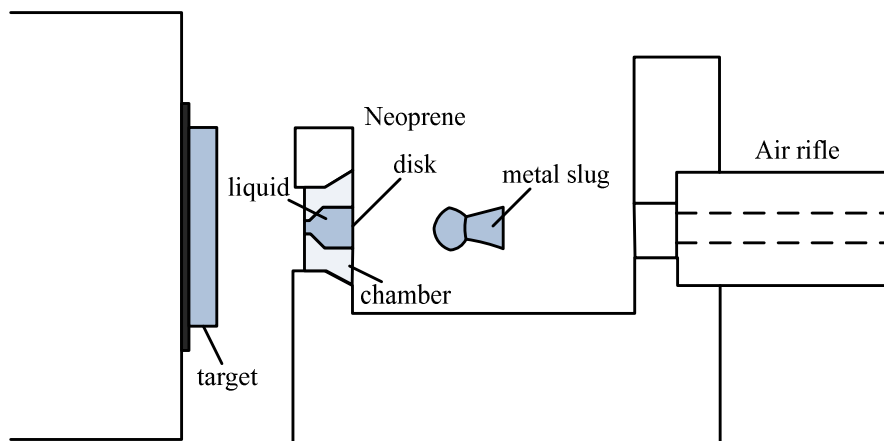


บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 การผลิตลำพุ่งความเร็วสูง

ในการศึกษานี้การผลิตลำพุ่งความเร็วสูงจะใช้เทคนิคที่เรียกว่า impact driven method หรือ Bowden and Brunton method ดังรูปที่ 3.1 [37] ซึ่งเรียกตามหลักการในการผลิตลำพุ่งจากการยิงกระสุนปืนความเร็วสูง (high-speed projectile) เข้าไปกระทบกับของเหลวซึ่งบรรจุอยู่ในหัวฉีด (nozzle) โมเมนต์ดัมของกระสุนปืนจะทำให้ความดันของของเหลวมีค่าสูงขึ้นจนกระทั่งความดันประมาณ GPa จากนั้นของเหลวก็จะฉีดออกมาจากหัวฉีดด้วยความเร็วสูง ซึ่งเป็นการฉีดลำพุ่งจากการกระทบของกระสุนปืนเอง ซึ่งจะเห็นได้ว่า กระสุนปืนความเร็วสูงมีความจำเป็นสำหรับการผลิตลำพุ่งด้วยเทคนิค ซึ่งในการศึกษานี้จะยิงกระสุนปืนความเร็วสูงหรือผลิตลำพุ่งความเร็วสูงจากชุดทดลองที่เรียกว่า Horizontal Single Stage Powder Gun (HSSPG) ดังรูปที่ 3.2 โดยในบทนี้จะศึกษาถึงสมรรถนะของชุดทดลองและความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของดินปืนกับความเร็วของกระสุนปืนที่ผลิตได้เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการผลิตลำพุ่งในการศึกษานี้



รูปที่ 3.1 Impact driven method หรือ Bowden and Brunton method [37, 38]

3.2 ชุดทดลอง Horizontal single-state powder gun

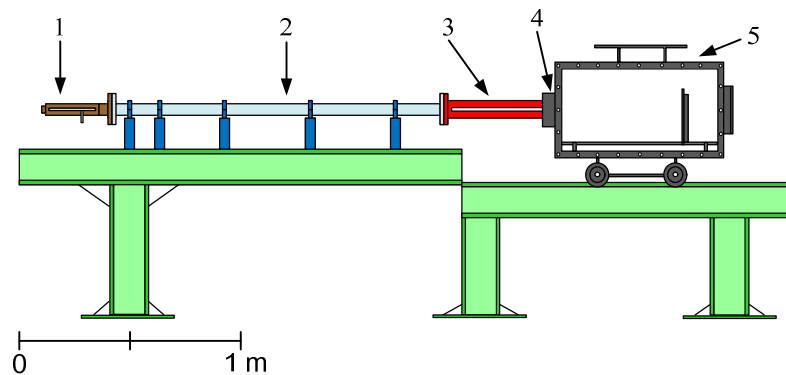
ดังรูปที่ 3.2 แสดงชุดทดลอง Horizontal Single Stage Powder Gun (HSSPG) ที่ถูกสร้างขึ้นในแนวนอน ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญ 5 ส่วน คือ

1. ชุดปล่อยกระสุนปืน (launcher หรือ powder gun) (หมายเลข 1 ในรูปที่ 3.2) ทำหน้าที่คล้ายปืน โดยเป็นตัวขับเคลื่อนซึ่งแรงขับเคลื่อนเกิดจากการจุดระเบิดของดินปืนในห้องเผาไหม้ จะประกอบด้วยเข็มแทงชนวน (firing pin) ทำหน้าที่กระแทกชนวน (primer) ที่อยู่ส่วนท้ายของปลอกกระสุนซึ่งบรรจุดินปืนภายในโดยดินปืนที่ใช้เป็นชนิดที่มีควันน้อย (smokeless powder) โดยมีรายละเอียดการออกแบบดังแสดงในภาคผนวก ก

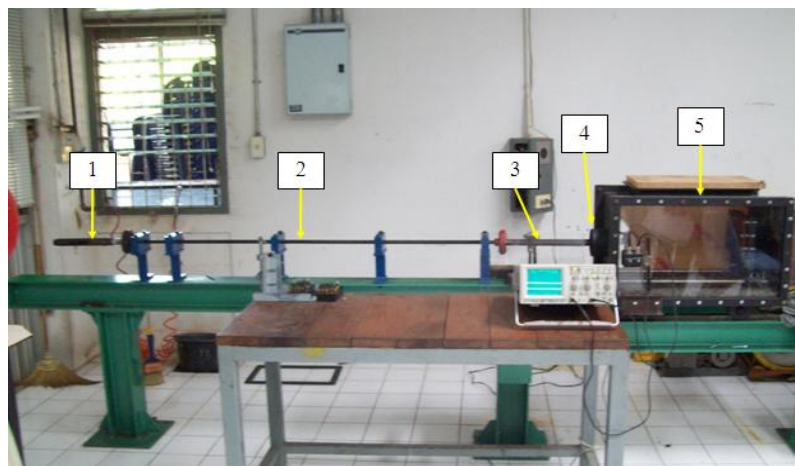
2. ท่อส่งกระสุนปืน (launch tube) (หมายเลข 2 ในรูปที่ 3.2) ทำหน้าที่คล้ายลำกล้องปืน ใช้ควบคุมทิศทางการขับเคลื่อนกระสุนปืนและเพิ่มความเร็วของกระสุนปืนก่อนที่จะไปยังท่อระบายความดัน มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 8 mm ยาว 1.5 m ที่ส่วนปลายด้านหนึ่งของท่อจะยึดติดกับท่อระบายความดัน (pressure relief section)

3. ท่อระบายความดัน (pressure relief section) (หมายเลข 3 ในรูปที่ 3.2) ทำหน้าที่ระบายแรงอัดอากาศที่อยู่ส่วนหน้าของกระสุนปืนที่ถูกอัดในท่อ เพื่อลดแรงต้านและแรงอัดภายในท่อส่งกระสุนปืนและป้องกันอากาศกระแทกบนของเหลวที่บรรจุในหัวฉีดก่อนการกระแทกของกระสุนปืน มีความยาว 40 cm เจาะเป็นช่องขนาด 3 mm ตามแนวยาวทั้ง 4 ด้าน

4. ส่วนประกอบหัวฉีด (nozzle assembly) (หมายเลข 4 ในรูปที่ 3.2) ทำหน้าที่ยึดจับหัวฉีดไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ระหว่างทำการทดลอง ซึ่งถูกติดตั้งระหว่างห้องทดสอบกับท่อระบายความดัน



(a)

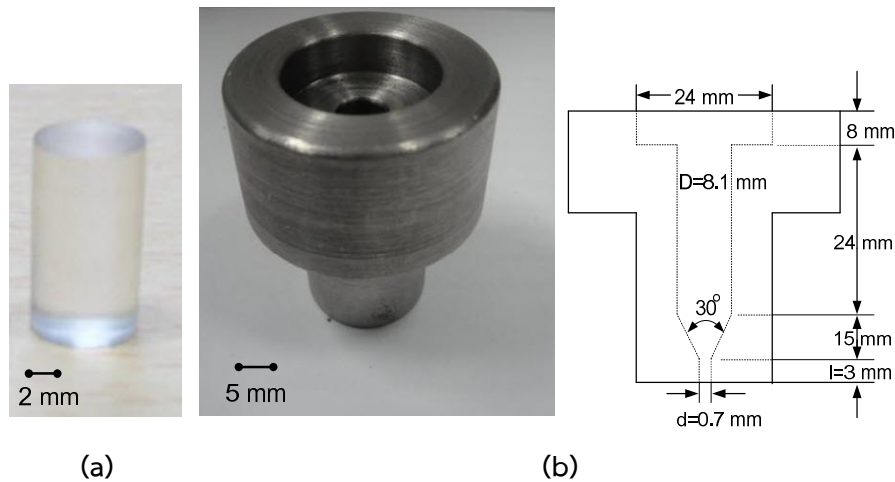


(b)

รูปที่ 3.2 ชุดทดลอง (a) แผนภาพชุดทดลอง (b) ภาพถ่ายชุดทดลอง Horizontal single stage powder gun (HSSPG)

5. ห้องทดสอบ (test chamber) (หมายเลข 5 ในรูปที่ 3.2) ได้ถูกออกแบบให้เป็นถังรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าหนา 5 mm มีขนาดกว้าง 39.5 cm ยาว 60 cm และสูง 35 cm ฝาด้านข้างทั้งสองด้านเป็นแผ่นอะคริลิกใส หนา 25 mm ใช้เป็นหน้าต่างสำหรับสังเกตพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในการเก็บข้อมูลการทดลอง

ในการทดลองนี้ใช้กระสุนปืนที่ทำมาจาก Polymethyl Methacrylate (PMMA) ทรงกระบอกมีความยาว 15 mm ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8.05 mm น้ำหนัก 0.92 g และหัวฉีดที่ใช้ในการผลิตลำพุ่งความเร็วสูงมีรูปทรงกรวยมุม 30° ทำมาจากเหล็ก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่บรรจของเหลว $D = 8.1$ mm ขนาดของรูหัวฉีด $d = 0.7$ mm และความยาวของรูหัวฉีด $l = 3$ mm ดังรูปที่ 3.3

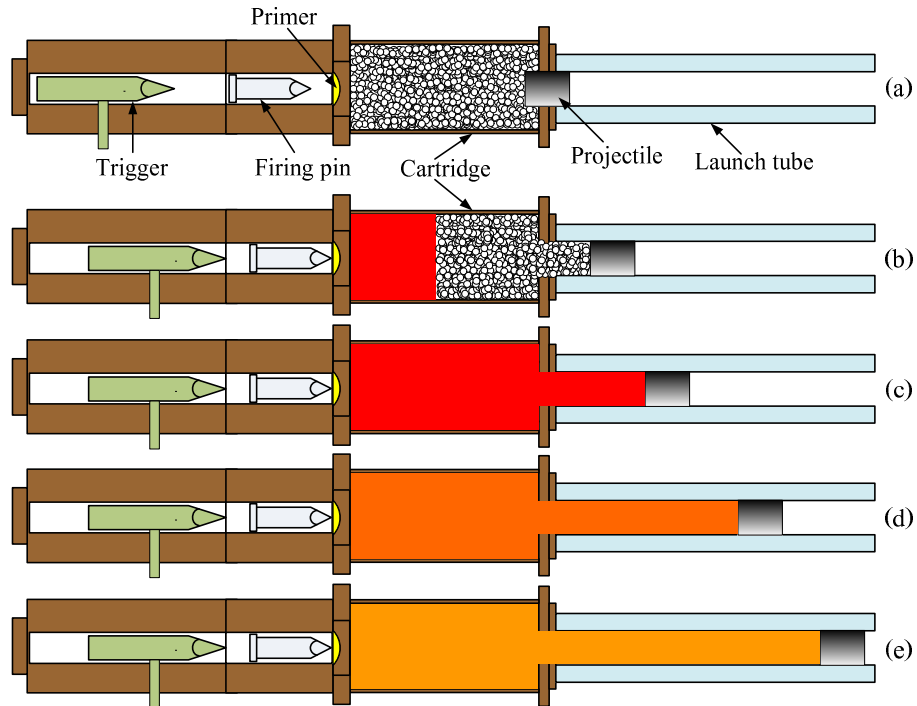


รูปที่ 3.3 (a) กระสุนปืน และ (b) หัวฉีดที่ใช้ในการทดลอง

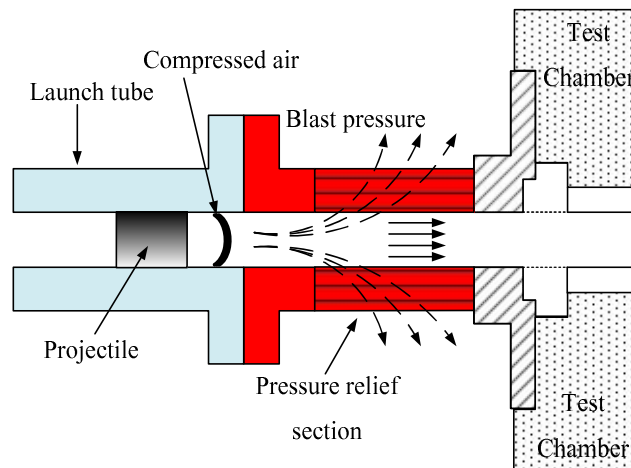
3.3 วิธีทำการทดลอง

จากรูปที่ 3.4 แสดงขั้นตอนการยิงกระสุนปืนของชุดทดลอง HSSPG ก่อนทำการยิงกระสุนปืน จะทำการชั่งดินปืนน้ำหนัก ซึ่งน้ำหนักของกระสุนปืนซึ่งจะมีน้ำหนัก 0.92 g ทำการใส่ดินปืนและบรรจุกระสุนปืนในปลอกกระสุน (cartridge) ซึ่งลึกจากด้านหน้าของปลอกกระสุนประมาณ 10 mm โดยที่ตัวจุดระเบิดจะติดอยู่ท้ายของปลอกกระสุน จากนั้นนำมาประกอบกับชุดปล่อยกระสุน (launcher) จากรูปที่ 3.4(a) จะเป็นขั้นตอนก่อนจุดระเบิด โดยภายในปลอกกระสุน (cartridge) จะมีดินปืนชนิดไร้ควัน (smokeless powder) อยู่เต็มกระบอก ซึ่งกระสุนปืนจะอยู่ระหว่างปลอกกระสุนกับท่อส่งกระสุนปืน (launch tube) และจะมีตัวจุดระเบิด (primer) อยู่ส่วนท้ายของปลอกกระสุน เมื่อเข็มแทงชนวนกระแทกตัวจุดระเบิดจะทำให้เกิดการเผาไหม้ของดินปืนภายในปลอกกระสุน ดังรูปที่ 3.4(b) หลังจากนั้นดินปืนจะเผาไหม้จนหมดอย่างรวดเร็วและทำให้เกิดความดันที่สูงมากภายในปลอกกระสุน จนทำให้กระสุนปืนเคลื่อนที่ออกไปข้างหน้าภายในท่อส่งกระสุนปืนดังรูปที่ 3.4(c) หลังจากทีกระสุนปืนเคลื่อนที่ไปข้างหน้าซึ่งเป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นในการยิงกระสุนในชุดทดลอง จากนั้นความดันภายใน

กระบอกปืนและท่อส่งกระสุนปืนจะมีความดันลดลงจนมีความดันปกติ ดังรูปที่ 3.4(d-e) ซึ่งถือว่าสิ้นสุดการทำงานของชุดทดลอง (รายละเอียดวิธีทำการทดลองแสดงในภาคผนวก ข)



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการยิงของชุดทดลอง HSSPG : (a) ก่อนจุดระเบิด, (b) การจุดระเบิด, (c) ดินปืนเผาไหม้หมด, (d) หลังจากดินปืนเผาไหม้หมด และ (e) การยิงกระสุนปืน



รูปที่ 3.5 การระบายอากาศด้านหน้ากระสุนปืน

รูปที่ 3.5 แสดงการระบายอากาศด้านหน้ากระสุนปืน เมื่อกระสุนปืนความเร็วสูงเคลื่อนที่ตามท่อส่งกระสุนปืน (launch tube) มาจนกระทั่งถึงที่ระบายความดัน (pressure relief section) จะ

พบว่า ท่อระบายความดันจะช่วยระบายแรงอัดอากาศที่อยู่ส่วนหน้าของกระสุนปืนออกภายนอกท่อ เพื่อลดแรงต้านและป้องกันไม่ให้อากาศกระแทกของเหลวในหัวฉีดก่อนการกระแทกของกระสุนปืน

3.4 การวัดความเร็วของกระสุนปืน

การวัดความเร็วของกระสุนปืนในการทดลองนี้ใช้หลักการการตัดแสงเลเซอร์ของวัตถุ (laser beam interruption method) หรือ time of flight method โดยใช้ไดโอดกำเนิดแสงเลเซอร์ และไดโอดรับแสงจำนวน 3 ชุด โดยต่อสัญญาณ sensor เข้ากับ oscilloscope เพื่ออ่านสัญญาณไฟฟ้าจากไดโอดรับแสงและแสดงผลบนหน้าจอ ซึ่งเป็น dual trace oscilloscope (ออสซิลโลสโคปสองแชนแนล) จำนวน 2 เครื่อง โดยเครื่องที่ 1 ใช้กับสัญญาณ sensor ชุดที่ 1 กับ 2 และเครื่องที่ 2 ใช้กับสัญญาณ sensor ชุดที่ 2 และ 3 โดยในการทดลองนี้ได้จัดวางระยะห่างของ Sensor ชุดที่ 1 กับ 2 ไว้ที่ระยะ 105 mm และ sensor ชุดที่ 2 กับ 3 ไว้ที่ระยะ 33 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่งเทคนิคนี้สามารถวัดความเร็วของลำพุ่งได้เช่นกัน

เมื่อทำการทดลองยิงกระสุนปืนแล้ว sensor ก็จะสามารถจับสัญญาณของกระสุนปืนหรือลำพุ่งที่ออกจากหัวฉีดได้ โดยสัญญาณจะแสดงบนเครื่อง oscilloscope ดังรูปที่ 3.6 จากนั้นจะทำการวัดความแตกต่างของเวลาที่ส่วนหัวของกระสุนปืนที่ตัดแสงเลเซอร์ชุดที่ 1 และ 2 ซึ่งสามารถคำนวณหาความเร็วได้จากสมการ

$$V = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (3.1)$$

เมื่อ

V คือ ความเร็ว

Δs คือ ระยะห่างของ laser beam ชุดที่ 1 กับ laser beam ชุดที่ 2

Δt คือ เวลาที่วัดได้จากเครื่อง oscilloscope

ตัวอย่างการคำนวณหาความเร็วของลูกกระสุนจากรูปที่ 3.7

$$\text{จาก } V_1 = \frac{\Delta s_1}{\Delta t} ; \quad \text{จะได้ } V_1 = \frac{105 \times 10^{-3} m}{(263 - 132.5) \times 10^{-6} s}$$

$$V_1 = 804.6 \text{ m/s}$$

ดังนั้นความเร็วของกระสุนปืนเท่ากับ 804.6 m/s

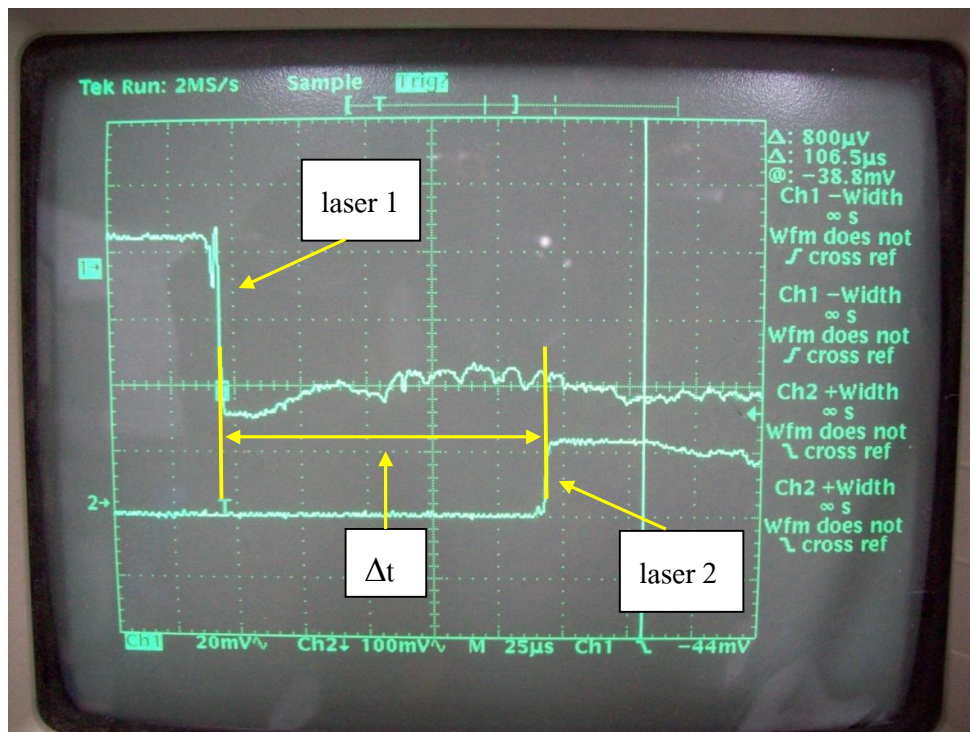
ตัวอย่างการคำนวณหาความเร็วของลูกกระสุนจากรูปที่ 3.8

$$\text{จาก } V_2 = \frac{\Delta s_2}{\Delta t} ; \quad \text{จะได้ } V_2 = \frac{33 \times 10^{-3} m}{(216 - 177) \times 10^{-6} s}$$

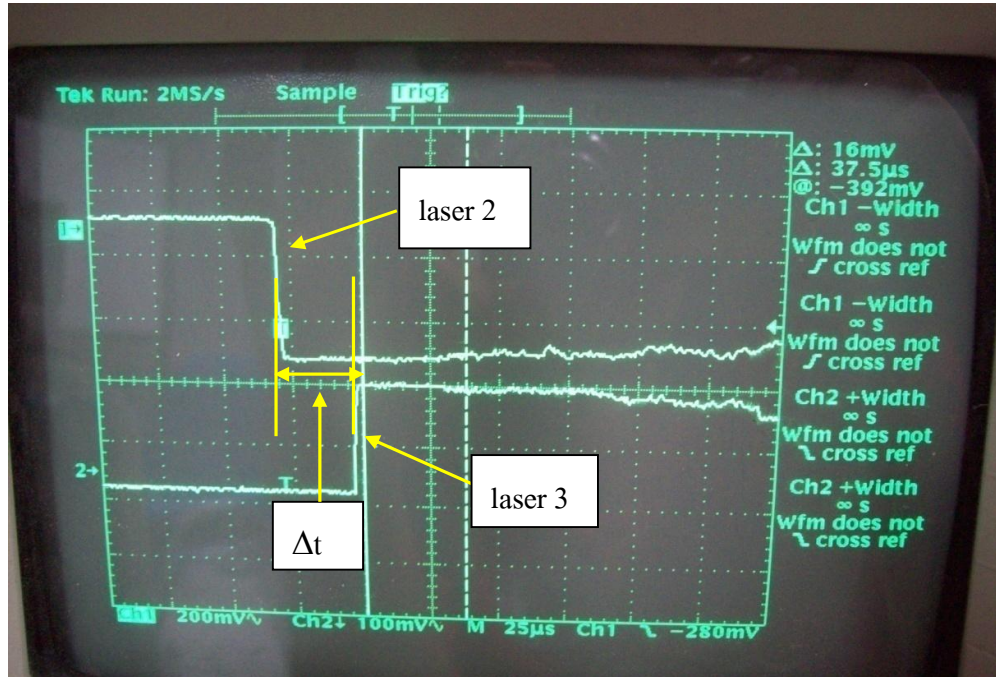
$$V_2 = 846.15 \text{ m/s}$$

ดังนั้นความเร็วของกระสุนปืนเท่ากับ 846.15 m/s

รูปที่ 3.6 การวัดความเร็วกระสุนปืนด้วยเทคนิค time of flight method



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างสัญญาณที่วัดได้จาก laser beam ชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ($\Delta s_1 = 105$ mm) บนหน้าจอ oscilloscope เครื่องที่ 1



รูปที่ 3.8 ตัวอย่างสัญญาณที่วัดได้จาก laser beam ชุดที่ 2 และชุดที่ 3 ($\Delta s_2 = 33 \text{ mm}$) บนหน้าจอ oscilloscope เครื่องที่ 2

3.5 สมรรถนะของชุดทดลอง

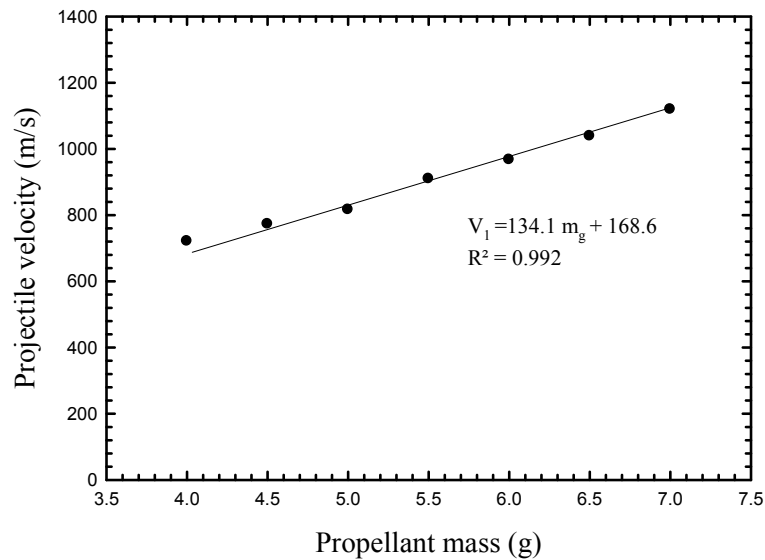
จากการทดลองเพื่อหาสมรรถนะในการผลิตความเร็วของกระสุนปืนของชุดทดลองโดยใช้ น้ำหนักดินปืน 4 g, 4.5 g, 5 g, 5.5 g, 6 g, 6.5 g และ 7 g จากการวัดความเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ใช้ laser 3 ชุด สามารถหาความสัมพันธ์ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของดินปืน (g) และความเร็วของกระสุนปืน (m/s) ที่ระยะ Δs_1 ได้ดังรูปที่ 3.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของดินปืนและความเร็วของกระสุนปืนที่ระยะ Δs_1 จากภาพแสดงว่าความเร็วของกระสุนปืนจะเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักของดินปืนเพิ่มขึ้น โดยที่ความเร็วต่ำสุดของกระสุนปืนเท่ากับ 721 m/s ที่น้ำหนักของดินปืนในการขับ 4 g และความเร็วสูงสุดของกระสุนปืนเท่ากับ 1,119 m/s ที่น้ำหนักของดินปืนในการขับ 7 g จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของดินปืนและความเร็วของกระสุนปืนสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$V_1 = 134.1m_g + 168.6 \quad (3.2)$$

เมื่อ

V_1 คือ ความเร็วเฉลี่ยของกระสุนปืน (m/s) ในท่อส่งกระสุนปืน (launch tube)

m_g คือ น้ำหนักของดินปืน



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของดินปืนและความเร็วของกระสุนปืนที่ระยะ Δs_1

จากรูปที่ 3.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของดินปืนและความเร็วของกระสุนปืนที่ระยะ Δs_2 จากภาพแสดงว่าความเร็วของกระสุนปืนจะเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักของดินปืนเพิ่มขึ้น โดยที่ความเร็วต่ำสุดของกระสุนปืนเท่ากับ 873 m/s ที่น้ำหนักของดินปืนในการขับ 4 g และความเร็วสูงสุดของกระสุนปืนเท่ากับ 1,294 m/s ที่น้ำหนักของดินปืนในการขับ 7 g จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของดินปืนและความเร็วของกระสุนปืนสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

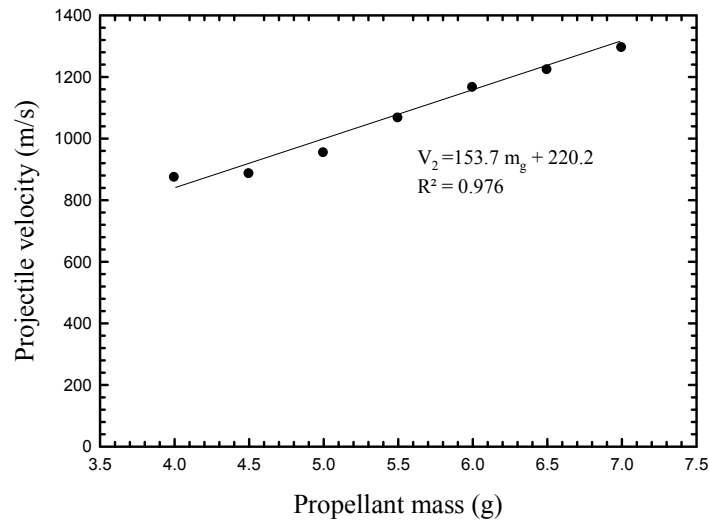
$$V_2 = 153.7m_g + 220.2 \quad (3.3)$$

เมื่อ

V_2 คือ ความเร็วเฉลี่ยของกระสุนปืน (m/s) ในห้องทดสอบ (test chamber)

m_g คือ น้ำหนักของดินปืน

โดยในการทดลองนี้ใช้ความเร็วของกระสุนปืนประมาณ 950 ± 30 m/s ในการผลิตลำพุ่งจากการใช้ดินปืน 5 g

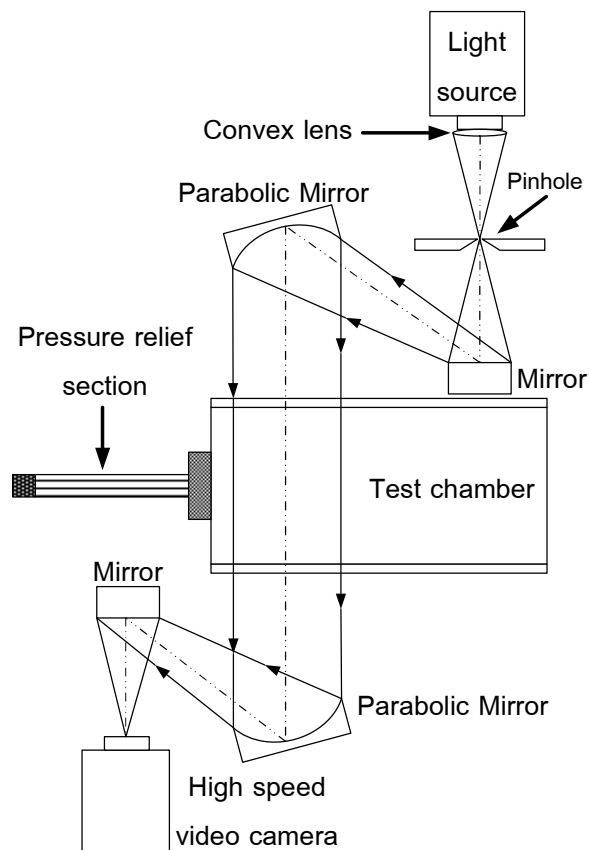


รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของดินปืนและความเร็วของกระสุนปืนที่ระยะ Δs_2

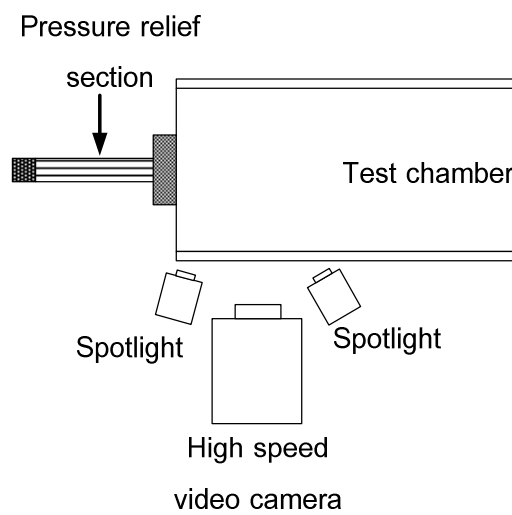
3.6 การถ่ายภาพ (Visualization)

เนื่องจากพฤติกรรมของลำพ่นที่เกิดขึ้นนั้นเป็นความเร็วระดับเหนือเสียง (supersonic) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในระดับไมโครวินาที (μs) ซึ่งไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า หรือจากกล้องถ่ายภาพทั่วไป ดังนั้นการศึกษานี้จึงใช้กล้องวิดีโอความเร็วสูง (high-speed digital video camera) ยี่ห้อ photron รุ่น FASTCAM SA5 ที่ความเร็วของการถ่ายภาพเท่ากับ 30,000 fps และความเร็วชัตเตอร์ (shutter speed) 1 μs โดยถ่ายภาพร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph ดังแสดงในรูปที่ 3.11 โดยแหล่งกำเนิดแสง (light source) ในการศึกษาที่ใช้หลอดซีนอน (xenon) 3500/4300 K ซึ่งจะส่องแสงออกมาผ่านเลนส์นูน (convex lens) เพื่อรวมแสงและส่องผ่านรูเข็ม (pinhole) ซึ่งทำหน้าที่ตัดแสงที่กระจายออกจากเลนส์นูน แสงจะกระทบกระจกผิวโค้ง (parabolic mirror) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 cm ความยาวโฟกัส 1.5 m ซึ่งทำหน้าที่จัดลำแสงให้ขนานผ่านห้องทดสอบ โดยแสงที่ผ่านห้องทดสอบหากมีพฤติกรรมการไหลที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของของไหลในห้องทดสอบแสงจะเกิดการหักเห โดยแสงที่หักเหจะกระทบกระจกผิวโค้งอีกบานเพื่อรวมแสง เนื่องจากพื้นที่ในห้องทดลองมีจำกัดจึงใช้กระจกเงา (plane mirror) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 19 cm จำนวน 2 บาน ช่วยในการสะท้อนแสงเพื่อลดระยะภายในห้องทดสอบ จากนั้นแสงจะฉายลงจอรับภาพของกล้องวิดีโอความเร็วสูงและจะถูกบันทึกภาพไว้

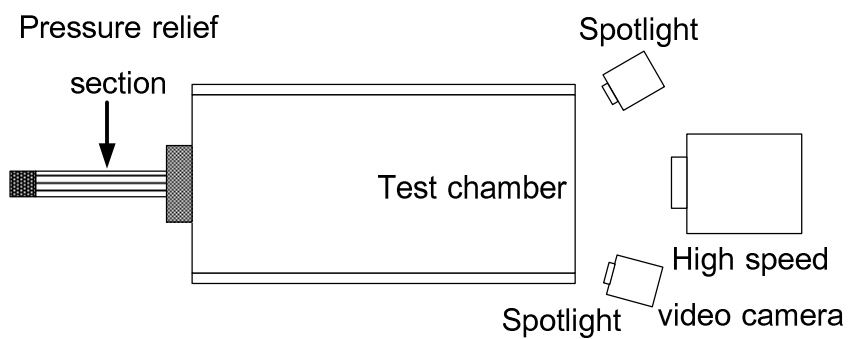
จากรูปที่ 3.12 แสดงการติดตั้งกล้องวิดีโอความเร็วสูงในมุมมองปกติโดยไม่มีการติดตั้งระบบการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph ซึ่งจะมีสปอร์ตไลท์ จำนวน 2 ตัวเป็นแหล่งกำเนิดแสงโดยพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจะถูกบันทึกโดยกล้องวิดีโอความเร็วสูงโดยตรง และรูปที่ 3.13 แสดงการติดตั้งกล้องวิดีโอความเร็วสูงในแนวแกนโดยไม่มีการติดตั้งระบบการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph ซึ่งจะมีสปอร์ตไลท์ จำนวน 2 ตัวเป็นแหล่งกำเนิดแสงโดยพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจะถูกบันทึกโดยกล้องวิดีโอความเร็วสูงโดยตรงเช่นกัน



รูปที่ 3.11 การติดตั้งระบบถ่ายภาพด้วยเทคนิค Shadowgraph



รูปที่ 3.12 การติดตั้งกล้องวิดีโอความเร็วสูงในมุมมองปกติโดยไม่มีการติดตั้งระบบการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph



รูปที่ 3.13 การติดตั้งกล้องวิดีโอความเร็วสูงในแนวแกนโดยไม่มีการติดตั้งระบบการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph