

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความเร็วเสียง (Speed of sound)

ความเร็วเสียง [44] คือ ระยะทางที่เสียงเดินทางไปในตัวกลางใดๆ ได้ในหนึ่งหน่วยเวลา โดยทั่วไปเสียงเดินทางในอากาศที่มีอุณหภูมิ 25°C ที่ความเร็วเท่ากับ 346 m/s และในอากาศที่อุณหภูมิ 20°C ที่ความเร็วเท่ากับ 343 m/s ความเร็วที่เสียงเดินทางได้นั้นอาจมีค่ามากขึ้นหรือน้อยลงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของตัวกลางเป็นหลัก และอาจได้รับอิทธิพลจากความชื้นบ้างเล็กน้อย แต่ไม่ขึ้นกับความดันอากาศ เนื่องจากการเดินทางของเสียงอาศัยการสั่นของโมเลกุลของตัวกลาง ดังนั้นเสียงจะเดินทางได้เร็วขึ้นหากตัวกลางมีความหนาแน่นมาก ทำให้เสียงเดินทางเร็วในของแข็ง แต่เดินทางไม่ได้ในอวกาศ เพราะอวกาศเป็นสุญญากาศจึงไม่มีโมเลกุลของตัวกลางอยู่ความเร็วเสียง (C) โดยทั่วไปคำนวณหาได้จาก

$$C = \sqrt{\frac{c}{\rho}} \quad (2.1)$$

เมื่อ

c คือ สัมประสิทธิ์ของความแข็งเกร็ง (coefficient of stiffness)

ρ คือ ความหนาแน่น

ดังนั้น ความเร็วเสียง จะเพิ่มขึ้นตามความแข็งเกร็งของวัสดุ และ ลดลงเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น

2.1.1 ความเร็วเสียงในแก๊ส

ค่า c ในตัวกลางสถานะแก๊สสามารถประมาณโดย

$$c = \gamma p \quad (2.2)$$

เมื่อ

γ คือ ดัชนีอะเดียบาติก (adiabatic index)

p คือ ความดัน

ดังนั้น ความเร็วเสียงในแก๊สสามารถคำนวณได้โดย

$$C_{gas} = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}} \quad (2.3)$$

ในกรณี แก๊สในอุดมคติ (Ideal gas) จะได้

$$C_{ideal\ gas} = \sqrt{\gamma RT} \quad (2.4)$$

เมื่อ

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (gas constant) (287.05 J/(kg.K) สำหรับอากาศ) ปกติในทางอากาศพลศาสตร์คำนวณได้จาก การหารค่าคงที่ของแก๊สสากล R (J/(mol.K)) ด้วย ค่ามวลโมล (molar mass)

γ คือ ค่าดัชนีอะเดียบาติก (Adiabatic index) มีค่าเท่ากับ 1.402 สำหรับ อากาศ บางครั้งเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ K (gamma)

T คือ ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) ที่สภาพบรรยากาศมาตรฐาน (Standard atmosphere)

ในกรณีของแก๊สในอุดมคติ ความเร็วเสียง C จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเท่านั้น โดยไม่ขึ้นอยู่กับความดัน สำหรับอากาศนั้นเกือบถือได้ว่าเป็นแก๊สในอุดมคติ อุณหภูมิของอากาศเปลี่ยนแปลงตามระดับความสูง เป็นผลให้ความเร็วของเสียงที่ระดับความสูงต่างๆ นั้นแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความเร็วเสียงในแก๊สอุดมคติ [44]

ระดับความสูง	อุณหภูมิ	m/s	km/h	mph	knot
ระดับน้ำทะเล	15 °C (59 °F)	340	1225	761	661
11,000 m -20,000 m	-57 °C (-70 °F)	295	1062	660	573
29,000 m	-48 °C (-53 °F)	301	1083	673	585

2.1.2 ความเร็วเสียงในของเหลว

ของเหลวจะมีความแข็งแกร่งต่อแรงอัดเท่านั้นโดยไม่มี ความแข็งแกร่งต่อแรงเฉือน ดังนั้นความเร็วของเสียงในของเหลวหาได้โดย

$$C_{fluid} = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (2.5)$$

เมื่อ

K คือ โมดูลัสของการอัดอะเดียบาติก (adiabatic bulk modulus)

2.1.3 ความเร็วเสียงในของแข็ง

ของแข็งนั้นมีค่าความแข็งเกร็งไม่เป็นศูนย์ทั้งต่อแรงบีบอัดหรือการเปลี่ยนปริมาตร (volumetric deformation) และแรงเฉือน (shear deformation) ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะกำเนิดคลื่นเสียงที่มีความเร็วต่างกันขึ้นกับรูปแบบของคลื่นในแท่งของแข็งซึ่งมีขนาดความหนา (หรือขนาดของตัวกลางในแนวตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของคลื่น) เล็กกว่าความยาวคลื่นมาก ความเร็วเสียงหาได้จาก

$$C_{solid(thin) \text{ longitudinal}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.6)$$

โดย

E คือ โมดูลัสของยัง

ρ คือ ความหนาแน่น

ดังนั้น ความเร็วเสียงในตัวกลางในเหล็กจะมีค่าประมาณ 5,100 m/s ความเร็วของเสียงสามารถหาได้จากการแทนค่าโมดูลัสของยังด้วยโมดูลัสคลื่นหนาราบ (plane wave modulus) ซึ่งหาได้จาก โมดูลัสของยัง และ อัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's ratio)

$$M = E \frac{1-\nu}{1-\nu-2\nu^2} \quad (2.7)$$

ดังนั้น ความเร็วของเสียง

$$C_{solid(thick) \text{ longitudinal}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1-\nu-2\nu^2)}} \quad (2.8)$$

สำหรับคลื่นตามขวาง (transverse wave) นั้นโมดูลัสของยัง E จะถูกแทนด้วยค่าโมดูลัสของแรงเฉือน (shear modulus) G

$$C_{solid \text{ transverse}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.9)$$

จะเห็นได้ว่า ความเร็วของเสียงในของแข็งจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของตัวกลางเท่านั้น โดยไม่ขึ้นกับอุณหภูมิของแข็ง เช่น เหล็ก สามารถนำคลื่นด้วยความเร็วที่สูงกว่าอากาศมาก

ในตัวกลางที่ไม่มีการกระจาย (non-dispersive medium) ความเร็วเสียงไม่ขึ้นกับความถี่ ดังนั้นความเร็วในการส่งถ่ายพลังงานและความเร็วในการเคลื่อนที่ของเสียงนั้นมีค่าเท่ากันในย่านความถี่เสียงที่มนุษย์สามารถได้ยินนั้น อากาศมีคุณสมบัติเป็นตัวกลางที่ไม่มีการกระจาย แต่จะสังเกตว่า CO_2 ในอากาศนั้นเป็นตัวกลางที่มีการกระจายและทำให้เกิดการกระจายสำหรับคลื่นเสียงความถี่สูง (28 KHz) ในตัวกลางที่มีการกระจาย (dispersive medium) ความเร็วเสียงจะขึ้นกับความถี่ องค์ประกอบที่แต่ละความถี่จะเดินทางด้วย

ความเร็วเฟส (phase velocity) ที่แตกต่างกัน ส่วนพลังงานของเสียงจะเดินทางด้วยความเร็วที่ความเร็วกลุ่ม (group velocity) ตัวอย่างของตัวกลางที่มีการกระจาย คือ น้ำ

ตารางที่ 2.2 ความเร็วเสียงในตัวกลางที่อุณหภูมิ 20 °C [44]

ชนิดวัสดุ	ความเร็ว (m/s)
อากาศ	343
น้ำ	1,480
น้ำแข็ง	3,200
แก้ว	5,300
เหล็ก	5,200
ตะกั่ว	1,200
ไทเทเนียม	4,950
พีวีซี (อ่อน)	80
พีวีซี (แข็ง)	1,700
คอนกรีต	3,100

2.1.4 ความเร็วเสียงในอากาศ

ความเร็วของเสียงในอากาศโดยประมาณหาได้จาก

$$C_{air} \approx (331.5 + 0.6t) \quad (2.10)$$

โดยที่ t คือ อุณหภูมิ ในหน่วย °C ความแม่นยำในการประมาณในช่วงของอุณหภูมิในช่วง -20 °C ถึง 40 °C จะมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 0.2% ในช่วงอุณหภูมิสูงกว่า หรือ ต่ำกว่านั้นความเร็วของเสียงจะประมาณจากสมการที่ 2.11 และตัวอย่างความเร็วเสียงในตัวกลางต่างๆ แสดงในตารางที่ 2.2

$$C_{air} = 331.5 \sqrt{1 + \frac{t}{273}} \quad (2.11)$$

2.2 เลขมัค (Mach number)

เลขมัค (Mach number) คือ สัดส่วนของความเร็ววัตถุต่อความเร็วเสียง เลขมัคปกติจะใช้กับวัตถุที่เดินทางด้วยความเร็วสูงในของไหลและของเหลวที่ไหลด้วยความเร็วสูงในช่องแคบๆ หรืออุโมงค์ลม และเนื่องจากเป็นสัดส่วนของความเร็ว ดังนั้น เลขมัคจึงเป็นเทอมที่ไม่มีหน่วย โดยที่สภาวะระดับน้ำทะเลมาตรฐาน มัค 1 เท่ากับความเร็ว 1,225 km/hr เนื่องจากความเร็วเสียงนั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าเลขมัคนั้นยังเป็นสัดส่วนของแรงเฉื่อย (แรงอากาศพลศาสตร์) ต่อแรงยืดหยุ่น (elastic force)

$$M_a = \frac{V}{V_0} \quad (2.12)$$

เมื่อ

M_a คือ เลขมัค (Mach number)

V คือ ความเร็ววัตถุ

V_0 คือ ความเร็วของเสียงในตัวกลาง

หากนิยามความเร็วตาม Mach number จะสามารถแบ่งประเภทของความเร็วเป็นช่วงได้ดังนี้

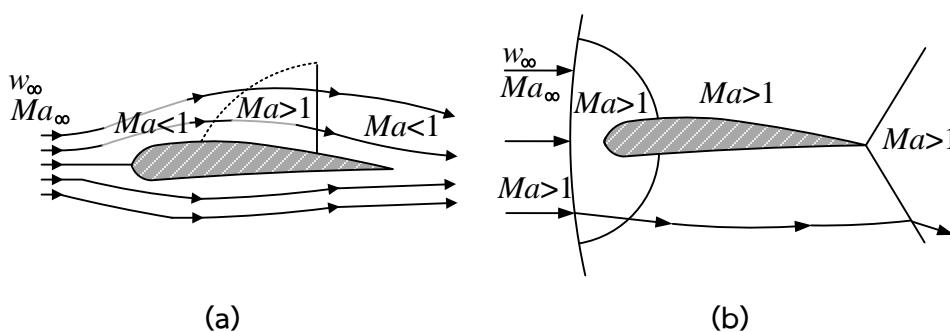
$M_a < 1$ เรียกว่า Subsonic เป็นช่วงของความเร็วที่ต่ำกว่าความเร็วเสียง

$M_a = 1$ เรียกว่า Sonic เป็นช่วงของความเร็วเสียง

$0.8 < M_a < 1.2$ เรียกว่า Transsonic เป็นช่วงของความเร็วย่านเสียงเป็นความเร็วที่อยู่ประมาณความเร็วเสียง

$1.2 < M_a < 5$ เรียกว่า Supersonic เป็นช่วงของความเร็วที่เหนือหรือมากกว่าความเร็วเสียง

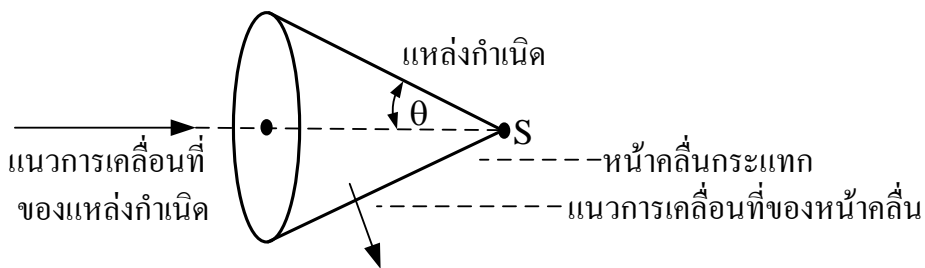
$M_a > 5$ เรียกว่า Hypersonic เป็นช่วงของความเร็วเหนือเสียงมาก มากกว่า 5 เท่าขึ้นไป



รูปที่ 2.1 (a) กระแสลมที่ค่าของ $M_a < 1$ และ (b) กระแสลมที่ค่าของ $M_a > 1$

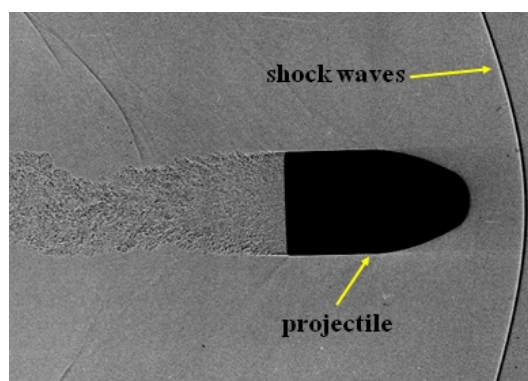
2.3 คลื่นกระแทก (shock wave)

คลื่นกระแทกเกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่ได้เท่ากับความเร็วของคลื่นหรือเร็วกว่า ซึ่งจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่คลื่นไม่สามารถที่จะเคลื่อนที่ออกไปจากแหล่งกำเนิดเสียงได้ โดยถ้าแหล่งกำเนิดเคลื่อนที่ได้เท่ากับความเร็วของคลื่น คลื่นจะเกิดการซ้อนทับกันและเสริมกันกลายเป็นแอมพลิจูดขนาดใหญ่ เรียกว่า คลื่นกระแทก (shock wave) และเมื่อแหล่งกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่เร็วกว่าคลื่น คลื่นจะฟอร์มตัวเป็นรูปกรวยโดยมีมุม $\theta = \sin^{-1}(V/V_0)$ อัตราส่วน (V/V_0) เรียกว่า เลขมัค (Mach number) คลื่นกระแทกเกิดขึ้นได้บ่อยมากในสถานการณ์ต่างๆ กัน เช่น โชนิกบูม (Sonic boom) คือ คลื่นกระแทกประเภทหนึ่งของเครื่องบินที่บินด้วยความเร็วเหนือเสียง คลื่นที่เกิดหลังเรือเร็วก็เป็นคลื่นกระแทกอีกประเภทหนึ่ง นอกอวกาศก็สามารถจะเกิดคลื่นกระแทกได้ อย่างเช่น ลมสุริยะที่วิ่งด้วยความเร็วสูงเข้าชนสนามแม่เหล็กโลก เป็นต้น

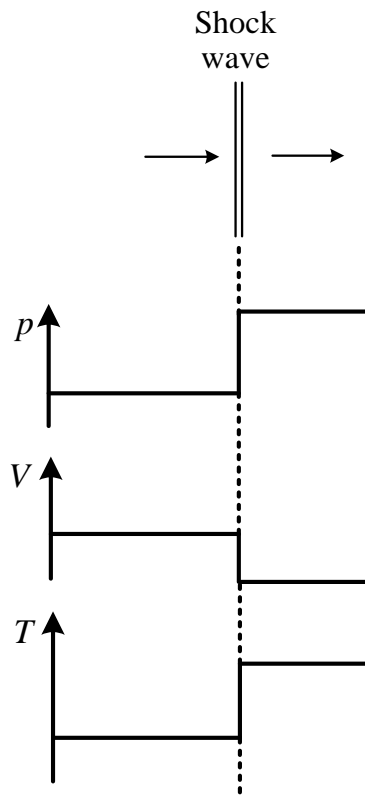


รูปที่ 2.2 คลื่นกระแทก (shock wave)

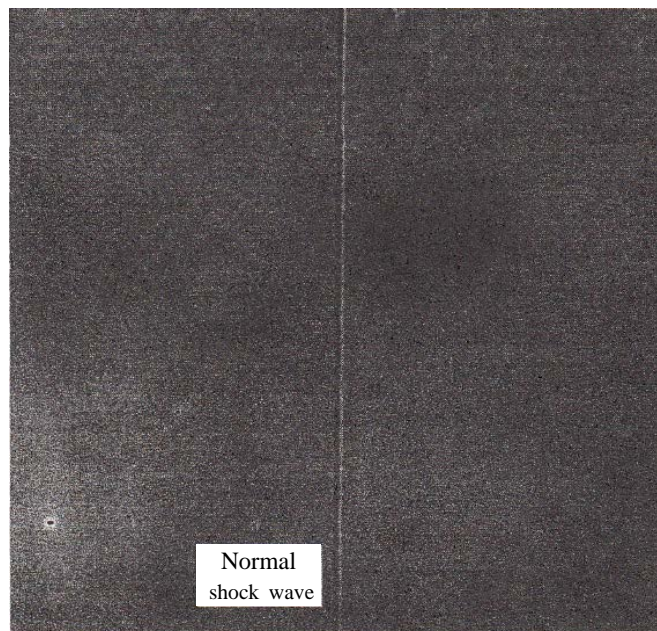
เมื่อแหล่งกำเนิดเสียงเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วเสียง ($V = V_0$ หรือ Mach no เท่ากับ 1) หน้าคลื่นทางขวาจะถูกอัดกันอยู่ทางด้านหน้าเป็นแนวเส้นโค้ง ทำให้หน้าคลื่นเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกัน ความดันของคลื่นเพิ่มขึ้นอย่างมาก เรียกว่า คลื่นกระแทก (shock wave) ตัวอย่างคลื่นกระแทกแสดงดังรูปที่ 2.3 เป็นการเคลื่อนที่ของกระสุนปืนที่วิ่งด้วยความเร็วสูง



รูปที่ 2.3 คลื่นกระแทกเป็นแนวโค้ง [44]



รูปที่ 2.4 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงสถานะต่างๆ ข้ามคลื่นกระแทกตั้งฉาก [45]

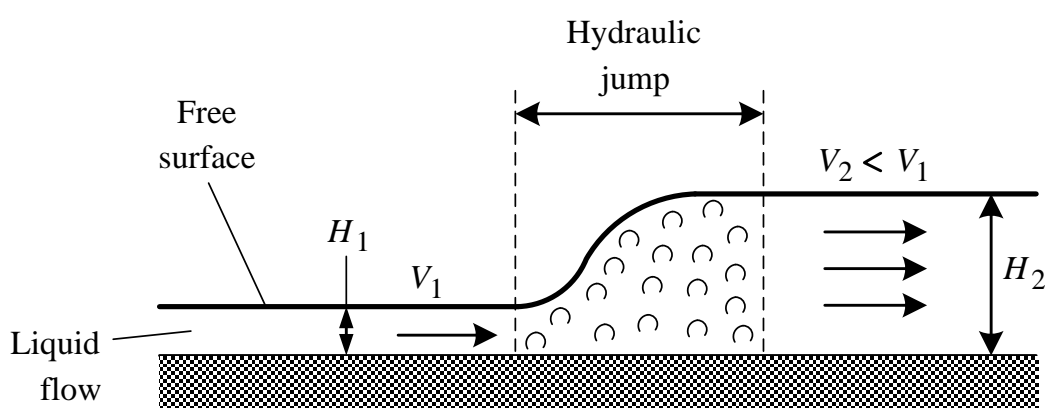


รูปที่ 2.5 ภาพถ่ายของ normal shock wave [45]

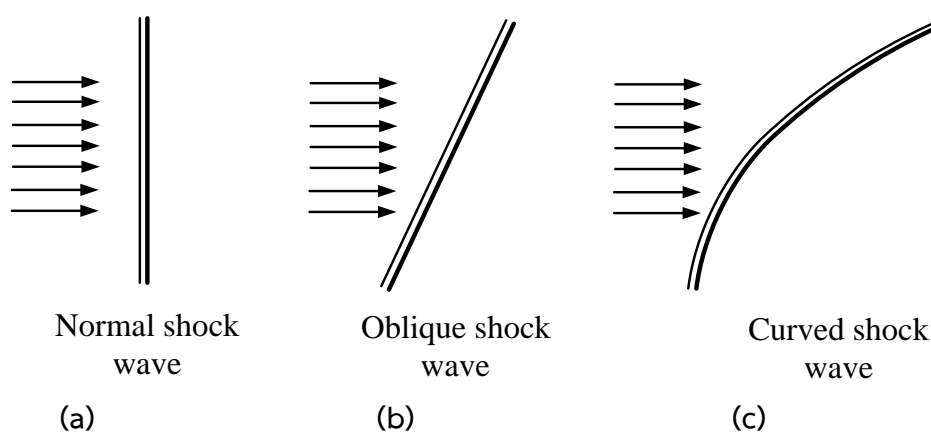
จากข้อมูลที่ได้จากการวิจัยต่างๆ พบว่า ภายใต้บางสภาวะมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของการไหลขึ้นเกือบจะทันที โดยมีการลดลงของความเร็วและการเพิ่มขึ้นของความดันอย่าง

ฉับพลันตลอดช่วงการเปลี่ยนแปลงของการไหลนั้น การที่จะเกิดบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบอย่างฉับพลัน (region of sharp change) ของของไหลได้นั้นความเร็วเริ่มต้นของของไหลจะต้องมีค่าเท่ากับความเร็วเสียง บริเวณที่มีความบางมากๆ ที่อยู่ระหว่างการเปลี่ยนแปลงจากสถานะของการไหลที่มีความเร็วเหนือเสียงและความดันต่ำไปยังสถานะที่มีความเร็วต่ำและความดันสูง เรียกว่า คลื่นกระแทก (shock wave) คลื่นกระแทกที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงทำมุมตั้งฉากกับทิศทางการไหลเรียกว่า คลื่นกระแทกตั้งฉาก (normal shock wave) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.4 และภาพถ่ายของ normal shock wave แสดงดังรูปที่ 2.5

คลื่นกระแทกมีความคล้ายคลึงกับลักษณะของการเกิด Hydraulic jump ซึ่งจะเกิดขึ้นในการไหลแบบผิวอิสระ (free surface flow) ลักษณะการเกิด Hydraulic jump แสดงดังรูปที่ 2.6 ตัวอย่างของการเกิด Hydraulic jump คือ การไหลของกระแสน้ำในเขื่อนหรือทำนบ



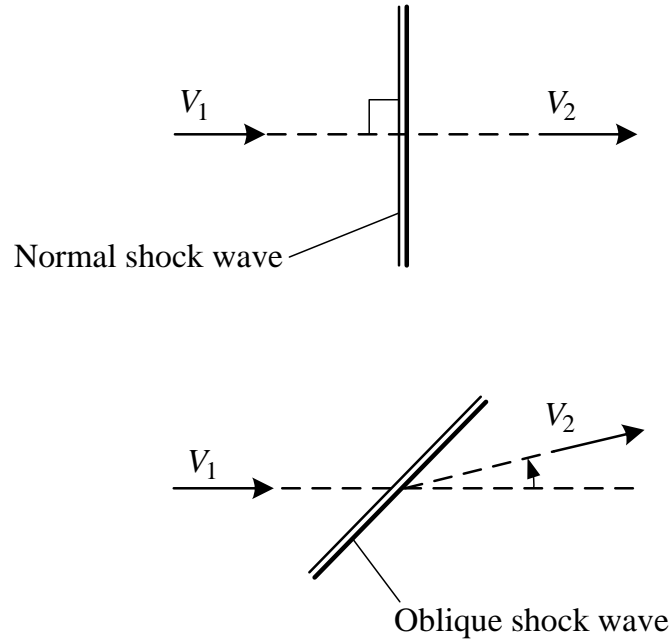
รูปที่ 2.6 Hydraulic jump [45]



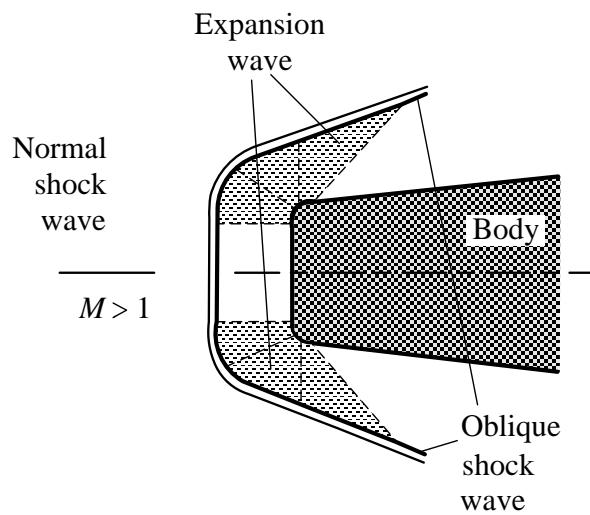
รูปที่ 2.7 (a) normal shock wave (b) curved shock wave และ (c) oblique shock wave

โดยทั่วไปคลื่นกระแทกจะมีลักษณะโค้ง (curved shock wave or bow shock) แต่ก็มีจำนวนมากที่มีลักษณะตรงทำมุม 90° กับทิศทางการไหล (normal shock wave) และเอียงทำมุมกับทิศทางการไหล (oblique shock wave) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ในกรณีของ normal shock wave ความเร็วหน้าและหลังคลื่นกระแทกจะทำมุม 90° กับคลื่นกระแทก ในกรณีของ oblique shock wave เกิดจากการเปลี่ยนทิศ

ของความเร็วหน้าคลื่นกระแทก ดังแสดงในรูปที่ 2.8 คลื่นกระแทกที่สมบูรณ์แบบอาจจะประกอบด้วย normal shock wave , curved shock wave และ oblique shock wave ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.8 การเปลี่ยนทิศของความเร็วด้านหน้าของ normal และ oblique shock wave [45]



รูปที่ 2.9 shock wave ที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง [45]

2.4 ชุดยิงกระสุนความเร็วสูง

ปัจจุบันงานวิจัยในด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรม ชุดยิงกระสุน (Launcher) หรืออาจเรียกว่า ปืน (gun) มีมากมายหลายแบบ เช่น ชุดยิงแบบ electrostatic และ electromagnetic ชุดยิงแบบใช้การระเบิด (explosive propulsion) ชุดยิงแบบ plasma เป็นต้น โดยแต่ละแบบจะมีความเหมาะสมในแต่ละงานวิจัย

อย่างไรก็ตามในหัวข้อนี้จะพูดถึงชนิดของชุดยิงที่ใช้กันมากในงานวิจัยปัจจุบันโดยจะจำแนกชนิดของชุดยิงหรือปืนออกตามแหล่งพลังงานของตัวขับเคลื่อนกระสุนซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.4.1 ชุดยิงกระสุนแบบใช้แก๊สเบา (light gas gun)

ชุดยิงกระสุนแบบนี้จะใช้แก๊สเบา (light gas) เช่น ไฮโดรเจน (H_2) หรือ ฮีเลียม (He) เป็นพลังงานในการขับเคลื่อน ดังนั้นชุดยิงชนิดนี้จึงเรียกว่า light gas gun โดยส่วนประกอบหลักของปืนชนิดนี้คือ ถังเก็บความดันสูง (high pressure reservoir) แผ่นฟิล์มบาง (diaphragm) และ ท่อปล่อยกระสุน (launch tube) หรือ ลำกล้องปืน (gun barrel) กระสุนปืน (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 จะขาดความดันภายใน high pressure reservoir จะขับหรือเร่งความเร็วของกระสุน ดังรูปที่ 2.10 หากประยุกต์กฎของการเคลื่อนที่ของนิวตัน จะสามารถหาความเร็วที่เกิดขึ้นในลำกล้องปืนได้

$$m \frac{dv_p}{dt} = m \frac{dv_p}{dx} v_p = PA \tag{2.13}$$

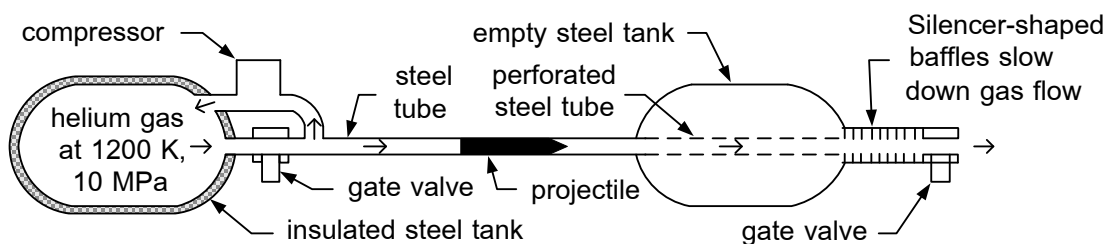
เมื่อ

m คือ น้ำหนักของกระสุน

v_p คือ ความเร็วของกระสุน ณ ตำแหน่ง x ใดๆ

P คือ ความดัน

A คือ พื้นที่หน้าตัดของลำกล้องปืน



รูปที่ 2.10 แผนภาพส่วนประกอบของ Single-stage light gas gun

หากอินทิเกรตตลอดความยาวของลำกล้องปืน (L) จะได้

$$\frac{mv_0^2}{2} = A \int_0^L P dx \tag{2.14}$$

เมื่อ

v_0 คือ ความเร็วของกระสุนที่ทางออกของลำกล้องปืน

เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาจะกำหนดให้ \bar{P} มีค่าคงที่ตลอดการเคลื่อนที่ของกระสุนในลำกล้องปืน ซึ่งมีค่าเป็น

$$v_o = \sqrt{2\bar{P} \frac{AL}{m}} \quad (2.15)$$

โดยสมการนี้จะมีค่าความผิดพลาดเนื่องมาจากสาเหตุหลักคือความเสียดทานระหว่างกระสุนปืนกับภายในลำกล้องปืน และในความเป็นจริงค่าของ \bar{P} จะมีค่าไม่คงที่เนื่องจากการเพิ่มปริมาตรมากขึ้นตามการเคลื่อนที่ของกระสุน ซึ่งความดัน \bar{P} ดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับแก๊สเบาและความดันภายใน Pressure reservoir (P_0) ถ้าพิจารณาเป็นแก๊สอุดมคติ (idea gas) ซึ่งมีค่าความดันเป็น P_0 และความเร็วเสียง (sound speed) เป็น C ดังนั้นความดันของ P ในขณะแก๊สขยายตัวจะมีความสัมพันธ์เป็น

$$P = P_0 \left(1 - \frac{v_g}{\left(\frac{2}{\gamma} - 1\right)C} \right)^{2\gamma/(\gamma-1)} \quad (2.16)$$

เมื่อ

v_g คือ ความเร็วของการขยายของแก๊ส

γ คือ Ratio of the specific heats

ถ้าสมการที่ 2.16 ใช้ในการหาค่าความเร็วแก๊สหลังกระสุนปืน จะได้อัตราส่วนของ P/P_0 จะขึ้นอยู่กับ

$$\frac{v_g (\gamma - 1)}{2C} \quad (2.17)$$

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

$$v_{esc} = \left(\frac{2}{\gamma - 1} \right) C \quad (2.18)$$

ค่าความเร็วสูงสุดที่ทางออก คือ Escape velocity (v_{esc}) มีค่าเท่ากับ

$$v_{esc} = \left(\frac{2}{\gamma - 1} \right) C = \frac{2}{\gamma - 1} \sqrt{\frac{\gamma RT_0}{M}} \quad (2.19)$$

เมื่อ

T_0 คือ อุณหภูมิภายใน pressure reservoir

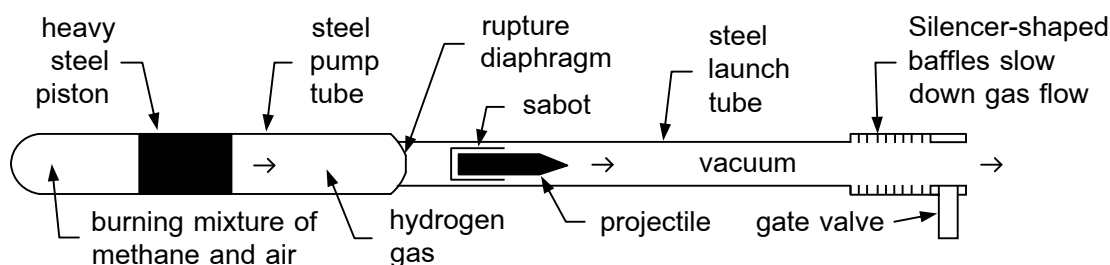
M_{mol} คือ มวลโมเลกุลของแก๊สภายใน pressure reservoir

R คือ universal gas constant

ซึ่งความสัมพันธ์นี้แสดงว่า light gas gun จะมีความเร็วสูงก็ต่อเมื่อใช้แก๊สที่มีค่ามวลโมเลกุลต่ำและแก๊สจะต้องมีอุณหภูมิสูง

2.4.2 ชุดยิงกระสุนแบบใช้แก๊สเบาแบบสองช่วง (two stage light gas gun)

เมื่อใช้ลูกสูบ (piston) กดอัดให้แก๊สที่ใช้ขับเคลื่อน (driver gas) มีความดันและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ชุดยิงกระสุนแบบนี้จะเรียกว่า ชุดยิงกระสุนแบบใช้แก๊สเบาแบบสองช่วง (two stage light gas gun) ซึ่งเป็นปืนที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง ดังรูปที่ 2.11 แสดงส่วนประกอบพื้นฐานของ piston-powered two-stage light gas gun โดยที่แก๊สเบาถูกบรรจุอยู่ในท่อที่มีผนังหนาและเรียบซึ่งโดยทั่วไปจะถูกเรียกว่า pump tube โดยที่ด้านหนึ่งจะถูกปิดโดยลูกสูบ (piston) และอีกด้านหนึ่งจะปิดโดย steel diaphragm



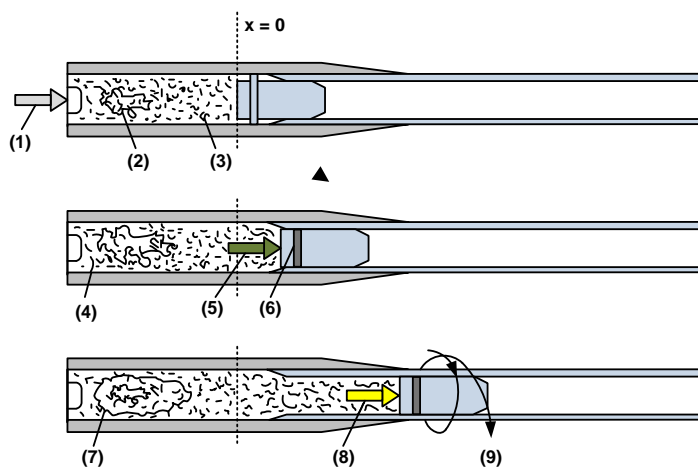
รูปที่ 2.11 แผนภาพส่วนประกอบของ two stage light gas gun

2.4.3 ชุดยิงกระสุนแบบใช้ดินปืน (powder gun)

ชุดยิงกระสุนชนิดนี้จะใช้ชุดปืนทดลองแทนแก๊สซึ่งมีหลักการทำงานคือ ใช้แรงของปืนในการขับเคลื่อนกระสุนปืนโดยมีดินปืนเป็นเชื้อเพลิง

จากรูปที่ 2.12 สามารถอธิบายการทำงานตามหมายเลขได้ดังนี้

- (1) เริ่มมีการจุดชนวนห้องเผาไหม้
- (2) เริ่มมีการเผาไหม้
- (3) มีแรงดันจากการเผาไหม้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว
- (4) ห้องเผาไหม้เกิดแรงดันประมาณ 14-68 MPa
- (5) กระสุนปืนเริ่มมีการเคลื่อนที่จากอิทธิพลของแรงดัน
- (6) มีแรงต้านการเคลื่อนที่ของกระสุนปืน
- (7) ความดันเริ่มสูงขึ้นจากอัตราการเผาไหม้ที่มากขึ้น
- (8) กระสุนปืนเคลื่อนที่มากขึ้นและปริมาตรห้องเผาไหม้มากขึ้น
- (9) เกิดแรงหมุนตัวของกระสุนปืนที่เกิดจากแรงดันสูงสุดจากการเผาไหม้สมบูรณ์



รูปที่ 2.12 แผนภาพการทำงานของ powder gun

2.5 เทคนิคการถ่ายภาพ (visualization technique) [45]

เทคนิคการถ่ายภาพที่นิยมใช้ในการวิจัย สามารถแบ่งออกได้ 3 เทคนิค คือ

1. เทคนิคชาโดว์กราฟ (Shadowgraph technique)
2. เทคนิคชไลเรน (Schlieren technique)
3. เทคนิคอินเทอเฟอโรมิเตอร์ (Interferometer technique)

โดยทั้ง 3 เทคนิคอาศัยหลักการหักเหของลำแสงเมื่อผ่านแก๊สที่มีความหนาแน่นเปลี่ยนแปลง โดยดัชนีการหักเหของแสงจะเป็นฟังก์ชันความหนาแน่นของแก๊สดังสมการที่ 2.20

$$n = \text{function}(\rho) \quad (2.20)$$

หรือสามารถประมาณเป็นสมการเส้นตรง คือ

$$n = 1 + \beta \frac{\rho}{\rho_s} \quad (2.21)$$

เมื่อ

ρ_s = ความหนาแน่นของแก๊สที่ 0°C ที่ความดันบรรยากาศ

β = เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของแก๊ส ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่าคงที่ของแก๊ส [45]

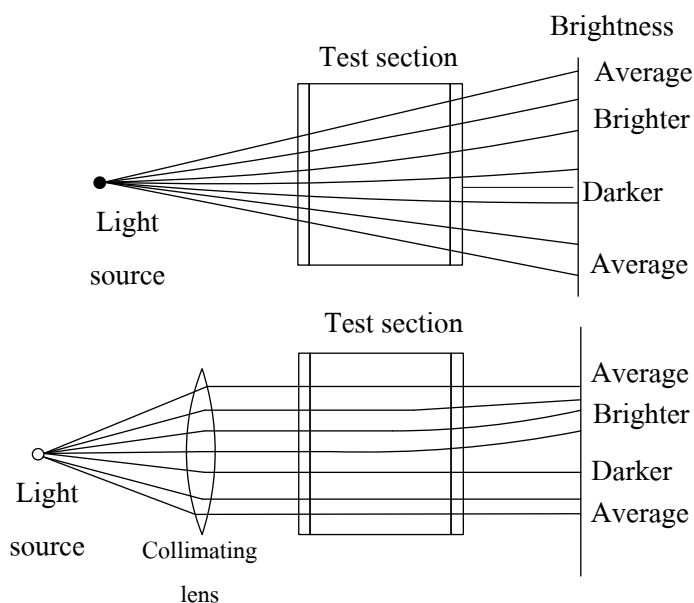
Gas	β
Air	0.000292
Nitrogen	0.000297
Oxygen	0.000271

Water vapor	0.000254
Carbon dioxide	0.000451

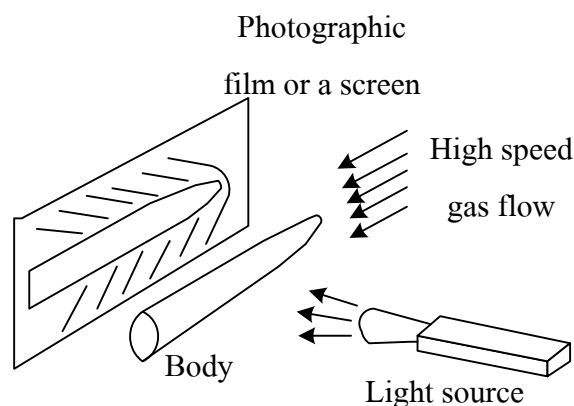
ดังนั้นหากพิจารณาว่า ความหนาแน่นของแก๊สเปลี่ยนแปลงไปในแนวแกน y ($d\rho/dy$) จะได้ว่าดัชนีการหักเหของแสงก็จะเปลี่ยนแปลงในแนวแกน y (dn/dy) เช่นกัน โดยหลักการถ่ายภาพของแต่ละวิธีมีรายละเอียดดังนี้

2.5.1 การถ่ายภาพด้วยเทคนิคซาโดว์กราฟ (Shadowgraph technique)

เมื่อพิจารณาการฉายแสงผ่านแก๊สในห้องทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.13 ลำแสงจะเกิดการหักเหเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของแก๊ส ถ้าวางจอร์บแสงเพื่อแสดงรูปที่เกิดจากการหักเหของแสงที่เคลื่อนที่ผ่านแก๊สมาจะพบว่า ลำแสงจะเกิดการหักเหโดยบางส่วนจะรวมกันแสงที่ปรากฏที่จอจะสว่างมากกว่าปกติ ในขณะที่เมื่อลำแสงกระจายออกจากกัน แสงที่ปรากฏจะมีมืด ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 เทคนิคการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph

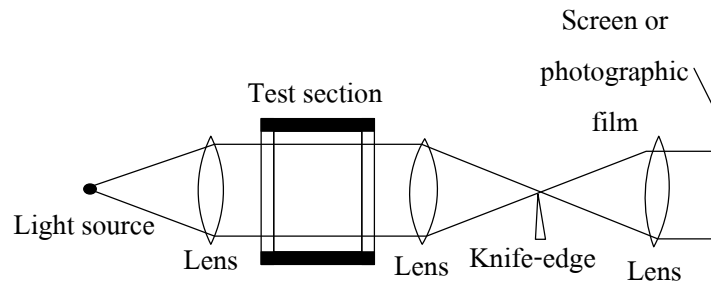


รูปที่ 2.14 การสร้างภาพด้วยเทคนิค Shadowgraph

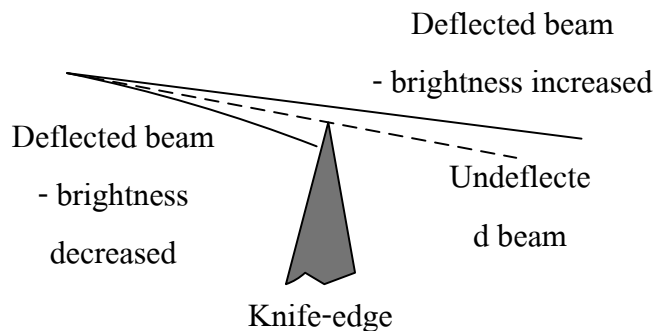
ถ้าพิจารณาการเบี่ยงเบนของลำแสงที่แสดงในรูปที่ 2.13 จะพบว่า ลำแสงที่ส่องผ่านแก๊สนั้น ถ้าไม่มีเลนส์ที่ทำให้แสงขนานกันภาพที่ปรากฏบนจอร์รับภาพจะมีขนาดที่ใหญ่กว่าขนาดของจริง ดังนั้นหากใช้เลนส์จะทำให้ภาพที่ขึ้นที่จอร์รับภาพมีขนาดเท่ากับขนาดจริง จากสมการของการหักเหของแสงในสมการที่ 2.20 จะพบว่า การถ่ายภาพด้วยเทคนิค Shadowgraph จะไวต่อความหนาแน่นที่เปลี่ยนแปลงด้วยความสัมพันธ์ $d^2\rho/dy^2$ เช่นเดียวกับดัชนีหักเหของแสง d^2n/dy^2 โดยในธรรมชาตินั้นจะสามารถพบลักษณะของภาพแบบ Shadowgraph ได้ เช่น แสงแวววาวจากหลังคาที่ร้อนในฤดูร้อนทำให้เกิดภาพการไหลของความร้อน ถึงแม้ว่าจะไม่มีควันวบบริเวณหลังคาโดยภาพที่เห็นดังกล่าว คือ ภาพแบบ Shadowgraph โดยที่ดวงอาทิตย์ในภาพนี้เป็นแหล่งกำเนิดของแสง

2.5.2 การถ่ายภาพเทคนิคชไรเรน (Schlieren technique)

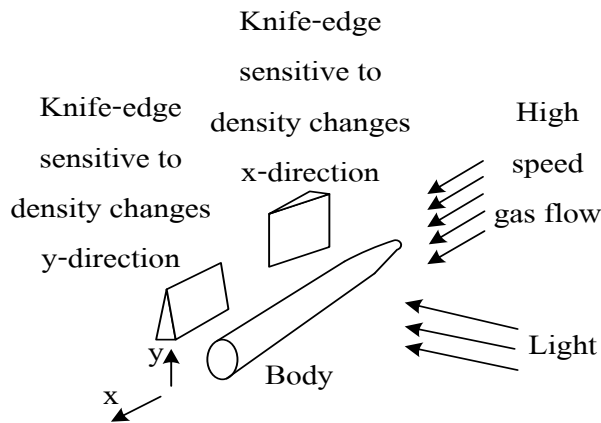
หลักการพื้นฐานของการถ่ายภาพด้วยเทคนิค Schlieren แสดงในรูปที่ 2.15 คือ เมื่อแสงจากแหล่งกำเนิดแสงเดินทางผ่านเลนส์ จะทำให้ลำแสงมีทิศทางขนานกันผ่านห้องทดสอบ จากนั้นจะส่องผ่านเลนส์อีกอันซึ่งทำหน้าที่รวมแสงไปยังจุดโฟกัสซึ่ง ณ บริเวณนี้จะมี knife-edge วางติดตั้งอยู่ โดย Knife-edge จะทำหน้าที่ตัดแสงที่รบกวนออกไป ลำแสงที่ผ่าน Knife-edge จะสว่างมากขึ้นจึงทำให้รูปที่ปรากฏออกมามีความคมชัดมากขึ้น ดังรูปที่ 2.16 แสดงหลักการทำงานของ Knife-edge



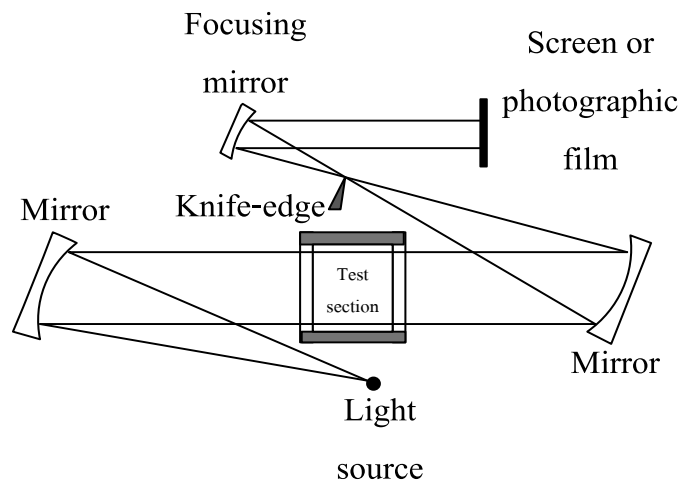
รูปที่ 2.15 พื้นฐานการจัดระบบชไรเรน (Schlieren)



รูปที่ 2.16 หลักการทำงานของ Knife-edge



รูปที่ 2.17 ผลจากการเปลี่ยนทิศทางของคมมีด



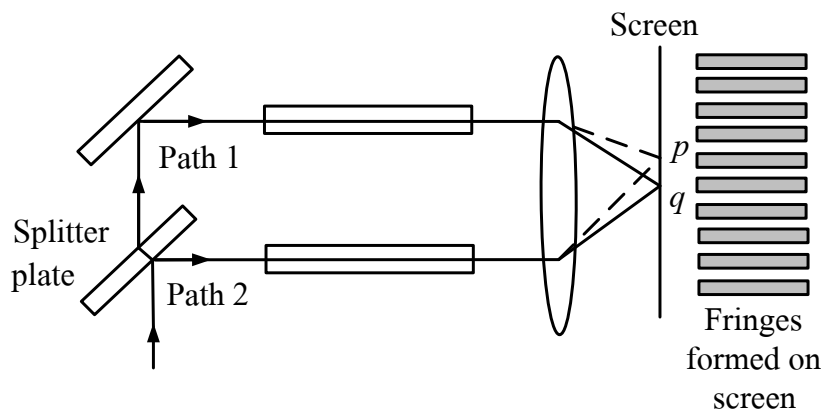
รูปที่ 2.18 ระบบชไลเรนกับกระจกสะท้อน (Schlieren system with mirrors)

รูปที่ 2.17 แสดงผลจากการเปลี่ยนทิศทางของ knife-edge เมื่อต้องการสังเกตการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของแก๊สในแนวแกน y ให้ปรับ knife-edge ให้อยู่ในแนวแกน x และเมื่อต้องการสังเกตการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของแก๊สในแนวแกน x ให้ปรับ knife-edge ให้อยู่ในแนวแกน y นอกจากนี้จะใช้เลนส์ในการทำให้แสงที่ส่องผ่านห้องทดสอบขนานแล้วยังสามารถใช้กระจกโค้ง (Parabolic mirror) ได้ซึ่งจะสามารถช่วยลดขนาดพื้นที่ที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในรูปที่ 2.18

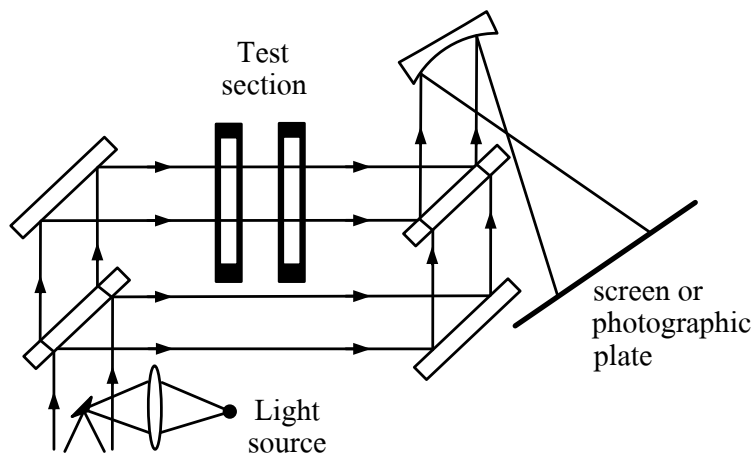
2.5.3 การถ่ายภาพด้วยเทคนิคอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์ (interferometer system)

จากรูปที่ 2.19 แสดงการแยกลำแสงเป็นสองทิศทางโดย splitter plate ซึ่ง splitter plate จะมีคุณสมบัติเป็นกระจกสามารถสะท้อนแสงบางส่วนที่ตกกระทบและสามารถส่งทะลุผ่านได้ในบางส่วน จึงทำให้เกิดการเดินทางของแสงออกเป็นสองเส้นทาง หากทำให้ลำแสงทั้งสองขนานกันดังรูป ซึ่งลำแสงสองลำมี

ระยะทางในการเดินทางต่างกัน จึงทำให้เฟสต่างกัน เมื่อนำลำแสงทั้งสองมาส่องผ่านเลนส์เพื่อรวมแสงจะทำให้เกิดบริเวณมืดและสว่างบนจอร์รับแสงที่เรียกว่า Fringes โดยหลักการดังกล่าวคือ หลักการพื้นฐานของการถ่ายภาพด้วยเทคนิคอินเทอเฟอโรมิเตอร์



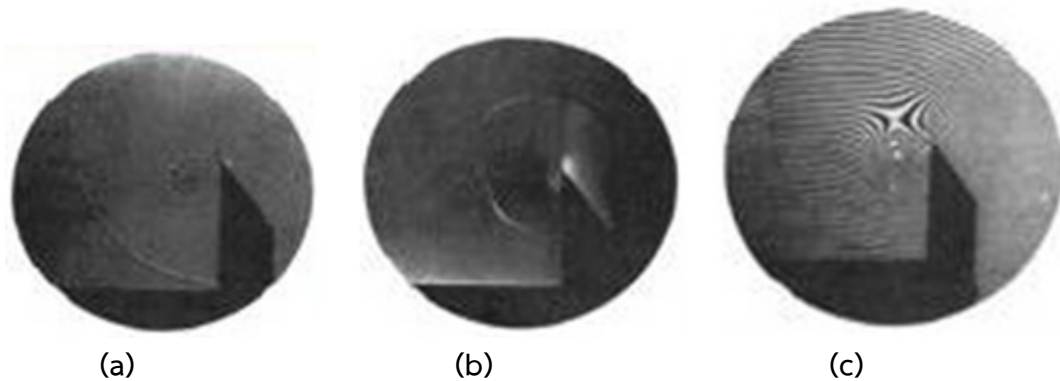
รูปที่ 2.19 ระบบอินเทอเฟอโรมิเตอร์ขั้นพื้นฐานโดยการใช้ beam splitter



รูปที่ 2.20 Mach-Zehnder interferometer.

หากเพิ่มลำแสงอีกคู่หนึ่งให้ส่องผ่านแก๊สที่มีความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงในห้องทดสอบดังรูปที่ 2.20 ลำแสงดังกล่าวจะมีเวลาในการเดินทางที่แตกต่างกันออกไปเป็นผลให้รูปแบบ Fringes ที่เกิดขึ้นที่เพิ่มขึ้นแตกต่างกันไปด้วย เมื่อนำลำแสงทั้งสองฉายลงบนจอร์รับภาพ จะได้ภาพที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงการไหล ซึ่งเป็นหลักการที่เรียกว่า Mach-Zehnder interferometer โดยส่วนใหญ่ระบบอินเทอเฟอโรมิเตอร์ มักจะใช้กระจกแทนการใช้เลนส์ด้วยเหตุผลเดียวกับรูปที่ 2.18

รูปที่ 2.21 แสดงภาพถ่ายจากเทคนิคการถ่ายภาพต่างกันจากการสังเกตพฤติกรรมการไหลในเงื่อนไขเดียวกัน ซึ่งจะพบว่า ภาพถ่ายด้วยเทคนิค Shadowgraph จะสังเกตพฤติกรรมการไหลได้ไม่ชัดเจนเท่ากับภาพถ่ายด้วยเทคนิค Schlieren ในขณะที่ภาพถ่ายด้วยเทคนิค Interferometer จะสังเกตพฤติกรรมการไหลได้จาก Fringes ในภาพได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 2.21 การถ่ายภาพของการไหลเดียวกันด้วยเทคนิค (a) Shadowgraph photograph, (b) Schlieren photograph และ (c) Interferometer photograph [51]

2.6 การประยุกต์ใช้ High-speed liquid jet

ปัจจุบันได้มีการนำเอา high-speed liquid jet มาประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ ดังตัวอย่าง ดังนี้

2.6.1 Water jet cutting technology

ในงานด้าน water jet cutting พบว่า วัสดุที่หลุดออกเกิดจากการกัดเซาะของลำพุงความเร็วสูงที่ความเร็วเหนือเสียง (supersonic) ไม่ได้เกิดจากความดันแต่เกิดจากความเร็วของกระแสลำพุงกัดเซาะเอาอนุภาคหรือเกรนของวัสดุให้หายไป โดยความเร็วของลำพุงจะเกิดจากความดันที่อยู่ภายในหัวฉีด ซึ่งหัวฉีดจะมีขนาดเล็กมาก โดยทั่วไปความดันที่ใช้ในอุตสาหกรรมจะมีความดันประมาณ 40 ksi ซึ่งทำให้ได้ลำพุงที่ความเร็วเท่ากับ 2 มัค และที่ความดันประมาณ 60 ksi จะให้ความเร็วของน้ำที่ประมาณ Mach no เท่ากับ 3 ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.22

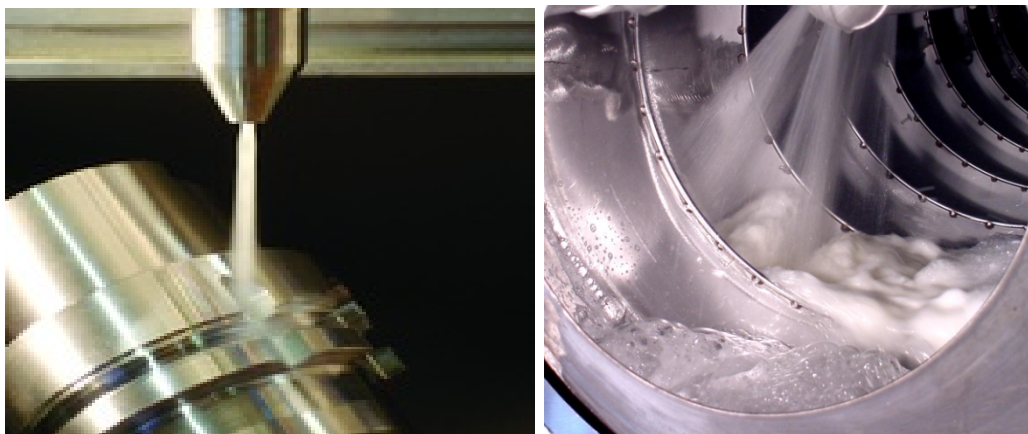


รูปที่ 2.22 Water jet cutting technology [46, 47]

2.6.2 Water jet cleaning technology

ในงานด้าน water jet cleaning จะเป็นเทคโนโลยีที่ประยุกต์ใช้ลำพุงความเร็วสูงเพื่อทำความสะอาด วัสดุมีหลักการคล้ายกับ water jet cutting โดยการใช้ความเร็วของลำพุงที่ความเร็วเหนือเสียง (supersonic)

เพื่อที่จะขจัดสิ่งสกปรกให้ออกไปได้อย่างรวดเร็ว แต่มีความแตกต่างจาก water jet cutting ตรงที่ใช้แรงดันในการผลิตลำพุ่งออกมาและลักษณะของหัวฉีดที่แตกต่างกัน โดยใช้แรงดันของน้ำอยู่ที่ประมาณ 1,500-3,500 psi ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.23



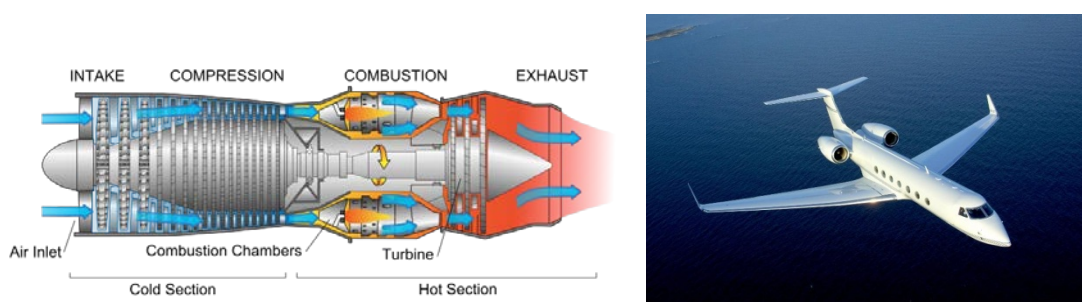
รูปที่ 2.23 Water jet cleaning technology [48]

2.6.3 Needleless technology

ปัญหาของเข็มฉีดยานั้นมีมากมาย โดยเฉพาะในประเทศกำลังพัฒนาและประเทศด้อยพัฒนา ไม่ว่าจะเป็นการขาดแคลนตัวอุปกรณ์เองขาดความพิถีพิถันเรื่องความสะอาดและสุขอนามัย ประมาณ 30% ของจำนวนครั้งที่มีการฉีดยานั้นไม่ปลอดภัย นอกจากนี้ยังมีรายงานการติดเชื้อจากเข็มฉีดยาที่ไม่สะอาด ส่งผลถึงขั้นเสียชีวิตอีกเป็นจำนวนมากถึง 1.3 ล้านคนทั่วโลก แต่ถึงอย่างไรเข็มฉีดยาก็ยังเป็นสิ่งจำเป็นในการป้องกัน (วัคซีน) และรักษาโรค ในบางประเทศด้อยพัฒนาที่มีอุปกรณ์ทางการแพทย์มีอยู่อย่างจำกัด ด้วยความรู้เท่าไม่ถึงการณ์และความเพิกเฉย เข็มฉีดยาถูกนำมาใช้ซ้ำกับผู้ป่วยหลายๆ คนโดยปราศจากการฆ่าเชื้อ (ที่ควรจะต้องผ่านความร้อน 121 °C เป็นเวลา 20 นาที ในแต่ละครั้งก็นำมาใช้) นอกจากนี้เข็มที่ใช้แล้วยังถูกกำจัดอย่างไม่เหมาะสม ซึ่งที่มาของแนวคิดเข็มฉีดยาแบบไม่ต้องใช้เข็มหรือ needle-free injectors (NFIS) ซึ่งมีหลักการทำงานอย่างเดียวกันแต่ไม่ต้องพึ่งเข็มแต่ใช้หัวฉีด (nozzle orifice) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 76-360 ไมโครเมตร เป็นตัวลำเลียงยาแทน ซึ่งสามารถส่งผ่านตัวยาคือเข้าไปใต้ผิวหนัง ไปสู่ชั้นไขมันหรือกล้ามเนื้อได้อย่างง่ายดายด้วยความเร็ว 100 m/s (ขึ้นอยู่กับความหนาและหนาของผิวหนัง รวมถึงบริเวณที่ฉีดด้วย) นอกจากนี้ การกำจัดก็เป็นเรื่องง่ายไม่ต้องใช้ถังเก็บขยะแหลมคม (sharps container) ไม่ต้องกังวลเรื่องการสเตอร์ไรส์ฆ่าเชื้อที่ไม่เหมาะสมหรือการใช้เข็มฉีดยาร่วมกัน



รูปที่ 2.24 Injectors injectors [49]



รูปที่ 2.25 Jet engine technology [50]

2.6.4 Jet engine technology

จากรูปที่ 2.25 แสดง Jet engine technology ซึ่งเครื่องยนต์ jet เป็นเครื่องจักรที่ถูกออกแบบมาเพื่อให้ผลิตหรือสร้างแก๊สที่มีความเร็วสูงไหลผ่านช่องที่กำหนด โดยเครื่องยนต์เริ่มต้นการหมุน compressor ด้วย starter อากาศจากภายนอกเครื่องยนต์ก็จะถูกดูดเข้าเครื่องยนต์ compressor ก็จะทำงานกับอากาศที่เข้ามาและก็จะส่งอากาศที่อัดผ่าน compressor นี้ ต่อไปยังส่วนของห้องเผาไหม้ ซึ่งจะมีความดันเพิ่มขึ้นมากถึง 12 เท่าของอากาศก่อนที่จะผ่านเข้าเครื่องยนต์ ในส่วนของห้องเผาไหม้หัวจุดไฟ (igniter) ก็จะทำกรจุดเครื่องยนต์ โดยจุดส่วนผสมของน้ำมันเชื้อเพลิงและอากาศในห้องเผาไหม้ หัวจุดไฟจะมีหนึ่งหรือสองหัว ซึ่งก็คล้ายกับหัวเทียนในรถยนต์ เมื่อเครื่องยนต์ติดหรือทำงานแล้วและ compressor หมุนด้วยความเร็วที่เพียงพอตามที่กำหนด แล้ว starter และ igniters ก็จะถูกปิดหรือเลิกใช้ ต่อจากนั้นเครื่องยนต์ก็จะทำงานด้วยตัวเอง โดยไม่ต้องได้รับความช่วยเหลือจาก starter และ igniters อีกต่อไปตราบเท่าที่น้ำมันเชื้อเพลิงและอากาศผสมในอัตราส่วนที่ถูกต้องยังไหลเข้าห้องเผาไหม้อย่างต่อเนื่องเพียง 25% ของอากาศ ที่มีส่วนใช้ในการเผาไหม้ที่ห้องเผาไหม้ส่วนอากาศที่เหลือก็จะผสมกับแก๊สไอเสียหรือแก๊สที่ผ่านการเผาไหม้เพื่อลดอุณหภูมิของแก๊สไอเสียหรือแก๊สที่ผ่านการเผาไหม้ก่อนที่แก๊สไอเสียจะเข้าไปยังส่วนของกังหัน (turbine) ส่วนของกังหันก็จะนำเอาพลังงานจากกระแสของแก๊สที่ไหลผ่านมาใช้ประโยชน์ พลังงานส่วนใหญ่ก็จะถูกนำเอาไปใช้ในการหมุน compressor และอุปกรณ์ต่างๆ แรงขับของเครื่องยนต์ (thrust) ก็มาจากการเอามวลของอากาศจำนวนมากจากด้านหน้าของเครื่องแล้วก็ดันมันออกไปด้วยความเร็วที่สูงมาก เมื่อเทียบกับความเร็วเมื่อตอนที่เข้ามาที่

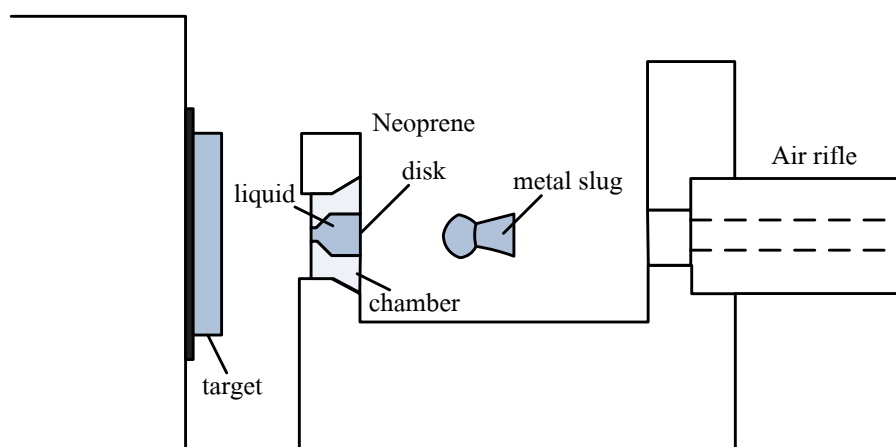
ด้านหน้าหรือที่ compressor หากสามารถฉีดน้ำมันที่ความเร็วสูงมากเท่าใดก็จะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ดีขึ้นเท่านั้น ส่งผลให้เครื่องบินที่ติดตั้งเครื่องยนต์ Jet สามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยความเร็วสูงขึ้นนั่นเอง

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ High-speed liquid jet

ปัจจุบันได้มีนักวิจัยจำนวนมากได้พยายามศึกษาเกี่ยวกับลำพุ่งความเร็วสูงโดยศึกษาเกี่ยวกับคุณลักษณะและความเร็วของลำพุ่งซึ่งมีรายละเอียดพอสังเขปดังนี้

ในปี ค.ศ.1958, Bowden, F.P. และ Brunton, J.H. [37] ได้คิดค้นเทคนิคใหม่ในการผลิตลำพุ่งความเร็วสูง โดยวิธีนี้จะยิงกระสุนความเร็วสูง (high-speed projectile) เข้าไปกระทบกับของเหลวปริมาตร 0.1 cm^3 ซึ่งบรรจุอยู่ในหัวฉีด (nozzle) ที่ทำด้วย stainless steel ถูกฉีกด้วยแผ่น Neoprene ดังแสดงในรูปที่ 2.26 จากการทดสอบพบว่า ลำพุ่งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1-2 mm เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ความดันของของเหลวนั้นจะมีค่าสูงขึ้นหลังจากนั้นของเหลวก็จะฉีดออกมาจากหัวฉีดด้วยความเร็วสูงที่ความเร็วเท่ากับ 1,200 m/s โดยการผลิตลำพุ่งความเร็วสูงด้วยเทคนิคนี้ถูกเรียกว่า impact driven method หรือเรียกตามชื่อนักวิจัยว่า Bowden and Brunton method ดังแสดงในรูปที่ 2.26 ซึ่งจากนั้นเป็นต้นมา เทคนิคนี้เป็นที่นิยมใช้ในการผลิตลำพุ่งความเร็วสูงในงานวิจัยต่างๆ

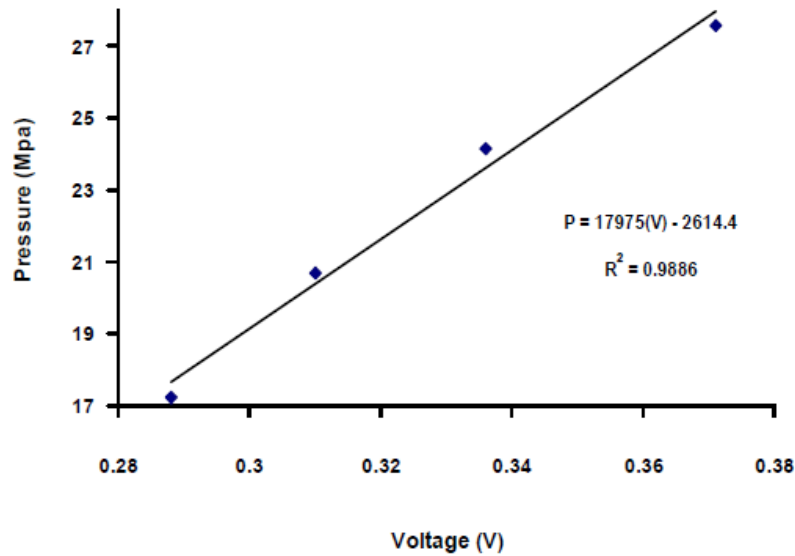
ในปี ค.ศ.1995 T. Obara, และคณะ [19] ได้ทดลองการกระแทกของลำพุ่งบนพื้นผิวของเหลวและของแข็ง ซึ่งพบว่า ความเสียหายที่เกิดขึ้นนั้นจะเกิดจาก cavitation และ การกัดกร่อน ในการทดลองนี้ใช้ลำพุ่งของเหลวขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 mm จากชุดทดลอง single impact jet ความเร็วในการกระแทกมีค่าเท่ากับ 600 m/s ลำพุ่งจะกระทบบนพื้นผิวของน้ำและ polymethyl-methacrylate (PMMA) ที่วางห่าง 15 mm ที่ทางออกหัวฉีด และวัดความดันโดยใช้ Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Film ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในการกระแทกจะถูกถ่ายภาพโดยใช้ image-converter high-speed ซึ่งพบการเกิด shock wave, cavitation และฟองอากาศ จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การกระแทกระหว่างลำพุ่งกับพื้นผิวน้ำจะทำให้เกิด cavitation ซึ่งจะเกิดขึ้นและยุบตัวอย่างรวดเร็วโดยเป็นส่วนที่ทำให้เกิดความเสียหายบนวัสดุ ส่วนลำพุ่งที่กระทบบนพื้นผิวของ PMMA ความเสียหายนั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดของลำพุ่ง นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าความดันที่วัดโดยใช้ PVDF นั้นจะสอดคล้องกับสมการ water-hammer



รูปที่ 2.26 Bowden and Brunton method [37]

ในปี ค.ศ.1996 Hitoshi Soyama และคณะ [51] ได้ศึกษาคุณลักษณะของลำพุ่งที่ฉีดในน้ำโดยพบว่า มีกลุ่ม cavitation เกิดขึ้นอย่างรุนแรงรอบๆ ลำพุ่ง 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 จากภาพแสดงให้เห็นความแตกต่างระหว่างลำพุ่งที่ฉีดในอากาศกับลำพุ่งที่ฉีดในน้ำ cavitation ที่เกิดขึ้นจากลำพุ่งที่อยู่ในน้ำนำไปสู่พลังการกัดกร่อนจากการปะทะโดยตรงของตัวลำพุ่งจะทำให้ความแข็งแรงของวัสดุลดลง ดังนั้นพฤติกรรมกระจายตัวของลำพุ่งความเร็วสูงที่อยู่ในน้ำสามารถนำมาอธิบายถึงการกัดกร่อนที่รุนแรงได้ เพื่อนำไปพิจารณาหาวิธีการที่จะทำให้พฤติกรรมกระจายตัวของลำพุ่งความเร็วสูงที่เกิดขึ้นนั้นนำมาใช้ประโยชน์มากที่สุด จากการทดลองสรุปได้ว่าลักษณะของลำพุ่งที่ฉีดในน้ำจะทำให้เกิดพฤติกรรม cavitation และคุณลักษณะของลำพุ่งที่ฉีดในน้ำจะแตกต่างกันมากกับลำพุ่งที่ฉีดในอากาศ แรงดันเฉียบพลันที่เกิดขึ้นรอบๆ ลำพุ่งที่ฉีดในน้ำค่าสูงสุดคือ horn nozzle และค่าต่ำสุด คือ canonical nozzle ผลลัพธ์ของพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจะไม่แน่นอนนั้นเนื่องมาจากจากรูปแบบของหัวฉีด

ในปี พ.ศ.2552 วุฒิชัย สิทธิวงษ์ และคณะ[52] ได้ศึกษาการปรับเทียบและวัดแรงกระแทก (Impact pressure) ลำพุ่งของน้ำความเร็วสูงที่ระดับความเร็วเหนือเสียง โดยลำพุ่งความเร็วสูงจะใช้วิธีกำเนิดขึ้นด้วยการส่งถ่ายโมเมนตัมของกระสุนปืน (projectile) ที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงเข้ากระแทกน้ำที่บรรจุอยู่ในชุดหัวฉีด ความเร็วของลำพุ่งที่ใช้ในการทดลองจะมีความเร็วอยู่ในช่วง 1,240 – 2,290 m/s โดยเกิดจากชุดทดลองที่สร้างขึ้นจากหลักการทำงานของปืนที่ขับเคลื่อนด้วยดินปืนซึ่งจะถูกเรียกว่า Horizontal Single Stage Powder Gun (HSSPG) กับหัวฉีด 3 แบบ ที่มีขนาดรูฉีด 0.7 mm แต่มีรูปทรงภายในแตกต่างกัน ลำพุ่งความเร็วสูงของน้ำจะพุ่งเข้ากระแทกแผ่นอะคริลิกแล้ววัดแรงกระแทกของลำพุ่งโดยใช้เปียโซอิเล็กทริกฟิล์ม (Piezoelectric polyvinylidene fluoride (PVDF) film) จากผลการทดลองพบว่า ความดันกระแทกมีค่าสูงสุดประมาณ 3.4 MPa ที่ระยะ 3 cm จากปลายหัวฉีด



รูปที่ 2.27 การเปรียบเทียบความดันกระแทก [52]

ในปี ค.ศ.2009, K. Otani และคณะ [53] ได้ศึกษาคุณลักษณะของลำพุ่งในน้ำโดยผลิตลำพุ่งจาก Ho:YAG Laser โดยศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการเจาะหินใต้น้ำ ด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph จากภาพที่ได้พบว่า ความเร็วของลำพุ่งมีค่าประมาณ 40 m/s นอกจากนี้ยังวัดความดันกระแทกที่เกิดขึ้น โดยใช้ PVDF needle hydrophone พบว่า ความดันของ shock wave มีค่าประมาณ 22.7 MPa และพบการยุบตัวของ water vapor bubble ที่ทำให้เกิด shock wave นอกจากนี้ยังพบว่าลำพุ่งที่ผลิตได้สามารถเจาะแผ่นหินทรายใต้น้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า ความเร็วของลำพุ่งในน้ำที่ศึกษานั้นมีความเร็วต่ำ เนื่องจากข้อจำกัดของเทคนิคในการผลิตลำพุ่ง ดังนั้นคุณลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูงในของเหลวจึงยังไม่ได้ทำการศึกษาและอธิบายอย่างชัดเจน