

# ผลของสมบัติของไหลที่มีต่อพฤติกรรมของลำพุ่งความเร็วสูง

## Effect of Liquid Properties on High Speed Liquid Jets Behavior

วุฒิชัย สิทธิวงษ์<sup>1</sup> วิระพันธ์ สีหนาม<sup>2</sup> และกุลเชษฐ์ เพียรทอง<sup>2</sup>

Received: June, 2014; Accepted: April, 2015

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของลำพุ่งความเร็วสูงและคลื่นกระแทก (Shock Wave) ของเหลวที่มีสมบัติต่างกัน ประกอบด้วย น้ำ (Water) น้ำมันดีเซล (Diesel Fuel) และน้ำมันสบู่ดำ (Jatropha Curcas Oil) ที่กำเนิดจากหัวฉีดเครื่องยนต์ดีเซลแบบเดือย (Pintle Nozzle) ขนาดรูฉีด (Orifice) 0.8 mm ด้วยวิธี Projectile Impact Driven (PID) ผลการทดลองบันทึกด้วยกล้องถ่ายภาพวิดีโอความเร็วสูง (High Speed Video Camera) ร่วมกับเทคนิคชาร์โดว์กราฟ จากการทดลองพบว่า ความเร็วเริ่มต้นของน้ำมันดีเซลมีค่าสูงสุดประมาณ 850 m/s และน้ำมันสบู่ดำมีความเร็วเริ่มต้นประมาณ 250 m/s นอกจากนี้จากภาพถ่ายเห็นพฤติกรรมของลำพุ่งของเหลวและคลื่นกระแทกชัดเจน รูปทรงของลำพุ่งน้ำแตกต่างจากลำพุ่งของน้ำมันดีเซลและน้ำมันสบู่ดำ กรณีคลื่นกระแทกของน้ำมันสบู่ดำจะแตกต่างจากกรณีอื่นคือการเกิดคลื่นกระแทกเป็นแบบ Multiple Shock Wave

คำสำคัญ : ลำพุ่งของเหลวของความเร็วสูง; คลื่นกระแทก; น้ำมันสบู่ดำ; กล้องถ่ายภาพวิดีโอความเร็วสูง; เทคนิคชาร์โดว์กราฟ

<sup>1</sup> คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์

<sup>2</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อุบลราชธานี

E-mail: sittiwong@gmail.com

## Abstract

The aims of this research are to study high velocity liquid jets and shock wave behavior of liquids with different properties. The liquid examined in this research consisted of water, diesel fuel and jatropha curcas oil, and High velocity liquids jets were generated using the projectile impact driven (PID) method along with a pintle diesel engine nozzle with a 0.8 mm orifice diameter. The experiment results were recorded by using a high speed video camera and shadowgraph technique. From experimental results, it is found that the diesel fuel liquid jets have the highest initial velocity of about 850 m/s while the jatropha curcas oil has the lowest initial velocity of about 250 m/s. According to recorded data, high velocity water jets differs in shape and behavior from diesel fuel and jatropha curcas oil jets. This and other liquid jet and shock wave behavior are clearly illustrated in recorded data. As a result, multiple shock waves are generated from jatropha curcas oil with high velocity liquid jets. This is in sharp contrast to the liquid jets creating with diesels fuel and water.

Keywords: High Speed Liquid Jet; Shock Wave; Jatropha Curcas Oil; High Speed Video Camera; Shadowgraph Technique

## บทนำ

การฉีดเชื้อเพลิงให้เป็นฝอยละออง (Fuel Atomization) เป็นปัจจัยหลักที่สำคัญข้อหนึ่งในการสันดาปเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ให้สมบูรณ์ โดยเฉพาะที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่สูงขึ้น ความดันในการฉีดเชื้อเพลิง (Injection Pressure) เป็นปัจจัยที่มีผลต่อความเร็วภายในรูฉีดของหัวฉีด (Nozzle Hole) ซึ่งเป็นขบวนการที่ทำให้เกิดการแตกตัวของสเปรย์น้ำมันที่ไม่เกิดขึ้น เมื่อความเร็วน้ำมันต่ำ หนึ่งในขบวนการที่เกิดขึ้นจากการฉีดที่ความเร็วสูง คือการเกิดควิเตชัน (Cavitation) ขึ้นภายในคอคอดหัวฉีด น้ำมันจะเกิดการแตกตัวอย่างรวดเร็ว และ Breakup Length ลดลง นอกจากนี้ปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อการแตกตัวของของเหลวหรือน้ำมันเชื้อเพลิง คือ อุณหภูมิและความดันภายในห้องเผาไหม้ รูปร่างของหัวฉีด (Lacoste J., 2006; Nakahira, T. et al., 1992; Sik Lee C. et al., 2002; Park S. W. and Lee C. S., 2003; Payri R. et al., 2009; Sittiwong W. et al., 2011; Sittiwong W. et al., 2011)

ในงานด้านวิศวกรรมยานยนต์เป็นที่ยอมรับกันว่า การฉีดเชื้อเพลิงด้วยความดันสูงเป็นประโยชน์ต่อเครื่องยนต์สันดาปภายใน ช่วยให้การเผาไหม้สมบูรณ์ให้พลังงานสูงสุด ประหยัดเชื้อเพลิง และลดมลพิษ เช่น ในเครื่องยนต์ที่ใช้ระบบฉีดเชื้อเพลิงคอมมอนเรล (Common Rail) ซึ่งมีความดันฉีดเชื้อเพลิงสูงถึง 1800 bar ความเร็วสเปรย์น้ำมันประมาณ 580 m/s (Bakar R. A. and Ismail A. R., 2008) ความเร็ว

ของสเปรย์น้ำมันสูงกว่าความเร็วเสียงในตัวกลางที่สภาวะบรรยากาศความเร็วเสียงในอากาศ 343 m/s (20°C) ทำให้เกิดพฤติกรรมของอากาศเกิดขึ้นรอบสเปรย์น้ำมันที่เรียกว่า คลื่นกระแทก (Shock Wave) ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการคลุกเคล้าของเชื้อเพลิงกับอากาศ (Pianthong K. et al., 2008; Seehanam W. et al., 2007; Sittiwong W. et al., 2012)

จากข้อดีของลำพุ่งของเหลวความเร็วสูงจึงมีกลุ่มนักวิจัยศึกษา ทดลอง และจำลองเกี่ยวกับคุณลักษณะของลำพุ่งที่สภาวะต่าง ๆ มากมาย Sittiwong W. และคณะ (Sittiwong W. et al., 2010) ศึกษาผลของอุณหภูมิและความดันในห้องทดสอบต่อพฤติกรรมลำพุ่งของน้ำมันดีเซลความเร็วสูงที่กำเนิดจากหัวฉีดทรงกรวย 30° ในห้องเผาไหม้ที่สภาวะอุณหภูมิและความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ 150°C ความดันบรรยากาศ และที่สภาวะห้องทดสอบอุณหภูมิบรรยากาศ ความดัน 8.2 bar จากการทดลองพบว่าลำพุ่งมีความเร็วสูงสุดประมาณ 1,400 m/s ที่สภาวะบรรยากาศ แต่การแตกตัวของน้ำมันเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิห้องทดสอบสูงขึ้น Alfuso S. และคณะ (Alfuso S. et al., 2005) ทำการทดลองศึกษาคุณลักษณะการระเหยตัวของสเปรย์น้ำมันดีเซลที่ถูกฉีดด้วยระบบคอมมอนเรล หัวฉีดขนาด 0.18 มม. อัตราส่วน L/D เป็น 5.56 ความดันฉีด 60, 90 และ 120 MPa ที่ 1.2 - 5.0 MPa และบันทึกด้วยกล้องถ่ายภาพ CCD การทดสอบสภาวะการระเหยตัวในห้องทดสอบความดันสูงที่บรรจุแก๊ส N<sub>2</sub> ที่ช่วงเวลาการฉีด 10  $\mu$ s กับเครื่องยนต์ 2 จังหวะ ที่ความเร็วรอบ 500 rpm ผลการทดลองแสดงระยะการฉีด (Tip Penetration) และมุมฉีด (Cone Angle) จากภาพถ่ายต่อเนื่องพบว่าระยะการฉีดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการฉีดเชื้อเพลิง ภายใต้สภาวะการระเหยตัวมีผลแตกต่างกันเล็กน้อย และลดลงเล็กน้อยเมื่อเริ่มเผาไหม้ Chang S.L. และ Sung W.P. (Chang S.L. and Sung W.P., 2002) ทดลองและจำลองเชิงตัวเลขเพื่อศึกษาคุณลักษณะของสเปรย์น้ำมันจากหัวฉีดขนาดเล็กที่ฉีดจากระบบคอมมอนเรลด้วยความดันสูงของเครื่องยนต์ดีเซลที่เปลี่ยนแปลงความดันฉีด ขบวนการสเปรย์และการเคลื่อนที่ของส่วนหัว Spray Tip ถูกนำมาวิเคราะห์ เช่น Sauter Mean Diameter (SMD) และความเร็วของแกนลำพุ่งถูกวัดโดย Phase Doppler Particle Analyzer และ โมเดล Kelvin-Helmholtz and Rayleigh-Taylor เพื่อประมาณการระยะ Breakup และ SMD และเปรียบเทียบผลทั้งสองกรณี Matthujak A. และคณะ (Matthujak A. et al., 2013) ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของการสันดาปของลำพุ่งความเร็วสูงของ N-Hexadecane ที่มีค่าซีเทนัมเบอร์ 100 ความเร็วฉีดที่ 1,186 m/s เลขมาร์ค (Mach Number) ประมาณ 3.41 โดยผลการทดลองได้จากกรณีวิเคราะห์จากภาพที่ถ่ายด้วยกล้องถ่ายภาพเคลื่อนไหวความเร็วสูง (High-Speed Digital Video Camera) กับระบบชาร์โดว์กราฟถึงการเกิดการจุดระเบิดด้วยตัวเองหรือไม่ ผลการทดลองปรากฏว่าลำพุ่งความเร็วสูงไม่เกิดการสันดาปด้วยตัวเองจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากคลื่นกระแทก และแม้ว่าจะใช้แท่งความร้อนหรือเลเซอร์ CO<sub>2</sub> ความเข้มสูงก็ตาม แต่หากใช้ทั้งสองอย่างคือ แท่งความร้อนทำให้เกิดการระเหยตัวและเลเซอร์ช่วยในการจุดติดจึงจะทำให้เกิดการสันดาป สรุปว่าการศึกษานี้พบว่าไม่เกิดการสันดาปด้วยตัวลำพุ่งเอง

แต่อย่างไรก็ตามที่สภาวะจริงของห้องเผาไหม้และการทดลองกับหัวฉีดเครื่องยนต์จริงที่ความเร็วสูงยังมีผู้ศึกษาน้อยมาก นอกจากนี้สมบัติของของเหลวโดยเฉพาะน้ำมันที่คุณภาพต่ำยังเป็นที่น่าสนใจหากจะชดเชยด้วยการฉีดที่ความดันสูง ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของลำพุ่งความเร็วสูงเหนือเสียงจากของเหลวที่มีสมบัติแตกต่างกัน 3 ชนิด ลำพุ่งของเหลวทั้ง 3 ชนิด

จะถูกกำเนิดจากหัวฉีดที่ใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลรูปทรงเดียวกัน โดยวิธีการกำเนิดลำพุงจากการกระแทกของลูกปืน (Projectile) ความเร็วสูง ซึ่งเรียกรวมกันว่า Projectile Impact Driven (PID) ผลของการทดลองได้จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูง (High Speed Video Camera, HSVC) ร่วมกับเทคนิคชาร์โดว์กราฟ (Shadowgraph Technique)

## เครื่องมือและวิธีการทดลอง

### สมบัติของของเหลว

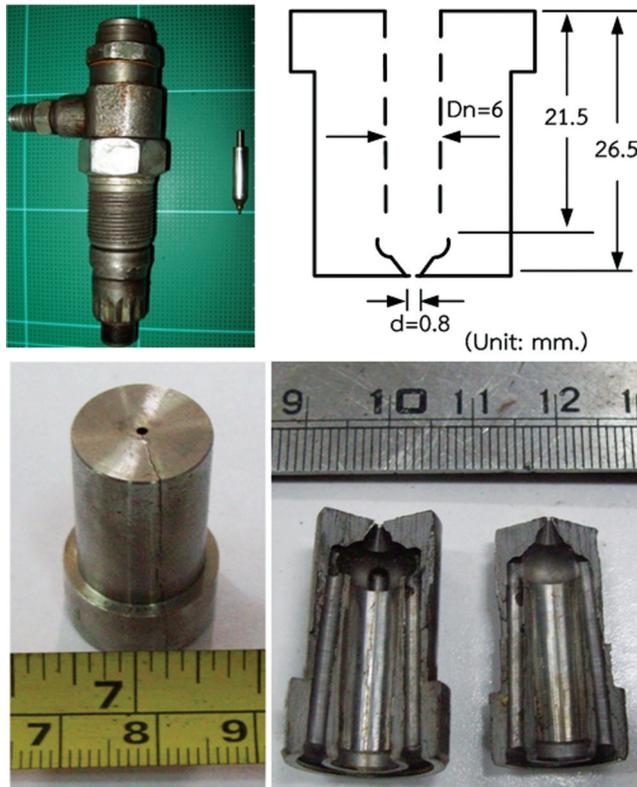
ในงานวิจัยนี้ใช้ของเหลวเพื่อกำเนิดลำพุง 3 ชนิด คือ น้ำ น้ำมันดีเซล และน้ำมันสบู่ดำที่มีสมบัติต่างกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำมันสบู่ดำที่มีความหนืดสูงถึง 50.7 cSt (ที่ 30°C) และน้ำที่มีค่าความตึงผิว (Surface Tension) สูงกว่าของเหลวทดลองอื่น ๆ มาก ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติของของเหลวที่ใช้ในการทดลอง

สมบัติ	น้ำ	ดีเซล	สบู่ดำ
Density (g/ml), (15°C)	0.998	0.83	0.92
Viscosity (cSt), (30°C)	1.007	3.36	50.7
Specific gravity, (20°C)	0.998	0.82	0.92
Flash point (°C)	-	>52	210
Bulk modulus (psi)	$3.1 \times 10^5$	$2.0 \times 10^5$	$2.6 \times 10^5$
Surface tension (mN/m, 20°C)	71.7	23	31

### หัวฉีด

การทดลองกำเนิดลำพุงของเหลวความเร็วสูงทั้ง 3 ชนิดที่นำเสนอในบทความนี้ กำเนิดจากหัวฉีดชนิดเดียวแบบรูเดี่ยว (Single-Hole Pintle Nozzle) ที่ใช้ในระบบจ่ายเชื้อเพลิงแบบ Indirect Injection (IDI) ยี่ห้อ Nippon-Denso (ND) รุ่น DN4 ของเครื่องยนต์ดีเซลยี่ห้ออิชูซุ ซึ่งมีรูปทรงดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 หัวฉีดและปลอกเข็มหัวฉีดแบบเดือย

### วิธีการกำเนิดลำพุ่งวิธี PID

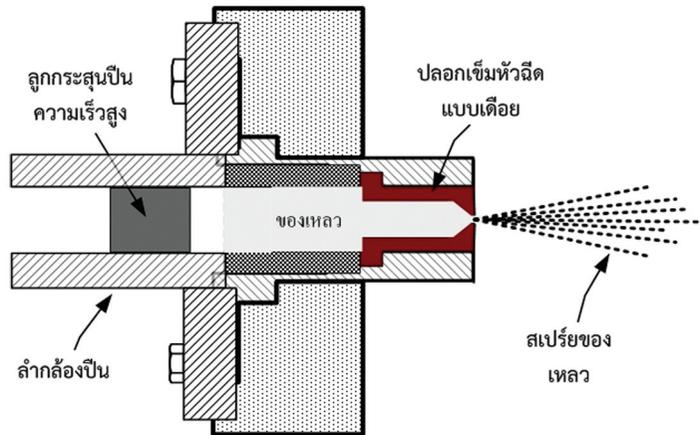
การกำเนิดลำพุ่งความเร็วสูงใช้วิธีพิเศษที่เรียกว่า Projectile Impact Driven (PID) โดยหลักการของ PID คือ การถ่ายเทโมเมนตัมจากมวลของลูกกระสุนปืนที่มีความเร็วสูงไปยังของเหลวที่บรรจุอยู่ในหัวฉีด ทำให้ของเหลวถูกฉีดออกมาด้วยความเร็วสูงกว่าความเร็วของลูกกระสุนปืน ดังรูปที่ 2 ลูกกระสุนปืนที่ใช้ในการทดลองเป็นลูกกระสุนปืน ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm ยาว 15 mm. ทำจาก Polymethylmethacrylate (PMMA) มวล 0.98 กรัม ถูกขับเคลื่อนด้วยดินปืนชั้นดินคินควันน้อย (Smokeless Powder) ปริมาณ 3 กรัม

พิจารณาลูกกระสุนปืนที่ทำจาก PMMA เพื่อประมาณค่าความดันกระแทกและความดันฉีดด้วยสมการค้อนน้ำ คือ

$$P = \rho CV \quad (1)$$

เมื่อ	$P$	คือ	ความดันกระแทก (MPa)
	$\rho$	คือ	ความหนาแน่นของ PMMA (1,190 kg/m <sup>3</sup> )
	$C$	คือ	ความเร็วเสียงใน PMMA (2,264 m/s)

และ  $V$  คือ ความเร็วของลูกกระสุนปืนที่ทำจาก PMMA ซึ่งเป็นความเร็วเริ่มต้นหรือความเร็วปลายกระบอกปืน ประมาณ 700 m/s จาก Guided Acoustic Shock หรือ GAS theory สามารถคำนวณหาความดันกระแทกของลูกกระสุนปืน และความดันขีดได้ประมาณ 2,219 MPa และ 2,344 MPa (Sittiwong W., 2011; Pianthong K., 2002)



รูปที่ 2 วิธี Projectile Impact Driven

### เทคนิคชาร์โดว์กราฟ

การศึกษาพฤติกรรมของวัตถุหรือของเหลวที่มีความเร็วสูงเหนือเสียงในตัวกลาง และพฤติกรรมที่เกิดขึ้นรอบ ๆ วัตถุ ไม่สามารถใช้เครื่องมือทั่วไปในการศึกษาพฤติกรรมได้ เนื่องจากวัตถุมีความเร็วสูงเหนือเสียงและคลื่นกระแทก หรือ Shock Wave ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่เกิดจากการอัดตัวหรือตัวกลางถ่ายเทพลังงานไม่ทัน ทำให้ความหนาแน่นของตัวกลางเปลี่ยนแปลง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้กล้องถ่ายภาพเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง (HSVC) เพื่อบันทึกภาพพฤติกรรมของลำพุ่งความเร็วสูงและเทคนิคชาร์โดว์กราฟที่สามารถมองเห็นพฤติกรรมของคลื่นกระแทกได้ HSVC กับเทคนิคชาร์โดว์กราฟถูกจัดวางอุปกรณ์และชุดทดลองดังแสดงในรูปที่ 3

ชุดทดลอง กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง และอุปกรณ์เพื่อถ่ายภาพด้วยเทคนิคชาร์โดว์กราฟ ประกอบด้วยอุปกรณ์

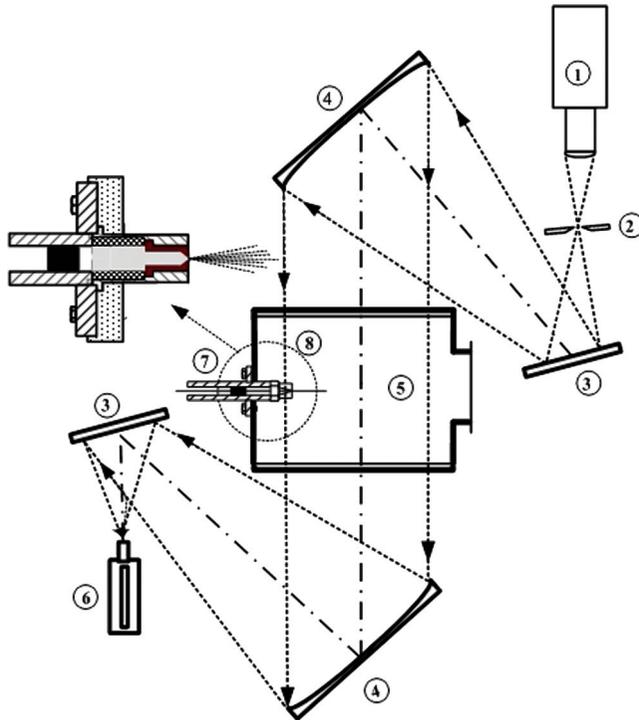
- หมายเลข 1 ชุดกำเนิดแสง (Light Source)
- หมายเลข 2 รูเข็ม (Pin Hole)
- หมายเลข 3 กระจกเงาแผ่นเรียบ (Plane Mirror)
- หมายเลข 4 กระจกเงาโค้ง (Parabolic Mirror)
- หมายเลข 5 ห้องทดสอบ (Test Chamber)
- หมายเลข 6 กล้องถ่ายภาพวิดีโอความเร็วสูง (High Speed Video Camera)

หมายเลข 7 ลำกล้องปืน (Gun Barrel)

หมายเลข 8 ชุดหัวฉีด (Nozzle Assembly)

ชาร์โคว์กราฟเทคนิค ใช้หลักการการหักเหของแสงที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่แตกต่างกัน ความหนาแน่นตัวกลางที่แตกต่างกันทำให้เกิดเงาภาพ ซึ่งแสงจากแหล่งกำเนิดแสง (1) ที่กระจายออกในแนวรัศมีจะถูกทำให้รวมกันที่จุดรวมแสง (Focus) ด้วยเลนส์นูน 2 ด้าน ที่ติดตั้งไว้กับชุดกำเนิดแสงที่จุดรวมแสง แสงจะเคลื่อนที่ผ่านรูเข็ม (2) ที่ทำหน้าที่กรองแสงที่กระจายออกเพื่อทำให้เกิดภาพเงาที่คมชัด แสงที่ผ่านจุดรวมแสงจะกลับมาระจายออกอีกครั้งและตกกระทบบนกระจกเงาโค้ง (4) แผ่นแรก กระจกเงาโค้งจะทำหน้าที่เปลี่ยนทิศทางของแสงจากแนวรัศมีเป็นแนวขนาน แสงขนานจะส่องผ่านห้องทดสอบ (5) และกระทบบนกระจกเงาโค้ง (4) แผ่นที่สอง ที่ทำหน้าที่รวมแสงที่จุดรวมแสงอีกครั้ง และเป็นตำแหน่งติดตั้ง HSVC

เมื่อเกิดการอัดตัวของตัวกลาง ความหนาแน่นของตัวกลาง (ในที่นี้ คืออากาศ) จะเปลี่ยนแปลงหรือเมื่อมีวัตถุเคลื่อนผ่านอากาศตัวกลางในห้องทดสอบ แสงในแนวขนานจากกระจกเงาโค้งแผ่นแรกเกิดหักเหทำให้เกิดเงาภาพ และถูกบันทึกด้วย HSVC



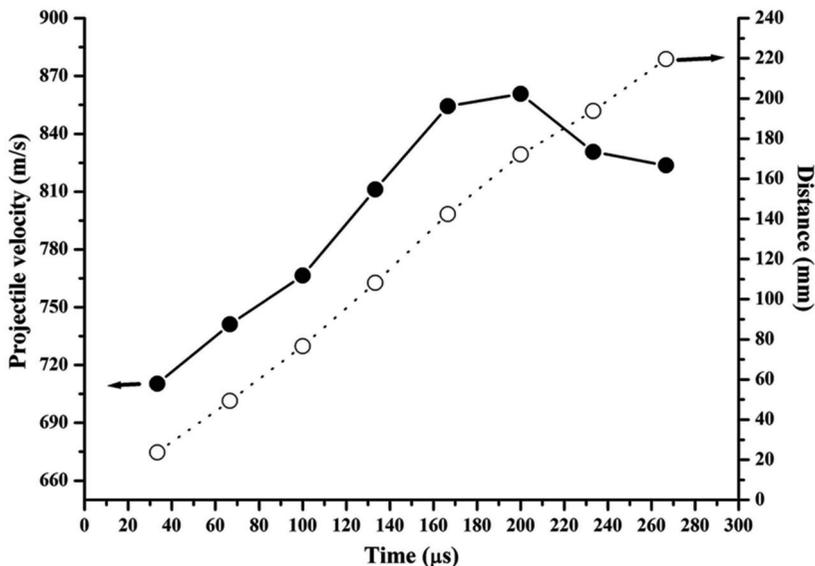
รูปที่ 3 การจัดวางชุดทดลองและกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงร่วมกับเทคนิคชาร์โคว์กราฟ

## ผลการทดลอง

### ความเร็วของลูกกระสุนปืนและลำพุ่ง

การกำเนิดลำพุ่งความเร็วสูงด้วยวิธี PID ใช้ดินปืนชนิดดินคัวน้อย ปริมาณ 3 กรัม เผาไหม้ในปลอกลูกปืนและขับเคลื่อนลูกกระสุนที่ทำจาก PMMA มวล 0.98 กรัม ลูกกระสุนปืนความเร็วสูงและพฤติกรรมที่เกิดขึ้นถูกบันทึกด้วย HSVC ที่ 30,000 f/s หรือ  $33 \mu\text{s}$  ต่อภาพ ความเร็วเฉลี่ยของลูกกระสุนปืนได้จากการเปลี่ยนแปลงระยะการเคลื่อนที่ของลูกกระสุนปืนแต่ละเฟรมหารด้วยเวลา ( $33 \mu\text{s}$ ) ผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4

ในรูปที่ 4 แสดงผลความเร็วเฉลี่ยและระยะการเคลื่อนที่ของลูกกระสุนที่เปลี่ยนแปลงทุก ๆ  $33 \mu\text{s}$  จากผลการทดลองพบว่าความเร็วเฉลี่ยเริ่มต้นสูงกว่าความเร็วเสียงในอากาศ ความเร็วระดับ Supersonic ที่เลขมาร์ค (Mach Number) ประมาณ 2 ( $\sim 700 \text{ m/s}$ ) และความเร็วเฉลี่ยสูงสุดประมาณ  $870 \text{ m/s}$  ที่เวลา  $199 \mu\text{s}$  ระยะการเคลื่อนที่ 170 mm จากปลายลำกล้องปืน ความเร็วเฉลี่ยของลูกกระสุนปืนเริ่มต้นที่กระแทกของเหลวที่บรรจุในหัวฉีดประมาณ  $700 \text{ m/s}$  ทำให้ลำพุ่งถูกฉีดออกมาด้วยความเร็วเริ่มต้นต่ำสุดของน้ำมันสบูดำที่ประมาณ  $250 \text{ m/s}$  น้ำที่ประมาณ  $600 \text{ m/s}$  และประมาณ  $850 \text{ m/s}$  กรณีลำพุ่งของน้ำมันดีเซล ดังแสดงในรูปที่ 5 นอกจากนี้ ความเร็วเริ่มต้นของน้ำต่ำกว่าน้ำมันดีเซลและเพิ่มสูงขึ้นจนเท่าน้ำมันดีเซลได้อย่างรวดเร็วนั้นเป็นเพราะค่าความตึงผิว (Surface Tension) ของน้ำที่สูงกว่าและสูงที่สุดเมื่อเทียบกับทั้ง 3 ชนิด

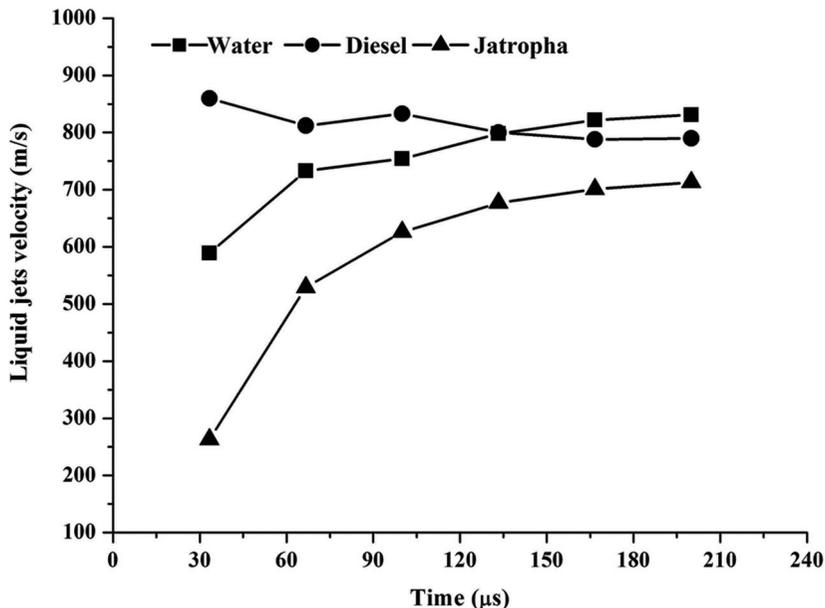


รูปที่ 4 ความเร็วเฉลี่ยและระยะการเคลื่อนที่ของลูกกระสุน

จากรูปที่ 5 จะเห็นว่าความเร็วเริ่มต้นของลำพุ่งน้ำมันสบูดำต่ำที่สุด ประมาณ  $250 \text{ m/s}$  และค่อย ๆ สูงขึ้น และความเร็วสูงสุดประมาณ  $700 \text{ m/s}$  ที่เวลา  $210 \mu\text{s}$

ความเร็วเริ่มต้นของน้ำประมาณ 600 m/s และ 830 m/s ที่เวลา 210  $\mu\text{s}$  ซึ่งเป็นความเร็วปลายสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล และน้ำมันสบูดำ กรณีน้ำมันดีเซล ความเร็วเริ่มต้นประมาณ 850 m/s ซึ่งเป็นความเร็วเริ่มต้นที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับน้ำ และน้ำมันสบูดำ และความเร็วที่เวลา 210  $\mu\text{s}$  มีความเร็วประมาณ 800 m/s

จากผลการทดลองจะเห็นว่าความเร็วเฉลี่ยของน้ำมันดีเซลค่อนข้างคงที่ เมื่อเทียบกับน้ำและน้ำมันสบูดำที่ความเร็วเริ่มต้นต่ำและสูงขึ้น สาเหตุที่ความเร็วเริ่มต้นและความเร็วปลายของน้ำมันสบูดำต่ำ เนื่องจากค่าความหนืด (Viscosity) ของน้ำมันสบูดำสูงมาก เมื่อเทียบกับของเหลวทดลองอีก 2 ชนิด เช่นเดียวกับกับผลจากน้ำมันดีเซลที่มีค่าความหนืดต่ำกว่าน้ำมันสบูดำ กรณีผลที่ได้จากลำพุ่งความเร็วสูงของน้ำที่มีค่าความเร็วค่อนข้างคงที่อาจเกิดจากค่าความหนืด (1.007 cSt, 30°C) ที่ต่ำกว่าของเหลวทดลองอีกสองชนิด ซึ่งต้องพิจารณาผลที่ได้จากรูปที่ถ่ายอีกครั้ง และเมื่อเทียบผลความเร็วของของเหลวทั้ง 2 คือ น้ำกับน้ำมันดีเซลที่มีค่าความหนืดแตกต่างกันไม่มากความเร็วของลำพุ่งก็แตกต่างกันไม่มาก



รูปที่ 5 ความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่งของเหลว

### พฤติกรรมของลำพุ่งและคลื่นกระแทก

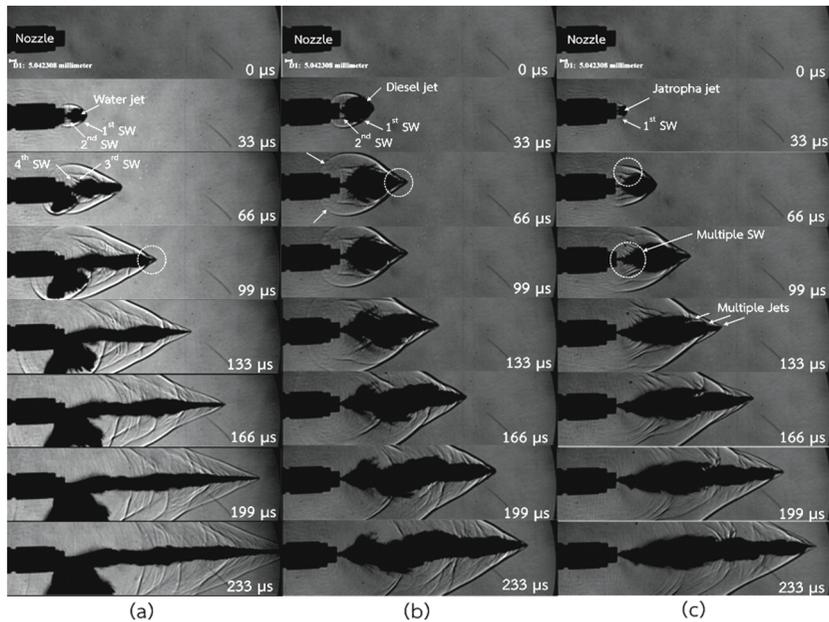
รูปที่ 6 ภาพถ่ายต่อเนื่องลำพุ่งของน้ำ (a) น้ำมันดีเซล (b) และน้ำมันสบูดำ (c) ที่เปลี่ยนแปลงทุก ๆ 33  $\mu\text{s}$  ถึง 233  $\mu\text{s}$  จากรูปจะเห็นลำพุ่งและคลื่นกระแทก หรือ Shock Wave (SW) ได้ชัดเจนในทุกกรณี

ในช่วงเริ่มต้น (33  $\mu\text{s}$ ) คลื่นกระแทกเกิดขึ้นพร้อมกับลำพุ่งนั้นแสดงว่าความเร็วของลำพุ่งสูงกว่าความเร็วเสียงในอากาศ ลำพุ่งของน้ำมันดีเซลและสบูดำเกิดขึ้นกระเจายอกเหมือนพัด (Fan) อย่างชัดเจนกว่ากรณีอื่น เนื่องจากค่าความตึงผิวของน้ำมันดีเซลและสบูดำมีค่าต่ำกว่าน้ำ ทำให้เกิดมองเห็น

การแตกตัวได้ดี นอกจากนี้การเกิดขึ้นของ 2<sup>nd</sup> SW ยังเกิดขึ้นได้อย่างชัดเจนทั้งกรณี (a) และ (b) นั้น แสดงว่าเกิด Multiple Jets ซึ่งเป็นเหตุที่เกิดจากพฤติกรรมภายในของหัวฉีดและวิธีการกำเนิดลำพุง ที่เวลา 66  $\mu$ s รูปร่างของลำพุงน้ำเริ่มเป็นรูปทรงเรียวยาว หรือ Boat Shape แต่ลำพุงน้ำมันดีเซลและ สบู่ดำยังคงไม่เปลี่ยนแปลงนั้น แสดงถึงแนวโน้มของความเร็วของลำพุงน้ำที่จะสูงขึ้น เนื่องจากพื้นที่ ด้านแรงเสียดทานอากาศต่ำ เพราะแรงตึงผิวของน้ำ (71.7 mN/m, 20°C) สูงกว่าน้ำมันดีเซล (23 mN/m, 20°C) และน้ำมันสบู่ดำ (31 mN/m, 20°C) และที่เห็นได้อย่างชัดเจนคือการเกิด SW อีก 3 - 4 คลื่นตามมา ส่วนทางของ 1<sup>st</sup> SW เริ่มม้วนตัวเข้าหาแกน ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยอื่น ๆ สาเหตุเกิดจากรูปทรงภายในของหัวฉีดที่แตกต่างกัน กรณีของ 2<sup>nd</sup> SW ของลำพุงสบู่ดำมีรูปร่างเป็น คอคอค สาเหตุจากส่วนทางของ 2<sup>nd</sup> SW จะม้วนเข้าหาแกนกลางลำพุงแต่ 3<sup>rd</sup> SW ขยายตัวออก ทำให้ส่วนทางของ 2<sup>nd</sup> SW ขยายตัวออก นอกจากนี้พฤติกรรมที่แตกต่างของคลื่นกระแทกที่เกิดขึ้น ในกรณีลำพุงน้ำมันสบู่ดำ คือ การเกิด Multiple SW ที่ส่วนทางของลำพุง (ใกล้หัวฉีด) พร้อม ๆ กัน จำนวนมากและต่อเนื่อง

### สรุปผลการทดลอง

ลำพุงของน้ำ น้ำมันดีเซล และน้ำมันสบู่ดำ กำเนิดจากลูกกระสุนปืนความเร็วประมาณ 700 m/s จากหัวฉีดแบบเดือย (Pintle Nozzle) ด้วยวิธี PID ความเร็วเริ่มต้นสูงสุด 850m/s 600 m/s และ 250 m/s จากน้ำมันดีเซล น้ำ และน้ำมันสบู่ดำ ตามลำดับ ความเร็วเฉลี่ยของลำพุงน้ำมันดีเซล 800 m/s ลำพุงน้ำ 750 m/s และลำพุงน้ำมันสบู่ดำประมาณ 600 m/s สาเหตุของความแตกต่างเกิดจากสมบัติของ ของเหลวที่แตกต่างกันตามตารางที่ 1 คือค่าความหนืด (Viscosity) เป็นค่าบ่งชี้คุณสมบัติความต้านทาน การไหลในตัวของไหลที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของของไหล และค่าความตึงผิว (Surface Tension) เป็นสมบัติของของเหลวที่มีผลต่อการแตกตัวหรือกระจายตัวของของเหลว หากค่าความตึงผิวต่ำ ลำพุง จะกระจายตัวออกทำให้พื้นที่ผิวต้านทานอากาศหรือแรงต้านการเคลื่อนที่สูง นอกจากนี้รูปทรงที่เกิดขึ้น ของลำพุงเกิดจากสมบัติของของเหลวแล้ว รูปทรงภายในหัวฉีดยังมีผลต่อรูปร่างและพฤติกรรมของลำพุง และพฤติกรรมการเกิดขึ้นของคลื่นกระแทกอีกด้วย



รูปที่ 6 ลำพุ่งของเหลวความเร็วสูงของ (a) น้ำ (b) น้ำมันดีเซล (c) น้ำมันสบู่ดำ

### กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่สนับสนุนงบประมาณ และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้การสนับสนุนการทำวิจัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

### References

- Lacoste J. (2006). Characteristics of diesel sprays at high temperature and pressures. PhD. Dissertation. School of Engineering. University of Brighton.
- Nakahira, T., Komori, M., Nishida, M. and Tsujimura, K. (1992). The shock wave generation around the diesel fuel spray with High pressure injection. SAE. Vol. 101. No. 3. pp. 741-746
- Sik Lee C., Obara T. and Park S.W. (2002). An experimental and numerical study on fuel atomization characteristics of high-pressure diesel injection sprays. Fuel. Vol. 81. Number. 18. pp. 2417-2423
- Park S.W. and Lee C.S. (2003). Macroscopic structure and atomization characteristics of high-speed diesel spray. International Journal of Automotive Technology. Vol. 4. pp. 157-164

- Payri R., Salvador, J., Gimeno, J. and de la Morena (2009). Effects of nozzle geometry on direct injection diesel engine combustion process. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 29. No. 10. pp. 2051-2060
- Sittiwong W., Pianthong K., Seehanam W., Matthujak A. and Kasamnimitporn C. (2011). Effect of test chamber conditions on the behavior of high speed diesel jets. *Journal of Science & Technology*. Ubon Ratchathani University. Vol. 13. No. 1. pp. 97-108
- Sittiwong W., Pianthong K., Seehanam W., Matthujak A. and Kasamnimitporn C. (2011). Effects of temperature on the high speed liquid jets behaviors. *Journal of Science & Technology*. Ubon Ratchathani University. Vol. 13. No. 2. pp. 33-43
- Bakar R. A. and Ismail A. R. (2008). Fuel injection pressure effect on performance of direct injection diesel engines based on experiment. *American Journal of Applied Sciences*. Vol. 5. Issue 3. pp. 197-202
- Pianthong, K., Matthujak, A., Takayama, K., Milton, B. and Behnia, M., (2008). Dynamic characteristics of pulsed supersonic fuel sprays. *Shock Waves*. Vol. 8. No. 1. pp. 1-10
- Seehanam W., Sittiwong W., Pianthong K. and Matthujak A. (2007). Simulation on fundamental characteristic of high speed fuel jet. In *Proceeding of the 21<sup>st</sup> Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*. Paper No. Cst 45.
- Sittiwong W., Pianthong K., Seehanam W., Milton B. E. and Takayama K. (2012). Effects of chamber temperature and pressure on the characteristics of high speed diesel jets. *Shock wave*. pp. 215-223
- Sittiwong W., Pianthong K., Seehanam W., Matthujak A. and Kasamnimitporn C. (2010). Effects of temperature and pressure on characteristics of high speed diesel jets. *The First TSME International Conference on Mechanical Engineering*. Ubon Ratchathani
- Alfuso S., Allocca L., Auriemma and Caputo, G. (2005). An analysis of a high pressure diesel spray at high pressure and temperature environment conditions, *SAE International Technical*. Paper 2005-01-1239
- Chang S. L. and Sung W. P. (2002). An experimental and numerical study on fuel atomization characteristics of high-pressure diesel injection sprays. *FUEL*. Vol. 81. Issue 18. Num. 18. pp. 2417-2423
- Matthujak A., Pianthong K., Takayama K. and Milton B. E. (2013). Experimental study of ignition over impact-driven supersonic liquid fuel jet advances in *Mechanical Engineering*. Vol. 2013 Article ID 928970. p. 8

- Sittiwong W. (2011). Characteristics of fuel spray under pulsed high pressure injection. PhD. Dissertation. Faculty of Engineering. Ubon ratchathani University
- Pianthong K. (2002). Supersonic liquid diesel fuel jets. PhD. Dissertation. The University of New South Wales