

## ผลของขนาดรูหัวฉีดต่อพฤติกรรมของลำพ่นน้ำความเร็วสูง คลื่นกระแทก และคลื่นกล

### Effect of Nozzle Orifice Diameter on High Speed Water-Jet Shock Wave and Mechanical Wave Behaviors

วุฒิชัย สิทธิวงษ์<sup>\*1</sup> วิระพันธ์ สีหานาม<sup>2</sup> กุลเชษฐ์ เพียรทอง<sup>2</sup>

<sup>1</sup> คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์

อ.เมือง จ.สุรินทร์ 32000

<sup>2</sup> คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

Wuttichai Sittiwong<sup>\*1</sup> Wirapan Seehanam<sup>2</sup>, Kulachate Pianthong<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Agriculture and Technology, Rajamangala University of Technology Isan,

Surin campus Muang, Surin 32000

<sup>2</sup> Faculty of Engineering, Ubonratchathani University, Warinchamrap, Ubonratchathani 34190

Tel : 0-4415-3093 E-mail: Sittiwong@gmail.com

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของลำพ่นน้ำความเร็วสูง (high speed water jets) พฤติกรรมของคลื่นกระแทก (shock wave) ที่พ่นชนผิววัสดุ และพฤติกรรมของคลื่นกล (mechanical wave) ความสัมพันธ์ของคลื่นกระแทกในอากาศกับคลื่นกลในแผ่น polymethyl methacrylate (PMMA) นอกจากนี้ อิทธิพลของขนาดรูหัวฉีดที่มีต่อพฤติกรรมของลำพ่นน้ำความเร็วสูง คลื่นกระแทกและคลื่นกล การทดลองกำเนิดลำพ่นน้ำความเร็วสูงใช้วิธีการถ่ายเทโมเมนตัมของลูกกระสุนปืน (Projectile Impact Driven, PID) และขนาดรูหัวฉีด (orifice) 0.7 mm 0.8 mm และ 0.9 mm ลำพ่นน้ำที่ฉีดจะชนแผ่น PMMA สีใส พฤติกรรมของลำพ่นน้ำ คลื่นกระแทกและคลื่นกลที่เกิดขึ้นจะถูกบันทึกด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง (High Speed Video Camera, HSVC) ร่วมกับเทคนิคชาร์โดว์กราฟ (shadowgraph technique) จากผลการทดลองพบว่า ความเร็วสูงสุดของลำพ่นประมาณ 950 m/s และความเร็วของคลื่นกระแทกประมาณ 970 m/s ความเร็วของคลื่นสะท้อนสูงสุดประมาณ 300 m/s เกิดจากหัวฉีด 0.7 mm ความเร็วของคลื่นกลสูงสุดประมาณ 240 m/s ได้จากหัวฉีดขนาด 0.9 mm ความเร็วของลำพ่น

ลดลงเมื่อชนวัตถุแต่ความเร็วของคลื่นกระแทกเพิ่มขึ้น และขนาดของหัวฉีดมีผลต่อความเร็วของคลื่นกล นอกจากนี้คลื่นกลยังเกิดจากการชนของคลื่นกระแทกด้วย

คำหลัก ลำพ่นน้ำความเร็วสูง คลื่นกระแทก คลื่นกล เทคนิคชาร์โดว์กราฟ กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง

#### Abstract

This research aims to study the behavior of high speed water jet, shock wave upon impact on a solid surface and mechanical wave behavior. Also under consideration are the relationship between the shock wave in the ambient air and mechanical wave in the polymethyl methacrylate (PMMA). In addition, the effect of nozzle orifice diameter on high speed water jet, shock wave and mechanical wave behavior are also under consideration in this study. In the experiment, the high speed water jets are generated by using the projectile impact driven (PID) method and the nozzle orifice diameters are 0.7 mm 0.8 mm

and 0.9 mm. The high speed video camera and shadowgraph technique were used to capture the behaviors of high speed water jets, shock wave and mechanical wave. From experimental results, it is found that the maximum water jet velocity around 950 m/s while the shock wave velocity around 970 m/s and shock wave reflex was about 300 m/s can be obtained from the 0.7 mm nozzle orifice diameter and the maximum mechanical wave velocity around 240 m/s from the 0.9 mm orifice nozzle diameter. Once the water jet impact on object the jet velocity will decrease while the shock wave velocity increases and the nozzle orifice size has an effect on mechanical wave velocity. In addition, mechanical wave can originate from shock waves impact upon solid surface.

**Keywords:** High speed water-jet, shock wave, mechanical wave, shadowgraph technique, high speed video camera

## 1. บทนำ

การประยุกต์ใช้ประโยชน์จากของไหลความเร็วสูง เช่น การตัด-เจาะโลหะ การทำความสะอาดผิววัสดุ [1-2] การฉีดเชื้อเพลิงสำหรับการสันดาป หรือแม้กระทั่งทางการแพทย์ที่ของไหลความเร็วสูงมีส่วนเกี่ยวข้อง เช่น การฉีดยาโดยไม่เข็มหรือที่เรียกว่า needle-free jets injection [3] เหล่านี้ เป็นส่วนหนึ่งของการใช้ประโยชน์จากของไหลความเร็วสูง อย่างไรก็ตามการศึกษาความเสียหายที่เกิดจากของไหลความเร็วสูงหรือวัตถุความเร็วสูงเคลื่อนที่ผ่านของไหลก็เป็นหัวข้อที่นักวิจัยให้ความสนใจ เช่น การเสียหายของผิววัตถุความเร็วสูงประเภทอากาศยานที่บินผ่านฝน [4-5] การเสียหายของโบราณสถานที่ถูกทำลายจากการเปลี่ยนแปลงของอากาศ โดยเฉพาะการกัดกร่อนของหินทรายจากเม็ดฝน การกัดกร่อนจากการกระแทกจากหยดน้ำหรือ Liquid Droplet Impingement erosion (LDI) ในระบบท่อไอน้ำของโรงต้นกำลัง [6] เป็นต้น การศึกษาการกระแทกของหยดน้ำหรือลำพุ่งความเร็วสูงจึงเป็นประโยชน์ในทางวัสดุศาสตร์มากในกรณีของความเสียหายของวัสดุที่ผิวจากการกระแทก หรือรวมไปถึงการเสียรูปในโครงสร้างวัสดุ

แต่อย่างไรก็ตาม การศึกษาพฤติกรรมของหยดน้ำหรือลำพุ่งความเร็วสูงทำได้ยาก ทั้งการสร้างหรือกำเนิดลำพุ่งความเร็วสูง การบันทึกข้อมูลพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเนื่องจากความเร็ว การกระแทกบนผิววัสดุที่เกิดขึ้นในลักษณะเป็นจังหวะ (pulse) ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นหลังจากการกระแทกลำพุ่ง คือ ความดันสูงมากจากการกระแทกจะเกิดความเสียหายขึ้นกับวัสดุหรือโครงสร้าง ความดันที่เกิดขึ้นเป็นความดันพลวัต (dynamics pressure) ซึ่งเป็นปัญหาในการจัดหาเครื่องมือวัดความดันซึ่งส่วนใหญ่ที่วัดได้เป็นความดันสถิต (statics pressure) นอกจากนี้ dynamics pressure ยังมีความดันที่สูงมากจึงยากที่จะวัด [7] Shi และคณะ [8] ได้วัดความดันกระแทก (impact pressure) ของของเหลวความเร็ว 270 m/s ด้วย polyvinylidene fluoride (PVDF) pressure transducer ที่ระยะประมาณ 2 cm จากหัวฉีด ได้ความดันสูงสุด 275 MPa ปี 2009 Wuttichai และคณะ [7] กำเนิดลำพุ่งด้วยวิธี Projectile Impact Driven (PID) [9-10] ความเร็วลำพุ่งประมาณ 2,300 m/s จากหัวฉีดแบบทรงกรวยมุม 30° วัดความดันกระแทกของลำพุ่งด้วย PVDF film ที่ระยะ 1.5 cm 3 cm และ 4 cm จากหัวฉีด ได้ความดันกระแทกสูงสุด 3.4 GPa ที่ระยะ 3 cm ซึ่งเป็นความดันที่สูงมาก ในทางทฤษฎีการคำนวณหาค่าความดันกระแทก หรือ impact pressure ที่เป็น dynamics pressure ที่มีความดันสูงยังคงสมมุติฐานด้วยสมการค้อนน้ำ (water hammer) [4], [11-13]

ความดันค้อนน้ำ (water-hammer pressure,  $P$ ) ได้จากสมการที่ 1

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

เมื่อ  $\rho$  คือค่าความหนาแน่นของของไหล ( $\text{kg/m}^3$ )  $C$  คือความเร็วเสียง (speed of sound) ในของไหล (m/s) และ  $V$  เป็นความเร็วของของไหล (m/s) โดยกำหนดให้ลำพุ่งหรือเม็ดของเหลวมีลักษณะเป็นลำกระบอกที่มีพฤติกรรมภายในดังรูปที่ 1

จากรูปที่ 1 แสดงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นภายในลำพุ่งกรณีที่ความเร็วของลำของไหล ( $U$ ) สูงกว่าความเร็วเสียงในตัวกลาง ( $c$ ) บริเวณ 1 ไป 3 ความดัน และความหนาแน่นจะเริ่มลดลงจากด้านนอกเข้าสู่แกนลำพุ่ง (core jets) บริเวณ 2 มีสถานะเดียวกันกับบรรยากาศ การเคลื่อนที่ของลำพุ่งทำให้เกิดมุม ( $\alpha$ ) หรือ Mach angle ส่วนที่ 4 (cavity

region) และ 5 เป็นส่วนที่ลำพุงที่ไม่มีระเบียบที่ชัดเจน [13]

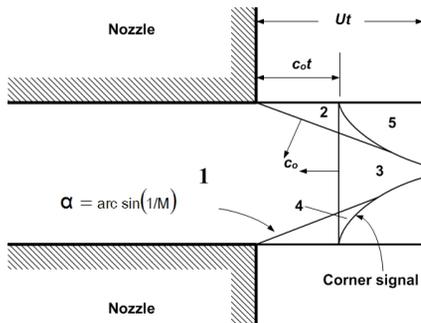
เมื่อลำพุงความดันสูง รูปที่ 2(A) พุงชนวัตถุ รูปที่ 2(B) และ รูปที่ 2(C) ส่วนหัวของลำพุงแตกออกในแนวราบ และยุบตัวลง ความเร็วแกนของลำพุงกระจายออกในแนวราบ ความเร็วต้นของลำพุงลดลง ดังรูปที่ 2 (D) และความดันที่วัตถุรับ  $P_i$  หาได้จากสมการที่ (2) คือ

$$P_i = \rho_1 c_1 v \quad (2)$$

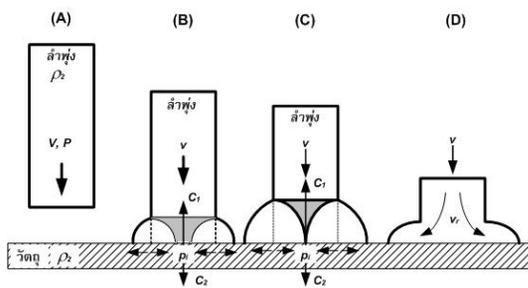
โดยที่  $c_1$  เป็นค่าความเร็วโดยประมาณของคลื่นกระแทก (approximate shock velocity) ได้จากสมการที่ (3)

$$c_1 = v_s + kv \quad (3)$$

โดยที่  $v_s$  คือ ความเร็วเสียง (acoustic velocity, m/s)  $k$  เป็นค่าคงที่  $v$  ค่าความเร็วของน้ำที่กระแทกลงบนวัตถุ ความเร็วสูงสุดที่เป็นไปได้ 1,000 m/s ค่า  $k=2$  และ  $v_s$  สำหรับน้ำมีค่า 1,480 m/s [14]



รูปที่ 1 พฤติกรรมของลำพุง [14]

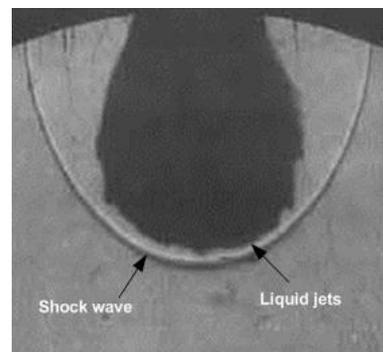


รูปที่ 2 พฤติกรรมของลำพุงเมื่อชนวัตถุ [14]

Supersonic liquid jets หรือลำพุงของเหลวเคลื่อนที่ในตัวกลางด้วยความเร็วที่สูงกว่าความเร็วเสียงในตัวกลาง จะเกิดปรากฏการณ์ด้านหน้าลำพุง ที่เรียกว่า คลื่นกระแทก (shock wave) ดังแสดงในรูปที่ 3 คลื่น

กระแทกเป็นคุณลักษณะพิเศษของตัวกลางที่เกิดขึ้นทันทีทันใด เป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้ความดัน อุณหภูมิ และความหนาแน่นของตัวกลางสูงขึ้นทันทีทันใด ลำพุงของเหลวจากรูปที่ 3 เป็นลำพุงความเร็วสูงของน้ำที่บันทึกภาพด้วย high-speed polaroid ร่วมกับเทคนิคซาร์โดว์กราฟ (Sadowgraph Technique) ความเร็วของลำพุงประมาณ 600 m/s จากหัวฉีดขนาด 5 mm ลำพุงกำเนิดด้วยวิธี PID ความเร็วของคลื่นกระแทกอยู่ที่เลขมัค (Mach Number) ประมาณ 1 ถึง 2 โดยงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาคุณลักษณะของลำพุงความเร็วสูงและคลื่นกระแทกเป็นหลัก [15] เช่นเดียวกับ Wuttichai และคณะ [9-10], [16] ศึกษาคุณลักษณะของลำพุงและคลื่นกระแทกที่ฉีดเข้าห้องทดสอบที่ทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความดัน และของเหลว จากผลการทดลองพบอุณหภูมิและความดันมีผลต่อคุณลักษณะของลำพุงและคลื่นกระแทก โดยเฉพาะการแตกตัวของลำพุงน้ำมัน

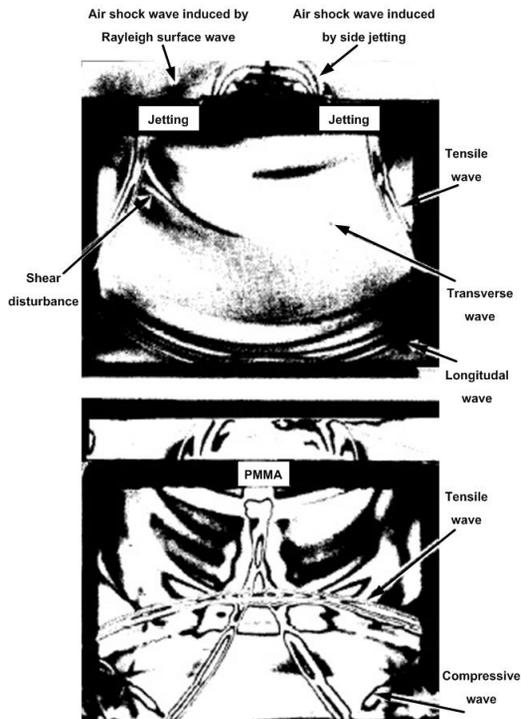
เมื่อลำพุงความเร็วสูงและคลื่นกระแทกชนผิววัสดุ วัสดุรับแรงกระทำภายใน เกิดการส่งผ่านพลังงานจากอนุภาคในตัวกลาง หรือแรงทำให้สสารสั่นตัวต่อเนื่อง เกิดการเคลื่อนที่ของคลื่นที่เรียกว่า คลื่นกล (mechanical waves) เป็นคลื่นตามขวาง (transverse waves) และคลื่นตามยาว (longitudinal waves) ภายในวัสดุ [8], [17] ดังผลการทดลอง ของ Shi และคณะ [8] ในรูปที่ 4 ภาพของลำพุงน้ำความเร็วประมาณ 300 m/s ขนาดหัวฉีด 2 mm กระแทกลงบน polymethyl methacrylate (PMMA) เกิด stress wave ใน PMMA ชัดเจน



รูปที่ 3 คลื่นกระแทกที่เกิดจากลำพุง [15]

จากงานวิจัยที่กล่าวมา เป็นการลำดับผลงานวิจัยตั้งแต่ประโยชน์ การประยุกต์ใช้ลำพุง วิธีการกำเนิดลำพุง

ความดันกระแทกของลำพุ่ง คุณลักษณะของลำพุ่งที่เกิดขึ้นและพฤติกรรมของลำพุ่งที่กระแทกผิววัสดุ คลื่นกระแทกที่เกิดจากลำพุ่งความเร็วสูงในอากาศและคลื่นกลซึ่งงานวิจัยที่กล่าวมานี้มีผู้ศึกษาน้อยมาก โดยเฉพาะในประเทศไทย อย่างไรก็ตาม ผลการวิจัยที่ผ่านมาเป็นการศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเฉพาะลำพุ่ง คลื่นกระแทก และพฤติกรรมภายในวัสดุ



รูปที่ 4 คลื่นกระแทกใน PMMA [8]

งานวิจัยจึงนี้ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมถึงพฤติกรรมของลำพุ่งความเร็วสูงพุ่งชนวัสดุผิวเรียบ พฤติกรรมของคลื่นกระแทกที่ชนวัสดุผิวเรียบ พฤติกรรมของคลื่นกลในวัสดุ ความสัมพันธ์ของคลื่นกระแทกในอากาศที่ชนวัสดุกับคลื่นกลในวัสดุ และผลของขนาดหัวฉีดที่มีต่อพฤติกรรมของคลื่นกระแทก คลื่นกล เพื่อเป็นประโยชน์ในงานวิศวกรรมต่อไป

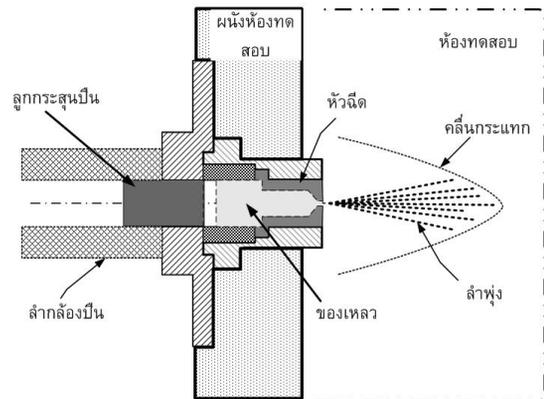
## 2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### 2.1 อุปกรณ์กำเนิดลำพุ่งและบันทึกผลการทดลอง

การทดลองนี้ทำการกำเนิดลำพุ่งด้วยวิธีการที่เรียกว่า projectile impact driven (PID) [9-10] วิธี PID

จะใช้หลักการการถ่ายเทโมเมนตัมจากลูกกระสุนที่ใช้ดินปืนจุดระเบิดภายในปลอกลูกกระสุนปืนเกิดแรงขับ เมื่อดินปืนถูกขับจากปลอกกระสุนเคลื่อนที่ตามลำกล้องหรือกระบอกปืน ที่ปลายกระบอกปืนติดตั้งหัวฉีดที่บรรจุของเหลวไว้ภายใน ลูกกระสุนปืนจะกระแทกและถ่ายเทโมเมนตัมให้ของเหลวในหัวฉีดและฉีดออกมาด้วยความเร็วสูงกว่าความเร็วของลูกกระสุนปืน ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 5

การทดลองนี้ ใช้ลูกกระสุนปืนทรงกระบอกทำจาก PMMA ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm ยาว 15 mm น้ำหนัก 0.98 g ดินปืนชนิดดินคันทันน้อย (smokeless powder) ปริมาณ 3 กรัม (ความเร็วประมาณ 700 m/s) และใช้น้ำเป็นของเหลวในการทดลอง ปริมาตรหัวฉีด 1.5 cm<sup>3</sup>



รูปที่ 5 วิธี projectile impact driven (PID) [16]

ผลการทดลองลำพุ่งความเร็วสูงพุ่งชนวัสดุผิวเรียบใช้แผ่น PMMA สีใสเป็นวัสดุผิวเรียบเพื่อให้สามารถศึกษาพฤติกรรมการเกิดคลื่นกลในวัสดุได้ แผ่น PMMA ที่ใช้มีความหนา 25 mm พฤติกรรมของลำพุ่ง พฤติกรรมของคลื่นกระแทกของลำพุ่ง และพฤติกรรมคลื่นกลในแผ่น PMMA จะถูกบันทึกด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง (high speed video camera, HSVC) ร่วมกับเทคนิคชาร์ดิวิกราฟที่จัดวางอุปกรณ์ดังรูปที่ 6 ประกอบด้วย

1. แหล่งกำเนิดแสง (light source) ชนิด high-intensity discharge xenon lamp ความส่องสว่าง 3,500 lumens แสงสีขาว 4,300 K
2. รูเข็มแบบปรับได้ (pin hole) ขนาดรู 2 mm ทำหน้าที่กรองแสง
3. กระจกเงาแผ่นเรียบ (plane mirror) จำนวน 2

บาน ทำหน้าเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ของแสง

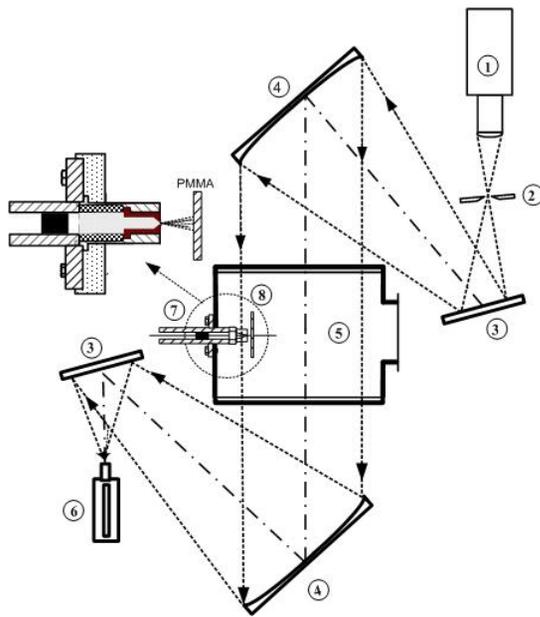
4. กระจกเงาเว้า (parabolic mirror) จำนวน 2 บาน แผ่นที่ 1 (จากแหล่งกำเนิดแสง) ทำหน้าที่เปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ของแสงจากแนวรัศมีเป็นแนวขนาน และแผ่นที่ 2 ทำหน้าที่เปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ของแสงจากแนวขนานกับมารวมแสงเข้ารูรับแสงของกล้องถ่ายภาพ

5. ห้องทดสอบ (test chamber) เป็นพื้นที่ที่ใช้สังเกตพฤติกรรมที่เกิดขึ้นกับแผ่น PMMA

6. กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง ยี่ห้อ Photron รุ่น FASTCAM SA5 การทดลองนี้ใช้ความเร็ว 30,000 f/s ความละเอียด 512x456 พิกเซล ความเร็วชัตเตอร์ 1/1,000,000 วินาที

7. ท่อส่งลูกกระสุนปืน (projectile) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 8 mm ยาว 1.5 m ทำหน้าที่เป็นท่อส่ง

8. ชูตหัวฉีดและแผ่น PMMA

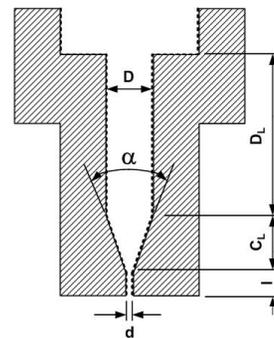


รูปที่ 6 กล้องถ่ายภาพความเร็วสูงกับชาร์โดว์กราฟเทคนิค

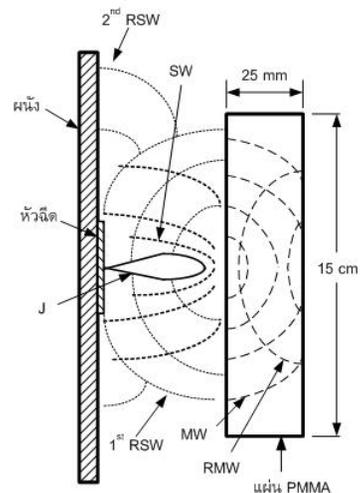
## 2.2 วิธีการทดลอง

รูปที่ 7 แสดงรูปทรงหัวฉีดที่ใช้ในการทดลอง ขนาดหัวฉีด (d) เปลี่ยนแปลง 3 ขนาด คือ 0.7 mm 0.8 mm และ 0.9 mm ความยาวคอคอด (l) 4.2 mm มุมกรวย ( $\alpha$ ) 30° ความยาวฐานมุมกรวย ( $C_L$ ) 7 mm ความยาวห้องบรรจุ ( $D_L$ ) 38 mm เส้นผ่านศูนย์กลางห้องบรรจุ (D) 8 mm ความ

จุของเหลว 1.5 cm<sup>3</sup> ของเหลวที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำที่ถูกบรรจุลงในหัวฉีดด้วยเข็มฉีดยาเพื่อให้ได้ปริมาณน้ำที่เท่ากันทุกครั้ง ก่อนการบรรจุน้ำลงในหัวฉีด หัวฉีดจะถูกปิดด้วยพลาสติกเทปด้านรูฉีด แล้วจึงบรรจุน้ำลงอีกด้าน เมื่อบรรจุน้ำแล้วจะปิดพลาสติกเทปด้านที่เหลือ พลาสติกเทปที่ใช้ปิดเป็นเทปกาวชนิดใสบางและค่าความต้านทาน (strength) ต่ำเมื่อเทียบกับแรงกระแทกจากลูกกระสุนปืน ลำพุ่งความเร็วสูงของน้ำที่กำเนิดด้วยวิธี PID หัวฉีดขนาดรูฉีด (orifice) 0.7 mm 0.8 mm และ 0.9 mm หัวฉีดวางห่างจากแผ่น PMMA ที่ใช้รับแรงกระแทก 20 mm ขนาดกว้าง 8x15 cm หนา 25 mm จัดวางไว้ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 7 หัวฉีดที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 8 การจัดวางแผ่นทดลองรับแรงกระแทก

การกำหนดสัญลักษณ์เพื่อความสะดวกต่อการอธิบายในแผ่นภาพ กราฟ และเนื้อหา ดังนี้ ลำพุ่งของน้ำ (water jet) ใช้สัญลักษณ์ J

ลำพุ่งสะท้อน ใช้สัญลักษณ์ RJ

คลื่นกระแทก (shock Wave) ใช้สัญลักษณ์ SW

คลื่นสะท้อนของ SW ใช้สัญลักษณ์ RSW

คลื่นกล (mechanical waves) ใช้สัญลักษณ์ MW

คลื่นสะท้อนของ MW ใช้สัญลักษณ์ RMW

คลื่นอัด (compressed wave) ใช้สัญลักษณ์ CW

ผลของพฤติกรรมของลำพุ่งน้ำ พฤติกรรมของคลื่นกระแทกที่เกิดขึ้น พฤติกรรมของคลื่นกระแทกที่กระแทกผิว PMMA พฤติกรรมของคลื่นกลใน PMMA ที่เกิดขึ้นจะถูกบันทึก และวิเคราะห์จากภาพถ่าย

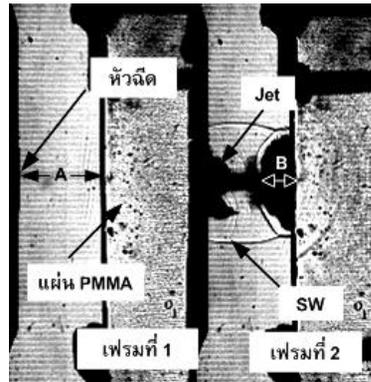
### 3. ผลการวิจัย

#### 3.1 ความเร็วเริ่มต้นของลำพุ่งน้ำและคลื่นกระแทก

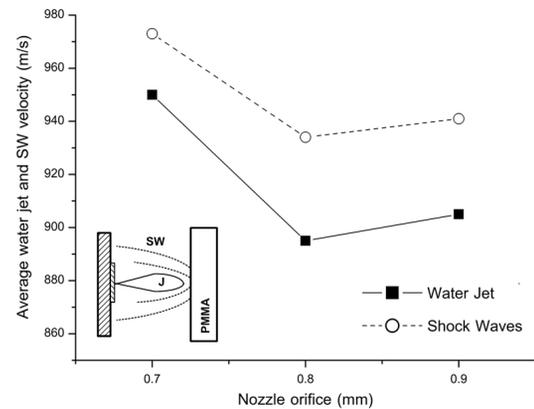
ความเร็วเริ่มต้นของลำพุ่งน้ำและความเร็วเริ่มต้นของคลื่นกระแทกที่ฉีดออกจากหัวฉีดในทิศทางเริ่มต้นฉีดความเร็วของลำพุ่งน้ำและคลื่นกระแทกคำนวณจากระยะของลำพุ่ง (และคลื่นกระแทก) ที่เปลี่ยนแปลงที่วัดได้ในแต่ละเฟรมหารด้วยช่วงเวลาในแต่ละเฟรม (33  $\mu$ s ต่อเฟรม) เนื่องจากระยะของหัวฉีดกับแผ่น PMMA ติดตั้งใกล้กันมาก ตามระยะที่ได้อ้างอิงไว้ว่ามีค่าความดันกระแทกสูงสุด [7] และความเร็วของลำพุ่งที่มีความเร็วสูงทำให้ลำพุ่งที่ถูกฉีดออกมากระแทกแผ่น PMMA และสะท้อนกลับ ดังรูปที่ 9 แต่อย่างไรก็ตาม ความเร็วของลำพุ่งจะไม่ต่ำกว่า 600 m/s หาได้จากระยะห่างของหัวฉีดกับแผ่น PMMA 20 mm (ระยะ A) ต่อช่วงเวลาระหว่างเฟรม นอกจากนี้ความเร็วของลำพุ่งจะประมาณจากระยะของหัวฉีดถึงแผ่น PMMA (ระยะ A) รวมกับระยะจากแผ่น PMMA ถึงส่วนหัวของลำพุ่ง (ระยะ B) หารด้วย 33  $\mu$ s ส่วนความเร็วของคลื่นกระแทกคำนวณค่าเช่นเดียวกับความเร็วของลำพุ่ง คือระยะหัวฉีดถึงแผ่น PMMA รวมกับระยะห่างระหว่างแผ่น PMMA ถึงคลื่นกระแทกหารด้วย 33  $\mu$ s จะได้ผลความเร็วเฉลี่ยดังรูปที่ 10

รูปที่ 10 ความเร็วเริ่มต้นของคลื่นกระแทกสูงกว่าความเร็วเริ่มต้นของลำพุ่งในทุกกรณี ที่หัวฉีดขนาดรูฉีดยุติ 0.7 mm ลำพุ่งมีความเร็วเริ่มต้นประมาณ 950 m/s และคลื่นกระแทกมีความเร็วเริ่มต้นประมาณ 970 m/s กรณีหัวฉีดขนาด 0.8 mm ลำพุ่งมีความเร็วเริ่มต้นประมาณ 900 m/s ซึ่งมีค่าต่ำกว่าหัวฉีด 0.9 mm แต่มีค่าใกล้เคียงกัน และคลื่นกระแทกมีความเร็วประมาณ 940 m/s ความเร็ว

เริ่มต้นของคลื่นกระแทกสูงกว่าความเร็วเริ่มต้นลำพุ่งเฉลี่ยประมาณ 30 m/s



รูปที่ 9 ภาพถ่ายก่อนและหลังลำพุ่งฉีด



รูปที่ 10 ความเร็วเริ่มต้นของลำพุ่งและคลื่นกระแทก

#### 3.2 พฤติกรรมลำพุ่งความเร็วสูงและคลื่นกระแทกชนวัตถุ

การศึกษาพฤติกรรมลำพุ่งน้ำความเร็วสูงและคลื่นกระแทกพุ่งชนผิววัสดุ จากภาพถ่ายลำพุ่งน้ำกำเนิดจากหัวฉีดที่มีขนาดรูฉีดยุติแตกต่างกัน คือ รูปที่ 11(a) เป็นภาพถ่ายลำพุ่งจากหัวฉีด 0.7 mm รูปที่ 11(b) จากหัวฉีด 0.8 mm และรูปที่ 11(c) จากหัวฉีด 0.9 mm

รูปที่ 11 พฤติกรรมของลำพุ่งน้ำความเร็วสูงชนแผ่น PMMA สีใส ช่วงเวลาของภาพถ่ายจากเริ่มต้น (0  $\mu$ s) ถึง 199  $\mu$ s เวลา 33  $\mu$ s ต่อเฟรม รูปที่ 11(a) ลำพุ่งมีความเร็วเริ่มต้นประมาณ 950 m/s รูปที่ 11(b) ลำพุ่งมีความเร็วเริ่มต้นประมาณ 900 m/s และรูปที่ 11(c) ลำพุ่งมีความเร็วเริ่มต้นประมาณ 910 m/s

ช่วงเวลา  $0-33 \mu\text{s}$  ของทุกกรณี ลำพุ่งถูกฉีดออกมาชนแผ่น PMMA ทำให้ส่วนหัวของลำพุ่งกระจายออกด้านข้าง โดยปกติหากลำพุ่งถูกฉีดออกมาที่สภาวะบรรยากาศ ลำพุ่งจะมีรูปร่างลักษณะ streamline body ซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วของลำพุ่งด้วย แต่ในกรณีนี้ รูปร่างของลำพุ่งมีรูปทรงเหมือนพัด (fan) สาเหตุเกิดจากลำพุ่งที่ความเร็วและความดันสูงฉีดออกไปชนวัสดุกันในระยะที่ความดันย้อนกลับมีผลต่อลำพุ่งที่ฉีดออกมาจากหัวฉีด ซึ่งเป็นการเพิ่มแรงต้านการเคลื่อนที่ (drag force) ทำให้แกนลำพุ่ง (core jet) แตกออกด้านข้าง [18] ในขณะที่เดียวกันการเกิดขึ้นของลำพุ่งยังทำให้เกิดคลื่นกระแทก ( $1^{\text{st}}$  SW) ขึ้นพร้อมๆ กัน แต่ส่วนหัวของลำพุ่ง (jet tip) และ  $1^{\text{st}}$  SW ชนกับแผ่น PMMA แล้วสะท้อนกลับทำให้  $1^{\text{st}}$  SW สะท้อนกลับ แต่อย่างไรก็ตาม  $1^{\text{st}}$  RSW ที่เห็นอาจเกิดขึ้นได้หลายกรณี คือ เป็น  $1^{\text{st}}$  SW ที่เกิดจากลำพุ่งก่อนชน PMMA เมื่อลำพุ่งชนแล้วกลายเป็น  $1^{\text{st}}$  RSW หรือเป็น  $1^{\text{st}}$  RSW ที่เกิดจากส่วนหัวของลำพุ่งที่ชน PMMA แล้วสะท้อนกลับ แต่ยังมีความเร็วสูงทำให้เกิด SW ขึ้น SW ที่เกิดขึ้นตั้งแต่แรกถูกลำพุ่งกลืนทำให้มองไม่เห็น ซึ่งต้องพิสูจน์ต่อไปด้วยทิศทางการเคลื่อนที่ของ  $1^{\text{st}}$  RSW ย้อนทิศของ  $1^{\text{st}}$  SW และส่วนหัวที่เล็กทำให้  $1^{\text{st}}$  RSW เคลื่อนที่อยู่ด้านใน  $1^{\text{st}}$  SW พร้อมกันกับ  $1^{\text{st}}$  SW ขยายออกด้านข้าง

ที่เวลาเริ่มต้นของลำพุ่งที่ฉีดออกมาชนแผ่น PMMA ( $33 \mu\text{s}$ ) จะเห็นคลื่นอัด (compression Wave, CW) เกิดขึ้นทันทีและกระจายทั่วแผ่น PMMA อย่างชัดเจน CW เป็นคลื่นกล (mechanical Waves, MW) ชนิด mechanical longitudinal waves ที่เกิดขึ้นในกรณีนี้ที่วัสดุรับแรงและเคลื่อนที่ในทิศเดียวกับทิศทางของแรง ภาพที่เวลา  $33 \mu\text{s}$  กรณีขนาดรูฉีด  $0.7 \text{ mm}$  (รูปที่ 11(a)) เห็น CW เกิดขึ้นเล็กน้อย และ CW เกิดขึ้นมากที่สุดในกรณีหัวฉีด  $0.9 \text{ mm}$  (รูปที่ 11(c)) นั้นแสดงให้เห็นว่าขนาดรูฉีดของหัวฉีดซึ่งจะทำให้มวลของน้ำกับพื้นที่หน้าตัดที่รับแรงกระทำมีผลต่อการเกิด CW ใน PMMA เช่นเดียวกันกับการทดลองของ Shi และคณะ [8] ที่แสดงไว้ในรูปที่ 4 โดยในการทดลองนั้น ใช้ลำพุ่งนำความเร็วเพียง  $329 \text{ m/s}$  แต่ขนาดรูฉีด  $2 \text{ mm}$  นอกจากนี้ ในกรณีขนาดรูฉีด  $0.9 \text{ mm}$  ยังเกิดพฤติกรรมการสะท้อนกลับของ CW (Reflex CW) เป็น RCW อย่างชัดเจน นั้นแสดงว่ากรณีดังกล่าวนี้ CW เกิดขึ้นรุนแรง เมื่อ RCW เคลื่อนที่ในทิศกลับทาง CW จึง

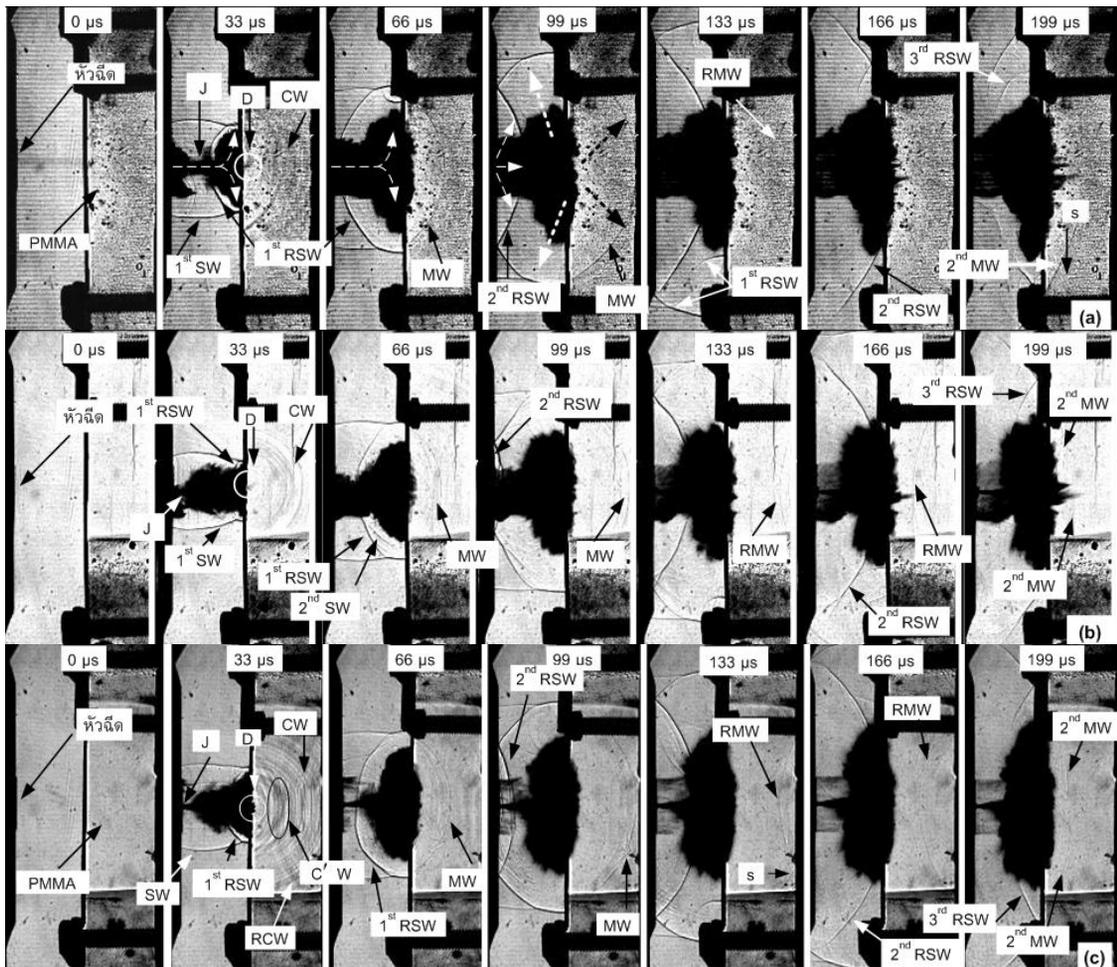
ทำให้เกิดการบีบอัดของ CW ขึ้นบริเวณ C'W (compressed wave) นอกจากจะเห็นพฤติกรรมที่ได้กล่าวถึงในข้างต้นแล้วยังเห็นความเสียหาย (รอยเจาะ) ของแผ่น PMMA (จุด D) ที่เกิดจากลำพุ่งอีกด้วย

ที่เวลา  $66 \mu\text{s}$  ของทุกกรณี ลำพุ่งยังคงแพร่ออกไปในแนวกว้าง รวมถึง  $1^{\text{st}}$  RSW ที่ขยายตัวออกเกิดเป็นรูปครึ่งทรงกลมและเคลื่อนที่ออกห่างจากส่วนหัวของลำพุ่งมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แสดงว่าความเร็วของ SW สูงกว่าความเร็วของลำพุ่งและความเร็วอาจเพิ่มขึ้นหรือความเร็วของลำพุ่งเริ่มลดลง ซึ่งต้องดูจากผลคำนวณอีกครั้ง เมื่อเปรียบเทียบ RSW จากทั้ง 3 กรณีพบว่า ความเร็วของ RSW กรณีรูปที่ 11(a) กับกรณีรูปที่ 11(c) มีความเร็วใกล้เคียงกัน ส่วนกรณีรูปที่ 11(b) ซึ่งเป็นกรณีหัวฉีดขนาด  $0.8 \text{ mm}$  ความเร็วของ RSW ต่ำกว่าแต่ที่สามารถเห็นได้ในช่วงเวลานี้ คือ ความชัดเจนและโดดเด่นของ MW ในแผ่น PMMA ซึ่งแตกต่างจากช่วงแรกที่ลำพุ่งชนวัสดุ ระยะการเคลื่อนที่ของ MW จากผิววัสดุด้านรับแรงกระแทกไม่ต่างกันมากนัก แสดงว่าความเร็วของ MW ไม่แตกต่างกัน

ที่เวลา  $99 \mu\text{s}$  ลำพุ่งยังคงแพร่ออกไปในแนวกว้างแต่ระยะไม่เปลี่ยนแปลงมากเมื่อเทียบจากภาพถ่ายเวลา  $66 \mu\text{s}$  แสดงว่าความเร็วของลำพุ่งลดลง และความเร็วสูงสุดของลำพุ่งจะอยู่ในช่วงเวลา  $0 - 66 \mu\text{s}$  นี้เท่านั้น ซึ่งแตกต่างจาก  $1^{\text{st}}$  RSW ที่ยังเคลื่อนที่และชนผนังห้องทดสอบด้านหัวฉีดและเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของลำพุ่งเป็น  $2^{\text{nd}}$  RSW จากภาพความเร็วของ  $2^{\text{nd}}$  RSW

จากกรณีหัวฉีด  $0.7 \text{ mm}$  ยังคงสูงกว่ากรณีอื่น ๆ และ MW เคลื่อนที่ถึงผิววัสดุส่วนหลังพร้อมๆ กันทั้ง 3 กรณี ส่วนหางของ MW กับ  $1^{\text{st}}$  RSW เกือบต่อกัน ทำให้มองภาพของคลื่น MW กับ  $1^{\text{st}}$  RSW เป็นรูปไข่

ที่เวลา  $133 \mu\text{s}$  ลำพุ่งยังคงแพร่ออกไปในแนวด้านข้างแต่ค่อนข้างจะช้ามาก ส่วน  $2^{\text{nd}}$  RSW ยังคงเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องแสดงว่าความเร็วของ  $2^{\text{nd}}$  RSW ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ในขณะที่เดียวกันนั้น MW สะท้อนกลับในทิศทางสวนทางการเคลื่อนที่ของลำพุ่งเป็น RMW ในกรณีหัวฉีด  $0.7 \text{ mm}$  ระยะการเคลื่อนที่ของ RMW จะมากกว่ากรณี  $0.8 \text{ mm}$  และ  $0.9 \text{ mm}$  ที่มีค่าเท่าๆ กัน นอกจากนี้กรณีหัวฉีด  $0.9 \text{ mm}$  ผลระหว่าง MW กับ RMW ที่เคลื่อนที่มาต่อกันทำให้เกิดคลื่นเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ เกิด Shear wave



รูปที่ 11 ลำพุงน้ำชนแผ่น PMMA (จากบนลงล่าง) (a) กรณีหัวฉีด 0.7 mm (b) กรณีหัวฉีด 0.8 mm (c) กรณีหัวฉีด 0.9 mm

(S) หรือ transverse wave ขึ้น แต่มองได้ไม่ชัดเจนนัก

ช่วงเวลาที่ 166  $\mu\text{s}$  และ 199  $\mu\text{s}$  ลำพุงเริ่มหยุดนิ่ง ที่เวลา 166  $\mu\text{s}$  นั้น 2<sup>nd</sup> RSW จากหัวฉีด 0.7 mm ชน แผ่น PMMA อีกครั้ง และ 2<sup>nd</sup> RSW จากหัวฉีด 0.8 mm และ 0.9 mm ไกลชนแผ่น PMMA ในขณะเดียวกัน RMW ยังคงเคลื่อนที่ในทิศทางสวนทางการเคลื่อนที่ของลำพุง

ที่เวลา 199  $\mu\text{s}$  เกิด 3<sup>rd</sup> RSW ซึ่งหมายถึง SW ที่ เกิดขึ้นจากลำพุงเคลื่อนที่ชนแผ่น PMMA และผนังห้อง ทดสอบกลับปามา 3 รอบ ซึ่งเป็นเรื่องไม่แปลก แต่เมื่อ SW ที่เป็น 2<sup>nd</sup> RSW ชนแผ่น PMMA เกิดคลื่นกล 2<sup>nd</sup> MW ขึ้นอีกครั้งหลังจากการเกิด 3<sup>rd</sup> RSW แสดงว่าแรง กระแทกของ RSW ทำให้เกิด MW

### 3.3 ความเร็วลำพุงและคลื่นกระแทกหลังจากชนวัตถุ

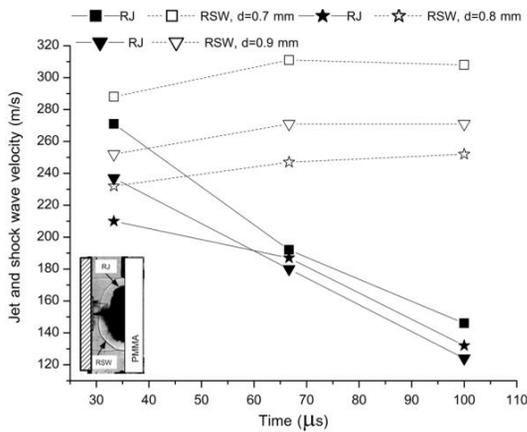
จากภาพถ่ายใช้ระยะการเคลื่อนที่ของลำพุงและ

คลื่นกระแทกหลังจากที่ชนแผ่น PMMA แล้วสะท้อนกลับ ในทิศตรงข้ามกับทิศการฉีดลำพุงเพื่อหาความเร็วของลำ พุงสะท้อนกลับ (RJ) และคลื่นสะท้อน (RSW) ผลของ ความเร็วจากรูปที่ 12 เป็นความเร็วเฉลี่ยโดยกำหนดเวลา เริ่มต้น (0  $\mu\text{s}$ ) ของการวัดระยะเมื่อลำพุงชนแผ่น PMMA แล้วสะท้อนกลับในทิศทางตรงกันกับทิศทางการฉีดเริ่มต้น

รูปที่ 12 เปรียบเทียบความเร็วเฉลี่ยของลำพุงสะท้อน (RJ) กับคลื่นสะท้อน (RSW) จากหัวฉีดขนาดต่างๆ ผลที่ ได้พบว่า ความเร็วของ RJ สูงสุดเกิดจากหัวฉีดขนาด 0.7 mm (~270 m/s) สาเหตุเป็นเพราะความเร็วกระแทกสูงกว่า กรณีอื่นๆ แนวโน้มของความเร็ว RJ ทุกกรณีจะเริ่มต้น จากความเร็วสูงและลดลง ซึ่งแตกต่างจากความเร็วของ RSW คือ ความเร็วเริ่มต้นจะช้าแล้วเพิ่มขึ้น ในแต่ละกรณี ของหัวฉีด ความเร็วเริ่มต้นของ RSW สูงกว่าความเร็ว

RJ ประมาณ 20 m/s พอสรุปได้ว่าความเร็วของ RJ ลดลงอย่างต่อเนื่องหลังจากชนแผ่น PMMA แต่ความเร็วของ RSW ยังคงเพิ่มขึ้น

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยภาพในหัวข้อ 3.2 กรณีการเกิดขึ้นของ RSW พิสูจน์ได้ว่า 1<sup>st</sup> RSW เกิดจากลำพุ่งก่อนชนแผ่น PMMA เนื่องจากความเร็วของลำพุ่งก่อนชน จากรูปที่ 10 มีความเร็วสูงกว่าความเร็วเสียงในอากาศที่เป็นตัวกลาง แต่กรณีที่คลื่นกระแทกชนแผ่น PMMA แล้วความเร็วของลำพุ่งต่ำกว่าความเร็วเสียงในอากาศ และความเร็วลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่ความเร็วของคลื่นกระแทกยังคงเพิ่มขึ้นและคงที่



รูปที่ 12 ความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่งและคลื่นกระแทก

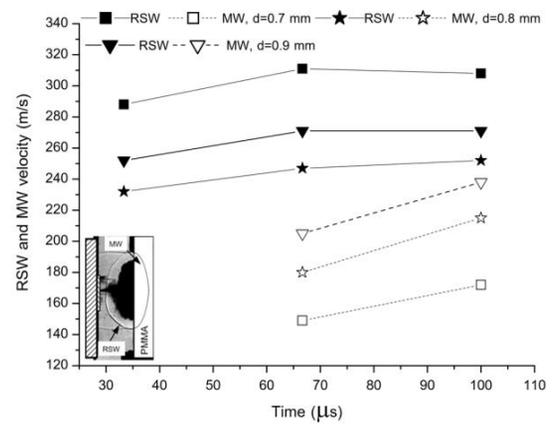
### 3.4 ความเร็วคลื่นกระแทกหลังจกชนวัตถุและความเร็วคลื่นกล

จากภาพถ่าย ได้ระยาระการเคลื่อนที่ของคลื่นกระแทกหลังจากที่ชนแผ่น PMMA แล้วสะท้อนกลับในทิศตรงข้ามกับทิศการเคลื่อนที่ของลำพุ่ง ได้ RSW เป็นคลื่นกระแทกในอากาศ และ MW เป็นคลื่นกลที่เคลื่อนที่ในตัวกลางที่เป็นของแข็ง เกิดจากการรับแรงของวัตถุซึ่งแตกต่างจากกรณีของลำพุ่งเคลื่อนที่ในอากาศ ทิศทางของ MW (รูปที่ 11) เคลื่อนที่ตามทิศทางการเคลื่อนที่ของลำพุ่งเป็นการเคลื่อนที่ของคลื่นกลตามยาว หรือ longitudinal waves ความเร็วของ MW ใช้หลักการเดียวกันกับการหาความเร็วของ SW โดยกำหนดเวลาเริ่มต้นเมื่อลำพุ่งชนแผ่น PMMA

รูปที่ 13 ความเร็วเริ่มต้นหาได้เฉพาะความเร็วของ RSW เท่านั้น ส่วน MW ไม่สามารถวัดได้ เนื่องจากเมื่อลำพุ่งและคลื่นกระแทกชนผิวของแผ่น PMMA เกิด

compression wave ขึ้นทั่วแผ่น PMMA (ดังแสดงในรูปที่ 11 ที่เวลา 33 µs) และเริ่มวัดได้ในเวลาที่ 66 µs ดังนั้นผลของความเร็วในรูปที่ 13 จึงมีเฉพาะความเร็วของ RSW เท่านั้น ความเร็วเริ่มต้นของ RSW สูงกว่าความเร็วของ MW แนวโน้มของความเร็วของ RSW เพิ่มขึ้นแล้วคงที่ แต่ความเร็วของ MW มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง

อย่างไรก็ตาม หากเปรียบเทียบความเร็วของ MW ในแต่ละกรณี พบว่าความเร็วของ MW ไม่ได้แปรผันโดยตรงกับความเร็วของ RSW แต่ความเร็วของ MW ขึ้นกับขนาดของหัวฉีดอย่างชัดเจน คือความเร็วสูงสุดเกิดจากหัวฉีด 0.9 mm 0.8 mm และ 0.7 ตามลำดับ



รูปที่ 13 ความเร็วของคลื่นกระแทกและคลื่นกล

### 4. สรุป

งานวิจัยนี้ทำการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของลำพุ่งความเร็วสูงของน้ำและคลื่นกระแทกที่ชนวัสดุศึกษาพฤติกรรมของคลื่นกลใน PMMA และความสัมพันธ์ของคลื่นกระแทกที่ชนแผ่น PMMA กับคลื่นกลในแผ่น PMMA รวมถึงผลของขนาดหัวฉีดต่อพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเมื่อลำพุ่งชนแผ่น PMMA

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ความเร็วเริ่มต้นของลำพุ่งน้ำที่กำเนิดจากวิธี projectile impact driven กับหัวฉีดทรงกรวยขนาดรูฉีด 0.7 mm 0.8 mm และ 0.9 mm ได้ความเร็วเฉลี่ยสูงสุดของลำพุ่งประมาณ 950 m/s และความเร็วเฉลี่ยสูงสุดของคลื่นกระแทกประมาณ 970 m/s ได้จากหัวฉีด 0.7 mm กรณีหัวฉีด 0.8 mm และ 0.9 mm ความเร็วเริ่มต้นของลำพุ่งและคลื่นกระแทกใกล้เคียงกันประมาณ 900 m/s และ 940 m/s ตามลำดับ

เมื่อลำพุ่งชนแผ่น PMMA ความเร็วของลำพุ่งที่

สะท้อนกลับทิศการเคลื่อนที่ มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องและความเร็วสูงสุดเกิดขึ้นจากรูหัวฉีด 0.7 mm (ประมาณ 300 m/s) 0.8 mm และ 0.9 mm ตามลำดับ และความเร็วของคลื่นกระแทกสูงสุดเกิดจากหัวฉีด 0.7 mm เช่นกัน

คลื่นกลที่เกิดในแผ่น PMMA เคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกับทิศทางของลำพุ่ง ความเร็วของคลื่นกลต่ำกว่าความเร็วของคลื่นกระแทกแต่มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ขนาดของหัวฉีดมีผลต่อความเร็วของคลื่นกล คือความเร็วสูงสุดวัดได้ประมาณ 240 m/s เกิดจากหัวฉีดขนาด 0.9 mm และ 220 m/s กับ 160 m/s จากหัวฉีด 0.8 mm และ 0.7 mm ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า การเกิดคลื่นกลเกิดจากการชนของลำพุ่งและเกิดจากการชนของคลื่นกระแทกด้วย

#### กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสุรินทร์ และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้การสนับสนุนการทำวิจัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Yoshiaki, Y., Hitoshi, S. and Yasunori, A. 1995. Suitable region of high-speed submerged water jets for cutting and peening. *JSME*, 38(1): 31-38.
- [2] Leach, J. and Walker, G.L. 1966. The application of high speed liquid jets to cutting. *Mathematical and Physical Sciences*, 266: 295-310.
- [3] Seehanam, W. 2011. High speed liquid jet for medical needle-free jet injection. PhD Dissertation, Mechanical Engineering Faculty, Ubonratchathani University.
- [4] Bowden, F.P. and Brunton, J.H. 1961. The deformation of solid by liquid impact at supersonic speeds. *Mathematical and Physical Sciences*, 263: 433-450.
- [5] Omid, G., David, M.W. and David W.H. 2012. Multiple liquid impacts on polymeric matrix composites reinforced with carbon nano-tubes. *Wear*, 294-295: 336-346.
- [6] Shuji, H. and Masaya, K. 2013. Effect of impact angle on liquid droplet impingement erosion. *Wear*, 298-299: 1-7.
- [7] Wuttichai, S., Wirapan, S., Kulachat, P. and Anirut, M. 2009. Effect of stand-off distance on impact pressure of high speed water jets. *Proceedings of the 10<sup>th</sup> Asian International Conference on Fluid Machinery*, Kuala Lumpur, Malaysia. Oct 21-23, 2009: 10-18.
- [8] Hong Hui, S., Kazuyoshi, T. and Nobuo, N. 1995. The measurement of impact pressure and solid surface response in liquid solid impact up to hypersonic range. *Wear*, 186-187: 352-359.
- [9] วุฒิชัย สิทธิวงษ์, กุลเชษฐ เพียรทอง, วิระพันธ์ สีหานาม อนิรุตต์ มัทธจักร และชัยเดช เกษมนิมิตรพร. 2554. ผลของอุณหภูมิต่อพฤติกรรมของลำพ่นน้ำมันดีเซลความเร็วสูง. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี* 13(1): 97-113.
- [10] วุฒิชัย สิทธิวงษ์, กุลเชษฐ เพียรทอง, วิระพันธ์ สีหานาม, อนิรุตต์ มัทธจักร และชัยเดช เกษมนิมิตรพร. 2554. ผลของอุณหภูมิต่อพฤติกรรมของลำพ่นน้ำมันดีเซลความเร็วสูง. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี* 13(2): 33-43.
- [11] Bourne, N.K. 2005. On impacting liquid jets and drops onto polymethylmethacrylate targets. *The Royal Society*. 461:1129-1145.
- [12] Brunton, J.H. 1966. The physics of impact and deformation: Single Impact. *Mathematical and Physical Sciences*. 260(1110): 79-85.
- [13] Field, J.E. and Lesser, M.B. 1977. On the mechanics of high speed liquid jets. *Mathematical and Physical Sciences*. 357: 143-162.
- [14] Foldyna, J., Sitek, L., Scucka, J., Martinec, P., Valicek, J. and Palenikova. 2009. Effect of pulsating water jet impact on aluminium surface. *Journal of Materials Processing Technology*. 209: 6174-6180.

- [15] Pianthong, K., Zakrzewski, S., Behnia, M. and Milton, B.E. 2003. Characteristics of impact driven supersonic liquid jets. *Experiments Thermal and Fluid Science*, 27: 589-598.
- [16] Wuttichai, S., Kulachat, P., Wirapan, S., W. and Milton, B. E., Takayama, K. 2012. Effect of chamber temperature and pressure on characteristics of high speed diesel jets. *Shock Waves*, 22(3): 215-223.
- [17] Anirut, M. 2007. Experimental study of impact-generated high speed liquid jet. PhD Dissertation, Department of Mechanical Systems and Design, Tohoku University.
- [18] Buzukov, A.A. 1999. Development of a liquid-fuel jet at high-speed pulse injection into a gaseous medium I.physical model. *Applied Mechanics and Technical Physics*. 40: 136-142.