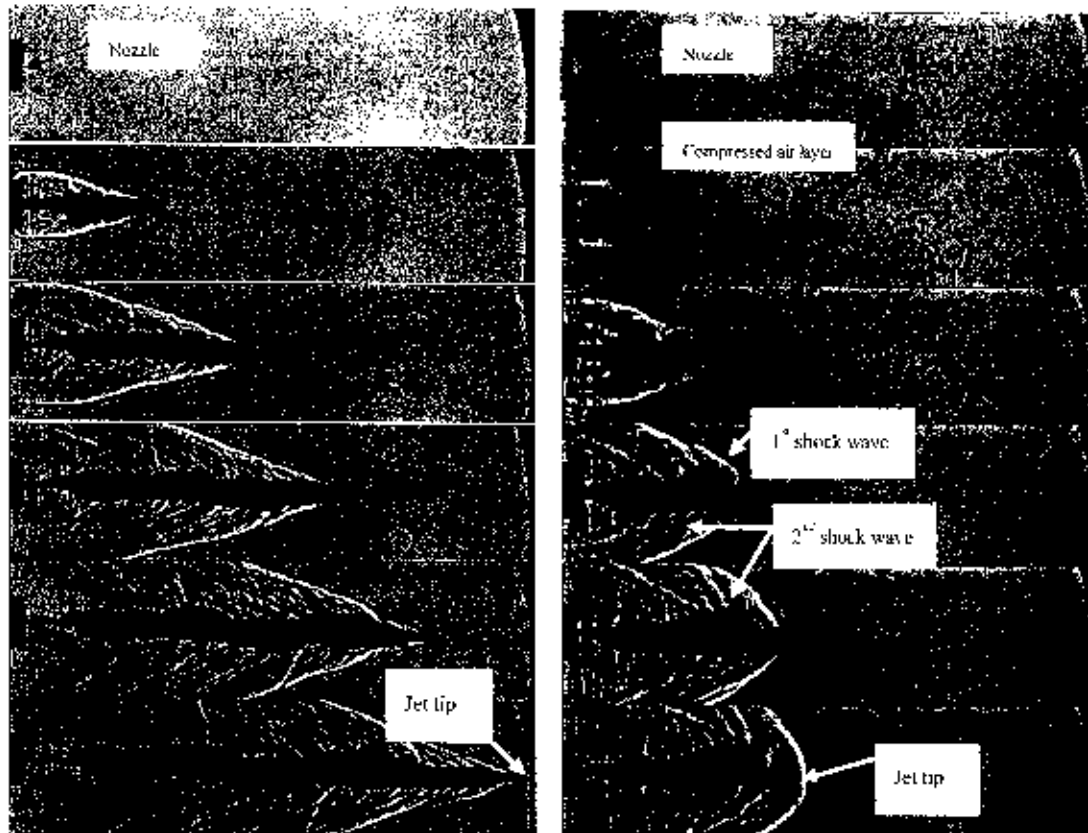


รูปที่ 4.15 Effect of pressure on supersonic diesel fuel jets velocity



รูปที่ 4.16 Effect of pressure on diesel fuel jets penetration distance

ผลการทดลองพบว่าความดันภายในห้องทดสอบมีผลต่อความเร็วเริ่มต้นของลำพู่่น้อยกว่าความเร็วของลำพู่่นที่เวลาเพิ่มขึ้น นั่นคือความเร็วเริ่มต้นของลำพู่่นจะสูงและค่อยๆลดลงอย่าง ต่อเนื่อง ความเร็วสูงสุดของลำพู่่นจะสูงสุดที่ความดันบรรยากาศ ความดัน 50 psi 100 psi และค่าสุด ที่ 120 psi ตามลำดับ นอกจากนี้ความดันในห้องทดสอบยังมีผลต่อระยะแหวก คือ ความดันเพิ่มขึ้น ระยะแหวกลดลงดังรูปที่ 4.17



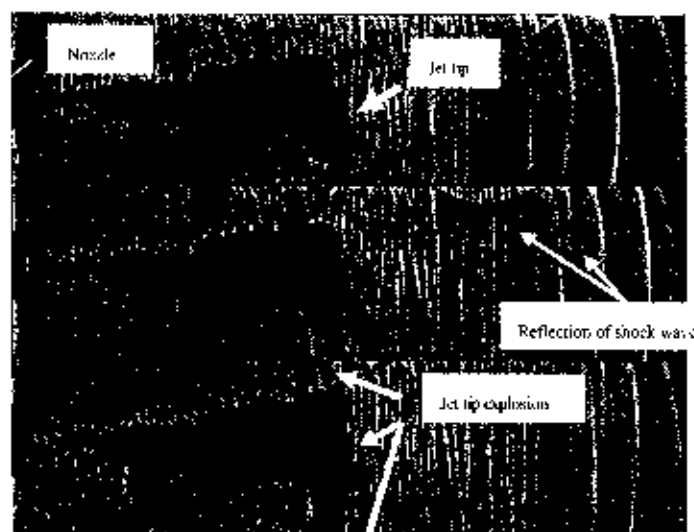
(a) High speed diesel jets: T 30°C, P_{atm}

(b) High speed diesel jets: T 30°C, P 120 psi

รูปที่ 4.17 Comparison of diesel fuel jets between the results from test chamber pressure: (a) atmosphere pressure and (b) 120 psi

จากรูปที่ 4.17 จะเห็นความแตกต่างของลำพู่่น้ำมันดีเซลที่ฉีดเข้าไปในถังทดสอบที่มีความดันที่แตกต่างกันในเวลาเดียวกัน ลำพู่่นของดีเซลที่ฉีดเข้าห้องทดสอบที่มีความดัน 120 psi จะมีความเร็วที่ช้ากว่า ลำพู่่นจะมีขนาดใหญ่กว่า และส่วนหัว (jet tip) จะกระจายตัวออก มุมของกลั่นซอค์ก็จะมีมากกว่า มุมของกลั่นซอค์ที่เกิดจากลำพู่่นที่น้ำมันดีเซลที่ฉีดเข้าไปในห้องทดสอบที่มีความดันบรรยากาศ นอกจากนี้ในห้องทดสอบที่มีความดันที่สูงขึ้นยังไม่เกิดการแตกตัวของน้ำมัน

เชื้อเพลิง ในขณะที่เวลาเพิ่มขึ้น ส่วนหัวของลำพุ่งเชื้อเพลิงจะเริ่มกระจายตัวออก ระยะทางที่เคลื่อนที่น้อยลง ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 Jet tip explosion

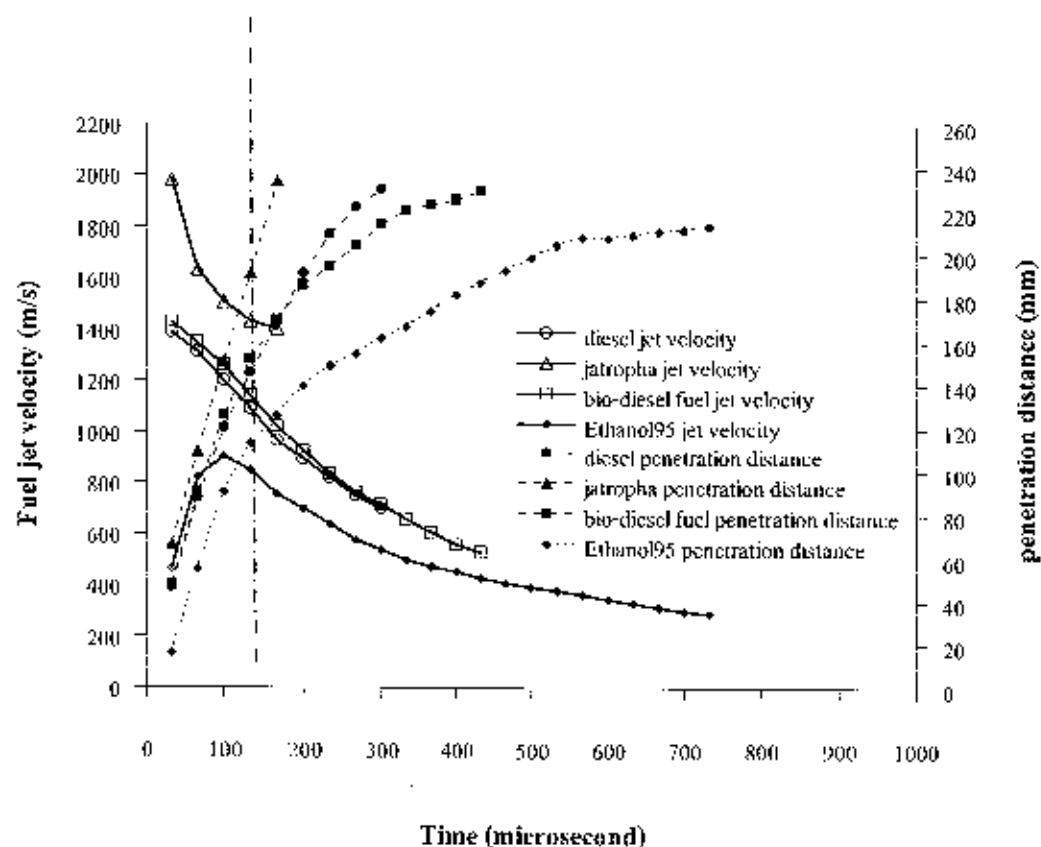
4.3.4 คุณสมบัติของลำพุน้ำมันเชื้อเพลิงภายใต้การเปลี่ยนอุณหภูมิและความดัน

ผลการทดลองที่จะกล่าวถึงในส่วนนี้จะเป็นการเปรียบเทียบคุณสมบัติของลำพุน้ำมันดีเซล ไบโอดีเซล (จากน้ำมันพืชใช้แล้ว) และสบู่ดำ ภายใต้อุณหภูมิและความดันของห้องทดสอบต่างๆ เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิและความดันที่มีต่อคุณสมบัติของลำพุ่งเชื้อเพลิงต่างๆ ข้างต้น

จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.3.1 ผลของความเร็วยังของลำพุ่งเชื้อเพลิงต่างๆ ที่อุณหภูมิบรรยากาศ (30°C) และความดันบรรยากาศ ลำพุ่งของสบู่ดำมีความเร็วสูงที่สุด ($\sim 2,000$ m/s) และเคลื่อนที่ไปได้ไกลกว่าเชื้อเพลิงอื่นที่เวลาเดียวกัน เช่นที่เวลา $166\ \mu\text{s}$ เคลื่อนที่ไปได้ไกล 233 mm ซึ่งเป็นระยะสูงสุดที่ชุดทดลองสามารถวัดได้ ส่วนลำพุ่งที่มีความเร็วต่ำสุดคือ E95 มีความเร็วสูงสุดเพียง 900 m/s และที่เวลา $166\ \mu\text{s}$ ลำพุ่งเคลื่อนที่ไปได้เพียง 126 mm ดังรูปที่ 4.19

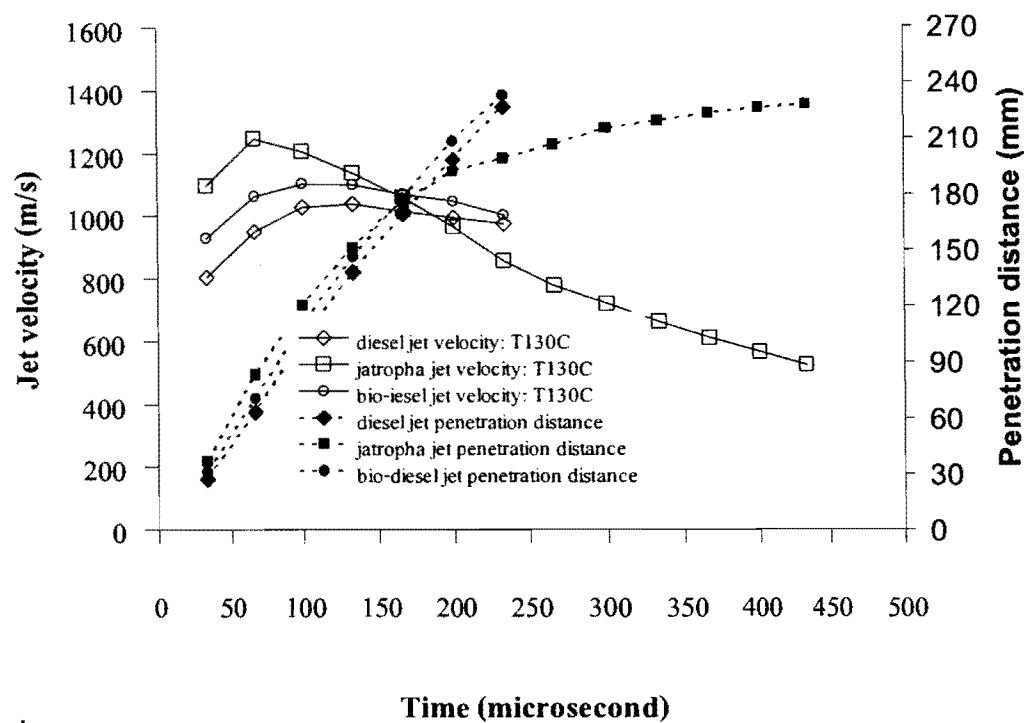
ในส่วนของน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซลมีความเร็วของลำพุ่ง ($\sim 1,400$ m/s) และเคลื่อนที่ไปได้ใกล้เคียงกันมาก เช่นที่เวลา $166\ \mu\text{s}$ น้ำมันดีเซลเคลื่อนที่ไปได้ 168 mm ส่วนน้ำมันไบโอดีเซลเคลื่อนที่ไปได้ 170 mm ดังรูปที่ 4.20

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิภายในห้องทดสอบ พบว่าความเร็วของลำพุ่งเชื้อเพลิงทั้ง 3 ชนิดที่ทดสอบเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่อุณหภูมิบรรยากาศ (ที่อุณหภูมิ 30°C) ดังรูปที่ 4.19, 130°C และ 150°C ดังรูปที่ 4.20 และ 4.21 ลดลง โดยเฉพาะความเร็วของลำพุ่งไบโอดีเซลมีค่าใกล้เคียงกันมาก ความเร็วของลำพุ่งและเคลื่อนที่ของน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซลมีค่าใกล้เคียงกันมาก

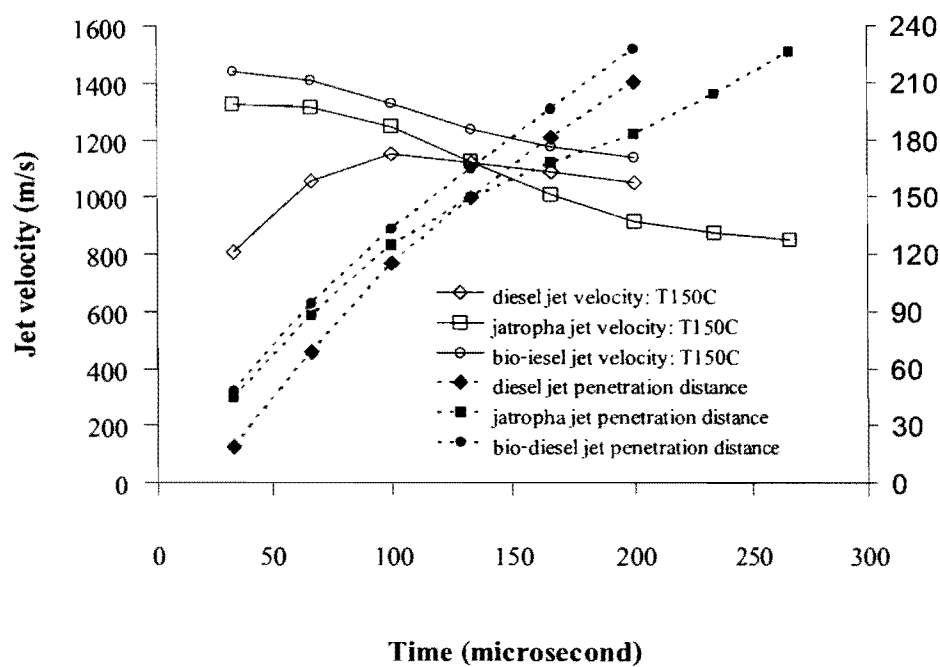


รูปที่ 4.19 Plots of penetration distance of fuel jets and average jet velocity against emerging time
: $T_{30}^{\circ}\text{C}$, P_{atm}

จากรูปที่ 4.20 ผลของคลื่นช็อคกับความเร็วยิงของลำพุ่งเชื้อเพลิงดีเซล สาบุดำ และไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันพืชใช้แล้ว ที่อุณหภูมิของห้องทดสอบ 130°C ความดันบรรยากาศ จากกราฟข้อมูลจะเห็นว่าความเร็วเริ่มต้นของเชื้อเพลิงทั้ง 3 ชนิดจะเพิ่มขึ้น แล้วจึงค่อยๆ ลดลง ความเร็วสูงสุดเป็นสาบุดำ ที่ประมาณ $1,300\text{ m/s}$ (ที่อุณหภูมิ 30°C ความเร็วประมาณ $2,000\text{ m/s}$) ส่วน คลื่นช็อคของน้ำมันสาบุดำอยู่ที่ 230 mm ที่เวลาประมาณ $430\text{ }\mu\text{s}$ (เป็นระยะที่สามารถวัดได้ เนื่องจากข้อจำกัดของชุดทดลอง, ที่อุณหภูมิ 30°C ระยะประมาณ 230 mm ที่เวลา $166\text{ }\mu\text{s}$) ความเร็วสูงสุดของน้ำมันไบโอดีเซลประมาณ $1,100\text{ m/s}$ ที่เวลา $99\text{ }\mu\text{s}$ ส่วนคลื่นช็อค ประมาณ ระยะประมาณ 230 mm ที่เวลา $233\text{ }\mu\text{s}$ น้ำมันดีเซลนี้ความเร็วสูงสุดประมาณ $1,000\text{ m/s}$ ที่เวลา $99\text{ }\mu\text{s}$ คลื่นช็อคประมาณ ระยะประมาณ 230 mm ที่เวลา $233\text{ }\mu\text{s}$



รูปที่ 4.20 Plots of penetration distance of fuel jets and average jet velocity against emerging time : T130 °C, P_{atm}



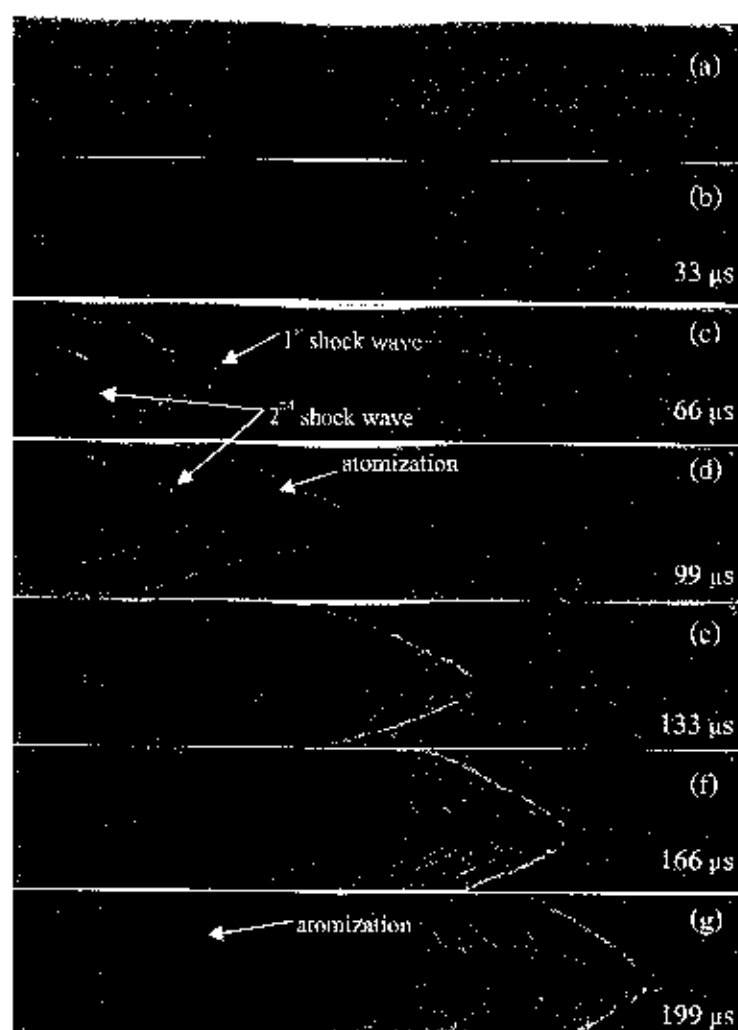
รูปที่ 4.21 Plots of penetration distance of fuel jets and average jet velocity against emerging time: T150 °C, P_{atm}

จากรูปที่ 4.20 ผลของระยะเหวี่ยงกับความเร็วของลำพุ่งเชื้อเพลิงดีเซล สบู่ดำ และไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันพืชใช้แล้ว ที่อุณหภูมิของห้องทดสอบ 150°C ความดันบรรยากาศ จากกราฟข้อมูลจะเห็นว่าความเร็วเริ่มต้นของเชื้อเพลิงทั้ง 3 ชนิดสูงกว่าความเร็วของลำพุ่งที่ห้องทดสอบ อุณหภูมิ 130°C แล้วจึงค่อยๆ ลดลง ความเร็วสูงสุดเป็นไบโอดีเซลที่ประมาณ $1,400\text{ m/s}$ (ที่อุณหภูมิ 30°C ความเร็วประมาณ $2,000\text{ m/s}$) ส่วนระยะเหวี่ยงอยู่ที่ 230 mm ที่เวลาประมาณ $199\text{ }\mu\text{s}$ (เป็นระยะที่สามารถวัดได้ เนื่องจากข้อจำกัดของชุดทดลอง, ที่อุณหภูมิ 30°C ระยะประมาณ 230 mm ที่เวลา $430\text{ }\mu\text{s}$) ซึ่งจะเห็นว่าที่ใช้ลดลงในระยะทางเท่ากัน

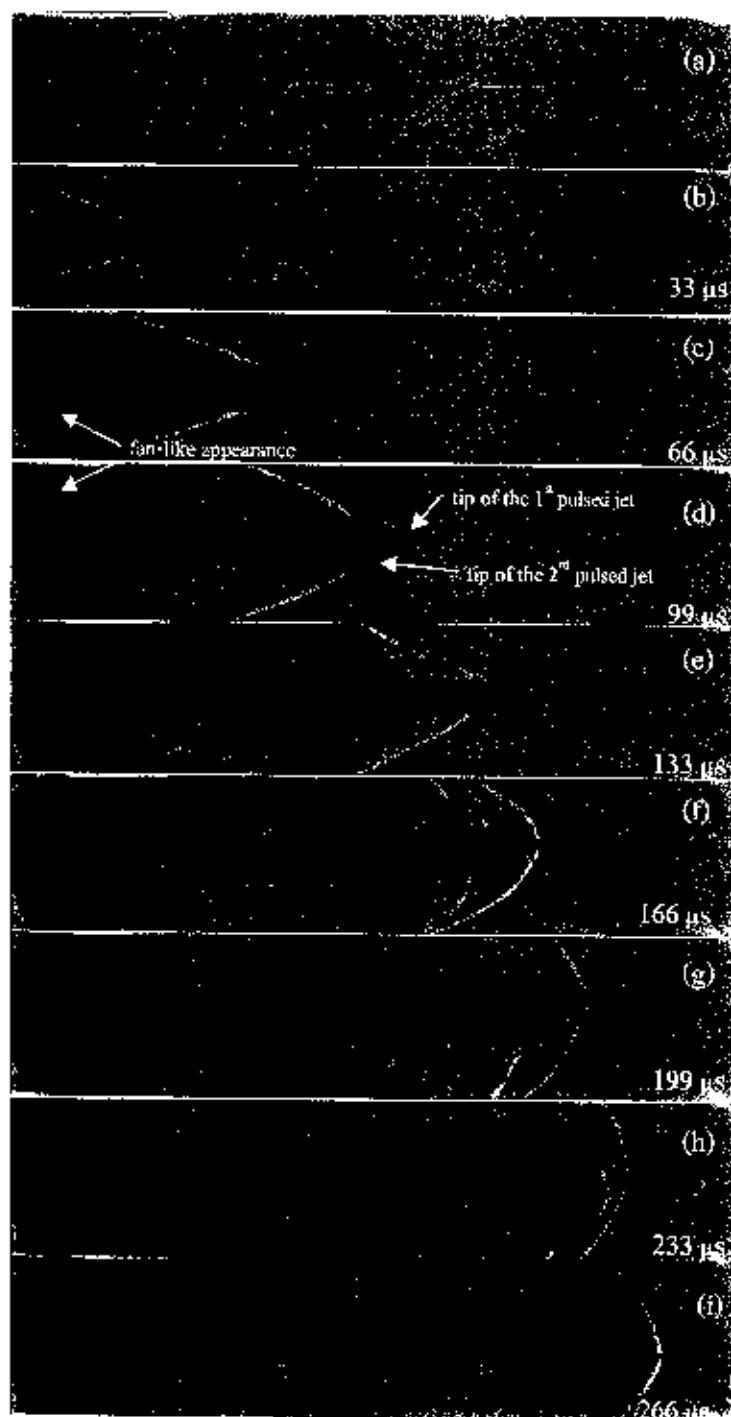
ความเร็วสูงสุดของน้ำมันสบู่ดำประมาณ $1,300\text{ m/s}$ ที่เวลา $33\text{ }\mu\text{s}$ ส่วนระยะเหวี่ยงประมาณ ระยะประมาณ 230 mm ที่เวลา $260\text{ }\mu\text{s}$ ซึ่งจะเห็นว่าเวลาลดลง น้ำมันดีเซลมีความเร็วสูงสุดประมาณ $1,100\text{ m/s}$ ที่เวลา $99\text{ }\mu\text{s}$ Penetration distance ประมาณ ระยะประมาณ 210 mm ที่เวลา $199\text{ }\mu\text{s}$

รูปที่ 4.22 แสดงลำพุ่งเชื้อเพลิงดีเซลที่ฉีดเข้าไปในห้องทดสอบที่อุณหภูมิ 150°C ความดันบรรยากาศ ด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง Photron SA-5 กับชุด Shadowgraph Technique ที่ความเร็วเฉลี่ยเริ่มต้น (รูปที่ 4.23b) ประมาณ 800 m/s เวลา $33\text{ }\mu\text{s}$ และความเร็วเฉลี่ยสุดท้าย (รูปที่ 4.23g) ประมาณ $1,050\text{ m/s}$ ที่เวลา $199\text{ }\mu\text{s}$ ที่รูปที่ 4.23c จะเห็นคลื่นช็อค 2 ลูก ซึ่งเกิดจากลำพุ่งของดีเซลที่ถูกฉีดออกมาด้วยความเร็วภายในแตกต่างกัน แต่คลื่นช็อคลูกที่ 1 ยังคงนำหน้า คลื่นช็อคลูกที่ 2 นั้นแสดงว่าลำพุ่งลูกที่ 1 มีความเร็วสูงกว่า นอกจากนี้ยังเห็นการเกิดการแตกตัว (atomization) ของลำพุ่งน้ำมัน

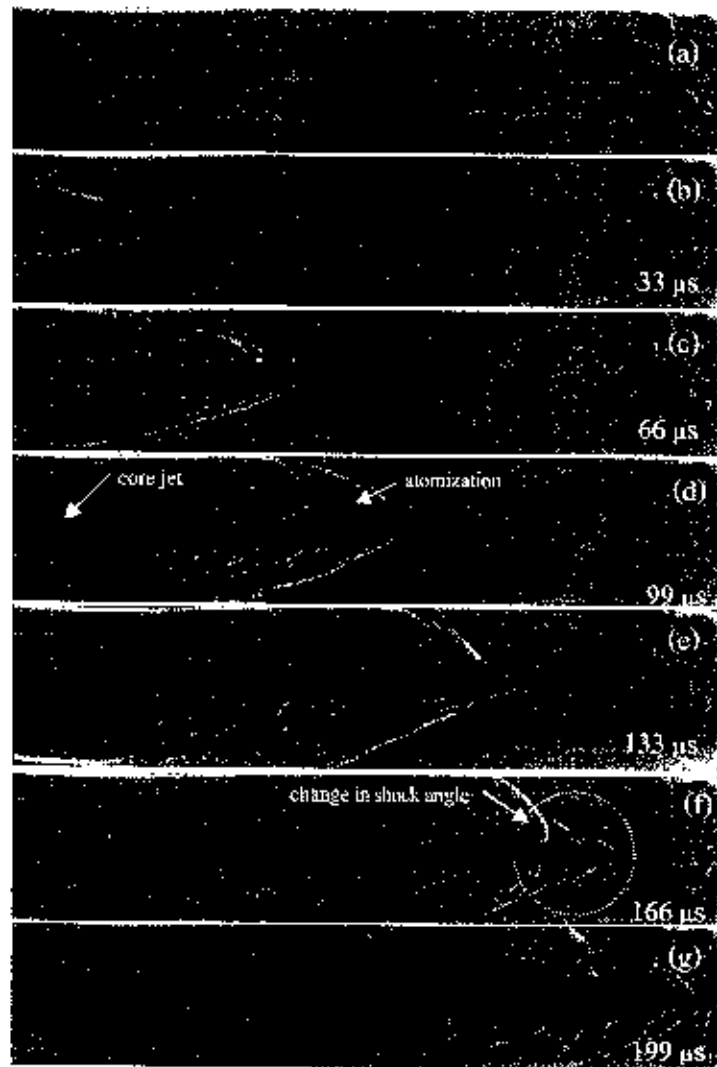
รูปที่ 4.23 แสดงลำพุ่งน้ำมันสบู่ดำที่ฉีดเข้าไปในห้องทดสอบที่อุณหภูมิ 150°C ความดันบรรยากาศ ด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง Photron SA-5 กับชุด Shadowgraph Technique ที่ความเร็วเฉลี่ยเริ่มต้น (รูปที่ 4.23b) ประมาณ $1,326\text{ m/s}$ ที่เวลา $33\text{ }\mu\text{s}$ และความเร็วเฉลี่ยสุดท้าย (รูปที่ 4.23i) ประมาณ 850 m/s ที่เวลา $266\text{ }\mu\text{s}$ ที่รูปที่ 4.23c จะเห็น ลำพุ่ง 2 ลูก ซึ่งเกิดจากลำพุ่งของดีเซลที่ถูกฉีดออกมาด้วยความเร็วภายในแตกต่างกัน และความเร็วของลำพุ่งลูกที่ 2 เริ่มมีความเร็วที่สูงขึ้น จนมีความเร็วที่สูงกว่าลำพุ่งลูกที่ 1 ที่เวลา $233\text{ }\mu\text{s}$ จนถึงเวลา $266\text{ }\mu\text{s}$ ลำพุ่งลูกที่ 2 สูงกว่าลูกที่ 1 และ คลื่นช็อคลูกที่ 2 นำหน้าคลื่นช็อคลูกที่ 1 นอกจากนี้ยังเห็นการเกิดการกระจายตัว (fan-like) ของลำพุ่งน้ำมันที่บริเวณส่วนปลายหัวฉีด



รูปที่ 4.22 Diesel fuel jet and shock wave at $M=2.1$ ($v_j = 1,150$ m/s, $C=528$ m/s @150°C)



รูปที่ 4.23 Jatropha curcas oil jet and shock wave at $M = 2.5$ ($v_j = 1.325$ m/s, $C = 528$ m/s @ 150°C)

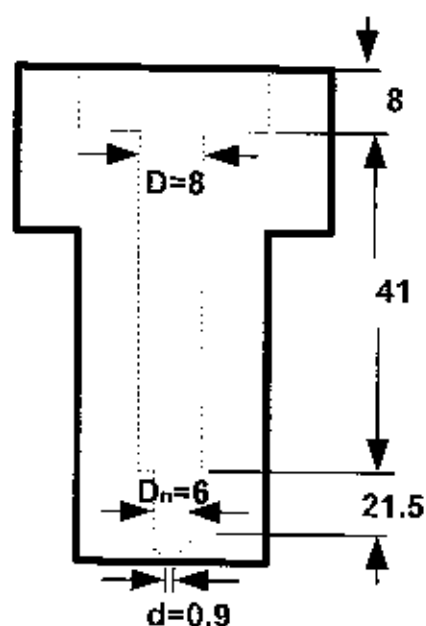


รูปที่ 4.24 Bio-diesel jet and shock wave at $M=2.7$ ($v_j=1,441$ m/s, $C=528$ m/s @150°C)

รูปที่ 4.24 แสดงลำพ่นน้ำมันไบโอดีเซลที่ฉีดเข้าไปในห้องทดสอบที่อุณหภูมิ 150°C ความดันบรรยากาศ ด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง Photon SA-5 กับชุด Shadowgraph Technique ที่ความเร็วเฉลี่ยเริ่มต้น (รูปที่ 4.24b) ประมาณ 1,441 m/s ที่เวลา 33 μ s และความเร็วเฉลี่ยสุดท้าย (รูปที่ 4.24g) ประมาณ 1,150 m/s ที่เวลา 199 μ s ที่รูปที่ 4.22d จะเห็นลำพ่นของไบโอดีเซลเริ่มแตกตัวตั้งแต่รูปที่ 4.24b และชัดเจนมากขึ้นตั้งแต่รูปที่ 4.24d รูปที่ 4.24e แสดงให้เห็นถึงลำพ่นลูกที่ 2 ชัดเจนขึ้นเนื่องจากส่วนหัวลำพ่นลูกแรก แตกตัว (รูปที่ 4.24d) ในรูปที่ 4.24f จะเห็นการเปลี่ยนแปลงของคลื่นช็อคก นั่นแสดงถึงความเร็วที่เปลี่ยนแปลงของลำพ่น เกิดจากลำพ่นที่ถูกฉีดออกมาด้วยความเร็วภายในแตกต่างกัน และความเร็วของลำพ่นลูกที่ 2 มีความเร็วที่สูงขึ้น จนมีความเร็วที่สูงกว่าลำพ่นลูกที่ 1]

4.3.5 คุณสมบัติของลำพ่นน้ำมันเชื้อเพลิงจากหัวฉีดดีเซลแบบรูเดี่ยว

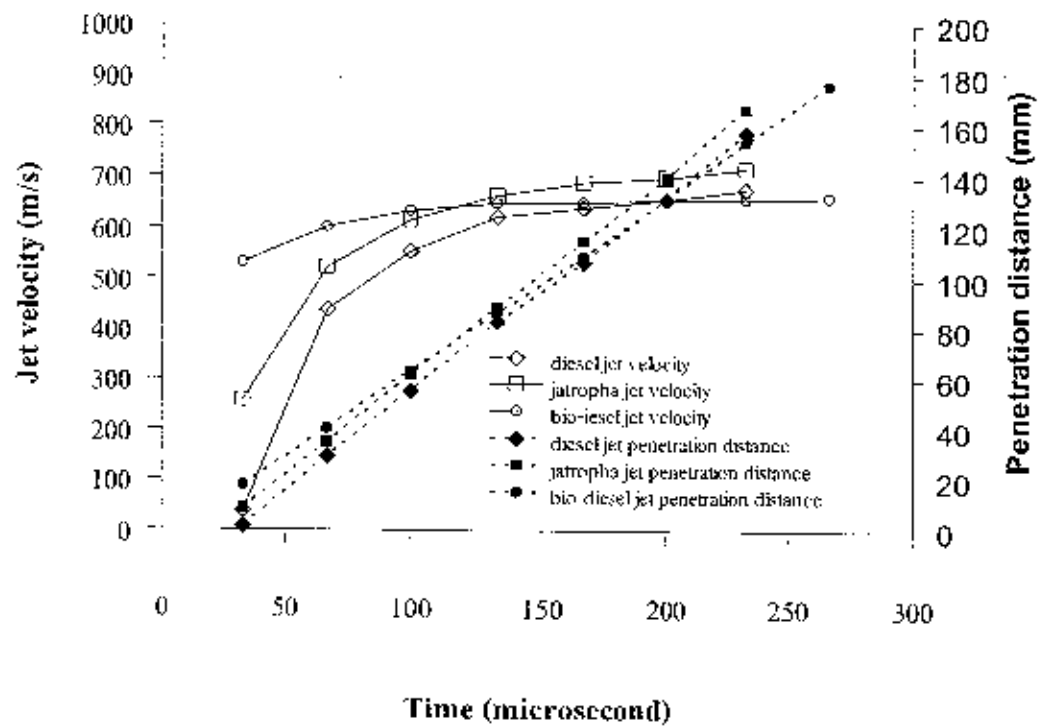
ผลการทดลองที่จะกล่าวถึงในส่วนนี้จะเป็นการเปรียบเทียบคุณลักษณะของลำพ่นน้ำมันเชื้อเพลิง ไบโอดีเซล (จากน้ำมันพืชใช้แล้ว) และสบู่ดำ ภายใต้อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ โดยลำพ่นน้ำมันเชื้อเพลิงถูกกำเนิดจากการกระแทกของลูกปืนที่มีความเร็วประมาณ 800 m/s (ดินปืน 3 g) ปริมาณของเหลวในหัวฉีด 4 cc หัวฉีดขนาด 0.9 mm ดังรูปที่ 4.25



(Unit: mm.)

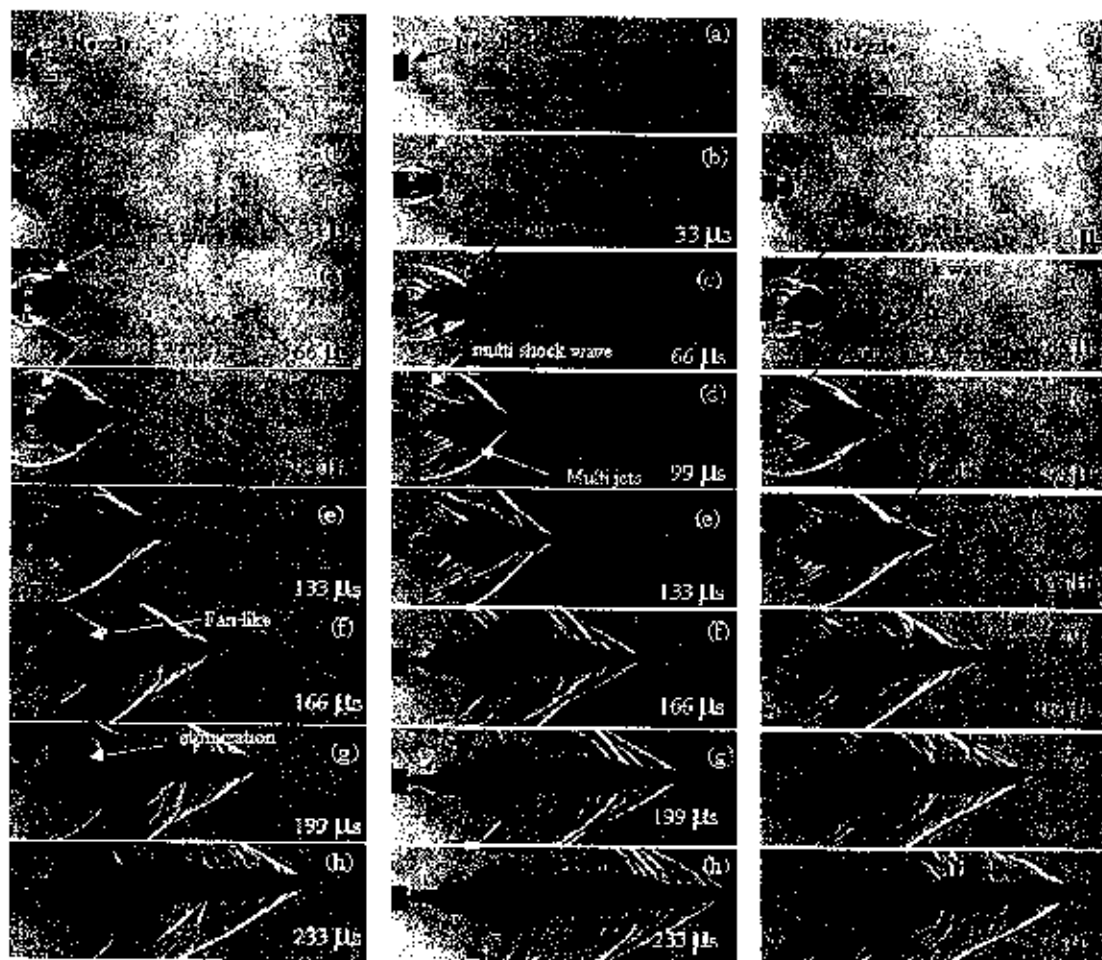
รูปที่ 4.25 single-hole diesel nozzle

จากผลการทดลองพบว่าความเร็วของลำพ่นทั้ง 3 ชนิดต่ำกว่าหัวฉีดที่ออกแบบมาก เฉลี่ยประมาณ 700 m/s ความเร็วของลำพ่นใกล้เคียงกัน และความเร็วค่อนข้างคงที่กว่า ส่วน Penetration distance มีค่าใกล้เคียงกัน เช่น ที่ 166 μ s Penetration distance ประมาณ 100 mm ดังรูปที่ 4.26 ซึ่งสาเหตุเกิดจากขนาดของลอคอดที่โตกว่าหัวฉีดที่ออกแบบ (0.7 mm) และ $1/d$ มีค่าเป็นศูนย์



รูปที่ 4.26 Plots of penetration distance of fuel jets and average jet velocity against emerging time from single-hole diesel nozzle

จากรูปที่ 4.27 ภาพถ่ายลำพุ่งของน้ำมันดีเซล ไบโอดีเซล และสบูดำจากหัวฉีดเครื่องยนต์ที่มีขนาด 0.9 mm ด้วยเทคนิค Shadowgraph ซึ่งจากภาพจะเห็นได้ชัดเจนถึงลักษณะของลำพุ่งที่เริ่มต้นที่ 33 μs จะเป็น bow liquid jet และคลื่นช็อกซึ่งจะแตกต่างจากหัวฉีดแบบทราเวอร์ส คือออกแบบและทำการทดลองในลักษณะนี้ นอกจากนี้พฤติกรรมที่แตกต่างกันอย่างมากคือ การเกิด คลื่นช็อกหลายครั้ง (multiple pulse shock wave) ในหัวฉีดดีเซล ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่น่าสนใจต่อไป



(a) Diesel jet

(b) Biodiesel jet

(c) Jatropha curcase oil jet

รูปที่ 4.27 Shadowgraph photographs of high-speed fuel jet from a diesel nozzle

บทที่ 5

สรุป

5.1 สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาคุณลักษณะลำพุ่งเชื้อเพลิงเหลวความเร็วสูงและความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้กับหัวฉีดของเครื่องยนต์โดยการทดลอง ได้มีการศึกษาคุณลักษณะของชุดทดลองยิงกระสุนความเร็วสูงเพื่อปรับเทียบความเร็ว ผลิกลำพุ่งที่มีความเร็วสูงกว่าความเร็วของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ฉีดได้ในปัจจุบัน (ประมาณ 700 m/s) เล็กน้อย (สูงกว่า 700 m/s) ในกรณีที่ฉีดภายในสภาวะบรรยากาศ ใช้หัวฉีดที่มีรูปร่างต่างๆ และหัวฉีดที่ใช้ในเครื่องยนต์ โดยเน้นความเร็วของลำพุ่งที่สูงกว่าเครื่องยนต์เล็กน้อย ศึกษาคุณลักษณะของลำพุ่งด้วย วิธีถ่ายภาพเลเซอร์และกล้องวิดีโอความเร็วสูง นอกจากนี้ยังพยายามที่จะสร้างอุณหภูมิและความดันในห้องทดสอบให้มีลักษณะเช่นเดียวกับห้องเผาไหม้ด้วย ซึ่งจากข้อมูลที่ได้จากการทดลองศึกษาสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

5.1.1 ปริมาณดินขับกับความเร็วของลูกปืนและลำพุ่ง

จากการทดลอง ชุดทดลองยิงกระสุนความเร็วสูงได้ตามที่ตั้งวัตถุประสงค์ไว้ โดยการเพิ่มหรือลดความเร็วของลูกปืนด้วยการเพิ่มปริมาณดินขับ จาก 2 - 7 g จึงจะได้ความเร็วของลูกปืนที่ด้วยการทดลองยิงกระสุนความเร็วสูง เพื่อให้เหมาะสมกับการผลิตลำพุ่งความเร็วสูงพบว่า ชุดทดลองสามารถผลิตความเร็วกระสุนได้สูงสุดประมาณ 1,200 m/s ที่ปริมาณดินปืน 7 g ด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูง และความเร็วกระสุนได้สูงสุดประมาณ 1,300 m/s ในกรณีของหลักการตัดลำแสงเลเซอร์ในการทดลองกำหนดลำพุ่งทั้งหมดจะใช้ดินขับ 3 g (800 m/s) เพื่อให้ลำพุ่งมีความเร็วสูงกว่าในเครื่องยนต์จริงเล็กน้อย

5.1.2 ปริมาณดินปืนและรูปทรงของหัวฉีดกับความเร็วของลำพุ่ง

จากผลการศึกษาที่ดินขับ 3 g กับหัวฉีดรูปทรงต่างดังที่กล่าวมาในบทที่ 4 พบว่าหัวฉีดที่มีมุม 30° กำหนดลำพุ่งเชื้อเพลิงได้ความเร็วสูงที่สุด ซึ่งในกรณีของของเหลวทดสอบเป็นน้ำความเร็วของลำพุ่งสูงถึง 2,200 m/s และ 1,500 m/s กับ 1,200 m/s ในกรณีหัวฉีดมุม 60° และ Step nozzle ของดินขับ 7 g ตามลำดับ

จากผลของความเร็วของลำพุ่งที่วัดได้จากหัวฉีดรูปทรงต่างๆ จึงเลือกใช้หัวฉีดที่มีขนาด Orifice 0.7 mm มุม 30° และ Id 4.2 mm ในการทดลอง

5.1.3 คุณลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูง

5.1.3.1 ความเร็วของลำพุ่งเชื้อเพลิงต่างๆ ที่อุณหภูมิบรรยากาศ (30°C) และความดันบรรยากาศ เปรียบเทียบผลของความเร็วของลำพุ่งเชื้อเพลิง 4 ชนิด คือ ดีเซล (Diesel) ไบโอดีเซล จากน้ำมันพืชใช้แล้ว (bio-diesel) ญูปัต (jatropha curcas oil) และ E95 (ethanol 95%) โดยภาพถ่ายกล้องวิดีโอความเร็วสูงร่วมกับ Z-type shadowgraph system

ผลการทดลองพบว่าลำพุ่งของน้ำมันเชื้อเพลิงจากญูปัตมีความเร็วสูงที่สุด ($\sim 2,000$ m/s) ความเร็วสูงสุดของน้ำมันดีเซลมีค่าสูงสุดที่ประมาณ 1,400 m/s ความเร็วสูงสุดของไบโอดีเซลประมาณ 1,400 m/s ส่วนความเร็วสูงสุดของลำพุ่งเชื้อเพลิงที่มีค่าต่ำสุดคือ E95 ประมาณ 900 m/s ผลของความเร็วกว่ากันเนื่องจากคุณสมบัติของเชื้อเพลิง

5.1.3.2 คุณลักษณะของลำพุ่งน้ำมันดีเซล ที่อุณหภูมิบรรยากาศ (30°C), 100°C , 130°C และ 150°C , ที่ความดันบรรยากาศ พบว่าความเร็วของลำพุ่งที่ความดันบรรยากาศมีค่าสูงสุดประมาณ 1,400 m/s และความเร็วจะลดลงอย่างต่อเนื่อง ส่วนในกรณีในห้องทดสอบถูกปรับให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ผลของความเร็วของลำพุ่งเริ่มต้นจะเปลี่ยนไป คือความเร็วเริ่มต้นจะมีค่าต่ำและเพิ่มความเร็วขึ้นจนถึงความเร็วสูงสุดที่ทำได้แล้วจึงจะลดลง ในกรณีที่ห้องทดสอบมีอุณหภูมิ 100°C - 150°C ลำพุ่งน้ำมันดีเซลมีความเร็วสูงสุดประมาณ 1100 m/s โดยที่อุณหภูมิยังเพิ่มขึ้นความเร็วเริ่มต้นของลำพุ่งยิ่งลดลง ซึ่งสาเหตุเกิดจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้การแตกตัวของน้ำมันดีเซลความเร็วต้นจึงลดลง

5.1.3.3 คุณลักษณะของลำพุ่งน้ำมันดีเซลที่อุณหภูมิบรรยากาศ (30°C) และที่ความดันบรรยากาศ, 50 psi, 80 psi และ 120 psi ผลการทดลองพบว่าความเร็วเริ่มต้นของลำพุ่งจะสูงและต่ำลงๆ ลดลงอย่างต่อเนื่อง ความเร็วสูงสุดของลำพุ่งจะสูงสุดที่ความดันบรรยากาศประมาณ 1,400 m/s, 1,200 m/s 1,100 m/s และ 1,000 m/s ที่ความดัน 50 psi 100 psi และ 120 psi ตามลำดับ นอกจากนี้ความดันในห้องทดสอบยังมีผลต่อระยะแนวทอ คือ ความดันเพิ่มขึ้นระยะแนวทอลดลง ซึ่งสาเหตุเกิดจากความดันที่สูงขึ้นทำให้เกิดแรงต้าน (Drag force) ยิ่งเคลื่อนไปความเร็วก็จะยิ่งลดลง

5.1.3.4 คุณลักษณะของลำพุ่งน้ำมันเชื้อเพลิงภายใต้การเปลี่ยนอุณหภูมิและความดัน การเปรียบเทียบคุณลักษณะของลำพุ่งน้ำมันดีเซล ไบโอดีเซล (จากน้ำมันพืชใช้แล้ว) และญูปัต ภายใต้อุณหภูมิและความดันของห้องทดสอบต่างๆ เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิและความดัน ซึ่งผลการทดลองที่อุณหภูมิบรรยากาศ (30°C) และความดันบรรยากาศ ลำพุ่งของญูปัตมีความเร็วสูงที่สุดประมาณ 2,000 m/s และเคลื่อนที่ไปได้ไกลกว่าเชื้อเพลิงอื่นที่เวลาเดียวกัน ส่วนของน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซลมีความเร็วของลำพุ่งใกล้เคียงกันประมาณ 1,400 m/s

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิภายในห้องทดสอบ พบว่าความเร็วของลำพุ่งเชื้อเพลิงทั้ง 3 ชนิดที่ทดสอบเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่อุณหภูมิบรรยากาศ (ที่อุณหภูมิ 30°C) 130°C และ 150°C ลดลง โดยเฉพาะความเร็วของลำพุ่งในช่วงเริ่มต้น โดยที่น้ำมันดีเซลจะมีความเร็วเริ่มต้นต่ำสุดที่ประมาณ 800 m/s ที่ทุกๆ อุณหภูมิ

5.1.3.5 คุณสมบัติของลำพุ่งน้ำมันเชื้อเพลิงจากหัวฉีดดีเซลแบบรูเดี่ยว ของลำพุ่งน้ำมันดีเซล ใบโตดีเซล และเบู่ลำ ภายใต้อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ ผลการทดลองพบว่าความเร็วของลำพุ่งทั้ง 3 ชนิดมีความเร็วเฉลี่ยประมาณ 700 m/s ซึ่งต่ำกว่าหัวฉีดชนิดกรวยมุม 30° เนื่องจากหัวฉีดสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลไม่มีส่วนของคอกของคอกทำให้ไม่เกิดการสัดขั้วลำพุ่ง ในช่วงที่ถูกกระแทกด้วยลูกปืน และขนาดของรูฉีดขนาดเล็กที่ต่ำกว่า

5.2 ปัญหาและข้อเสนอมณะ

จากงานวิจัยนี้ มีปัจจัยหลายอย่างที่อาจทำให้ผลการทดลองนั้นมีความคลาดเคลื่อน เนื่องจากสภาวะในการทดสอบ ที่ยากที่จะควบคุม ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นและข้อเสนอมณะกังานวิจัยนี้มีดังนี้

5.2.1 ดินขับ (gunpowder)

ดินขับที่ใช้เป็นชนิดไร้ควัน (Smokeless powder) เป็นดินขับที่ใช้ในลูกกระสุนปืน ไม่สามารถหาซื้อได้ในปริมาณมากๆ ต้องซื้อลูกกระสุนแล้วถอดหัวลูกกระสุนปืนออก ซึ่งเป็นอันตราย ราคาสูงและมีปริมาณที่น้อย แต่มีคุณภาพสูงกว่าดินปืนชนิดดำ (Black powder) ซึ่งหาได้มากกว่า แต่คุณภาพไม่คงที่ในแต่ละครั้งที่จัดหาได้ นอกจากนี้การเผาไหม้ดินขับชนิดดำยังมี煙มากกว่าชนิดไร้ควัน ซึ่งต่อไปอาจเลือกวิธีปล่อยลูกปืนด้วยวิธีอื่นที่มีความแม่นยำในการปล่อยลูกปืน เช่น rail gun เป็นต้น

นอกจากนี้ ดินขับยังมีความเป็นกรดทำให้วัสดุที่ใช้ถูกกัดกร่อนจึงต้องเลือกใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติที่ดี เช่น ปลอกลูกปืน (Cartridge) ต้องใช้เหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) และทำความสะอาดชุดทดลองอย่างสม่ำเสมอ

ความชื้นมีผลอย่างมากต่อการจุดติดของดินขับ และชนวน (Primer gap) ดังนั้นก่อนการทดลองต้องอุ่นดินปืนด้วยความร้อน ซึ่งต้องคอยรักษาอุณหภูมิเนื่องจากดินขับสามารถติดไฟได้ หากให้ความร้อนในเวลานานๆ

5.2.2 หัวฉีด (Nozzle)

หัวฉีดมีผลโดยตรงต่อคุณลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูง จำเป็นต้องออกแบบ สร้างให้มีขนาดที่เท่ากันซึ่งทำได้ยากเนื่องจากขนาดของรูฉีด มีขนาดเล็กมาก มุมภายในทำได้ยาก จึงไม่สามารถสร้างหัวฉีดให้มีมุมที่น้อยกว่า 30° ได้ การทดลองจำเป็นต้องใช้หัวฉีดปริมาณมาก เนื่องจากใช้งานหัวฉีดจะมีขนาดของรูฉีดที่โตขึ้น ด้านข้างหรือด้านหน้าของหัวฉีดบวม หากใช้วัสดุที่มีความเหนียวสูง หรือหากใช้วัสดุที่มีความแข็งหรือชุบแข็ง ทำได้ยากและเมื่อใช้งานหัวฉีดก็จะแตก ดังนั้นการสร้างหัวฉีดที่ดีมากจึงมีราคาสูง ดังนั้นจึงต้องใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการใช้งานและการผลิต

5.2.3 ถังทดสอบ (Test chamber)

โดยการใช้งานที่ความดันและอุณหภูมิบรรยากาศ ถังทดสอบจะสามารถใช้งานได้ดี แต่เมื่อเพิ่มความดัน ส่วนหน้าต่างด้านข้างที่ใช้ PMMA ชนิดใสหนา 25 mm จะแตก หรือเสียรูปเนื่องจากความร้อน ทำให้ภาพถ่ายเกิดเงาของแสงที่หักเห หากใช้แผ่น PMMA ในการทดลองเปลี่ยนแปลงความดันของถังทดสอบจึงต้องให้พื้นที่ของแผ่น PMMA มีเท่าที่จำเป็น หรือหากทดลองเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในถังทดสอบต้องทำการทดลองจนแล้วเสร็จ เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิภายในลดลงแผ่น PMMA จะเสียรูปไม่สามารถใช้งานได้อีกต้องเปลี่ยนใหม่ทันที

นอกจากแผ่น PMMA แล้วอาจใช้วัสดุใตที่ทนความดันหรืออุณหภูมิได้สูงกว่า เช่น กระบอกหรือแผ่นควอตซ์ เป็นต้น

5.2.4 ระบบถ่ายภาพ (Visualization)

ชุดถ่ายภาพนอกจากกล้องวิดีโอความเร็วสูงที่มีราคาสูงมากและ ชุดเลนส์และกระจก ยังมีราคาค่อนข้างสูงและหาซื้อยาก และความละเอียดในการดูแลรักษา ปรับตั้ง จำเป็นต้องใช้ประสบการณ์ในการปรับตั้ง และการดูแลความสะอาด ของผิว ชุดเลนส์และกระจก

เอกสารอ้างอิง

- [1] F. P. Bowden and J. H. Brunton, Damage to solids by liquid impact at supersonic speeds, *Nature*, vol. 181, pp. 873-875, 1958.
- [2] Ryhming I.I., *Journal of Applied Mathematics and Physics (ZAMP)* 24: 149-164 (1973).
- [3] M. Rochester and J. Brunton, "High speed impact of liquid jets on solid," *1st International Symp on Jet Cutting Technology*, 1972, paper A1, Coventry, UK
- [4] J. E. Field and M. B. Lesser, On the mechanics of high speed liquid jets, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, vol. 357, pp. 143-162, 1977.
- [5] H. H. Shi, Study of Hypersonic Liquid Jet, Ph.D. Thesis, Tohoku University, Sendai, Japan, 1994.
- [6] B. Milton, R. Casey, M. Behnia, S. Yudanov, and W. Mitchell, "Development of a tunable diesel engine injection system for engine calibration and optimization," ARC Research Report, Australia, 1998
- [7] K. Piantog, "Supersonic liquid diesel fuel jets: generation, shock wave characteristics, auto-ignition feasibilities," Ph.D. thesis, the University of New South Wales, Sydney, Australia, 2002
- [8] T. Kakegawa, T. Suzuki, K. Tsujimura, and M. Shimoda, "A study on Combustion of High Pressure Fuel Injection for Direct Injection Diesel Engine," SAE Paper 880422, 1988.
- [9] G. Greeves and S. Tullis, "Contribution of EUI-200 and Quiescent Combustion System toward US94 Emissions," SAE Paper 930274, 1993.
- [10] B.E. Milton, R. Casey, M. Behnia, S. Yudanov, and W. Mitchell, "Development of a Tunable Diesel Engine Injection System for Engine Calibration and Optimization," ARC Research Report, The University of New South Wales, Sydney, NSW, Australia, 1998.
- [11] T. Nakahira, M. Komori, N. Nishida, and K. Tsujimura, "A Study of Shock Wave Generation around High Pressure Fuel Spray in Diesel Engine," Shock Waves Proceedings, Sendai, Japan, Springer-Verlag, 1991, pp. 1271-1276.
- [12] T. Minami, I. Yamaguchi, M. Shintani, K. Tsujimura, and T. Suzuki, "Analysis of Fuel Spray Characteristics and Combustion Phenomena under High Pressure Fuel Injection," SAE Paper 900438, 1990.
- [13] H. Akiyama, H. Nishimura, Y. Ibaraki, and N. Iida, "Study of Diesel Spray Combustion and Ignition Using High Pressure Fuel Injection and Micro-hole Nozzle with a Rapid Compression Machine," JSAE Review, vol. 9, 1998, pp. 319-327.

- [14] F. Pischinger, U. Reuter, and E. Scheid, "Self-ignition of Diesel Sprays and its Dependence of Fuel Properties and Injection Parameters," *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, vol. 110, 1988, pp. 399-404.
- [15] K. Nishida, H. Ochiai, M. Arai, and H. Hiroyasu, "Characterization of Diesel Fuel Spray by Ultrahigh-Pressure Injection," *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part B*, vol. 63(605), 1997, pp. 344-349 (Japanese).
- [16] K. Pianthong, B.E. Milton, and M. Behnia, "Fundamentals of supersonic diesel fuel jets for use in diesel engine," *Proceedings of the 12th International Pacific Conference on Automotive Engineering (12IPC)*, paper no. D08, 1-4 April 2003, Bangkok, Thailand.
- [17] Technology on Gasoline direct Injection (GDI), Mitsubishi-motors Website, <http://www.mitsubishi-motors.co.jp/inter/technology/GDI/page1.html>, 15 Dec 03.
- [18] J. O'Keefe, W. Wrinkle, and C. Scully, "Supersonic liquid jets," *Nature*, Vol. 213, 1967, pp. 23-25
- [19] H. Shi and K. Takayama, "Generation of hypersonic liquid fuel jets accompanying self-combustion," *Shock Waves*, Vol. 9, No. 5, 1999, pp.327-332.
- [20] K. Pianthong, S. Zakrzewski, M. Behnia, and B.E. Milton, Supersonic liquid jets; their generation and shock wave characteristics, *Shock Waves International Journal*, vol 11, no 6, pp 457 – 466, 2002.
- [21] K. Pianthong, S. Zakrzewski, M. Behnia, and B.E. Milton, "Characteristics of impact driven supersonic liquid jets," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 27 (5), pp. 589-598, 2003.
- [22] T. Nakahira, M. Komori, N. Nishida, and K. Tsujimura, "A study of shock wave generation around high pressure fuel spray in diesel engine," *Shock Waves Proceedings*, Vol. 2, 1991, pp. 1271-1276
- [23] K. Pianthong, B.E. Milton, and M. Behnia, "Generation and shock wave characteristics of unsteady pulsed supersonic liquid jets," *Atomization and Sprays*, vol. 13, no. 5&6, pp. 475-498, 2003.
- [24] B.E. Milton, K. Pianthong, "Prediction of the driving conditions for hypersonic liquid fuel jets," *Proceedings of the 24th International Symposium on Shock Waves (ISSW24)*, Beijing, 11-16 July 2004, paper no. 3771.
- [25] K. Pianthong, S. Zakrzewski, B.E. Milton, and M. Behnia, "Contribution to auto-ignition of the shock wave characteristics from supersonic diesel fuel jets," *Proceedings of the 23rd*

International Symposium on Shock Waves (ISSW23) Conference, Fort Worth, Texas, USA, paper no. 2398, pp. 165-172, 22-27 July 2001.

[26] K. Piantong, M. Behnia, and B.E. Milton, "Study of shock wave characteristics of supersonic diesel fuel jets using a shadowgraph technique," *Proceedings of the 14th Australasian Fluid Mechanics Conference (AFMC14)*, Adelaide, Australia, pp. 777-780, 9-14 December 2001.

[27] K. Piantong, M. Behnia, and B.E. Milton, "Visualization of supersonic diesel fuel jets using shadowgraph technique," *Proceedings of the 24th International Congress on High-Speed Photography and Photonics (ICHSPP24)*, Sendai, Japan, pp. 845-855, 24-29 September 2000.

[28] K. Piantong, M. Behnia, and B.E. Milton, "Visualization of supersonic liquid diesel fuel jets: effect of nozzle geometries on jet shapes and shock waves characteristics," *Proceedings of the 7th Asian Symposium on Visualization (7ASV)*, 3-7 Nov. 2003, Singapore.

[29] K. Piantong, K. Takayama, B.E. Milton, and M. Behnia, "Multiple pulsed hypersonic liquid diesel fuel jets driven by projectile impact," *Shock Waves Journal*, Vol. 14, no. 1&2, pp. 73-82, 2005.

[30] G.L. Smallwood and O.L. Gulder, "Views on the structure of transient diesel sprays," *Atomization and sprays*, vol. 10, pp. 355-386, 2000.

[31] S. Zakrzewski; A Numerical and Experimental Investigation of High-Speed Liquid Jets - Their Characteristics and Dynamics. PhD Thesis, UNSW. Sydney, Australia (2002)

[32] S. Zakrzewski, K. Piantong, M. Behnia, and B.E. Milton, "CFD predictions of bow shock characteristics ahead of a high-speed liquid jet," *Proceedings of the 23rd International Symposium on Shock Waves (ISSW23) Conference*, Fort Worth, Texas, USA, paper no. 3124, pp. 698-704, 22-27 July 2001.

[33] S. Zakrzewski, K. Piantong, M. Behnia, and B.E. Milton, "A blunt body analogy for bow shock characteristics in front of a supersonic liquid jet," *Proceedings of the 2nd International Conference on Computational Fluid dynamics (ICCFD2)*, Sydney, Australia, 15-19 July 2002, pp. 229 - 234.

[34] M. Behnia, S. Zakrzewski, K. Piantong, B.E. Milton, and K. Takayama, "Supersonic and hypersonic liquid jets: Part 3--Simulation of shock wave structures and liquid/air mixing layers"

[35] K. Piantong, "Visualisation of supersonic liquid fuel jets," *Proceedings of the 5th Pacific Symposium on Flow Visualisation and Image Processing (PSFVIP5)*, 27-29th September, 2005, Australia (Keynote Lecture).

- [36] B.E. Milton and K. Piantong, "Pulsed, supersonic fuel jets - A review of their characteristics and potential for fuel injection," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 26, issue 4 , pp. 656-671, 2005.
- [37] A. Matthujak, K. Piantong, M. Sun, K. Takayama, T. Ikohagi, "Effect of different fuels on the characteristics of supersonic liquid fuel jets," *Proceedings of the 25th International Symposium on Shock Waves (ISSW25)*, Bangalore, India, 17-19 July 2005, paper no.1104.

ภาคผนวก

ภาคผนวก
ผลงานตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

1. National Conferences

- 1.1 Wirapan Sechanam, **Wuttichai Sittiwong**, Kulachate Pianthong, and Anirut Matthujak
“Simulation on fundamental characteristic of high speed fuel jet”, Proceedings of the 21st Annual Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand. CST-45; 17-19 October, 2007.
- 1.2 **Wuttichai Sittiwong**, Wirapan Sechanam, Kulachate Pianthong, Anirut Matthujak, and Eric Yeo. “Calibration of High Speed Impact Test Rig”, Proceedings of the 22nd Annual Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand. AME-05; 15-17 October, 2008.
- 1.3 **Wuttichai Sittiwong**, Wirapan Sechanam, Kulachate Pianthong, and Anirut Matthujak.
“Impact pressure of high-speed water jets”, Proceedings of the 23rd Annual Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand. TSP-030232; 4-7 November, 2008.
- 1.4 Wirapan Sechanam, **Wuttichai Sittiwong**, Kulachate Pianthong, Anirut Matthujak. “Investigation on high speed liquid jet using computational fluid dynamics technique”. Proceedings of the 23rd Annual Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand. CST-035222; 4-7 November, 2008.

2. International Conferences

- 2.1 **Wuttichai Sittiwong**, Wirapan Sechanam, Kulachate Pianthong, and Anirut Matthujak.
“Effect of stand-off distance on impact pressure of high speed water jets”, Proceedings of the 10th Asian International Conference on Fluid Machinery (10th AICFM). AICFM0171; 21-23 October, 2008, Malaysia.

การจำลองคุณลักษณะเบื้องต้นของลำพุ่งเชื้อเพลิงความเร็วสูง Simulation on fundamental characteristic of high speed fuel jet

วิระพันธ์ สีหานาม^{1*}, วุฒิชัย สิทธิวงษ์¹, กุลเชษฐ์ เพียรทอง¹ และ อนิรุตต์ มัทธูจัก¹

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

โทร 0-4535-3381 โทรสาร 0-4535-3380 *อีเมล: wirapan_seehanam@yahoo.com

Wirapan Seehanam^{1*}, Wuttichai Sittiwong¹, Kulachate Pianthong¹, and Anirut Matthujak¹

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchatany University, Ubon Ratchatani, 34190,

Thailand, Tel: 0-4535-3381, Fax: 0-4535-3380 *E-mail: wirapan_seehanam@yahoo.com

บทคัดย่อ

การฉีดเชื้อเพลิงด้วยความเร็วสูงมากขึ้นจะเพิ่มประสิทธิภาพของการเผาไหม้และลดมลภาวะที่เป็นพิษจากเครื่องยนต์ โดยเฉพาะกับเครื่องยนต์ดีเซล แต่อย่างไรก็ตาม การศึกษาในประเด็นดังกล่าวยังมีน้อยมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการศึกษาดังเชื้อเพลิงในระดับจีกะพาสคาล และความเร็วมวลค่าสูงสุดเกิดระดับความเร็วเพียงมากขึ้นๆ ด้วยเหตุนี้การวิจัยนี้จึงได้พยายามหา คิระจากคุณลักษณะพื้นฐานของลำพุ่งเชื้อเพลิงความเร็วสูง โดยใช้ การคำนวณของไหลพลศาสตร์ (CFD) จำลองการฉีดพ่นของน้ำมันก๊าดในแบบจำลองประมาณตัวของไหล 2 ชนิด คือ น้ำมันก๊าด และอากาศ ความเร็วเริ่มต้นของเชื้อเพลิงอยู่ที่ 1300 เมตรต่อวินาที พุ่งออกสู่อากาศที่อยู่นิ่ง โดยการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของของไหลจะเปลี่ยนแนวพุ่งตามเวลา ผลการศึกษาจาก CFD และการทดลองได้แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของพวยกอากาศและความเร็วของลำพุ่ง ผลการศึกษาทำให้เราเข้าใจคุณลักษณะของลำพุ่งเชื้อเพลิงความเร็วสูงได้ลึกซึ้งขึ้นและข้อมูลที่ได้นี้จะเป็นรากฐานสำหรับการพัฒนาในระดับต่อไป

Abstract

Injection of fuel jet at ultra-high pressure can benefit the combustion efficiency and emission reduction in internal combustion engine especially the diesel engine. However, very few studies had been carried out in the past, especially when injection pressure is in the order of GPa (10,000 bar) and the jet velocities are in hypersonic and supersonic ranges. In this study, fundamental characteristics of high speed fuel jets are calculated and visualized by Computational Fluid Dynamic (CFD). Computational domain, consisted of liquid fuel and air,

modeled on the basis of two phase flow. The liquid jet is injected at velocity of around 1300 m/s, while the air is quiescent. The CFD results show quite similar trend to the previous experimental results. The simulation is time dependent or unsteady. The fundamental characteristics which are penetration distance and velocity attenuation of fuel jet are the main focus. From this study, more understanding on the characteristics of high speed fuel jet can obtained and will be useful further development.

1. บทนำ

การฉีดน้ำมันในเครื่องยนต์ดีเซลด้วยความดันสูงมากขึ้นจะทำให้การเผาไหม้มีประสิทธิภาพดีขึ้นและช่วยลดมลภาวะจากการเผาไหม้ได้ ทั้งนี้การฉีดเชื้อเพลิงให้มีความเร็วสูงจะทำให้เพิ่มสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซลสูงขึ้น [1,2] ซึ่งเครื่องยนต์ในปัจจุบันที่ฉีดเชื้อเพลิงแบบเป็นจังหวะเป็ด-ปิด (intermittent) นั้น สามารถฉีดเชื้อเพลิงได้ระดับความดันในช่วง 75-230 MPa ความเร็วสูงสุดของลำพุ่งอยู่ที่ประมาณ 255-520 m/s ถ้าในสภาวะความดันบรรยากาศ ความเร็วในระดับนี้จะอยู่ในช่วงที่ต่ำกว่าความเร็วเสียง (transonic หรือ supersonic) แต่ในกระบอกสูบที่มีความดันและอุณหภูมิสูงกว่าสภาวะบรรยากาศทั่วไป ทำให้ความเร็วระดับดังกล่าวอยู่ต่ำกว่าความเร็วเสียงที่สามารถกระแทกสูบ (ความเร็วเสียงในกระบอกสูบประมาณ 550 m/s) [3] ปัจจุบันมีนักวิจัยหลากหลายกลุ่มพยายามศึกษาการฉีดเชื้อเพลิงด้วยความเร็วสูงระดับ ความเร็วสูงกว่าเสียงมาก (ระดับ supersonic หรือ hypersonic) [4,5] คุณลักษณะการฉีดถูกทดลองและศึกษาเป็นระดับแรกๆ เพราะว่าเป็นพื้นฐานสำคัญในการพัฒนาการฉีดเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลแบบ homogeneous

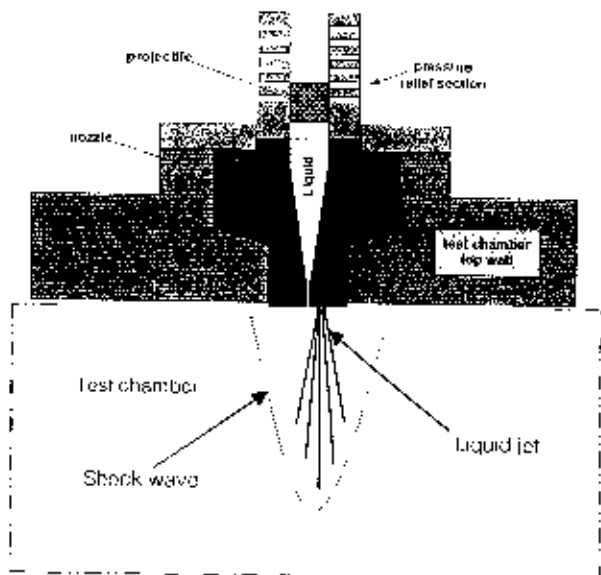
charge compression-ignition (HCCI) เพื่อให้ได้อัตราส่วนของอากาศ-เชื้อเพลิง ที่เหมาะสมอันประโชยน์ต่อการลดอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและมลภาวะจากการเผาไหม้

อุปสรรคในการทดลองเพื่อศึกษาการฉีดเชื้อเพลิงด้วยความเร็วสูงคือ การวัดที่ทำได้ยากในทางปฏิบัติและจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ราคาแพง ด้วยเหตุนี้ การคำนวณพลศาสตร์การไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) จึงเป็นเครื่องมือทางเลือกใหม่เพื่อให้ทราบและวิเคราะห์ผลของเชื้อเพลิงในลักษณะต่างๆ ซึ่ง Zakrzewski *et al.* [6] ใช้ CFD โปรแกรม FLUENT ศึกษาคุณลักษณะของลำพ่นที่ได้รับอิทธิพลจาก shock เมื่อลำพ่นเคลื่อนที่ผ่านอากาศ โดยได้เพิ่มโปรแกรม (User Define Function, UDF) ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการคำนวณใน CFD ให้เพิ่มขึ้น โดยการศึกษาต้องจำลองการแบ่งพ่นระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงแบบปฏิกริยาเคมีของ multi-species ที่อัตราส่วนความหนาแน่นแตกต่างกันมาก นอกจากนี้การศึกษาของ Zakrzewski *et al.* แล้ว Pianthong *et al.* [7] ได้นำ CFD โปรแกรม Auto Dyn ซึ่งเป็นโปรแกรมสำหรับจำลองการเกิด shock ในวัสดุหรือของไหล ศึกษาควบคู่กับการทดลอง โดยเปลี่ยนแปลงชนิดของไหล ซึ่งพบว่าชนิดของเชื้อเพลิงมีผลกับพฤติกรรมของลำพ่นเมื่อเกิดความดันสำหรับฉีดและความเร็วของลำพ่นมีค่าสูง แต่อย่างไรก็ตามทั้งสองงานวิจัยยังเน้นในการคาดคะเนพฤติกรรมของลำพ่นในเบื้องต้นอยู่ ยังไม่ได้ศึกษาคุณลักษณะทางพลศาสตร์ (dynamics characteristics) ของลำพ่น เช่น ระยะแทรกอากาศ (penetration distance) และความเร็วเฉลี่ยของลำพ่น (average jet velocity) อีกทั้ง ยังมีหลายข้อแปรที่ยังไม่มีการศึกษาและพิจารณา เช่น การเป็นแตกของเชื้อเพลิง (atomization) การกระจายตัวของเม็ดเชื้อเพลิงเหลว (droplet break-up) และ อากาศพลศาสตร์ของเม็ดเชื้อเพลิงเหลว ทั้งนี้สาเหตุหลักเนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในเวลานั้นยังมีประสิทธิภาพต่ำอยู่ ทำให้เกิดปัญหา การลู่กลับของผลเฉลยและได้คำตอบของปัญหาไม่ถูกต้อง แต่อย่างไรก็ตามโปรแกรม CFD ก็ถูกพัฒนาและศึกษาอย่างต่อเนื่อง ทำให้ CFD ในปัจจุบันสามารถคำนวณปัญหาได้ครอบคลุมปัญหาได้กว้างขวางมากยิ่งขึ้น รวมทั้งกรณีปัญหาการไหลของลำพ่นความเร็วสูงผ่านอากาศ ก็เช่นเดียวกัน ดังนั้น การศึกษาจึงได้นำเอา CFD โปรแกรม FLUENT เวอร์ชันใหม่ มาใช้ศึกษาปัญหาการฉีดเชื้อเพลิงความเร็วสูง โดยจำลองการฉีดของน้ำมันก๊าด (kerosene) ผ่านปากที่อยู่นิ่ง ซึ่งจะศึกษาและพิจารณา คุณลักษณะทางพลศาสตร์ โดยเปลี่ยนแปลงตามเวลาในช่วง 350 usec ที่ความเร็วลำพ่นสูงสุด 1300 m/s

2. วิธีการสร้างลำพ่นความเร็วสูงและระบบถ่ายภาพ

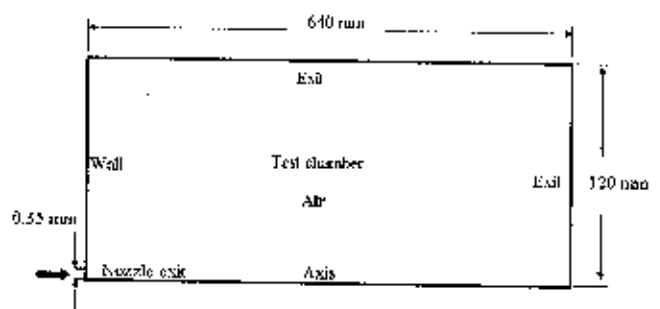
ในการทดลอง ใช้วิธีของ Bowden-Brunton [8] เพื่อสร้างลำพ่นที่มีความเร็วสูงดังแสดงในรูปที่ 1 โดยหลักการนี้จะบรรจุเชื้อเพลิงเหลวในหัวฉีด จากนั้นปล่อยทุกปืนด้วยความเร็วสูงกระแทกทำให้ภายในหัวฉีดเกิดความดันสูงระดับ GPa และปล่อยเชื้อเพลิงด้วยความเร็วสูงจนเห็นเพียงที่ความดันบรรยากาศ ออกสู่ห้องทดสอบ ซึ่งกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง (high speed video camera) ที่

สามารถถ่ายภาพได้ 10^6 เฟรมต่อวินาที ถ่ายได้ 103 เฟรม จะบันทึกภาพด้วยเทคนิคการมองภาพเงาเทรโดกราฟ (shadowgraph optical system) ซึ่งเทคนิคนี้ทำให้เราสามารถมองเห็น shock wave ที่เกิดในอากาศได้ ทั้งนี้เพื่อใช้อธิบายคุณลักษณะเชิงพลศาสตร์ของลำพ่นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาต่างๆ ซึ่งรายละเอียดของชุดทดลองสามารถดูได้จากการศึกษาของ Pianthong's *et al.* [7] และข้อมูลการทดลองเองน้ำมันก๊าดเพื่อใช้เปรียบเทียบในการศึกษาได้ จากการศึกษาที่ผ่านมาของ Matthijak, *et al.* [9]

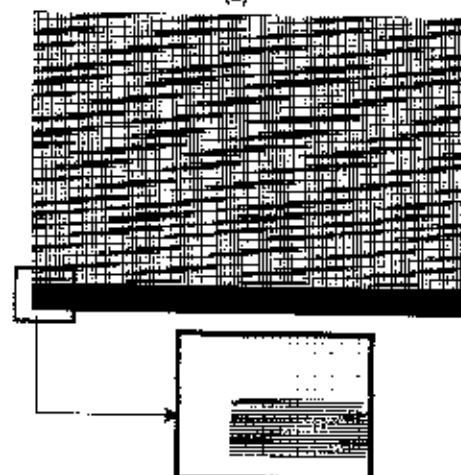


รูปที่ 1 กระบวนการสร้างลำพ่นความเร็วสูง

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ CFD



(a)



(b)

รูปที่ 2 (a) รูปร่าง และ (b) ขอบเขตปัญหาของห้องทดสอบ

การไหลและขอบเขตของปัญหาการฉีดเชื้อเพลิงด้วยความเร็วสูงที่เกิดขึ้นในห้องทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 2(a) โดยที่ทางออกของหัวฉีด (nozzle exit) มีเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 7 มม. และขนาดห้องทดสอบ กว้าง 24 ซม. และ ยาว 640 ซม. ซึ่งรูปที่ 2 แสดงในมุมมองแบบสมมาตรในแนวแกน จากการขอบปัญหาและขอบเขตดังกล่าว สามารถสร้างรูปร่างแบบจำลองและกริดตัวโปรแกรม GAMBIT โดยรูปร่างกำหนดเป็นแบบสมมาตรในแนวแกน (axis-symmetry) และสร้างกริดสี่เหลี่ยม quadrilateral จำนวนประมาณ 100,000 โหนด ให้อนวณบริเวณที่คาดว่าการผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศจะเกิดขึ้น แสดงดังรูปที่ 2(b) รูปร่างแบบจำลองที่ได้นี้จะนำไปคำนวณด้วยโปรแกรม FLUENT เพื่อทดสอบและศึกษาคุณสมบัติและเชิงพลศาสตร์ของลำพุ่งความเร็วสูง โดยการศึกษานี้จะใช้น้ำมันก๊าดเป็นเชื้อเพลิงเหลว ทั้งนี้ในการคำนวณกำหนดคุณสมบัติให้เป็นของเหลวที่มีความหนาแน่นคงที่ ขณะที่อากาศกำหนดให้มีคุณสมบัติเป็นก๊าซอุดมคติ (ideal gas) ที่สามารถกดอัดได้ กำหนดคุณสมบัติของผสมจากสารทั้งสองด้วยแบบจำลองของ Volume of Fluid (VOF) การคำนวณเป็นแบบเปลี่ยนแปลงขึ้นกับเวลา โดยขนาดช่วงเวลาคำนวณ 1 μs จะทำการเก็บข้อมูลทุกๆช่วงเวลาที่ยาวนานเสี้ยววินาที การจำลองหาความเป็นปฏิกิริยาการไหลให้แบบจำลองแบบ realizable k- ϵ จะเทียบคำนวณปัญหาแบบ segregated solver ความเร็วของเชื้อเพลิงที่ทางเข้า (nozzle exit) 1300 m/s

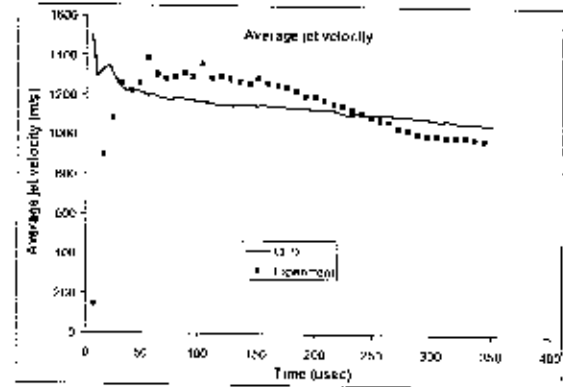
4. ผลการตีพิมพ์และวิเคราะห์

4.1 คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของลำพุ่งจากน้ำมันก๊าด

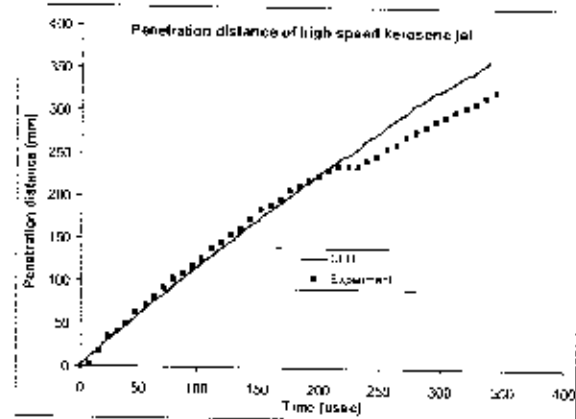
การแผ่ความเร็วเฉลี่ย ระยะแหวกอากาศ และความเร็วช่วง ณ ช่วงเวลา ต่อเวลาที่ลำพุ่งของน้ำมันก๊าดเคลื่อนที่ไม่ แสดงในรูปที่ 3, 4 และ 5 ตามลำดับ ที่ช่วงเวลาเริ่มต้น (0 -75 μs) ผลการคำนวณความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่งจะลดลงอย่างรวดเร็ว แต่ผลจากการทดลองความเร็วจะเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลที่แตกต่างกัน เนื่องจากความแตกต่างของกระบวนการการสร้างลำพุ่งใน CFD และการทดลอง ในแบบจำลองลำพุ่งถูกกำหนดให้เคลื่อนที่เข้าสู่ขอบเขตปัญหาด้วยความเร็วเริ่มต้นสูงสุด (1300 m/s) แต่ในการทดลองลำพุ่งจะถูกฉีดออกมาด้วยการอัดอากาศลูกปืนทำให้ความเร็วของลำพุ่งเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงความเร็วสูงสุด หลังจากลำพุ่งมีความเร็วสูงสุด ความเร็วเฉลี่ยและความเร็วช่วง ณ ช่วงเวลา จะลดลงอย่างรวดเร็ว

โดยทั่วไปแล้ว ผลจากการทดลองพบว่าลำพุ่งจะล่อนกำลังและอัตราการแหวกอากาศลดลงหลังจากลำพุ่งเคลื่อนที่ได้ 200 μs เนื่องจากการแยกตัวของหยดขนาดเล็กออกจากลำพุ่ง ประกอบกับการเกิดแรงของเชื้อเพลิงจากการเคลื่อนที่สัมผัสกันระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศ นอกจากนี้แล้ว แรงต้านจากอากาศก็เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ลำพุ่งมีความเร็วลดลงเช่นกัน แต่การคำนวณใน CFD

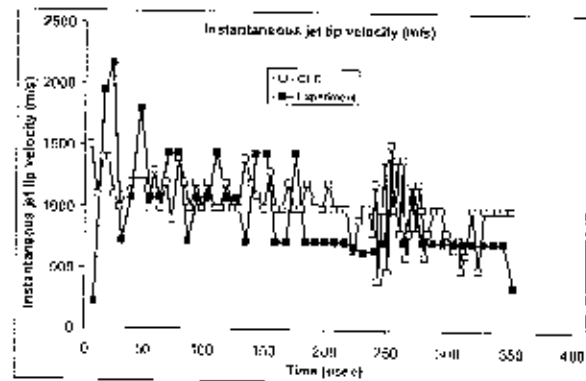
เรากำหนดให้น้ำมันก๊าดความเร็วที่ทางเข้าของขอบเขตมีสูงสุดคงที่ และต่อเนื่อง อีกทั้งไม่ได้พิจารณาการเกิดหยดของเหลวและแรงของเชื้อเพลิงทำให้ผลการแหวกอากาศของลำพุ่งมีค่าคงที่ จากรูปที่ 5 พบว่าผลจากทั้งการทดลอง และ CFD มีค่าความเร็ว ณ ช่วงเวลาที่มีค่าแรงกลึงไปกลับมา ในช่วงความเร็วสูงสุด (1300 m/s) และเป็นสิ่งที่สังเกตว่าความกว้างของช่วงการแผ่กระจายจากการทดลองมีค่ามากกว่าค่าจาก CFD



รูปที่ 3 ความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่งของน้ำมันก๊าด



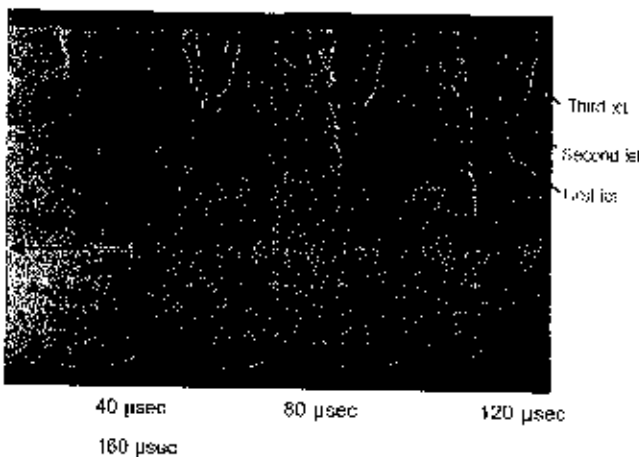
รูปที่ 4 ระยะแหวกอากาศของลำพุ่งของน้ำมันก๊าด



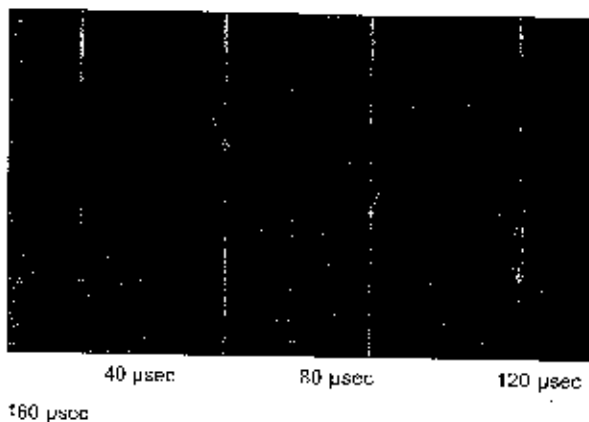
รูปที่ 5 ความเร็วช่วง ณ ช่วงเวลาของลำพุ่งของน้ำมันก๊าด

4.2 ลำพู่ของน้ำมันก๊าดความเร็วสูง

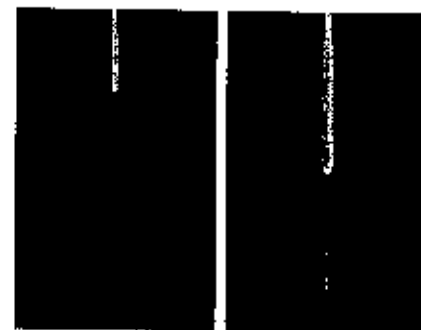
ภาพของลำพู่ของน้ำมันก๊าดความเร็วสูงที่ได้จากการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 6 ซึ่งสามารถแสดงการเกิด shock อย่างชัดเจนและพบพฤติกรรมของลำพู่ที่มีหลายลูก ดังแสดงในรูปที่ 6. ซึ่งผลของ CFD ก็สนับสนุน และแสดงให้เห็นปรากฏการณ์ shock เช่นเดียวกัน เมื่อแสดงความหนาแน่นของอากาศ เราพบการเปลี่ยนแปลงซึ่งเป็นผลจาก shock แสดงดังรูปที่ 7 ทั้งนี้ผลของ CFD ยืนยันการเกิด shock มากกว่าหนึ่งลูกแม้ว่าจะไม่ชัดเจนดังเช่นที่เกิดจากการทดลอง เนื่องจากความแตกต่างกันของกระบวนการสร้างลำพู่และเงื่อนไขการฉีดในหัวฉีด และเมื่อเปรียบเทียบภาพที่ช่วงเวลาเดียวกันจะเห็นว่ารูปร่างลำพู่มีความใกล้เคียงกัน แต่ระยะห่างจากหัวฉีดของแต่ละช่วงเวลา มีความแตกต่างกันอย่างมากซึ่งผลของ CFD ให้ความยาวมากกว่า ๗ ช่วงเวลาเดียวกัน



รูปที่ 6 ภาพลำพู่ของน้ำมันก๊าดจากการทดลองตามเวลาที่เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 7 แถบสีความหนาแน่นของอากาศที่ได้จาก CFD โดยเปลี่ยนแปลงตามเวลา



40 μsec

80 μsec



120 μsec

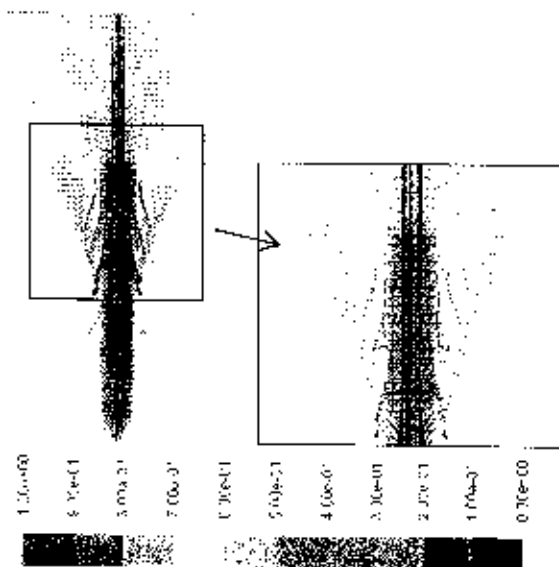
160 μsec



รูปที่ 8 แถบสีความเร็วของลำพู่จาก CFD ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

แถบสีของความเร็วที่แสดงได้จากการคำนวณแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งสังเกตเห็นว่าในช่วงเริ่มต้น (0 - 40 μsec) ความเร็วของตัวที่เป็นน้ำมันก๊าดพ่นที่ความเร็วสูงอยู่ แต่หลังจากนั้น ความเร็วของลำพู่จะเริ่มลดลงและอากาศรอบ ๆ จะถูกเหวี่ยงทำให้มีความเร็วเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก การผสมกันและนำพาพลังงานจลน์จลน์ระหว่างของเหลวและอากาศ ซึ่งอากาศจะถูกเหวี่ยงนำให้ผสมกับลำพู่ การเคลื่อนที่ของอากาศและลักษณะการผสมกับของอากาศกับลำพู่แสดงด้วยเวกเตอร์ตามรูปที่ 9 ซึ่งสามารถเห็นการไหลวนของ

อากาศที่โคนของลำพุ่งและความเร็วของอากาศที่บริเวณดังกล่าวจะสูงกว่าอากาศที่บริเวณอื่น



รูปที่ 9 เวกเซอร์ความเร็วกับแผนที่ความเร็วส่วนเชิงปริมาตรของอากาศ ที่เวลา 20 μsec

5. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้เราได้เริ่มดำเนินการสำรวจของน้ำวนกักความเร็วสูงสำหรับการคำนวณและจำลองการไหลหรือ CFD ที่มีการเคลื่อนเร็วเริ่มต้นของลำพุ่ง 1300 m/s ได้เป็นผลสำเร็จ ซึ่งเป็นความก้าวหน้าที่สำคัญของการพัฒนาการไหลของของไหลแบบอัดได้ที่มีความเร็วสูงและมีของไหลมากกว่า หนึ่งในนั้น เราได้วิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของลำพุ่งโดยเปรียบเทียบกันระหว่างการทดลองและ CFD พบว่าผลของทั้งสองวิธีสอดคล้องกัน ถึงแม้ว่ากระบวนการสร้างลำพุ่งจะแตกต่างกัน ซึ่งหมายความว่าทำให้ผลบางประการไม่สอดคล้องกัน ดังนั้นเพื่อทำให้ผลของ CFD มีค่าที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้นจึงจำเป็นต้องพัฒนาแบบจำลองที่สามารถสร้างลำพุ่งให้ใกล้เคียงกับการทดลอง นอกจากนี้แม้ว่าการศึกษาในระดับต่อไปควรพิจารณาผลของการเกิดและการกระจายตัวของหยดละอองจากเจ็ทหลังจากการแตก

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้การสนับสนุนด้านเงินทุนวิจัยในการศึกษานี้ อีกทั้งยังขอขอบคุณจากสถาบัน Interdisciplinary Shock Wave Research Laboratory (ISWRL), Institute of Fluid Science, Tohoku University, Japan มา ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Nishida, K., Ochiai, H., Arai, M., Hiroyasu, H., 1997. Characterization of Diesel Fuel Spray by Ultrahigh-Pressure Injection. Transaction of Japanese Society of Mechanical Engineering, series B 63 (605). pp. 344 -349.
- [2] Hiroyasu, H., 1995. Fundamental Spray Combustion Mechanism and Structure of Fuel Sprays in Diesel Engine. Begell House, New York.
- [3] Milton, B.E., and Pianthong, K., 2005. Pulsed, Supersonic Fuel Jet – A Review of Their Characteristics and Potential for Fuel Injection. International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 25, pp. 656-671.
- [4] Shi H.H., 1994. Study of Hypersonic Liquid Jet. PhD Thesis, Tohoku University, Sendai, Japan.
- [5] Pianthong, K., 2002. Supersonic Liquid Diesel Fuel Jets: Generation, Shock Wave Characteristics, Auto-Ignition Feasibilities. University of New South Wales, Sydney, Australia.
- [6] Zakrzewski, S., Milton, B.E., Pianthong, K., and Bohnia, M., 2004. Supersonic Liquid Fuel Jet Injected Into Quiescent Air. International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 25, pp. 833-840.
- [7] Pianthong, K., Muthujak, A., Takayama, K., Saito., and Milton, B. 2006. Visualization of Supersonic Liquid Fuel Jets. Journal of Flow Visualization and Image Processing, Vol. 30, pp. 217-242.
- [8] Bowden, F.P., and Brunton, J.H., 1958. Damage to Solids by Liquid Impact at Supersonic Speed. Nature, Vol. 213, pp. 23-25.
- [9] Matthujak, A., Hossain, S.H.R., Takayama, K., Sun, M., and Voinovich, P., 2007. High Speed Jet Formation by Impact Acceleration Method. Shock Waves Journal (i

การปรับเทียบชุดทดลองสำหรับการศึกษาการกระแทกความเร็วสูง Calibration of High Speed Impact Test Rig

วุฒิชัย สิทธิวงษ์¹ วิระพันธ์ สีหะนาม^{1*} กุลเชษฐ์ เพียรทอง¹ อนันต์ มัทธจักร¹ และ Eric Yeo²

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

²บริษัท Hi-Tech Resources ประจำประเทศไทย ถนนสุขุมวิท 21 แขวงคลองเตยเหนือ กรุงเทพฯ 10110

โทร 0-433-53380 โทรสาร 0-433 53333 อีเมล: wirapan_sathanam@yahoo.com

บทคัดย่อ

การศึกษาลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูง มีคุณประโยชน์ต่อหลายสาขาเทคโนโลยีการเผาไหม้ การตัด การเจาะ หรือแม้แต่โรค การแพทย์ แต่การสร้างลำพุ่งให้มีความเร็วระดับเหนือเสียง เป็นอุปสรรคสำคัญต่อการศึกษาดังกล่าว ทำให้การวิจัยด้านหัวในนี้มีผลวิจัยน้อยมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศไทย ด้วยเหตุนี้ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จึงได้สร้างชุดทดลองที่สามารถสร้างลำพุ่งของเหลวให้มีความเร็วเหนือเสียงได้ในอากาศ โดยใช้หลักการ "ขับลำพุ่งด้วยการกระแทก (impact driven method)" โดยยิงลูกปืนกระแทกของเหลวที่บรรจุในหัวฉีด ชุดทดลองมีองค์ประกอบหลัก 4 ส่วน คือ 1. ชุดไลอูว์น (launcher) 2. หลอดยิง (launch tube) 3. ส่วนลดความดัน (pressure relief section) และห้องทดสอบ (test chamber) ซึ่งชุดทดลองนี้สามารถสร้างความเร็วลูกปืนได้สูงกว่า 800 m/s และให้กำเนิดลำพุ่งของเหลวที่มีความเร็วระดับเหนือเสียง แต่อาจไวเกิน อุปกรณ์ดังกล่าวจำเป็นต้องทำการปรับเทียบชุดทดลอง สำหรับรองรับการศึกษาการกระแทกความเร็วสูงในระดับต่อไป ดังนั้น งานวิจัยนี้ จึงได้เสนอการศึกษาความเร็วลูกปืนและลำพุ่งของเหลวที่ชุดทดลองนี้สามารถทำได้ ปริมาณดีเอ็นพีและความเร็วของลูกปืน โดยวัดความเร็วด้วยการจับสัญญาณของชุดรับส่งแสงเลเซอร์ (time of flight method) เพื่อเป็นการตรวจสอบช่วงการทำงานของชุดทดลอง ซึ่งความเร็วสูงสุดของลูกปืนมีค่าประมาณ 1,100 m/s จากข้อมูลการทดลองระหว่างความเร็วลูกปืนกับปริมาณดีเอ็นพีสามารถสร้างสมการประมาณค่าทั้งสอง เพื่อใช้ในการศึกษาในระดับต่อไป ความเร็วของลูกปืนนอกจากจะขึ้นกับปริมาณดีเอ็นพีแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง เช่น การเผาไหม้ของดีเอ็นพี ลักษณะการเคลื่อนที่ของลูกปืน และเวลาของชุดอุปกรณ์การทดลอง

Abstract

Investigations of high speed liquid jet characteristics benefit to many technology developments such as

combustion, material cutting, drilling, or even medical engineering. Generation of high speed liquid jet which has velocity over speed of sound is the barrier against the researcher from its study and development, resulting very few researches in these areas especially in Thailand. Therefore, high speed liquid jet test rig is constructed in the Department of Mechanical Engineering, Ubon Ratchatani University. The impact driving method is used for generating the liquid jet because the high velocity projectile will produce the impulsive liquid jet. There are four main components in this test rig; launcher, launch tube, pressure relief section and test chamber. In general, the launcher can generate the projectiles at velocity above 800 m/s averagely. Therefore, the liquid jet velocity from the projectile impact could be over the speed of sound. However calibration of the high speed impact test rig is necessary before experiments. This paper presents the maximum speed of projectile and liquid jet which apparatus can produce. In addition, relationship between the gun powder mass and projectile velocity was determined. The projectile velocity is measured by time of flight method and maximum velocity is 1100 m/s. Experimental data are plotted and fitted by the second order of polynomial curve. However, the uncertainty of projectile velocity is sometimes affected by many factors such as combustion in launcher, behavior of projectile movement and condition of apparatus, especially inside of the tube.

1. คำนำ

ลำพุ่งของเหลวความเร็วสูงถูกนำมาประยุกต์ใช้ทั้งงานหลายประเภทในปัจจุบัน ได้แก่ อุตสาหกรรมขึ้นรูปวัสดุ การเผา

ใหม่ของเครื่องบิน หรือแม้แต่ในทางการแพทย์ ซึ่งแต่ละประเภทการใช้งานต้องการคุณลักษณะของลำพุ่งแตกต่างกันออกไป เช่น การเจาะหรือการตัดวัสดุหิน ความดันสร้างลำพุ่งจะอยู่ในช่วง 50 – 500 MPa โดยมีความเร็ว 300 – 1,000 m/s [1 และ 2]

เทคโนโลยีการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ ประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับความเร็วของการฉีดน้ำมัน เชื้อว่าหากสามารถฉีดน้ำมันด้วยความเร็วสูงมากๆ ได้ ประสิทธิภาพการเผาไหม้ก็จะดีและเป็นการลดมลภาวะจากการเผาไหม้ด้วย [3]

ทางการแพทย์ ยังนำเทคโนโลยีลำพุ่งของเหลวจากหินและพัฒนามาเพื่อนำส่งยาเข้าสู่ร่างกายแทนเข็ม พบว่าความเร็วและความดันน้อยสุดในการเจาะผิวหนัง ประมาณ 150 m/s และ 140 MPa ตามลำดับ [4 และ 5] ซึ่งความเร็วของลำพุ่งจะต้องมากขึ้นตามเป้าหมายในการฉีดยา

นอกจากการประยุกต์ใช้งานดังที่กล่าวไว้ ลำพุ่งความเร็วสูงยังถูกนำไปใช้กับ อุตสาหกรรมการเจาะน้ำมัน เจาะอุโมงค์ หรือแม้แต่การฉีดพ่นต่างๆด้วยเช่นกัน

จะเห็นได้ว่าเทคโนโลยีของลำพุ่งความเร็วสูงมีบทบาทต่อการพัฒนาในงานหลายประเภท ดังที่กล่าวไว้ ดังนั้นความเข้าใจคุณลักษณะของลำพุ่ง จึงมีความสำคัญ และนอกจากนี้แล้ว การเพิ่มความเร็วลำพุ่งให้สูงขึ้นมีความสำคัญต่อการพัฒนาเทคโนโลยีอากาศยานยุคสมัยใหม่ไม่ได้

การศึกษาเพื่อหาค่าความเร็วของลำพุ่งให้สูงกว่าความเร็วเสียง (ระดับ supersonic หรือ hypersonic) F. P. Bowden และ J. H. Brunton [6] การศึกษาการกระแทกของลำพุ่งความเร็วสูง ซึ่งใช้หลักการ “ขับลำพุ่งด้วยการกระแทก (impact driven method)” โดยลำพุ่งที่ได้มีความเร็วสูงถึง 1200 m/s จากนั้น ด้วยหลักการเดียวกับ K. Piantonny และคณะ [7-10] ศึกษาการฉีกตัวของลำพุ่งกับการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ อย่างไรก็ดี เนื่องจากลำพุ่งความเร็วสูงถูกนำไปประยุกต์ใช้กับงานหลายประเภท จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาคุณลักษณะที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ในด้านอื่นๆ ด้วย

ด้วยเหตุนี้ทีมนักวิจัยวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จึงได้ทำการสร้างชุดทดลอง เพื่อสร้างลำพุ่งของเหลวความเร็วสูง จากการอาศัยหลักการ ขับลำพุ่งด้วยการกระแทก ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวจำเป็นต้องทำการปรับเทียบ ก่อนนำไปใช้ทดสอบ

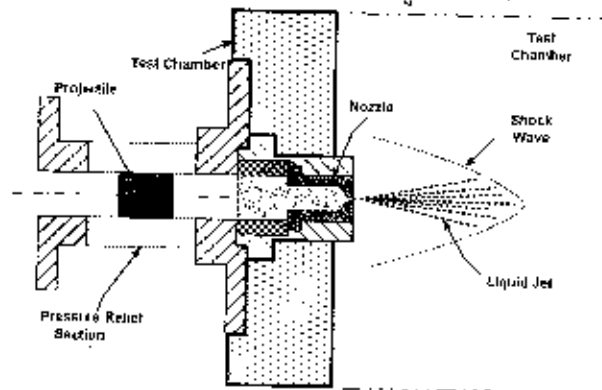
ดังนั้นการศึกษานี้จึงได้ทำการปรับเทียบอุปกรณ์การทดลอง การฉีดลำพุ่งด้วยความเร็วสูง เพื่อเก็บข้อมูลเป็นพื้นฐานสำหรับอุปกรณ์การทดลอง โดยเปรียบเทียบกับความเร็วของลูกปืนกับดินปืน สำหรับการทำทดสอบความเร็วลูกปืนในการศึกษาลำพุ่งของเหลวในลำดับต่อไป

2. การทดลอง

2.1 หลักการขับลำพุ่งด้วยการกระแทก (impact driven method)

หลักการการขับลำพุ่งด้วยการกระแทกถูกใช้เป็นที่แรกโดย Bowden and Brunton [6] เพื่อสร้างลำพุ่งที่มีความเร็วสูง (ดัง

แสดงในรูปที่ 1) โดยหลักการนี้จะบรรจุของเหลวในหัวฉีด จากนั้นปล่อยลูกปืนด้วยความเร็วสูง กระแทกของเหลวภายในหัวฉีดให้เกิดความดันระดับ GPa และหัวฉีดจะปล่อยของเหลวออกมาด้วยความเร็วเหนือเสียงที่ความดันบรรยากาศเข้าสู่ห้องทดสอบ



รูปที่ 1 การขับลำพุ่งด้วยการกระแทก (impact driven method)

2.2 อุปกรณ์ฉีดลำพุ่งด้วยความเร็วสูง

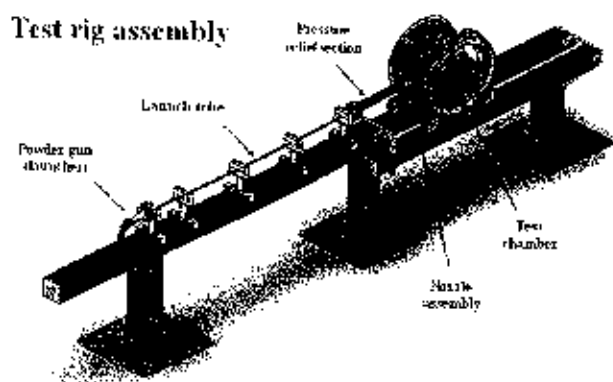
ชุดทดลองนี้มีองค์ประกอบหลัก 4 ส่วน ได้แก่ ชุดปล่อยลูกปืน (launcher) ท่อส่งลูกปืน (launch tube) ภาชนะความดัน (pressure relief section) และห้องทดสอบ (test chamber) ดังแสดงในรูปที่ 2

ชุดปล่อยลูกปืนทำหน้าที่เป็นฉนวน จากการระเบิดของดินปืน ในห้องเผาไหม้ และรับลูกปืนที่มาจาก high density Polyethylene (HDPE) หนัก 0.86 g ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.1 mm ยาว 15 mm สำหรับระบบการจุดระเบิด ดินปืนจะบรรจุในท่อบรรจุรูปที่ 3a) และลูกปืนจะอัดแน่นหัวท่อบรรจุ (รูปที่ 3b) ซึ่งทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 3 ในช่วงแรกเมื่อ จุดชนวนด้วยเข็มแทงชนวนทั่วไป พบว่าการจุดระเบิดดินปืนไม่แน่นอน เนื่องจากแรงกดของเข็มแทงชนวนไม่พอ จึงได้ทำการปรับปรุงระบบการจุดระเบิดใหม่โดยใช้หลักการของปืนปากกา ที่ใช้แรงกดจากสปริง ดันให้เข็มแทงชนวน ซึ่งพบว่าให้ประสิทธิภาพมากกว่าแบบจุดด้วยเข็มแทงชนวนทั่วไป ที่บ่าทางออกของชุดปล่อยลูกปืนจะติดกับท่อส่งลูกปืนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm ยาว 1,500 mm สำหรับการปล่อยให้ลูกปืนเพิ่มความเร็วของลูกปืน ก่อนจะไปยังท่อระบายความดัน

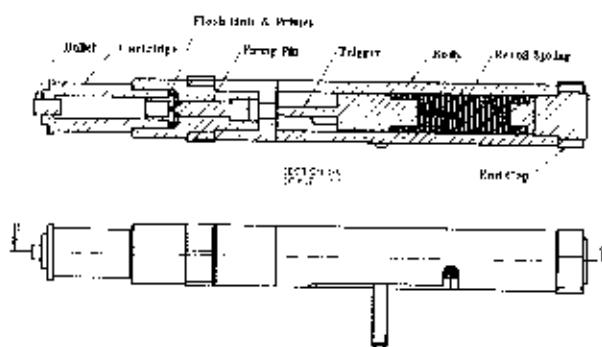
หน้าที่ของท่อระบายความดันจะทำการระบายอากาศด้านหน้าลูกปืนที่ถูกกักในท่อส่งออกสู่บรรยากาศ เพื่อป้องกันอากาศกระแทกบนหัวฉีดก่อนลูกปืน ท่อระบายความดันมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm ผ่าดอง 4 ด้าน ขนาดกว้าง 4 mm ยาว 400 mm ปลายท่อต่อกับชุดประกอบหัวฉีด ซึ่งอยู่ระหว่างท่อระบายความดันกับห้องทดสอบ

ห้องทดลองมีลักษณะเป็นทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 400 mm ด้านข้างทั้งสองบ่งชี้ด้วยวัสดุโพลีเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) ด้านหลังห้องทดสอบติดกับถังรับลูกปืนซึ่งจะทำหน้าที่กักเก็บลูกปืนที่ถูกยิงออกมา ห้องทดลองนี้ถูก

ออกแบบให้สามารถปรับ ความดันภายในได้ เพื่อรองรับการทดลอง ในไนโตรเจน นอกจากนี้แล้วการวัดความเร็วของลูกปืนและลำพุ่งจะ ติดตั้งอุปกรณ์วัดไว้ในส่วนนี้ด้วย



รูปที่ 2 ชุดอุปกรณ์การฉีดลำพุ่งความเร็วสูง



a) ชุดจุดระเบิดไฟฟ้าเป็นปากกา



b) ที่กับบรรจุดินปืนกับลูกปืน

รูปที่ 3 ระบบจุดระเบิดแบบปืนปากกาในชุดปล่อยลูกปืน

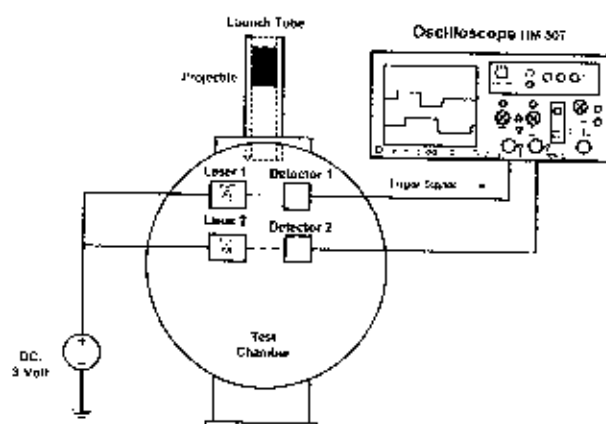
2.3 การวัดความเร็วของลูกปืนและลำพุ่งของเหลว

การวัดความเร็วของลูกปืนและลำพุ่งของเหลวใช้ หลักการ "การตัดแสงเลเซอร์ของวัตถุ (laser beam interrupt method)" หรือ "time of flight method" ติดตั้งตัวกำเนิดแสงเลเซอร์ และตัวรับแสง เลเซอร์มีกำลัง 5 mW ความยาวคลื่นประมาณ 850 nm วางตัวกำเนิดห่างจากผนังด้านชุดประกอบ หัวฉีด 12 mm และห่างกัน 33 mm ภายในห้องทดสอบ ตัวรับแสงจะต่อสัญญาณ เข้ากับ oscilloscope เพื่ออ่านสัญญาณไฟฟ้าจากตัวรับแสงและ แสดงบนหน้าจอ ดังได้ระบอกรูปที่ 4

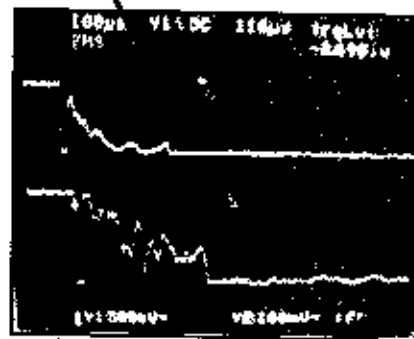
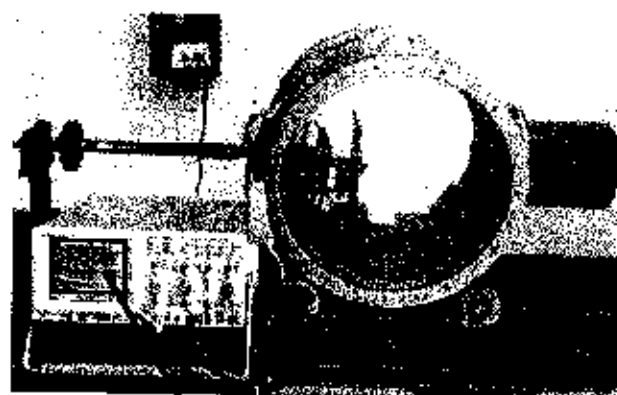
การวัดความเร็วของลูกปืนนั้นจะวัดจากเวลาที่ลูกปืนใช้ ในการวิ่งตัดแสงเลเซอร์ตัวที่หนึ่งกับแสงเลเซอร์ตัวที่สอง แล้วจึงแปลง มาเป็นความเร็วเฉลี่ยของลูกปืนดังสมการ

$$v_p = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

โดยที่ Δx คือระยะห่างระหว่างแสงเลเซอร์ทั้งสองเท่ากับ 33 mm และ Δt ได้จากผลที่แสดงใน oscilloscope ของเส้น สัญญาณจากตัวรับแสงเลเซอร์ทั้งสอง ซึ่งแสดงผลดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 โจทย์กรรมของเครื่องวัดความเร็วของลูกปืน



รูปที่ 5 ระบบวัดความเร็วแสงด้วยแสงเลเซอร์และตัวรับแสงที่ ตกไปเมื่อวัดความเร็ว

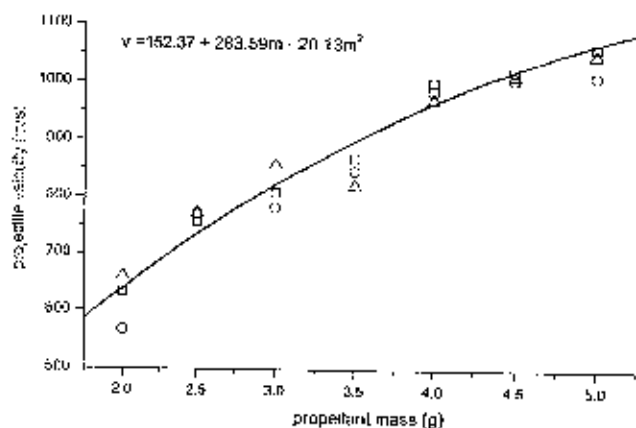
นอกจากนี้ยังได้ถ่ายภาพการเคลื่อนที่ของลูกปืนด้วย กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง (High speed video camera) ของ บริษัท Photron รุ่น FASTCAM SA3 ซึ่งสามารถถ่ายภาพด้วย

ความเร็วได้สูงสุดถึง 60,000 fps เพื่อศึกษาพฤติกรรมและวัด
ความเร็วของลูกปืนและลำพุ่งขณะเคลื่อนที่ในห้องทดสอบ

3. ผลการศึกษา

3.1 ปริมาณดินปืนกับความเร็วของลูกปืน

เมื่อทำการเก็บข้อมูล โดยวัดความเร็วของลูกปืนที่เปลี่ยนไป
กับน้ำหนักของดินปืนที่เติมแต่ละครั้งในการยิง พบว่า ดินปืนจะ
สามารถทำการขับเคลื่อนลูกปืนได้ต้องใช้ ดินปืนประมาณ 2 กรัม ขึ้นไป
หากน้อยกว่านั้น ไม่สามารถขับเคลื่อนลูกปืนได้ ทั้งนี้ก่อนบรรจุดินปืน
สามารถบรรจุดินปืนได้สูงสุด 5 กรัม ในช่วงที่ทำการศึกษา ดัง
แสดงในรูปที่ 6 พบว่าเมื่อดินปืนมีปริมาณเพิ่มขึ้นความเร็วของ
ลูกปืนก็จะเพิ่มขึ้นด้วย แต่อย่างไรก็ตามมีข้อสังเกตว่า ที่ช่วง 4 –
5 กรัมความเร็วของลูกปืนเริ่มมีค่าใกล้เคียงกัน อยู่ช่วง 950 –
1050 m/s



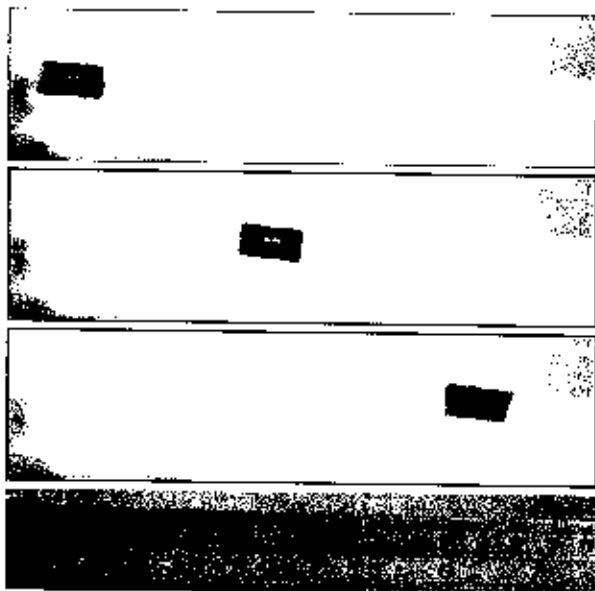
รูปที่ 6 ผลของปริมาณดินปืนที่มีต่อความเร็วของลูกปืน

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณดินปืนกับความเร็วของลูกปืน
ที่ได้จากภาพทดลองสามารถนำข้อมูลมาสร้างสมการประมาณการ
ได้ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6 สมการนี้สามารถนำมาคำนวณหาความเร็ว
ของลูกปืนจากปริมาณดินปืนที่ใช้และเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้
ศึกษาในระดับต่อไป

3.2 การเคลื่อนที่ของลูกปืน

เมื่อทำการถ่ายภาพด้วยกล้องความเร็วสูง ที่ความเร็ว
15,000 fps พบการเคลื่อนที่ของลูกปืนดังแสดงในรูปที่ 7 จากรูป
สามารถวัดความเร็วของลูกปืน โดยเวลาของแต่ละภาพให้ต่างกัน
66.67 micro-sec ระยะห่างของลูกปืนวัดได้ตามภาพโดยเทียบกับ
การหมุนของไม้บรรทัด ที่ติดตั้งก่อนทำการถ่าย ซึ่งจากรูปทำการ
คำนวณพบว่าความเร็วเฉลี่ยของลูกปืนประมาณ 833 m/s ทั้งนี้
ความเร็วของลูกปืนในช่วงแรกกับรูปสอง มีค่าน้อยกว่าความเร็ว
ในภาพช่วงต่อๆไป นั่นหมายความว่า ลูกปืนยังเร่งความเร็ว
ได้ไม่หยุด จากปลายกระบอกปืนแล้วจะยังมีความเร็วเพิ่มขึ้นอีกซึ่ง

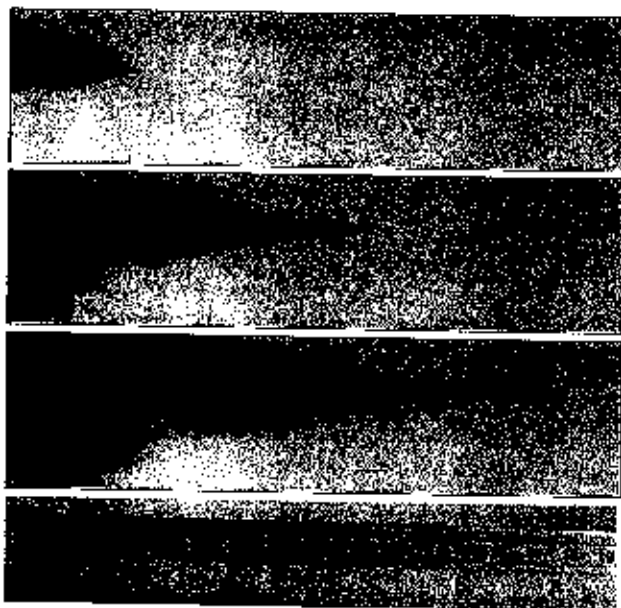
ในการศึกษาไม่สามารถระบุได้เนื่องจากข้อจำกัดของความเร็ว
ของกล้องทดสอบและเครื่องมือวัด



รูปที่ 7 ภาพถ่ายภาพเคลื่อนที่ของลูกปืน จากกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง
66.67 micro-sec ต่อภาพ, ดินปืนชนิดดินดำ, พ่น้ำ 3 กรัม

3.3 การเคลื่อนที่ของลำพุ่ง

เมื่อทำการถ่ายภาพลำพุ่งด้วยกล้องความเร็วสูงที่ 20,000
fps ได้ผลแสดงดังรูปที่ 8 โดยให้ลูกปืนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.1
mm ยาว 15 mm พ่น้ำ 0.88 กรัม กระแสกระสุนหัวใต้แบบเรเดียร์ มี
เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 mm ของเครื่องบนดีดเชล พบว่าความเร็ว
เฉลี่ยของลำพุ่งประมาณ 1,350 m/s จากความเร็วลูกปืนที่วัดได้ใน
ตอนต้น 833 m/s



รูปที่ 8 การเคลื่อนที่ของลำพุ่งหลังจากการกระพ่นของลูกปืน

4. ขอบข่ายผลการศึกษา

การทดสอบเบื้องต้นของเครื่องมีข้อจำกัดด้านกำลังความเร็วสูง เพื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลสำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลูกปืนกับปริมาณดินปืน ให้ผลตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ผ่านมามากกว่ารูปที่ 6 แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าชุดข้อมูลนี้ ยังกระจายและเบี่ยงเบนอยู่ ปัจจัยที่ทำการยิงลูกปืนแต่ละครั้งที่ดินปืนปริมาณเท่ากันแต่ให้ความเร็วผลแตกต่างกัน ได้แก่ การเผาไหม้ของดินปืนไม่เกินไปอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งขึ้นอยู่กับห้องเผาไหม้หรือท่อบรรจุดินปืน ชนิดและคุณภาพของดินปืน ความสะอาดของอุปกรณ์การทดสอบโดยเฉพาะในหัวตอลูกปืน และห้องเผาไหม้ ก็มีผลเช่นเดียวกัน เพราะเศษวัสดุ หรือฝุ่นในท่อที่ลูกปืนเคลื่อนที่มีผลเพิ่มแรงเสียดทานได้เช่นกัน

นอกจากนี้ยังจากภาพผ่านความเร็วสูง เห็นได้ว่าการเคลื่อนที่ของกระบอกในหัวตอลูกปืนจะไม่แน่นอนกับแนวราบ และไม่เหมือนกันในการทดสอบแต่ละครั้ง ทำให้แรงดันจากอากาศภายในกระบอกที่มีค่าไม่เท่ากัน ความเร็วของลูกปืนที่วัดได้จึงไม่เท่ากันด้วย แต่อย่างไรก็ตามพบผิดเพี้ยน การเคลื่อนที่ของลูกปืนในหัวตอลูกปืนไม่มีผลต่อการศึกษาลักษณะของหัวตอลูกปืนเพราะว่าลูกปืนจะหยุดที่จุดปะทะกับหัวตอลูกปืน หลังจากการยิงแล้วพุ่งของเหลว

ปัจจุบันมีผลต่อความเร็วลูกปืนเหล่านี้ทั้งว่าเป็นปัจจัยการศึกษาเพื่อพัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพของชุดทดลองไว้ด้วย

5. สรุปผลการศึกษา

การศึกษาในชุดทดลองสำหรับศึกษาผลด้านความเร็วสูง พร้อมเครื่องมือวัดความเร็วลูกปืนและลำพุ่ง ทำการเปรียบเทียบอุปกรณ์ โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างดินปืนและความเร็วของลูกปืน พร้อมทั้งเสนอผลการประมาณความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองเพื่อเป็นข้อมูลในการศึกษาในระดับต่อไป

จากการศึกษานี้พบว่าความเร็วของลูกปืนที่ได้จากการวัดแต่ละครั้งมีค่าไม่เท่ากันทุกครั้ง เนื่องจาก การเผาไหม้ไม่สม่ำเสมอลักษณะการเคลื่อนที่ของลูกปืนไม่แน่นอน และความสะอาดของอุปกรณ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ภายในหัวตอลูกปืน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช

เอกสารอ้างอิง

1. Leach, G. J., Walker, G. L., Smith, A. V., Farnor, I. W

- and Geoffrey Taylor, 1966. Some Aspects of Rock Cutting by High Speed Water Jets. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 260, No. 1110, pp 295 – 310.
2. Harris, H. D. and Malcolm Mellor. Cutting Rock with Water Jets. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 11, pp. 343 – 358.
3. Milton, B.E. and Pianthong, K., 2005. Pulsed, Supersonic Fuel Jet – A Review of Their Characteristics and Potential for Fuel Injection. International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 25, pp. 656-671.
4. Shergold, O. A., Heck, N. A., and King, T. S., 2006. The penetration of a soft solid by a liquid jet, with application to the administration of a needle-free injection. Journal of Biomechanics Vol. 39, pp. 2593-2602.
5. Baxter, J. and Mitragotri, S., 2004. Needle-free jet injections: dependence of jet penetration and dispersion in the skin on jet power. Journal of controlled release, Vol. 97, pp. 517-535.
6. Bowden, F. P. and Brunton J. H. 1961. The Deformation of Solids by Liquid Impact at Supersonic Speeds. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 263, No. 1315, pp. 433-450.
7. Pianthong, K., Zakrzewski, S., Behnia, M. and Milton, B.E. 2003. Characteristics of impact driven supersonic liquid jets. Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 27 (5), pp. 589-598.
8. Pianthong, K., Takayama, K., Milton, B.E. and Behnia, M. 2005. Multiple pulsed hypersonic liquid diesel fuel jets driven by projectile impact, Shock Waves Journal, Vol. 14, pp. 73 -82.
9. Pianthong, K., Matthujak, A., Takayama, K., Milton, B.E. and Behnia, M. 2006. Fundamental studies on effects of nozzle geometries and fuel properties on the characteristics of supersonic fuel jets. Shock Waves Journal.
10. วีระพันธ์ สีนานาม วุฒิชัย สิทธิวัฒน์ กุลเชษฐ์ เพ็ชรทอง และ กนิษฐดี มีวัชรจักร, การจำลองคุณลักษณะเบื้องต้นของลำพุ่งเชื้อเพลิงความเร็วสูง. การประชุมวิชาการเครื่องช่างวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21 17-19 ตุลาคม 2550 จังหวัดชลบุรี

ความดันกระแทกของลำพุ่งความเร็วสูง Impact pressure of high-speed water jets

วุฒิชัย สิทธิวงศ์*, วีระพันธ์ สีหามาน, กุศลเชษฐ์ เพียรทอง และ อนิรุตต์ มัทธจักร

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190
อีเมล: sithiwong@hotmail.com โทร 0-433-53380 โทรสาร 0-433-53333

บทคัดย่อ

การศึกษาลำพุ่งของไหลความเร็วสูง (High-Speed Liquid Jet) และหยดน้ำที่พุ่งชนผิววัสดุมีความสำคัญในงานอุตสาหกรรมหลายด้าน เช่น การตัดด้วยลำพุ่ง การทำความสะอาดผิววัสดุ การฉีดเชื้อเพลิงและการเผาไหม้ เป็นต้น การกระแทกของไหลความเร็วสูงสามารถทำให้เกิดความเสียหายหรือการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรในโครงสร้างของวัสดุได้ ดังเช่นการเกิดความเสียหายของเครื่องบินที่บินด้วยความเร็วสูงในเวลาที่ไม่คาดคิด ซึ่งเป็นการกัดเซาะจากน้ำฝน การกัดเซาะจากน้ำฝน หรือ "Rain erosion" เป็นปัญหาที่มาของการวิจัยในด้านการพุ่งชนด้วยความเร็วสูง

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้เพื่อเปรียบเทียบและวัดแรงกระแทก (Impact pressure) ลำพุ่งของน้ำความเร็วสูงที่ระดับความเร็วเหนือเสียง โดยลำพุ่งความเร็วสูงจะใช้วิธีกำเนิดขึ้นด้วยการส่งถ่ายโมเมนตัมของลูกกระสุนปืน (projectile) ที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงเข้ากระแทกน้ำที่บรรจุอยู่ในชุดหัวฉีด ความเร็วของลำพุ่งที่ใช้ในการทดลองจะมีความเร็วอยู่ในช่วง 1,240 – 2,290 เมตรต่อวินาที โดยกำเนิดจากเครื่องมือทดลองที่สร้างขึ้นจากหลักการทำงานของปืนที่ขับเคลื่อนด้วยดินปืนซึ่งจะถูกเรียกว่า "Horizontal Single Stage Powder Gun (HSSPG)" กับหัวฉีด 3 แบบ ที่มีขนาดรูฉีด 0.7 มิลลิเมตร แต่มีรูปร่างภายในแตกต่างกัน ลำพุ่งความเร็วสูงของน้ำจะพุ่งเข้ากระแทกแผ่นอะคริลิกแล้ววัดแรงกระแทกของลำพุ่งโดยใช้เพียโซอิเล็กทริกฟิล์ม (Piezoelectric polyvinylidenefluoride (PVDF) film) จากผลการทดลองพบว่า ความดันกระแทกมีค่าสูงสุดประมาณ 3.4 GPa ที่ระยะ 3 เซนติเมตรจากปลายหัวฉีด

คำหลัก: ลำพุ่งความเร็วสูง, ความดันกระแทก, เพียโซอิเล็กทริกฟิล์ม

Abstract

The study of high-speed liquid jet and its droplets striking on the solid surface has important application in many industrial areas, such as jet cutting technology, jet cleaning, fuel injection, and combustion. High speed liquid impact can cause damage or permanently deform of structure materials. Such damage can occur on the surface of aircraft during high-speed flight in the rain. This "rain erosion" problem began to attract researchers in the field of impact engineering.

This study focuses on an experiment of the calibration and measurement of an impact pressure of high-speed water jets. The high-speed water jets were generated by using the momentum exchange from the impact of a high velocity projectile on liquid package contained in the nozzle. Water jet velocities ranging from 1240 m/s to 2291 m/s were generated by a horizontal single stage powder gun (HSSPG) with three difference nozzle curve angles and 0.7 mm orifice diameter. The impact pressure on polymethyl methacrylate (PMMA) caused by water jets impact was measured using a piezoelectric polyvinylidenedifluoride (PVDF) film. The maximum impact pressure of about 3.4 GPa at stand-off distance 3 cm was obtained. However, at more than 3 cm stand-off distance, the impact pressure significantly decreases because of aerodynamic drag, jet core break-up, and atomization of the water jet.

Key words: high-speed water jets, impact pressure, PVDF.

1. บทนำ

ปรากฏการณ์การกระแทกของของเหลวที่มีความเร็วสูงเกิดขึ้นในงานอุตสาหกรรมหลายด้านไม่ว่าจะเป็นการสร้างเพื่อใช้ประโยชน์หรือเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นโดยไม่ต้องการ เช่น เทคโนโลยีการตัดและการทำความสะอาดผิววัสดุด้วยน้ำ การฉีดเชื้อเพลิงที่ความดันสูงและเครื่องยนต์สแครมเจ็ต (Scramjets) งานเหมืองแร่และอุโมงค์ การกัดกร่อนกังหันไอน้ำ การกัดกร่อนผิววัสดุที่เคลื่อนที่ผ่านน้ำ เนื่องจากหยดน้ำที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงเมื่อกระทบลงบนผิววัสดุหรือวัตถุความเร็วสูงเคลื่อนที่ผ่านหยดน้ำจะทำให้เกิดความเสียหายขึ้นกับผิวของวัสดุ อย่างเช่นเครื่องบินที่เคลื่อนที่ผ่านฝน หยดน้ำที่กลั่นตัวในระบบกังหันไอน้ำขึ้นส่วนของระบบฉีดเชื้อเพลิงที่ความดันสูง [1-3] เป็นต้น Worthing (1908) [4] ทำการศึกษาทางภาพถ่ายของหยดน้ำที่กระทบบนผิววัสดุโดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพความเร็วสูง การเกิดการเสีกรูปในของแข็งที่ถูกกระทบจากลำพุ่งความเร็วสูงจะเกิดขึ้น 5 แบบคือ

การเสียหายที่ผิวเป็นวงกลม การเสียหายได้ผิววัสดุ การเสีกรูปในวงกว้าง การเสีกรูปจากแรงเฉือนในพื้นที่ที่ถูกกระทบและการเสีกรูปจากการสะท้อนและการเกิดจากคลื่นสั่นสะเทือน (Stress wave) โดยการศึกษาความเสียหายในแต่ละแบบนี้จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุและความเร็วของลำพุ่งที่เข้ากระทบ ส่วนการให้งานลำพุ่งของน้ำครั้งแรกเพื่อใช้ในการตัดผ่านหินในสหภาพโซเวียต อเมริกาและโปรแลนด์ ใช้ความดันเพียง 30 MPa [3-5]

จากการศึกษาด้านการกระแทกของลำพุ่งความเร็วสูงบนผิววัสดุ เช่น การกระทบบนอลูมิเนียม กระฉกอะคริลิก มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาความเสียหายของผิววัสดุ ศึกษาความดันกระแทก (Impact Pressure) หรือการคำนวณค้อนน้ำ (Water hammer) จากความเร็วของลำพุ่งที่ 2-3 เท่าของความเร็วเสียงเท่านั้น [6-10] การศึกษาการกระแทกของลำพุ่งที่ความดันสูงในระยะต่างๆ จากหัวฉีด (Stand-off Distance) ยังมีน้อยมาก และยังไม่พบในประเทศไทย

เนื่องจากความดันกระแทกจากลำพุ่งความเร็วสูง เป็นความดันจลน์ (Dynamics Pressure) และมีค่าความดันสูงในระดับเมกะปาสกาล(MPa) - จิกกะปาสกาล (GPa) ทำให้การวัดทำได้ยาก ด้วยเหตุนี้ที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จึงได้สร้างชุดทดลองกำเนิดลำพุ่งความเร็วสูงระดับจิกกะปาสกาล (GPa) จากการกระแทก (1) สร้างและเปรียบเทียบเซนเซอร์วัดความดันจลน์จากเป็กโซอิเล็กทริกฟิล์ม เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาและพัฒนา ระบบฉีดเชื้อเพลิงที่ความดันสูงต่อไป

2. การทดลอง

2.1 ชุดกำเนิดลำพุ่งความเร็วสูง

การทดลองจะกำเนิดลำพุ่งความเร็วสูงที่ความเร็วเหนือเสียง (ระดับ Supersonic ถึง Hypersonic) จากชุดทดลองที่สร้างขึ้นและทำการเปรียบเทียบ โดยชุดทดลองนี้เรียกว่า "Horizontal Single - Stage Powder Gun (HSSPG)" ซึ่งประกอบไปด้วย 5 ส่วนหลัก คือ ชุดปล่อยลูกกระสุนปืน (Launcher) ท่อส่งลูกกระสุนปืน (Launch Tube) ท่อระบายความดัน (Pressure Relief Section) และห้องทดสอบ (Test Chamber) ดังเก็บ (Drum Tank) ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ชุดกำเนิดลำพุ่งความเร็วสูง: 1.ชุดปล่อยลูกกระสุนปืน 2.ท่อส่งลูกกระสุนปืน 3.ท่อระบายความดัน 4.ห้องทดสอบ และ 5.ถังเก็บ

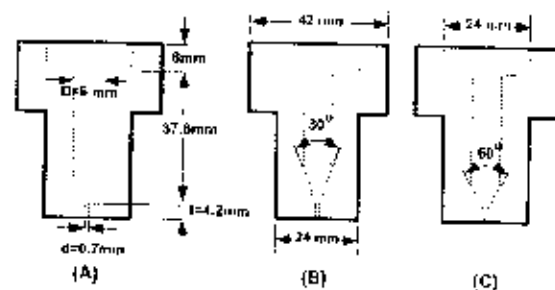
การกำเนิดลำพุ่งความเร็วสูงจะอาศัยหลักการการส่งถ่ายโมเมนตัม (Projectile Impact Driven Method) จากลูกกระสุนปืน (หรือ Projectile) ไปกระแทกกับของเหลวที่ถูกบรรจุในชุดหัวฉีดด้วยความเร็วสูงของเหลวในชุดหัวฉีดก็จะถูกฉีดออกมาด้วยความเร็วสูง

ซึ่งหลักการทำงานและรายละเอียดของชุดกำเนิดลำพุ่งความเร็วสูงได้นำเสนอไว้โดยวุฒิชัยและคณะแล้ว [11]

2.2 หัวฉีด

ปัจจัยที่มีผลต่อการกำเนิดลำพุ่งให้มีคุณลักษณะที่ต้องการ เช่น ความเร็วของลำพุ่งที่กำเนิดได้ การแตกตัว (Atomization) ของลำพุ่ง ความสามารถของลำพุ่งในการเหนี่ยวนำ เป็นต้น นอกจากความเร็วของลูกกระสุนปืนที่กระแทกแล้ว รูปทรงของหัวฉีด (Nozzle Geometry) ยังเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อคุณลักษณะของลำพุ่งที่กำเนิดได้ [12-14]

ในการทดลองนี้จะใช้หัวฉีดที่มีรูปทรงต่างกันสามแบบเพื่อศึกษาความเร็วของลำพุ่ง (Water Jets Tip) และความดันกระแทกที่ระยะต่างๆจากปลายหัวฉีด หัวฉีดทั้งสามแบบจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางห้องบรรจุของเหลว (D) 8 mm ขนาดรูหัวฉีด (d) 0.7 mm และความยาวรูฉีด (l) เป็น 4.2 mm ซึ่งความยาวรูฉีดจะถูกกำหนดในทอมของอัตราส่วนของความยาวรูฉีดต่อขนาดรูฉีด (l/d) ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบหัวฉีด (2) และในส่วนที่แตกต่างกันคือ หัวฉีด A เป็นหัวฉีดทรงกระบอก (Cylindrical nozzle หรือ Step nozzle) หัวฉีด B เป็นหัวฉีดทรงกรวยมุม 30° และหัวฉีด C เป็นหัวฉีดทรงกรวยมุม 60° (Conical nozzle) ดังแสดงในรูปที่ 2

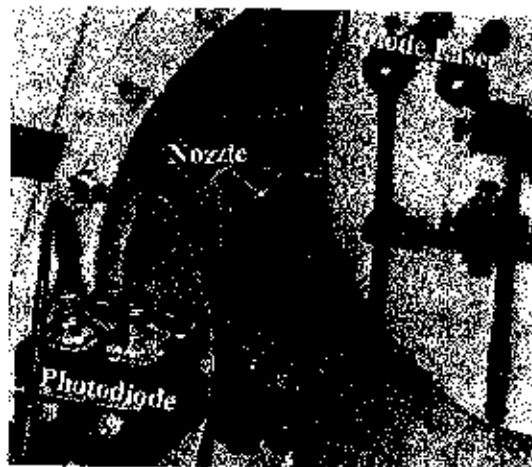


รูปที่ 2 หัวฉีดที่ใช้ในการทดลอง

2.3 การวัดความเร็วของลำพุ่ง

การวัดความเร็วของลำพุ่งของเหลวใช้หลักการ "การตัดเลี้ยวของวัตถุ (laser beam interruption method)" หรือ "Time of Flight Method" โดยใช้ไดโอดกำเนิดแสงเลเซอร์และไดโอดรับแสงจำนวน 2

ชุด โดยไดโอดชุดแรกวางห่างจากหัวฉีด 15 mm และ ไดโอดทั้งสองชุดวางห่างกัน 33 mm ไดโอดรับแสงจะ ต่อสายสัญญาณเข้ากับออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) เพื่ออ่านสัญญาณไฟฟ้าจากและแสดงผลบนหน้าจอ ดัง รูปที่ 3



รูปที่ 3 หัวฉีดที่ใช้ในการทดลอง

การวัดความเร็วของลำพุ่งของเหลวนั้นจะวัดจาก เวลาที่ส่วนหัวของลำพุ่งของของเหลวตัดแสงเลเซอร์ ของตัวที่หนึ่งกับเลเซอร์ตัวที่สอง ที่แสดงวัดได้ออสซิลโลสโคปแล้วจึงคำนวณความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่ง (V_j) ดังสมการ

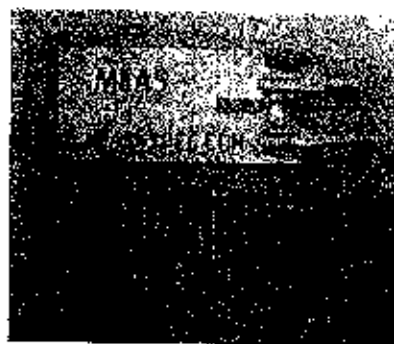
$$V_j = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (1)$$

2.4 การวัดความดันกระแทกของลำพุ่ง

ลำพุ่งของเหลวที่ถูกกำเนิดจาก HSSPG เป็น แรงดันแบบจังหวะพัลส์ (Pulse) ที่ไม่ต่อเนื่อง ซึ่งเป็น ความดันจลน์ (Dynamic Pressure) หรือ ถ้อนน้ำ (Water hammer) ซึ่งไม่สามารถใช้เครื่องวัดความดัน ซึ่งจะเป็นความดันสถิต (Static Pressure) วัดได้ นอกจากนี้ค่าความดันที่สูงยังเป็นปัญหาต่อการวัดและความเสียหายของเครื่องมือวัด

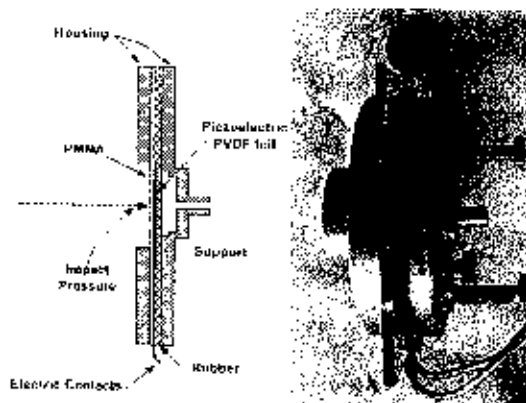
เครื่องวัดความดันถูกออกแบบและสร้างโดยใช้ เปียโซอิเล็กทริกฟิล์ม (Piezoelectric film) หรือ polyvinylidenefluoride (PVDF) ฟิล์ม ซึ่งอาศัยหลักการ การกำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากการสั่น หรือโก่งตัว

ทันทีที่ทันใด ดังนั้นจึงสามารถใช้งานกับความดัน กระแทกได้ ซึ่งแสดงในรูปที่ 4 เป็น PVDF ฟิล์มที่ใช้ สำหรับสร้างเครื่องวัดความดันกระแทกในการศึกษา



รูปที่ 4 เปียโซอิเล็กทริกฟิล์ม (Piezoelectric film)

เครื่องวัดความดันถูกสร้างให้ PVDF ฟิล์ม ถูก ติดตั้งภายในเรือนโลหะ เครื่องวัดความดันจะประกอบไปด้วย ส่วนหน้าของเรือนโลหะจะเป็นแผ่นอะคริลิกหนา 6 mm ทำหน้าที่รับแรงกระแทกจากลำพุ่ง ส่วนที่สองเป็น PVDF ฟิล์ม มีความหนา 28 μm ซึ่งจะต่อสายสัญญาณกับออสซิลโลสโคป และส่วนที่สามเป็นแผ่นยางหนา 1.8 cm ทำหน้าป้องกันความเสียหายจากกระแทกของ PVDF กับเรือนโลหะส่วนหลัง ดังแสดงในรูป 5



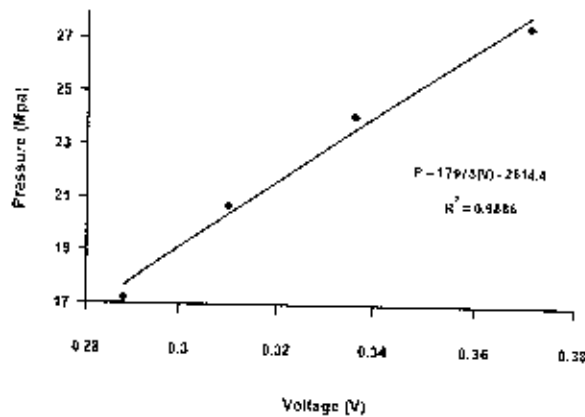
รูปที่ 5 ส่วนประกอบของเครื่องวัดความดัน

การปรับเทียบเครื่องวัดความดันโดยใช้ความดัน กระแทกจากเครื่องทดสอบหัวฉีดและหัวฉีดดีเซลแบบปรับความดันได้ โดยยึดหัวฉีดเข้ากับเครื่องวัดความดันดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ชุดปรับเทียบความดัน

การปรับเทียบความดันจะทำได้โดยปรับความดันชนิดที่ตัวปรับแรงดันของหัวฉีดดีเซล จากนั้นฉีดเชื้อเพลิงดีเซลกระแทกลงบนเครื่องวัด เมื่อเครื่องวัดถูกกระแทกจากเชื้อเพลิงที่ฉีด PVDF ฟิล์มจะโก่งตัวทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าส่งไปยังออสซิลโลสโคป ความดันที่ใช้สำหรับการปรับเทียบจะถูกสร้างขึ้นจากเครื่องทดสอบหัวฉีดและหัวฉีดดีเซลจากความดัน 17.2 – 27.6 MPa (2,500 – 4,000 psi) ผลที่ได้จากการปรับเทียบแสดงไว้ในรูปที่ 7



รูปที่ 7 แผนภาพความดันกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากเครื่องวัดความดัน PVDF ฟิล์ม

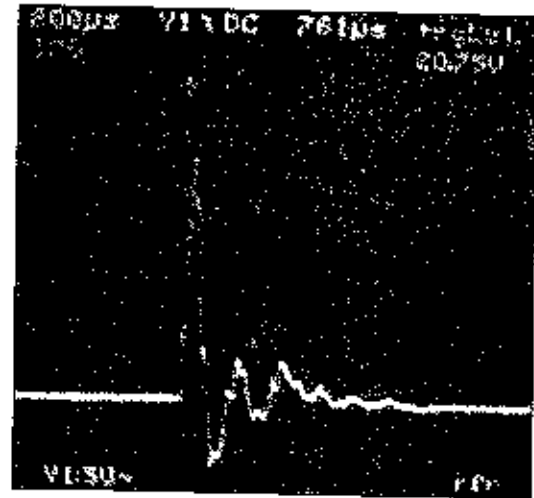
จากรูปที่ 7 ได้สมการความสัมพันธ์ของความดันกับแรงเคลื่อนไฟฟ้า

$$P = 17,975 (V) - 2614.4 \quad (2)$$

เมื่อ P = ความดัน (psi)

V = แรงเคลื่อนไฟฟ้า (Voltage)

ในการทดลอง เมื่อลำพุ่งของเหลวความเร็วสูงกระแทกลงบนเครื่องวัด แผ่น PVDF ฟิล์มโก่งตัวทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้น และส่งสัญญาณไปที่ออสซิลโลสโคป ได้สัญญาณไฟฟ้างดแสดงในรูปที่ 8 เมื่อนำค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าแทนลงในสมการที่ 2 ก็จะได้ความดันกระแทก

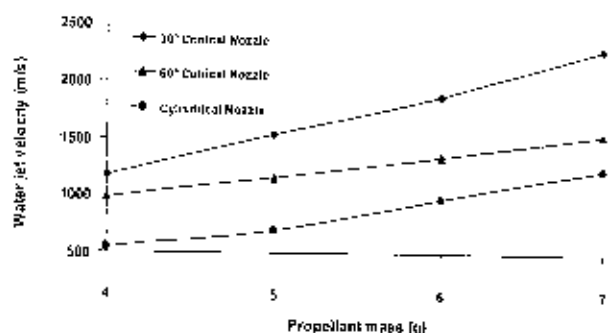


รูปที่ 8 แรงเคลื่อนไฟฟ้าจาก PVDF ฟิล์ม เมื่อถูกกระแทกด้วยความดันจากลำพุ่งของน้ำ

3. ผลการศึกษา

3.1 ความเร็วลำพุ่งของน้ำ

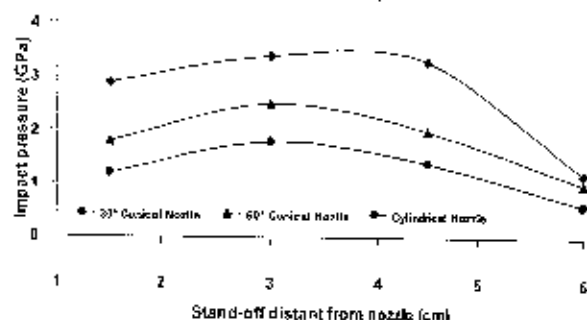
ในเบื้องต้น ความเร็วของลำพุ่งจะถูกเปลี่ยนแปลงตามความเร็วของลูกกระสุนปืน โดยการเพิ่มปริมาณดินปืนขึ้น การทดลองหาความเร็วของลำพุ่งจากหัวฉีดทั้งสามแบบข้างต้น ที่ปริมาณดินปืนขึ้น 4-7 กรัม (ความเร็วของลูกกระสุนปืนเฉลี่ย 956-1,358 m/s) พบว่าทุกๆค่าการทดลองของปริมาณดินปืนจาก หัวฉีด B ได้ค่าความเร็วสูงสุด และความเร็วสูงสุดของลำพุ่งของน้ำมีค่า 2,292 m/s ที่ปริมาณดินปืนขึ้น 7 กรัม (ความเร็วของลูกกระสุนปืน 1,358 m/s) ส่วนความเร็วต่ำสุดของลำพุ่งได้จากหัวฉีด A ที่ความเร็ว 552 m/s จากปริมาณดินปืนขึ้น 7 กรัมเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ผลจากรูปทรงหัวฉีดและปริมาณดินปืนขับที่มีต่อความเร็วของลำพุ่งของน้ำ

3.2 แรงดันกระแทก

ที่ความเร็วสูงสุดของลำพุ่งของน้ำจากหัวฉีด (A) (B) และหัวฉีด (C) มีค่า 1,240 2,292 และ 1,549 m/s ตามลำดับ ใช้ทดลองหาค่าความดันกระแทกที่ระยะ 1.5, 3, 4.5 และ 6 cm พบว่าที่หัวฉีด B มีความดันสูงกว่าหัวฉีด A และ C ในทุกตำแหน่ง หัวฉีด A มีค่าความดันกระแทกต่ำที่สุดในทุกตำแหน่งการวัด และหัวฉีดทั้งสามแบบจะค่าความดันกระแทกสูงสุดที่ระยะ 3 cm จากหัวฉีด ค่าความดันกระแทกสูงสุดของหัวฉีด A มีค่า 1.8 GPa ค่าความดันกระแทกสูงสุดของหัวฉีด B มีค่า 3.4 GPa และค่าความดันกระแทกสูงสุดของหัวฉีด C มีค่า 2.5 GPa ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 ผลของความดันกระแทกที่ระยะต่างๆ

3.3 แรงดันกระแทกทางทฤษฎี

การศึกษากลไกการเสียรูปของผิววัสดุภายใต้แรงแรงกระแทกของของไหลที่มีความเร็วสูงเป็นผลที่เกิดจากความดันกระแทกที่เกิดจากของไหลเคลื่อนที่แล้วหยุดอย่างฉับพลันจากสิ่งกีดขวาง โดยใช้สมการ

พื้นฐานของสมการค้อนน้ำ (Water Hammer) สมการที่ใช้คือ

$$P = \rho CV \quad (3)$$

เมื่อ ρ เป็นความหนาแน่นของของไหลความเร็วสูง (kg/m^3) C เป็นความเร็วเสียงของของไหลความเร็วสูง (Sound of Speed, m/s) และ V เป็นความเร็วของของไหลความเร็วสูง (m/s) [2, 4-7, 10, 15, 16]

นำผลของความเร็วลำพุ่งของน้ำที่ค่าสูงสุดจากหัวฉีดทั้งสามในรูปที่ 4 แทนสมการที่ 3 เพื่อหาความดันกระแทกหรือค้อนน้ำเปรียบเทียบกับความดันกระแทกที่ได้จากการทดลองที่ระยะการวัดของชุดวัดความเร็ว 1.5 - 4.8 cm ได้ผลเปรียบเทียบกันดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบผลความดันกระแทกจากการคำนวณและการทดลองที่ความเร็วลำพุ่งของน้ำสูงสุดของหัวฉีดสามแบบ

วิธีการ \ รูปร่างหัวฉีด		Stop Nozzle (GPa)	30° Conical Nozzle (GPa)	60° Conical Nozzle (GPa)
การคำนวณ (1.5 - 4.8 cm)		1.9	3.57	2.57
การทดลอง	ระยะ 3 cm	1.8	3.4	2.5
	ระยะ 4.5 cm	1.4	3.3	2

4. อภิปรายผลการศึกษา

การทดสอบความดันกระแทกของลำพุ่งของน้ำที่ความเร็วสูง เพื่อสร้างและเปรียบเทียบเครื่องวัดความดันจนที่ความดันสูงมากๆ ศึกษาปัจจัยเบื้องต้นที่มีผลต่อความดันกระแทกที่เกิดขึ้นจากลำพุ่งความเร็วสูงมากๆ หาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของลำพุ่งของน้ำกับความดันกระแทกและความดันกระแทกที่ระยะต่างๆของลำพุ่งจากหัวฉีดที่แตกต่างกัน จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความเร็วของลูกกระสุนปืนที่ทำหน้าที่ขับดันลำพุ่งมีผลต่อความเร็วของลำพุ่ง ความเร็วของลำพุ่งมีผลโดยตรงต่อความดันกระแทกของลำพุ่ง ส่วนความดันกระแทกของลำพุ่งที่ใกล้หัวฉีดไม่ได้มีค่ามากที่สุดแต่จะเพิ่มขึ้นหากระยะเพิ่มขึ้นจนถึงระยะหนึ่งจึง

ลดลงอย่างฉับพลัน ซึ่งต้องทำการศึกษาต่อไปถึงความมีนัยสัมพันธ์กับความเร็วของลำพุ่งของน้ำที่ระยะต่างๆ รูปข้างภายในมีผลโดยตรงต่อความเร็วของลำพุ่ง เครื่องวัดความดัน PVDF ฟิล์มสามารถวัดความดันจนได้ผลที่น่าพอใจเมื่อเปรียบเทียบกับความดันที่ได้จากการคำนวณ

แต่อย่างไรก็ตามลำพุ่งของน้ำที่ความเร็วสูงจะทำให้เกิดคลื่นกระแทก (Shock Wave) ขึ้น ในเบื้องต้นเชื่อว่าสามารถใช้เครื่องวัดความดัน PVDF ฟิล์มที่สร้างขึ้นทำการศึกษาพฤติกรรมในเบื้องต้นได้ ซึ่งจะได้ทำการศึกษาเพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อไป

5. สรุปผลการศึกษา

งานทดลองนี้ ออกแบบ สร้างและเปรียบเทียบ เครื่องวัดความดันจลน์จาก PVDF ฟิล์ม เพื่อใช้วัดความดันที่เกิดจากลำพุ่งของน้ำความเร็วสูง ศึกษาความดันกระแทกของลำพุ่งของน้ำที่ความเร็วสูง ความสัมพันธ์ของความดันกระแทกที่เกิดจากรูปข้างของหัวฉีดสามแบบ ความสัมพันธ์ของความดันกระแทกกับความเร็วสูงสุดของลำพุ่งความเร็วสูง

จากการศึกษาพบว่าความดันกระแทกของลำพุ่งความเร็วสูงมีผลโดยตรงจากความเร็วของลำพุ่ง และความเร็วของลำพุ่งขึ้นอยู่กับรูปข้างของหัวฉีดและความเร็วในการกระแทกของลูกกระสุนปืนหรือตัวขับลำพุ่งด้วย

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีที่ให้การสนับสนุนวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] A.S. Vlasov, E.L. Zilberbrand, A.A. Kozhushko, A.I. Kozachuk and A.B. Sinani (2002). Behavior of Strengthened Glass Under High-Velocity Impact, Strength of Material, Vol. 34(3), pp. 266-268.
- [2] J.E.Field (1966). Stress waves, deformation and fracture caused by liquid impact,

Mathematical and Physical Sciences, Vol. 260(6), pp. 86-93.

[3] S.J.Leach and G.L.Walker (1966). The application of high speed liquid jets to cutting, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 266, pp. 295-310.

[4] J.H.Brunton (1966). The physics of impact and deformation: Single Impact, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 260(1110), pp. 79-85.

[5] F.P.Bowden, F.R.S., and J.H.Brunton (1961). The deformation of solid by liquid impact at supersonic speeds, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 263(10-15), pp. 433-450.

[6] N.K.Bourne, T.Obara and J.E.Field (1997). High-speed Photography and Stress Gauge Studies of Jet Impact Upon Surfaces, The Royal Society, Vol. 355, pp. 607-623.

[7] N.K.Bourne (2005). On Impacting Liquid Jets and Drops onto Polymethylmethacrylate Targets, The Royal Society, Vol. 461, pp. 1129-45.

[8] Yoshiaki YAMAUCHI, Hitoshi SOYAMA and Yasunori ADACHI (1995). Suitable Region of High-Speed Submerged Water Jets for Cutting and Peening, JSME, Vol. 38 (1), pp. 31-38.

[9] N.K.Bourne, T.Obara and J.E.Field (1996). The impact and penetration of a water surface by a liquid jet, The Royal Society, Vol. 452, pp.1497-1502.

[10] H.H. Shi, Kazuyoshi Takayama and Nobuo Nagayasu (1995). The measurement of impact pressure and solid surface response in liquid solid impact up to hypersonic range, WEAR, Vol. 186-187, pp. 352-359.

[11] วุฒิชัย ลิขธิวงษ์, มุสเซอร์ เฟียรทอง, วิระพันธ์ สีหามาม และ อนิรุตน์ มัทธจักร (2008). การเปรียบเทียบชุดกำเนิดลำพุ่งความเร็วสูง. การประชุมเครือข่าย

วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย,
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จังหวัดปทุมธานี.

[12] K.Pianthong, S.Zakrzewski, M.Behnia and
B.E.Milton (2002). Supersonic liquid jets: Their
generation and shock wave characteristics, *Shock
Waves*, Vol.7(11), pp. 457-66.

[13] H.H. Shi, Motoyuki Itoh (1966). Design and
Experiment of a Small High-Speed Liquid Jet
Apparatus, *Jpn.J.Appl.Phys*, pp. 35(4157-4165).

[14] M.V. Hopson, S.K. Treadway (2008). Testing
and computational analysis of pressure
transducers in water filled tank impacted by
hypervelocity projectile, *Impact Engineering*, Vol.
35(12), pp. 121-139.

[15] N.L.Hancox, J.H.Brunton (1966). The Physics
of Impact and Deformation: Multiple Impact, *The
Royal Society*, Vol 260, pp. 121-39.

[16] F.P.Bowden, F.R.S. and J.E.Field (1964). The
brittle fracture of solid by liquid impact, by solid
impact, and by shock, *The Royal Society*, Vol.
282, pp. 331-352.

Effect of stand-off distance on impact pressure of high speed water jets

Wuttichai Sittiwong*, Wirapan Sechanam, Kulachate Pianthong and Anirut Matthujak

Department of Mechanical Engineering, Ubon Ratchathani University

Ubon Ratchathani, 34190, Thailand

Tel: +66 45 353 308 / FAX: +66 45 353 308

sittiwong@hotmail.com

Abstract

High speed liquid jets may be applied to jet cutting, drilling and cleaning. Recently, in the automotive industries, the spray injection pressure becomes higher and higher to enhance the fuel mixing for the improved combustion efficiency. However, the ultra high injection pressure may cause the damage to the nozzle and also the combustion chamber. In the medical application, the high speed liquid injection might be applied for the drug delivery through the skin where the needle is not required anymore.

From the above mentioned application, the investigation on the impact pressure of the high speed liquid jet relative to the stand-off distance is significant. The high speed liquid jets are generated by the projectile impact driven method. The high speed projectile is launched by the horizontal single stage powder gun. The experimental study focuses on the stand-off between 1.5 cm to 6.0 cm, while the nozzle contains approximately 1.5 cm³ of water in its cavity. The nozzle conical angles are 30° and 60° with the orifice diameter of 0.7 mm. The jet velocities are measured by laser beam interruptions method. The target material is the Polymethyl Methacrylate (PMMA) which the impact pressure is measured by using a piezoelectric Polyvinylidene Fluoride (PVDF) film. From the experiments, the maximum water jet velocity of 2290 m/s can be obtained from the 30° conical angle nozzle. The maximum impact pressures of nozzle conical angle of 30° and 60° are 3.4 GPa and 2.6 GPa respectively, at stand-off distance 3 cm. However, at the stand-off distance more than 3 cm, the impact pressure significantly decreases, because of aerodynamic drag, jets core break-up, and atomization of the water.

Key words: high-speed water jets, impact pressure, water-hammer, PVDF film

1. Introduction

The impact phenomenon of high-speed liquid jet on surface have been studied for many engineering application, such as water jet cleaning and cutting technology [1, 2] wet stream turbine erosion, mining and tunneling, fuel injection and Supersonic Combustion Ram (SCRAM) jets [3-7]. However, high speed liquid phenomenon can cause damage or permanently deform of structure materials. If the high-speed liquid strikes on solid surface, it can generate a great number of pressures on solid surface. This pressure causes stresses, which can create damage in material. Such damage can occur on the surface of aircraft during high-speed flight in rain, steam turbine blades, surface cleaning, fuel injection part, etc [8-16]. In case of aircraft, it is referred to as "rain erosion". The first experimental investigation of the physical of drop impact began with the famous experiments of Worthington (1908) [12] who for the first time used high speed photograph to study liquid impact. Investigation into the mechanism of rain erosion has been carried out by Engel and Jenkins (1957) [17]. Since 1961, F.P Bowden *et al.* [13] studied, the deformation of solid by the impact of a liquid jet on the solid surface. It is found that there are five general types of deformation produced in the solid. There are in that; (i) circumferential surface fractures, (ii) subsurface flow and fractures, (iii) large-scale plastic deformation, (iv) shear deformation around the periphery the impact zone and (v) fracture due to the reflexion of stress wave. After that, J.H. Brunton (1966) [12] generate liquid jet at speed up to 1,200 m/s for investigate the mode of deformation in brittle

and plastically deforming material. It was found that the predominating mechanism of deformation depends on mechanical properties of the solid and the velocity of impact. In the last 10 years, H.H. Shi *et al.* [24] measured high speed liquid jet impact pressure on solid targets by using a polyvinylidene difluoride (PVDF) pressure transducer at various stand-off distances from nozzle exit to the target. A single size nozzle diameter 2 mm was for generating impact velocity of 270 m/s.

In literature review, the studies of high speed liquid impact on a solid surface have been purpose for investigation of the damage out across the surface [8-11,13-16,21-23], calculation water-hammer pressure for 2-3 time speed of sound [2,11,14,24-25]. However, the impact pressure measurement of high speed liquid jet is difficult because of the limitation pressure transducer.

In this study high impact pressure is measured by a pressure transducer made from PVDF piezoelectric film. A study of an impact pressure of supersonic to hypersonic water jets at various stand-off distances from nozzle exit to the PVDF pressure sensor is carried out. The nozzles for experiment are three difference shapes. Finally, the value of impact pressure found from experiments can be compared with that determined from water-hammer equation.

2. Experimental apparatus

2.1 Test rig

In this study, high-speed liquid jet is generated by a special technique known as the projectile impact driven method [13]. By this technique, the liquid retained in the nozzle cavity is impacted by a high velocity projectile. The liquid obtains the momentum transfer from the projectile and is injected from the nozzle. The high velocity projectile needed in this technique has been generated by the Horizontal Single Stage Powder Gun (HSSPG), shown in Fig. 1. The HSSPG consists of launcher, launch tube, pressure relief section, test chamber and dump tank. The launch tube has a diameter of 15 mm and length of 1.5 m. The pressure relief section has a length of 40 cm, which is designed to diminish the blast wave in front of the projectile as shown in Fig. 2. The pressure relief section has 3 slots; each having a diameter of 4 mm and a length of 36 cm. The test chamber has a diameter of 48 cm. It is enclosed by poly methyl methacrylate (PMMA) and windows on two sides for visualization. The projectile is made of Polymethyl Methacrylate (PMMA), is cylindrical shape with diameter of 15 mm and length of 8 mm (weight of 0.92 g). This HSSPG has been employed to generate the high-speed water jet velocity ranged from 550 to 2,290 m/s.

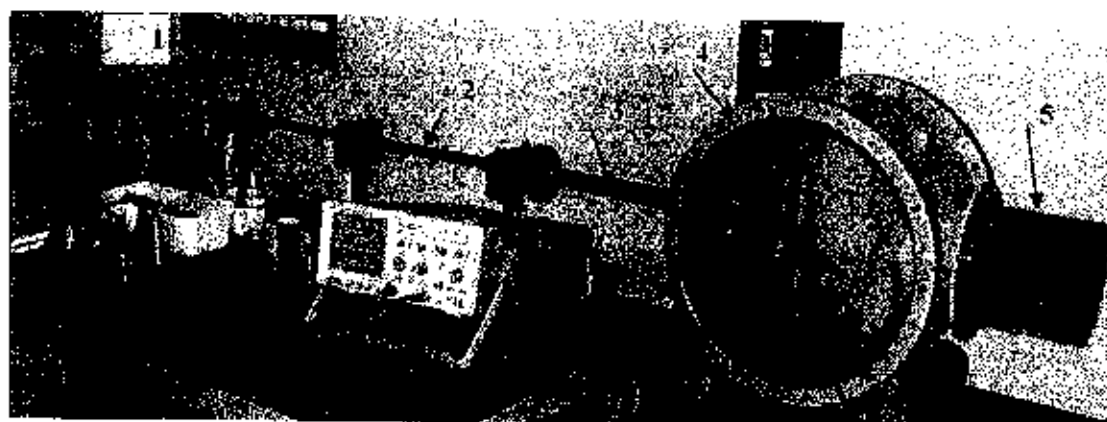


Fig. 1 The HSSPG facility: (1) Launcher, (2) Launch tube, (3) Pressure Relief Section, (4) Test Chamber and (5) Dump Tank.

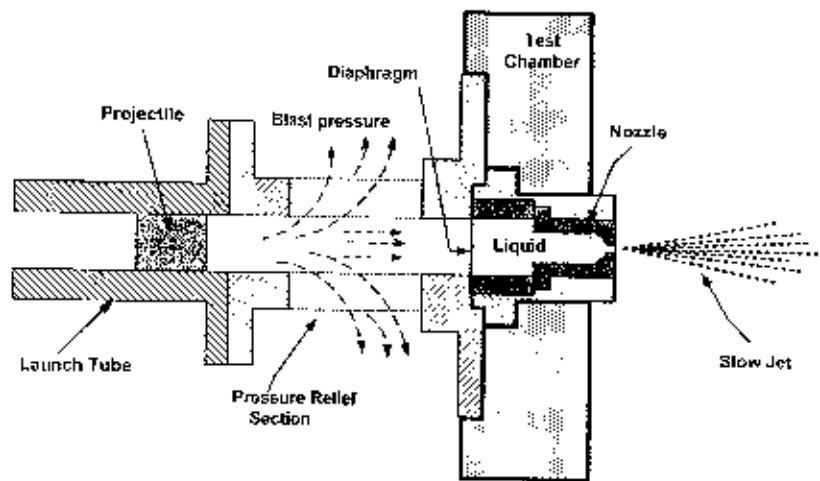


Fig. 2 The blast pressure or shock wave effect cause slow jet

2.2 Nozzle geometries

In investigation the effect of nozzle geometries on the impact pressure of the high speed water jet, three nozzle geometries: the cylindrical nozzle (A) and two conical nozzle (B, C), which has apex angles of 30° and 60° , respectively, have been tested. All nozzles have a 0.7 mm of orifice diameter (d), 8 mm of entrance diameter (D), and 4.2 mm of nozzle orifice length (l). The length of the nozzle orifice is usually defined in terms of the nozzle diameter as l/d , cone angles, and l/d as an importance parameter in designing nozzles [26] as shown in Fig. 3.

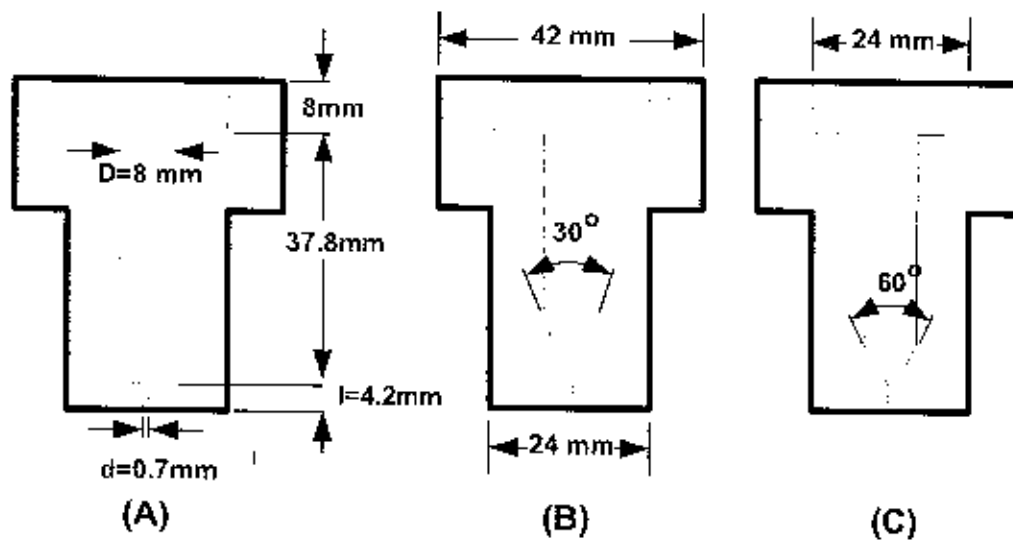


Fig. 3 nozzle shape, (A) Cylindrical nozzle (B) 30° cone angle nozzle and (C) 60° cone angle nozzle

2.3 Jet velocity measurement

The jets velocity is measured by laser beam interruption method. Two diode laser beams are put across the jet path in the test chamber as shown in Fig. 4. The 1st laser beam is placed at 15 mm from the nozzle exit and the second laser beams are at 33 mm away from the 1st one. When the jet tip interrupted laser beams, the corresponding output signals were recorded and displayed in a digital oscilloscope.

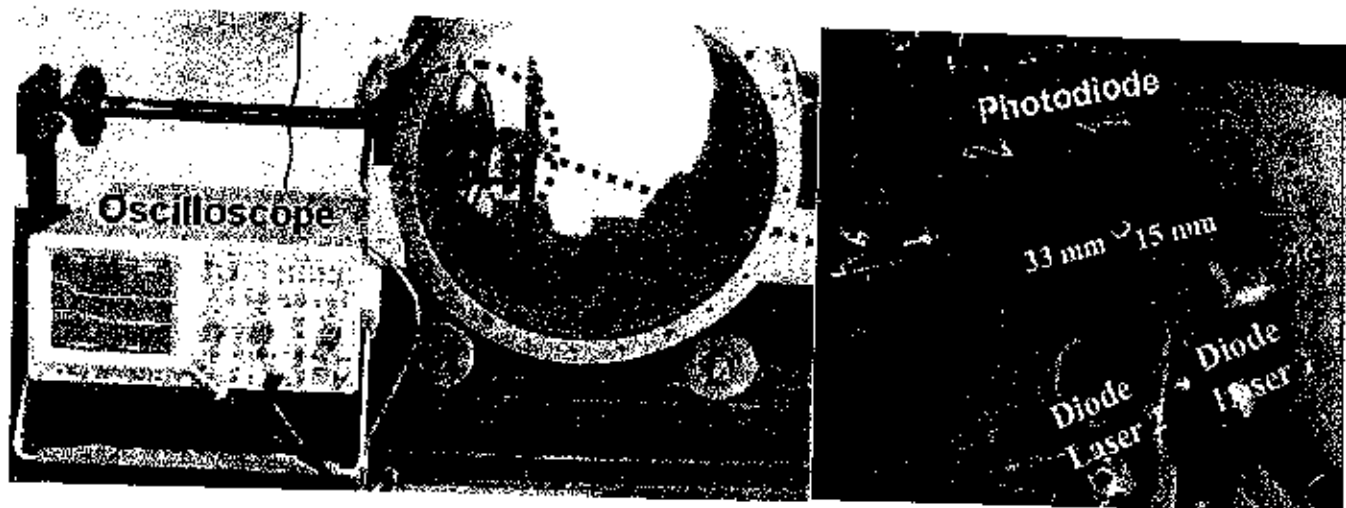


Fig. 4 Water Jet velocity measurement arrangement

When water jet tip interrupts the laser beams, the jet travelling duration between two laser beams is measured by an oscilloscope as shown in Fig. 5. From the time interval between the water jet tip crossed the two laser beam, the water jet velocities (V_j) can be calculated by,

$$V_j = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (1)$$

Where Δs is the distances between two laser beams (33 mm, in this case) and Δt is the time of flight of water jet tip over the distance Δs

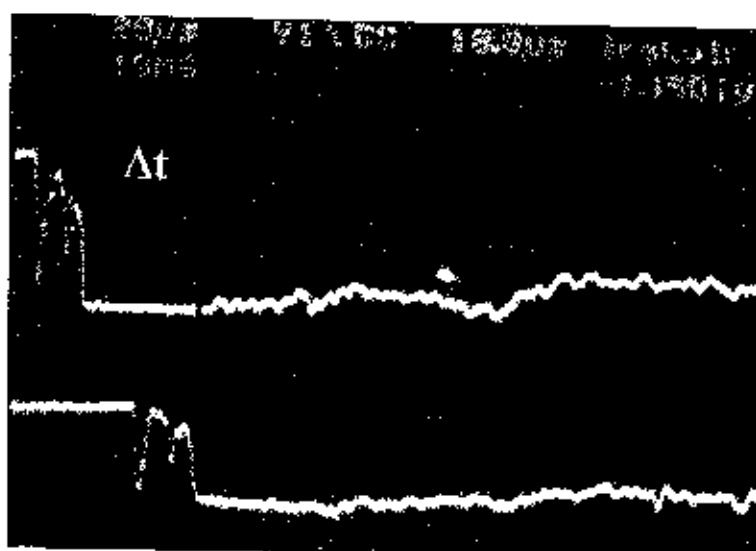


Fig. 5 Oscilloscope trace for the time of flight measurement

2.4 Impact pressure measurement

The high speed water jets generated from HSSPG is impulsive jet. Once the water jet impinges on solid surface, their impact pressure reaches a high value in a very short time. This pressure is dynamics pressure or water-hammer pressure created by impact of impulsive water jet. This dynamics pressure is a pressure of high MPa up to GPa. Hence, it is not possible to measure by conventional pressure measurement.

To measure very high pressure which can not use conventional pressure measurement, the pressure sensor was designed, manufactured and calibrated in this study. The pressure sensor is constructed with Polyvinylidene Fluoride (PVDF)

piezoelectric film, a 6 mm thick of PMMA and a 8 mm thick of support rubber. The constructed pressure sensor is assembled in a 8 mm thickness and an outer diameter 75 mm housing as shown in Fig 6. This PVDF film is a flexible component which comprises a 28 μm thick of piezoelectric PVDF polymer film with screen printed Ag-ink electrodes as shows in Fig. 7.

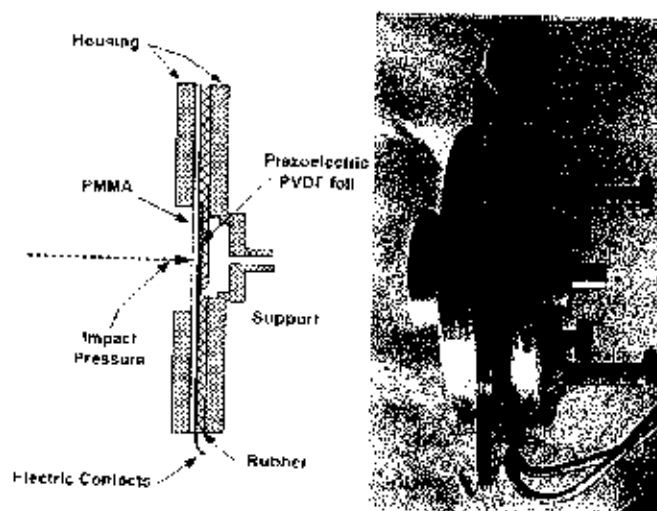


Fig. 6 Assembly of the PVDF pressure sensor



Fig. 7 Polyvinylidene Fluoride (PVDF) piezoelectric film

The characteristics curve of PVDF pressure sensor was measured by test set-up shown in Fig. 8. The PVDF pressure sensor was calibrated by using dynamics pressure from injector nozzle tester. One side of the pressure sensor is exposed to the impingement from diesel fuel generated by injector nozzle tester, and other side is exposed to ambient air pressure. The pressure level was increasing from 2,500 psi to 4,000 psi (17.2 - 27.6 MPa) by 500 psi step interval.

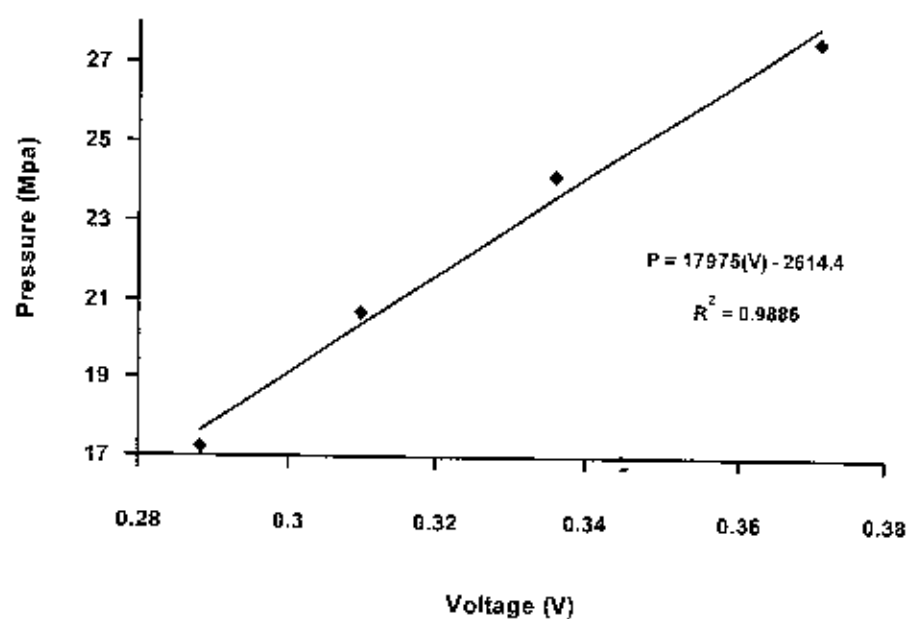


Fig. 8 Characteristics curve of the PVDF pressure sensor

The experiment setup for measuring the impact pressure of liquid jets by using a PVDF is shown in Fig. 9. Once the water jet impacts on the PMMA surface, the PVDF film will respond to impact pressure and then the pressure signal of PVDF film is recorded by oscilloscope as shown in Fig. 10. In the experiment, the stand-off distance from nozzle exit to the PVDF pressure sensor is varied changed by adjusting the pressure sensor holder backwards or forwards.

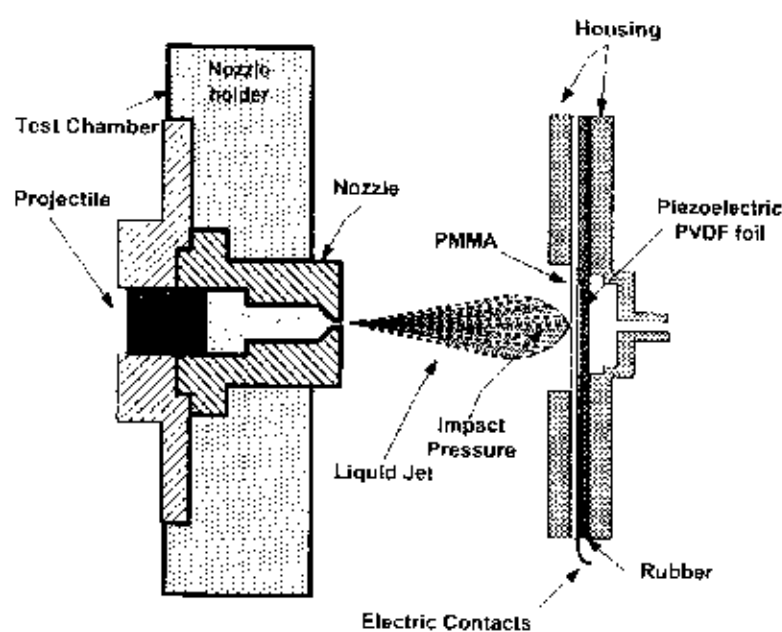


Fig. 9 Experimental setup for Impact pressure measurement

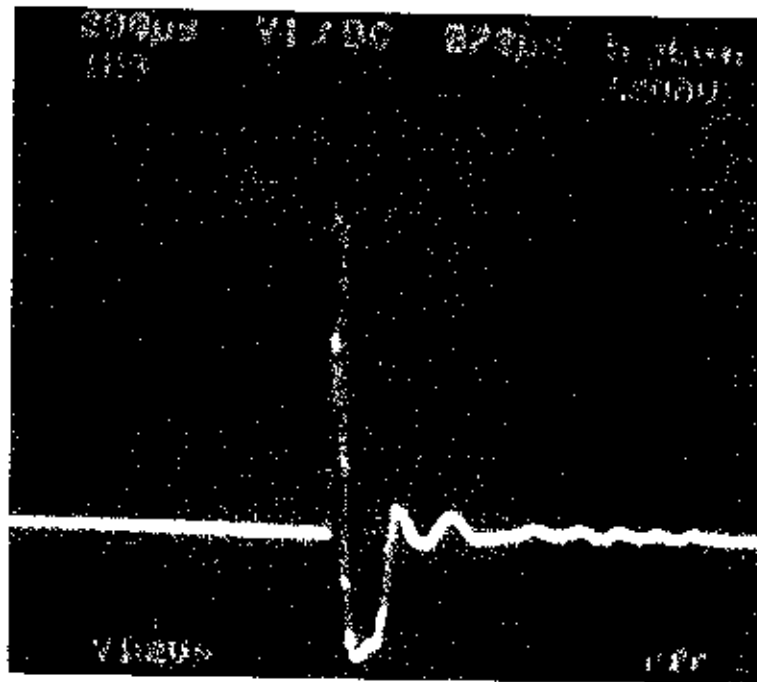


Fig. 10 A load-time trace for a water jet impact

From the calibration curve in Fig. 8, the line on the figure is linear fit to the data and the impact pressure can be calculated using the Equation;

$$P = 17,975 (V) - 2,614.4 \quad (2)$$

Where P is the impact pressure (MPa) of water jet and V is voltage signal (mV) from PVDF pressure sensor.

3. Results

3.1 The Water jet velocity

In this experiment, the projectile velocity (956-1,358 m/s) is varied by variant the propellant mass from a 4 g up to 7 g of smokeless gunpowder. In Fig. 11, the water jet velocities from three shapes nozzle are compared. In this study, a 7 g (1,358 m/s V_p) of gunpowder is used for generating the maximum water jet velocity. The maximum velocity of around 2,292 m/s, 1,519 m/s and 1,241 m/s were generated from a 30° conical angle nozzle, a 60° conical angle and a cylindrical nozzle, respectively. The effect of nozzle shape and propellant mass on water jet velocities are shown in Fig. 11

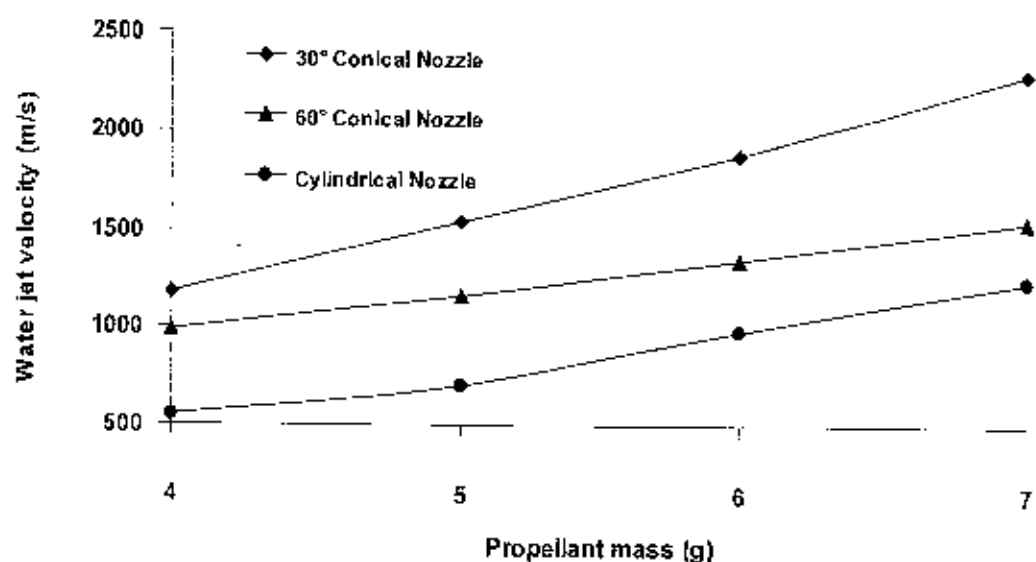


Fig. 11 The effect of nozzle shape and propellant mass on water jet velocities

3.2 The Impact Pressure

The impact pressures of the water jets at 1.5, 3, 4 and 6 cm stand-off distance from nozzle exit with three nozzle shapes are investigated. The maximum water jet velocities generated from nozzle (A), nozzle (B) and nozzle (C) are 1,240, 2,292 and 1,549 m/s, respectively. The effect of stand-off distant and nozzle geometries on the impact pressures is shown in Fig. 12. From the figure, we found that the maximum impact pressure obtained from the 30° conical nozzle, 60° conical nozzle and cylindrical nozzle are 3.4 GPa, 2.5 GPa and 1.8 GPa, respectively. The maximum impact pressure occurs at 3 cm for 60° conical nozzle and cylindrical nozzle while it occurs at 4.5 for 30° conical nozzle.

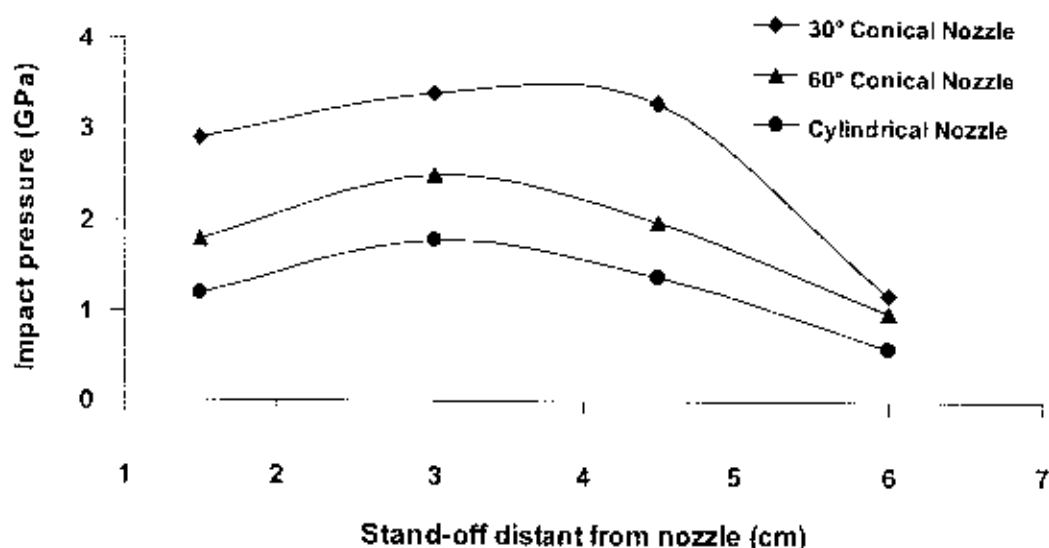


Fig. 12 Impact pressure at stand-off distance from nozzle

3.3 The water-hammer effect

When a droplet of liquid crash on a rigid surface under higher velocity or the frontal liquid in column is stopped instantaneously and sideways flow is prevented. In these cases, the pressure developed in moving column or the high

pressure occur in liquid impact as a result of the water-hammer effect. The water-hammer pressure (P) for a liquid striking a rigid surface is given by the equation [11-16, 23, 24]

$$P = \rho CV \tag{3}$$

Where ρ is the density (kg/m^3) of the liquid, C the speed of sound (m/s) in liquid and V is the velocity (m/s) of the liquid. The water-hammer equation can be used for calculating the maximum pressure developed when a water jet collides on a rigid surface. The value of P found from the experiments can be compared with that determined from Equation (3). From the equation, a water jet with an impact velocities V of the maximum velocity from each nozzles (1,240 2,292 and 1,549 m/s), C = 1,500 m/s and $\rho = 1,000 \text{ kg/m}^3$. Results of impact pressure from experiment are comparing with that of the calculation as shown in Table 1.

Table 1 Calculate-experiment comparison for impact pressure

Nozzle Shapes source		Cylindrical Nozzle (GPa)	30° Conical Nozzle (GPa)	60° Conical Nozzle (GPa)
Calculation (1.5 - 4.8 cm.)		1.9	3.57	2.57
Experiment	Distance 3 cm.	1.8	3.4	2.5
	Distance 4.5 cm.	1.4	3.3	2

4. Concluding Remarks

A horizontal single-stage powder gun was designed and manufactured for the high-speed liquid jets generation. From the high-speed jet generation, the maximum water jet velocity of 2,292 m/s can be obtained from 30° conical angle nozzle with 7 g of gunpowder. In this study, the PVDF film is used for measuring the impact pressure of the high-speed water jet at four stand-off distance with three nozzle geometries. The maximum impact pressure is 3.4 GPa at 3 cm stand-off distance. These results are compared with the water-hammer pressure equation from comparison, the pressure PVDF sensor was successfully performed to measure dynamics pressure of high-speed water jet. Besides, the impact pressures of water jets depend on the velocities of water jet, while the velocity of water jet depends on nozzle shapes and projectile impact velocity.

Acknowledgments

This research is financially supported by the National Research Council of Thailand (NRCT) through Ubon Ratchathani University Research grant 2007 and Thailand Research Fund (RTF), contract No.RMU5180020.

References

[1] S.J.Leach, G.L.Walker., 1966, "The application of high speed liquid jets to cutting. Mathematical and Physical Sciences," Vol. 266, pp. 295-310.
[2] Yoshiaki YAMAUCHI, Ilitoshi SOYAMA, Yasunori ADACHI, et al., 1995, "Suitable Region of High-Speed Submerged Water Jets for Cutting and Peening," JSME, Vol. 38, No. 1 pp. 31-38.
[3] K.Pianthong, A.Matthujak, K.Takayama, et al., 2008, "Dynamic characteristics of pulsed supersonic fuel sprays," Shock Waves, Vol. 18, pp. 1-10.
[4] K.Pianthong, K.Takayama, B.E.Milton, M.Bchnia., 2005, "Multiple pulsed hypersonic liquid diesel fuel jets driven by projectile impact," Shock Waves.
[5] B.E.Milton, K.Pianthong., 2005, "Pulsed, supersonic fuel jets-A review of their characteristics and potential for fuel injection, Heat and Fluid Flow," Vol. 26, pp. 656-71.
[6] H.H.Shi, K.Takayama., 1999, "Generation of hypersonic liquid fuel jets accompanying self-combustion," Shock Waves, Vol. 9, pp.327-32.
[7] Chang Sik Lee, T.Obara, Sung Wook Park., 2002, "An experimental and numerical study on fuel atomization characteristics of high-pressure diesel injection sprays," Fuel, Vol. 81, pp. 2417-23.
[8] M.J.MATTHELWSON, D.A.Gorhan., 1980, "An oblique impact anomaly in high-velocity liquid impact on glass," journal of materials science, Vol. 15, pp. 1518-20.

- [9] R.C.Dykhuizen, M.F.Smith, D.I.Gilmore, et al., 1999, "Impact of High Velocity Cold Spray Particles," *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 8, No. 4, pp. 559-64.
- [10] V.Samardzic, E.S.Geskin, G.A.Atanov, et al., 2008, "Investigation of Liquid Impact-Based Macro-, Meso-, and Microforming Processes," *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 17 No. 3, pp. 302-15.
- [11] N.K.Bourne., 2005, "On Impacting Liquid Jets and Drops onto Polymethylmethacrylate Targets," *The Royal Society*, Vol. 461, pp. 1129-45.
- [12] J.H.Brunton., 1966, "The physics of impact and deformation: Single Impact," *Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 260, No. 1110, pp.79-85.
- [13] F.P.Bowden, F.R.S., J.H.Brunton., 1961, "The deformation of solid by liquid impact at supersonic speeds," *Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 263, No. 10-15, pp. 433-50.
- [14] N.K.Bourne, T.Obara, J.E.Field., 1997, "High-speed Photography and Stress Gauge Studies of Jet Impact Upon Surfaces," *The Royal Society*, Vol. 355, pp. 607-623.
- [15] N.I.Hancox, J.H.Brunton., 1966, "The Physics of Impact and Deformation: Multiple Impact," *The Royal Society*, Vol. 260, pp.121-39.
- [16] F.P.Bowden, F.R.S., J.E.Field., 1964, "The brittle fracture of solid by liquid impact, by solid impact, and by shock," *The Royal Society*, Vol. 282, pp.331-352.
- [17] Wuttichai Sittiwong, Kulachate Pianthong, Wirapan Seehanam, Anirut Matthujak., 2008, "Calibration of High Speed Impact Test Rig," *The Mechanical Engineering Network of Thailand, Bangkok, Thailand*, ISBN 978-974-466-340-5
- [18] A.Sasoh, S.Ohba, K.Takayama., 2000, "Projectile acceleration in a single-stage gun at breech pressures below 50 MPa," *Shock Waves*, Vol. 10, pp. 235-40.
- [19] A.Matthujak, S.H.R.Hosseini, K.Takayama, et al., 2007, "High speed jet formation by impact acceleration method," *Shock Waves*, Vol. 16, pp. 405-19.
- [20] H.H.Shi, H.Sato., 2003, "Comparison-speed liquid jets," *Experiments in Fluids*, Vol. 35, pp. 486-92.
- [21] A.S.Vlasov, E.L.Zilberbrand, A.A.Kozhushko, et al., 2002, "Behavior of Strengthened Glass Under High-Velocity Impact," *Strength of Materials*, Vol. 34, No. 3, pp. 266-268.
- [22] H.H.Shi, J.E.Field., 2004, "Stress waves propagation in solids under high-speed liquid impact," *Science in China*, Vol. 47, No. 6, pp. 752-66.
- [23] J.E.Field., 1966, "Stress waves, deformation and fracture caused by liquid impact," *Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 260, No. 6, pp. 86-93.
- [24] H.H.Shi, Kazuyoshi Takayama, Nobuo Nagayasu., 1995, "The measurement of impact pressure and solid surface response in liquid solid impact up to hypersonic range," *WEAR*, Vol. 186-187, pp.352-359.
- [25] N.K.Bourne, T.Obara, J.E.Field., 1996, "The impact and penetration of a water surface by a liquid jet. *The Royal Society*, Vol. 452, pp.1497-1502.
- [26] K.Pianthong, S.Zakrzewski, M.Behnia, B.E.Milton., 2002, "Supersonic liquid jets: Their generation and shock wave characteristics," *Shock Waves*, Vol.7, No. 11, pp. 457-66.

ภาคผนวก ข
ประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติคณะผู้วิจัย

ส่วน ก : ประวัติคณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย

- ชื่อ(ภาษาไทย) รศ.ดร. กุลเชษฐ์ เพียรทอง
(ภาษาอังกฤษ) Asst.Prof.Dr. Kulachate PLANTHONG
- หมายเลขบัตรประจำตัวประชาชน 3 3499 00623 07 1
- ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
อ. วรวิมลราช จ. อุบลราชธานี 34190
Email: K.Plantong@ubu.ac.th
Telephone: 045-288376-377 Fax: 045-288378

4. ประวัติการศึกษา

ปี การศึกษา ที่จบ	ระดับปริญญา (ตรี โท เอก) และชื่อเต็ม	อักษรย่อ ปริญญา วิชา	สาขา	วิชาเอก	รับสถาบัน การศึกษา	ประเทศ
2535	วิศวกรรมศาสตร บัณฑิต	วศ.บ. (เครื่องกล)	วิศวกรรม เครื่องกล	-	มหาวิทยาลัย เทคโนโลยี พระจอม เกล้าธนบุรี	ไทย
2540	มหาบัณฑิต	M.Eng.Sc. (Mechanical Engineering)	วิศวกรรม เครื่องกล	Refriger ation and Air Condition ing design	The University of New South Wales	Australia
2545	ดุษฎีบัณฑิต	Ph.D. (Mechanical	วิศวกรรม เครื่องกล	Combusti on	The University	Australia

		Engineering)		hypersonic jets	of New South Wales	
--	--	--------------	--	-----------------	--------------------	--

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ: High-speed liquid fuel jets and shock wave characteristics, fuels & engine performance & engine emission, ejector refrigeration
6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ
 - a. Heating-up Behaviour of Rotary Kiln in Cement Plant, TPI Polene Co. Ltd. Saraburi, THAILAND (1994)
 - b. Hyper-velocity impact at Shock Wave Research Research Center, Institute of Fluid Sciences, Tohoku University, Sendai, JAPAN (1998)
 - c. Combustion in Hypersonic Fuel jets at the Internal Combustion Engine Laboratory, The University of New South Wales, Sydney, AUSTRALIA. (1997-2001)
 - d. Supersonic Liquid Fuel Jets at Interdisciplinary Shock Wave Research Center, Institute of Fluid Science, Tohoku University, Japan (during 2001-2004, เดินทางไปร่วมทำวิจัย 7 ครั้ง)
7. บทความวิจัย//ผลงานตีพิมพ์

ผลงานตีพิมพ์ ของ รศ.ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง (เฉพาะบทความวิจัยตีพิมพ์ในวารสาร)

List & Contribution on Kulachate Pianthong's Publications

International Refereed Journal

[1] K. Pianthong, S. Zakrzewski, B.F. Milton, and M. Behnia, "Supersonic liquid jets; their generation and shock wave characteristics," Shock Waves Journal, Vol. 11, no. 6, pp. 457-466, 2002. (average impact factor = 0.442, between 2002-2004)

- [2] **K. Pianthong**, S. Zakrzewski, M. Behnia, and B.E. Milton, "Characteristics of impact driven supersonic liquid jets," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 27 (5), pp. 589-598, 2003. (average impact factor = 0.663, between 2002-2004)
- [3] **K. Pianthong**, B.E. Milton, and M. Behnia, "Generation and shock wave characteristics of unsteady pulsed supersonic liquid jets," *Journal of Atomization and Sprays*, vol. 13, no. 5&6, pp. 475-498, 2003. (average impact factor = 0.512, between 2002-2004)
- [4] S. Zakrzewski, B.E. Milton, **K. Pianthong**, and M. Behnia, "Supersonic liquid fuel jets injected into quiescent air," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 25, pp 833-840, 2004. (average impact factor = 1.018, between 2002-2004)
- [5] **K. Pianthong (70%)**, K. Takayama (15%), B.E. Milton (10%), and M. Behnia (5%), "Multiple pulsed hypersonic liquid diesel fuel jets driven by projectile impact," *Shock Waves Journal*, Vol. 14, issue 1&2, pp. 73-82, 2005. (average impact factor = 0.442, between 2002-2004)
- [6] B.E. Milton (50%) and **K. Pianthong (50%)**, "Pulsed, supersonic fuel jets - A review of their characteristics and potential for fuel injection," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 26, issue 4, pp. 656-671, 2005. (average impact factor = 1.018, between 2002-2004)
- [7] **K. Pianthong (60%)**, A. Matthujak (10%), K. Takayama (10%), T. Saito (10%), and B. Milton (10%), "Visualization of supersonic liquid fuel jets," *Journal of Flow Visualization and Image Processing*, Vol. 13, pp. issue. 3, pp. 217-242, 2006 (December) (invited paper & Keynote speaker at PSFVIP5)
- [8] **K. Pianthong*** (65%), W. Sechanam (20%), M. Behnia (5%), T. Sriveerakul (5%), S. Aphornratana (5%), "Investigation and improvement of ejector refrigeration system using computational fluid dynamics technique," *Energy Conversion and Management Journal*, vol. 48, pp. 2556-2564, 2007 (impact factor 2005 = 1.244)
- [9] **K. Pianthong*** (60%), A. Matthujak (15%), K. Takayama (10%), B.E. Milton (10%), and M. Behnia (5%), "Dynamic characteristics of pulsed supersonic sprays," *Shock Waves Journal*, Vol. 18, pp. issue. 1, pp. 1-10, 2006. (Impact factor 2010 = 0.907).

- [10] Nirut Onsalung, Chawalit Thinvongpituk, and **Kulachate Pianthong**, "The Influence of Foam Density on Specific Energy Absorption of Rectangular Steel Tubes", *Energy Research Journal (ERJ)*, Vol. 1, issue 2, pp. 135-140, 2010.
- [11] **Kulachate Pianthong**, and Prachasanti Thaiyasuit* "Production of Biodiesel from Rubber Seed Oil and Its Effects to Engine Performances" Greater Mekong Sub-region Academic and Research Network (GMSARN) International Journal, Vol. 5, no. 1, pp. 1-10.
- [12] **Kulachate Pianthong***, Prachasanti Thaiyasuit, Chayamon Saengmance, Veerayoot nonchana and Sorawit Nunt-jaruwong "Investigation on Performances of the Engine for the Electrical Power Generator Using Biomass Gases and Biodiesel as Fuels", Greater Mekong Sub-region Academic and Research Network (GMSARN) International Journal, Vol. 5, no. 1, pp. 11-17.
- [13] Ittipon Worapan, **Kulachate Pianthong***, Prachasanti Thaiyasuit, "Optimization for biodiesel production from crude palm oil by ultrasonic irradiation assisted using response surface methodology," *Journal of Chemical Technology and Biotechnology (JCTB)* (in press) (Impact factor 2010 = 1.818)
- [14] Prachasanti Thaiyasuit, **Kulachate Pianthong***, Ittipon Worapan, "Acid esterification-alkaline transesterification process for methyl ester production from crude rubber seed oil," *Journal of Oleo Science (JOS)* (in press) (Impact factor 2010= 1.094)
- [15] Ittipon Worapan, **Kulachate Pianthong***, Prachasanti Thaiyasuit, "Two-step biodiesel production from crude *Jatropha curcas* L. oil using ultrasonic irradiation assisted," *Journal of Oleo Science (JOS)* (manuscript accepted) (Impact factor 2010= 1.094)
- [16] A. Matthajak, C. Kasammittiporn, W. Sithinwong, **K. Pianthong**, "Effect of stand-off distance on impact pressure of high speed water jets injected into water," *Applied Mechanics and Materials*, Vols. 52-54 (Advances in Mechanical Engineering), pp. 1873-1878, 2011. (SJR 2010 = 0.027 equivalent to Impact factor 0.146, powered by SCOPUS).

[17] A. Marthujak, C. Kasammittiporn, W. Sitthinwong, **K. Pianthong**, "Effects of different liquid properties on the characteristics of impact-generated high speed liquid jets," Applied Mechanics and Materials, Vols. 110-116 (Mechanical and Aerospace Engineering), pp. 370-376, 2012. (SJIR 2010 – 0.027 equivalent to Impact factor 0.146, powered by SCOPUS).

National Refereed Journal

[1] I. Worapun (45%), **K. Pianthong (45%)**, S. Pongstakodee (5%), and D. Soodphakdee (5%) "Performance and Emission Characteristics in Diesel Engine Using Biodiesel from Waste Cooking Oil-Ethanol Blend as a Fuel," KKU Engineering Journal, Vol. 33, no. 6, pp. 691-705, 2006. (in Thai)

[2] W. Sechanain (45%), **K. Pianthong (40%)**, M. Belunja (5%), T. Srivicerakul (5%), S. Aphornratana (5%), "Investigation on Characteristic of Ejector Refrigeration using CFD," KKU Engineering Journal, Vol. 33, no. 6, pp. 629-644, 2006. (in Thai)

[3] **กุลเชษฐ์ เพียรทอง** กิตติพงษ์ เสถียรสมภาส อธิพัลล วรพันธ์ และ วิระพันธ์ สีหนาม "ความสึกหรอและสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กที่ใช้น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันทอดแล้วเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงในระยะยาว" วารสารวิชาการ ม.อบ. (มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี), ปีที่ 10, ฉบับที่ 3, หน้า 45-60, 2550.

[4] อธิพัลล วรพันธ์ **กุลเชษฐ์ เพียรทอง** และ ประจักษ์นติ ไตรยสุทธิ์ "ผลกระทบของอัตราส่วนผสมน้ำมันไบโอดีเซลผสมเอทานอลต่อสมรรถนะและการปล่อยสารมลพิษในเครื่องยนต์ดีเซลหมุนเร็ว" วารสารวิชาการ ม.อบ. (มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี), ปีที่ 10, ฉบับที่ 3, หน้า 61-80, 2550.

[5] **กุลเชษฐ์ เพียรทอง** ปรวิษฐา มุขดา และ วิระพันธ์ สีหนาม "การลดของเสียประสัทธิ์แรงด้าน ในกรณีวิ่งตามกันของรถบรรทุกเล็ก" วารสารวิชาการ ม.อบ. (มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี), ปีที่ 11, ฉบับที่ 1, หน้า 35-52, 2552.

- [6] ชญานนัทธ์ แสงมณี, กุลเชษฐ์ เพียรทอง, พิสิษฐ์ เดชะรุ่งไพศาล, อนิรุตต์ มัทธูจิกัร “สมรรถนะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ก๊าซชีวภาพและน้ำมันไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิง” วารสารวิชาการ ม.อบ. มหาวิทยาลัย (อุบลราชธานี, ปีที่ 11, ฉบับที่ 2, หน้า 1-9, 2552).
- [7] พิสิษฐ์ เดชะรุ่งไพศาล, ธนกร เก็มสุวรรณ, ชาคริต โพธิ์งาม, กุลเชษฐ์ เพียรทอง “ระบบติดตามดวงอาทิตย์สำหรับวัดรังสีแสงอาทิตย์” วารสารวิชาการ ม.อบ. มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี (ปีที่ 11, ฉบับที่ 1, หน้า 99-110, 2552).
- [8] ปรัชญา มุขดา, กุลเชษฐ์ เพียรทอง, และวิระพันธ์ สีหามาม. “การเพิ่มขึ้นของอัตราการผลิตไบโอดีเซลจากไขมันจากการเปิดกระจกข้างและติดตั้งอุปกรณ์เสริมของรถบรรทุกเล็ก.” วารสารราชภัฏเพชรบุรี ปีที่ 7 ฉบับที่ 1: มกราคม-มิถุนายน 2552.
- [9] ปรัชญา มุขดา, กุลเชษฐ์ เพียรทอง, และวิระพันธ์ สีหามาม. “การเพิ่มขึ้นของอัตราการผลิตไบโอดีเซลจากไขมันจากการเปิดกระจกข้างและติดตั้งอุปกรณ์เสริมของรถบรรทุกเล็ก.” วารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี (ปีที่ 2 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม 2551).
- [10] Itipon Worapun, **Kulachate Pianthong** and Prachasanti Thaiyasui .Synthesis of biodiesel by two-step transesterification from crude jatropha curcas L. oil using ultrasonic cavitation assisted .KKU Engineering Journal. Volume 37 Number 3, July-September, 2010. pp.169-179
- [11] วุฒิชัย เทิดจิวงษ์, กุลเชษฐ์ เพียรทอง, วิระพันธ์ สีหามาม, อนิรุตต์ มัทธูจิกัร และ ชัยเดช เกษมนนิมิตรพร “ผลของอุณหภูมิต่อพฤติกรรมของลำฟุ้งน้ำมันดีเซลความเร็วสูง” วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, ปีที่ 13, ฉบับที่ 2, 2554, หน้า 33-43.
- [12] วิสัณณนาม ผลเจริญ และ กุลเชษฐ์ เพียรทอง “การปรับปรุงสมรรถนะของเครื่องยนต์ SI ที่ใช้เชื้อเพลิงเอทานอล (E100) และ เชื้อเพลิงแก๊สโซลีน E85” วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, ปีที่ 13, ฉบับที่ 2, 2554, หน้า 44-51.
- [13] สุพิน จอคนอก, กุลเชษฐ์ เพียรทอง และ จิริง ดินเชิดชู “คุณลักษณะการเผาไหม้และสมรรถนะของเครื่องยนต์ทรงกระบอกล” วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, ปีที่ 13, ฉบับที่ 2, 2554, หน้า 52-61.

[14] Ittipon Worapun, Prachasanti Thaiyasui, Kulachate Piantkong(2011), Ultrasonic irradiation assisted synthesis of biodiesel from crude palm oil using response surface methodology, SWU Engineering Journal, Vol. 6 (1), pp. 1-15 (English).

.....

ประวัติและผลงาน

1. ชื่อ (ภาษาไทย) ศศ.ดร. ประชาสันติ ไตรยสุทธิ์
(English) Asst.Prof.Dr. Prachasanti Thaiyasui
2. หมายเลขบัตรประจำตัวประชาชน 3 3497 00058 141
3. ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ระดับ 8 เลขที่ประจำตำแหน่ง 434
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
โทรศัพท์ 045 353309 โทรสาร 045 353 308

4. ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา ที่จบ	ระดับปริญญา (ตรี โท เอก) และชื่อเต็ม	อักษรย่อ ปริญญา/วิชา	สาขา	ชื่อสถาบัน การศึกษา	ประเทศ
2536	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	วศ.บ. (เครื่องกล)	วิศวกรรม เครื่องกล	มหาวิทยาลัย รังสิต	ไทย
2540	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	วศ.ม. (เครื่องกล)	วิศวกรรม เครื่องกล	มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์	ไทย
2554	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต	ปร.ด. (เครื่องกล)	วิศวกรรม เครื่องกล	มหาวิทยาลัย อุบลราชธานี	ไทย

5. ผลงานวิจัย บทความทางวิชาการ และสิ่งตีพิมพ์

5.1 ประชุมวิชาการระดับชาติ

- [1] ประชาสันติ ไตรยสุทธิ 2547, "Effect of Ethanol-Gasoline Fueled on Combustion Characteristics for SI Engine" การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18
- [2] กุลเชษฐ เพียรทอง, อธิธิพล วรพันธ์ ประชาสันติ ไตรยสุทธิ พิศาล สมบัติวงศ์ มงคล หุตเสนห์ 2548, "การผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วขนาด 150 ลิตร ต่อรอบการผลิต และการใช้งานกับเครื่องยนต์ขนาดเล็ก" การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 1
- [3] ประชาสันติ ไตรยสุทธิ, กุลเชษฐ เพียรทอง, ไพฑูรย์ เติญรัมย์ย์, ทนงคำ กิริยะ และ อธิธิพล วรพันธ์ 2549, "การผลิตน้ำมัน Bio diesel จากน้ำมันพืชใช้แล้ว และศึกษาผลกระทบต่อเครื่องยนต์" การประชุมวิชาการ ม.อ.บ.วิจัย ครั้งที่ 1
- [4] ประชาสันติ ไตรยสุทธิ, กุลเชษฐ เพียรทอง, พิสิษฐ์ เตชะรุ่งไพศาล, ชวลิต ฉันทวงศ์พิทักษ์ และ อธิธิพล วรพันธ์ 2550, "สมรรถนะและมลพิษจากไอเสียของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดเมื่อใช้น้ำมันไบโอดีเซลจากเมล็ดยางพารา" ประชุมสัมมนาวิชาการ วิศวกรรมยานยนต์ ครั้งที่ 3
- [5] ประชาสันติ ไตรยสุทธิ, กุลเชษฐ เพียรทอง, พิสิษฐ์ เตชะรุ่งไพศาล, ชวลิต ฉันทวงศ์พิทักษ์ และ อธิธิพล วรพันธ์ 2550, "การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดยางพาราโดยวิธี กรด-เอสเทอร์รีไฟเคชัน และ ค้าง-ทรานเอสเอสเทอร์รีไฟเคชัน" การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 3
- [6] ประชาสันติ ไตรยสุทธิ, กุลเชษฐ เพียรทอง และ อธิธิพล วรพันธ์ 2550, "สมรรถนะและสมดุลทางความร้อนของเครื่องยนต์ดีเซล 1 สูบที่ใช้ไบโอดีเซลจากเมล็ดยางพารา" การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21
- [7] ประชาสันติ ไตรยสุทธิ, กุลเชษฐ เพียรทอง, พิสิษฐ์ เตชะรุ่งไพศาล, ชวลิต ฉันทวงศ์พิทักษ์ และ อธิธิพล วรพันธ์ 2550, "การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดยางพาราด้วยวิธี ทรานเอสเอสเทอร์รีไฟเคชันแบบ 2 ขั้นตอน" การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21
- [8] ประชาสันติ ไตรยสุทธิ, และ กุลเชษฐ เพียรทอง 2552, "คุณลักษณะการสเปย์ของเชื้อเพลิงไบโอดีเซล" การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 5
- [9] อธิธิพล หิรัญวัฒน์, ประชาสันติ ไตรยสุทธิ และ กุลเชษฐ เพียรทอง 2554, "การใช้เอทานอลเป็นสารหน่วงจังหวะเริ่มต้นการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ CI ขนาดเล็กเมื่อใช้ปาล์มไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงหลัก" การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25

[10] พิกุล สมบัติวงศ์ ประชาสันติ ไตรยสุทธิ และ กุลเชษฐ เพียรทอง 2554, “คุณสมบัติและการเผาไหม้ของเครื่องยนต์เชื้อเพลิงร่วมน้ำมันดีเซล-ก๊าซชีววมวล” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25

[11] Ittipon Worapun, Kulachate Pianthong and **Prachasanti Thaiyasuit** 2554, “Ultrasonic irradiation assisted synthesis of biodiesel from crude palm oil using response surface methodology (RSM)” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25

5.2 วารสารวิชาการระดับชาติ

[1] อธิวัฒน์ วรพันธ์, กุลเชษฐ เพียรทอง และ **ประชาสันติ ไตรยสุทธิ** 2551, “ผลกระทบของอัตราส่วนผสมน้ำมันไบโอดีเซลผสมเอทานอลต่อสมรรถนะและการปล่อยมลพิษในเครื่องยนต์ดีเซลหมุนเร็ว”

วารสารวิชาการ ม.อบ. ปีที่ 10 ฉบับที่ 3, 61-80 หน้า.

[2] Ittipon Worapun, Kulachate Pianthong and **Prachasanti Thaiyasui**. Synthesis of biodiesel by two-step transesterification from crude jatropha curcus L.oil using ultrasonic cavitation assisted. *KKU Engineering Journal*. Volume 37 Number 3, July-September, 2010. pp.169-179.

[3] Ittipon Worapun, **Prachasanti Thaiyasuit** and Kulachate Pianthong, 2554, “Ultrasonic irradiation assisted synthesis of biodiesel from crude palm oil using response surface methodology” วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 6 ฉบับที่ 1.

5.3 International Conferences

[1] **P. Thaiyasuit**, K. Pianthong, P. Techarungpaisan, C. Thinvongpituk, I. Worapun. 2007.

“PRODUCTION OF BIODIESEL FROM RUBBER SEED OIL AND ENGINE PERFORMANCE TESTS” The 9th Asian International Conference on Fluid Machinery, Jeju, Korea.

[2] K. Pianthong, **P. Thaiyasuit**, C. Saengmanee, V. Nonchana, S. Nunt-jaruwong. 2009, “Investigation on performances of the engine for the electrical power generator using biomass gases and biodiesel as fuels” The 4th GMSARN International Conference, Ha Long, Vietnam.

[3] K. Pianthong, **P. Thaiyasuit**. 2009. “Acid esterification-alkaline transesterification process for methyl ester production from crude rubber seed oil and its performances in CI engine” The 4th GMSARN International Conference, Ha Long, Vietnam.

[4] I. Worapun, K. Pianthong, **P. Thaiyasuit**, C. Thinvongpituk, 2009. "Effect on the use of ultrasonic cavitation for biodiesel production from crude *jatropha curcas* L. seed oil with a high content of free fatty acid" Fourth International Conference on Experimental Mechanics, Singapore, Singapore.

5.4 International Journals

[1] K. Pianthong, **P. Thaiyasuit**, C. Saengmanee, V. Nonchana, S. Nunt-jaruwong, 2011, "Investigation on performances of the engine for the electrical power generator using biomass gases and biodiesel as fuels" GMSARN International Journal, 5(1), 1-10.

[2] K. Pianthong, **P. Thaiyasuit**, 2011. "Acid esterification-alkaline transesterification process for methyl ester production from crude rubber seed oil and its performances in CI engine" GMSARN International Journal, 5(2), 1-10.

[3] I. Worapun, K. Pianthong and **P. Thaiyasuit**, 2011, "Optimization of biodiesel production from crude palm oil using ultrasonic irradiation assistance and response surface methodology". Journal of Chemical Technology and Biotechnology. Article first published online: 14 JUN 2011 DOI: 10.1002/jctb.2679 .

[4] **P. Thaiyasuit**, K. Pianthong and I. worapun, 2012. "Acid esterification-alkaline transesterification process for methyl ester production from crude rubber seed oil" Journal of oleo science, 61(2).

[5] I. worapun, K. Pianthong and **P. Thaiyasuit**, 2012. "Two-step biodiesel production from crude *jatropha curcas* L. oil using ultrasonic irradiation assisted" Journal of oleo science, 61(4).

[6] **P. Thaiyasuit**, K. Pianthong and B. milton, 2012. "Combustion efficiency and performance of RSO biodiesel as alternative fuel in a single cylinder CI engine" Energy exploration and exploitation, 30.

6. ประวัติการทำงาน

- ปี พ.ศ. 2536-2537: วิศวกร บริษัท Fujitsu (Thailand) Ltd.
- ปี พ.ศ. 2541-2547: อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
- ปี พ.ศ. 2547-ปัจจุบัน: อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

.....

ផ្លូវលំដឹកជញ្ជូន

- ชื่อ (ภาษาไทย) ผศ.ดร.ชวดี ตันวงศ์พิทักษ์
(English) (Asst.Prof.Dr. Chawadi THINVONGPITUK)
- หมายเลขบัตรประจำตัวประชาชน 3 3497 00058 141
- ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ระดับ 8
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
โทรศัพท์ 045 288400 ต่อ 3380, 3382 โทรสาร 045 353 333
- ประวัติการศึกษา

4. ประวัติการศึกษา

ปี การศึกษา ที่จบ	ระดับปริญญา (ตรี โท เอก) และชื่อเต็ม	อักษรย่อ ปริญญา วิชา	สาขา	วิชาเอก	ชื่อสถาบัน การศึกษา	ประเทศ
2539	วิศวกรรมศาสตร บัณฑิต	วศ.บ. (เครื่องกล) (เกียรตินิยม อันดับ 2)	วิศวกรรม เครื่องกล	-	มหาวิทาลัย อุบลราชธา นี	ไทย
2545	ดุษฎีบัณฑิต	Ph.D. (Mechanical Engineering)	Mechanic al Engineeri ng	-	University of Manchester Institute of Science and Technology (UMIST)	สหราช- อาณาจักร

5. ผลงานวิจัย บทความทางวิชาการ และสิ่งตีพิมพ์

Book Contribution

1. **Chawalit Thinvongpituk** and Sonya Poonaya. "A study of the ovalisation of circular tubes subjected to pure bending" in Current Themes in Engineering Science 2008, American Institute of Physics (AIP), 2009, London, England, p129-140

International Journal

1. **C. Thinvongpituk** and V. Chomkwah "Experimental and Numerical Studies on the Behavior of Cylindrical and Conical Shells with Varying Thickness Along the Length Subjected to Axial Compression" Global Journal of Researcher in Engineering (GJRE), 10(4), August 2010, p 92-100
2. Nirut Onsalung, **Chawalit Thinvongpituk** and Kulachate Painthong "The influence of foam density on specific energy absorption of rectangular steel tubes" Energy Research Journal, 1(2), 2010, p 135-140
3. S. Poonaya, **C. Thinvongpituk** "Plastic collapse analysis of thin-walled circular tubes subjected to bending" Thin-Walled Structures, 2009, 47 p 637-645
4. Sonya Poonaya, **Chawalit Thinvongpituk** and Umphisak Techoonma "An analysis of collapse mechanism of thin-walled circular tubes subjected to bending" International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering, 2007, 1(3), p 144-149
- 5.

International Conferences

1. **C. Thinvongpituk**, A. Bootwong and Y. Watanabe "The effect of axial force and contact angle on the welded area of plastic tube welded by ultrasonic welding" 4th International Conference on Experimental Mechanics 2009, 18-20 November 2009, Holiday Inn Atrium Hotel, Singapore
2. Nirut Onsalung, **Chawalit Thinvongpituk** and Kulachate Painthong "Crush Characteristic of Foam-Filled Steel Tubes" 4th International Conference on Experimental Mechanics 2009, 18-20 November 2009, Holiday Inn Atrium Hotel, Singapore

3. Ittipon Worapun, Kulachate Paimthong Prachasanti Thaiyasuit and **Chawalit Thinvongpituk** "Effect on the Use of Ultrasonic Cavitation for Biodiesel Production from Crude Jatropha Curcas L. Seed Oil with a High Content of Free Fatty Acid" 4th International Conference on Experimental Mechanics 2009, 18-20 November 2009, Holiday Inn Atrium Hotel, Singapore
4. Nirut Onsalung, **Chawalit Thinvongpituk** and Kulachate Paimthong "The Influence of Foam Density on the Specific Energy Absorption of Rectangular Steel Tubes" International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB 2009), 23-24 July 2009, Pullman Raja Orchid Hotel, Khon Kaen, Thailand
5. **C. Thinvongpituk**, S. Poonaya, S. Choksawadee and M. Lee "The Ovalisation of Thin-walled Circular Tubes Subjected to Bending" The 2008 International Conference of Mechanical Engineering, 2-4 July, 2008, London, U.K.
6. P. Thaiyasuit, K. Paimthong, P. Techarungpaisan, **C. Thinvongpituk**, and I. Worapun "Production of biodiesel from rubber seed oil and engine performance tests," The 9th Asian International Conference of Fluid Machinery, 16-19 October 2007, Jeju Island, South Korea,
7. P. Swatdepan, U. Techoomma, **C. Thinvongpituk**, "Study of performance improvement of air condition by heat recovery", An International Conference on Energy for Sustainable Development, Phuket, 1-3 March 2006.
8. **C. Thinvongpituk**, V Chomkwah "Crush characteristic of conical shell with varying thickness" 8th Asian Symposium on Visualization, 23-27 May 2005, Chaing Mai, Thailand
9. **C. Thinvongpituk**, H. El-Sobky "Buckling of axially compressed conical shells of linearly variable thickness" The 2nd MIT Conference on Computational Fluid Dynamics and Solid Mechanics, June 17-20, 2003, MIT, USA
10. **C. Thinvongpituk**, H. El-Sobky "The effect of end conditions on the buckling load characteristic of conical shells subjected to axial loading" The ABAQUS Users' Conference Proceedings, 2003 June 4-6, 2003, Munich, Germany.

6.2 ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในระดับชาติ

National Journal

1. สุรัชย์ จันทร์ชนะ และ ขวลิขิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ “อิทธิพลของแหล่งยึดทานและมุมหน้าสัมผัสในการเชื่อมท่อพลาสติกกลมชนิดพอลิเอทิลีนด้วยความเสียดทาน” วารสารวิศวกรรมสาร มข. 38(2), April-June 2011
2. ช่างชัย ชูปวา และ ขวลิขิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ “อิทธิพลของเวลาในการเสียดทานและความเร็วรอบในการเสียดทานที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมของเหล็ก AISI 1015 ที่เชื่อมเสียดทาน” วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ปีที่ 13 ฉบับที่ 1, ม.ค. – มี.ค. 2554 หน้า 73-81
3. ช่างชัย ชูปวา และ ขวลิขิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ “อิทธิพลของเวลาในการเสียดทานที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมของเหล็ก AISI 1015 ที่เชื่อมด้วยความเสียดทาน” วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อว. ปีที่ 3 ฉบับที่ 2, ก.ค. – ค.ค. 2553
4. ปิยะวุฒิ ปิ้องเพชร, นิรุศ อ่อนสูง และ ขวลิขิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ “การศึกษาคุณสมบัติและการเสียหายของเหล็กกล่องที่เติมโพลียูรีเทนภายใต้แรงกด” วารสารวิศวกรรมสาร มข., ปีที่ 37 ฉบับที่ 2, เม.ย.-มิ.ย. 2553, หน้า 101-108
5. อติศักดิ์ บุตรวงษ์, สุรสิงห์ อารยางค์กูร และ ขวลิขิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ “ปัจจัยที่มีผลต่อการเชื่อมท่อพลาสติกกลมด้วยอุลตราโซนิก” วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, ปีที่ 11 ฉบับที่ 2, พฤษภาคม-สิงหาคม 2552
6. สุรสิงห์ อารยางค์กูร, อติศักดิ์ บุตรวงษ์ และ ขวลิขิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ “การศึกษาคุณสมบัติของรอยเชื่อมของเหล็กกลมที่เชื่อมด้วยความเสียดทาน” วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, ปีที่ 11 ฉบับที่ 1, ม.ค.-เม.ย. 2552, หน้า 83-89
7. นิรุศ อ่อนสูง, ขวลิขิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ และ ถ้าไพศักดิ์ ทิบุญมา “การศึกษาความต้านทานการดูดซับพลังงานของแบบจำลองโครงสร้างด้านข้างของรถยนต์โดยสารภายใต้การชน” วิศวกรรมสาร มข. , ปีที่ 34 ฉบับที่ 3 เดือน พฤษภาคม – มิถุนายน 2550, หน้า 343-354

National Conferences

1. ช่วงชัย ชูปวา, ขวลิขิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ และสุริยา โชคสวัสดิ์ “อิทธิพลของความเร่งรอบในการเสียดทานที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยความเสียดทานภายใต้การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรอื่นๆ” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 24, 20-22 ตุลาคม 2553, โรงแรมสุโขทัย แกรนด์ไฮเทล แอนคอนเวนชัน เซ็นเตอร์ อุบลราชธานี
2. ปิยะวุฒิ ป้องเพชร, นิรุต อ่อนสกุล และ ขวลิขิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ “อิทธิพลของความหนาแน่นของไฟผ่นต่อความสามารถในการรับแรงกดของท่อเหล็กกลมที่เติมไฟผ่น” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 24, 20-22 ตุลาคม 2553, โรงแรมสุโขทัย แกรนด์ไฮเทล แอนคอนเวนชัน เซ็นเตอร์ อุบลราชธานี
3. ธนีย์ ทูมประเสน, ช่วงชัย ชูปวา, ขวลิขิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ และสุโขทัย “การศึกษาสมบัติทางกลของรอยเชื่อมแบบความเสียดทานต่อเหล็กกล้าผสมต่ำและไร้สนิม” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 24, 20-22 ตุลาคม 2553, โรงแรมสุโขทัย แกรนด์ไฮเทล แอนคอนเวนชัน เซ็นเตอร์ อุบลราชธานี
4. สุระชัย จันทร์ชนะ และ ขวลิขิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ “การศึกษาการเชื่อมท่อพลาสติกกลมชนิด Polyethylene ด้วยวิธีความเสียดทาน” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 24, 20-22 ตุลาคม 2553, โรงแรมสุโขทัย แกรนด์ไฮเทล แอนคอนเวนชัน เซ็นเตอร์ อุบลราชธานี
5. ธนศักดิ์ บุตรวงษ์, ขวลิขิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ และ Yuji Watanabe “ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดรอยเชื่อมท่อพลาสติกกลมด้วยอุลตราโซนิก” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 24, 20-22 ตุลาคม 2553, โรงแรมสุโขทัย แกรนด์ไฮเทล แอนคอนเวนชัน เซ็นเตอร์ อุบลราชธานี
6. สุรสิงห์ อรยางกูร, ขวลิขิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ และชวชาติ พยอม “คุณลักษณะของโครงสร้างจุดภาคของรอยเชื่อมของเหล็กกลมคาร์บอนต่ำที่เชื่อมด้วยความเสียดทาน” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 23, 4-7 พฤศจิกายน 2552, โรงแรมอิมพีเรียลเมย์โป้ง เชียงใหม่
7. ช่วงชัย ชูปวา และ ขวลิขิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ “การศึกษอิทธิพลของเวลาในการเสียดทานและแรงดันในการอัดที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 23, 4-7 พฤศจิกายน 2552, โรงแรมอิมพีเรียลเมย์โป้ง เชียงใหม่
8. สุรสิงห์ อรยางกูร และ ขวลิขิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ “การเชื่อมเหล็กกลมด้วยความเสียดทาน” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22, 15-17 ตุลาคม 2551, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

9. สุรสิงห์ อรยางกูร และ ขวณิด ถิ่นวงศ์พิทักษ์ "อิทธิพลของแรงดันเสียดทานต่อคุณสมบัติของเหล็กที่เชื่อมด้วยความเสียดทาน" การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ครั้งที่ 2 28-29 กรกฎาคม 2551, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อุบลราชธานี
10. นิรุฒ อ่อนสูง ขวณิด ถิ่นวงศ์พิทักษ์ และณรงก์ หุ้ยภูมิ "การศึกษาการดูดซับพลังงานของแผงโครงสร้างด้านข้างที่ต่อสับกับโครงสร้างหลังคาของรถยนต์โดยสารภายใต้ภาระการชนในแนวชน" การประชุมสัมมนาทางวิชาการ ราชชมงคลอีสานวิชาการ ครั้งที่ 1, 9-11 มกราคม 2551, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน, นครราชสีมา
11. นิรุฒ อ่อนสูง ขวณิด ถิ่นวงศ์พิทักษ์ และ ชาคริต โพธิ์งาม "การศึกษาความสามารถในการดูดซับพลังงานจากการชนของโครงสร้างหลังการถยนต์โดยสาร จากการทดสอบด้วยเหล็กที่มีหน้าตัดต่างกัน" การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21, 17-19 ตุลาคม 2550, โรงแรมเวลกัม จอมเทียน ปิ่น, พัทยา,ชลบุรี
12. P. Triyasuti, K. Pianthong, P. Techarungpaisan, C. Thinvongpituk and I. Worapun "Performances and exhaust gas emission of CI engine using biodiesel from rubber seed oil" The 3rd National Conference on Automotive Engineering, 2 April 2007, Bangkok.
13. P. Thaiyasuit, K. Pianthong, P. Techarungpaisan, C. Thinvongpituk, and I. Vorapun. "Production of biodiesel from rubber seed oil by acid-esterification and alkaline-transesterification method," Proceedings of the 3rd Annual Conference of Energy Network of Thailand (E-Nett) , 23-25 May 2007, Baiyok Sky Hotel, Bangkok
14. P. Thaiyasuit, K. Pianthong, P. Techarungpaisan, C. Thinvongpituk, and I. Worapun, "Production of biodiesel from unrefined Para rubber seed oil by 2 step transesterification method" Proceeding of the 21st Annual Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand (ME NETT 21st), 17-19 October 2007, Welcome Jomtien Beach Hotel, Chonburi
15. ยศศักดิ์ บุตรวงษ์ และ ขวณิด ถิ่นวงศ์พิทักษ์ "กราฟช่วยออกแบบหัวเชื่อมอุณหภูมิลำโชนิกแบบครึ่งวงกลม" การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 20, 18-20 ตุลาคม 2549, โรงแรมแมนดาริน โกลเดนวิลเลจ ไฮเต็ลแอนด์รีสอร์ท, ปากช่อง, นครราชสีมา
16. นิรุฒ อ่อนสูง ขวณิด ถิ่นวงศ์พิทักษ์ และชาคริต โพธิ์งาม "การศึกษาความสามารถในการดูดซับพลังงานของโครงสร้างด้านข้างรถยนต์โดยสารภายใต้แรงกด แรงบิดและแรงดัด" การประชุมวิชาการ

- เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 20, 18-20 ตุลาคม 2549, โรงแรมเมเนดจริน โกลเดนวิลล์ ไฮเด้นถนนศรีสุวรรณ์, ปากช่อง, นครราชสีมา
17. นิรุศ อ่อนสูง, ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ และ อำไพศักดิ์หัตถุมมา “การศึกษาผลต่ออาณัติการกดของโครงสร้างด้านข้างรถยนต์โดยสาร” การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 19, 19-21 ตุลาคม 2548, โรงแรม เดอะ รอยัล พาราไดซ์,ภูเก็ต
 18. Somya Poonaya, Chawalit Thinvongpituk and Umpaisak Teeboonma “Some analytical methods of plastic collapse of circular steel tube under quasi-static axial compression” the 19th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, 19-21 October 2005, Phuket, Thailand
 19. ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ และ อุณพญ์ ธีรทอง “การกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาเผาเครื่องปั้นดินเผาที่ใช้ไม้ฟืนเป็นเชื้อเพลิง” การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 1, 11-13 พฤษภาคม 2548 โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ ซิตี้ จอมเทียน จังหวัดชลบุรี
 20. P. Swatdepan, U. Teeboonma, C. Thinvongpituk, “Performance improvement of air condition by heat recovery”, Proceedings of the 19th Annual conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, Phuket, 19-21 October, 2005, paper no. ETM023.
 21. P. Swatdepan, U. Teeboonma, C. Thinvongpituk, “Performance improvement of air condition by water condensing from evaporator”, Proceedings of the 1st Annual Conference of Energy Network of Thailand (E-Nett) , Pattaya City, 11-13 May, 2005, paper no. ECB06.
 22. C Thinvongpituk, P. Techarungpaisan, H. El-Sobky “Buckling of axially compressed conical shells of linearly variable thickness using structural model” Proceedings of the 17th Annual conference of Mechanical Engineering Network Thailand, 15-17 October, 2003.
 23. C Thinvongpituk, H. El-Sobky “The buckling load characteristic of conical shells under various end conditions” Proceedings of the 17th Annual conference of Mechanical Engineering Network Thailand, 15-17 October, 2003.
-

ผู้ช่วยนักวิจัย

1. ชื่อ (ภาษาไทย)

นายวุฒิชัย สิตวิชชัย

(ภาษาอังกฤษ)

Mr.Wuttichai Sittiwong
2. หมายเลขบัตรประจำตัวประชาชน 3 6399 00087 754
3. ตำแหน่งปัจจุบัน

อาจารย์

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสุรินทร์

โทรศัพท์ 044 153093 โทรสาร 044 153093

4. ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษาที่จบ	ระดับปริญญา (ตรีโท เอก) และชื่อเต็ม	อักษรย่อปริญญา วิชา	สาขา	วิชาเอก	ชื่อสถาบันการศึกษา	ประเทศ
2539	ครุศาสตร์ อุตสาหกรรมบัณฑิต	กอ.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล)	วิศวกรรมเครื่องกล	-	สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล จ.เพชรบูรณ์	ไทย
2546	ครุศาสตร์ อุตสาหกรรม มหาบัณฑิต	คอ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล)	วิศวกรรมเครื่องกล		ม.เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	

5. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ

- วิทยานิพนธ์ เรื่อง สมรรถนะระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนโดยใช้ความร้อนทิ้งจากไอเสียเครื่องยนต์

- การพัฒนาเครื่องกลั่นเชื้อเพลิงเอทานอลโดยใช้ความร้อนทิ้งจากไอเสียเครื่องยนต์เล็กเพื่อการเกษตร

6. ผลงานวิจัย บทความทางวิชาการ และสิ่งตีพิมพ์

- [1] **Wuttichai Sittiwong**, Wirapan Sechanam, Kulachate Pianthong, Anirut Matthujak, and Eric Yeo. "Calibration of High Speed Impact Test Rig", Proceedings of the 22nd Annual Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand. AME-05; 15-17 October, 2008.
- [2] Wirapan Sechanam, **Wuttichai Sittiwong**, Kulachate Pianthong, and Anirut Matthujak "Simulation on fundamental characteristic of high speed fuel jet", Proceedings of the 21st Annual Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand. CST-45; 17-19 October, 2007.
- [3] **Wuttichai Sittiwong**, Wirapan Sechanam, Kulachate Pianthong, and Anirut Matthujak. "Impact pressure of high-speed water jets", Proceedings of the 23rd Annual Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand. ISF-030232; 4-7 November, 2008.
- [4] Wirapan Sechanam, **Wuttichai Sittiwong**, Kulachate Pianthong, Anirut Matthujak. "Investigation on high speed liquid jet using computational fluid dynamics technique". Proceedings of the 23rd Annual Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand. CST-035222; 4-7 November, 2008.
- [5] **Wuttichai Sittiwong**, Wirapan Sechanam, Kulachate Pianthong, and Anirut Matthujak. "Effect of stand-off distance on impact pressure of high speed water jets", Proceedings of the 10th Asian International Conference on Fluid Machinery (10th AICFM). AICFM0171; 21-23 October, 2008, Malaysia.
- [6] วุฒิชัย สิทธีวงษ์ กุลเชษฐ์ เพียรทอง วีระพันธ์ สีหานาม อนิรุตต์ มัทธูจักษ์ และชัยเดช เกษมนนิมิตรพร "ผลของอุณหภูมิต่อพฤติกรรมของลำพ่นน้ำมันดีเซลความเร็วสูง" วารสารวิชาการ ม.อ.บ. (มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี), ปีที่ 13, ฉบับที่ 2, 2554.
- [7] วุฒิชัย สิทธีวงษ์, วีระพันธ์ สีหานาม, กุลเชษฐ์ เพียรทอง, อนิรุตต์ มัทธูจักษ์ และชัยเดช เกษมนนิมิตรพร. 2553. ผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณลักษณะของลำพ่นน้ำมันเชื้อเพลิงความเร็วสูง. การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24, 20 – 22 ตุลาคม 2553; อุบลราชธานี.มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. Paper no. ISF 25.
- [8] วุฒิชัย สิทธีวงษ์, วีระพันธ์ สีหานาม, กุลเชษฐ์ เพียรทอง, อนิรุตต์ มัทธูจักษ์ และชัยเดช เกษมนนิมิตรพร. 2553. ผลของอุณหภูมิและความดันที่มีต่อคุณลักษณะของลำพ่นน้ำมันดีเซลความเร็วสูง. การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24, 20 – 22 ตุลาคม 2553; อุบลราชธานี.มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. Paper no. ISF 20.

[9] **Wuttichai Sittiwong**, Wirapan Seehanam, Kulachate Pianthong, Anirut Matthujak and Chaidet Kasamnimitporn, “**Effect of temperature and pressure on characteristics of high speed diesel jets**”, Proceedings of the first TSME International Conference on Mechanical Engineering, 20-22 October, 2010, Ubon Ratchathani Paper no. TSF 014.

[10] Kulachate Pianthong, **Wuttichai Sittiwong**, Wirapan Seehanam, Anirut Matthujak and Chaidet Kasamnimitporn, “**Effect of test chamber conditions on high speed fuel jets behaviors**”, International Conference on Experimental Mechanics 2010 (ICEM 2010), 29 November -1 December, 2010, Legend Hotel, Kuala Lumpur, Malaysia Paper no. TSF 014.

ผู้ช่วยนักวิจัย

- 1 ชื่อ (ภาษาไทย) นายวิระพันธ์ สีหานาม
(ภาษาอังกฤษ) Mr. Wirapan Seehanam
2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3 4807 00293 150
3. ตำแหน่งปัจจุบัน นักศึกษาระดับปริญญาเอก
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

4. ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษาที่จบ	ระดับปริญญา (ตรี โท เอก) และชื่อเต็ม	อักษรย่อปริญญา วิชา	สาขา	วิชาเอก	ชื่อสถาบันการศึกษา	ประเทศ
2546	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	วส.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล)	วิศวกรรมเครื่องกล	-	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	ไทย

2546	วิศวกรรมศาสตร มหาบัณฑิต	วศ.ม. (วิศวกรรมค ่ออังกฤษ)	วิศวกรรม เครื่องกล	-	คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย อุบลราชธานี	ไทย
------	----------------------------	----------------------------------	-----------------------	---	---	-----

5. บทความทางวิชาการ

5.1 International refereed journal

[1] K. Pianthong, W. Sechanam, M. Behnia, T. Sriveerakul, S. Apomratana, "Investigation and improvement of ejector refrigeration system using computational fluid dynamics technique," Energy Conversion and Management Journal, 2007;48:2556-2564 (impact factor 2005 = 1,244.)

5.2 International Refereed conference

- [1]. K. Pianthong, W. Sechanam, K. Chunnanond, S. Aphornratana, M. Behnia, "Prediction of performance and flow behavior of steam ejector using computational fluid dynamics techniques." Proceedings of the 8th Annual National Symposium on Computational Science and Engineering (ANSCSE8), at Nakorn Ratchasima, Thailand , 21-23 July 2004, paper no. CFDM-028.(International)
- [2] W. Sechanam, K. Sahumin, K. Pianthong and M. Behnia, "Prediction of flow characteristic and performance of steam ejector in refrigeration cycle using CFD," Proceedings of the 8th Asian Symposium on Visualization (8ASV), 23-27 May, 2005, Chiangmai, Thailand. (Inter national)
- [3] K. Pianthong, W. Sechanam, and A. Matthujak 'Investigation on Supersonic Kerosene Jets' Proceedings of The 9th Asian International Conference on Fluid Machinery, Jeju, Korea, 2007, paper no. AICFM9-188 (International)
- [4] W. Sittiwong, W. Sechanam, K. Pianthong, and A. Matthujak, "Effect of stand-off distance on impact pressure of high speed water jets". Proceedings of the 10th Asian International Conference on Fluid Machinery (10th AICFM). AICFM0171; 21-23 October, 2008, Malaysia

[5] **W. Sechanam**, K. Pianthong and W. Sittiwong. "Dynamic Characteristics of Impact Driven Jet in a Step Nozzle" Proceedings of The First TSME International Conference on Mechanical Engineering 20-22 October, 2010, Ubon Ratchathani, Thailand, Paper no.CST003

[6] W. Sittiwong, **W. Sechanam**, K. Pianthong, A. Matthujak and C. Kasamnitiporn. "Effect of temperature and pressure on characteristics of high speed diesel jets", Proceedings of the first TSME International Conference on Mechanical Engineering, 20-22 October, 2010, Ubon Ratchathani Paper no. TSF 014

[7] K. Pianthong, W. Sittiwong, **W. Sechanam**, A. Matthujak and C. Kasamnitiporn. "Effect of test chamber conditions on high speed fuel jets behaviors", International Conference on Experimental Mechanics 2010 (ICEM 2010), 29 November -1 December, 2010, Legend Hotel, Kuala Lumpur, Malaysia Paper no. TSF 014

5.3 National refereed journal

[1] วิระพันธ์ สีหนาม, กุศลเชษฐ์ เพียรทอง, Masud Behnia, จณรัฐ ศรีวิระกุล และ ศรัทธา อภรณ์รัตน์. "การศึกษาระบบทำความเย็นแบบอัดแก๊สโดยใช้วิธีเชิงตัวเลขสำหรับการไหล" วิศวกรรมสาร มช. ปีที่ 33 ฉบับที่ 6 2550. pp. (639-654)

[2] กุศลเชษฐ์ เพียรทอง, กิตติพงษ์ เสถียรเสาวภากร, อธิพัฒน์ วรพันธ์ และ วิระพันธ์ สีหนาม. "ความลึกหรือและสมรรถนะของเครื่องชนิดดีเซลขนาดเล็กที่ใช้ น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันทอดแล้วเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์" วารสารวิชาการ ม.อ.บ. ปีที่ 10 ฉบับที่ 3 2551 pp. 45- 60.

[3] กุศลเชษฐ์ เพียรทอง, รัชฎา मुखดา และ วิระพันธ์ สีหนาม. "การลดลงของเอนโทรปีแรงดัน ในกรณีวิ่งตามกันของรถบรรทุกเล็ก" วารสารวิชาการ ม.อ.บ. ปีที่ 11 ฉบับที่ 1 2552 pp. 35- 52.

[4] วุฒิชัย สิทธิวงษ์ กุศลเชษฐ์ เพียรทอง วิระพันธ์ สีหนาม อนันต์ มัทนิกักร์ และชัยเดช เกษมนิมิตรพร "ผลของอุณหภูมิต่อพฤติกรรมของลำพ่นน้ำมันดีเซลความเร็วสูง" วารสารวิชาการ ม.อ.บ. (มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี). ปีที่ 13. ฉบับที่ 2, 2554.

5.4 National refereed conferences

[1] **W. Sechanam**, K. Pianthong, M.Behnia, K. Chunnanond, and S. Aphornratana, "Simulation on performance of CPM and CRMC steam ejectors using CFD technique," Proceedings of the 18th Annual

Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, Khonkaen, 18-20 October, 2004, paper no. CST29. (National)

[2] **W. Sechanam**, K. Pianthong, T. Sriveerakul, S. Aphornratana, and M. Behnia, "Design and test of CRMC steam ejector in refrigeration system," Proceedings of the 19th Annual conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, Phuket, 19-21 October, 2005, paper no. CST043. (National)

[3] ปรัชญา มุขดา, กุลเชษฐ์ เพียรทอง และ วีระพันธ์ สีหามณ 'อาศาศพลศาสตร์เพื่อการประหยัดงานสำหรับรถยนต์บรรทุกขนาดเล็กโดยวิธีจำลองเชิงตัวเลข" Proceedings of the 21th Annual conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, Chonburi, 16 - 18 October, 2005, paper no. CST031. (National)

[4] ปรัชญา มุขดา, กุลเชษฐ์ เพียรทอง และ วีระพันธ์ สีหามณ 'การทดลองของสัมประสิทธิ์แรงต้าน ในกรณีวิ่งตามกันของรถบรรทุกเล็ก" Proceedings of the 22th Annual conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, Phatuntani, 15 - 17 October, 2005, paper no. CST024. (National)

[5] วุฒิชัย สิริวงษ์, วีระพันธ์ สีหามณ, กุลเชษฐ์ เพียรทอง, อนิรุตต์ มัทธูจักกร และ Eric Yeo, 'การปรับเทียบชุดทดลองสำหรับการศึกษาการกระแทกความเร็วสูง" Proceedings of the 22th Annual conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, Phatuntani, 15 - 17 October, 2005, paper no. AMI005. (National)

[6] **W. Sechanam**, W. Sittiwong, K. Pianthong, and A. Matthujak 'Simulation on fundamental characteristic of high speed fuel jet' Proceedings of the 21th Annual conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, Chonburi, 16 - 18 October, 2005, paper no. CST045. (National)

[7] Wuttichai Sittiwong, **Wirapan Sechanam**, Kulachate Pianthong, and Anirut Matthujak. "Impact pressure of high-speed water jets", Proceedings of the 23rd Annual Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, TSF-030232; 4-7 November, 2008

[8] **Wirapan Sechanam**, Wuttichai Sittiwong, Kulachate Pianthong, Anirut Matthujak., "Invesitigation on high speed liquid jet using computational fluid dynamics technique". Proceedings of the 23rd Annual Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand. CST-035222; 4-7 November, 2008

[9] วุฒิชัย สิริวงษ์, วีระพันธ์ สีหามณ, กุลเชษฐ์ เพียรทอง, อนิรุตต์ มัทธูจักกร และชัยเดช เกษมณิมิตพร .2553. ผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณลักษณะของลำพ่นน้ำนํ้าเชื้อเพลิงความเร็วสูง. การประชุมเครือข่าย

วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24, 20 – 22 ตุลาคม 2553; อุบลราชธานี มหาวิทยาลัย
อุบลราชธานี. Paper no. TSF 25.

[10] วุฒิชัย สัทธวงษ์, วีระพันธ์ สีสานน. กุลเชษฐ์ เพ็ชรทอง, อนิรุตต์ มัทธจักร์ และชัยเดช เกษมณีนมิตรพร.
2553. ผลของอุณหภูมิและความดันที่มีต่อคุณลักษณะของลำฟุ้งน้ำมันดีเซลความเร็วสูง.การประชุม
เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24, 20 – 22 ตุลาคม 2553; อุบลราชธานี มหาวิทยาลัย
อุบลราชธานี. Paper no. TSF 20

ภาคผนวก ก

ความเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิ



ส่วนราชการ โครงการจัดตั้งกองส่งเสริมการวิจัย สำนักงานอธิการบดี โทรศัพท์ ๑๓๕๙

திரு. பி. சி. சிவசுந்தரம்

วันที่ 25 เม.ย. 2554

เรื่อง ผลการพิจารณาร่างรายงานการวิจัย

เรียน คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

ตามที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ได้ส่งร่างรายงานผลการวิจัย เรื่อง “การศึกษาคุณลักษณะของสเปร์ยเพื่อเพลิงเหลวความเร็วสูง และความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้กับหัวฉีดของเครื่องยนต์โดยการทดลอง” โดยมี ผศ.ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง เป็นหัวหน้าโครงการ ให้พิจารณา ก่อนจัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์ ความละเอียดครบถ้วนแล้วนั้น บัดนี้กองบรรณาธิการบริหารงานวิจัย มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีได้พิจารณา ร่างรายงานดังกล่าวเสร็จสิ้นแล้ว ซึ่งมีรายละเอียดการแก้ไขและข้อเสนอแนะในการจัดทำรายงานตามแบบ

ดังนั้นโครงการจัดตั้งกองส่งเสริมการวิจัย ฯ จึงขอแจ้งผลการพิจารณาให้นักวิจัยดำเนินการจัดทำรายงานตามคำแนะนำและส่งแบบฟอร์มแจ้งการแก้ไขร่างรายงานการวิจัยตามข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ พร้อมทั้งจัดส่งรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ จำนวน ๑๐ เล่ม และแผ่นบันทึกข้อมูล จำนวน ๒ แผ่น มาที่โครงการจัดตั้งกองส่งเสริมการวิจัย ฯ

จึงเรียนมาเพื่อโปรดพิจารณา

$\frac{1}{\sqrt{e}} \approx 0.6065$

✓ 2

(ឯកសារ ក្រសួងសេដ្ឋកិច្ច)

เจ้าหน้าที่บริหารงานทั่วไป

28 JUL 2554

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริพร จังสุทธีวงศ์

ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายวิจัย

1. Uphallig 2. Ardu 3. Wach
4. Immer 5. Wach 6. Wach

1000 ZHNN

28/4/54

ผลการพิจารณาร่างรายงานวิจัย

โครงการวิจัย: การศึกษาคุณลักษณะของสเปร์ยเชื้อเพลิงเหลวความเร็วสูง และความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้กับหัวฉีดของเครื่องยนต์โดยทำการทดลอง

หัวหน้าโครงการ: ผศ.ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง

เนื้อหาหรือคุณภาพของงานวิจัย : ดี

ข้อเสนอแนะในการจัดทำรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ มีดังนี้

- ๑ ควรตรวจสอบความถูกต้องของคำต่าง ๆ และขนาดตัวอักษรในรายงานทั้งเล่ม
- ๒ เอกสารอ้างอิงให้พิมพ์ตามแบบที่กำหนด
- ๓ รูปแบบปรายงานให้จัดทำตามแบบที่แนบมาพร้อมนี้
- ๔ ข้อเสนอแนะอื่น ๆ ให้ดูในเอกสารแนบ



แบบฟอร์มแจ้งการแก้ไขร่างรายงานการวิจัยตามข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ

โครงการวิจัย เรื่อง
หัวหน้าโครงการ

1. ข้อเสนอแนะที่ได้แก้ไขแล้ว ดังนี้

ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ	แก้ไขตามข้อเสนอแนะ

2. ข้อเสนอแนะที่ไม่ได้แก้ไข

ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ	ไม่แก้ไข เนื่องจาก

3. ข้อเสนอแนะของผู้เสนอผลงาน

.....
.....
.....
.....
.....

ลงชื่อ.....
(.....)

วันที่ / /