

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความหนืด

ความหนืด (Viscosity) คือ ความสามารถในการต้านทานการไหลของของไหล เมื่อมีแรงมากระทำ (ของไหล หมายถึง สสารที่สามารถไหลได้ เช่น ก๊าซ และของเหลว) ของไหลที่มีความหนืดสูง จะมีค่าความต้านทานต่อการไหลสูง ของไหลที่มีความหนืดต่ำ จะมีค่าความต้านทานต่อการไหลต่ำ ของไหลธรรมดาสามารถที่จะแสดงค่าความหนืดสมบูรณ์ได้ แต่ในขณะที่ของไหลที่มีส่วนผสมของสารหลายตัวจะมีลักษณะการไหลที่ซับซ้อนและไม่สามารถแสดงค่าความหนืดค่าเดียวได้

การวัดความหนืดทำได้โดยการวัดแรงต้านทานการไหลภายในของของไหล เมื่อมีแรงมากระทำ (F) ในแนวขนานกับพื้นผิว เรียก แรงต้านที่เกิดขึ้นนี้ว่า แรงเฉือน (Shear force) เมื่อพิจารณาถึงก้อนของไหลซึ่งประกอบด้วยแผ่นโมเลกุลที่ขนานกัน (ดังรูปที่ 2.1) ชั้นที่อยู่ล่างสุดของของไหล จะถูกยึดไว้ถ้าแผ่นด้านบนของของไหล ได้รับแรงกระทำให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ แผ่นด้านล่างถดถอยไปจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะทางจากแผ่นของไหลชั้นล่างสุดที่ไม่เคลื่อนที่ ความแตกต่างของ ความเร็ว (dv) ระหว่างของไหลสองแผ่นกับระยะทางที่เปลี่ยนไป (dx) ก็คืออัตราเฉือน (Shear rate) ที่อยู่ในเทอมของ velocity gradient (dv/dx, S) ค่าแรงต่อหน่วยพื้นที่ (F/A) ที่ทำให้เกิดการไหล เรียกว่า แรงเฉือนต่อหน่วยพื้นที่ (Shear stress, F') ถ้าของไหลมีความหนืดสูงขึ้น ก็ต้องใช้แรงเฉือนที่สูงขึ้นเพื่อให้ได้ อัตราเฉือนเท่าเดิม ดังนั้น อัตราเฉือนจึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ แรงเฉือน ดังสมการที่ 1

$$F/A = \eta (dv/dx) \quad (2.1)$$

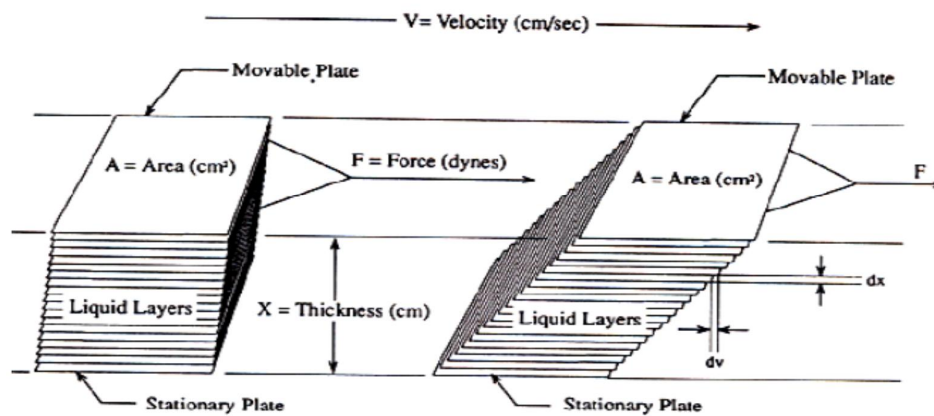
η คือ สัมประสิทธิ์ของความหนืด (coefficient of viscosity) หรือเรียกง่าย ๆ ว่า "ความหนืด" ตามหลักของ เซอร์ ไอแซก นิวตัน (I saac Newton) คำจำกัดความของความหนืดสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ ดังสมการที่ 2

$$\eta = F/S \quad (2.2)$$

เมื่อ F' คือ แรงเฉือนต่อหน่วยพื้นที่ มีหน่วยเป็น dynes/cm² s หรือ Pascal (Pa)
 S คือ อัตราเฉือน มีหน่วยเป็น Sec⁻¹

หน่วยของความหนืด คือ dyne.sec.cm⁻² หรือ gram.cm⁻¹.sec⁻¹ เรียกเป็น poise

1 poise คือ แรงที่ใช้ทำให้ของเหลวที่มีพื้นที่หน้าตัด 1 cm² หนา 1 cm เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 1 cm/sec (1 poise = 100 centipoise)



รูปที่ 2.1 การเกิด velocity gradient เมื่อมีแรงกระทำในแนวนอนกับพื้นผิวของของไหล

2.2 การไหลของของไหล

ลักษณะการไหลของของไหลโดยทั่วไปสามารถแบ่งได้ 2 แบบ

1. Newtonian Fluid: เป็นลักษณะการไหลของของไหลที่เป็นไปตามการสันนิษฐานของ นิวตัน คือ ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ ของไหลจะมีค่าความหนืดเป็นค่าคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงขึ้นกับอัตราเฉือน หรือ ความเร็วในการกวน ไม่ว่าจะกวนเร็วหรือกวนช้า ตัวอย่างเช่น น้ำ น้ำมัน น้ำเชื่อม น้ำผลไม้ น้ำผึ้ง นม กาแฟ กลีเซอริน แอลกอฮอล์ เป็นต้น

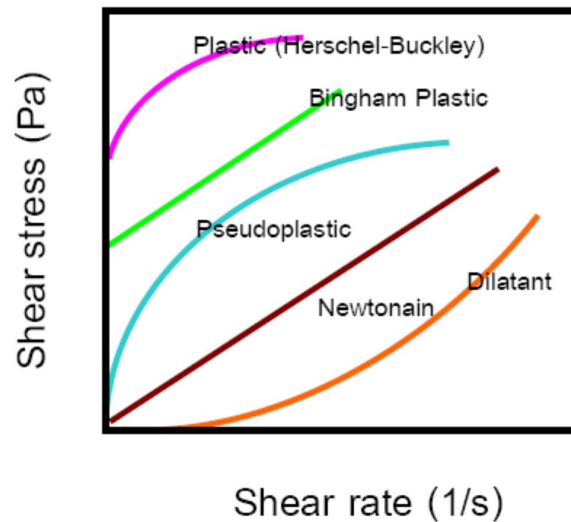
2. Non Newtonian Fluid : เป็นลักษณะการไหลของของไหลที่ไม่เป็นไปตามการสันนิษฐานของนิวตัน คือ ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ ของไหลมีค่าความหนืดเป็นค่าไม่คงที่ การเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับอัตราเฉือน หรือ ความเร็วในการกวน ลักษณะการไหลแบบนี้แบ่งเป็น 4 แบบ

2.1 Pseudoplastic : ของไหลที่มีค่าความหนืดลดลง เมื่อเพิ่มอัตราเฉือน หรือ ยิ่งกวนเร็ว ยิ่งไหลง่าย พฤติกรรมแบบนี้แสดงสมบัติเป็น “shear thinning” ตัวอย่างเช่น น้ำผลไม้เข้มข้น กาวน้ำใส สารช่วยแขวนตะกอน สารละลายพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ สารละลายพอลิเมอร์สังเคราะห์ เป็นต้น

2.2 Dilatant : ของไหลที่มีค่าความหนืดเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราเฉือน หรือ ยิ่งกวนเร็ว ยิ่งหนืด พฤติกรรมแบบนี้แสดงสมบัติเป็น “shear thickening” ตัวอย่างเช่น น้ำดินขุ่น น้ำแป้ง เป็นต้น

2.3 Bingham Plastic : ของไหลที่เมื่อมีแรงกระทำสูงพอจึงจะเกิดลักษณะการไหลแบบ Newtonian Fluid ตัวอย่างเช่น ยาสีฟัน น้ำสลัดของเซรามิก นมช็อกโกแลต เป็นต้น

2.4 Plastic : ของไหลที่เมื่อมีแรงกระทำสูงพอเพื่อเอาชนะค่าความเค้น ณ จุดคราก (yield stress) ถึงจะเริ่มไหลได้ และจะไหลแบบ Pseudoplastic หรือ ตามโมเดลของ Herschel-Buckley ตัวอย่างเช่น ซอสมะเขือเทศ สี ดินเหนียว มายองเนส ยาน้ำแขวนตะกอน เป็นต้น



รูปที่ 2.2 กราฟแสดงลักษณะการไหลของของเหลว

2.3 การผลิตลำพุ่งความเร็วสูง

สำหรับการผลิตลำพุ่งความเร็วสูงจนมีความเร็วอยู่ในช่วง supersonic หรือ hypersonic speed นั้น จะต้องใช้ความดันขับ (driving pressure) สูงมากถึงหลายร้อย MPa ซึ่งมีข้อจำกัดในด้าน การผลิตและการเก็บความดันดังกล่าวในถังเก็บความดัน pressure vessel จากข้อจำกัดดังกล่าว จึงมี การคิดค้นวิธีการผลิตลำพุ่งความเร็วสูงโดยวิธีที่เรียกว่า impact acceleration method หรือ Bowden and Brunton method [37, 38] ซึ่งเป็นนักวิจัยกลุ่มแรกที่คิดค้นวิธีนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยวิธีนี้จะยิงกระสุนความเร็วสูง (high-speed projectile) เข้าไปกระทบกับของเหลวซึ่งบรรจุ อยู่ในหัวฉีด (nozzle) โมเมนตัมของกระสุนจะทำให้ความดันของของเหลวมีค่าสูงขึ้นจนกระทั่งความดันประมาณ GPa หลังจากนั้นของเหลวก็จะฉีดออกมาจากหัวฉีดด้วยความเร็วสูง ซึ่งเป็นการฉีดลำพุ่ง จากการกระทบของกระสุนนั่นเอง

รูปที่ 2.3 Generation of high-speed liquid jet injected into ambient air by impact acceleration method of Bowden and Bunton method [37, 38]

2.4 ชุดยิงกระสุน (launcher)

ในการผลิตลำพุ่งความเร็วสูง โดยเทคนิค impact acceleration method หรือ Bowden and Brunton method [37, 38] จำเป็นต้องใช้กระสุนความเร็วสูง (high-speed projectile) เพื่อเข้าไปกระทบกับของเหลวซึ่งบรรจุอยู่ในหัวฉีด (nozzle) ซึ่งในการผลิตกระสุนความเร็วสูงดังกล่าว จำเป็นต้องใช้ชุดยิงกระสุน (launcher) หรือปืน (gun) ชุดยิงกระสุนความเร็วสูงที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีดังนี้

2.4.1. ชุดยิงกระสุนแบบใช้แก๊สเบา (light gas gun)

ชุดยิงกระสุนแบบนี้จะใช้แก๊สเบา (light gas) เช่น ไฮโดรเจน (H_2) หรือ ฮีเลียม (He) เป็นตัวขับเคลื่อน ดังนั้นชุดยิงชนิดนี้จึงเรียกว่า light gas gun โดยส่วนประกอบหลักของปืนชนิดนี้คือ ถังเก็บความดันสูง (high pressure reservoir) แผ่นฟิล์มบาง (diaphragm) และ ท่อปล่อยกระสุน (launch tube) หรือ ลำกล้องปืน (gun barrel) กระสุน (projectile) โดยทั่วไปจะสอดอยู่ทางออกของลำกล้องปืนติดกับแผ่น diaphragm แก๊สเบาที่ใช้เป็นตัวขับเคลื่อนจะบรรจุอยู่ใน reservoir ซึ่งแก๊สดังกล่าวจะทำให้เพิ่มความร้อนและความดันได้จากหลายวิธีเช่น จากการเผาไหม้ (combustion) จากแหล่งความร้อนภายนอก (external heat) จากการชาร์จประจุ (electric charge) จาก shock wave และจากการดันตัวของ piston (piston compress) ทันทีที่ความดันของแก๊สเบาเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งความดันแผ่น diaphragm ทนรับไม่ได้ แผ่น diaphragm จะขาด ความดันภายใน high pressure reservoir จะขับหรือเร่งความเร็วของกระสุน ดังรูปที่ 2.4 แสดงแผนภาพส่วนประกอบของ single stage light gas gun หากประยุกต์กฎของการเคลื่อนที่ของนิวตัน จะสามารถหาความเร็วที่เกิดขึ้นในลำกล้องปืนได้

$$m \frac{dv}{dt} = m \frac{dv}{dx} v = PA \quad (2.3)$$

เมื่อ

m คือ น้ำหนักของกระสุน

v คือ ความเร็วของกระสุน ณ ตำแหน่ง x ใดๆ

P คือ ความดัน

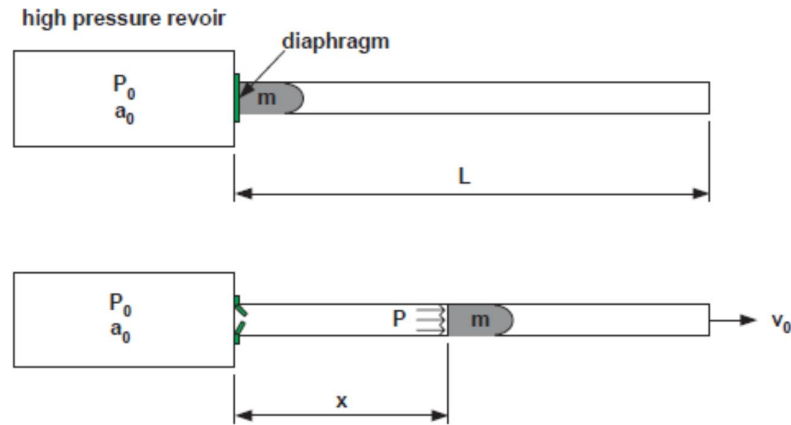
A คือ พื้นที่หน้าตัดของลำกล้องปืน

หากอินทิเกรตตลอดความยาวของลำกล้องปืน (L) จะได้

$$\frac{mv_0^2}{2} = A \int_0^L P dx \quad (2.4)$$

เมื่อ

v_0 คือ ความเร็วของกระสุนที่ทางออกของลำกล้องปืน



รูปที่ 2.4 การยิงกระสุนโดยชุดยิงกระสุนแบบใช้แก๊สเบา (light gas gun)

เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาจะกำหนดให้ $\bar{P}$ มีค่าคงที่ตลอดการเคลื่อนที่ของกระสุนในลำกล้องปืน ซึ่งมีค่าเป็น

$$v_0 = \sqrt{2\bar{P} \frac{AL}{m}} \quad (2.5)$$

โดยสมการนี้จะมีค่าความผิดพลาดเนื่องมาจากสาเหตุหลักคือความเสียดทานระหว่างกระสุนกับภายในลำกล้องปืน และในความเป็นจริงค่าของ $\bar{P}$ จะมีค่าไม่คงที่เนื่องจากการเพิ่มปริมาตรมากขึ้นตามการเคลื่อนที่ของกระสุน ซึ่งความดัน $\bar{P}$ ดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับแก๊สเบาและความดันภายใน pressure reservoir (P_0) ถ้าพิจารณาเป็นแก๊สอุดมคติ (idea gas) ซึ่งมีค่าความดันเป็น P_0 และความเร็วเสียง (sound speed) เป็น a_0 ดังนั้นความดันของ P ในขณะแก๊สขยายตัวจะมีความสัมพันธ์เป็น

$$P = P_0 \left(1 - \frac{v}{\left(\frac{2}{\gamma} - 1 \right) a_0} \right)^{2\gamma/(\gamma-1)} \quad (2.6)$$

เมื่อ

v คือ ความเร็วของการขยายของแก๊ส

γ คือ ratio of the specific heats

ถ้าสมการที่ 2.6 ใช้ในการหาความเร็วแก๊สหลังกระสุน จะได้อัตราส่วนของ P/P_0 จะขึ้นอยู่กับ

$$\frac{v(\gamma-1)}{2a_0} \quad (2.7)$$

จากกระบวนการทำงานแก๊สจะขยายตัวจาก high pressure reservoir ซึ่งเป็นการแปลงพลังงานที่สะสมภายใน high pressure reservoir เพื่อไปขับหรือเร่งความเร็วของกระสุน ความเร็วสูงสุดของการไหลของแก๊สจะเกิดขึ้นเมื่อแก๊สแปลงพลังงานทั้งหมดที่มีให้กับการขับเคลื่อนหรือเร่งความเร็วของกระสุน ซึ่งความดันของแก๊สจะลดลงเป็นศูนย์ โดยที่ความเร็วจะคำนวณได้จาก

$$v_{esc} = \left(\frac{2}{\gamma-1} \right) a_0 \quad (2.8)$$

ค่าความเร็วสูงสุดที่ทางออก คือ escape velocity (v_{esc}) มีค่าเท่ากับ

$$v_{esc} = \left(\frac{2}{\gamma-1} \right) a_0 = \frac{2}{\gamma-1} \sqrt{\frac{\gamma R T_0}{M}} \quad (2.9)$$

เมื่อ

T_0 คือ อุณหภูมิภายใน pressure reservoir

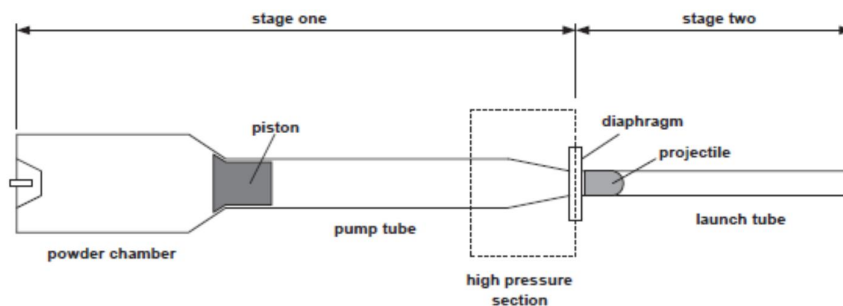
M คือ มวลโมเลกุลของแก๊สภายใน pressure reservoir

R คือ universal gas constant

ซึ่งความสัมพันธ์นี้แสดงว่า light gas gun จะมีความเร็วสูงก็ต่อเมื่อใช้แก๊สที่มีค่ามวลโมเลกุลต่ำและแก๊สจะต้องมีอุณหภูมิสูง

2.4.2 ชุดยิงกระสุนแบบใช้แก๊สเบาแบบสองช่วง (two stage light gas gun)

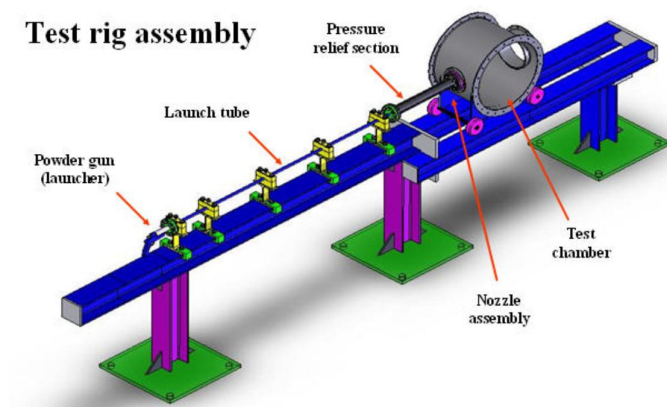
เมื่อใช้ลูกสูบ (piston) กดอัดให้แก๊สที่ใช้ขับกระสุน (driver gas) มีความดันและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ชุดยิงกระสุนแบบนี้จะเรียกว่า ชุดยิงกระสุนแบบใช้แก๊สเบาแบบสองช่วง (two-stage light gas gun) ซึ่งเป็นปืนที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง ดังรูปที่ 2.5 แสดงส่วนประกอบพื้นฐานของ piston-powered two-stage light gas gun โดยที่แก๊สเบาจะถูกบรรจุอยู่ในท่อที่มีผนังหนาและเรียบซึ่งโดยทั่วไปจะถูกเรียกว่า pump tube โดยที่ด้านหนึ่งจะถูกปิดโดยลูกสูบ (piston) และอีกด้านหนึ่งจะถูกปิดโดย steel diaphragm ในการขับลูกสูบจะขับโดยดินปืนหรือแรงขับชนิดอื่นจะขับลูกสูบในเคลื่อนที่อัดแก๊สเบาให้มีความดันสูงและความร้อนสูงขึ้น เมื่อความดันของแก๊สเบามีค่าสูงขึ้นจนกระทั่งถึงจุดที่แผ่น diaphragm ไม่สามารถทนได้ แผ่น diaphragm จะฉีกขาดโดยทันทีทำให้แก๊สเบาความดันสูงดังกล่าวขับกระสุนให้เคลื่อนที่ ซึ่งหลักการในการพิจารณาการเคลื่อนที่ของกระสุน สามารถใช้หลักการเดียวกับชุดยิงกระสุนแบบใช้แก๊สเบาดังที่กล่าวมาแล้วได้



รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบพื้นฐานของ piston-powered two-stage light gas gun

2.4.3 ชุดยิงกระสุนแบบใช้ดินปืน (powder gun)

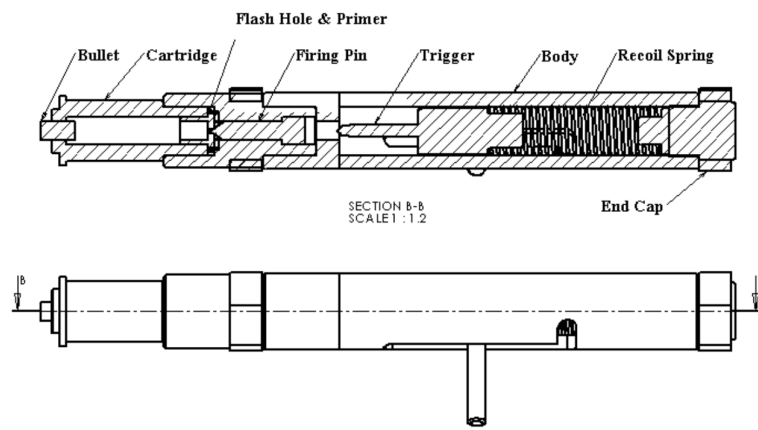
ในโครงการวิจัยนี้จะใช้ชุดยิงกระสุนแบบใช้ดินปืน ซึ่งชุดทดลองนี้มีองค์ประกอบหลัก 4 ส่วน ได้แก่ ชุดปล่อยลูกปืน (launcher) ท่อส่งลูกปืน (launch Tube) ท่อระบายความดัน (pressure relief section) และห้องทดสอบ (test chamber) ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ชุดยิงกระสุนแบบใช้ดินปืน

ชุดปล่อยลูกปืนทำหน้าที่เป็นตัวขับเคลื่อนจากการจุดระเบิดของดินปืน ในห้องเผาไหม้ และขับลูกปืนที่ทำจาก High Density Polyethylene (HDPE) หนัก 0.88 g ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.1 mm ยาว 15 mm สำหรับระบบการจุดระเบิด ดินปืนจะบรรจุในท่อบรรจุ (รูปที่ 2.7a) และลูกปืนจะอัดบนหัวท่อบรรจุ (รูปที่ 2.7b) ซึ่งทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 2.7 ในช่วงแรกเมื่อ จุดชนวนด้วยเข็มแทงชนวนทั่วไป พบว่าการจุดระเบิดดินปืนไม่แน่นอน เนื่องจากแรงกดของเข็มแทงชนวนไม่พอ จึงได้ทำการปรับปรุงระบบการจุดระเบิดใหม่โดยใช้หลักการของปืนปากกา ที่ใช้แรงอัดจากสปริง ดันให้เข็มแทงชนวน ซึ่งพบว่าให้ประสิทธิภาพมากกว่าแบบจุดด้วยเข็มแทงชนวนทั่วไป ที่ปากทางออกของชุดปล่อยลูกปืนจะต่อกับท่อส่งลูกปืนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm ยาว 1,500 mm สำหรับการปล่อยให้ลูกปืนเพิ่มความเร็วของลูกปืน ก่อนจะไปยังท่อระบายความดันหน้าของท่อระบายความดันจะทำให้การระบายอากาศด้านหน้าลูกปืนที่ถูกอัดในท่อส่งออกสู่บรรยากาศ เพื่อป้องกันอากาศกระแทกบน

หัวฉีดก่อนลูกปืน ท่อระบายความดันมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm ผ่าล่อง 4 ด้าน ขนาดกว้าง 4 mm ยาว 400 mm ปลายท่อต่อกับชุดประกอบหัวฉีด ซึ่งอยู่ระหว่างท่อระบายความดันกับห้องทดสอบ ห้องทดสอบมีลักษณะเป็นทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 400 mm ด้านข้างทั้งสองประกบติดด้วยวัสดุใสทำจาก Polymethyl Methacrylate (PMMA) ด้านหลังห้องทดสอบต่อกับถังรับลูกปืนซึ่งจะทำหน้าที่คอยรับลูกปืนที่ถูกยิงออกมา ห้องทดสอบนี้ถูกออกแบบให้สามารถปรับความดันภายในได้เพื่อรองรับการทดลองในขั้นต่อไป นอกจากนี้แล้วการวัดความเร็วของลูกปืนและลำพุงจะติดตั้งอุปกรณ์วัดไว้ในส่วนนี้ด้วย



a) ชุดจุดระเบิดด้วยปืนปากกา



b) ท่อบรรจุดินปืนกับลูกปืน

รูปที่ 2.7 ระบบจุดระเบิดแบบปืนปากกาในชุดปล่อยลูกปืน

2.5 การวัดความเร็วของลูกปืนและลำพุงของเหลว

การวัดความเร็วของลูกปืนและลำพุงของเหลวใช้หลักการ การตัดเลเซอร์ของวัตถุ (laser beam interrupt method) หรือ Time of Flight Method ติดตั้งตัวกำเนิดเลเซอร์และตัวรับแสงเลเซอร์มีกำลัง 5 mW ความยาวคลื่นประมาณ 850 nm วางตัวกำเนิดห่างจากผนังด้านชุดประกอบ

หัวฉีด 12 mm และห่างกัน 33 mm ภายในห้องทดสอบ ตัวรับแสงจะต่อสัญญาณเข้ากับ Oscilloscope เพื่ออ่านสัญญาณไฟฟ้าจากตัวรับแสงและแสดงบนหน้าจอ ดังไดอะแกรมรูปที่ 2.8

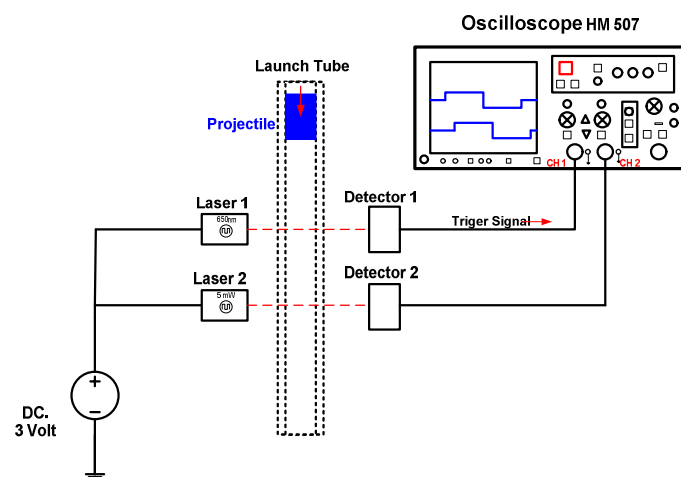
การวัดความเร็วของลูกปืนนั้นจะวัดจากเวลาที่ลูกปืนใช้ในการวิ่งตัดเลเซอร์ตัวที่หนึ่งกับเลเซอร์ตัวที่สอง แล้วจึงแปลงมาเป็นความเร็วเฉลี่ยของลูกปืนดังสมการ

$$v_p = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (2.10)$$

เมื่อ

Δx คือ ระยะห่างระหว่างเลเซอร์ทั้งสอง

Δt คือ เวลาที่ได้จาก Oscilloscope ของเส้นสัญญาณจากตัวรับแสงเลเซอร์ทั้งสอง



รูปที่ 2.8 ไดอะแกรมวงจรของการวัดความเร็วของลูกปืน

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันได้มีนักวิจัยจำนวนมากได้พยายามศึกษาเกี่ยวกับลำพุ่งความเร็วสูงโดยศึกษาเกี่ยวกับคุณลักษณะและความเร็วของลำพุ่งซึ่งมีรายละเอียดพอสังเขปดังนี้

ในปี ค.ศ.1958, Bowden, F.P. และ Brunton, J.H. [37] ได้คิดค้นเทคนิคใหม่ในการผลิตลำพุ่งความเร็วสูง โดยวิธีนี้จะยิงกระสุนความเร็วสูง (high-speed projectile) เข้าไปกระแทกกับของเหลวปริมาตร 0.1 cm^3 ซึ่งบรรจุอยู่ในหัวฉีด (nozzle) ที่ทำด้วย stainless steel ถูกฉีกด้วยแผ่น Neoprene ดังแสดงในรูปที่ 2.3 จากการทดสอบพบว่า ลำพุ่งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1-2 mm เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ความดันของของเหลวนั้นจะมีค่าสูงขึ้นหลังจากนั้นของเหลวก็จะฉีดออกมาจากหัวฉีดด้วยความเร็วสูงที่ความเร็วเท่ากับ $1,200 \text{ m/s}$ โดยการผลิตลำพุ่งความเร็วสูงด้วยเทคนิคนี้ถูก

เรียกว่า impact driven method หรือเรียกตามชื่อนักวิจัยว่า Bowden and Brunton method ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งจากนั้นเป็นต้นมา เทคนิคนี้เป็นที่นิยมใช้ในการผลิตลำพุ่งความเร็วสูงในงานวิจัยต่างๆ

ในปี ค.ศ.1992, H. H. Shi และคณะ [15] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับลำพุ่งของเหลวความเร็วสูง รวมทั้งลักษณะของ shock wave ที่เกิดขึ้นจากลำพุ่ง นอกจากนี้ยังศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการเกิด auto-ignition ของลำพุ่งน้ำมันดีเซลความเร็วเหนือเสียง โดยการผลิตลำพุ่งด้วยเทคนิค impact driven method โดยสามารถผลิตลำพุ่งได้ความเร็วสูงสุดเท่ากับ 4.5 km/s และทำการอธิบายคุณลักษณะของลำพุ่งที่ผลิตได้ด้วยการถ่ายภาพด้วยเทคนิค interferometer นอกจากนี้ยังได้ทำการเปรียบเทียบการผลิตลำพุ่งจากการกระแทก 2 วิธี คือ แบบกระแทกโดยตรง และแบบกระแทกผ่านตัวกลาง ซึ่งพบว่า ความเร็วของลำพุ่งที่ใช้วิธีแบบกระแทกผ่านตัวกลางจะช้ากว่าและจะใช้เวลามากกว่าแบบกระแทกแบบขับโดยตรง นอกจากนี้ยังพบการจุดติดไฟด้วยตัวเองสำหรับลำพุ่งน้ำมันดีเซลที่ความเร็วสูงกว่า 2 km/s จากภาพถ่าย

ในปี ค.ศ.1995, T. Obara และคณะ [19] ได้ทำการทดลองการกระแทกของลำพุ่งลงบนของเหลวและของแข็ง ซึ่งในการทดลองนี้ใช้ลำพุ่งของเหลวขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 mm จากชุดทดลอง single impact jet ที่ความเร็วในการกระแทกเท่ากับ 600 m/s ลำพุ่งจะกระแทกบนพื้นผิวของน้ำโดยมี polymethyl-methacrylate (PMMA) วางห่างทางออกของหัวฉีดที่ระยะ 15 mm และวัดความดันโดยใช้ Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Film นอกจากนี้ยังถ่ายภาพโดยใช้ image-converter high-speed camera จากภาพแสดงให้เห็นการเกิด shock wave, cavitation และฟองอากาศ จากการทดลองสรุปได้ว่า การกระแทกระหว่างลำพุ่งกับน้ำจะทำให้เกิดกลุ่ม cavitation ซึ่งจะเกิดขึ้นและยุบตัวอย่างรวดเร็วและอาจจะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดความเสียหายบนวัสดุ ส่วนลำพุ่งที่กระแทกบนพื้นผิวของแข็ง พบว่า พื้นผิว PMMA เกิดเป็นรู ซึ่งความเสียหายนั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดของลำพุ่ง และค่าความดันที่วัดโดยใช้ PVDF นั้นจะสอดคล้องกับสมการ water-hammer

ในปี ค.ศ.2002, K. Pianthong และคณะ [45] ได้ศึกษาคุณลักษณะลำพุ่งความเร็วสูงของน้ำและน้ำมันดีเซล (high-speed liquid jet) จากชุดทดลองที่เรียกว่า vertical single-stage powder gun และศึกษาถึงอิทธิพลของความเร็วกระสุนปืน มวลของดินปืนและรูปทรงของหัวฉีด ที่มีผลต่อความเร็วลำพุ่ง โดยจากถ่ายภาพด้วยเทคนิค Shadowgraph จะแสดงให้เห็นในแต่ละช่วงของการเกิดลำพุ่ง จากผลการทดลองพบว่า สามารถผลิตลำพุ่งความเร็วสูงสุดที่ได้เท่ากับ 2,195 m/s และ 2,150 m/s จากลำพุ่งน้ำมันดีเซลและน้ำ ตามลำดับ เมื่อใช้หัวฉีดที่แข็งขึ้นความเร็วสูงสุดของลำพุ่งน้ำมันดีเซลก็จะมีค่าสูงขึ้นโดยมีค่าเท่ากับ 2,500 m/s และสังเกตเห็นลักษณะลำพุ่งเป็นละอองหยดน้อยกว่าอย่างเห็นได้ชัดและมีการกระจายเป็นไอรอบๆ แกนลำพุ่ง ต่อมาในปี ค.ศ.2003, K. Pianthong และคณะ [46] ยังศึกษาคุณลักษณะลำพุ่งน้ำและดีเซลความเร็วสูงที่มีความเร็วเหนือเสียง (supersonic liquid jet) เพิ่มเติม โดยลำพุ่งความเร็วสูงถูกผลิตจากชุดทดลองที่เรียกว่า single-stage powder gun ที่สร้างขึ้นมาใช้งานในแนวตั้ง โดยในการศึกษานี้คุณลักษณะและพฤติกรรมของ supersonic liquid jet ถูกถ่ายภาพโดยใช้เทคนิค Shadowgraph และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างรูปทรงหัวฉีดที่ใช้กับพฤติกรรมของลำพุ่งที่ฉีดในอากาศที่ความเร็วประมาณ 2 km/s จากผลการทดลองพบว่า ลักษณะพฤติกรรมของลำพุ่ง ลักษณะของ shock wave และรูปร่างของลำพุ่งเป็นผลมาจากรูปทรง

ของหัวฉีดที่แตกต่างกัน กระบวนการเกิดลำพุงแบบ pulse ถูกวิเคราะห์ในหัวฉีดโดยใช้การวิเคราะห์ที่ 1 มิติ ซึ่งพบว่ามีความสอดคล้องกับภาพถ่ายของลำพุงจาก shadowgraph image นอกจากนี้ยังใช้การคำนวณของไหลพลศาสตร์ (CFD) ในการจำลองการเกิดลำพุงและทำการเปรียบเทียบกับมุมของ shock wave ที่ได้รับการทดลอง ซึ่งพบว่า มีความสอดคล้องกันถึงแม้ว่ารูปร่างของลำพุงจะแตกต่างกันก็ตาม นอกจากนี้ยังทำการศึกษาการจุดติดไฟของลำพุงดีเซลความเร็วเหนือเสียงที่ความเร็ว 2 km/s ที่สภาวะอากาศปกติและอุณหภูมิ 110 °C โดยใช้ น้ำมันดีเซลที่ cetane number ระหว่าง 50 – 100 จากการตรวจสอบ ไม่พบการเกิด auto-ignition อย่างที่อ้างถึงในงานวิจัยของ H.H. Shi [15]

ในปี ค.ศ.2007, A.Matthujak และคณะ [39] ได้ศึกษาการเกิดลำพุงความเร็วสูง (high-speed liquid jets) โดยใช้วิธีการผลิตลำพุงความเร็วสูงที่เรียกว่า impact driven method จากชุดทดลอง vertical two-stage light gas gun ที่ออกแบบและสร้างขึ้น นอกจากจะศึกษาคุณลักษณะของลำพุงแล้วยังได้ทำการวัดความดันของเหลวในหัวฉีดด้วย optical fiber pressure transducer ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.1 แทรกอยู่ในหัวฉีด ซึ่งพบว่า ความดันที่เกิดขึ้นในการขับลำพุงค่าสูงถึง 1.24 GPa จากการกระแทกของกระสุนปืน ในการทดลองนี้ได้สร้างหัวฉีดอะคิลิคขนาด 10.6 mm × 10.6 mm เพื่อใช้ในการศึกษาพฤติกรรมภายในหัวฉีดระหว่างการผลิตลำพุงโดยการถ่ายภาพด้วยเทคนิค holographic interferometry พบว่า มี shock wave ที่เกิดขึ้นภายในหัวฉีดเป็นสาเหตุหลักในการขับลำพุง และใช้การถ่ายภาพด้วยเทคนิค holographic interferometry รวมทั้ง high speed video camera ร่วมกับการถ่ายภาพด้วยเทคนิค shadowgraph ในการถ่ายภาพลำพุงของเหลว 5 ชนิด คือ น้ำ น้ำมันดีเซล ไบโอดีเซล น้ำมันก๊าดและน้ำมันเบนซิน โดยความเร็วที่ผลิตได้สูงสุดจะอยู่ในช่วง 1.3 km/s ถึง 2.3 km/s และพบว่า คุณลักษณะของลำพุงจะมีลักษณะแตกต่างกันเมื่อชนิดของลำพุงต่างกัน นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาการเกิด auto-ignition ของลำพุงน้ำมันในอากาศ จากการวัดความดันและจากการถ่ายภาพด้วยเทคนิค holographic interferometry ซึ่งไม่มีการเกิด auto-ignition ขึ้นเลย

ในปี พ.ศ.2550, วีระพันธ์ สีหนามและคณะ [47] ได้ศึกษาคุณลักษณะพื้นฐานของลำพุงเชื้อเพลิงความเร็วสูง โดยใช้การคำนวณของไหลพลศาสตร์ (CFD) ในการจำลองการฉีดของน้ำมันก๊าด โดยในแบบจำลองประกอบด้วยของไหล 2 ชนิด คือ น้ำมันก๊าด และอากาศ ความเร็วเริ่มแรกของเชื้อเพลิงอยู่ที่ 1,300 m/s โดยลำพุงจะพุ่งออกสู่อากาศที่อยู่นิ่ง โดยการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของไหลจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา ในการศึกษาสนใจพิจารณาระยะการเคลื่อนที่ของลำพุงในอากาศและความเร็วของลำพุง ผลจากการศึกษาพบว่า ผลการศึกษาจาก CFD และการทดลองให้ผลใกล้เคียงกัน โดยลำพุงจะมีความเร็วต่ำลงและระยะทางการเคลื่อนที่ในอากาศลดลงหลังจากลำพุงเคลื่อนที่ผ่านไป 200 μ s เนื่องจากการแตกเป็นฝอยละอองของลำพุง นอกจากนี้แรงต้านจากอากาศก็เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ลำพุงมีความเร็วลดลงเช่นกัน ผลการศึกษาทำให้เข้าใจคุณลักษณะของลำพุงเชื้อเพลิงความเร็วสูงได้ดียิ่งขึ้นและข้อมูลที่ได้ถือเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการพัฒนาในระดับต่อไป

จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับลำพุงความเร็วสูงที่ผ่านมา พบว่า การศึกษาคุณลักษณะของลำพุงความเร็วสูงนั้นจะเป็นการศึกษาในกรณีที่ฉีดลำพุงเข้าไปในอากาศหรือสถานะแก๊สเท่านั้น แต่การฉีดลำพุงเข้าไปในน้ำนั้นยังมีการศึกษาน้อยมาก โดยในปี ค.ศ.1996, Hitoshi Soyama และคณะ [44] ได้ศึกษาคุณลักษณะของลำพุงที่ฉีดในน้ำโดยพบว่ามิกลุ่ม cavitation เกิดขึ้นอย่างรุนแรงรอบลำพุง

ซึ่งคุณลักษณะของลำพุ่งถูกถ่ายภาพโดยใช้วิธี shadowgraph-type และ reflective-type ร่วมกับแหล่งกำเนิดแสง xenon flash ในการทดลองนี้ใช้หัวฉีด 3 แบบ คือ horn nozzle, canonical nozzle และ cylindrical nozzle ลำพุ่งที่ถูกถ่ายภาพได้จะนำมาศึกษาอย่างละเอียด และทำการวัดความดันซึ่งจะวัดโดยวิธีการใช้แผ่นที่ไวต่อความดัน (pressure-sensitive film) ผลกระทบของการฉีดแรงดันและการออกแบบหัวฉีดจะทำให้เข้าใจมากขึ้น จากการถ่ายภาพทำให้เห็นความแตกต่างระหว่างลำพุ่งที่ฉีดในอากาศกับลำพุ่งที่ฉีดในน้ำ โดย cavitation ที่เกิดขึ้นจากลำพุ่งที่อยู่ในน้ำนำไปสู่ผลการกัดกร่อนจากการกระแทกโดยตรงของตัวลำพุ่งจะทำให้ความแข็งแรงของวัสดุลดลง ดังนั้นพฤติกรรมกระจายตัวของลำพุ่งความเร็วสูงที่อยู่ในน้ำสามารถนำมาอธิบายถึงการกัดกร่อนที่รุนแรงได้ เพื่อนำไปพิจารณาหาวิธีการที่จะทำให้พฤติกรรมกระจายตัวของลำพุ่งความเร็วสูงที่เกิดขึ้นนั้นนำมาใช้ประโยชน์มากที่สุด จากการทดลองสรุปได้ว่าลักษณะของลำพุ่งที่ฉีดในน้ำจะทำให้เกิดพฤติกรรม cavitation และคุณลักษณะของลำพุ่งที่ฉีดในน้ำจะแตกต่างกันมากกับลำพุ่งที่ฉีดในอากาศ แรงดันเฉียบพลันที่เกิดขึ้นรอบๆ ลำพุ่งที่ฉีดในน้ำมีค่าสูงสุด คือ horn nozzle และมีค่าต่ำสุด คือ canonical nozzle ผลลัพธ์ของพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจะไม่แน่นอนเนื่องมาจากรูปแบบของหัวฉีด

ในปี 2009, K. Otani และคณะ [48] ได้ศึกษาคุณลักษณะของลำพุ่งในน้ำโดยผลิตลำพุ่งจาก Ho: YAG Laser โดยศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการเจาะหินทรายใต้น้ำ ด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph จากรูปที่ได้พบว่า ความเร็วของลำพุ่งมีค่าประมาณ 40 m/s นอกจากนี้ยังวัดความดันกระแทกที่เกิดขึ้น โดยใช้ PVDF needle hydrophone พบว่าความดันของ shock wave มีค่าประมาณ 22.7 MPa และพบการยุบตัวของ water vapor bubble ที่ทำให้เกิด shock wave นอกจากนี้ยังพบว่าลำพุ่งที่ผลิตได้สามารถเจาะแผ่นหินทรายใต้น้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากงานวิจัยต่างๆ ที่ได้ทำการศึกษามาแล้วนั้นพบว่า เป็นการศึกษาเกี่ยวกับลำพุ่ง Newtonian fluid ความเร็วสูงซึ่งฉีดเข้าไปในของไหลในสถานะแก๊ส (gas phase) เช่น อากาศที่สถานะต่างๆ เท่านั้น ขณะที่ในปัจจุบัน มีการศึกษาการนำลำพุ่งความเร็วสูงในงานด้านการแพทย์ [40-42] อาทิ การฉีดยาแบบไม่ใช้เข็ม (needleless) โดยใช้ลำพุ่งความเร็วสูงของยาฉีดเข้าไปในผิวหนังโดยตรง และการรักษาการอุดตันของก้อนเลือดในเส้นเลือดในสมองโดยการฉีดลำพุ่งเข้าไปกระแทกทำลายเม็ดเลือด และอุตสาหกรรมใต้สมุทร [43, 44] เช่น การตัดโครงสร้างใต้ทะเลโดยลำพุ่งความเร็วสูง (jet cutting marine structures) หรือการเจาะใต้ทะเล (jet drilling at the bottom of the sea) ซึ่งเป็นการฉีดลำพุ่งในของเหลว ได้เริ่มมีการศึกษาวิจัยมาบ้างแล้ว [62] แต่อย่างไรก็ตามคุณลักษณะต่างๆ ของลำพุ่ง Non-Newtonian fluid ที่ฉีดในของเหลวนั้น ยังไม่มีนักวิจัยกลุ่มใดทำการศึกษาหรือรายงานมาก่อน ซึ่งเป็นประเด็นวิจัยที่มีความสำคัญต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริงในงานด้านต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้นในอนาคตอันใกล้