ผลของอุณหภูมิต่อพฤติกรรมของลำพุ่งห้ำมันดีเซลความเร็วสูง Effect of temperature on the high speed diesel fuel jets behaviors

วุฒิชัย สิทธิวงษ์ กุลเซษฐ์ เพียรทอง วิระพันธ์ สิหานาม อนิรุตต์ มัทธุจักร์ และชัยเดช เกษมนิมิตรพร ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190 *Email: sittiwong@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณลักษณะลำพุ่งน้ำมันดีเซลความเร็วสูง (High speed diesel fuel jets) ลำพุ่ง น้ำมันดีเซลที่มีความเร็วสูงจะเกิดจากการกระแทกของลูกปืน ซึ่งวิธีการนี้เรียกว่า "Projectile impact driven" การทดลองนี้ จะใช้ความเร็วของลูกปืนประมาณ 700 เมตร/วินาที กับหัวฉีดทรงกรวย (Conical nozzle) มุม 30 องศา ขนาดคอคอด (Orifice) 0.7 มิลลิเมตร ในส่วนของพฤติกรรมของลำพุ่งน้ำมันดีเซลที่จะนำมาวิเคราะห์ ได้จากภาพที่ถ่ายด้วยเทคนิค ชาโดว์กราฟ (Shadowgraph technique) ร่วมกับกล้องวิดีโอความเร็วสูง (High speed video camera) ภายในห้อง ทดสอบจะทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจาก 30 - 150 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลอง พบว่าอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อความเร็วและรูปร่างของลำพุ่งน้ำมันดีเซล คือ ที่กรณีอุณหภูมิสูง (150 องศาเซลเซียส) ลำพุ่งของน้ำมันดีเซลมีความเร็วเฉลี่ยเริ่มต้นประมาณ 1,200 เมตร/วินาที ที่ระยะการเคลื่อนที่ (Penetration distance) เริ่มต้นของลำพุ่ง 20 มิลลิเมตร (เวลา 33 μs) ซึ่งมีความเร็วต่ำกว่ากรณีอุณหภูมิต่ำ (30 องศา เซลเซียส) คือ 1,400 เมตร/วินาที และ 46 มิลลิเมตร นอกจากนี้ ที่อุณหภูมิของห้องทดสอบ 150 องศาเซลเซียส ยังเกิด การแตกดัวของน้ำมันเชื้อเพลิงขึ้นรอบแกนของลำพุ่งอย่างชัดเจน

้ **คำสำคัญ :** ลำพุ่งน้ำมันดีเซลความเร็วสูง เทคนิคชาโดว์กราฟ การขับดันด้วยการกระแทก กล้องวิดีโอความเร็วสูง

Abstract

This study investigates on effect of temperature in the test chamber on characteristics of high speed diesel jets. The high speed diesel jets are generated by using the projectile impact driven method. In the experiment, the projectile velocity is around 700 m/s and nozzle with 30° cone angle and 0.7 mm orifice diameter are used. The visual behaviors of high speed diesel jets were obtained from the high speed video camera and optical system with shadowgraph technique. The high speed diesel jets are injected into the test chamber in which the temperature is varied the range of 30°C to 150°C.

From experimental results, it is found that at the high temperature condition (150°C) the maximum average jet velocity and initial penetration of jet are around 1,200 m/s and 20 mm (33 µs) respectively, and lower than those at the low temperature (30°C) condition (1,400 m/s and 46 mm). In addition, intensive atomization of diesel fuel generation surround the core jet can be observed from experimental result at high temperature condition.

Keywords: high speed diesel fuel jet, shadowgraph technique, projectile impact driven, high speed video camera

1. บทนำ

การฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงที่ความดันสูง สำหรับการ สันดาปของเครื่องยนต์ โดยเฉพาะกับเครื่องยนต์ดีเซลเป็น วิธีการหนึ่งที่ช่วยเพิ่มสมรรถนะของเครื่องยนต์ ซึ่งได้ พิสูจน์และยอมรับกันอย่างกว้างขวาง เช่น ในเครื่องยนต์ ดีเซลที่ใช้ระบบการฉีดเชื้อเพลิง Common rail ที่สามารถ สร้างความดันในการฉีดเชื้อเพลิงได้สูงถึง 2,000 บาร์ [1], [2] เหตุผลที่ทำให้สมรรถนะของเครื่องยนต์สูงขึ้น เกิดจาก ้ความดันในการฉีดเชื้อเพลิงที่สูงขึ้นทำให้เชื้อเพลิงแตกตัว (Atomization) เม็ดเชื้อเพลิงมีขนาดเล็กลง ช่วยให้การผสม ้กับอากาศดีขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ดีขึ้น เป็นผลให้สมรรถนะของเครื่องยนต์สูงขึ้น ซึ่งได้มีการพิสูจน์ ้จากงานวิจัยถึงพฤติกรรมและคุณลักษณะของสเปรย์น้ำมัน เชื้อเพลิงทั้งเหนือความเร็วเสียง ทำให้เกิด Shock wave ขึ้นการทดลองและทางทฤษฏี [3], [4], [5], [6], [7], [8] การ ฉีดเชื้อเพลิงที่ความดันสูงจนกระทั่งความเร็วของเชื้อเพลิง ้มีความเร็วที่สูงรอบๆ ลำพุ่งของเชื้อเพลิง [3], [9] ขนาด ของเม็ดน้ำมันมีขนาดที่เล็กลง [10], [11] จากทฤษฏีของ High speed flow เมื่อมี Shock wave เกิดขึ้น อุณหภูมิ ้ด้านหลังของ shock wave จนถึงส่วนหัวของลำพุ่งจะสูงขึ้น กว่าปกติมาก [12] ซึ่งเป็นเรื่องที่น่าสนใจที่จะศึกษา พฤติกรรมและคุณลักษณะของลำพุ่งเชื้อเพลิงที่มีความเร็ว ที่สูงกว่าความเร็วเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดเข้าไปในห้องเผาไหม้ ปัจจุบัน (~700 m/s ที่บรรยากาศ) แล้วเพิ่มอุณหภูมิใน ห้องทดสอบให้เข้าใกล้อุณหภูมิของการเผาไหม้จริงตาม คณสมบัติของเชื้อเพลิง

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมและ คุณลักษณะของลำพุ่งเชื้อเพลิงดีเซลที่มีความเร็วสูงเหนือ ความเร็วเสียงที่ถูกกำเนิดจากวิธีถ่ายเทโมเมนต์ตัมจาก ลูกปืนความเร็วสูงไปยังน้ำมันดีเซลที่ถูกบรรจุอยู่ในหัวฉีด ซึ่งเรียกว่าวิธีการนี้ว่า "Projectile Impact driven method" น้ำมันดีเซลจะถูกฉีดเข้าไปในห้องทดสอบที่ควบคุม อุณหภูมิ 30°C, 100°C, 130°C และ 150°C ผลของการ ทดลองจะได้จากการวิเคราะห์ภาพที่ถ่ายด้วยเทคนิคชา โดว์กราฟ (Shadowgraph technique) ร่วมกับกล้องวิดีโอ ความเร็วสูง (High Speed Video Camera, HSVC)

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 อุปกรณ์กำเนิดลำพุ่งความเร็วสูง

การกำเนิดลำพุ่งของน้ำมันดีเซลให้มีความเร็ว สูงระดับ Supersonic ด้วยวิธีการกระแทกด้วยลูกปืน (projectile impact driven) ที่ใช้หลักการการถ่ายเท โมเมนต์ตัมจากลูกปืน (Projectile) ความเร็วสูงไปกระแทก น้ำมันดีเซลที่ถูกบรรจุอยู่ในหัวฉีด เมื่อลูกปืนกระแทก น้ำมันในหัวฉีด น้ำมันจะฉีดออกมาด้วยความเร็วที่สูง ดัง แสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 Projectile impact driven method

ลูกปืนที่มีความเร็วสูงนี้ถูกขับจากการระเบิดของดินขับ (Gun powder) ภายท่อบรรจุดินขับ (Cartridge) ซึ่งทำงาน เหมือนอาวุธปืน ซึ่งเป็นหลักการที่ใช้ออกแบบและสร้าง เครื่องทดลองขึ้น โดยให้ชื่อว่า "Horizontal Single Stage Powder Gun" (HSSPG) ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ชุดกำเนิดลำพุ่งความเร็วสูง HSSPG

ในภาพที่ 2 แสดงภาพร่างชุดกำเนิดลำพุ่งความเร็วสูง ติดตั้งอยู่บนคานเหล็กรูปตัวไอ (I-beam) ประกอบด้วย 5 ส่วนคือ

 1. ชุดปล่อยกระสุนป็น (Launcher) ทำหน้าที่เหมือน ป็น คือ จุดชนวนเผาไหม้ดินขับที่อยู่ภายในปลอกลูกป็น (Cartridge) และขับลูกกระสุนปืน (Projectile) ซึ่งจะ ประกอบด้วยชุดเข็มแทงชนวนกับปลอกลูกปืน ที่บรรจุดิน ขับชนิดดินควันน้อย (Smokeless powder) ที่สามารถ บรรจุดินขับได้สูงสุด 7.5 กรัม ดังแสดงในภาพที่ 3

 2. ท่อส่ง (Launch tube) ทำหน้าที่เหมือนลำกล้อง ปืนคือ ควบคุมทิศทางและแรงขับให้กระสุนปืน มีลักษณะ เป็นท่อกลมตรง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 8 มิลลิเมตร ความยาว 1.5 เมตร ปลายด้านหนึ่งยึดติดกับชุด ปล่อยกระสุนปืนส่วนปลายอีกด้านจะยึดติดกับท่อระบาย แรงดัน (Pressure relief section)



ภาพที่ 3 ชุดปล่อยกระสุน

ส่วนที่ 3 คือท่อระบายแรงดัน ทำหน้าที่ระบาย แรงดันหรือแรงอัดของอากาศในท่อส่ง ที่ถูกอัดจากลูก กระสุน ดังภาพที่ 4 ซึ่งแรงอัดอากาศที่อยู่ด้านหน้าลูกปืนนี้ จะเป็นสาเหตุทำให้การฉึดเชื้อเพลิงก่อนที่ลูกกระสุนจะ กระแทกน้ำมัน หรือเกิด Slow jet ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ ท่อระบายแรงดันจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน เท่ากับท่อส่ง ยาว 0.4 เมตร เจาะเป็นช่องขนาด 3 มิลลิเมตร ตามแนวยาว (Slot) ทั้ง 4 ด้าน ด้านหนึ่งของท่อ ระบายแรงดันถูกติดตั้งอยู่ส่วนปลายของท่อส่ง และอีกด้าน ยึดกับห้องทดสอบ นอกจากทำหน้าที่ระบายแรงอัดแล้ว ท่อระบายแรงดันยังทำหน้าที่ยึดชุดหัวฉีดให้ติดกับห้อง ทดสอบด้วย



ภาพที่ 4 อากาศที่ระบายบริเวณท่อระบายแรงดัน

4. ชุดหัวฉีด (Nozzle assembly) จะประกอบด้วย หัวฉีดและเสื้อยึดหัวฉีด ชุดหัวฉีดจะถูกติดตั้งระหว่างห้อง ทดสอบกับท่อระบายแรงดัน และส่วนสุดท้าย คือ ห้อง ทดสอบ (Test chamber) ซึ่งถูกออกแบบให้เป็นถังทรง กลม หนา 5 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 400 มิลลิเมตร กว้าง 300 มิลลิเมตร ฝาด้านข้างทั้งสองด้านเป็นแผ่นอะ คริกใส หนา 25 มิลลิเมตร เพื่อเป็นช่องหน้าต่างสำหรับ ถ่ายภาพลำพุ่งความเร็วสูง ภายในถังทดสอบจะติดตั้งชุด ตัวทำความร้อน ขนาด 1,000 วัตต์ พัดลมหมุนเวียนอากาศ และหัววัดอุณหภูมิ ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ถังทดสอบและอุปกรณ์

2.2 การวัดความเร็วของลูกปีน

การกำเนิดลำพุ่ง จะใช้ลูกปืนที่ทำจากอะคิริคแท่งใส ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ยาว 15 มิลลิเมตร มวล 0.92 กรัม ดังภาพที่ 6 ลูกปืน ถูกขับจากการเผาไหม้ ของดินปืนชนิดควันน้อยที่เผาไหม้จากชนวนที่จุดจาก การกระแทกของเข็มแทงชนวน เมื่อความดันภายในปลอก บรรจุดินปืน



ภาพที่ 6 ลูกปืน

การวัดความเร็วของลำพุ่งของเหลวใช้หลักการ การตัด เลเซอร์ของวัตถุ (Laser beam interruption) หรือ "Time of flight method" โดยใช้เลเซอร์ไดโอด (Laser diode) และไดโอดรับแสง (Photo diode) จำนวน 2 ชุด โดยไดโอด ชุดแรกวางห่างจากหัวฉีด 15 มิลลิเมตร และไดโอดชุดที่ สองวางห่างจากไดโอดชุดแรก 33 มิลลิเมตร ไดโอดรับแสง จะต่อสายสัญญาณเข้ากับออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) เพื่ออ่านสัญญาณไฟฟ้าและแสดงผลบนหน้าจอ ดังภาพที่ 7 หลักการทำงานของการวัดความเร็วด้วย Laser beam interruption method เกิดขึ้นเมื่อลูกปืนเคลื่อนที่ตัดลำแสง จากเลเซอร์ไดโอดชุดแรก สัญญาณไฟฟ้าที่ไดโอดรับแสง ส่งให้ออสซิลโลสโคปที่ช่องสัญญาณที่ 1 ถูกตัดลง เส้น สัญญาณบนหน้าจอแสดงผลจากบวกจึงตกลงเป็นศูนย์และ เกิดขึ้นตามมากับสัญญาณในชุดที่ 2 เมื่อลูกปืนผ่านลำแสง เส้นที่ 2 ดังภาพที่ 7(b)



ี**ภาพที่ 7** (a) laser beam interruption method (b) สัญญาณไฟฟ้าที่ออสซิลโลสโคปวัดได้จาก ไดโอด

จากระยะห่างของลำแสงชุดที่ 1 กับ 2 และเวลา ที่วัดได้จากออสซิลโลสโคป สามารถหาความเร็วของลูกปืน ได้จากสมการ

$$V_{P} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \tag{1}$$

เมื่อ $V_{\!P}$ คือ ความเร็วของลูกปืน, m/s

 Δs คือ ระยะของลำแสงเลเซอร์ 1 กับ 2, m

 Δt คือ เวลาที่ลูกปืนตัดแสงเลเซอร์ 1 กับ 2 อ่าน ค่าได้จากออสซิลโลสโคป, s

2.3 การถ่ายภาพลำพุ่งความเร็วสูงและ Shock wave

การเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงของลำพุ่งน้ำมัน ดีเซลและ Shock wave นั้น ไม่สามารถมองเห็น รายละเอียดได้ด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูงเพียงอย่างเดียว ดังแสดงให้เห็นจากภาพที่ 8 เป็นลำพุ่งของเหลวความเร็ว ประมาณ 1,300 m/s (M~3.8) ซึ่งจากภาพจะเห็นเพียงลำ พุ่งของของเหลวเท่านั้น ไม่สามารถมองเห็นรายละเอียด ของลำพุ่งและ Shock wave ได้

จากสาเหตุดังกล่าวข้างต้น การศึกษานี้จึงได้นำ เทคนิคชาโดว์กราฟ (Shadowgraph technique) เข้ามาใช้ ร่วมกับกล้องวิดีโอความเร็วสูง Photron รุ่น Fastcame SA5 โดยอุปกรณ์ประกอบไปด้วยกระจกผิวโค้ง (Parabolic mirror) ขนาด 30 เซนติเมตร โฟกัส 1,500 เซนติเมตร จำนวน 2 บาน แหล่งกำเนิดแสง (Light Source) ชนิด Xenon 3,500 lumens/4300 K พร้อมเลนส์รวมแสง (Convex lens) และกล้องวิดีโอความเร็วสูง โดยการศึกษา นี้ตั้งความเร็วและรายละเอียดของการถ่ายภาพเป็น 30,000 fps ที่ความละเอียด 1,024x240 พิกเซล และ ความเร็วชัตเตอร์ (Shutter speed) 1/1,000,000 วินาที จัดวางไว้ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 8 ลำพุ่งของน้ำจากกล้องวิดีโอความเร็วสูง





หลักการทำงานของระบบ Optical ด้วยเทคนิค ชาโดว์กราฟ จะเริ่มจากแสงจากแหล่งกำเนิดแสง ผ่าน เลนส์นูนสองด้าน (Convex lens) เพื่อรวมแสง แสงผ่านรู เข็ม (Pin-hole หรือ Slit) ที่ตำแหน่งรวมแสง (Focus) แล้ว กระจายลงบนกระจกผิวโค้ง แสงที่สะท้อนจากกระจกผิว โค้งจะส่องขนานผ่านห้องทดสอบ (บริเวณส่วนที่ต้องการ ศึกษา) ตกกระทบบนกระจกผิวโค้งที่วางขนานกันอีกด้าน ของห้องทดสอบ แสงที่สะท้อนจากกระจกผิวโค้งบานที่สอง จะรวมกันที่จุดรวมแสง และตกลงบนรูรับแสงของ HSVC เมื่อเกิดการหักเหของแสงที่เกิดจากความแตกต่างหรือ เปลี่ยนแปลงความหนาแน่น บริเวณห้องทดสอบ ภาพจะ ถูกบันทึกด้วย HSVC

2.4 หัวฉีด

จากผลการวิจัยที่ผ่านมา [12], [13], [14], [15], [17] รูปร่างของหัวฉีดมีผลต่อคุณลักษณะของลำพุ่ง ความเร็วสูง โดยเฉพาะความเร็วของลำพุ่ง ในการศึกษานี้ ได้เลือกหัวฉีดที่สามารถสร้างลำพุ่งให้ได้ความเร็วสูงสุด [12], [14], [16] คือหัวฉีดรูปทรงกรวย มีภายใน 60 องศา ขนาด



รูฉีด 0.7 มิลลิเมตร อัตราส่วน I/d เป็น 4.2 ปริมาตรความจุ 1.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังภาพที่ 10

ภาพที่ 10 รูปร่างของหัวฉีด

2.5 วิธีการทดลอง

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณลักษณะ ของลำพุ่งน้ำมันดีเซลความเร็วสูง ที่สูงกว่าความเร็วของ เชื้อ เพลิงที่ฉีดในระบบฉีดเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ ภายใต้ การเปลี่ยนของอุณหภูมิในห้องทดสอบ แล้ววิเคราะห์ผล จากภาพถ่าย โดยการทดลองเริ่มจากควบคุมอุณหภูมิใน ห้องทดสอบให้ได้ตามเป้ามาย แล้วจึงจุดชนวนดินขับให้ ลูกปืนวิ่งไปกระแทกน้ำมันดีเซลที่บรรจุในหัวฉีด น้ำมันจะ ฉีดเข้าไปภายในห้องทดสอบที่ถูกควบคุมอุณหภูมิโดยมีหัว ้วัดอุณหภูมิทำหน้าที่ส่งสัญญาณให้ตัวควบคุมอุณหภูมิของ ้ตัวทำความร้อน เพื่อควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบจาก 30°C เป็น 100°C, 130°C และ 150°C ในส่วนของระบบ Optical ทั้งแหล่งกำเนิดแสงและกล้องวิดีโอจะทำงานก่อน ที่จะจุดชนวนดินขับ โดยเปิดแหล่งกำเนิดแสงจนแสงสว่าง ถึงจุดสูงสุด (ประมาณ 3 ms) แสงส่องผ่านห้องทดสอบ บริเวณที่ต้องการ เข้ากล้องวิดีโอความเร็วสูง เริ่ม บันทึกภาพ จากนั้นจึงจุดชนวนดินขับ สิ้นเสียงระเบิดดิน ขับจึงหยุดการบันทึกภาพ

ผลการทดลองและอภิปรายผล 3.1 ความเร็วของลูกปีน

ความเร็วของลูกปืนเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลโดยตรง กับความเร็วของลำพุ่ง การทดลองจะทำการเปลี่ยนแปลง ปริมาณของดินขับในตั้งแต่ 3 กรัม ถึง 7.5 กรัม (ปริมาณ สูงสุดที่บรรจุได้ปลอกบรรจุ) และทำการวัดความเร็วของ ลูกปืน

การวัดความเร็วโดยวิธี Time of Flight จะเป็น ความเร็วเฉลี่ยของลูกปืน ที่ตำแหน่งเลเซอร์ทั้งสองเท่านั้น ไม่สามารถบอกการเปลี่ยนแปลงความเร็วของลูกปืนตลอด การเคลื่อนที่ได้ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าความเร็วต่ำสุด ประมาณ 900 m/s ที่ปริมาณดินขับ 3 กรัม ซึ่งเป็นปริมาณ ดินขับต่ำสุดที่สามารถขับลูกปืนได้ ความเร็วของลูกปืนจะ เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณดินขับ จนความเร็วสูงสุดประมาณ 1,300 m/s จากดินปืน 7 กรัม เมื่อเพิ่มปริมาณดินขับจน เต็มปลอกบรรจุ ความเร็วของลูกปืนจะลดลง สาเหตุ เนื่องจากพื้นที่ภายในปลอกบรรจุเหลือน้อย เมื่อเกิดการ เผาไหม้ของดินขับ การขยายตัวของแก็สภายในจึงขับดัน ให้ลูกปืนถูกขับออกมาได้ แต่ดินขับยังเผาไหม้ไม่หมด ดังนั้น ความเร็วของลูกปืนจึงไม่สูงขึ้น ซึ่งผลจากการ ทดลองแสดงในภาพที่ 11



ี่ ภาพที่ 11 ความเร็วของลูกปืนด้วยวิธี Time of flight

ส่วนการวัดความเร็วของลูกปืนจากภาพถ่าย ด้วย เทคนิคซาโดว์กราฟ กับ HSVC นั้น สามารถวัดความเร็ว ได้ตลอดช่วงเวลาที่วัตถุเคลื่อนที่ โดยความเร็วของลูกปืน หาได้จาก ระยะทางที่วัตถุเคลื่อนที่ต่อเวลาที่กล้องถ่ายใน แต่ละเฟรม ซึ่งการศึกษานี้ตั้งไว้ที่ 30,000 fps หรือ 33 μs ต่อ 1 ภาพ ดังแสดงตัวอย่างของภาพที่ถ่ายในภาพที่ 12

ภาพที่ 12(a) เป็นภาพที่ถ่ายด้วย HSVC แสดง ลูกปืนที่ถูกขับด้วยดินขับ 3 กรัม ระยะที่เคลื่อนที่วัดได้ห่าง จากท่อปลายส่ง 23.67 มิลลิเมตร ในเวลา 33 μs ดังนั้น ความเร็วเฉลี่ยหาได้จากระยะทางต่อเวลาจะมีค่าประมาณ 700 m/s ในภาพที่ 12(b) เป็นภาพที่บันทึกได้ในเฟรม ต่อมา ที่เวลา 66 μs (จาก Frame speed: 30,000 fps) ระยะเคลื่อนที่ 49.4 มิลลิเมตร ความเร็วประมาณ 740 m/s นอกจากความเร็วที่หาได้ตลอดการเคลื่อนที่ของลูกปืนแล้ว ยังเห็นพฤติกรรมการเคลื่อนที่ และ Shock wave ที่เกิดขึ้น อีกด้วย



ภาพที่ 12 High speed projectile (Mach ~2)

การทดลองในเบื้องต้น จะทดลองที่ดินขับ 3, 5 และ 7 กรัม เพื่อหาความเร็วของลูกปืนที่จะใช้สำหรับกำเนิดลำ พุ่ง ต่อไป ผลที่ได้นำมาแสดงเป็นกราฟในภาพที่ 13 ซึ่งจะ เห็นว่าความเร็วของลูกปืนค่อนข้างจะคงที่ ความเร็วจะ เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณดินขับเพิ่มขึ้น และระยะทางที่เคลื่อนที่ เพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้น



ภาพที่ 13 ความเร็วเฉลี่ยและระยะการเคลื่อนที่ของลูกปืน

จากผลทั้งความเร็วและระยะทางที่เคลื่อนที่ของ ลูกปืนเมื่อเทียบกับเวลา จะสังเกตเห็นว่าความยาวของเส้น ข้อมูลจะไม่เท่ากัน ที่ปริมาณดินขับ 7 กรัม จะสั้นสุด (จำนวนข้อมูลน้อย) และ 3 กรัม ยาวสุด (จำนวนข้อมูล มากกว่า) สาเหตุเนื่องจากข้อจำกัดของระยะการเก็บภาพ จำกัดที่ประมาณ 220 มิลลิเมตร ดังนั้นลูกปืนที่มีความเร็ว สูงกว่าจะเก็บภาพได้ข้อมูลน้อยค่ากว่า เช่น ที่ดินขับ 7 กรัม ได้ข้อมูล 5 ตำแหน่ง ข้อมูลตำแหน่งที่ 5 เวลา 166.65 µร ความเร็วลูกปืนประมาณ 1,100 m/s วัดระยะที่ ลูกปืนเคลื่อนที่ได้จากปลายท่อส่งประมาณ 190 มิลลิเมตร เมื่อถึงภาพต่อไป (ตำแหน่งที่ 6) ไม่สามารถวัดได้เนื่อง จากลูกปืนเคลื่อนที่เกินระยะที่จับภาพได้ (~220 มิลลิเมตร) การศึกษานี้จะสร้างลำพุ่งน้ำมันดีเซล โดยใช้ปริมาณ ดินขับ 3 กรัมเท่านั้น เนื่องจากต้องการกำเนิดลำพุ่งน้ำมัน ดีเซลให้มีความเร็วสูงกว่าความเร็วของน้ำมัน ที่ฉีดให้กับ เครื่องยนต์ดีเซลได้ในปัจจุบันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และ จากผลการทดลองในเบื้องดัน การใช้ดินขับในปริมาณมาก จะเกิดความเสียหายกับหัวฉีด ดังแสดงในภาพที่ 14 ดังนั้น การศึกษาและทำการทดลองจึงใช้ดินขับเพียง 3 กรัม



ภาพที่ 14 ความเสียหายของหัวฉีด

3.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อลำพุ่งน้ำมันดีเซล

วัตถุประสงค์ของการทดลอง เพื่อศึกษา คุณลักษณะของลำพุ่งน้ำมันดีเซลความเร็วสูงที่ฉีดเข้าไป ในห้องที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 30°C 100°C 130°C และ 150°C การกำเนิดลำพุ่งจากการกระแทกของลูกปืน ที่ขับด้วยดินขับปริมาณ 3 กรัม

3.2.1 ผลจากภาพถ่ายของลำพุ่งที่อุณหภูมิห้อง ทดสอบ 30⁰C

ภาพที่ 15 เป็นภาพที่ถ่ายจากเทคนิคชาโดว์ กราฟ กับ HSVC แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลง พฤติกรรมของลำพุ่งของน้ำมันดีเซลปริมาณ 1.5 ลบ.ซม. ที่ฉีดออกจากหัวฉีดทรงกรวย ขนาดรูฉีด 0.7 มิลลิเมตร เข้าไปในห้องทดสอบที่อุณหภูมิ 30°C (ค่าความหนาแน่น ของอากาศ 1.168 kg/m³) ทุกๆ 33 µs (30,000 fps)

ในภาพที่15 (b) ลำพุ่งน้ำมันดีเซลมีความเร็วสูง ประมาณ 1,400 m/s (M~4 ที่ 30^oC) เป็นความเร็วที่สูงใน ระดับ Supersonic จากภาพเห็นลำพุ่ง และ Shock wave อย่างชัดเจน สำหรับลักษณะรูปร่างของลำพุ่งพบว่าส่วนหัว ของลำพุ่งน้ำมันดีเซล (Diesel jet tip) มีขนาดโตกว่าส่วน หาง สาเหตุเกิดจากแรงต้านการเคลื่อนที่ของอากาศ (Drag force) สำหรับกรณีนี้ ความเร็วของลำพุ่งเป็นตัวแปรที่ สำคัญที่ทำให้เกิดแรงต้าน ดังสมการที่ 2 แรงต้านจะ เพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วของลำพุ่งเพิ่มขึ้น แรงต้านจะทำให้ ส่วนหัวของลำพุ่งแตกออกจากแกนลำพุ่ง (Jet core) ทำให้ ส่วนหัวของลำพุ่งโตกว่าส่วนหาง และยังทำให้ลำพุ่งแตก ตัว

$$F_D = \frac{1}{2} \rho V^2 c_d A \tag{2}$$

- เมื่อ *F_D* คือ แรงต้าน, Nm
 - ho คือ ความหนาแน่นของของไหล, kg/m 3
 - V คือ ความเร็วของวัตถุ, m/s²
 - C_d คือ สัมประสิทธิ์แรงต้าน
- และ A คือ พื้นที่หน้าตัด, m²



ภาพที่ 15 ลำพุ่งน้ำมันดีเชลความเร็วสูงในห้องทดสอบ อุณหภูมิ 30[°]C

ในช่วงเวลาเริ่มด้นของการเกิดขึ้นของลำพุ่ง ถึง 66 µs จะเห็นละอองน้ำมันเกิดขึ้นตลอดลำพุ่งตั้งแต่ส่วนหัวจนถึง ส่วนหางอย่างชัดเจน ซึ่งสาเหตุนอกจากคุณสมบัติทาง กายภาพของน้ำมันแล้ว ขบวนการในการแตกตัวของ น้ำมันจะขึ้นอยู่กับความเร็วของน้ำมันภายในคอคอดของ หัวฉีด หรือรูฉีด (Nozzle hole) โดยความเร็วสูงนี้ทำให้ เกิด Cavitation ซึ่งช่วยให้น้ำมันแตกตัวได้ดีและทำให้ น้ำมันแตกตัวอย่างรวดเร็วเมื่อน้ำมันถูกฉีดออกมาจาก หัวฉีด แต่เมื่อเวลาผ่านไปละอองน้ำมันที่เห็นเกิดขึ้น โดยรอบลำพุ่งจะลดลงแต่ยังคงเกิดขึ้นบริเวณส่วนหางของ ลำพุ่ง สาเหตุเนื่องจากเริ่มต้นการฉีด ปริมาณของน้ำมันที่ ถูกขับยังมีปริมาณน้อย ความดันฉีดสูง ความเร็วสูง การ แตกตัวหรือกระจายเป็นไปได้ง่าย เช่นเดียวกับช่วงท้าย ของการฉีด ดังภาพ 15 (g) จะเห็นได้ชัดว่าเกิดการแตกตัว ของน้ำมันเฉพาะส่วนหางของลำพุ่งที่ปริมาณของน้ำมัน น้อยกว่าส่วนหัว นอกจากนี้ ความดันที่ปลายหัวฉีด รอบ แกนลำพุ่งจะต่ำกว่าทำให้การแตกตัวของน้ำมันที่ส่วนหาง เป็นไปได้ง่ายกว่าส่วนหัวที่

ภายในแกนลำพุ่ง (Jet core) มีลักษณะเป็นจังหวะ (Pulse jet) ซึ่งสังเกตได้จากการเกิด Shock wave มากกว่าหนึ่ง และการเปลี่ยนแปลงมุมของ Shock wave ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงความเร็วของลำพุ่ง

3.2.2 ผลจากภาพถ่ายของลำพุ่งที่อุณหภูมิห้อง ทดสอบ 130⁰C

ภาพที่ 16 ลำพุ่งน้ำมันดีเซลถูกฉีดเข้าห้อง ทดสอบที่มีอุณหภูมิ 130°C (ค่าความหนาแน่นของอากาศ 0.876 kg/m³) ลำพุ่งน้ำมันดีเซลมีความเร็วเริ่มต้นประมาณ 800 m/s (M~1.9 ที่ 130°C ความเร็วเสียง 402 m/s) ลำ พุ่งที่เกิดขึ้นมีลักษณะรูปทรงทีเรียวแหลมกว่าลำพุ่งที่เกิด ขึ้นกับกรณีที่ลำพุ่งถูกฉีดเข้าไปในห้องทดสอบที่อุณหภูมิ 30°C ความหนาแน่นของอากาศที่ต่ำ ทำให้แรงต้านการ เคลื่อนที่ของลำพุ่งจากอากาศต่ำ ลำพุ่งจึงมีลักษณะเรียว แหลมดังภาพ นอกจากนี้การแตกตัวของน้ำมันรอบ ๆ แกน ลำพุ่งจึงเห็นไม่ชัดเจน เนื่องจากเม็ดน้ำที่แตกตัวเป็น ละอองเกิดการระเหยตัว นอกจากนี้ ในช่วงเริ่มต้น ส่วนหัว ของลำพุ่งมีลักษณะที่โตกว่าส่วนหางเนื่องจาก ความดัน ภายในและแรงต้านการเคลื่อนที่ของลำพุ่งที่สูง ค่าความ หนาแน่นของลำพุ่ง (ρ) และความเร็วที่สูง ดังสมการที่ 2 ทำให้แรงต้านส่วนหัวของลำพุ่งสูง



ภาพที่ 16 ลำพุ่งน้ำมันดีเซลความเร็วสูงในห้องทดสอบ อุณหภูมิ 130[°]C

3.2.3 ผลจากภาพถ่ายของลำพุ่งที่อุณหภูมิห้อง ทดสอบ 150⁰C

ในภาพที่ 17 ลำพุ่งน้ำมันดีเซลถูกฉีดเข้าห้อง ทดสอบที่มีอุณหภูมิสูงถึง 150°C (ค่าความหนาแน่นของ อากาศ 0.835 kg/m³) ลำพุ่งน้ำมันดีเซลมีความเร็วเริ่มต้น ประมาณ 600 m/s และความเร็วสูงสุดประมาณ 1,200 m/s (M~2.3 ที่ 150°C ความเร็วเสียง 528 m/s) จากภาพ เห็นลำพุ่ง และ Shock wave อย่างชัดเจน แต่ความคมชัด ของลำพุ่ง และ Shock wave น้อยกว่าในกรณีอุณหภูมิต่ำ ลำพุ่งมีรูปร่างที่เรียวบาง สาเหตุเนื่องจากค่าความ หนาแน่นของอากาศที่ลดลง ทำให้แรงต้านอากาศต่ำลง ดัง สมการที่ 2 เห็นว่าค่าความหนาแน่นอากาศในห้องทดสอบ มีผลต่อแรงต้านการเคลื่อนที่

นอกจากนี้สิ่งที่เห็นได้ชัดเจนคือ การแตกตัวของ เชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นรอบลำพุ่ง เนื่องจากความหนาแน่นของ อากาศรอบลำพุ่งต่ำ อุณหภูมิรอบลำพุ่งสูง นอกจากนี้ ยิ่ง ลำพุ่งมีรูปทรงเรียวบาง แรงต้านการเคลื่อนที่จากอากาศ ด้านหน้าจะต่ำ แต่แรงเสียดทานที่ผิว (Skin friction) มีมาก จึงช่วยให้เกิดการระเหยของละอองน้ำมันขึ้นตลอดแกนลำ พุ่ง ในส่วนของ Shock wave ที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ลำพุ่งจะเป็น Attach shock (ลำพุ่งเคลื่อนที่ติดกับ Shock wave) ซึ่ง แสดงว่าลำพุ่งมีความเร็วใกล้เคียงกับ Shock wave) ซึ่ง แสดงว่าลำพุ่งมีความเร็วใกล้เคียงกับ Shock wave) ซึ่ง แสดงว่าลำพุ่งมีความเร็วใกล้เคียงกับ Shock wave) ซึ่ง แสดงว่าลำพุ่งมีความเร็วใกล้เคียงกับ Shock wave เช่นเดียวกันกับที่อุณหภูมิต่ำ นั้นหมายถึงความเร็วของลำ พุ่งค่อนข้างจะคงที่ นอกจากนี้แล้ว จากภาพจะเห็นว่ามุม ของ shock wave กรณีอุณหภูมิสูงมีค่าน้อยกว่ากรณี อุณหภูมิต่ำ ซึ่งสาเหตุเกิดจากรูปร่างและคุณลักษณะของ ลำพุ่งเอง



ภาพที่ 17 ลำพุ่งน้ำมันดีเซลความเร็วสูงในห้องทดสอบ อุณหภูมิ 150°C

3.2.4 เปรียบเทียบผลของอุณหภูมิห้องทดสอบที่ มีต่อคุณลักษณะของลำพุ่งดีเซลความเร็วสูง จากการทดลองการฉีดน้ำมันดีเซลความเร็วสูง เข้าไปในห้องทดสอบที่ถูกควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 30°C 100°C 130°C และ 150°C

จากภาพที่ 18 ความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่งดีเซล ได้จาก ระยะที่ลำพุ่งเคลื่อนที่จากหัวฉีด ต่อเวลาที่ลำพุ่งเคลื่อนที่ ภายในห้องทดสอบที่อุณหภูมิแตกต่างกันดังที่กล่าวไว้ใน ข้างต้น พบว่าอุณหภูมิภายในห้องทดสอบมีผลต่อความเร็ว ของลำพุ่ง คือที่อุณหภูมิต่ำสุด (30°C) ได้ความเร็วเริ่มตัน ของลำพุ่งสูงที่สุดประมาณ 1,400 m/s หลังจากนั้นความเร็ว จะลดลง ความเร็วปลายจะต่ำกว่าความเร็วปลายของลำพุ่ง ที่ฉีดเข้าไปในห้องทดสอบที่มีอุณหภูมิห้องทดสอบสูง เช่น กรณีที่อุณหภูมิสูงสุด (150°C) ความเร็วเริ่มตันมีค่าต่ำ ีที่สุดเมื่อเทียบกับทุกกรณี (~600 m/s) แล้วความเร็วจะ เพิ่มขึ้นจนสูงสุด (1,150 m/s ที่ 99 μs) และลดลงอย่าง ต่อเนื่อง ยิ่งอุณหภูมิห้องทดสอบยิ่งสูงขึ้นความเร็วปลาย ของลำพุ่งก็จะยิ่งสูงกว่ากรณีที่อุณหภูมิต่ำ สาเหตุตามที่ได้ กล่าวไปข้างต้น คือ ที่อุณหภูมิต่ำความหนาแน่นของ อากาศจะสูงกว่าความหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิสูง ทำให้แรงต้านของอากาศสูงความเร็วของลำพุ่งจะลดลง ในทางกลับกัน เมื่ออุณหภูมิห้องทดสอบสูงขึ้นแรงต้าน อากาศต่ำ แต่ลำพุ่งของน้ำมันระเหยตัวได้ง่ายทำให้ ความเร็วเริ่มของลำพุ่งที่วัดได้ต่ำและสูงขึ้นเนื่องจากแรง ้ต้านอากาศต่ำ ส่วนระยะการเคลื่อนที่ อิทธิพลของอุณหภูมิ ้มีผลต่อระยะการเคลื่อนที่ของลำพุ่งน้อยมาก ดังแสดงใน ภาพที่ 18



ภาพที่ 18 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความเร็วและระยะการ เคลื่อนที่ของลำพุ่งน้ำมันดีเซล

3.2.5 ความเร็วของหัวลำพุ่งและระยะการ เคลื่อนที่ของหัวลำพุ่ง

ภาพที่ 19 เป็นผลของความเร็วของส่วนหัวของ ลำพุ่ง (Jet tip velocity) ได้จากความแตกต่างของระยะการ เคลื่อนของลำพุ่ง (Jet tip penetration) ในแต่ละเฟรมต่อ เวลาที่ลำพุ่งเคลื่อนที่ในแต่ละเฟรม ซึ่งในกรณีนี้มีค่าเท่ากับ 33 μs

จากการทดลองพบว่าความเร็วของหัวลำพุ่งเริ่มต้น จะสูงสุดที่อุณหภูมิ 30°C และจะลดลงเมื่ออุณหภูมิห้อง ทดสอบเพิ่มขึ้น และความเร็วเริ่มต้นของหัวลำพุ่งต่ำสุดที่ ห้องทดสอบมีอุณหภูมิ 150°C

ความเร็วของหัวลำพุ่งจะลดลงที่อุณหภูมิห้องทดสอบ ด่ำ นั้นแสดงถึงผลของความหนาแน่นของอากาศภายใน ห้องทดสอบที่มีต่อลำพุ่ง เช่นกรณีของลำพุ่งที่ฉีดในห้อง ทดสอบอุณหภูมิ 30°C ความเร็วของลำพุ่งที่ฉีดในห้อง อื่นๆ แล้วค่อยๆลดลง จนมีความเร็วด่ำสุด และความเร็ว ของหัวลำพุ่งจะสูงขึ้นจากเริ่มต้นเมื่ออุณหภูมิห้องทดสอบ สูงขึ้น เช่นกรณีของลำพุ่งที่ฉีดในห้องทดสอบอุณหภูมิ 150°C ความเร็วหัวลำพุ่งต่ำสุดที่เวลาเริ่มต้นแล้วความเร็ว จะเพิ่มขึ้นจนความเร็วสูงสุดกว่าทุกกรณีในช่วงท้าย นอกจากนี้ยังพบว่าการเปลี่ยนแปลงของระยะการเคลื่อนที่ ของหัวลำพุ่งที่อุณหภูมิห้องทดสอบต่ำจะลดลงอย่าง สม่ำเสมอ ส่วนการเปลี่ยนแปลงระยะการเคลื่อนที่ของลำ พุ่งในช่วงเริ่มต้นในกรณีที่ห้องทดสอบมีอุณหภูมิสูงจะ เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น และจะค่อยๆ ลดลง



ภาพที่ 19 ความเร็วและระยะการเคลื่อนที่ของหัวลำพุ่ง น้ำมันดีเซล

4. วิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ความเร็วของลูกปีน

จากผลการทดลอง ความเร็วของลูกปืนเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณดินขับ เนื่องจากพื้นที่ภายในของปลอก บรรจุดินปืนลดลง ความดันที่เกิดจากปริมาณดินขับเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ความเร็วของลูกปืนจะเพิ่มขึ้นและลดลง เนื่องจากเมื่อลูกปืนหลุดจากท่อส่งแรงต้านที่เกิดจาก อากาศด้านหน้าลูกปืนและแรงเสียดทานที่ผิวของลูกปืนกับ ท่อส่งลดลงความเร็วจึงเพิ่มขึ้น แต่ด้วยแรงขับดันด้านหลัง ของลูกปืนที่เกิดจากดินขับหายไป และแรงต้านทานการ เคลื่อนที่ที่เกิดจากอากาศความเร็วของลูกปืนจึงลดลง

4.2 ผลของอุณหภูมิต่อลำพุ่งน้ำมันดีเซล

ความเร็วสูง

กล้องวิดีโอความเร็วสูงร่วมกับเทคนิคซาโดร์ กราฟสามารถบันทึกภาพพฤติกรรมและลักษณะของลำพุ่ง ความเร็วสูงและคลื่นนกระแทกได้อย่างชัดเจน จากผลของ ภาพพบว่าการแตกตัวของเม็ดน้ำมันเกิดขึ้นรอบๆ ลำพุ่ง ความเร็วสูงอย่างชัดเจน แต่แรงตัานของอากาศมีผลต่อ รูปร่างของลำพุ่ง โดยเฉพาะส่วนหัว เมื่ออุณหภูมิของห้อง ทดสอบสูงขึ้น ผลของอุณหภูมิทำให้ความหนาแน่นของ อากาศในห้องทดสอบเปลี่ยนแปลง คือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความหนาแน่นของอากาศจะลดลง และแรงต้านการ เคลื่อนที่จากอากาศลดลงด้วย ทำให้ความเร็วของลำพุ่ง สูงขึ้น นอกจากนี้อุณหภูมิยังทำให้น้ำมันเกิดการระเหยตัว กลายเป็นไอ

5. สรุป

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาคุณลักษณะของลำพุ่งน้ำมัน ดีเซลความเร็วสูงที่กำเนิดจากการกระแทกของลูกปืนเข้า ไปในห้องทดสอบที่ถูกเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ 30°C 100°C, 130°C และ 150°C ผลการทดลองได้จากการ ถ่ายภาพด้วยกล้องถ่ายภาพวิดีโอความเร็วสูงร่วมกับ เทคนิคชาโดว์กราฟ ซึ่งพบว่าอุณหภูมิของห้องทดสอบมี อิทธิพลต่อความเร็วของลำพุ่ง รูปร่างของลำพุ่ง และการ แตกตัวของเม็ดน้ำมัน คือ ที่อุณหภูมิห้องทดสอบต่ำ ความเร็วต้นของลำพุ่งจะสูง และความเร็วจะลดลง เนื่องจากผลของแรงต้านการเคลื่อนที่จากอากาศ สาเหต จากแรงต้านของอากาศ ซึ่งตรงกันข้ามกับกรณีที่ห้อง ทดสอบมีอุณหภูมิสูง แต่อุณหภูมิของห้องทดสอบมีผลต่อ ระยะการเคลื่อนที่ของลำพุ่งไม่มากนัก นอกจากนี้ที่ อุณหภูมิสูง และความเร็วของลำพุ่งที่สูงขึ้น ช่วยให้เกิดการ แตกตัวของน้ำมันได้ดี จนเกิดการระเหยตัวขึ้นได้อย่าง ชัดเจน

6. บรรณานุกรม

- [1] Celikten. 2003. "An experimental investigation of the effect of the injection pressure on engine performance and exhaust emission in indirect injection diesel engines". Applied Thermal Engineering. 23, 2051-2060.
- [2] Rosli, Semin and Abdul Rahim, I. 2008. "Fuel Injection pressure effect on performance of diesel injection: diesel engines based on experiment". Amrican Journal of Applied Sciences. 5, 197-202.
- [3] Nakahira, Komori, Nishida, and Tsujimura. 1992.
 "The Shock Wave Generation Around the Diesel Fuel Spray with High Pressure Injection". SAE. 101 (3), 741-746.
- [4] Shi, Takayama. 1999. "Generation of hypersonic liquid fuel jets accompanying selfcombustion". Shock Waves. 9, 327-332.
- [5] Crua. 2002. Combustion Processes in a Diesel Engine. PhD Dissertation, School of Engineering, Uiversity of Brighton.
- [6] Suh, Lee. 2008. "Experiment and numerical ananlysis of diesel fuel atomization characteristics of a piezo injection system".
 Oil & Gas Science and Technology. 63(2): 239-250.
- [7] Desantes, Payri, Salvador, and Gil. 2005.
 "Development and validation of a theoretical model for diesel spray penetration". Fuel. 85: 910-917.
- [8] Pianthong, Takayama, Milton, and Behnia. 2008. "Dynamic characteristics of pulsed supersonic fuel sprays". Shock Waves. 8 (1), 100-110.
- [9] Pianthong, Takayama, Milton, and Behnia. 2005. "Multiple pulsed hypersonic liquid diesel fuel jets driven by projectile impact". Shock Waves. 4 (1-2), 73-82.

- [10] Wu, Reitz, and Bracco. 1986. "Measurements of drop size at the spray edge near the nozzle in atomizing liquid jets". Phys. Fluids. 29 (4), 941-951.
- [11] Nakahira, Komori, Nishida, and Tujimura. 1991.
 A study of shock wave generation around high pressur fuel spray in a diesel engine.
 In Proceeding of the 18th International Symposium on Shock wave, 21-26 July. Sendai, Japan.
- [12] Pianthong. 2002. Supersonic Liquid Diesel Fuel Jets. PhD Dissertation, School of Engineering, The University of New South Wales.
- [13] Shi, Takayama, and Onodera. 1994. "Supersonic diesel fuel injection through a single-hole nozzle in a compact gas gun (Part II)".

Japan society mechanical engineering. 37: 509-516.

- [14] Pianthong, Zakrzewski, Milton, and Behnia. 2001. "Supersonic liquid jets: Their generation and shock wave characteristics". Shock Waves. 11, 457-466.
- [15] Matthujak, Hosseini, Takayama, Sun, and Voinovich. 2007. "High speed jet formation by impact acceleration method". Shock Waves. 16, 405-419.
- [16] Sittiwong, Seehanam, Pianthong, and Matthujak.
 2009. Effect of stand-off distance on impact pressure of high speed water jets.
 In Proceedings of the 10th Asian International Conference on Fluid Machinery, 21-23 October. Kuala Lumpur, Malaysia.