

การศึกษาพฤติกรรมคลื่นกระแทกด้วยเทคนิคชาร์โดว์กราฟ A study of the shock wave behavior using the shadowgraph technique

วุฒิชัย สิริวงษ์^{1*}
Wuttichai Sittiwong^{1*}

รับบทความ 30 เมษายน 2567 แก้ไขบทความ 26 กุมภาพันธ์ 2568 ยอมรับตีพิมพ์ 21 เมษายน 2568

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย เพื่อศึกษาความแตกต่างของพฤติกรรมของคลื่นกระแทก (Shock wave) ที่เกิดจากลูกกระสุนปืนทรงกระบอกที่มีรูปร่างส่วนหัวแตกต่างกัน 5 แบบ ได้แก่ 1) หัวเรียบ 2) หัวมน 3) หัวทรงกรวยตัด 4) หัวทรงกรวยแหลม 30 องศา และ 5) หัวทรงกรวยแหลม 45 องศา ลูกกระสุนปืนขับเคลื่อนด้วยดินปืนชนิดดินคว้นน้อยปริมาณ 3 กรัม พฤติกรรมของคลื่นกระแทกจะถูกบันทึกด้วยเทคนิคชาร์โดว์ (Shadowgraph technique) ร่วมกับกล้องถ่ายภาพเคลื่อนไหวยุติความเร็วสูงจากผลการทดลอง พบว่า เทคนิคชาร์โดว์กราฟร่วมกับกล้องถ่ายภาพเคลื่อนไหวยุติความเร็วสูงสามารถบันทึกพฤติกรรมของคลื่นกระแทกจากลูกกระสุนปืนได้อย่างชัดเจน นอกจากนั้นความเร็วของลูกกระสุนปืนจะแบ่งเป็น 2 กลุ่มตามลักษณะรูปร่างของลูกกระสุนปืน คือ ลูกกระสุนปืนหัวเรียบ หัวมน และหัวกรวยตัด มีความเร็วเฉลี่ยใกล้เคียงกันที่ประมาณ 780 เมตรต่อวินาที ส่วนลูกกระสุนปืนทรงกระบอกหัวทรงกรวย 30 องศา และ 45 องศา มีความเร็วเฉลี่ยประมาณ 550 เมตรต่อวินาที

คำสำคัญ: เทคนิคชาร์โดว์กราฟ, กล้องถ่ายภาพเคลื่อนไหวยุติความเร็วสูง, ดินคว้นน้อย, ปากกระบอกปืน

¹สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสุรินทร์

Abstract

The purpose of the research is to study the differences shock waves behavior, the cylindrical projectile of following five head shapes are assigned: 1) flat shape head 2) round nose head, 3) flat nose head, 4) 30° boat tail head, and 5) 45° boat tail head shape. The projectile driven with 3 grams of smokeless powder. The behavior of the shock waves recorded using the shadowgraph technique in conjunction with a high-speed video camera. According to the results of the experiment, the shadowgraph technique combined with a high-speed video camera can clearly record the behavior of the shock waves from the projectiles. In addition, the projectile velocity is divided into two groups according to the shape of the bullet: flat shape, round nose headed, and flat nose head projectile. It has a similar average speed of about 780 meters per second. The group including projectiles with 30° and 45° boat tail shapes had a velocity of around 550 m/s. It has an average speed of about 550 meters per second.

Keywords: Shadowgraph technique, High speed video camera, Smokeless powder, Gun muzzle

¹Division of Mechanical Engineering, Faculty of Agriculture and Technology, Rajamangala University of Technology Isan SURIN Campus

*Corresponding author e-mail address: sittiwong@gmail.com

1. บทนำ (Introduction)

คลื่นกระแทก (Shock wave) เป็นการเคลื่อนที่ของพลังงานในตัวกลาง (ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส) ที่เกิดขึ้นทันทีทันใดหรืออย่างรวดเร็วจนทำให้คุณลักษณะของตัวกลางเปลี่ยน คลื่นกระแทกจะมีบทบาทสำคัญสำหรับฟิสิกส์สมัยใหม่ [1] วิศวกรรมอากาศยาน [2] วัสดุศาสตร์ [3] การทหาร [4] หรือแม้กระทั่งทางการแพทย์ [5-7] ปัจจุบันคลื่นกระแทกเป็นตัวเลือกแรก ๆ ในการรักษาหัวใจในโตและท่อปัสสาวะ ระบบทางเดินปัสสาวะเป็นสาขาการแพทย์สำหรับคลื่นกระแทกในการทางการแพทย์มานานแล้ว นอกจากนี้คลื่นกระแทกยังถูกนำมาใช้ในศัลยกรรมกระดูกและบาดแผลเพื่อรักษาเส้นเอ็นอักเสบ (Tendinitis) หัวกระดูกข้อสะโพกตายจากการขาดเลือดและการรักษากระดูกตาย ซึ่งเป็นการรักษาด้วยคลื่นกระแทกนอกร่างกาย [8] เป็นต้น

ในกรณีที่คลื่นกระแทกเกิดขึ้นจากวัตถุเคลื่อนที่ในตัวกลางที่เป็นอากาศด้วยความเร็วสูงกว่าความเร็วเสียงในอากาศ (343 เมตรต่อวินาที, 20 องศาเซลเซียส) เช่น อากาศยาน ลูกกระสุนปืน เป็นต้น โมเลกุลของตัวกลางระหว่างชั้นของคลื่นกระแทก (Shock layer) กับวัตถุจะสั่นตัวทำให้เกิดความร้อนขึ้นเป็นผลให้ชั้นความหนาของคลื่นกระแทกที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ลดลง ความดันเกิดขึ้นกระจายรอบ ๆ วัตถุ เป็นผลต่อพลศาสตร์การเคลื่อนที่ของวัตถุ (Aerodynamics) คือ การเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุที่เกิดจาก Pitching moment กรณีของลูกกระสุนปืนเคลื่อนที่ในอากาศที่ความเร็วสูงเหนือเสียง ในทางการทหาร มุมของ Sound shock wave สามารถใช้เป็นข้อมูลเพื่อหาตำแหน่งของผู้ยิง และบอกชนิดของปืนได้ [9] พฤติกรรมของคลื่นกระแทกที่เกิดจากการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงเหนือเสียงในระดับ Supersonic ของลูกกระสุนปืนในลำกล้องปืนมีผลต่อตัวกลางหรืออากาศที่อยู่ส่วนหน้าของลูกกระสุนปืนจะถูกอัด ทำให้ความดันและความหนาแน่นสูงขึ้น หลังจากนั้นจะถูกขับออกมาที่ปลายลำกล้อง ที่เรียกว่า Precursor shock wave ความแตกต่างของความหนาแน่นของอากาศภายนอกทำให้คลื่นกระแทกเกิดพฤติกรรมการหมุนวน หรือเรียกว่า Vortex ring เมื่อลูกกระสุนปืนเคลื่อนที่ออกจากปลายลำกล้องแล้วจะเกิดคลื่นกระแทกโค้ง (Bow shock wave) ขึ้น อย่างไรก็ตามพฤติกรรมของคลื่นกระแทกที่เกิดขึ้นจะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความเร็วของลูกปืน รูปทรงของลูกกระสุนปืน เป็นต้น [10-11]

Hao และคณะ [12] ทำการศึกษาการก่อตัวของโพรงอากาศขนาดใหญ่ (Super cavitation) และการเจาะของกระสุนปืน ความเร็วสูงในน้ำด้วยโปรแกรม Ansys fluent 19.0 ศึกษาการเจาะของกระสุนปืนในน้ำ ลักษณะโพรงอากาศได้น้ำ วิถี และลักษณะสนามการไหลของกระสุนปืนหัวแบนทรงกรวยและหัวกระสุนปืนแบนรูปไข่ ขนาด 5.8 มิลลิเมตร โดยกระสุนปืนที่ยิงลงน้ำในแนวตั้งด้วยความเร็ว 300, 400, 500 และ 600 เมตรต่อวินาที ซึ่งผลการวิจัยพบว่า อัตราการลดลงของความเร็วในน้ำจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วที่เพิ่มขึ้น ภายใน 3 มิลลิวินาทีแรก อัตราการลดของความเร็วของกระสุนปืนทรงกรวยหัวแบนที่มีความเร็วในการยิงลงน้ำ 600 เมตรต่อวินาที คือ 55.6% ในขณะที่อัตราการลดลงของความเร็วของกระสุนปืนที่มีความเร็วในการยิงลงน้ำ 300 เมตรต่อวินาทีนั้นเพียง 16.3% ใน 3 มิลลิวินาที นอกจากนี้แล้ว ยังมีการศึกษาถึงการแพร่กระจายและการสะท้อนของคลื่นกระแทกที่เกิดจากการยิงกระสุนปืนความเร็วสูงลงในถังน้ำด้วยเทคนิคภาพกราฟเงา หรือ Shadowgraph technique [13]

Token และ Korneev [14] ศึกษาระยะและรูปทรงของคลื่นกระแทกที่เกิดจากวัตถุที่มีรูปทรงกระบอกหัวมน (Round nose) รัศมี 14 มิลลิเมตร และ 15 มิลลิเมตร กับรูปทรงกระบอกหัวทรงกรวย มุม 30 องศา และ 45 องศา ที่กำเนิดจากเครื่องยิงความเร็วสูงที่เรียกว่าปืนแก๊สเบาสองขั้น (Two-stage light-gas gun) ที่ความเร็วระดับอัตราเร็วขั้นสูง หรือ Hypersonic จากภาพถ่ายด้วยเทคนิคชูลีเรน (Schlieren technique) พบว่าคลื่นกระแทกจากวัตถุรูปทรงกรวยมุม 30 องศา มีมุมเฉียงหรือมุมเทมากกว่าวัตถุรูปทรงกรวยมุม 45 องศา และวัตถุที่มีรูปทรงกระบอกหัวมน ตามลำดับ และคลื่นกระแทกที่เกิดจากวัตถุรูปทรงกรวยจะเคลื่อนที่ติดกับวัตถุ (Attach shock wave) ซึ่งแตกต่างจากคลื่นกระแทกที่เกิดจากวัตถุรูปทรงมน ซึ่งมีระยะเกิดขึ้นระหว่างวัตถุกับคลื่นกระแทก (Detach shock wave)

กรณีของลูกกระสุนปืนที่มีความเร็วเหนือความเร็วเสียงถูกขับด้วยแรงระเบิดของดินปืนขับจากปลอกกระสุนปืนซึ่งอยู่ส่วนท้ายของลำกล้องปืน เมื่อลูกกระสุนปืนเคลื่อนที่ทำให้อากาศด้านหน้าของกระบอกปืนถูกขับดันและถูกอัดตัวออกมา

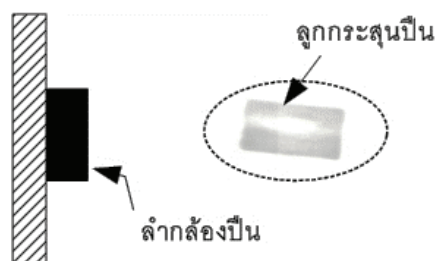
ที่ส่วนปลายลำกล้องปืนเท่านั้น เนื่องจากขนาดของลำกล้องปืนและลูกกระสุนปืนที่มีขนาดเท่ากัน อากาศอัดที่เคลื่อนที่ข้างหน้าลูกกระสุนปืนซึ่งเปรียบได้กับการกำเนิดคลื่นกระแทกแบบท่อคลื่นกระแทก หรือ Shock tube เกิดเป็นคลื่นกระแทกตั้งฉาก (Normal shock wave หรือ Precursor shock wave) เมื่อ Normal shock wave เคลื่อนที่พ้นจากปลายลำกล้องปืน ซึ่งแตกต่างทั้งความดันและพื้นที่ที่ไม่จำกัด จึงขยายตัวออกเป็นแรงระเบิดปลายกระบอกปืน (Muzzle blast) เป็นคลื่นกระแทกจากการระเบิด (Blast wave) ซึ่งเป็นคลื่นกระแทกตั้งฉาก หรือ Precursor blast wave เมื่อลูกกระสุนปืนเคลื่อนที่พ้นจากปลายลำกล้องปืนแล้ว ความดันของแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ดินปืนขับที่ขับลูกกระสุนปืนออกมาจะเคลื่อนที่ตามลูกกระสุนปืนออกมาจากกระบอกปืนเป็นคลื่นกระแทกลำดับสอง (Secondary shock wave) [14-16] ถึงแม้ว่าพฤติกรรมของคลื่นกระแทกจะเป็นที่น่าสนใจและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาแล้ว แต่เนื่องจากวัตถุเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงและพฤติกรรมของคลื่นกระแทกเป็นความแตกต่างของความหนาแน่นของตัวกลางหรืออากาศ (กรณีลูกกระสุนปืนยิงออกไปในอากาศ) ทำให้เป็นไปได้ยากที่จะมองเห็นพฤติกรรมของคลื่นกระแทก นอกจากนี้ ดังที่ได้กล่าวถึงในทางการแพทย์ การใช้คลื่นกระแทกในประเทศไทยมีผู้สนใจทำวิจัยในการใช้เครื่องมือเพื่อประโยชน์ต่อผู้ป่วย เช่น การเปรียบเทียบประสิทธิผลการรักษาด้วยคลื่นกระแทกชนิดเรเดียล (Radial shock wave therapy; RSWT) กับการรักษาด้วยการนวดแบบกดลึก (Deep friction massage; DFM) ในกลุ่มอาการปวดกล้ามเนื้อและพังผืด (Myofascial pain syndrome; MPS) [16] หรือ S. Ladawan [17] ทำการเปรียบเทียบผลของการรักษานิวไทรโตสส่วนปลายด้วยการส่องกล้องท่อไต (Ureteroscopy หรือ URS) และการสลายนิ่วด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (Extracorporeal shockwave lithotripsy; ESWL) ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้ล้วนแต่เป็นการใช้เครื่องมือทางการแพทย์กับผู้ป่วย แต่ไม่มีการวิเคราะห์พฤติกรรมของคลื่นกระแทกหรือคลื่นชอลักกับอาการป่วย เนื่องจากคลื่นกระแทกไม่สามารถมองด้วยตาเปล่าได้ จึงมีงานวิจัยด้านนี้น้อยมากโดยเฉพาะในประเทศไทย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เทคนิคชาร์โดว์กราฟ (Shadowgraph technique) ร่วมกับกล้องถ่ายภาพเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงหรือกล้องวิดีโอความเร็วสูง (High speed video camera, HSVC) ศึกษาพฤติกรรมของคลื่นกระแทกที่เกิดจากการเคลื่อนที่วัตถุความเร็วสูง กรณีนี้ใช้ลูกกระสุนปืนที่มีรูปทรงส่วนหัวแตกต่างกันที่ปลายกระบอกปืน ลูกกระสุนปืนถูกยิงจากปืนที่ใช้แรงระเบิดของดินปืนชนิดดินควันน้อย (Smokeless powder) ขับดันลูกกระสุนปืนเคลื่อนที่ในลำกล้องหรือกระบอกปืน ผลการทดลองได้จากภาพถ่ายเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการพัฒนางานวิจัยต่อไป ดังที่ Sittiwong และคณะ [18] ได้ทำการศึกษาผลของรูปทรงลูกกระสุนปืนที่มีต่อพฤติกรรมของคลื่นในของแข็งด้วยวิธีการและเทคนิคเดียวกันนี้

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

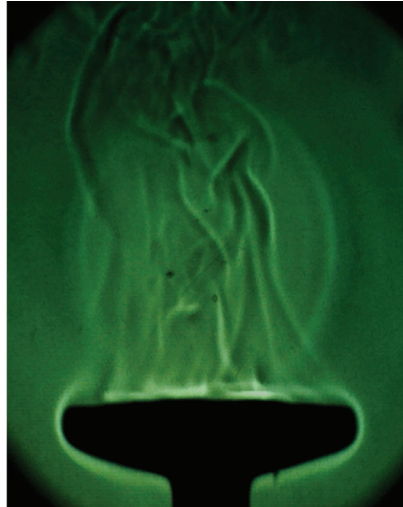
2.1 เทคนิคการบันทึกภาพวัตถุความเร็วสูงและคลื่นกระแทก

คลื่นกระแทกเกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของวัตถุ หรือของไหลผ่านตัวกลางด้วยความเร็วสูงกว่าความเร็วเสียงของตัวกลาง พฤติกรรมเคลื่อนที่ของลูกปืนความเร็วสูงและคลื่นกระแทกไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าหรือเครื่องมือปกติทั่วไปได้ ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 1 เป็นภาพถ่ายลูกกระสุนปืนที่ความเร็วประมาณ 800 เมตรต่อวินาที ด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงโดยไม่ใช้เทคนิคชาร์โดว์กราฟ จะเห็นว่าสามารถมองเห็นการเคลื่อนที่ของลูกกระสุนปืนได้ แต่ไม่สามารถมองเห็นพฤติกรรมของคลื่นกระแทกได้ เทคนิคชาร์โดว์กราฟใช้หลักการการหักเหของแสงเมื่อผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน เช่นเดียวกับคลื่นกระแทกที่ความหนาแน่นบริเวณคลื่นกระแทกแตกต่างกับความหนาแน่นของบรรยากาศรอบวัตถุ ดังนั้นการทดลองนี้จึงใช้เทคนิคชาร์โดว์กราฟร่วมกับกล้องถ่ายภาพเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง (HSVC) เพื่อบันทึกผลการทดลอง



รูปที่ 1 ภาพถ่ายลูกกระสุนปืนด้วย HSVC

เทคนิคชาร์โดว์กราฟเป็นวิธีการที่อาศัยหลักการหักเหของแสงที่ผ่านตัวกลาง โดยที่ตัวกลางมีความหนาแน่นแตกต่างกัน เช่น แสงส่องผ่านน้ำที่ไหลในอากาศ ซึ่งกรณีงานวิจัยนี้จะเป็นแสงส่องผ่านลูกกระสุนปืนที่ถูกยิงผ่านอากาศ ความแตกต่างของความหนาแน่นของลูกกระสุนปืนกับความหนาแน่นของอากาศที่แสงส่องผ่านจะทำให้แสงเกิดการหักเหดังรูปที่ 2 แสดงภาพถ่ายไอความร้อนที่เกิดจากตัวทำความร้อนอินฟราเรดด้วยเทคนิคชาร์โดว์กราฟโดยไม่ใช้กล้องถ่ายภาพเคลื่อนไหวความเร็วสูง ความร้อนทำให้อากาศโดยรอบมีความหนาแน่นลดลงกว่าความหนาแน่นของอากาศปกติที่แสงเคลื่อนที่ผ่าน ทำให้เกิดการหักเหของแสง เกิดเป็นภาพไอความร้อนที่ไม่สามารถมองด้วยตาเปล่าได้

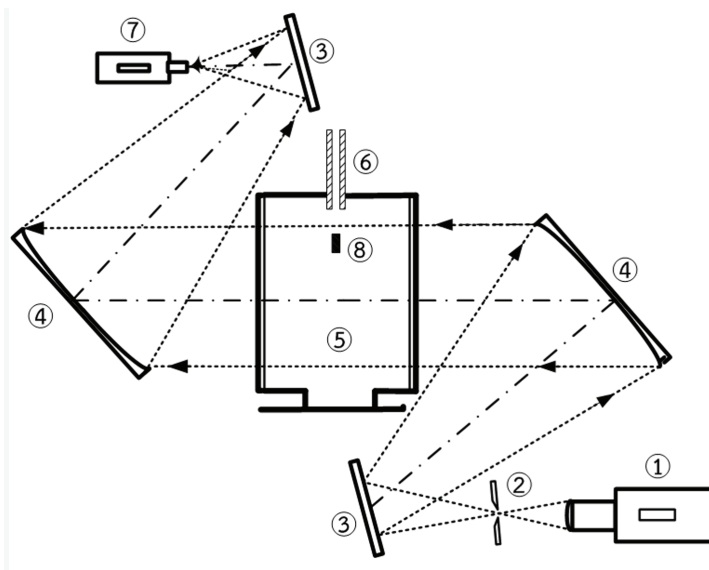


รูปที่ 2 ภาพถ่ายความร้อนจากเทคนิคชาร์โดว์กราฟ

ในรูปที่ 3 แสดงการจัดวางชุดทดลองของกล้องถ่ายภาพเคลื่อนไหวความเร็วสูงใช้ร่วมกับเทคนิคชาร์โดว์กราฟประกอบด้วย

1. แหล่งกำเนิดแสง (Light source) จากหลอดไฟซีนอน (HID xenon) ค่าอุณหภูมิสีเคลวิน (K) 4,300 K ค่าความส่องสว่าง 3,500 ลูเมน (Lumens)
2. รูเข็ม (Pinhole) แบบปรับได้ ขนาดรูเล็กสุด 2 มิลลิเมตร ทำหน้าที่ตัดหรือกรองแสงส่วนที่กระจายและความส่องสว่างต่ำออก เพื่อให้ได้แสงจากจุดกำเนิดแสงที่มีความเข้มแสงสูง
3. กระจกเงา (Mirror) แผ่นเรียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร ทำหน้าที่เปลี่ยนทิศทางของแสงเพื่อลดพื้นที่การทำงานและติดตั้งอุปกรณ์
4. กระจกเงาเว้า (Concave mirror) เส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร จุบรวมแสง 1,500 เซนติเมตร จำนวน 2 บาน กระจกบานแรก (ขวา) ทำหน้าที่เปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงให้แสงเคลื่อนที่ในแนวขนาน กระจกบานที่สอง (ซ้าย) ทำหน้าที่เปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ของแสงจากขนานเป็นรวมเข้าสู่จุดรวมแสงของกล้องถ่ายภาพเคลื่อนไหวความเร็วสูง
5. ห้องทดสอบ (Test chamber) ทำหน้าที่เก็บและป้องกันอันตรายที่เกิดจากลูกกระสุนปืน ทั้งสองข้างของห้องทดสอบจะกันด้วยกระจกใส หนา 25 มิลลิเมตร
6. ลำกล้องปืน (Gun barrel) ทำหน้าที่เป็นท่อส่งลูกกระสุนปืน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 8 มิลลิเมตร ซึ่งมีขนาดเท่ากับลูกกระสุนปืนเพื่อให้เกิดการขับเคลื่อนจากแรงระเบิดของดินปืนได้
7. กล้องถ่ายภาพเคลื่อนไหวความเร็วสูง (High-speed video camera) ยี่ห้อ Photron รุ่น FASTCAM SA5 ที่สามารถถ่ายภาพเคลื่อนไหวได้สูงสุด 1,000,000 เฟรมต่อวินาที (fps) โดยการทดลองนี้ใช้ความเร็ว 30,000 เฟรมต่อวินาที (fps) ที่ความละเอียด $1,024 \times 240$ พิกเซล

กล้องถ่ายภาพเคลื่อนไหวยุติความเร็วสูงร่วมกับเทคนิคชาร์โดว์กราฟในรูปที่ 3 มีหลักการทำงาน คือ แสงจากจุดกำเนิดแสง (1) จะกระจายออกในแนวรัศมีจากแหล่งกำเนิดแสง (เส้นประ) แสงผ่านเลนส์นูนสองด้านภายในแหล่งกำเนิดแสง เพื่อรวมแสงที่จุดรวมแสง ที่จุดรวมแสง แสงจะถูกกรองด้วยรูเข็ม (Pin hole) (2) และกระจายตกกระทบบนกระจกเงาเว้าบานแรก (4) ในการทดลองนี้ผู้วิจัยได้เพิ่มกระจกเงาแบบแผ่นเรียบ (3) ทำหน้าที่เปลี่ยนทิศทางของแสงเพื่อลดพื้นที่การทำงานเท่านั้น กระจกเงาเว้าบานแรก (ขวา) จะเปลี่ยนทิศทางของแสงจากกระจายในแนวรัศมีเป็นแนวขนานผ่านห้องทดสอบ (5) และกลับมารวมแสงเมื่อผ่านกระจกเงาเว้าบานที่สอง (ซ้าย) ที่จุดรวมแสง แสงจะตกลงบนรูรับแสงของกล้องถ่ายภาพเคลื่อนไหวยุติความเร็วสูง (7) ลูกกระสุนปืนความเร็วสูง (8) จากลำกล้องปืน (6) ถูกยิงเข้ามาภายในห้องทดสอบหากมีความเร็วสูงกว่าความเร็วเสียงในอากาศจะทำให้เกิดคลื่นกระแทกขึ้น ความหนาแน่นของอากาศที่เกิดจากคลื่นกระแทกจะแตกต่างกับความหนาแน่นของอากาศในห้องทดสอบ เมื่อแสงจากจุดกำเนิดแสงที่เป็นเส้นขนานเคลื่อนที่ผ่านทำให้เกิดการหักเหและเกิดเป็นภาพเงา ซึ่งภาพเงาที่เกิดขึ้นเร็วมากนี้จะมองเห็นได้จากเทคนิคชาร์โดว์กราฟ และถูกบันทึกด้วยกล้องถ่ายภาพเคลื่อนไหวยุติความเร็วสูง



รูปที่ 3 การจัดอุปกรณ์เทคนิคชาร์โดว์กราฟร่วมกับ HSVC

2.2 วิธีการกำเนิดคลื่นกระแทก

การศึกษากฎธรรมชาติของคลื่นกระแทกด้วยเทคนิคชาร์โดว์กราฟร่วมกับกล้องถ่ายภาพเคลื่อนไหวยุติความเร็วสูงนี้ จะกำเนิดคลื่นกระแทกจากลูกกระสุนปืนที่ทำจาก Polymethyl-methacrylate (PMMA) ทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ยาว 15 มิลลิเมตร ค่าความหนาแน่น 1.1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และถูกอัดเข้าไปในปลอกกระสุนปืน 10 มิลลิเมตร จากความยาว 15 มิลลิเมตร เท่ากันทุกการทดลอง แตกต่างกันที่รูปร่างของส่วนหัวที่ใช้ทำการทดลองมี 5 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 4 คือ

แบบที่ 1 ส่วนหัวตัดแบนเรียบ (P.std)

แบบที่ 2 ส่วนหัวทรงมนโค้งมีรัศมี 4 มิลลิเมตร (P.r4)

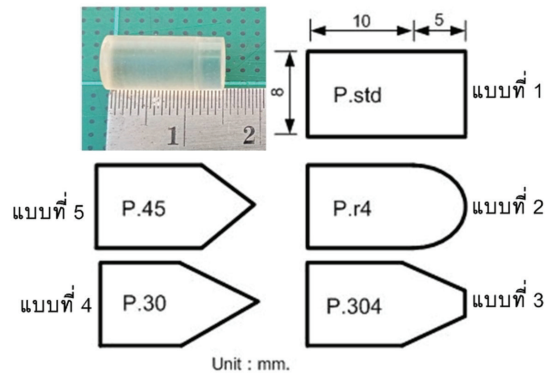
แบบที่ 3 ส่วนหัวทรงกรวยตัด เส้นผ่านศูนย์กลางกรวยตัด 4 มิลลิเมตร มุมเอียง 30 องศา (P.304)

แบบที่ 4 ส่วนหัวทรงกรวยแหลม มุมเอียง 30 องศา (P.30)

แบบที่ 5 ส่วนหัวทรงกรวยแหลมทำมุมเอียง 45 องศา (P.45)

การขับลูกกระสุนปืนใช้หลักการของปืนที่ใช้ดินปืน (Powder gun) จุดชนวนด้วยการกระแทกของเข็มแทงชนวน ทำให้เกิดการเผาไหม้ดินปืนในปลอกกระสุนปืนแล้วขยายตัวเกิดความดันในปลอกกระสุนปืน แก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้

ดินขั้บมีความดันสูงและขั้บดันลูกกระสุนปืนออกมาตามลำลั้อง ปลอกกระสุนปืนที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 4 ลูกกระสุนปืนที่ใช้สำหรับการทดลอง 5 แบบ



รูปที่ 5 ปลอกกระสุนปืน

ปลอกกระสุนปืนจะสามารถบรรจุดินปืนขั้บชนิดดินควันนั้อย (Smokeless powder) ได้สูงสั้ด 5 กรัม โดยการทดลองนี้ใช้ดินปืนขั้บปริมาตร 3 กรัม ทุกการทดลอง เนื่องจากการบรรจุดินปืนเต็มปลอกกระสุนปืน ภายในปลอกกระสุนปืนจะไม่มีพื้นที่ให้แก๊สจากการเผาไหม้ดินปืนขยายตัว ดินปืนที่เผาไหม้จะขั้บดันลูกกระสุนปืนออกจากปลอกกระสุนปืนก่อนที่จะเกิดการเผาไหม้ดินปืนทั้งหมด จากการทดลองเบื้องต้นพบว่าดินปืนเผาไหม้ไม่หมดจะถูกขั้บออกมาปลายกระบอกปืนทำให้ไม่สามารถเห็นพฤติกรรมของคลื่นกระแทกได้ และความเร็วของกระสุนปืนยังมีความเร็วไม่คงที่ ดังนั้นการทดลองเบื้องต้นพบว่าปริมาณดินปืนขั้บ 3 กรัม ทำให้ความเร็วลูกกระสุนปืนสูงกว่าความเร็วเสียงในทุกกรณี และบันทึกภาพคลื่นกระแทกได้ชัดเจน

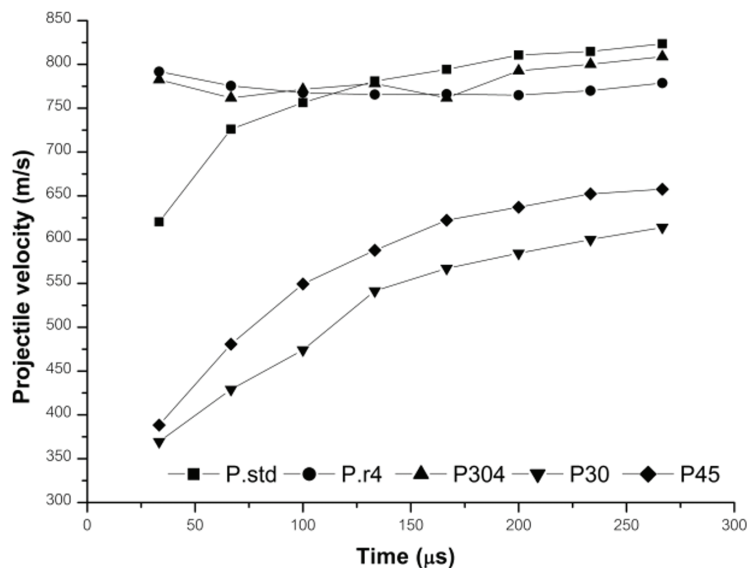
3. ผลและวื้การณั้ (Results and discussion)

การทดลองได้ภาพถ่ายลูกกระสุนปืนที่มีลักษณะส่วนหัวแตกต่างกัน 5 แบบ ในห้องทดสอบที่สภาวะบรรยากาศลูกกระสุนปืนและพฤติกรรมของคลื่นกระแทกที่เกิดขึ้นจะถูกบันทึกด้วยกล้องถ่ายภาพเคลื่อนไห้ความเร็วสูงร่วมกับเทคนิคชาร์โดว์กราฟ ที่การทดลองแบบละ 10 ครั้ง ผลการทดลองถูกวิเคราะห์จากภาพถ่ายที่ได้ร่วมกับเทคนิคชาร์โดว์กราฟ

3.1 ความเร็วของลูกกระสุนปืน

ความเร็วของลูกกระสุนปืนได้จากระยะการเคลื่อนที่ของลูกกระสุนปืนจากภาพถ่ายต่อช่วงเวลาในแต่ละเฟรมของภาพ กรณีการทดลองนี้ใช้ความเร็วการถ่ายภาพ 30,000 เฟรมต่อวินาที หรือ 33 ไมโครวินาทีต่อเฟรม ($\mu\text{s/f}$) ในรูปที่ 6 เป็นผลของความเร็วเฉลี่ยจากลูกกระสุนปืนแบบทรงกระบอกหน้าตัดแบนเรียบ หรือ P.std ได้ความเร็วเริ่มต้นประมาณ 600 เมตรต่อวินาที ความเร็วเฉลี่ย 760 เมตรต่อวินาที ความเร็วของลูกกระสุนปืน P.r4 และ P.304 มีความเร็วเริ่มต้นใกล้เคียงกันคือประมาณ 800 เมตรต่อวินาที และความเร็วเฉลี่ยประมาณ 780 เมตรต่อวินาที และใกล้เคียงกับความเร็วของลูกกระสุนปืน

แบบ P.std ส่วนความเร็วของลูกกระสุนปืน P.30 และ P.45 มีความเร็วเริ่มต้นต่ำกว่า (ประมาณ 380 เมตรต่อวินาที) และมีความเร็วเฉลี่ยประมาณ 550 เมตรต่อวินาที จะเห็นได้ว่าความเร็วของลูกกระสุนปืนแบบที่มีรูปทรงเหมือนกันมีแนวโน้มของความเร็วเท่ากัน คือลูกกระสุนปืนแบบ P.std แบบ P.r4 และแบบ P.304 มีความเร็วเริ่มต้นสูงและความเร็วเฉลี่ยใกล้เคียงกัน ส่วนความเร็วของลูกกระสุนปืนแบบ P.30 และแบบ P.45 เริ่มต้นต่ำและความเร็วจะสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง

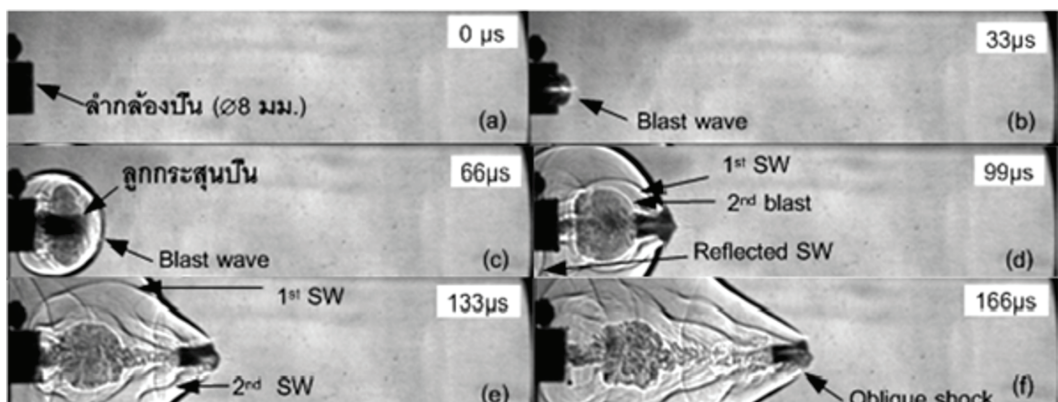


รูปที่ 6 ความเร็วของลูกกระสุนปืนรูปทรงต่าง ๆ

3.2 วิเคราะห์ภาพคลื่นกระแทกจากลูกกระสุนปืน

3.2.1 ผลของภาพถ่ายคลื่นกระแทกจากลูกกระสุนปืนแบบ P.std

ในรูปที่ 7 จากกล้องถ่ายภาพเคลื่อนไหวความเร็วสูงร่วมกับเทคนิคซาริโดว์กราฟ ถูกขับด้วยดินปืน 3 กรัม



รูปที่ 7 คลื่นกระแทกจากลูกกระสุนปืนแบบ P.std

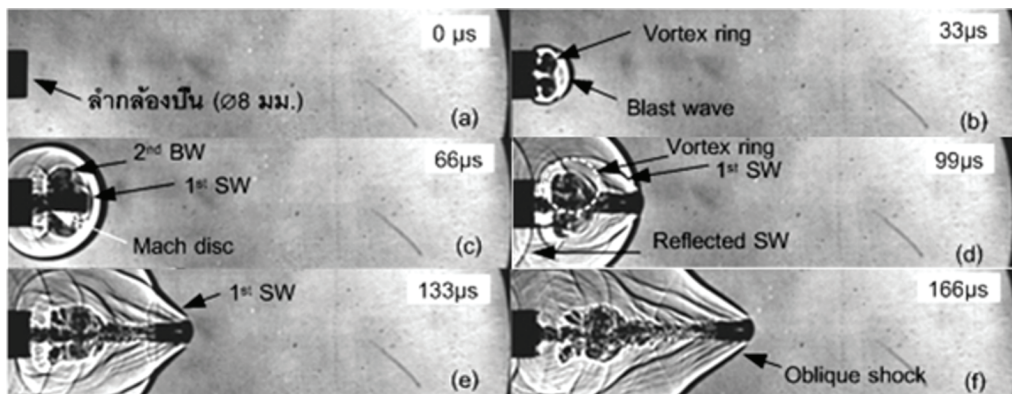
รูปที่ 7(b) แสดงคลื่นกระแทกระเบิด (Blast wave) หรือ Precursor shock wave ที่เกิดจากอากาศภายในลำกล้องปืนที่ถูกอัดจากการระเบิดขับเคลื่อนปืนในลำกล้อง ที่เวลา 66 ไมโครวินาที (μs) ในรูปที่ 7(c) Blast wave ขยายตัวขึ้นรอบลูกกระสุนปืนเป็นทรงบอลกลมเห็นได้อย่างชัดเจน และหลัง Blast wave โดยเฉพาะส่วนท้ายของลูกกระสุนปืน จะมองเห็นคลื่นกระแทกซ้อน (Multiple shock wave) ที่เกิดจากการระเบิดของดินปืนขับที่ขับเคลื่อนลูกกระสุนปืนออกมา ที่เวลา 99 ไมโครวินาที คลื่นกระแทกระเบิด หรือ Blast wave ขยายออกจนชนกับผนังห้องทดสอบและคลื่นกระแทกสะท้อนกลับ

(Reflected shock wave) ลูกกระสุนปืนมีความเร็วเหนือความเร็วเสียงทำให้เกิดคลื่นกระแทกแรก (1st shock wave) ขึ้น หลัง Blast wave ความเร็วของ Blast wave ต่ำกว่าความเร็วของลูกกระสุนปืน เห็นได้ชัดจากลูกกระสุนปืนเริ่มเคลื่อนที่ผ่าน Blast wave นอกจากนั้น ส่วนด้านหลังของลูกกระสุนปืนยังเกิดคลื่นกระแทกจากการระเบิดที่สอง (2nd blast wave) ซึ่งเป็นแรงขับเคลื่อนปืนที่ขับเคลื่อนลูกกระสุนปืนอย่างต่อเนื่อง แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนในรูปที่ 7(d) รูปที่ 7(e) และรูปที่ 7(f) คลื่นกระแทกเกิดขึ้นรอบ ๆ ลูกกระสุนปืน และยังเห็นการเปลี่ยนแปลงมุมของคลื่นกระแทก คลื่นกระแทกเฉียง หรือ Oblique shock wave นั้นแสดงว่าความเร็วของลูกกระสุนปืนยังเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังผลของความเร็วจากรูปที่ 6 ที่แสดงให้เห็นว่าลูกกระสุนปืนแบบ P.std ยังมีความเร็วที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

3.2.2 ผลของคลื่นกระแทกจากลูกกระสุนปืนแบบ P.r4

ในรูปที่ 8 เป็นภาพถ่ายคลื่นกระแทกที่กำเนิดจากลูกกระสุนปืนทรงกระบอกส่วนหัวโค้งมนรัศมี 4 มิลลิเมตร หรือ P.r4

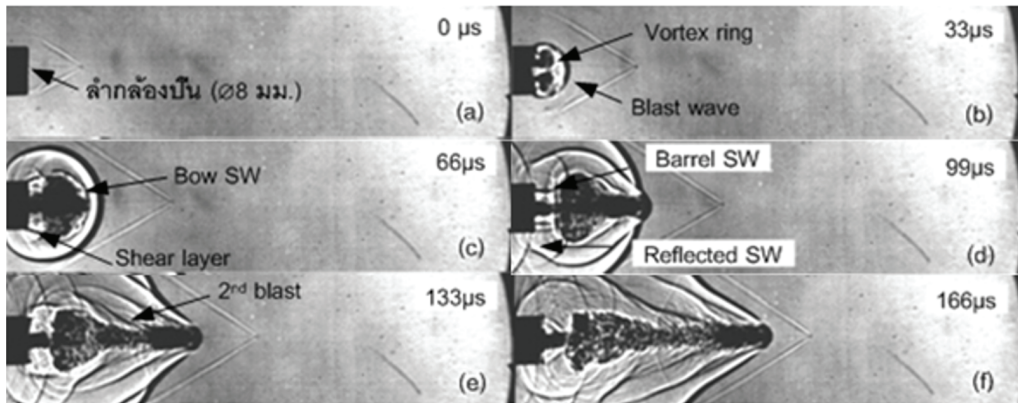
จากรูปที่ 8(b) จะเห็น Blast wave เกิดขึ้นเช่นเดียวกับรูปที่ 7 แต่ที่มองเห็นได้อย่างชัดเจนคือ การเกิดวงแหวนกระแสวน (Vortex ring) ที่ปลายกระบอกปืนก่อนที่ลูกกระสุนปืนจะถูกยิงออกมาจากกระบอกปืน สาเหตุของการเกิด Vortex ring คือ ความแตกต่างของความดันของแก๊สที่ถูกอัดในลำกล้องกับความแตกต่างภายนอก เมื่อความดันถูกอัดออกมาพ่นปลายลำกล้องปืน แรงต้านการเคลื่อนที่ (Drag force) ส่วนหน้าจะสูงประกบกับความดันด้านข้างต่ำกว่าจึงมีแนวโน้มตัวออกด้านข้าง ที่เวลา 66 ไมโครวินาที หลังจากที่ถูกยิงออกมา เกิด 1st shock wave ซึ่งเป็นคลื่นกระแทกที่เกิดจากการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงเหนือเสียงของลูกกระสุนปืนพร้อม ๆ กันกับคลื่นกระแทกจากการระเบิดที่สอง หรือ 2nd blast wave ที่เกิดจากแรงระเบิดของดินปืนขับ ส่วนด้านหลังของลูกกระสุนปืน มองเห็นจานแมค (Mach disc) ได้บ้าง เป็นคลื่นกระแทกที่เกิดจากความดันภายในและแรงต้านของแรงดันจากภายนอกที่มีความแตกต่างกัน ในช่วงเวลาสั้น ๆ แรงดันขับจากด้านหลังจึงพยายามเคลื่อนที่ออกทางด้านข้าง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 8(d) ที่เกิด Vortex ring ขึ้นอีกครั้งที่ด้านหลังลูกกระสุนปืน ในรูปที่ 8(e) และรูปที่ 8(f) พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของคลื่นกระแทกคลื่นกระแทกเป็น Oblique shock wave แสดงว่าลูกกระสุนปืนยังเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง



รูปที่ 8 คลื่นกระแทกจากลูกกระสุนปืนแบบ P.r4

3.2.3 ผลของคลื่นกระแทกจากลูกกระสุนปืนแบบ P.304

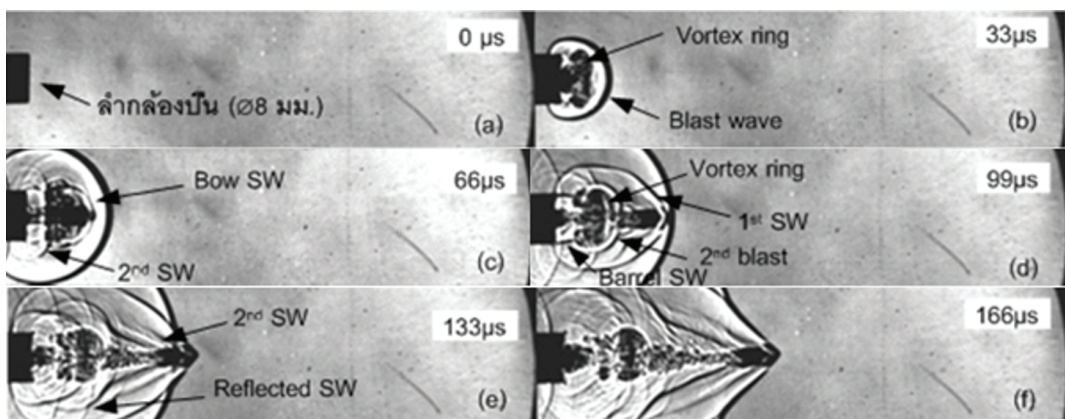
รูปที่ 9(b) ที่เวลาเริ่มต้น 33 ไมโครวินาที เกิด Vortex ring และ Blast wave เช่นเดียวกันกับกรณีอื่น ๆ แต่ที่เห็นได้ชัดก็คือ การเกิด Barrel shock wave และ Shear layer ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่ 33 - 66 ไมโครวินาที ในรูปที่ 9(c) และรูปที่ 9(d) นอกจากนี้คลื่นกระแทกที่ส่วนหัวของลูกกระสุนปืนมีลักษณะเป็นคลื่นกระแทกเฉียง Oblique shock wave แบบคลื่นกระแทกติด หรือ Attached shock wave เหมือนคลื่นกระแทกของกรณี P.r4 เนื่องจากลักษณะรูปร่างของลูกกระสุนปืนทั้งสองคล้ายคลึงกัน



รูปที่ 9 คลื่นกระแทกจากลูกกระสุนปืนแบบ P.304

3.2.4 ผลของคลื่นกระแทกจากลูกกระสุนปืนแบบ P.30

ในรูปที่ 10(b) ที่เวลาเริ่มต้น 33 ไมโครวินาที เกิด Vortex ring และ Blast wave เหมือนกรณีอื่น ๆ และที่เวลา 66 ไมโครวินาที เกิด Bow shock wave ขึ้นที่ด้านหน้าลูกกระสุนปืนแต่เป็นคลื่นกระแทกที่เกิดจากการระเบิดของดินปืนขับ รูปที่ 10(d) แสดงคลื่นกระแทกที่เกิดจากลูกกระสุนปืนหัวทรงกรวยแหลม มุม 30 องศา คลื่นกระแทกที่เกิดขึ้นมีรูปทรงเหมือนส่วนหัวของลูกกระสุนปืน มีลักษณะเป็น Oblique shock wave ที่เป็น Attached shock wave ชัดเจนและในช่วงเวลา 66 - 99 ไมโครวินาที ในรูปที่ 10(c) และรูปที่ 10(d) เกิดคลื่นกระแทกปลายกระบอกปืน และ Vortex ring ด้านหลังลูกกระสุนปืนอย่างชัดเจน



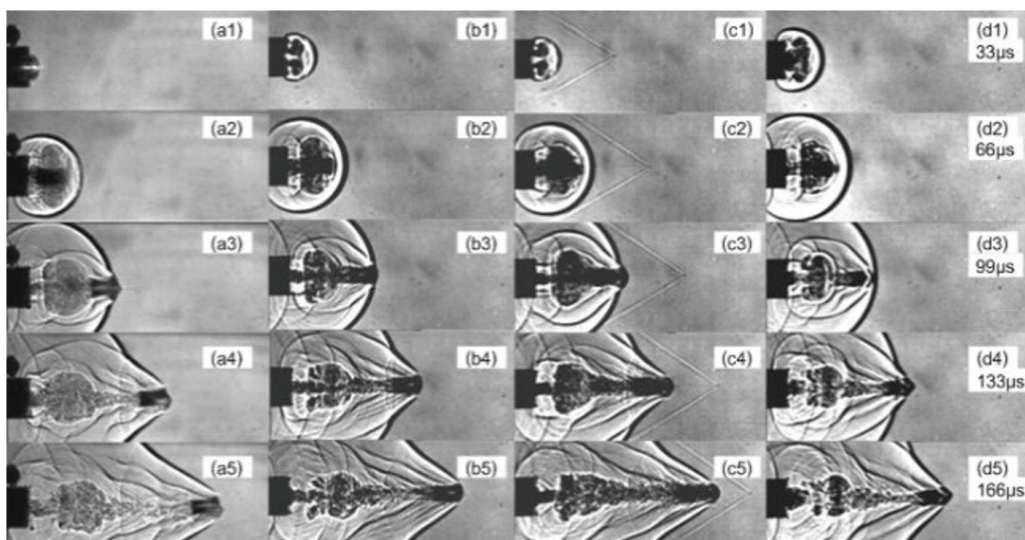
รูปที่ 10 คลื่นกระแทกจากลูกกระสุนปืนแบบ P.30

3.2.5 เปรียบเทียบคลื่นกระแทกของลูกกระสุนปืนแบบต่าง ๆ

ในรูปที่ 11 เปรียบเทียบภาพถ่ายลูกกระสุนปืนแบบ P.std (รูปที่ 7(a)) P.r4 (รูปที่ 8(b)) P.304 (รูปที่ 9(c)) และ P.30 (รูปที่ 10(d)) ที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ทุก 33 ไมโครวินาที และเนื่องจากลูกกระสุนปืนแบบ P.45 มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับลูกกระสุนปืนแบบ P.30 มาก ดังนั้นผลการทดลองที่ได้จากภาพถ่ายจึงใกล้เคียงกัน และผลของความเร็วในรูปที่ 6 ที่มีความเร็วเริ่มต้น ความเร็วสุดท้ายและแนวโน้มของความเร็วไม่ต่างกัน ดังนั้นการเปรียบเทียบของการทดลองจากภาพถ่ายจึงไม่ได้นำมาเสนอ

ในช่วงเวลาเริ่มต้นของภาพที่บันทึกได้ (ที่ 33 ไมโครวินาที) พฤติกรรมของคลื่นกระแทกที่เกิดขึ้นนั้นไม่แตกต่างกัน คือ Blast wave จากอากาศที่ถูกอัดด้านหน้าของลูกกระสุนปืนมีลักษณะรูปทรงเป็นลูกบอลกลม และเกิด

Vortex ring อยู่ด้านใน แต่ Blast wave ที่เกิดจากลูกกระสุนปืน P.30 (รูปที่ 11(d1)) ซึ่งมีความเร็วต่ำกว่าลูกกระสุนปืนชนิดอื่น (ความเร็วประมาณ 380 เมตรต่อวินาที) มีขนาดใหญ่กว่า Blast wave ของลูกกระสุนปืนแบบอื่น สาเหตุที่เห็นได้ชัดจากภาพคือแรงระเบิดจากดินปืนขับสามารถรื้อไหลผ่านผนังกระบอกปืนกับผิวด้านข้างของลูกกระสุนปืนได้ เพราะพื้นที่ผิวด้านข้างของลูกกระสุนปืนที่สัมผัสผนังลำกล้องปืนน้อย ทำให้ Blast wave ที่เกิดขึ้นรุนแรงกว่าและทำให้แรงขับเคลื่อนลูกกระสุนปืนต่ำ ความเร็วของลูกกระสุนปืนจึงต่ำ รูปที่ 11(b1) และรูปที่ 11(c1) เป็นภาพถ่ายของลูกกระสุนปืน P.r4 กับ P.304 มีขนาดและรูปทรงของ Blast wave ที่ไม่แตกต่างกัน ความเร็วของลูกกระสุนปืนใกล้เคียงกันมาก ดังกราฟความเร็วที่แสดงในรูปที่ 5 ความเร็วที่สูงเกิดจากแรงขับเคลื่อนของดินปืนที่สูงกว่าแบบ P.30 แรงต้านการเคลื่อนที่ของผิวสัมผัสด้านข้างกับแรงต้านด้านหน้าต่ำกว่าแบบ P.std นอกจากนี้ ภาพของ Blast wave กรณีลูกกระสุนปืน P.std ไม่ชัด แสดงถึงความดันอัดตัวของอากาศด้านหน้าลูกกระสุนปืนต่ำ (และการรื้อไหลของแรงขับเคลื่อนด้านหลังลูกปืนน้อย) ความเร็วของลูกกระสุนปืนเริ่มต้นต่ำกว่าลูกกระสุนปืน P.r4 กับ P.304 เนื่องจากพื้นที่ผิวผนังด้านข้างมีแรงเสียดทานสูง ในช่วงเวลาที่ 66 ไมโครวินาที



รูปที่ 11 เปรียบเทียบพฤติกรรมของคลื่นกระแทก

เห็นได้ชัดเจนว่า Blast wave ขยายตัวขึ้นเหมือนกันทุกกรณี พฤติกรรมของคลื่นกระแทกด้านหน้าและด้านหลังของลูกกระสุนปืนไม่แตกต่างกัน คือ Bow shock wave หรือ 2^{nd} blast wave เกิดขึ้นพร้อมกัน และเกิดขึ้นพร้อมกับ Shear layer ด้านหลังลูกกระสุนปืนยกเว้นกรณี P.std (รูปที่ 10(a2)) ที่ไม่ค่อยชัดเจน ช่วงเวลา 99 ไมโครวินาที นั้น 2^{nd} blast wave ขยายตัวออก คลื่นกระแทกที่เกิดจากลูกกระสุนปืนเกิดขึ้นที่ส่วนหัวของลูกกระสุนปืนเห็นได้ชัดเจนขึ้นเหมือนกันทุกกรณี กรณีของคลื่นกระแทกที่เกิดจากลูกกระสุนปืนแบบ P.30 (รูปที่ 10(d)) เห็นได้ชัดเจนที่สุดว่ามีรูปทรงเหมือนหัวกระสุนปืน ส่วนหางของคลื่นกระแทกม้วนกลับเข้าหาแกนกลางเนื่องจากความแตกต่างของความดันที่เกิดจากการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงจึงเกิดการเหนี่ยวนำส่วนท้ายของลูกกระสุนปืน ท้ายสุดของการเคลื่อนที่ของลูกกระสุนปืนที่แสดงในรูป คือช่วงเวลา 133 - 166 ไมโครวินาที นั้น คลื่นกระแทกยังเห็นได้อย่างชัดเจน 3 คลื่นหลัก ๆ เหมือนกันทุกกรณี นั่นคือ

1. Blast wave หรือ Precursor shock wave ส่วนหน้าของลูกกระสุนปืน รวมถึงคลื่นกระแทกที่เกิดจากลูกกระสุนปืน หรือ 1st shock wave
2. คลื่นกระแทกที่สองที่เกิดจากลูกกระสุนปืน หรือ 2^{nd} shock wave
3. Blast wave ที่เกิดจากดินปืนขับส่วนหลังของลูกกระสุนปืน หรือ 2^{nd} blast wave ที่เคลื่อนที่ตามส่วนหางของลูกกระสุนปืนเนื่องจากการระเบิดของดินปืนขับและเหนี่ยวนำของลูกกระสุนปืน

4. สรุป (Conclusion)

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยพื้นฐานเพื่อใช้เทคนิคการโดว์กราฟศึกษาพฤติกรรมของคลื่นกระแทก พฤติกรรมของคลื่นกระแทกกำเนิดจากรูปร่างของลูกกระสุนปืนที่แตกต่างกัน ผลการทดลองที่ได้จากเทคนิคการโดว์กราฟถูกบันทึกด้วยกล้องถ่ายภาพเคลื่อนไหวความเร็วสูง ที่ความเร็วของลูกกระสุนปืนสูงสุดประมาณ 780 เมตรต่อวินาที ที่กำเนิดจากลูกกระสุนปืนทรงกระบอกหัวเรียบ หัวมน และหัวกรวยตัด หรือที่ความเร็วเฉลี่ยประมาณ 550 เมตรต่อวินาที จากลูกกระสุนปืนทรงกระบอกหัวทรงกรวย 30 องศา และ 45 องศา สามารถมองเห็นพฤติกรรมของคลื่นกระแทกได้ชัดเจน

ดังนั้น เทคนิคการโดว์กราฟจะเป็นประโยชน์ในการศึกษาคลื่นกระแทก โดยเฉพาะการกำเนิดคลื่นกระแทกจากเครื่องมือทางการแพทย์ เพื่อทำการพัฒนาเครื่องมือทางการแพทย์และพฤติกรรมของคลื่นกระแทกให้เหมาะสมกับผู้ป่วยหรือชนิดของโรคต่อไปในอนาคต นอกจากนี้แล้วพฤติกรรมของคลื่นกระแทกยังแสดงถึงความเร็วของวัตถุ ชนิดของกระสุนปืน และวิถีกระสุนได้

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีที่ให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะในการทำวิจัย และเครื่องมือ ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์ ที่สนับสนุนการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Kennedy CF, Field JE. Damage threshold velocities for liquid impact. J Mater Sci. 2000;35:5331-9.
- [2] Field JE, Camus JJ, Tinguely M, Obreschkow D, Farhat M. Cavitation in impacted drops and jets and the effect on erosion damage threshold. Wear. 2012;290:154-60.
- [3] Gohardani O, Williamson DM, Hammond DW. Multiple liquid impacts on polymeric matrix composites reinforced with carbon nanotubes. Wear. 2012;294:336-46.
- [4] Settles GS. High-speed imaging of shock waves explosions and gunshots. Am Sci. 2006;94(1):22-31.
- [5] Shergold OA, Fleck NA, King TS. The penetration of a soft solid by a liquid-jets, with application to the administration of a needle-free injection. J Biomech. 2006;39(14):2593-602.
- [6] ปริญา เลิศสินไทย. การรักษาด้วยคลื่นช็อกในความผิดปกติระบบโครงสร้างกระดูกและกล้ามเนื้อ. J Med Tech Phy Ther. 2015;27(2):107-24.
- [7] วลัยลักษณ์กุลไทย, ฌาก ฟองอักชร. การศึกษาเปรียบเทียบผลของคลื่นกระแทกชนิดเรเดียลกับคลื่นเสียงความถี่สูงในการลดอาการปวดในผู้ป่วยโรคข้อเข่าเสื่อม. J Thai Rehabil Med. 2017;27(1):18-24.
- [8] Shrivastava SK, Kailash, Shock wave treatment in medicine. J Biosci. 2005;30(2):269-75.
- [9] Libal U, Spyra K. Wavelet based shock wave and muzzle blast classification for different supersonic projectiles. Expert Syst Appl. 2014;41(11):5079-104.
- [10] Jiang Z, Huang Y, Takayama K. Shocked flows induced by supersonic projectiles moving in tubes. Comput Fluids. 2004;33(7):953-66.
- [11] Horii T, Kasahara J, Endo T, Fujiwara T. Experimental studies on supersonic combustion phenomena of CO-O₂-H₂ premixed gases around hypersonic projectiles. JSME Int J, Ser B. 1998;41(2):316-21.
- [12] Hao B, Lu YG, Dai H. Ballistic characteristics of high-speed projectiles entering water vertically. J Appl Fluid Mech. 2023;16(10):1962-73.

- [13] Chen T, Guo Z, Zhao G, Zhang W. A discrete method and experimental study for the propagation of shock wave induced by high-speed projectile entering water-filled tanks. *Ocean Engineering*. 2022;248:1-15.
- [14] Toker G, Korneev N. Disappearance of holographic and interference fringes accompanies optical diagnostics of a supersonic bow shock flow. *Optik*. 2008;119(3):112-6.
- [15] Jiang Z. Wave dynamic processes induced by a supersonic projectile discharging from a shock tube. *Phys Fluids*. 2003;15(6):1665-75.
- [16] Sukhon TA. Comparison of the effectiveness of radial shock wave therapy (RSWT) and deep friction massage (DFM) in myofascial pain syndrome of upper trapezius. *Medical Journal of Srisaket Surin Buriram Hospitals*. 2018;33(2):129-44.
- [17] Ladawan S. Comparison of ureteroscopy versus extracorporeal shockwave lithotripsy in the treatment of distal ureteral stones. *Region 4-5 Medical Journal*. 2016;35:114-23.
- [18] Sittiwong W, Seehanam W, Pianthong K. Effect of projectile shape on wave behavior in solid. *Journal of Science Ladkrabang*. 2015;24(1):1-5.