



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาคุณลักษณะพื้นฐานของลำพุงเชื้อเพลิงเหลวที่มีความเร็ว  
มากกว่าเสียง และความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้กับหัวฉีดของ  
เครื่องยนต์โดยทำการทดลอง

โดย

กุลเชษฐ์ เพียรทอง และ คณะ

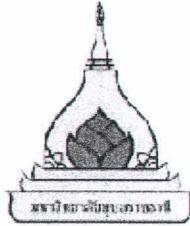
เมษายน 2553

6 00250490

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ



245652



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาคุณลักษณะพื้นฐานของลำฟุ้งเชื้อเพลิงเหลวที่มีความเร็ว  
มากกว่าเสียง และความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้กับหัวฉีดของ  
เครื่องยนต์โดยทำการทดลอง

โดย



กุลเชษฐ์ เพียรทอง และ คณะ

เมษายน 2553



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาคุณลักษณะพื้นฐานของลำพุ่งเชื้อเพลิงเหลวที่มีความเร็วมากกว่าเสียง  
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 ไตรยสุทธิ สังกัด คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
3. นายชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ สังกัด คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
4. นายวุฒิชัย สิทธิวงษ์ สังกัด คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
5. นายวิระพันธ์ สีหานาม สังกัด คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี  
ประจำปีงบประมาณ 2551

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

### บทคัดย่อ

245652

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณลักษณะของลำพู่ความเร็วสูง (high-speed diesel fuel jets) เมื่ออุณหภูมิและความดันในห้องทดสอบเพิ่มขึ้น โดยใช้การถ่ายภาพความเร็วสูงและเทคนิค shadowgraph การทดลองจะทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ในช่วง  $30 - 150^{\circ}\text{C}$  ความดันภายในห้องทดสอบ ในช่วง  $1 - 8.2 \text{ bar}$  เปรียบเทียบความเร็วและระยะแหวกอากาศ (penetration distance) ของลำพู่เชื้อเพลิงดีเซลความเร็วสูงกับสภาวะบรรยากาศ ( $30^{\circ}\text{C}$ ,  $1 \text{ bar}$ ) ลำพู่เชื้อเพลิงดีเซลที่ความเร็วสูงจะผลิตจากวิธีการที่เรียกว่า “Projectile impact driven” ความเร็วของลูกปืน (Projectile) ประมาณ  $800 \text{ m/s}$  หัวฉีดตรงกรวยมุม  $30^{\circ}$  ขนาดคอคอด (orifice diameter)  $0.7 \text{ mm}$

จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิมีผลต่อความเร็วและระยะแหวกอากาศของลำพู่ของเชื้อเพลิงดีเซลคือ ที่อุณหภูมิ  $30^{\circ}\text{C}$  ความดันบรรยากาศ ลำพู่ของน้ำมันดีเซลมีความเร็วสูงสุดประมาณ  $1,400 \text{ m/s}$  และระยะแหวกอากาศ ได้  $230 \text{ mm}$  ที่เวลา  $299 \mu\text{s}$  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 Thinwongpituk 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

**245652**

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.

## กิตติกรรมประกาศ

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

คณะผู้วิจัย

## สารบัญ

	หน้า	
บทคัดย่อภาษาไทย	ก	
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข	
กิตติกรรมประกาศ	ค	
สารบัญ	ง	
สารบัญตาราง	ฉ	
สารบัญรูป	ช	
<b>บทที่ 1</b>	<b>บทนำ</b>	
1.1	ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2	วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3	ขอบเขตของโครงการวิจัย	3
1.4	ระเบียบวิธีวิจัย	3
1.5	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2</b>	<b>ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
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
<b>บทที่ 3</b>	<b>ระเบียบวิธีวิจัย</b>	
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 วิธีการทดลอง	69
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัย</b>	
4.1 ปริมาณดินจับกับความเร็วของลูกปืนและลำพุง	75
4.2 ปริมาณดินปืนและรูปทรงของหัวฉีดกับความเร็วของลำพุง	79
4.3 คุณลักษณะของลำพุงความเร็วสูง	81
<b>บทที่ 5 สรุป</b>	
5.1 สรุปผลการศึกษา	98
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	100
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	102
<b>ภาคผนวก</b>	
<b>ภาคผนวก ก</b> ผลงานตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	
<b>ภาคผนวก ข</b> ประวัติคณะผู้วิจัย	
<b>ภาคผนวก ค</b> ความเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิ	

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความเร็วเสียงในก๊าซ	12
2.2 ความเร็วเสียงในตัวกลาง ที่อุณหภูมิ 20 °C	14
2.3 ค่าผันแปรและอัตราความเร็วสูงสุดในการฉีดของเหลว	56
2.4 อัตราความเร็วในการฉีดของเหลว โดยหัวฉีดรูปโค้งและหัวฉีดแข็ง	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 กระแสลมที่ค่าของ $Ma < 1$ และ กระแสลมที่ค่าของ $Ma > 1$	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 Brunton	26
2.14 การติดตั้งวิธีทำให้เกิดการฉีดแบบ hypersonic ในการศึกษาของ O'Keefe	27
2.15 การประดิษฐ์การฉีดของเหลวโดยอาศัยการสันสะท้อน	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 แบบต่ำด้วยกล้องที่มีความเร็วสูง	41
2.22 รูปถ่ายของการฉีดในลักษณะพุ่งด้วยอัตราความเร็ว 9.2 m/s	42
2.23 การฉีดเชื้อเพลิงดีเซลแบบ Supersonic จากการถ่ายรูปภายในเนื้อหิน	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 โครงสร้างและการวัดขนาดของหัวฉีดเหล็กอ่อนทรงกรวยตรง	48
2.29 หัวฉีดแบบ exponential และ hyperbolic	50
2.30 หัวฉีดทรงกรวยตรง	51
2.31 ผลของขนาดหัวฉีดต่อความเร็วการฉีดลำพุ่งน้ำจากหัวฉีดเหล็กอ่อนทรงกรวยตรง	52
2.32 ผลของขนาดหัวฉีดต่อความเร็วการฉีดลำพุ่งดีเซลจากหัวฉีดเหล็กอ่อนทรงกรวยตรง	53
2.33 ผลของอัตราส่วน L/d ต่อความเร็วในการฉีดน้ำจากหัวฉีดเหล็กอ่อนทรงกรวยตรง	53
2.34 ผลของอัตราส่วน L/d ต่อความเร็วในการฉีดดีเซลจากหัวฉีดเหล็กอ่อนทรงกรวยตรง	54
2.35 ผลของมุมกรวยหัวฉีดต่อความเร็วในการฉีดน้ำและดีเซลด้วยหัวฉีดเหล็กอ่อนทรงกรวย	54
2.36 ผลกระทบของมวลกระสุนต่ออัตราความเร็วในการฉีดน้ำจากหัวฉีดเหล็กอ่อนทรงกรวย	55
2.37 ความเสียหายของหัวฉีดแข็งที่ยิงได้เพียงครั้งเดียว	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 สัญญาณลดลงเมื่อลูกระเบิดวิ่งผ่านชุด 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 กล้องวิดีโอความเร็วสูง	68
3.17 Z-type shadowgraph system	69
3.18 มวลของลูกปืน	70
3.19 ขนาดของลูกปืน	70
3.20 บรรจุลูกกระสุน	71
3.21 บรรจูดินขับและหัวจุดระเบิด	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 ต่อภาพ	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: T30°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