

บทที่ 2

บททวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบัน ในอุตสาหกรรมยานยนต์ แนวโน้มในการพัฒนาหัวฉีด (injector) ของเครื่องยนต์ ทั้ง diesel (เครื่องยนต์ดีเซล) และ gasoline (เครื่องยนต์เบนซิน) มีแนวโน้มที่จะเพิ่มแรงดันของหัวฉีด ให้สูงขึ้นเพื่อเพิ่มความละเอียดของฝอยน้ำมัน (spray or jet) เพื่อการคลุกเคล้าที่ดีของน้ำมันเชื้อเพลิงกับอากาศ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้และลดมลพิษทางไอเสีย รวมทั้งเป็นการประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิงอีกด้วย (เนื่องจากให้ความร้อนเท่าเดิมโดยปริมาณน้ำมันที่ใช้น้อยกว่าเดิม) ปัจจุบัน (ปี 2548) เครื่องยนต์ดีเซลชนิด common rail ได้พัฒนา ให้มีแรงดันสูงขึ้นเป็น 180 MPa หรือ 1800 bar ซึ่งสูงกว่าเครื่องยนต์ในอดีตประมาณ 10 เท่าและความเร็วของ spray (หรือ jet) น้ำมัน อยู่ที่ประมาณ 300 m/s เครื่องยนต์ GDI (gasoline direct injection) ซึ่งจะฉีดน้ำมันเข้ากระบอกสูบโดยตรง คล้ายกับเครื่องยนต์ดีเซล มีแรงดันหัวฉีดอยู่ที่ประมาณ สูงกว่า 5 MPa ซึ่งเพิ่มจากอดีตประมาณ 2 เท่า เครื่องยนต์ GDI ขณะนี้เริ่มเป็นที่นิยมและได้รับการยอมรับว่าช่วยประหยัดน้ำมันและลดมลภาวะได้ดี [16-17]

หมายเหตุ ปัจจุบัน หัวฉีดน้ำมันในเครื่องยนต์ดีเซล สามารถทำได้สูงสุดที่ความดันประมาณ 300 MPa ที่ความเร็วลำพุง 700 m/s

ในการศึกษาเกี่ยวกับลำพุงความเร็วสูง ที่ระดับความดันที่สูงมาก กว่าที่เครื่องยนต์จะทำได้ ต้องใช้เทคนิคการทดลองแบบพิเศษ นั่นคือการใช้ลูกปืนกระแทก (projectile impact driven method) และผลัดดัน (compress) น้ำมันให้ออกมาจากหัวฉีด (nozzle) ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้กันอยู่ในกลุ่มวิจัยเล็กๆ [1,4,6] แต่เป็นวิธีที่ให้แรงดันและความเร็ว ของลำพุงเชื้อเพลิง ที่สูงมาก ที่ความเร็วกระแทกของลูกปืน 1000 m/s แรงดันในหัวฉีดอาจจะสูง 2 GPa (20,000 bar) และความเร็วสูง ถึงระดับ hypersonic (ความเร็วสูงกว่า 1800 m/s) ในสภาวะอากาศปกติ [5,23-24]

จากการศึกษาของนักวิจัยบางกลุ่ม [4-5] อ้างว่า ถ้าฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีความเร็วสูงมากๆ (สูงกว่า 2000 m/s) ไปในอากาศที่สภาวะความดันและอุณหภูมิปกติ น้ำมันเชื้อเพลิงอาจจะเกิดการติดไฟได้เอง (auto-ignition) โดยไม่ต้องให้ความร้อนจากภายนอกเลย แต่ความร้อนนั้นมาจากการเหนี่ยวนำของคลื่นช็อค (shock induced heating) อย่างไรก็ตามการเกิดของปรากฏการณ์นี้ เป็นเพียงการกล่าวอ้าง ควรจะต้องมีการศึกษาเพื่อยืนยัน ในรายละเอียดต่อไป จากการศึกษาในเบื้องต้นของ Painthong [7,21,25,26] น้ำมันเชื้อเพลิงไม่น่าจะติดไฟได้โดยความร้อนจากคลื่นช็อค (shock heating) ที่ความเร็วนี้ และที่สภาวะอากาศปกติ แต่ถ้ามีการเพิ่มอุณหภูมิหรือแรงดันในห้องเผาไหม้

ให้สูงขึ้น (แต่ไม่ต้องสูงเหมือนในเครื่องยนต์) น้ำมันอาจจะติดไฟได้เองง่ายขึ้นและต่อเนื่อง ประเด็นนี้เป็นประเด็นที่ควรจะมีการศึกษาต่อไป คุณลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูง ที่สร้างโดยใช้ความเร็วกระแทกต่างๆ และใช้หัวฉีด รูปร่างต่างๆ ก็ให้ผลการทดลองที่น่าสนใจ และเป็นประเด็นที่จะต้องศึกษาอีกต่อไป [27-29]

ปัจจุบัน งานวิจัยเกี่ยวกับการฉีดน้ำมัน (หรือของเหลว) ที่ระดับความเร็วมากกว่าเสียงนี้ (supersonic และ hypersonic โดยวิธี projectile impact driven) มีการศึกษาอยู่เพียงแค่สองสถาบันเท่านั้นในโลก คือ ที่ School of Mechanical and Manufacturing Engineering, The University of New South Wales (UNSW), Australia และที่ Interdisciplinary Shock Wave Research Center (ISWRC) , Institute of Fluid Science (IFS), Tohoku University, Japan โดยนักวิจัยหลัก คือ Dr. Kulachate Pianthong (ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง) ซึ่งทำงานวิจัยนี้เป็นวิทยานิพนธ์ปริญญาเอก ที่ UNSW และโครงการร่วมมือ หลังจบปริญญาเอก ที่ ISWRC ผู้สนับสนุนงานวิจัยและที่ปรึกษา คือ Prof. Brian Milton (UNSW) และ Prof. Kazuyoshi Takayama (ISWRC)

จากการศึกษามาอย่างต่อเนื่องเป็นเวลามากกว่า 8 ปี มีการค้นพบข้อมูลผลการทดลองที่แปลกใหม่และน่าสนใจหลายประการ (ดังได้เสนอในการสัมมนาวิชาการและวารสารระดับนานาชาติ ดังที่แสดงในรายการของบทความวิจัย ของ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง โดยส่วนใหญ่จะสนใจที่คุณลักษณะและพฤติกรรมของลำพุ่ง ที่ความเร็วสูงมากๆ; hypersonic) ทั้งที่ยังมีประเด็นที่น่าสนใจและควรจะมีศึกษา คือ (1) คุณลักษณะพื้นฐาน (fundamental characteristics) ของของลำพุ่ง ที่ความเร็วสูงในระดับนี้ ซึ่งยังมีน้อยมากในปัจจุบัน (2) ที่ระดับความเร็ว และความดันที่สูงกว่าในเครื่องยนต์ปกติเล็กน้อย เพื่อเป็นการเสนอข้อมูลให้กับอุตสาหกรรมหรือผู้ผลิตเทคโนโลยีด้านพ่นเชื้อเพลิงและการเผาไหม้ เป็นข้อมูลในการออกแบบหรือพัฒนาเครื่องยนต์ (3) การศึกษาที่ระดับความเร็วสูง (สูงกว่า 2500 m/s) เพื่อพิสูจน์การเผาไหม้จากการเหนี่ยวนำของคลื่นช็อค และการเผาไหม้ที่ความเร็วสูง (supersonic combustion) ก็ควรจะดำเนินการควบคู่กันไป

ลำพุ่งของเหลวความเร็วสูงถูกนำมาประยุกต์ใช้กับงานหลายประเภทในปัจจุบัน ได้แก่ อุตสาหกรรมขึ้นรูปวัสดุ การเผาไหม้ของเครื่องยนต์ หรือแม้แต่ในทางการแพทย์ ซึ่งแต่ละประเภทการใช้งานต้องการคุณลักษณะของลำพุ่งแตกต่างกันออกไป เช่น การเจาะหรือการตัดวัสดุหิน ความดันสร้างลำพุ่งจะอยู่ในช่วง 50 – 500 MPa โดยมีความเร็ว 300 – 1,000 m/s [1และ 2] เทคโนโลยีการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ ประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับความเร็วของการฉีดน้ำมัน เชื่อว่าหากสามารถฉีดน้ำมันด้วยความเร็วสูงมาก ได้ ประสิทธิภาพการเผาไหม้ยิ่งดีและเป็นการลดมลภาวะจากการเผาไหม้ด้วย [3]

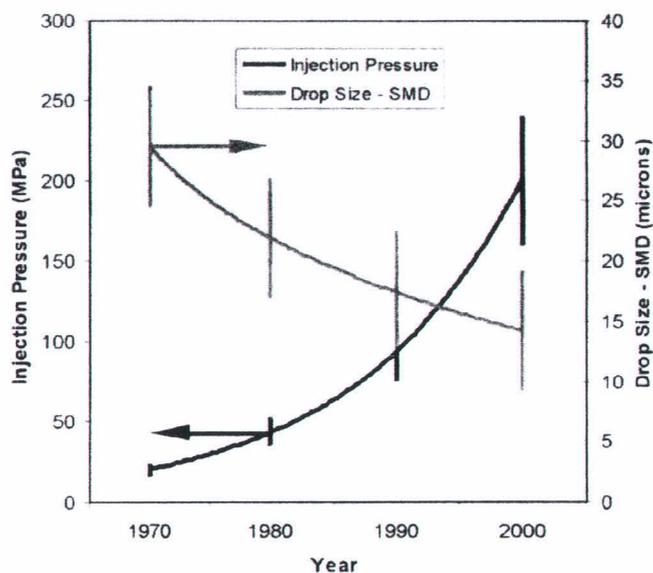
ทางการแพทย์ ยังนำเทคโนโลยีลำพุงของเหลวถูกศึกษาและพัฒนาเพื่อนำส่งยาเข้าสู่ร่างกายแทนเข็ม พบว่าความเร็วและความดันน้อยสุดในการเจาะผิวหนัง ประมาณ 150 m/s และ 140 MPa ตามลำดับ [4 และ 5] ซึ่งความเร็วของลำพุงจะต้องมากขึ้นตามเป้าหมายในการฉีด นอกจากการประยุกต์ใช้งานดังที่กล่าวไว้ ลำพุงความเร็วสูงยังถูกไปใช้กับ อุตสาหกรรมเจาะน้ำมัน เจาะอุโมงค์ หรือแม้แต่การฉีดพ่นต่างๆด้วยเช่นกัน

จะเห็นได้ว่าเทคโนโลยีของลำพุงความเร็วสูงมีบทบาทต่อการพัฒนาในงานหลายประเภท ดังที่กล่าวไว้ ดังนั้นความเข้าใจคุณลักษณะของลำพุง จึงมีความสำคัญ และนอกจากนั้นแล้ว การเพิ่มความเร็วลำพุงให้สูงขึ้นมีความสำคัญต่อการพัฒนาเทคโนโลยีเหล่านั้นอยากหลีกเลี่ยงไม่ได้

การศึกษาเพื่อเพิ่มความเร็วของลำพุงให้สูงกว่าความเร็วเสียง (ระดับ supersonic หรือ hypersonic) F. P. Bowden และ J. H. Brunton [6] การศึกษาการกระแทกบนวัสดุของลำพุงความเร็วสูง ซึ่งใช้หลักการ “ขับลำพุงด้วยการกระแทก (impact driven method)” โดยลำพุงที่ได้มีความเร็วสูงถึง 1200 m/s จากนั้นด้วยหลักการเดียวกัน K. Pianthong และคณะ [7-10] ศึกษาการฉีดเชื้อเพลิงที่ความเร็ว 1500 – 2,500 m/s เพื่อศึกษาคุณลักษณะของลำพุงกับการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากลำพุงความเร็วสูงถูกนำไปประยุกต์ใช้กับงานหลายประเภท จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาคุณลักษณะที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ในด้านอื่นๆ ด้วย

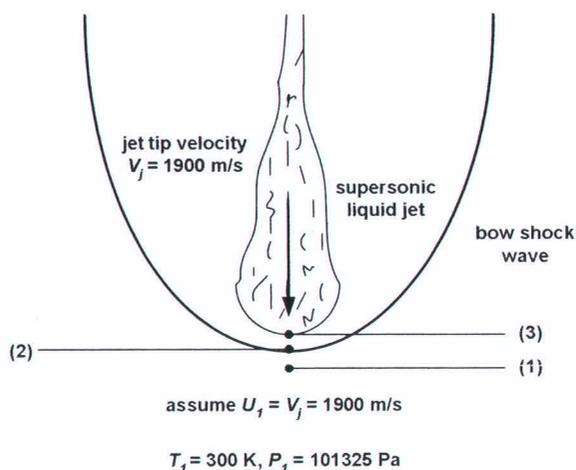
เกี่ยวกับลำพุงเชื้อเพลิงความเร็วสูง เนื่องจากเป็นการศึกษาที่ค่อนข้างใหม่และมีกลุ่มนักวิจัยที่ทำเรื่องนี้ไม่มากนัก ทฤษฎีของการพ่นเชื้อเพลิงด้วยความดันสูง ยังไม่มีแต่สามารถอ้างอิงได้บ้าง จากทฤษฎีของการพ่นและแตกตัว (spray and atomization) ที่ใช้กันในงานอุตสาหกรรม การค้นพบและข้อมูลจากการทดลองต่างๆ ในปัจจุบัน ยังมีไม่มากพอที่จะเป็นทฤษฎีได้

สมมติฐาน จากทฤษฎีการพ่นและแตกตัวของเชื้อเพลิง บอกว่าเมื่อพ่นเชื้อเพลิง ถูกฉีดออกมาด้วยความดันสูงขึ้นขนาดของเม็ดอนุภาค (sauter mean diameter, SMD) ก็จะเล็กลง ทำให้เกิดการระเหยตัว (evaporate) ของน้ำมันเชื้อเพลิงได้ดีขึ้นด้วย การฉีดเชื้อเพลิง ออกมาด้วยความเร็วและรุนแรงนี้ จะเหนี่ยวนำ (induced) ให้เกิดการผสมคลุกเคล้ากัน (mixing) กันระหว่างอากาศและน้ำมันได้ดีมากขึ้น เพราะเกิดแรงเฉือนหรือเสียดสี (shear) ที่ผิวขอบของลำพุงน้ำมันกับอากาศรุนแรง (strong shear layer) เมื่อเกิดการจุดติดไฟ การเผาไหม้ของส่วนผสมก็จะดีขึ้น (รวดเร็วและทั่วถึง) และให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงขึ้น ดังนั้น จะทำให้ประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิงได้ และมลภาวะจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ขึ้น ก็จะน้อยกว่าการเผาไหม้ที่เป็นอยู่ปกติด้วย

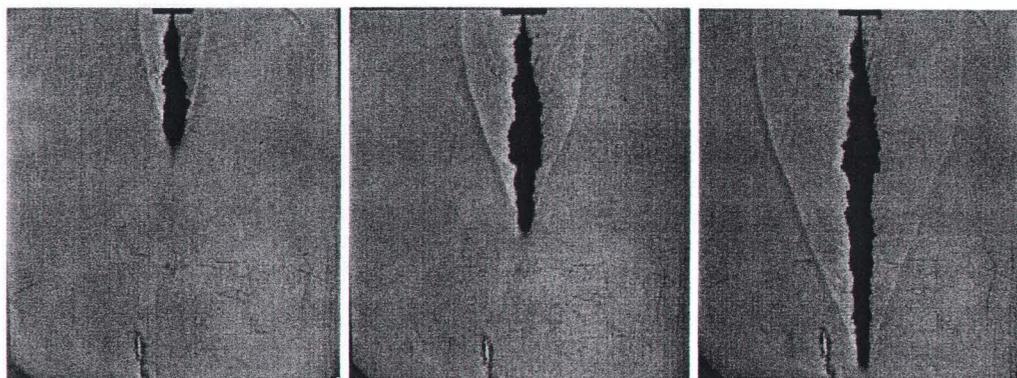


รูปที่ 2.1 Trend of injection pressure and droplet size diameter in diesel engine [30]

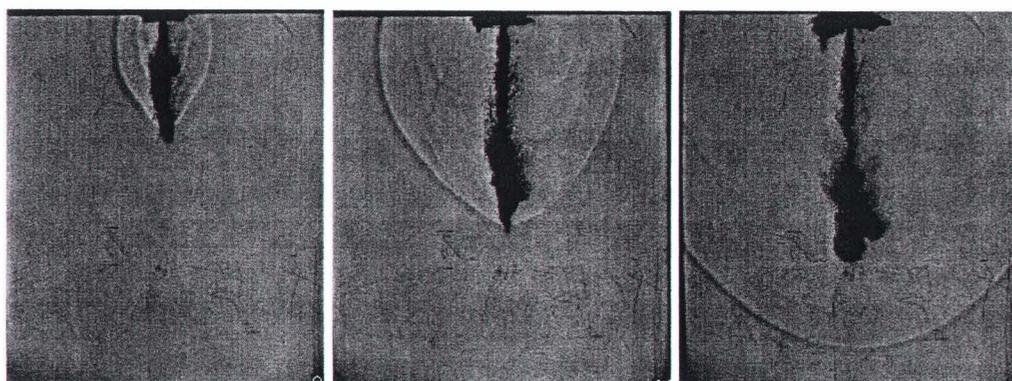
ตัวอย่างของแนวโน้มของการพัฒนาเครื่องยนต์ดีเซล และแรงดันให้หัวฉีดและขนาดของ SMD [30] แสดงในรูปที่ 2.1 ถ้าลำพุ่งเชื้อเพลิง ที่ความดันสูงมากขึ้นไปอีก (โดยใช้เทคนิคการสร้างลำพุ่งด้วย impact driven method) ลำพุ่งเชื้อเพลิงที่ได้มีความเร็วในระดับเหนือความเร็วเสียง (supersonic/hypersonic) จะทำให้เกิดคลื่นช็อค นำหน้าลำพุ่งเชื้อเพลิงและความร้อนเพิ่มขึ้นจากคลื่นช็อค (shock heating) ตามทฤษฎีของคลื่นช็อค อุณหภูมิและความดัน หลังคลื่นช็อคจะเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนหลายเท่า (ขึ้นอยู่กับเลข Mach ของลำพุ่งเชื้อเพลิง และอุณหภูมิบรรยากาศ) จะทำให้เกิดการระเหย (evaporate) ที่ดี และอาจจะเกิดการติดไฟโดยอัตโนมัติ (auto-ignition) ได้



รูปที่ 2.2 Bow shock wave ahead of supersonic diesel fuel jets



รูปที่ 2.3 Various stages of the World fastest bio-diesel fuel jets [37]



รูปที่ 2.4 Various stages of supersonic gasoline fuel jets [37]

ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เมื่อใช้ ทฤษฎีของคลื่นช็อค จะเห็นว่า บริเวณ 1 (region 1) ที่มี อุณหภูมิ 300 K และ ความดัน 1 atm (1.01325 bar) เมื่อลำพุง มีความเร็วเท่ากับ 1900 m/s บริเวณ 2 (region 2) บริเวณหลังคลื่นช็อคจะมีอุณหภูมิ 2034 K และความดัน 35 MPa [7,21] อุณหภูมินี้ อาจจะทำให้ น้ำมันดีเซล ติดไฟเองได้ถึงจะไม่ติดไฟ ก็จะช่วยให้ความร้อนแก่ spray ทำให้เกิดการ ระเหยตัว (evaporate) ได้ดีขึ้น ส่วนบริเวณ 3 (region 3) จะมีอุณหภูมิต่ำลงตามระยะห่างและถ้า ใช้ทฤษฎีของคลื่นช็อค อุณหภูมิและความดันในบริเวณ 2 (region 2) จะเท่ากับ 1130 K และ 0.95 MPa เท่านั้นซึ่งก็จะช่วยทำให้เกิดการผสมที่ดีได้ ค่าตัวเลขที่บอกมานั้นเป็นค่าทางทฤษฎี (โดยการ คำนวณจากสมการพื้นฐาน) เท่านั้น และเป็นการยากที่จะวัดจากการทดลอง หากมีการใช้ CFD มา ช่วยในการ คำนวณ หรือ ทำนายตัวเลขเหล่านี้ ก็จะเป็นประโยชน์ อย่างมาก ในการออกแบบ หรือ พัฒนาเทคโนโลยีเกี่ยวกับลำพุงเชื้อเพลิงความเร็วสูงต่อไป [31-34] รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างของน้ำมัน bio-diesel ที่ผลิตจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว ที่ความเร็วประมาณ 1400 m/s (หมายเหตุ: เป็นลำพุงน้ำมัน bio-diesel ที่ความเร็วสูงที่สุดในโลก ณ เวลาปัจจุบัน) หลังจาก กระบวนการเกิดลำพุงแล้ว น้ำมัน

แตกกระจายเป็นละเอียดดีมาก แต่ความยาวของพ่นน้ำมันมากเกินไป อาจจะไม่เหมาะที่จะใช้งานกับเครื่องยนต์ขนาดเล็ก หรือไม่ก็ต้องออกแบบหัวฉีดใหม่ สิ่งเหล่านี้ควรจะมีการศึกษาต่อไป [35-37] ส่วนรูปที่ 2.4 เป็นลำพุ่งของ gasoline ที่ความเร็วประมาณ 900 m/s ทั่วๆ ที่ทำการทดลองที่สถานะใกล้เคียงกันกับ รูปที่ 2.3 แต่ผลที่ได้ค่อนข้างต่างกัน

2.1 ความเร็วเสียง (Speed of sound)

ระยะทางที่เสียงเดินทางไปในตัวกลางใดๆ ได้ในหนึ่งหน่วยเวลา โดยทั่วไปเสียงเดินทางในอากาศที่มีอุณหภูมิ 25°C (298 K) ได้ประมาณ 346 m/s และในอากาศที่อุณหภูมิ 20°C ได้ประมาณ 343 m/s ความเร็วที่เสียงเดินทางได้นั้นอาจมีค่ามากขึ้นหรือน้อยลงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของตัวกลางเป็นหลัก และอาจได้รับอิทธิพลจากความชื้นบ้างเล็กน้อย แต่ไม่ขึ้นกับความดันอากาศ เนื่องจากการเดินทางของเสียงอาศัยการสั่นของโมเลกุลของตัวกลาง ดังนั้นเสียงจะเดินทางได้เร็วขึ้นหากตัวกลางมีความหนาแน่นมาก ทำให้เสียงเดินทางเร็วในของแข็ง แต่เดินทางไม่ได้ในอวกาศ เพราะอวกาศเป็นสุญญากาศจึงไม่มีโมเลกุลของตัวกลางอยู่ ความเร็วเสียง c โดยทั่วไปคำนวณหาได้จาก

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

โดย

C คือ สัมประสิทธิ์ของความแข็งเกร็ง (coefficient of stiffness)

ρ คือ ความหนาแน่น

ดังนั้น ความเร็วเสียง จะเพิ่มขึ้นตามความแข็งเกร็งของวัสดุ และ ลดลงเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น

2.1.1 ความเร็วเสียงในก๊าซ

ในก๊าซ ค่า K สามารถประมาณโดย

$$K = \gamma P \quad (2.2)$$

โดย

γ คือ ดัชนีอะเดียบาติก (Adiabatic index) บางครั้งใช้สัญลักษณ์ κ

P คือ ความดัน

ดังนั้น ความเร็วเสียงในก๊าซสามารถคำนวณได้โดย

$$c_{\text{gas}} = \sqrt{\frac{\mathcal{P}}{\rho}} \quad (2.3)$$

ในกรณี ก๊าซในอุดมคติ (Ideal gas) จะได้

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

โดย

R (287.05 J/(kg.K) สำหรับอากาศ) คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (gas constant) สำหรับอากาศ ปกติ ในทางอากาศพลศาสตร์ค่านี้หาจาก การหารค่าคงที่ของก๊าซสากล R (J/(mol.K) ด้วย ค่ามวลโมล (molar mass) ของอากาศ

Gamma (γ) คือ ค่าดัชนีอะเดียบาติก (adiabatic index) (เท่ากับ 1.402 สำหรับอากาศ) บางครั้งเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ κ (cappa)

T คือ ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน) (นิวตัน นั้นค้นพบวิธีการหาค่าความเร็วเสียงก่อน พัฒนาการของ อุณหพลศาสตร์ และได้ใช้การคำนวณแบบอุณหภูมิเสมอ (isothermal) แทนที่จะเป็นแบบอะเดียบาติก (adiabatic) ซึ่งทำให้สูตรของนิวตันนั้นขาดตัวคูณ) ที่สภาพบรรยากาศมาตรฐาน (standard atmosphere)

$T_0 = 273.15 \text{ K}$ (0 °C หรือ 32 °F) ความเร็วเสียง 331.5 m/s (1,087.6 ft/s หรือ 1,193 km/h หรือ 741.5 mph หรือ 43.9 knot)

$T_{20} = 293.15 \text{ K}$ (20 °C หรือ 68 °F) ความเร็วเสียง 343.4 m/s (1,126.6 ft/s หรือ 1,236 km/h หรือ 768.2 mph หรือ 667.1 knot)

$T_{25} = 298.15 \text{ K}$ (25 °C หรือ 77 °F) ความเร็วเสียง 346.3 m/s (1,136.2 ft/s หรือ 1,246 km/h หรือ 774.7 mph หรือ 672.7 knot)

ในกรณีของก๊าซในอุดมคติ ความเร็วเสียง c ขึ้นกับอุณหภูมิเท่านั้น โดยไม่ขึ้นกับความดัน อากาศนั้นเกือบจะถือได้ว่าเป็นก๊าซในอุดมคติ อุณหภูมิของอากาศเปลี่ยนแปลงตามระดับความสูง เป็นผลให้ความเร็วของเสียงที่ระดับความสูงต่างๆ นั้นแตกต่างกัน

ตารางที่ 2.1 ความเร็วเสียงในก๊าซ

ระดับความสูง	อุณหภูมิ	m/s	km/h	mph	knot
ระดับน้ำทะเล	15 °C (59 °F)	340	1,225	761	661
11,000 m -20,000 m	-57 °C (-70 °F)	295	1,062	660	573
29,000 m	-48 °C (-53 °F)	301	1,083	673	585

2.1.2 ความเร็วเสียงในของเหลว

ของเหลวจะมีความแข็งแกร่งต่อแรงอัดเท่านั้น โดยไม่มีความแข็งแกร่งต่อแรงเฉือน ดังนั้นความเร็วของเสียงในของเหลวหาได้โดย

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

โดย

K คือ โมดูลัสของการอัดอะเดียบาติก (adiabatic bulk modulus)

2.1.3 ความเร็วเสียงในของแข็ง

ของแข็งนั้นมีค่าความแข็งแกร่งไม่เพียงแต่ทั้งต่อแรงบีบอัด หรือ การเปลี่ยนปริมาตร (Volumetric deformation) และแรงเฉือน (shear deformation) ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะกำเนิดคลื่นเสียงที่มีความเร็วต่างกันขึ้นกับรูปแบบของคลื่นในแท่งของแข็งซึ่งมีขนาดความหนา (หรือขนาดของตัวกลางในแนวตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของคลื่น) เล็กกว่าความยาวคลื่นมาก ความเร็วเสียงหาได้จาก

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

โดย

E คือ โมดูลัสของยัง

ρ คือ ความหนาแน่น



ดังนั้น ในเหล็กความเร็วของเสียงจะมีค่าประมาณ 5,100 m/s ความเร็วของเสียงสามารถหาได้จาก การแทนค่าโมดูลัสของยังด้วยโมดูลัสคลื่นหน้าราบ (plane wave modulus) ซึ่งหาได้จาก โมดูลัสของยัง และ อัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's ratio)

$$M = E \frac{1 - \nu}{1 - \nu - 2\nu^2} \tag{2.7}$$

ดังนั้น ความเร็วของเสียง

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

สำหรับคลื่นตามขวางนั้น โมดูลัสของยัง E จะถูกแทนด้วยค่าโมดูลัสของแรงเฉือน (Shear modulus) G

$$c_{\text{solid,transverse}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \tag{2.9}$$

จะเห็นได้ว่า ความเร็วของเสียงในของแข็งขึ้นกับความหนาแน่น ของตัวกลางเท่านั้น โดยไม่ขึ้นกับอุณหภูมิของแข็ง เช่น เหล็ก สามารถนำคลื่นด้วยความเร็วที่สูงกว่าอากาศมาก

ในตัวกลางที่ไม่มีการกระจาย (non-dispersive medium) ความเร็วเสียงไม่ขึ้นกับความถี่ ดังนั้นความเร็วในการส่งถ่ายพลังงาน และ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของเสียง นั้นมีค่า เท่ากัน ในย่านความถี่เสียงที่เราสามารถได้ยินนั้น อากาศมีคุณสมบัติเป็นตัวกลางที่ไม่มีการกระจาย โปรดสังเกตว่า CO₂ ในอากาศนั้นเป็นตัวกลางที่มีการกระจายและทำให้เกิดการกระจายสำหรับคลื่นเสียงความถี่สูง (28KHz) ในตัวกลางที่มีการกระจาย (dispersive medium) ความเร็วเสียงจะขึ้นกับความถี่ องค์ประกอบที่แต่ละความถี่จะเดินทางด้วยความเร็วเฟส (phase velocity) ที่แตกต่างกัน ส่วนพลังงานของเสียงจะเดินทางด้วยความเร็วที่ความเร็วกลุ่ม (group velocity) ตัวอย่างของตัวกลางที่มีการกระจาย คือ น้ำ

2.1.4 ความเร็วเสียงในอากาศ

ความเร็วของเสียงในอากาศโดยประมาณหาได้จาก

$$c_{\text{air}} \approx (331.5 + 0.6t) \tag{2.10}$$

โดยที่ t คือ อุณหภูมิ ในหน่วย °C ความแม่นยำในการประมาณในช่วงของอุณหภูมิในช่วง -20°C ถึง 40°C จะมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 0.2% ในช่วงอุณหภูมิสูงกว่า หรือ ต่ำกว่านั้นความเร็วของเสียงจะประมาณโดย

$$c_{\text{air}} = 331.5 \sqrt{1 + \frac{t}{273}} \text{ m/s} \quad (2.11)$$

ตัวอย่างความเร็วเสียงในตัวกลางต่าง ๆ

ตารางที่ 2.2 ความเร็วเสียงในตัวกลาง ที่อุณหภูมิ 20 °C

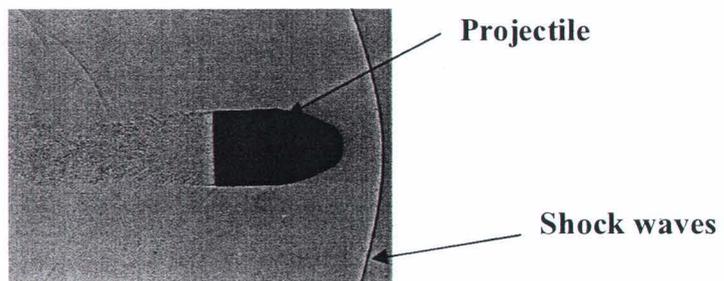
ชนิดวัสดุ	ความเร็ว (m/s)
อากาศ	343
น้ำ	1,480
น้ำแข็ง	3,200
แก้ว	5,300
เหล็ก	5,200
ตะกั่ว	1,200
ไทเทเนียม	4,950
พีวีซี (อ่อน)	80
พีวีซี (แข็ง)	1,700
คอนกรีต	3,100

2.2 คลื่นช็อก (Shock waves)

คลื่นช็อก (shock wave) เกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่ได้เท่ากับความเร็วของคลื่น หรือเร็วกว่า จะเกิดปรากฏการณ์ที่ว่าคลื่นไม่สามารถที่จะเคลื่อนที่ออกไปจากแหล่งกำเนิดเสียง โดยถ้าแหล่งกำเนิดเคลื่อนที่ได้เท่ากับความเร็วของคลื่น คลื่นจะเกิดการซ้อนกันเสริมกัน กลายเป็น amplitude ขนาดใหญ่เรียกว่าคลื่นช็อก และเมื่อแหล่งกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่เร็วกว่า คลื่น คลื่นจะฟอร์มตัวเป็นรูปกรวยโดยมีมุม $\theta = \sin^{-1}(V/V_0)$ อัตราส่วน (V/V_0) เรียกว่า เลขเลขมัค (Mach number) คลื่นช็อกเกิดขึ้นได้บ่อยมากในสถานการณ์ต่างๆ กัน ดังเช่น Sonic boom คือ คลื่นช็อก ประเภทหนึ่งของเครื่องบินที่วิ่งเร็วเหนือเสียง คลื่นที่เกิดหลังเรือเร็วก็เป็น

คลื่นช็อค อีกประเภทหนึ่ง นอกอวกาศ ก็สามารถจะเกิด คลื่นช็อค ได้ อย่างเช่น ลมสุริยะที่วิ่งด้วยความเร็วสูงเข้าชนสนามแม่เหล็ก โลกเป็นต้น

เมื่อแหล่งกำเนิดเสียงเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่าเสียง ($v_s = v$ หรือ 1 Mach) หน้าคลื่นทางขวาจะถูกอัดกันอยู่ทางด้านหน้าเป็นแนวเส้นโค้ง ทำให้หน้าคลื่นเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกัน ความดันของคลื่นเพิ่มขึ้นอย่างมากมาย เรียกว่า คลื่นช็อค (shock wave) รูปที่ 2.5 คือ ลูกปืนที่วิ่งด้วยความเร็วสูง



รูปที่ 2.5 Detach shock wave

2.3 เลขมัค (Mach number)

เลขเลขมัค (Ma) คือสัดส่วนของความเร็วต่อความเร็วเสียง เลขเลขมัคปกติจะใช้กับวัตถุที่เดินทางด้วยความเร็วสูงในของเหลว และของเหลวที่ไหลด้วยความเร็วสูงในช่องแคบๆ หรืออุโมงค์ลม และเนื่องจากเป็นสัดส่วนของความเร็วสองค่า เลขเลขมัค จึงไม่มีหน่วย ที่สภาวะระดับทะเลมาตรฐาน มัค 1 เท่ากับความเร็ว 1,225 km/hr (761.2 mile/hr ในบรรยากาศ) เนื่องจากความเร็วเสียงนั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความจริงที่แท้จริงของวัตถุที่เดินทางเท่ากับ มัค 1 จึงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของของไหลที่อยู่ล้อมรอบ นอกจากนี้เรายังอาจเห็นได้ว่า เลขเลขมัค นั้นยังเป็นสัดส่วนของแรงเฉื่อย (อ้างถึงแรงอากาศพลศาสตร์) ต่อแรงยืดหยุ่น (elastic force) เลขเลขมัค ตั้งชื่อตาม Ernst Mach นักฟิสิกส์และนักปรัชญาชาวออสเตรีย

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

เมื่อ M_a คือ Mach number
 V คือ ความเร็วของแหล่งกำเนิดเสียง
 V_0 คือ ความเร็วของเสียงในอากาศ

จากรูปที่ 2.6 หากนิยามความเร็วตาม เลขเลขมัค จะสามารถแบ่งประเภทของความเร็วเป็นช่วงได้ดังนี้

$Ma < 1$ เรียกว่า subsonic เป็นช่วงของความเร็วที่ต่ำกว่าความเร็วเสียง

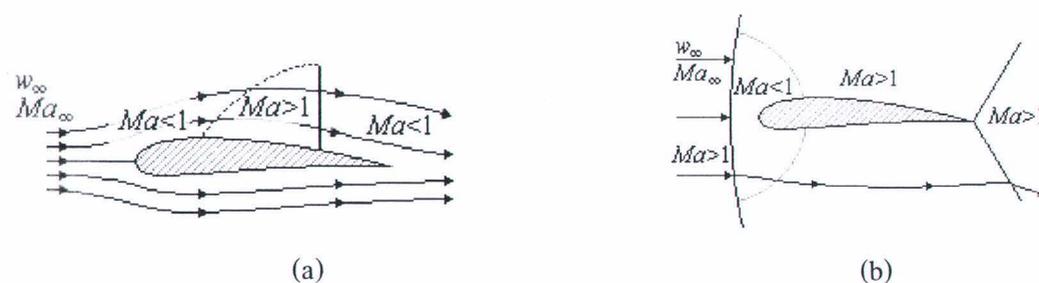
$Ma=1$ เรียกว่า sonic เป็นช่วงของความเร็วเสียง ($Ma=1$)

$0.8 < Ma < 1.2$ เรียกว่า Transonic เป็นช่วงของความเร็วย่านเสียงเป็นความเร็วที่อยู่ประมาณความเร็วเสียง

$1.2 < Ma < 5$ เรียกว่า supersonic เป็นช่วงของความเร็วที่เหนือหรือมากกว่าความเร็วเสียง

$Ma > 5$ เรียกว่า hyper sonic เป็นช่วงของความเร็วโพ้นความเร็วเสียง มากกว่า 5 เท่าเสียงขึ้นไป

* เสียงเดินทางในอากาศ ประมาณ 1,100 ft/s *



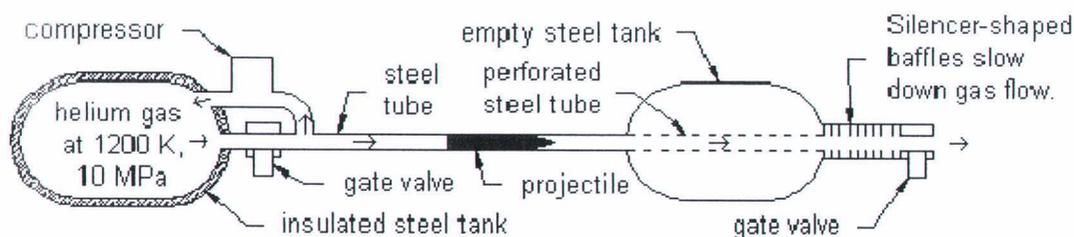
รูปที่ 2.6 (a) กระแสลมที่ค่าของ $Ma < 1$ และ (b) กระแสลมที่ค่าของ $Ma > 1$

2.4 ชุดปล่อยกระสุนความเร็วสูง

ปัจจุบันงานวิจัยในด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรม ชุดปล่อยกระสุน (launcher) หรืออาจเรียกว่า ปืน (gun) มีมากมายหลายแบบ เช่น ชุดปล่อยแบบ electrostatic และ electromagnetic ชุดปล่อยแบบใช้การระเบิด (explosive propulsion) ชุดปล่อยแบบ plasma เป็นต้น แต่ละแบบจะมีความเหมาะสมในแต่ละงานวิจัยอย่างไรก็ตามในบทความนี้จะพูดถึงชนิดของชุดปล่อยที่ใช้กันมากในงานวิจัยปัจจุบัน โดยจะจำแนกชนิดของชุดปล่อยหรือปืนออกตามแหล่งของตัวขับเคลื่อนกระสุน

2.4.1 ชุดปล่อยกระสุนแบบใช้แก๊สเบา (light gas gun)

ชุดปล่อยกระสุนแบบนี้จะใช้แก๊สเบา (light gas) เช่น ไฮโดรเจน (H_2) หรือ ฮีเลียม (He) เป็นตัวขับเคลื่อน ดังนั้นชุดปล่อยชนิดนี้จึงเรียกว่า light gas gun โดยส่วนประกอบหลักของปืนชนิดนี้คือ ถังเก็บความดันสูง (high pressure reservoir) แผ่นฟิล์มบาง (diaphragm) และท่อปล่อยกระสุน (launch tube) หรือ ลำกล้องปืน (gun barrel) กระสุน (projectile) โดยทั่วไปจะสอดอยู่ทางออกของลำกล้องปืนติดกับแผ่น diaphragm แก๊สเบาที่ใช้เป็นตัวขับเคลื่อนจะบรรจุอยู่ในถังเก็บ (reservoir) ซึ่งแก๊สดังกล่าวจะทำให้เพิ่มความร้อนและความดันได้จากหลายวิธีเช่น จากการเผาไหม้ (combustion) จากแหล่งความร้อนภายนอก (external heat) จากการชาร์จประจุ (electric charge) จากคลื่นช็อค และจากการดันตัวของแท่งกด (piston compress) ทันทีที่ความดันของแก๊สเบาเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งความดันแผ่น diaphragm ทนรับไม่ได้ แผ่น diaphragm จะขาด ความดันภายใน ถังเก็บจะขับหรือเร่งความเร็วของกระสุน รูปที่ 2.7 แสดงแผนภาพส่วนประกอบของ single stage light gas gun หากประยุกต์กฎของการเคลื่อนที่ของนิวตัน จะสามารถหาความเร็วที่เกิดขึ้นในลำกล้องปืนได้



รูปที่ 2.7 แผนภาพส่วนประกอบของ Single stage light gas gun

$$m \frac{dv}{dt} = m \frac{dv}{dx} v = PA \quad (2.13)$$

เมื่อ m คือ น้ำหนักของกระสุน

V คือ ความเร็วของกระสุน ณ ตำแหน่ง x ใดๆ

P คือ ความดัน

A คือ พื้นที่หน้าตัดของลำกล้องปืน

หากอินทิเกรตตลอดความยาวของลำกล้องปืน (L) จะได้

$$\frac{mv_0^2}{2} = A \int_0^L P dx \quad (2.14)$$

เมื่อ v_0 คือ ความเร็วของกระสุนที่ทางออกของลำกล้องปืนเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาจะกำหนดให้ \bar{P} มีค่าคงที่ตลอดการเคลื่อนที่ของกระสุนในลำกล้องปืน ซึ่งมีค่าเป็น

$$v_0 = \sqrt{2\bar{P} \frac{AL}{m}} \quad (2.15)$$

โดยสมการนี้จะมีค่าความผิดพลาดเนื่องมาจากสาเหตุหลักคือความเสียดทานระหว่างกระสุนกับภายในลำกล้องปืน และในความเป็นจริงค่าของ \bar{P} จะมีค่าไม่คงที่เนื่องจากการเพิ่มปริมาตรมากขึ้นตามการเคลื่อนที่ของกระสุน ซึ่งความดัน \bar{P} ดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับแก๊สเบาและความดันภายในความดันถังเก็บ (Pressure reservoir, P_0) ถ้าพิจารณาเป็นแก๊สอุดมคติ (idea gas) ซึ่งมี ค่าความดันเป็น P_0 และความเร็วเสียง (sound speed) เป็น a_0 ดังนั้นความดันของ P ในขณะแก๊สขยายตัวจะมีความสัมพันธ์เป็น

$$P = P_0 \left(1 - \frac{v}{\left(\frac{2}{\gamma} - 1 \right) a_0} \right)^{2\gamma/(\gamma-1)} \quad (2.16)$$

เมื่อ v คือ ความเร็วของการขยายของแก๊ส

γ คือ ratio of the specific heats

ถ้าสมการที่ 2.16 ใช้ในการหาค่าความเร็วแก๊สหลังกระสุน จะได้อัตราส่วนของ P/P_0 จะขึ้นอยู่กับ

$$\frac{v(\gamma-1)}{2a_0} \quad (2.17)$$

จากกระบวนการทำงานแก๊สจะขยายตัวจากถังเก็บ ซึ่งเป็นการแปลงพลังงานที่สะสมภายในถัง เพื่อไปขับหรือเร่งความเร็วของกระสุนความเร็วสูงสุดของการไหลของแก๊สจะเกิดขึ้นเมื่อแก๊สแปลงพลังงานทั้งหมดที่มีให้กับการขับดันหรือเร่งความเร็วของกระสุน ซึ่งความดันของแก๊สจะลดลงเป็นศูนย์ โดยที่ความเร็วจะคำนวณได้จาก

$$v_{esc} = \left(\frac{2}{\gamma-1} \right) a_0 \quad (2.18)$$

ค่าความเร็วสูงสุดที่ทางออก คือ Escape velocity (v_{esc}) มีค่าเท่ากับ

$$v_{esc} = \left(\frac{2}{\gamma - 1} \right) a_0 = \frac{2}{\gamma - 1} \sqrt{\frac{\gamma R T_0}{M}} \quad (2.19)$$

เมื่อ T_0 คือ อุณหภูมิภายในถังเก็บ

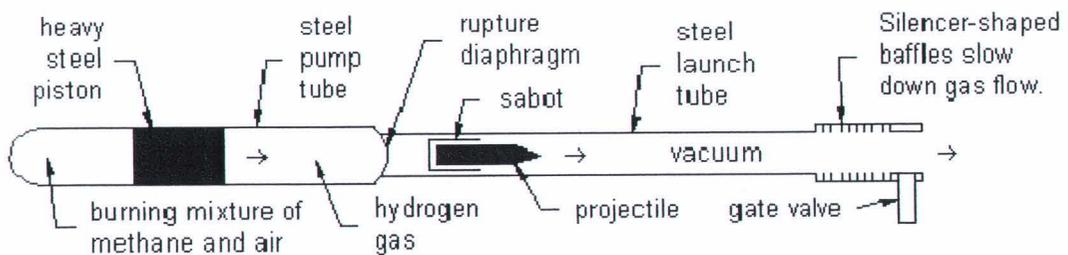
M คือ มวลโมเลกุลของแก๊สภายในถังเก็บ

R คือ universal gas constant

ซึ่งความสัมพันธ์นี้แสดงว่า light gas gun จะมีความเร็วสูงก็ต่อเมื่อใช้แก๊สที่มีค่ามวลโมเลกุลต่ำและแก๊สจะต้องมีอุณหภูมิสูง

2.4.2 ชุดปล่อยกระสุนแบบใช้แก๊สเบาแบบสองช่วง (two stage light gas gun)

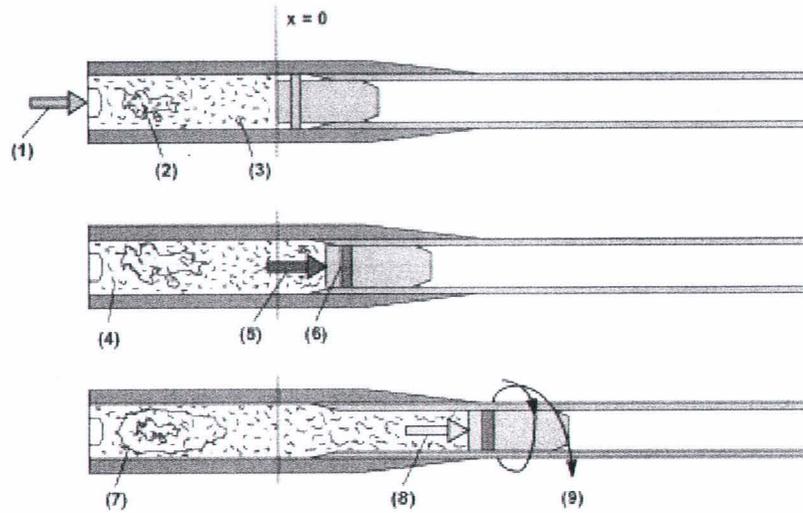
เมื่อใช้ลูกสูบ (Piston) กดอัดให้แก๊สที่ใช้ขับเคลื่อนกระสุน (driver gas) มีความดันและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ชุดปล่อยกระสุนแบบนี้จะเรียกว่า ชุดปล่อยกระสุนแบบใช้แก๊สเบาแบบสองช่วง (two stage light gas gun) ซึ่งเป็นปืนที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง ดังรูปที่ 2.8 แสดงส่วนประกอบพื้นฐานของ piston-powered two-stage light gas gun โดยที่แก๊สเบาจะถูกบรรจุอยู่ภายในท่อที่มีผนังหนาและเรียบซึ่งโดยทั่วไปจะถูกเรียกว่าท่อปั๊ม (pump tube) โดยที่ด้านหนึ่งจะถูกปิดโดยลูกสูบ (piston) และอีกด้านหนึ่งจะปิดโดย diaphragm แบบแผ่นโลหะ



รูปที่ 2.8 แผนภาพส่วนประกอบของ two stage light gas gun

2.4.3 ชุดปล่อยกระสุนแบบใช้ดินปืน (powder gun)

ชุดปล่อยกระสุนชนิดนี้จะใช้ชุดปืนทดลองแทนแก๊สซึ่งมีหลักการทำงานคือใช้แรงของปืนในการขับเคลื่อนกระสุนโดยมีดินปืนเป็นเชื้อเพลิง



รูปที่ 2.9 แผนภาพการทำงานของ Powder gun

จากรูปที่ 2.9 สามารถอธิบายการทำงานตามหมายเลขได้ดังนี้

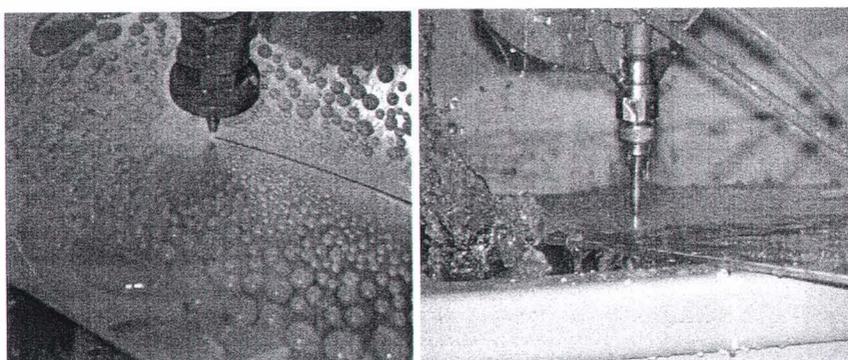
- 1) เริ่มมีการจุดชนวนห้องเผาไหม้
- 2) เริ่มมีการเผาไหม้
- 3) มีแรงดันจากการเผาไหม้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว
- 4) ห้องเผาไหม้เกิดแรงดันประมาณ 14-68 MPa
- 5) กระสุนเริ่มมีการเคลื่อนที่จากอิทธิพลของแรงดัน
- 6) มีแรงต้านการเคลื่อนที่ของกระสุน
- 7) ความดันเริ่มสูงขึ้นจากอัตราการเผาไหม้ที่มากขึ้น
- 8) ลูกกระสุนเคลื่อนที่มากขึ้นและปริมาตรห้องเผาไหม้มากขึ้น
- 9) เกิดแรงหมุนตัวของกระสุนที่เกิดจากแรงดันสูงสุดจากการเผาไหม้สมบูรณ์

เปลี่ยนแปลงตามเวลาศึกษาเปรียบเทียบรูปคลื่นของสัญญาณทั้งสองได้อย่างมีประสิทธิภาพและยังสามารถแสดงรูปคลื่นที่เป็นผลรวมของสัญญาณทั้งสองได้อีกด้วย

2.5 การประยุกต์ใช้ลำพุ่งความเร็วสูง

2.5.1 เทคโนโลยีตัดวัสดุด้วยลำพุ่ง (Jet cutting technology)

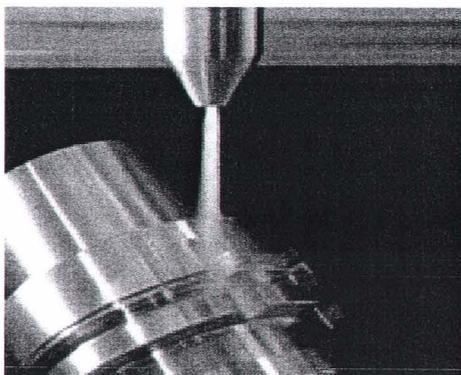
ในงานตัดวัสดุ (jet cutting) สิ่งที่ทำให้วัสดุหลุดออกไป สามารถอธิบายได้ในรูปของการกักเซาะของลำพุ่งความเร็วสูง ที่เกิดจากความเร็วเหนือเสียง (supersonic) ไม่ได้เกิดจากความดัน แต่เกิดจากความเร็วของกระแสน้ำที่กักเซาะเอาอนุภาคหรือเกรนของวัสดุให้หายไป ซึ่งจะเกิดจากการเปลี่ยนความดันให้กลายเป็นความเร็วด้วยลักษณะของโครงสร้างของหัวฉีด ซึ่งหัวฉีดจะมีรูซึ่งมีขนาดเล็กมากเอาไว้ให้น้ำออกมา ซึ่งโดยทั่วไปความดันที่ใช้คือความดันประมาณ 40,000 psi นั้นจะให้ความเร็วของน้ำเท่ากับ 2 มัค และที่ความดันประมาณ 60,000 psi จะให้ความเร็วของน้ำที่ประมาณ 3 มัค ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 Jet cutting technology

2.5.2 เทคโนโลยีทำความสะอาดด้วยลำพุ่งน้ำ

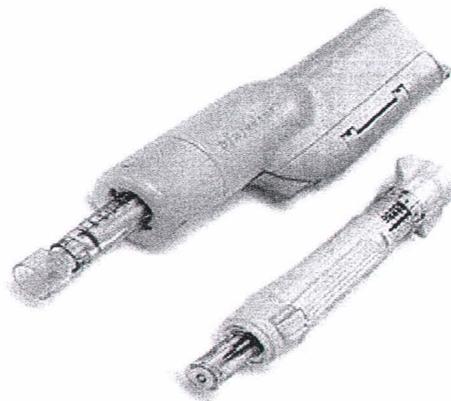
ในงานของเทคโนโลยีทำความสะอาดด้วยลำพุ่งน้ำ เป็นเทคโนโลยีที่ประยุกต์ใช้ลำพุ่งความเร็วสูงเพื่อทำความสะอาดวัสดุมีหลักการคล้ายกับการตัดวัสดุด้วยลำพุ่ง โดยการใช้ความเร็วของลำพุ่งที่ความเร็วเหนือเสียง (supersonic) เพื่อที่จะจัดสิ่งสกปรกให้ออกไปได้อย่างรวดเร็ว แต่มีความแตกต่างจากการตัดวัสดุ ตรงที่การใช้แรงดันของน้ำเพื่อผลิตลำพุ่งออกมาและลักษณะของหัวฉีดที่ต่างกันไป โดยใช้แรงดันของน้ำอยู่ที่ประมาณ 1,500-3,500 psi ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 Water jet cleaning technology

2.5.3 เทคโนโลยีนำส่งยาด้วยลำพุ่งความเร็วสูง (Needle less technology)

ปัญหาของเข็มฉีดยานั้นมีมากมายเลยทีเดียว โดยเฉพาะในประเทศกำลังพัฒนาและประเทศด้อยพัฒนา ไม่ว่าจะเป็นการขาดแคลนตัวอุปกรณ์เองขาดความพิถีพิถันเรื่องความสะอาดและสุขอนามัยประมาณ 30% ของจำนวนครั้งที่มีการฉีดยานั้นไม่ปลอดภัย นอกจากนี้ยังมีรายงานการติดเชื้อจากเข็มฉีดยาที่ไม่สะอาด ส่งผลถึงขั้นเสียชีวิตอีกเป็นจำนวนมากถึง 1.3 ล้านคนทั่วโลก แต่ถึงอย่างไรเข็มฉีดยาก็ยังเป็นสิ่งจำเป็นในการป้องกัน (วัคซีน) และรักษาโรค ในบางประเทศด้อยพัฒนาที่มีอุปกรณ์ทางการแพทย์อยู่อย่างจำกัด ด้วยความรู้เท่าไม่ถึงการณ์และความเพิกเฉย เข็มฉีดยาถูกนำมาใช้ซ้ำกับผู้ป่วยหลายคนโดยปราศจากการฆ่าเชื้อ (ที่ควรจะต้องผ่านความร้อน 121° C เป็นเวลา 20 นาที ในแต่ละครั้งที่นำมาใช้) นอกจากนี้เข็มที่ใช้แล้วยังถูกกำจัดอย่างไม่เหมาะสม ทางออกก็คือ ที่มาของแนวคิดเข็มฉีดยาแบบไม่ต้องใช้เข็ม (Needle-free injectors, NFIS) ซึ่งมีหลักการทำงานอย่างเดียวกัน แต่ไม่ต้องพึ่งเข็มแต่ใช้หัวฉีด (nozzle orifice) ดังรูปที่ 2.12 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ตั้งแต่ 76-360 ไมโครเมตร เป็นตัวลำเสียดยาแทน ซึ่งสามารถส่งผ่านตัวยาเข้าไปได้ ผิวหนัง ไปสู่ชั้นไขมันหรือกล้ามเนื้อได้อย่างง่ายดายด้วยความเร็ว 100 m/s (ขึ้นอยู่กับความหนาและหนาของผิวหนัง รวมถึงบริเวณที่ฉีดด้วย) นอกจากนี้การกำจัดก็เป็นเรื่องง่ายไม่ต้องใช้หน่วยเก็บขยะแหลมคม (sharps container) ไม่ต้องกังวลเรื่องการสเตอริไลส์ฆ่าเชื้อที่ไม่เหมาะสมหรือการใช้เข็มฉีดยาร่วมกัน



รูปที่ 2.12 Needle free jet injection device

2.5.4 เทคโนโลยีเครื่องยนต์ลำพุ่ง (Jet engine technology)

เครื่องยนต์ลำพุ่ง เป็นเครื่องจักรที่ถูกออกแบบมา เพื่อให้ผลิตหรือสร้างก๊าซที่มีความเร็วสูง ไหลผ่านช่องที่กำหนด เครื่องยนต์เริ่มต้นการหมุนเครื่องอัดไอ (compressor) อากาศจากภายนอก ด้วยเปิด เครื่องยนต์ก็จะถูกดูดเข้าเครื่องยนต์เครื่องอัดไอ ก็จะทำงานกับอากาศที่เข้ามาและก็จะส่ง อากาศที่อัดผ่านเครื่องอัดไอ นี้ต่อไปยังส่วนของห้องเผาไหม้ ซึ่งจะมี ความดันเพิ่มขึ้นมาก ถึง 12 เท่า ของอากาศ ก่อนที่จะผ่านเข้าเครื่องยนต์ ในส่วนของห้องเผาไหม้หัวจุดไฟ (Igniter) ก็จะทำการ จุดเครื่องยนต์ โดยจุดส่วนผสมของน้ำมันเชื้อเพลิงและอากาศในห้องเผาไหม้ หัวจุดไฟจะมีหนึ่ง หรือ สองหัว ซึ่งก็คล้ายกับหัวเทียนในรถยนต์ เมื่อเครื่องยนต์ติดหรือทำงานแล้วและเครื่องอัดไอ หมุนด้วยความเร็วที่เพียงพอตามที่กำหนดแล้ว Starter และหัวจุดไฟ ก็จะถูกปิดหรือเลิกใช้ ต่อจากนั้นเครื่องยนต์ ก็จะทำงานของมันเอง โดยไม่ต้องได้รับความช่วยเหลือ จาก Starter และ หัวจุดไฟ อีกต่อไป トラบเท่าที่น้ำมันเชื้อเพลิงและอากาศผสมในอัตราส่วนที่ถูกต้อง ยังไหลเข้าห้องเผาไหม้อย่างต่อเนื่องเพียง 25% ของอากาศ ที่มีส่วนใช้ในการเผาไหม้ที่ห้องเผาไหม้ส่วนอากาศที่เหลือ ก็จะผสมกับก๊าซไอเสียหรือก๊าซที่ผ่านการเผาไหม้ เพื่อการลดอุณหภูมิของก๊าซไอเสียหรือก๊าซที่ ผ่านการเผาไหม้ก่อนที่ก๊าซไอเสียจะเข้าไปยังส่วนของกังหัน (turbine) ส่วนของกังหันก็จะนำเอา พลังงานจากกระแสของก๊าซที่ไหล พลังงานส่วนใหญ่ก็จะถูกนำไปใช้ในการหมุนเครื่องอัด และ อุปกรณ์ต่างๆ แรงขับของเครื่องยนต์ (thrust) ก็มาจากการเอามวลของอากาศ จำนวน มาก จาก ด้านหน้าของเครื่องแล้วก็ดันมันออกไปด้วยความเร็วที่สูงมากเมื่อเทียบกับความเร็วเมื่อตอนที่เข้า มาที่ด้านหน้า หรือที่เครื่องอัดไอ

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับลำพุงความเร็วสูง

ปัจจุบันยังได้มีนักวิจัยจำนวนมากได้พยายามศึกษาเกี่ยวกับลำพุงความเร็วสูงโดยศึกษาเกี่ยวกับคุณลักษณะและความเร็วของลำพุงเพื่อการประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ เป็นเวลานับสิบปีแล้วที่มีนักวิจัยจำนวนมากได้ศึกษาถึงลักษณะของการฉีดของเหลวอัตราความเร็วสูงและความเกี่ยวข้องปฏิสัมพันธ์กัน ซึ่งจัดว่าเป็นประโยชน์ในหลายๆด้าน อาทิเช่น เทคโนโลยีของการตัด การทำเหมืองแร่ การเจาะอุโมงค์ การกัดเซาะด้วยของเหลวในอัตราความเร็วสูง เครื่องยนต์ที่มีการฉีดพ่นในทิศทางตรง เครื่องยนต์เจ็ทที่มีการเผาไหม้ในอัตราที่เร็วกว่าเสียง (SCRAM) และการศึกษาของกระบวนการเผาไหม้ในลักษณะที่มีการพ่น อย่างไรก็ตามการฉีดที่มีความเร็วสูงมากๆ นั้นต่างก็มีลักษณะที่เข้าใจยาก ซึ่งนี่อาจจะเป็นสาเหตุยากต่อการผลิตและนำไปใช้ได้โดยง่าย วิธีการใช้ชิปนาวู่นั้นได้ถูกนำมาศึกษาในการไหลด้วยอัตราความเร็วสูงอีกครั้ง ซึ่งเทคนิคที่ทำให้เกิดการฉีดของเหลวด้วยความเร็วสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้วยระบบ hypersonic ได้มีการนำมาทดสอบ นับว่าเป็นข้อมูลที่มีประโยชน์ในการทดสอบที่มีการกำหนดสัญลักษณ์และวิธีการทดลองในโครงการนี้ ลักษณะของการฉีดของเหลวที่มีความเร็วสูงนั้นนับว่ามีความสำคัญอย่างยิ่ง งานเขียนของการศึกษาเรื่องการฉีดของเหลวที่มีความเร็วสูงในครั้งก่อนๆได้ถูกนำมาทบทวนอีกครั้ง เพื่อเป็นประโยชน์ในการนำมาตรวจสอบ โดยการนำการฉีดเชื้อเพลิงในอัตราความเร็วสูงของเครื่องยนต์ดีเซลหรือเครื่องยนต์เจ็ทแบบ scram ดังนั้นกระบวนการเผาไหม้ของเครื่องยนต์โดยอัตโนมัติของการฉีดดีเซลนั้นได้นำมาทดสอบ รวมไปถึงการศึกษากระบวนการเผาไหม้ต่างๆที่ได้นำมาพิสูจน์ด้วย

2.6.1 การฉีดของเหลวในอัตราความเร็วสูง

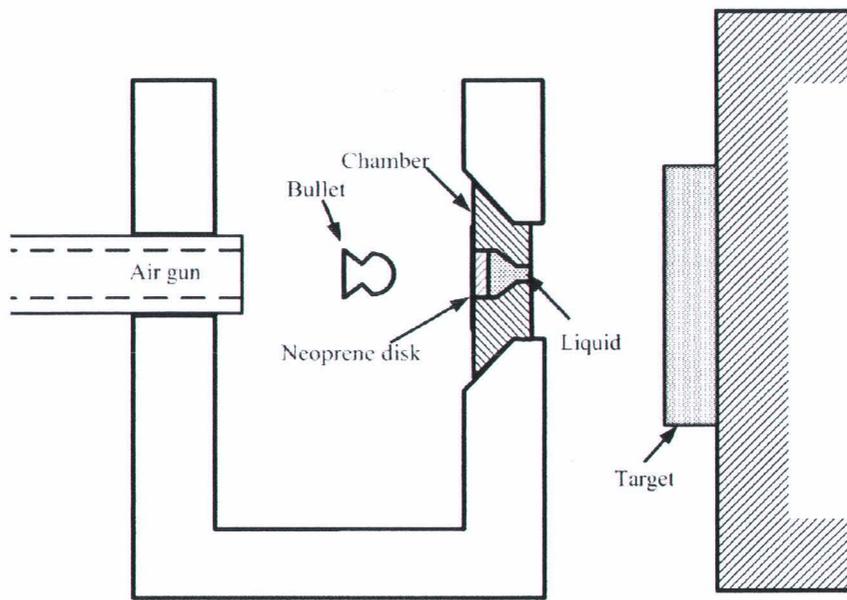
เมื่อไม่กี่สิบปีมานี้ได้มีการศึกษาถึงลักษณะของการฉีดของเหลวด้วยอัตราความเร็วสูงกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งสามารถนำไปใช้กับเทคโนโลยีต่างๆ มากมาย เช่น การชะของฝนโดยเครื่องบินที่มีความเร็วสูง การกัดเซาะด้วยใบพัดของกังหันน้ำ การทำความสะอาด และการทำเหมืองแร่ ยิ่งไปกว่านั้นการศึกษาดังกล่าวนั้นอาจจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนากระบวนการเผาไหม้ด้วยการฉีดที่ใช้ระบบ Supersonic (scram) และเครื่องยนต์ดีเซลที่มีการฉีดในทิศทางตรง อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้ก็มีข้อจำกัดของอัตราความเร็วในแต่ละองค์ประกอบด้วย แต่ทว่าการศึกษาข้อมูลพื้นฐานของกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ในแต่ละองค์ประกอบนั้นสำคัญประโยชน์ที่ได้นั้นจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการเผาไหม้และยกระดับการควบคุมการปล่อยออกมาจากการทำให้เป็นอนุภาคเล็กๆ ซึ่งการที่จะทำให้เกิดการฉีดของเหลวที่มีความเร็วสูง และวิธีการใช้ชิปนาวูอย่างประสบผลสำเร็จได้โดยส่งผลต่อการสันตะเทือนอย่างสูงซึ่งเป็นเหตุทำให้เกิดการฉีดของเหลวแบบ hypersonic ในบทนี้ได้อธิบายถึงวิธีการทำให้เกิดลักษณะกระบวนการหรือปัญหาที่อาจเกิดในการทดลองของการฉีดของเหลวในอัตราความเร็วสูง

2.6.1.1 วิธีการทำให้เกิดการฉีกของเหลวในอัตราความเร็วสูง หากย้อนกลับไปเมื่อ

ช่วงปี 1950 ปัญหาการกัดเซาะของฝนนั่นได้เริ่มกระตุ้นนักวิจัยหันมาสนใจในการทำงานด้านวิศวกรรม ซึ่งปรากฏการณ์นี้เป็นเหตุให้เกิดการทำลายพื้นผิวดิน เช่น หยอดของน้ำที่พุ่งผ่านเครื่องบิน ในระหว่างที่มีการบินในอัตราเร็วสูง การทำลายนี้อาจจะเกิดจากผิวของเครื่องบินและใบพัดของเครื่องยนต์ การศึกษาผลกระทบของของเหลวกับของแข็งในอัตราที่เร็วขึ้นจัดว่าเป็นเรื่องยากในการทดลอง เนื่องจากสาเหตุดังกล่าวไม่ได้ก่อให้เกิดการฉีกของเหลวด้วยอัตราที่เร็วสูงในแบบ Supersonic และ hypersonic

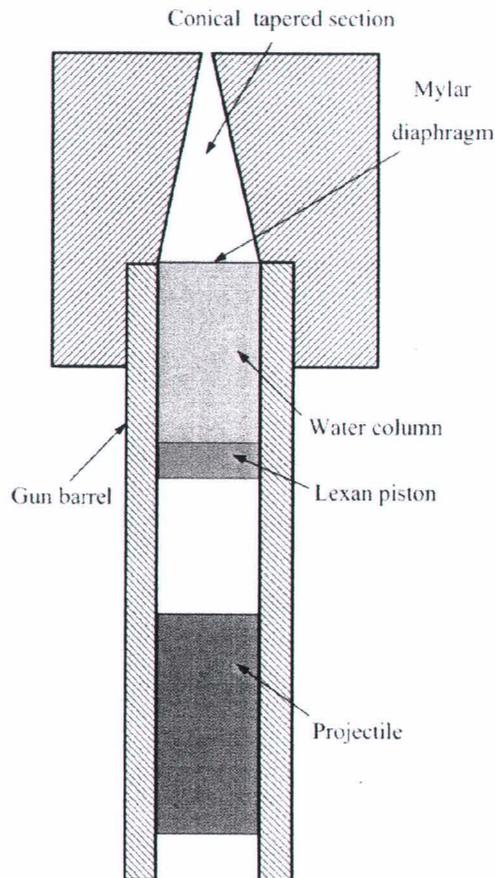
เทคนิคของการทดลองที่เป็นแบบแผนนั้นไม่ได้ถูกนำมาใช้ให้เกิดอัตราความเร็วที่สูง ดังนั้นวิธีการยิงแบบซีปนาวูธได้ถูกพัฒนาในการเพิ่มให้การค้นคว้านั้นมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ในปี ค.ศ. 1955 เจ็นคินส์ได้พยายามศึกษาผลกระทบของของหนืดในอัตราที่เร็วสูงเป็นครั้งแรกโดยการเผาไหม้ของกระสุนยิงของแข็ง (จากปืนอัดลม) ที่ส่งผลต่อการลอยตัวของหยดน้ำเล็กๆในอากาศ หยดน้ำได้ลอยอยู่โดยเทคนิคโยแมงมุมและทำให้เกิดอัตราความเร็วของกระสุนเร็วถึง 240 m/s กระสุนยิงก็จะลดความเร็วลงและหยุดโดยแท่งกุด เพื่อจะได้ไม่มีการทำลายเกิดขึ้น ซึ่งการทำลายของพื้นผิวด้านหน้าที่ส่งผลกระทบต่อของหยดน้ำจะได้นำมาศึกษาในครั้งต่อมา

วิธีนี้ได้ถูกนำมาใช้จนถึงปี ค.ศ. 1958 Bowden และ Brunton ได้คิดค้นเทคนิคใหม่ที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือน ด้วยหัวฉีดของเหลวในอัตราที่สูงซึ่งเป็นวิธีการแลกเปลี่ยนการเคลื่อนไหวย่างง่ายๆ ปืนอัดลมไรเฟิลที่มีพลังสูงนั้น ได้มีการเผาไหม้แล้วไปกระทบกับแผ่นยางสังเคราะห์และจากนั้นจะดันน้ำออกอย่างรวดเร็วที่บรรจุไว้ตรงปากกระบอกฉีด อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำนี้ประกอบไปด้วย เครื่องฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงที่ไม่เป็นสนิม ดังรูป 2.13 ที่มีความจุของเหลวอยู่ 0.1 cm³ ที่สามารถถูกปิดด้วยแผ่นยางสังเคราะห์นี้โอพลิน กระบอกสูบของเหลวมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1-2 mm ในกระบวนการเผาไหม้อย่างรวดเร็วนั้นทำได้โดยกระสุนจากปืนอัดลมไรเฟิลที่มีแรงดันสูงได้ดันลูกกระสุนออกอย่างแรงไปยังแผ่นยางนี้โอพลินภายในหัวฉีด ซึ่งของเหลวที่มีการบีบจากแรงดันอย่างสูงนั้นได้ทะลุผ่านปลายท่อจนไปถึงปลายหัวฉีดราวกับการฉีดหรือถูกสูบที่มีอัตราความเร็วสูง โดยหัวสูบนั้นมีอัตราความเร็วถึง 1,200 m/s ของการพ่นน้ำจากปากกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1mm



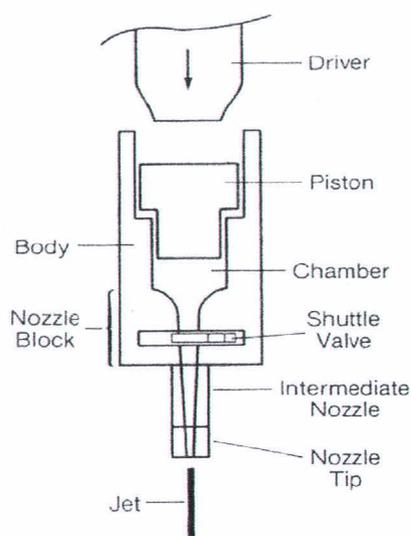
รูปที่ 2.13 วิธีการผลิตการฉีดของเหลวแบบ Supersonic ของ Bowden และ Brunton
 A: เป้าหมาย, B: ชุดทดลอง, C: ของเหลว, D: แผ่นยางนีโอพรีน, E: กระสุนโลหะ

O'Keefe และคณะได้นำกฎของ Bowden และ Brunton มาใช้ในการฉีดน้ำจนประสบความสำเร็จที่มีอัตราความเร็วสูงถึง 4.58 km/s โดยแนวทางลำพุ่งได้ถูกทำขึ้นอย่างแนวตรงที่จะทะลุผ่านมาบรรจบกันในส่วนที่เป็นรูปทรงกรวยอย่างรวดเร็วภายในลำกล้องกระสุนปืน Lucite ที่มีการขับออกมา ก่อนที่จะมีการตีไฟนั้น แนวนำพุ่งแต่ละแนวจะถูกทำภายในภาชนะรูปทรงกระบอกภายในโดยกระสุน Lexan ที่มีขนาดเหมาะสม ซึ่งกระบังลม Mylar ที่มีความหนา 1mm ที่อยู่ระหว่างช่องขับกระสุนและแนวลำพุ่งได้ถูกนำมาใช้เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ การยิงกระสุนด้วยอัตราความเร็วจาก 0.714 – 1.90 km/s ได้มีเผาไหม้จากปืนที่มีดินปืนที่ไม่มีควันภายในส่วนที่เป็นทรงกรวยที่หมุนเกลียวในทิศทางตรงไปยังปลายภาชนะทรงกระบอกของปืน ซึ่งการเรียวยาวทั้งหมดมีการทำมุมครั้งเดียวเพียง 1.5° และเส้นผ่านศูนย์กลางที่กว้างได้เข้าคู่กับภาชนะทรงกระบอกของปืน แต่มีความยาวแตกต่างกันด้วยอัตราส่วนของพื้นที่ที่ย่อมแตกต่างกัน การติดตั้งการทดสอบของ O'Keefe ได้แสดงดังรูปที่ 2.14



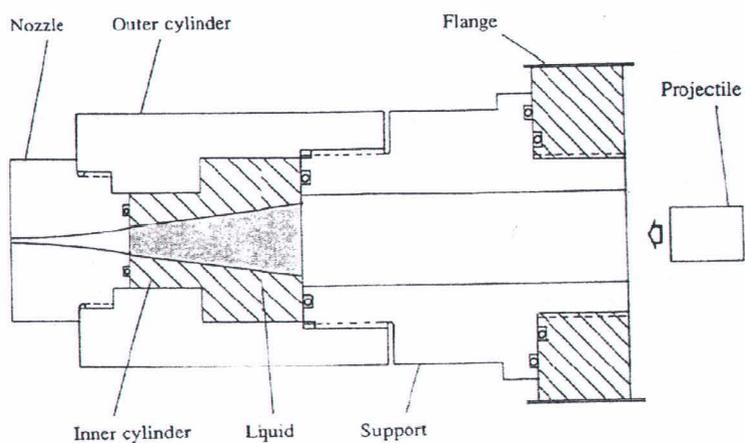
รูปที่ 2.14 การติดตั้งวิธีทำให้เกิดการฉีดแบบ hypersonic ในการศึกษาของ O'Keefe

ตั้งแต่ที่ทฤษฎีของ Bowden-Brunton และ O'Keefe ประสบความสำเร็จนั้นทำให้มีการนำกระสุนยิงมาใช้ในการฉีดของเหลวในอัตราที่เร็วสูง นักวิจัยยังคงใช้วิธีนี้อยู่ถึงแม้ว่าการทำจะค่อนข้างแตกต่างโดยขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ อีกเทคนิคหนึ่งในการฉีดของเหลวแบบ hypersonic นั้นคือ ทฤษฎีของ Edney โดยที่ Edney ไม่ได้ใช้ปืนและกระสุนแต่วิธีของเขาที่ทำเช่นเดียวกับหลักการของ Bowden และ Brunton's ซึ่งหลักการของ Edney นั้นใช้ลูกสูบที่มีความเร็วสูงอยู่ที่ราวๆ 500 m/s โดยการกดของอากาศสูงถึง 300 bar การสร้างแบบทดสอบนี้ก็มีความคล้ายคลึงกับของ O'Keefe ที่มีการจู่ของน้ำเข้าไปปิดที่ทางเข้าของปากกระบอกฉีด จนทำให้เกิดการฉีดน้ำแบบ hypersonic ด้วยความเร็วสูงถึง 3.5 km/s โดยที่มีการประมาณว่ามีความดันถึง 1.8 GPa ในช่องของหัวฉีด ซึ่งเป็นที่น่าสังเกตทางเรขาคณิตของหัวฉีดที่มีการฉีดในอัตราที่สูงมากเป็นพิเศษ ผลกระทบดังกล่าวทำให้เป็นที่น่าสนใจในการศึกษาของ Edney ยังได้พิสูจน์ถึงวิธีการสั้นสะเทือนนั้นทำให้เกิดการฉีดน้ำแบบ Supersonic ในลักษณะความดันสูงที่มีการนิ่งอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเขาได้ใช้การประดิษฐ์การฉีดแบบสั้นสะเทือนมาทำให้เกิดหัวฉีดดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การประดิษฐ์การฉีดของเหลวโดยอาศัยการสั่นสะเทือน

พลังงานของการสั่นสะเทือนได้ถูกสะสมจนเป็นพลังงานจลน์และได้ถ่ายไปยังน้ำโดยจากแรงกระทบ การประดิษฐ์นี้ได้นำมาใช้งานครั้งแรกในวิธีการยิงเดี่ยวโดยการหย่อนก้อนของแข็งในแนวตั้งตรงจากตัวเก็บของแข็ง จากนั้นก็มีการพยายามที่จะทำซ้ำหลายครั้งโดยวิธีการสั่นสะเทือนของตัวเก็บ ซึ่งทำให้เกิดความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเร็วของการฉีดน้ำและพลังงานการสั่นสะเทือนขึ้น จนได้มีการฉีดในอัตราที่เร็วที่สุดอยู่ที่ 2.185 km/s



รูปที่ 2.16 การประกอบชิ้นส่วนของหัวฉีดในการศึกษาของ Shi [6]

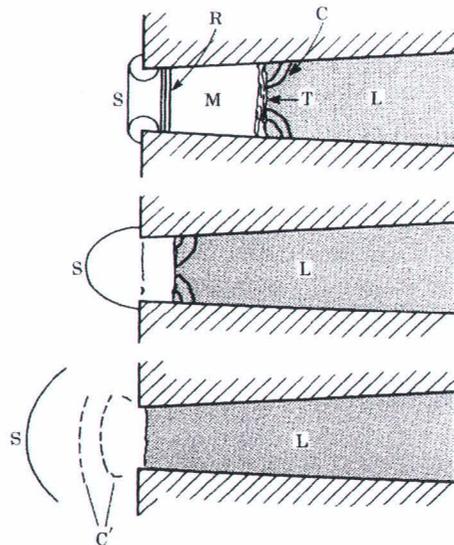
เมื่อปี 1992 Shi และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาการฉีดของเหลวในอัตราที่เร็วสูง ไม่ว่าจะป็นวิธีการทำให้เกิดการฉีด การแสดงตอบกลับของของเหลวและของแข็ง คลื่นของการฉีด และการตีไฟอย่างเหมาะสมของดีเซล Supersonic เป็นเหตุให้เกิดเทคนิคการทดลองและการผลิตมากมาย อย่างไรก็ตามหนึ่งในเทคนิคของ Shi ที่ประสบความสำเร็จมากที่สุดคือการใช้หัวฉีดที่มีการเบนเข้าหากันที่ทำมาจากไทเทเนียม โดยที่กระสุนยิงจะถูกทำให้ตีไฟและกระทบในลักษณะทางตรงบนพื้นผิวของของเหลวด้านหลัง หัวฉีดนั้นมีรูปร่างในลักษณะของไฮเปอร์-บอลิกและเชื่อมติดกับกระบอกสูบภายในที่ไม่เป็นสนิมที่สามารถเปลี่ยนได้ โดยมีอัตราความเร็วสูงสุดที่ 4.5 km/s การประกอบชิ้นส่วนต่างๆของหัวฉีดปรากฏดังรูปที่ 2.16 แม้ว่าหัวฉีดนั้นทำมาจากไทเทเนียม แต่ก็ไม่สามารถทนต่อความกดดันที่สูงๆ ได้ดังเช่นจากแรงปะทะของกระสุนยิง หัวฉีดจะถูกทำลายไปหลังจากการทดลองยิงสองถึงสามครั้ง เมื่อการเคลื่อนไหวนี้ได้มีการโยกย้ายดังที่กระสุนยิงปะทะกับลูกสูบที่เป็นทองเหลืองที่พื้นผิวของเหลวตอนหลังได้ถูกใช้ขึ้น อัตราความเร็วของการฉีดของเหลวนั้นพบว่าช้ากว่าการกระแทกในทิศทางตรง

อีกวิธีหนึ่งในการทำให้เกิดการฉีดของเหลวในอัตราที่เร็วขึ้นคือการสูบในความดันสูง ซึ่งวิธีนี้ได้มีการนำมาศึกษากันอย่างกว้างขวางเกี่ยวกับการฉีดในด้านการตัดและเทคโนโลยีการทำเหมืองแร่ โดยที่การสูบนั้นสามารถผลิตได้อย่างต่อเนื่องและบางครั้งก็เกิดการฉีดของเหลวในอัตราที่เร็วในลักษณะที่สั้นสะเทือน ซึ่งการฉีดในลักษณะดังกล่าวได้เกิดขึ้นจากการสูบของลูกสูบจนเกิดความดันน้ำโดยการอัดของลูกสูบซึ่งกันและกัน จนเกิดความดันสูงถึง 70 MPa และมีอัตราความเร็วของการฉีดสูงสุดที่ 1,500 m/s อย่างไรก็ตามอัตราความเร็วนี้สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อใช้หัวฉีดที่มีช่องเล็กมาก (0.2-0.3 mm) และเมื่อมีการยุบตัวจนเป็นหลุมในปากกระบอกฉีด ทั้งนี้ทั้งนั้นความดันสูงและการสูบของลูกสูบไม่สามารถผลิตการฉีดของเหลวได้เทียบเท่ากับวิธีการใช้การขับเคลื่อนแบบกระสุนยิง

การฉีดแบบ hypersonic สามารถผลิตได้ด้วยอีกเทคนิคหนึ่งซึ่งเรียกว่า “หัวรบติดดินระเบิดที่สามารถระเบิดได้ตามทิศทางที่กำหนดไว้” การฉีดจากลักษณะดังกล่าวในแนวทางตรงนั้นได้เกิดขึ้นจากการหลุดตัวของเส้นแบ่งรอยแยกที่มีคลื่นเสียงระเบิดตลอดการระเบิดในบริเวณรอบๆ วิธีนี้ได้นำมาใช้ให้เกิดเป็นโพรงเส้นยาว จนทำให้เกิดการฉีดของเหลวในลักษณะเส้นยาวแบบ hypersonic อย่างไรก็ตามถ้ามีการบรรจุของเหลวในเส้น การฉีดแบบ hypersonic ก็จะเกิดขึ้น การฉีดแบบ hypersonic ที่เกิดจากการระเบิดของการประดิษฐ์หัวรบติดดินระเบิดได้นำมาใช้ในการแทงทะลุเป้าหมายในด้านการทหารและความมั่นคงเกี่ยวข้องกับประชาชน

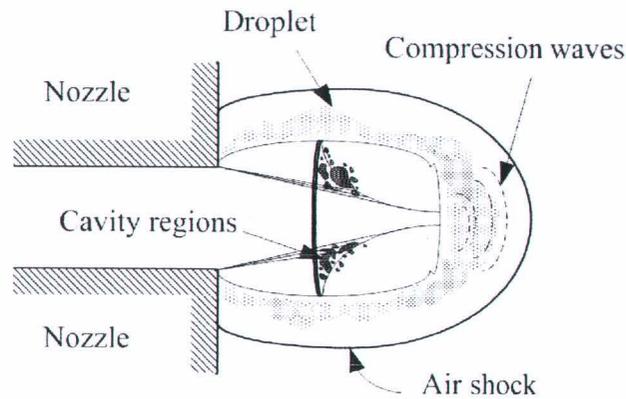
การสำรวจนี้ได้แสดงให้เห็นว่าการฉีดของเหลวแบบ hypersonic หรือ supersonic นั้นสามารถทำได้ด้วยวิธีและการติดตั้งที่แตกต่างกัน โดยที่จะต้องมีความรู้พื้นฐานในการติดตั้งและการออกแบบอย่างเหมาะสม ซึ่งสิ่งเหล่านี้ล้วนเป็นประโยชน์มากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งวิธีที่ทำให้เกิดการฉีดของเหลวแบบ supersonic

2.6.1.2 ลักษณะพิเศษของการฉีดของเหลวในอัตราความเร็วสูง แม้ว่าการศึกษาการฉีดของเหลวในอัตราความเร็วสูง นั้นจะเป็นประโยชน์ในหลายๆอย่างที่เกี่ยวกับมัน แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นก็ยังมีข้อจำกัดในการใช้งาน ซึ่งข้อมูลที่แท้จริงของลักษณะของการฉีดของเหลวในอัตราความเร็วสูงนั้นมีความสำคัญ ในส่วนนี้จะกล่าวถึงระบบกลไกรวมทั้งลักษณะพิเศษของการฉีดของเหลวในอัตราความเร็วสูง



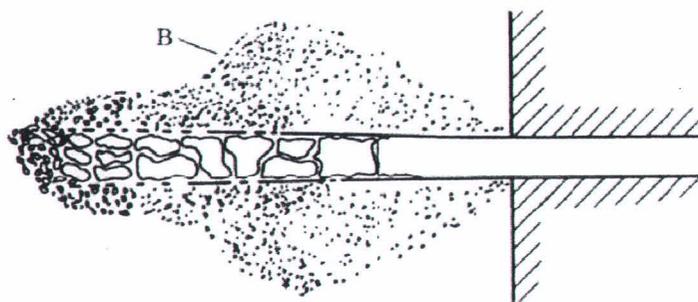
รูปที่ 2.17 ระบบกลไกของการฉีดของเหลวในอัตราความเร็วสูงจากปากของหัวฉีด C,T: บริเวณการบีบด้านหน้า, L: น้ำ, M: บริเวณของอากาศและหยดน้ำที่อัดตัว, R: คลื่นที่ลดอากาศ, S: การสั่นสะเทือน, C': คลื่นความดัน

ในส่วนตอนท้ายของกระบวนการฉีดของเหลวในอัตราความเร็วสูงนั้นเกิดขึ้นได้โดยการประดิษฐ์ด้วยวิธีการปะทะของกระสุนยิง ที่ได้มีการอธิบายของ Field และ Lesser ดังรูปที่ 2.17 ที่เก็บของเหลวได้ถูกกระแทกด้วยกระสุนยิง จนมีการบีบของน้ำในปากกระบอกฉีดในลักษณะที่บรรจบกัน ผลลัพธ์ที่ได้คือส่วนที่เล็กๆของการจู่ในครั้งแรกจะส่งไปยังช่องด้วยความหนาแน่นสูงและอัตราความเร็วสูง การเพิ่มความหนาแน่นในที่เก็บของเหลวนี้ประมาณว่าอยู่ระหว่าง 1.05 - 1.20 ครั้งในความหนาแน่นครั้งแรก



รูปที่ 2.18 การแสดงลักษณะการฉีกของเหลวในอัตราความเร็วสูงหลังจากที่ออกจากหัวฉีดใน
ตอนต้น [12]

S: การสั่นสะเทือนของอากาศ, C: หลุม, C': คลื่นความดัน, D: การปกคลุมของหยดน้ำ
เล็กๆ บริเวณที่ใกล้ทางออกของหัวฉีดนั้นคือส่วนที่เก็บของเหลวที่มีการเพิ่มขึ้นนั้นได้ถูกทำให้
เกิดขึ้นก่อนโดยคลื่นการสั่นสะเทือนของอากาศที่ล้อมรอบอยู่ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความดันสูงที่อยู่
ระหว่างความสั่นสะเทือนและส่วนหน้าของของเหลว บริเวณที่ใกล้ส่วนหน้าของของเหลวนี้จะมี
อากาศที่มีการบีบตัวนั้นจะผสมไปกับหยดของของเหลวเล็กๆ อีกทั้งการบีบตัวของของเหลว
นำไปสู่การทำให้เกิดความกดดันภายในอย่างมากในส่วนด้านหน้าของการเก็บของเหลวที่มีการ
เพิ่มขึ้น เมื่อการสั่นสะเทือนของอากาศได้ส่งไปยังหัวฉีดซึ่งกระทบกับคลื่นที่เบาบางย้อนกลับไปยัง
ด้านหน้าของของเหลว ส่งผลให้เกิดอากาศและหยดเล็กๆพุ่งออกมา เมื่อของเหลวได้ออกจากช่อง
แล้วแรงบีบทั้งหมดก็ออกมาด้วย การดันตัวในครั้งต่อมาก็ส่งไปตามความสั่นสะเทือนของบริเวณที่
มีอากาศ จากนั้นก็จะค่อยๆผ่านจากส่วนกลางของบริเวณล้อมรอบของเหลวต่อจากนั้นก็ผ่อน
ความดันของของเหลวออกไปยังสภาพที่มีอยู่จนเป็นลักษณะของการฉีกตามมาภายหลัง
การแสดงของรูปที่ 2.18 นั้นเป็นการฉีกของเหลวในอัตราความเร็วสูงอย่างทันทีทันใดหลังจากที่
ออกจากหัวฉีด การฉีกที่เป็นหลักนั้นถูกล้อมรอบด้วยหยดน้ำเล็กๆที่ได้แตกสลายและถูกเสริมหน้า
ด้วยคลื่นความสั่นสะเทือนในลักษณะโค้งและชุดของคลื่นที่มีการบีบตัว จนมีหยดของเหลวออกมา
ในบริเวณดังกล่าว การเคลื่อนย้ายของคลื่นที่มีความเบาบางลงภายในแกนของของเหลวตรงมุนนั้น
ได้เพิ่มการแตกสลายของของเหลวภายในที่เก็บของเหลวเล็กๆ



รูปที่ 2.19 รูปแสดงลักษณะการฉีดของเหลวในอัตราความเร็วสูงในตอนท้ายหลังจากออกจากหัวฉีด (B: การกระจายของหยดเล็กๆจากความดันของอากาศ)

รูปที่ 2.19 ได้แสดงถึงลักษณะการฉีดในช่วงท้ายตรงในระยะตรงหัวฉีดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10–20 mm จากผลลัพธ์ทางทฤษฎีและการทดลองนั้น Field และ Lesser ได้อธิบายไว้ว่าแกนกลางของของเหลวนั้นดูเหมือนจะไม่มีวามสอดคล้องกันอย่างสมบูรณ์ เนื่องจากกระบวนการลดความดันทำให้เกิดการสลายตัวจนเป็นความหนาแน่นมากตรงเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดแกนหลักของของเหลวถูกล้อมรอบโดยการปกคลุมของหยดของเหลวเล็กๆ (ดังสัญลักษณ์ B) ที่ได้รับการพัฒนาแบบไดนามิก สัญลักษณ์ B นั้นเกี่ยวข้องกับผลกระทบของการดึงอากาศ โดยการใช้วิธีการแบบสโตกและทฤษฎีที่ของเทอร์รี่นั้นทำให้ขนาดของหยดของเหลวนี้ใหญ่ประมาณ 2–10 μm

ระบบกลไกของการลดอนุภาคการฉีดของเหลวให้เล็กลงนั้นได้มีการศึกษาทางการทดลองกระบวนการนี้เกี่ยวข้องกับทรงเรขาคณิตของหัวฉีดที่ทำให้เกิดการลดขนาดของอนุภาค โดยเฉพาะมุมของการฉีดที่เป็นที่น่าสังเกตของทางออกของหัวฉีด จากการประเมินของทฤษฎีที่ทำให้อนุภาคของการฉีดลดลงนั้นแสดงให้เห็นว่าผลกระทบของวิธีการเคลื่อนไหวของอากาศ การไหลทะลักของของเหลว ผลกระทบของการเพิ่มสมรรถนะของอัตราความเร็วในการฉีด และการเคลื่อนตัวของความดันของของเหลว ซึ่งสิ่งเหล่านี้ไม่สามารถอธิบายผลลัพธ์ทางการทดลองได้เพียงอย่างเดียว โดยระบบกลไกที่รวมกับความเกี่ยวเนื่องของวิธีการเคลื่อนไหวของอากาศในของเหลวในด้านผลกระทบของทรงเรขาคณิตของหัวฉีดนั้นอาจจะมีเกี่ยวข้องในทางการศึกษา แต่จากกระบวนการการศึกษาเรื่องของรูปทรงของหัวฉีดนั้นได้ระบุไว้ว่าส่งผลต่อการทำให้เกิดอนุภาคที่เล็กลงได้

ความไม่เสถียรในการฉีดของเหลวในอัตราความเร็วสูงนั้นได้มีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง โดยได้มีการทดสอบความสัมพันธ์กันของการเคลื่อนไหวของอากาศระหว่างการฉีดและเครื่องมือโดยรอบ ผลปรากฏว่ากระบวนการสลายตัวประกอบกับความไม่เสถียรในลักษณะเล็กน้อยนั้นทำให้มีการรบกวนของแกนกลางเพิ่มมากขึ้น โดยที่ทำให้เกิดการแตกสลายของการฉีดจนเป็นแนวของหยดเล็กๆ จากการทดลองพบว่าความไม่เสถียรและการทำให้เป็นอนุภาคเล็กๆของการฉีดของเหลวทำให้เกิดการไหลเวียนของอากาศที่อัดกัน ซึ่งมีหน่วยมัดตั้งแต่ 0.50 ถึง 1.50 นับว่าเป็นความไม่เสถียรที่รุนแรงเนื่องจากจำนวนหน่วยเกือบเท่ากับ 1 หน่วยมัด โดยการแตกตัวของหยดของเหลวภายใต้สภาพที่มีการเร่งอัตราความเร็วนั้นแสดงให้เห็นถึงอัตราแรงเฉื่อยนั้นทำให้หยดการสั่นสะเทือนและเป็นเสียงเดียวในเวลาเดียวกัน ครั้นต่อมาถึงแม้ว่าการตอบกลับนั้นไม่เสถียร แต่ก็ทำให้เกิดการผิดรูปโดยจากการกระจายความดันของการเคลื่อนไหวอากาศที่ยังเหลือค้างอยู่

การศึกษาการฉีดของเหลวในอัตราความเร็วสูงเพื่อความเข้าใจที่ดียิ่งขึ้นหรือการปรับปรุงในการฉีดในทิศทางตรงด้วยเครื่องยนต์ดีเซลนั้นจัดว่ามีความสำคัญในการศึกษาเช่นกัน เป็นที่รู้กันคืออยู่แล้วว่าการเพิ่มความดันในการฉีดเชื้อเพลิงนั้น การเพิ่มปริมาณหรืออัตราความเร็วในการฉีด ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นที่น่าสังเกตว่าน่าจะทำให้เกิดการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซล เนื่องจากละอองน้ำมันมีขนาดเล็กลงและมีการระเหยพร้อมทั้งมีการผสมกันอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นการใช้เชื้อเพลิงและการปล่อยก๊าซออกมาจนหมดโดยเฉพาะที่เป็นควันนั้นจะมีจำนวนที่ลดลง Hiroyasu ได้ศึกษาถึงการลดการเผาไหม้ของเครื่องยนต์และลักษณะของการเผาไหม้ในสภาพที่เสียงและกระบวนการที่ทำให้เกิดละออง อีกทั้งยังได้อธิบายถึงระยะของการสลายตัว มุมของการฉีด การแทรกซึมของละอองและการรบกวนของหยดเล็กๆในการฉีด จากข้อมูลการทดลองการฉีดพ่นดีเซลนั้น Hiroyasu ได้แสดงการทดลองให้เห็นถึงระยะของการสลายตัวของดีเซล L_b พร้อมทั้งยังได้แนะนำหลักฐานที่ยืนยันในการสลายตัวอย่างสมบูรณ์ ดังนี้

$$L_b = 0.7D(1 + 0.4\frac{r}{D})(\frac{P_a}{\rho_t V_i^2})^{0.05}(\frac{L}{D})^{0.13}(\frac{\rho_l}{\rho_a})^{0.5} \quad (2.20)$$

โดยที่ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด, L คือความยาวของหัวฉีด, r คือเส้นรัศมีของหัวฉีด, P_a คือความดันของอากาศ, ρ_a คือ ความหนาแน่นของอากาศ, ρ_l คือความหนาแน่นของเชื้อเพลิง, V_i คืออัตราความเร็วในการฉีดช่วงแรก อีกทั้งเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ย SMD สามารถคำนวณได้จากองค์ประกอบของลักษณะการฉีด ดังนี้

$$\bar{X}_{32} = 2.33 \times 10^{-3} (\Delta P)^{-0.135} (\rho_a)^{0.121} Q^{0.131} \quad (2.21)$$

ΔP คือความแตกต่างระหว่างความดันในการฉีดและความดันล้อมรอบ โดยกำหนดให้ Q คือ ปริมาณของเชื้อเพลิงที่ถูกส่งไป โดยมีสมการการหามุมของการฉีดได้ดังนี้

$$\theta = 83.5 \left(\frac{L}{D}\right)^{-0.22} \left(\frac{D}{D_0}\right)^{0.15} \left(\frac{\rho_a}{\rho_l}\right)^{0.26} \quad (2.22)$$

กำหนดให้ D_0 คือเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกของหัวฉีด การคำนวณการแทรกซึมของการฉีดมีอยู่ 2 ส่วน ดังนี้

$$S = 0.39t \left(\frac{2\Delta P}{\rho_l}\right)^{0.5} \quad \text{when} \quad 0 < t < t_b \quad (2.23)$$

$$S = 2.95(Dt)^{0.5} \left(\frac{2\Delta P}{\rho_l}\right)^{0.25} \quad \text{when} \quad t < t_b \quad (2.24)$$

$$t_b = 28.65 \frac{\rho_l D}{(\rho_a \Delta P)^{0.5}} \quad (2.25)$$

กำหนดให้ t_b คือเวลาที่สลายตัวของการฉีด และ t คือเวลาของการแทรกซึมของการฉีด

จากการศึกษาถึงกระบวนการแตกตัวและกลไกในการสร้างละอองโดยการฉีดของเหลวใน อัตราความเร็วสูง (โดยมีความเร็วสูงถึง 200 m/s) นั้น ระยะเวลาของการแตกตัวสามารถวัดได้โดยวิธีการทางไฟฟ้า ซึ่งจากระยะของการแตกตัวได้แบ่งองค์ประกอบของอัตราความเร็วในการฉีดออกเป็น 6 ลักษณะด้วยกันคือ 1. การเปลี่ยนแปลงของระยะเวลาการแตกตัวนั้นไม่ติดขัด 2. การเปลี่ยนรูปของการแตกตัวที่ไม่สม่ำเสมอเป็นในลักษณะของการไหลเป็นคลื่น 3. การทำให้ระยะที่แตกตัวออกมาอย่างไม่สม่ำเสมอเป็นในลักษณะของสายละออง 4. ระยะเวลาการแตกตัวนั้นมีค่าน้อยสุดในสายละออง 5. การไหลในลักษณะที่เป็นคลื่นนั้นมีการกระจายออกอย่างราบเรียบไปยังส่วนของหัวฉีด ความเร็วสูงเพื่อที่ว่าหัวฉีดจะได้ไม่ต้องมาทำให้เป็นการฉีดแบบละอองเอง 6. ระยะเวลาการแตกตัวได้กระจายออกอย่างไม่สม่ำเสมอโดยมีลักษณะเป็นคลื่นและหัวฉีดก็ไม่สามารถพัฒนามาทำให้เกิดการฉีดในลักษณะที่เป็นละอองได้

ลักษณะของการไหลและเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กที่สุดในการพ่น รูปทรงกรวยมีลักษณะที่เป็นมุมกว้างนั้นเกี่ยวข้องกับการทำก่อนการผสมในกระบวนการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซล โดยที่การฉีดพ่นรูปทรงกรวยที่ไม่เสถียรในอากาศนั้นได้นำมาวิเคราะห์โดยการใช้อุปกรณ์วัดคือพีเออร์ (PDA) เป็นเครื่องวัดอัตราการความเร็วลม พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กที่สุดและอัตราการเร็วของการพ่นจนสมบูรณ์นั้นไม่ตรงกัน และเมื่อเปรียบเทียบกับกรวยกระจายของการฉีดในความดันที่เสถียรนั้นมีความผิดปกติ แต่ก็มีความปกติได้ถ้าการฉีดพ่นนั้นได้แบ่งออกเป็นส่วนๆ ผลกระทบของการเกิดฟองอากาศในการทำให้เป็นละอองด้วยการฉีดดีเซลในทิศทางตรงได้มีการนำมาศึกษาขึ้น ผลปรากฏว่าฟองอากาศในรูปของหัวฉีดนั้นเป็นเหตุทำให้เกิดอะตอมของการฉีดอย่างรวดเร็วในด้านที่ออก ซึ่งถือว่าเป็นข้อดีอย่างหนึ่ง โดยที่ฟองอากาศนี้ผลิตจากฟองที่มีคุณสมบัติเหมือนกันมากกว่าเกิดจากที่ว่าง

จากการวิเคราะห์ของการระเหยและการไหลทะลักของการฉีดนั้นพบว่า มีสาเหตุมาจากการฉีดละอองในความดันสูง อีกทั้งยังมีการวิเคราะห์ถึงโครงสร้างของหัวฉีดเชื้อเพลิงดีเซลกับเครื่องยนต์ที่เหมือนดีเซล พบว่าโครงสร้างของหัวฉีดดีเซลนั้นอาจจะเคยมีการนำมาใช้ในแบบของหลักฐานในการศึกษาเครื่องยนต์ดีเซลที่แท้จริง

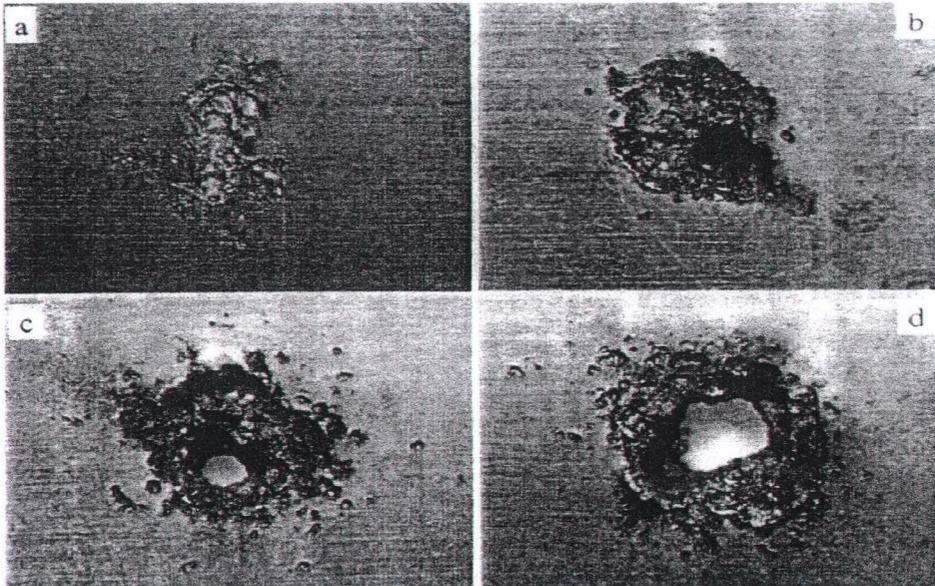
Nakahira ได้ผลิตหัวฉีดเชื้อเพลิงดีเซลในแบบ Supersonic ในระดับต่ำ (บรรจุแก๊สไนโตรเจน 2 MPa ในถึงความดันสูง) และเขายังได้ศึกษาถึงประโยชน์จากคลื่นสั้นสะเทือนต่ำ ผลปรากฏว่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบ SMD ของหยดเล็กๆ ในการฉีดเชื้อเพลิงนั้นเล็กลงเมื่อความดันในการฉีดสูง เพื่อที่ว่าคลื่นมีความสั้นสะเทือนได้พอดีกับหัวฉีด Nishida และทีมงานยังได้ศึกษาถึงมุมในการฉีด รูปร่างของการฉีด อัตราความเร็วในการซึม และค่า SMD ของการฉีดเชื้อเพลิงดีเซลด้วยความดันที่สูงมาก (มากถึง 300 MPa) การศึกษานี้ได้ยืนยันถึงค่า SMD และมุมในการฉีดที่มีการลดลงจากการที่ได้เพิ่มความดันในการฉีด (จากสูตรของ Hiroyasu ในสมการที่ 2.21 และ 2.22) อีกทั้งยังมีสังเกตคลื่นของมัท (Mach) จากรอบๆของการฉีดเมื่ออัตราการเร็วที่เพิ่มในการฉีดนั้นเร็วกว่าความเร็วของเสียงในอากาศที่ล้อมรอบอยู่ (1.2 MPa และ 298 K)

2.6.1.3 การกระทบของของเหลวไปยังของแข็งจากอัตราความเร็วสูง ปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่งในการศึกษาถึงหัวฉีดของเหลวในอัตราความเร็วสูงนั้นคือการเปลี่ยนรูปของของแข็งหรือมีการตอบสนองจากการกระทบของหัวฉีดที่เกิดขึ้นเช่นเดียวกับการชะน้ำของเครื่องบินในอัตราความเร็วสูง การชะของใบพัดกังหันหรือเทคโนโลยีในการตัดหัวฉีด จนทำให้มีการเปลี่ยนรูปออกเป็น 5 ลักษณะตรงพื้นผิวด้านบนของของแข็งหลังจากการกระทบของหัวฉีดในอัตราความเร็วสูง แบบแรกคือมีการแตกร้าวดตรงพื้นผิวในลักษณะเป็นเส้นรอบวง แบบที่สองมีการไหลใต้พื้นผิวและมีการแตกร้าวด แบบที่สามมีการเปลี่ยนรูปของพลาสติกที่มีน้ำหนักมาก แบบที่สี่การเปลี่ยนรูปมีลักษณะ

แบบถูกตัดออกบริเวณผิวรอบนอกของส่วนที่มีการกระทบ และแบบสุดท้ายคือมีการแตกร้าว ซึ่งลักษณะของการเปลี่ยนรูปร่างนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะทางกลไกของของแข็งและอัตราความเร็วของการกระทบ อีกทั้งยังมีการศึกษาถึงการแตกร้าวในลักษณะที่เปราะของของแข็งที่ได้มีการกระทบของเหลว พบว่าการผลิตความสั่นสะเทือนที่สั้นและชัดเจนนั้นเกี่ยวกับประเด็นต่างๆมากมายเปรียบได้กับการผลิตจากการระเบิดของดินปืนระเบิดอันเล็กๆบนพื้นผิว

Hirano พบว่าอัตราความเร็วในการกระจายตัวนั้นเร็วกว่าอัตราการหยดลงเมื่อหัวฉีดนั้นมีการกระทบบนพื้นผิวของแข็งอย่างเต็มที่ เนื่องจากลักษณะของการไหลในการกระจายของหัวฉีดในขั้นตอนแรกนั้นเป็นลักษณะที่ชั่วคราว จากการศึกษาอย่างละเอียดของField และ Lesser นั้นพบว่าการอัดแน่นนั้นเป็นปัญหาจากการกระทบของเหลวในวิถีที่มีความเร็วสูงอย่างแบบ Supersonic แต่ต่ำกว่าแบบ hypersonic ซึ่งปัญหาและทฤษฎีต่างๆได้มีการนำมาตรวจสอบเพื่อความเข้าใจมากยิ่งขึ้นในเรื่องต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการกระทบของของเหลว การพัฒนาการสั่นสะเทือนและสภาพที่มีการปลีกตัวแยกออกมาซึ่งเป็นผลมาจากการกระทบของของเหลวไปยังของแข็งและความสั่นสะเทือนที่ทำให้เกิดการแตกสลายจนเป็นโพรงจากการกระทำของหัวฉีดของเหลวที่มีอัตราความเร็วสูงนั้นได้มีนำมาอธิบายขึ้น Shi และทีมงานได้ทำการทดสอบอัตราความเร็วของคลื่นความสั่นสะเทือนและแรงดันในการกระทบของน้ำที่มีอัตราความเร็วสูงไปยังของแข็ง แนะนำว่าเมื่อมีอัตราความเร็วของน้ำที่มีการกระทบในปริมาณมาก (มากกว่า 1,500 m/s) การอัดตัวของของเหลว และการเปลี่ยนรูปของวัตถุนั้นควรจะมีการคำนวณของแรงดันในการกระทบและอัตราความเร็วของคลื่นความสั่นสะเทือนรวมอยู่ไว้ด้วย

ซึ่งเทคโนโลยีในการตัดหัวฉีดนั้นจัดว่าเป็นสิ่งที่น่าสนใจอีกอย่างหนึ่งในเรื่องของหัวฉีดของเหลวที่มีอัตราความเร็วสูง จึงได้มีการนำมาศึกษากันอย่างกว้างขวางเป็นเวลาหลายปี โดยการศึกษาวิจัยได้รวมถึงวิธีการที่ทำให้เกิดหัวฉีดของเหลวที่มีความเร็วสูง อัตราความเร็วของการฉีดและลักษณะเฉพาะต่างๆ อาทิเช่นผลกระทบของทรงเรขาคณิตของปากหัวฉีดเกี่ยวกับโครงสร้างและความแข็งแรง แรงดันของการกระทบ สมรรถนะในการตัด และอื่นๆ ตัวอย่างเช่น จากการศึกษาของฉีด ที่พบว่าการทำลายบริเวณพื้นผิวของของแข็งหลังจากการกระทบโดยการฉีดน้ำแบบ Hypersonic ดังรูปที่ 2.20 ซึ่งมีอัตราความเร็วในการฉีดที่แตกต่างกัน การทำลายหรือการเปลี่ยนรูปร่างบนพื้นผิวของของแข็งมีความแตกต่างกัน อีกทั้งยังเป็นที่น่าสังเกตอีกว่าระยะห่างและรูของหัวฉีดนั้นส่งผลต่อการทำลายได้



รูปที่ 2.20 ความหนาของแผ่นกระแทก 3 mm ระยะ 45 mm a) 2,727 m/s b) 3,529 m/s
c) 4,111 m/s d) 4,545 m/s

2.6.1.4 การศึกษาเกี่ยวกับตัวเลขและการวิเคราะห์ ถึงแม้ว่าวิธีที่ทำให้เกิดหัวฉีดของเหลวแบบ Supersonic ที่ได้มีการกล่าวไว้โดย Bowden และ Brunton's เมื่อ 1958 นั้น แต่ก็ยังมีการศึกษาที่เกี่ยวกับวิเคราะห์และการคำนวณอีกด้วย

ในการศึกษาของ O'Keefe นั้น ได้กล่าวถึงการเคลื่อนที่ของแนวลำพุ่งที่ได้มาบรรจบกันเกี่ยวกับความสำคัญอย่างหนึ่ง นั่นคือสมการที่ไม่แน่นอนเกี่ยวกับการไหลของของเหลวที่มีการอัดตัวที่มีอัตราส่วนแปรผันของพื้นที่ในส่วนที่ตัดตามขวาง จากการเท่ากันแบบยูเลอร์เรียน (ดูรูปที่ 2.14 ประกอบ)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\rho u}{A} \frac{\partial A}{\partial x} = 0 \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \quad (2.27)$$

$$\frac{dP}{dt} - c^2 \frac{d\rho}{dt} \quad (2.28)$$

สมการลักษณะพิเศษทางด้านกายภาพ ดังนี้

$$\frac{dx}{dt} = u \pm c \quad (2.29)$$

และสมการในลักษณะที่มีความสอดคล้องกัน

$$du = \pm \frac{1}{\rho c} \left(\frac{\partial P}{\partial c} \right)_s dc \mp \frac{1}{A} \frac{dA}{dx} dt \quad (2.30)$$

กำหนดให้ ρ คือ ความหนาแน่น, P คือ ความดัน, u คือ อัตราความเร็ว, c คือ อัตราความเร็วของเสียง, A คือ พื้นที่ส่วนที่ตัดตามขวาง และส่วนที่เหลือนั้นเป็นสมการของแนวของลูกสูบและความดันหนุนหลังของลูกสูบ

$$\frac{dx}{dt} = u \quad (2.31)$$

$$P = P_b - \frac{m_p}{A} \frac{du}{dt} \quad (2.32)$$

กำหนดให้ m_p คือ มวลของลูกสูบ, P_b คือ ความดันอากาศที่อยู่หลังลูกสูบส่วนเส้นแบ่งด้านขวานั้น กำหนดให้เป็นสมการของพื้นผิวว่างเปล่าและความดันของตัวเอง

$$\frac{dx}{dt} = u \quad (2.33)$$

$$P_f = 0 \quad (2.34)$$

กำหนดให้ P_f คือ ความดันของพื้นผิวที่ว่างสมการของของเหลวจากการเสนอของ Tait

$$P = 2.94 \left\{ \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{7.17} - 1 \right\} \quad (2.35)$$

ความดันสูงสุดในส่วนที่มีการเร็วเล็กน้อยสามารถนำมาคำนวณได้ ตัวอย่างเช่น ในกรณีของอัตราส่วนพื้นที่ของหัวฉีดเป็น 12:1 และอัตราเร็วของการกระทบเป็น 1.22 km/s โดยมีความดันสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 0.82 GPa

ต่อมา Shi ได้ใช้วิธีที่มีลักษณะพิเศษที่คล้ายกับการศึกษาของ O'Keefe โดยได้เขียนแบบความดันของคลื่นของหัวฉีดที่ทำเป็นมุมฉากในลักษณะที่มีการมาบรรจบกัน (เป็นทรงกรวยครึ่งหนึ่งที่ทำมุม 60°) อย่างไรก็ตาม ความแน่นอนในสมการของ O'Keefe ที่เกี่ยวกับของเหลวซึ่งมีความแตกต่างกันเล็กน้อยดังนี้

$$\frac{P + B}{P_0 + B} = \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^n \quad (2.36)$$

กำหนดให้ $n = 7$, $P_0 = 101325$ Pa และ $\rho_0 = 1,000$ kg/m³ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ B ได้มาจากสมการด้านล่างนี้ โดยกำหนดให้ $C_0 = 1,500$ m/s

$$c = \sqrt{\frac{dP}{d\rho}} = \sqrt{\frac{n(P_0 + B)}{\rho_0} \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{n-1}} \quad (2.37)$$

แม้ว่าจะมีการศึกษาที่อัตราความเร็วของการกระทบที่ต่ำ (40 m/s) ได้นำมาพิจารณา แต่ก็มี การสะท้อนกลับของคลื่นการสั่นสะเทือนสองอย่างของหัวฉีดอย่างชัดเจน (วัดได้โดยเครื่องมือรับแรงดันที่ได้ติดตั้งไว้ตรงผนังของหัวฉีด) ดังนั้นจากการคำนวณของความดันสูงสุดทั้งสองอย่างทำให้ คาดว่าน่าจะทำให้เกิดโพรงของหัวฉีด อย่างไรก็ตามในบางครั้งไม่สามหรือสองของความดันสูงสุดสามารถพบได้จากการวัดในการทำการทดลอง ความดันที่สูงสุดที่ 100 MPa ได้ถูกวัดในการที่มีช่องของหัวฉีดขนาด 1 mm

การวิเคราะห์ของกระบวนการทำให้เกิดหัวฉีดของเหลวแบบ Supersonic เบื้องต้นของ เวียทเชคอฟกีและคูลิได้มีการรายงานขึ้น โดยไรห์มิง การวิเคราะห์ของพวกเขาเกี่ยวข้องกับ ทฤษฎีการไหลที่ไม่คงที่และไม่ได้มีการอัดตัวในการเคลื่อนที่ของส่วนที่เป็นของเหลวเปล่าๆที่ทะลุ ไปยังปลายของหัวฉีด รูปแบบของแล-แกรนเจียนของสมการที่สงวนไว้ของมวลและพลังงานใน ส่วนของของเหลวทั้งหมดในลักษณะที่ไม่คงที่ได้มาจากสมการของเบอร์นูลลีวิเคราะห์ จากการ รายงานของ Glenn ได้อ้างถึงการพัฒนาความดันของหัวฉีดที่ได้นำมาเปรียบเทียบกับสูตรที่มีการกด ผลปรากฏว่ามีแนวโน้มของความดันในแรงดันที่มากที่สุดแบบทันทีทันใดนั้นแทบจะมีความ เหมือนกัน อย่างไรก็ตามความดันที่แรงสุดนั้นทำให้เกิดผลที่ตามมาแตกต่างกัน ในส่วนของสูตรที่ ไม่ได้มีการกั้นความดันสูงสุดทำให้เกิดการปล่อยตัวออกมา ในขณะที่สูตรที่มีการกั้นนั้นยังมีการ สร้างความดันขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเริ่มมีการปล่อยตัวออกมาในภายหลัง ผลกระทบของการ กดของของเหลวนั้นทำให้เกิดอัตราความเร็วสูงสุดของหัวฉีดที่ต่ำกว่า 15%

Pater ยังได้รายงานถึงสูตรที่เกี่ยวกับการวิเคราะห์ของอุปกรณ์หัวฉีดที่มีการสันสะเทือนแบบผลึกออก สูตรของของเหลวที่ไม่ได้มีการกวดตัวนั้นได้ถูกพัฒนาขึ้นและยังนำมาใช้เป็นตัวช่วยในการออกแบบอุปกรณ์เกี่ยวกับการตัดของหัวฉีดในเวลาต่อมา อัตราความเร็วของหัวฉีดของเหลว นั้นสามารถคำนวณได้จากองค์ประกอบของพลังงานจลน์ที่นำเข้าไปหรือพลังงานของหัวฉีดที่เพิ่มมากขึ้น (E_j) อย่างไรก็ตามสูตรที่มีผลออกมาคล้ายกันย่อมเกี่ยวข้องกับกรณีที่มีความแน่นอน และค่าที่มากของอัตราส่วนพื้นที่ของหัวฉีด อัตราความเร็วของหัวฉีดของเหลว (V_j) ดังสมการด้านล่าง

$$V_j = \sqrt{\frac{2E_j}{\rho S A_p}} \quad (2.38)$$

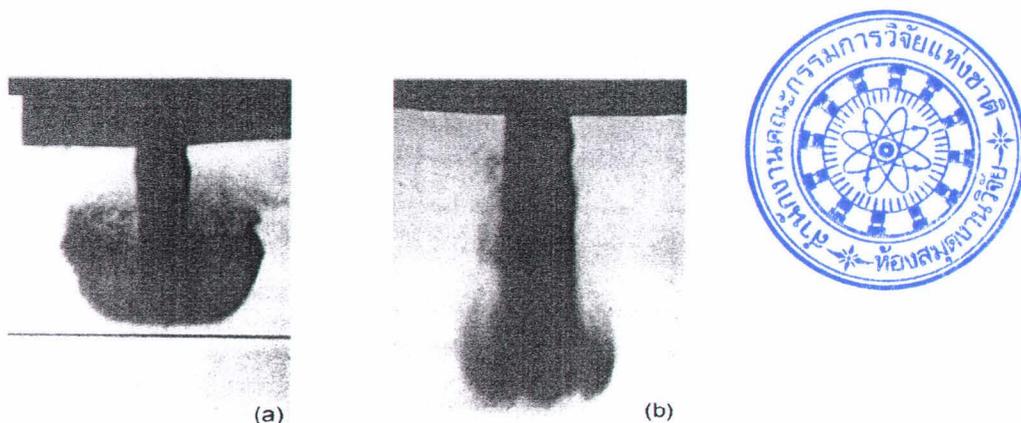
กำหนดให้ S ความยาวของระยะชัก, A_p คือ พื้นที่ของส่วนที่ตัดตามขวางของลูกสูบ และ ρ คือความหนาแน่นของของเหลว

Atanov ได้พัฒนาสูตรการคำนวณถึงความเป็นไปได้ของอัตราความเร็วสูงสุดของหัวฉีดของเหลวที่มีการสันสะเทือนจากการสร้างหัวฉีดแบบปืนกลน้ำ โดยได้อาศัยกฎความเฉื่อยของการเพิ่มความเร็วของของเหลวและรูปแบบเฉพาะของความดันพลังงานของหัวฉีดที่สูงกว่าความดันคงที่ภายในปากกระบอกฉีด พบว่าสูตรการคำนวณที่ได้มีการพัฒนานั้นสามารถนำมาคำนวณได้ดีกว่า

Lesser ได้สรุปกระบวนการเบื้องต้นของการทำให้เกิดหัวฉีดแบบ Supersonic จากวิธีการกระทบของกระสุนยิง โดยเรียกชื่อว่าอะไรก็ได้ที่สามารถทำความเข้าใจของขั้นต้นที่สำคัญของการกระทบของของเหลวในอัตราความเร็วสูง โดยให้ชื่อและเรียกว่าทฤษฎีของคลื่นนำของเสียงหรือทฤษฎีแก๊ส (GAS) นั่นเอง สมการเบื้องต้นที่เกี่ยวกับการสันสะเทือนของการนำเสียงได้มาจากการใช้ทฤษฎีของ Bowden และ Brunton's (วิธีการกระทบของการยิงกระสุน) Lesser ได้แนะนำสมการการคำนวณอัตราความเร็วของหัวฉีดน้ำดังนี้

$$V_j = \frac{4V_i}{1 + B/A} \quad (2.39)$$

กำหนดให้ V_i คือ อัตราความเร็วของการกระทบของการยิงกระสุน, A คือ พื้นที่ส่วนตัดตามขวางของโพรงหัวฉีด และ B คือช่องของหัวฉีด

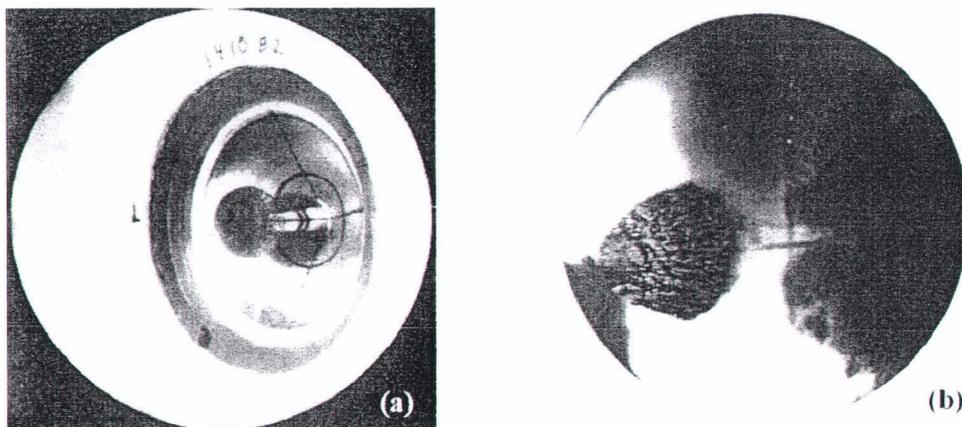


รูปที่ 2.21 รูปแสดงของหัวฉีดน้ำแบบ Supersonic แบบดำด้วยกล้องที่มีความเร็วสูง
(a) มีอัตราความเร็ว 620 m/s (b) มีอัตราความเร็ว 770 m/s

2.6.1.5 รูปของหัวฉีดของเหลวที่มีความเร็วสูง การศึกษาถึงลักษณะพิเศษของการ หัวฉีดของเหลวที่มีอัตราความเร็วสูงนั้นจำเป็นที่จะต้องมิตะคนิกทางการมองรูปมาเกี่ยวข้องด้วย เนื่องจากเวลาที่เกิดการฉัดนั้นสั้น ในส่วนนี้จะนำเสนอถึงเทคนิคการใช้รูปมาศึกษาถึงหัวฉีดที่มีความเร็วสูง

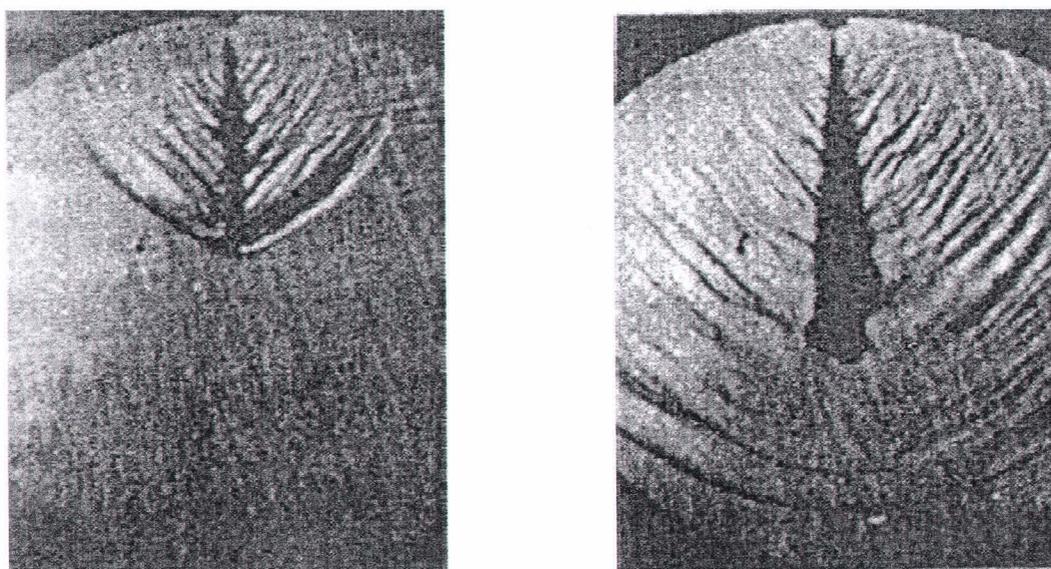
ซึ่งการศึกษาของ Bowden และ Brunton's นั้นได้มีการนำวิธีใช้รูปถ่ายมาศึกษาร่วมด้วย โดยใช้ทั้งการวัดอัตราความเร็วและการใช้รูปถ่าย การถ่ายรูปด้วยความเร็วสูงนั้นใช้เวลาการถ่ายรูปหนึ่งรูปครึ่งต่อหนึ่งส่วนล้านวินาที เท่ากับการถ่ายหนึ่งครั้งจะได้รูปถึงล้านรูปในหนึ่งวินาที แสงที่ใช้ถ่ายนั้นใช้หลอดไฟที่มีก๊าซซีนอนเข้มข้น ดังตัวอย่างของรูปการฉัดของเหลวแบบ Supersonic จากการศึกษาของ Bowden และ Brunton's ของรูปที่ 2.21 โดยกล้องที่มีความเร็วสูงได้นำมาใช้คำนวณหาอัตราความเร็ว (ตำแหน่งและเวลา) กันอย่างแพร่หลาย และการใช้รูปในการศึกษาประกอบในการศึกษาเรื่องอื่นๆด้วย

การนำคุณลักษณะของการกชดเตอร์และความสว่างของแสงที่สั้นสะท้อนนั้นทำให้เกิดกล้องที่มีการสลับกระแสรูปหลายๆ เฟรม ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่ต่อเนื่องของปรากฏการณ์ที่เร็วมาก ซึ่งต้องมีความเที่ยงตรงในการทำสูง ตัวอย่างเช่น รูปของหัวฉีดที่มีพุ่งโจมตีด้วยอัตราความเร็ว 9.2 m/s ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 รูปถ่ายของการฉีดในลักษณะพุ่งด้วยอัตราความเร็ว 9.2 m/s

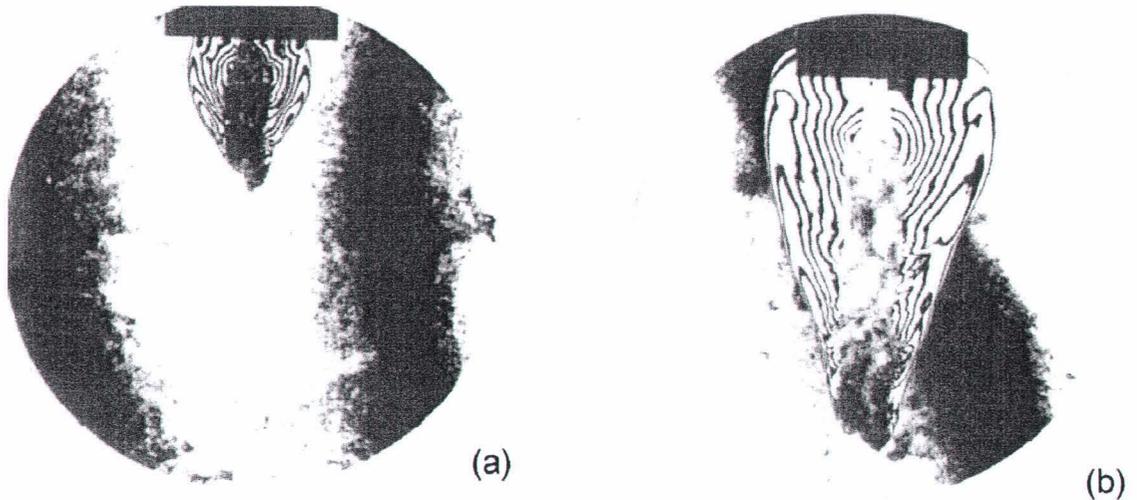
(a) คือ 24 μ s หลังการระเบิด และ (b) คือ 53.5 μ s หลังการระเบิด



รูปที่ 2.23 การฉีดเชื้อเพลิงดีเซลแบบ Supersonic จากการถ่ายภาพภายในเนื้อหิน

รูปงานนั้นจัดว่าเป็นวิธีที่ง่ายได้ผลในการใช้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาการไหลที่มีการอัดในการใช้รูปประกอบมาเป็นเวลานาน ซึ่งนักวิจัยจำนวนมากได้นำไปใช้ในการศึกษาถึงการฉีดของเหลวที่มีอัตราความเร็วสูง นอกจากนั้นหลักฐานชิ้นหนึ่งจากรูปถ่ายของการฉีดคือคลื่นความดันสะท้อนที่เกิดขึ้นขณะที่ได้ถ่าย

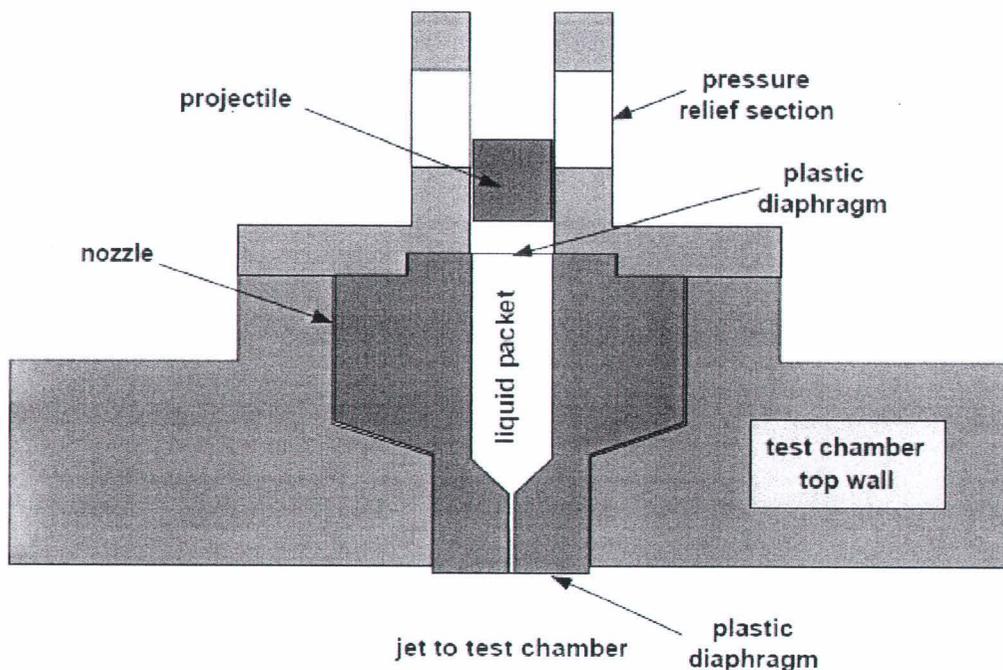
Nishida และทีมงานได้ประสบความสำเร็จจากการใช้วิธีการแตกของเนื้อหินจากการฉีดดีเซลแบบSupersonic ซึ่งเส้นมัธยฐานการฉีดนั้นสามารถมองเห็นได้ชัดเจนกว่ารูปเงา รูปที่ 2.23 ได้แสดงให้เห็นถึงรูปการแตกของเนื้อหินในลักษณะของการพันและคลื่นมัคโดยรอบ ซึ่งการวัดความยาวของคลื่นแสงจากงานเขียนทั้งหมดนั้นได้นำมาใช้ในการศึกษาของ Shi ที่ว่าการฉีดน้ำในแบบ Supersonic นั้นทำให้เกิดผลดังรูปที่ 2.24 ซึ่งสามารถมองเห็นความหนาแน่นภายในได้



รูปที่ 2.24 การฉีดน้ำ ที่ความเร็ว 2,000 m/s (a) คือ ปรากฏการณ์ช่วงต้น และ (b) คือ ปรากฏการณ์ช่วงท้าย

(1) ผลกระทบของรูปทรงหัวฉีดที่มีผลต่ออัตราความเร็วของการฉีดของเหลวหลังจากที่ได้มีการจัดเตรียมการทดสอบนั้นก็ยังมีอีกขั้นตอนหนึ่งที่ทำให้เกิดการฉีดของเหลวแบบ Supersonic ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มอัตราความเร็วให้ได้เต็มกำลังมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เมื่อขั้นตอนนี้เสร็จสิ้นก็จะทำให้ส่งผลในการศึกษาถึงการทำให้เกิดความเหมาะสมและการยกระดับของการฉีดไปอย่างอัตโนมัติโดยเชื้อเพลิงดีเซลตามมา ในส่วนของบทนี้ ได้อธิบายถึงวิธีการที่ทำให้เกิดการฉีดของเหลวแบบ Supersonic ซึ่งได้อธิบายถึงการออกแบบของหัวฉีดที่ใช้ในการทดลองด้วย โดยรูปทรงของหัวฉีดที่หลากหลายแบบได้ถูกนำมาศึกษาค้นคว้าถึงความเกี่ยวข้องกับอัตราความเร็วของการฉีด ตลอดจนผลกระทบของความหนาแน่นของผิวหัวฉีดที่มีผลต่ออัตราความเร็วของการฉีด ในตอนท้ายมีการอธิบายถึงผลลัพธ์จากการทำการทดลอง เช่น ผลของเส้นผ่านศูนย์กลางของปากหัวฉีด, L/d , แผนผังรูปของมุมทรงกรวยในอัตราความเร็วของการฉีดของเหลว ซึ่งของเหลวที่นำมาใช้ในการทดลองคือน้ำและเชื้อเพลิงดีเซล

(2) วิธีการทำให้เกิดการฉีดของเหลวแบบ Supersonic วิธีการขับเคลื่อนแบบการปะทะโดยพุ่งไปด้านหน้า จากรูปที่ 2.25 เป็นภาพการติดตั้งการทดลอง ซึ่งคล้ายกับวิธีการของ Bowden-Brunto แต่ต่างกันตรงที่มีการอธิบายถึงส่วนที่มีการผ่อนความดันที่ใช้แทนการปล่อยกระสุนอย่างอิสระก่อนที่จะมีการปะทะ โดยการกระทบอย่างแรงนั้นอาศัยการใช้ชุดปล่อยลูกกระสุนปืน (ปืนที่ขับเคลื่อนด้วยดินปืน) ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางของกระสุนที่ 8.025 mm การยิงกระสุนสามารถทำได้โดยใช้เครื่องมือที่หลากหลายและมีรูปร่างเป็นทรงกระบอก มีความยาว 10 mm โดยใช้โพลีคาร์บอเนตและโพลีทีลีนที่มีความหนาแน่นสูงเป็นวัสดุหลักๆ หัวฉีดที่นำมาศึกษาทำมาจากเหล็กอ่อน การยิงนั้นมีการเผาไหม้ในลักษณะแนวตั้งลงโดยผ่านท่อระบายความดัน ที่ได้มีการออกแบบให้มีคลื่นที่ลดลงซึ่งตรงข้ามของการยิงกระสุน หัวฉีดมีการเชื่อมต่อกับทางออกของท่อระบายความดันโดยตรง ซึ่งอยู่ที่ผนังด้านบนของห้องทดสอบ การกระทบอย่างแม่นยำนั้นจัดว่าเป็นสิ่งที่จำเป็น การยิงผิดพลาดเล็กน้อยๆ (การยิงกระสุนในบางครั้งลูกกระสุนจะเคลื่อนที่ไปชนที่ขอบทางเข้าของหัวฉีด) จะมีน้อยลงในการเคลื่อนไหวกว้างในช่วงแรกของการยิง ดังนั้นการเชื่อมต่อระหว่างช่องระบายความดันกับทางเข้าของหัวฉีดนั้นจะเป็นสิ่งที่ต้องใช้ความระมัดระวังอย่างยิ่งในการออกแบบเพื่อลดปัญหาอื่นๆ ตามมา ของเหลวที่เก็บไว้ภายในหัวฉีดนั้นทำได้จากการใช้กระบังลมพลาสติก (เทปกาวบางๆ) ที่ได้ปิดผนึกไว้ตรงด้านบนสุดและด้านท้ายสุดของหัวฉีด กระบังลมพลาสติกนี้บางมากและมีความทนทานต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับกระบอกเคลื่อนไหวกว้างแบบกระแทกจากการยิง ด้วยเหตุนี้ จึงเป็นเหตุผลที่ได้มองข้ามความสูญเสียของการเคลื่อนไหวกว้างจากการยิง เนื่องจากความทนทานของกระบังลมพลาสติก การเคลื่อนไหวกว้างอย่างรวดเร็วสูงในช่วงเวลาสั้นๆ ทำให้ลูกกระสุนเคลื่อนที่ไปชนของเหลวที่อยู่ภายในหัวฉีดอย่างแรง ทำให้ลูกกระสุนเกิดการถ่ายเทโมเมนตัมให้กับของเหลว ทำให้เกิดความดันสูงขึ้นจากนั้นความดันสูง (ระดับ GPa) ทำให้เกิดการขับเคลื่อนของเหลวให้ทะลุผ่านรูของหัวฉีดในการฉีดด้วยความเร็วสูง ในระหว่างกระบวนการทำให้เกิดการฉีดนั้นอาจจะทำให้เกิดคลื่นสะท้อนย้อนกลับภายในช่องของหัวฉีด อย่างไรก็ตามเป็นที่สังเกตได้ว่าเหตุการณ์ดังกล่าวนั้นเกิดขึ้นได้ขึ้นอยู่กับอัตราความเร็วของการกระแทกจากการยิงและความยาวของของเหลว ในตอนท้ายสุดการยิงก็จะหยุดพักตรงช่องของหัวฉีด

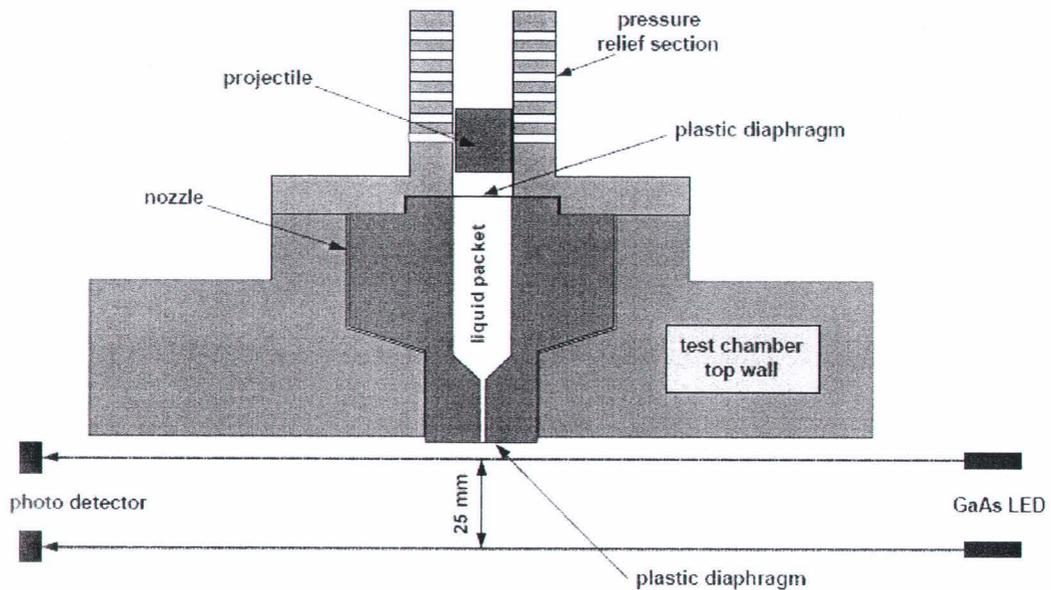


รูปที่ 2.25 projectile impacts driven method

โดยการวินิจฉัยในทางทฤษฎีของอัตราความเร็วของการฉีดของเหลวนั้นได้ถูกทำให้สมบูรณ์แล้ว ทำให้ได้รู้ถึงแนวคิดที่ว่าอัตราความเร็วในการฉีดของเหลวนั้นควรบรรจุจากอะไรในการติดตั้งทดสอบ

2.7 การวัดความเร็วของการลำพุ่ง

จากการอธิบายเกี่ยวกับการฉีดของเหลวระดับ Supersonic นั้นสามารถทำให้สำเร็จได้โดยวิธีการขับเคลื่อนแบบกระสุนยิง ซึ่งการติดตั้งในการทดลองดังกล่าวได้แสดงให้เห็นในรูปที่ 2.26 อีกครั้งหนึ่ง โดยหัวฉีดรูปทรงกรวยทางด้านหน้านั้นเชื่อมต่อกับช่องระบายความดันโดยตรงของเหลวได้ถูกเก็บไว้ในหัวฉีดโดยการใช้กระบังลมพลาสติกที่ปิดตรงหัวและท้ายของหัวฉีด ซึ่งกระบังลมนี้นิ่งมากและมีความทนทานต่ำหากเทียบกับการเคลื่อนไหวของการกระแทกด้วยการยิง ดังนั้นจึงไม่มีผลต่อความสูญเสียการเคลื่อนไหวของการยิง การทดลองนี้ได้ใช้ช่องระบายความดันซึ่งมีความยาว 15 cm จาก 40% ของช่องระบาย

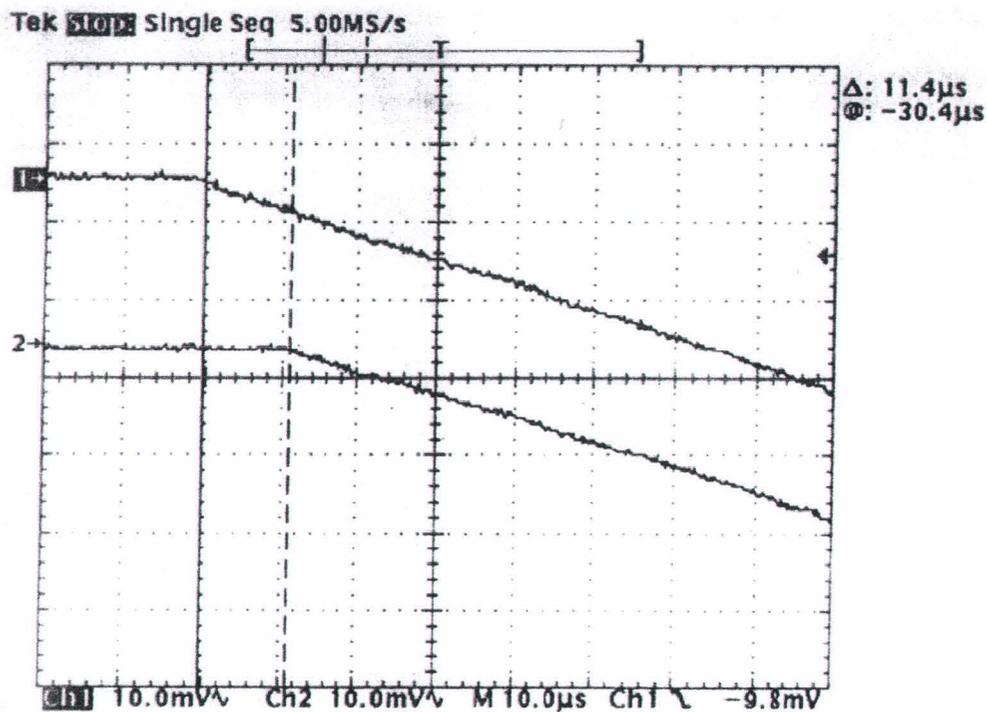


รูปที่ 2.26 การติดตั้งชุดทดลองสำหรับการวัดความเร็วของลำพุ่ง

อัตราความเร็วของการฉีดของเหลววัดได้โดยวิธีการตัดลำแสงเลเซอร์ของวัตถุ ซึ่งการทดลองนี้ได้ใช้ระยะการติดตั้งระหว่างลำแสงเลเซอร์แรกและลำแสงเลเซอร์ที่สองที่ได้มีการลดลงถึง 25 mm ซึ่งระยะทางที่แยกออกไปจากลำแสงแรกถึงช่องของหัวฉีดเป็น 3 mm ดังนั้นอัตราความเร็วของการฉีดของเหลว (V_j) สามารถวัดได้ดังนี้

$$V_j = \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{0.025}{\Delta t} \quad (2.40)$$

กำหนดให้ ΔS คือระยะการติดตั้งของลำแสงเลเซอร์ทั้งสอง 25 mm หรือ 0.025 m และ Δt คือเวลาของการยิงของเหลวในระยะ ΔS ตัวอย่างเช่น ผลลัพธ์ของตัวอย่างจากภาพแสดงคลื่นกระแสไฟฟ้า สำหรับการวัดอัตราความเร็วของการฉีดเชื้อเพลิงดีเซลได้แสดงดังรูปที่ 2.27 โดยที่ $\Delta t = 11.4 \mu s$ ดังนั้นอัตราความเร็วของการฉีดของเหลวเป็น 2,193 m/s



รูปที่ 2.27 แสดงสัญญาณของ Oscilloscope จากการวัดความเร็วของการฉีดเชื้อเพลิงดีเซล

2.8 ผลกระทบของรูปทรงของหัวฉีดที่มีต่อความเร็วของการฉีด

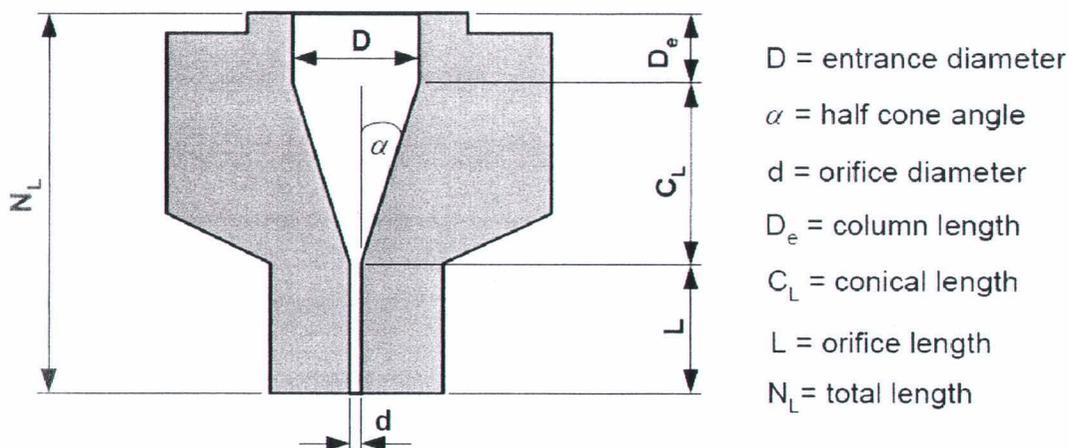
ในส่วนนี้ได้มีการอธิบายถึงความพยายามในการที่ทำให้เกิดอัตราความเร็วของการฉีดของเหลวสูงสุดในการจัดเตรียมการทดสอบ ของเหลวที่ใช้ในการทดสอบเป็นน้ำและเชื้อเพลิงดีเซล รูปทรงของหัวฉีดเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอัตราความเร็วในการฉีด ในสภาพที่มีความดันเฉพาะ ดังนั้น ผลกระทบจากรูปทรงของหัวฉีดที่มีผลต่ออัตราความเร็วในการฉีดของเหลวได้ถูกนำมาทดสอบขึ้น นอกจากนั้นอิทธิพลของการเคลื่อนไหวแรงปะทะในตอนต้นคือ ปริมาณของการยิงและอัตราความเร็ว ได้มีการทดสอบขึ้นในการวัดอัตราความเร็วของการฉีดของเหลว

2.8.1 การออกแบบหัวฉีด

ในการศึกษาถึงผลกระทบของรูปทรงหัวฉีดที่มีต่ออัตราความเร็วของการฉีด ของเหลว นั้นมีการออกแบบ 2 ลักษณะด้วยกันคือ แบบแรกเป็นหัวฉีดทรงกรวยตรง และแบบที่สองเป็นหัวฉีดที่มีรูปร่างเป็นสามเหลี่ยม หัวฉีดทั้งสองแบบนี้ทำมาจากเหล็กอ่อน โดยแบบจำลองที่เสริมมาซึ่งเป็นหัวฉีดทรงกรวยตรงที่มีความแข็งแรง ได้ผลิตขึ้นเพื่อทดสอบว่าลักษณะเฉพาะของวัสดุพื้นผิวหัวฉีด (หรือผนังช่อง) ส่งผลกระทบต่ออัตราความเร็วของการฉีดของเหลวหรือไม่

2.8.2 หัวฉีดเหล็กอ่อนทรงกรวยตรง

รูปที่ 2.28 ได้แสดงถึงรูปที่ของหัวฉีดทรงกรวยตรง โดยมีการบอกองค์ ประกอบที่สำคัญที่ส่งผลต่ออัตราการความเร็วในการฉีดของเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง หัวฉีดที่ทำมาจากเหล็กอ่อนนั้น ซึ่งทางเทคนิคทางกลที่มีการปล่อยอิเล็กตรอน (EDM) ได้เคยถูกเจาะในการเกิดเป็นทรงกรวย



รูปที่ 2.28 โครงสร้างและการวัดขนาดของหัวฉีดเหล็กอ่อนทรงกรวยตรง

เส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้าของหัวฉีด (D) ในการศึกษานี้ เส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้าของหัวฉีดได้ถูกปรับให้เป็น 8.1 mm เนื่องจากต้องทำให้เข้ากับขนาดของกระสุนยิงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.03 mm เส้นผ่านศูนย์กลางได้ถูกออกแบบอย่างชำนาญ ที่เชื่อว่าขนาดนั้นเป็นสิ่งที่ต้องประณีตมากที่สุด ถ้า D มีขนาดใหญ่กว่านี้ หลังจากการกระแทกของการยิงอาจทำให้ของเหลวกระเด็นขึ้นได้ ความดันของของเหลวในหัวฉีดจะลดลงและอัตราการความเร็วในการฉีดก็จะลดน้อยลงไปด้วย อย่างไรก็ตามถ้ามีขนาดเล็กเกินไป (ประมาณ 8.03 mm) ทำให้ขนาดทางเข้าของหัวฉีดนั้นมีขนาดเล็กกว่าขนาดของลูกกระสุน ซึ่งส่งผลให้กระสุนยิงอาจติดกับขอบทางเข้าของหัวฉีดและทำให้สูญเสียการเคลื่อนที่ได้ อีกทั้งยังทำให้เกิดอัตราการความเร็วของการฉีดที่ไม่แน่นอนได้

มุมทรงกรวยครึ่งหนึ่งของหัวฉีด (α) จัดว่าเป็นองค์ประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งของการส่งผลต่อการเกิดอัตราการความเร็วของการฉีดของเหลว ผนังที่มีการเรียวลงหรือเป็นลักษณะบรรจบกันนั้นมีลักษณะเหมือนหลอดทดลองและการเร่งความเร็วของของเหลวนั้นมีลักษณะเหมือนการดันของเหลวให้ออกทางออกของรูหัวฉีด โดยการศึกษาี้ มุมทรงกรวยครึ่งหนึ่งได้เปลี่ยนแปลงลงจาก 7° ถึง 30° อีกทั้งส่วนที่เบนเข้าหากันนั้นทำงานในลักษณะที่เป็นเครื่องกันชนเพื่อชะงักการยิงหลังการปล่อยของเหลวออกมาทั้งหมด

เส้นผ่านศูนย์กลางของปากหัวฉีด (d) จัดว่าเป็นปัจจัยที่ไม่แน่นอนมากที่สุดของการฉีดของเหลวด้วยความเร็วสูง สำหรับการไหลของการฉีดที่ไม่คงที่นั้น ดังสมการความต่อเนื่อง อัตราความเร็วของการฉีดของเหลวจะสูงขึ้นเมื่อปากของหัวฉีดเล็กลง ในการศึกษาครั้งนี้ เส้นผ่านศูนย์กลางของปากหัวฉีดสามขนาดได้ถูกนำมาทดลองขึ้น คือ ขนาด 0.5 mm, 0.7 mm และ 1.0 mm

ความยาวของปากหัวฉีด (L) ในด้านนี้เป็นความยาวตรงของส่วนของปากหัวฉีดหลังส่วนที่มีการเรียวเล็กลง องค์ประกอบของมันคือ การเร่งให้ของเหลวกลายเป็นไอด้วยความเร็วที่เสมอกันมากขึ้น ดังนั้นการฉีดของเหลวที่ออกจากปากของหัวฉีดนั้นมีลักษณะเป็นแนวยาวคงที่และเสมอกันมากขึ้น ความยาวของปากหัวฉีดนั้นได้มีการอธิบายในบทสรุปของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดคือ L/d ซึ่ง L/d นั้นส่งผลกระทบต่อมุมของการฉีดเมื่อของเหลวนั้นออกจากหัวฉีด ดังนั้นจึงส่งผลต่ออัตราความเร็วของการฉีดของเหลว จากการทดลองดังกล่าว ค่า L/d นั้นแปรเป็น 2 ถึง 6 ค่าเปลี่ยนแปลงอื่นๆ เช่น N_L , C_L , D_c นั้นไม่ได้ถูกนำมากล่าวถึง ค่าเหล่านี้อาจจะแปรเปลี่ยนไปในแต่ละการทดลอง (α , d , L/d) แต่ต้องรักษาให้คงที่เพื่อแสดงว่าแนวของของเหลวนั้นจะเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อย จากการทดลองนั้นพบว่า D_c ต้องไม่เท่ากับศูนย์ มิฉะนั้นการฉีดแบบวิถีกระสุนจะไม่สามารถขับเคลื่อนไปได้อย่างต่อเนื่องหลังจากการปะทะ ในการทดลองนี้แนวของของเหลวจะมีค่าราวๆ $0.85 - 0.90 \text{ cm}^3$

2.8.3 หัวฉีดที่มีลักษณะโค้ง

หัวฉีดที่มีรูปร่างโค้งนั้นได้เป็นสิ่งที่ถูกคิดถึงมากที่สุดในการศึกษาเกี่ยวกับเทคโนโลยีการตัดของการฉีด ซึ่งจัดว่าเป็นการฉีดของเหลวในอัตราความเร็วสูงและยังทำให้เกิดความดันที่คงที่สูงสุดภายในหัวฉีด หัวฉีดทั้งสองลักษณะได้มีการออกแบบขึ้น ลักษณะหนึ่งได้มีการอธิบายโดยวอยเซโซฟสกีและได้มีการพัฒนาขึ้นโดยคูเลย์ หัวฉีดอีกลักษณะหนึ่งเป็นหัวฉีดที่เป็นรูปทรงกรวยที่มีส่วนตัด ซึ่งประดิษฐ์โดยเกล็นน์และทีมงาน โดยมีการอธิบายสมการของโครงสร้างภายในของหัวฉีดทั้งสองแบบดังนี้

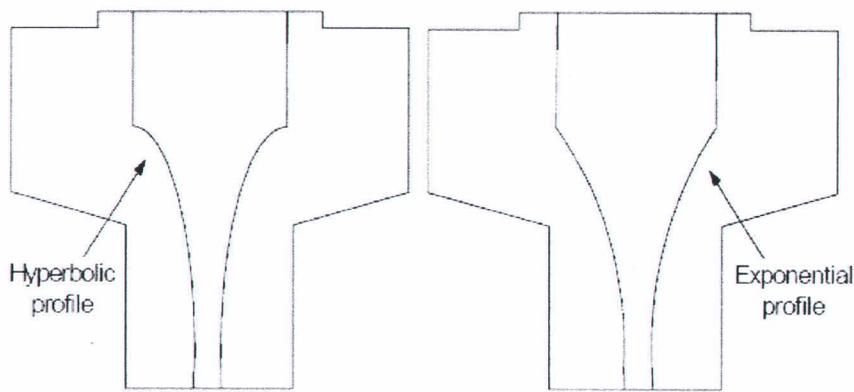
หัวฉีดแบบ Exponential

$$A(x) = A(o) \exp \left| -\frac{x}{L} \ln R \right| \quad (2.41)$$

หัวฉีดแบบ Hyperbolic

$$A(x) = A(o) \left| \frac{x}{L} (\sqrt{R} - 1) + 1 \right|^{-2} \quad (2.42)$$

กำหนดให้ x คือระยะความยาวของหัวฉีด, L คือความยาวทั้งหมดของหัวฉีด $A(x)$ คือพื้นที่ของส่วนที่แบ่งตามเส้นทแยงมุมในส่วนของ x , $A(o)$ คือพื้นที่ของส่วนที่แบ่งตามเส้นทแยงมุมของทางเข้า ($x=0$) และ R คืออัตราส่วนของพื้นที่ของหัวฉีดที่เท่ากับ $(A(0)/A(L))$



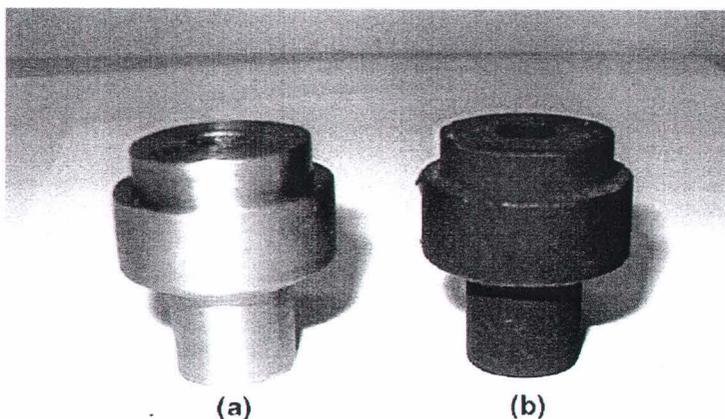
รูปที่ 2.29 หัวฉีดแบบ exponential และ hyperbolic

จากสมการทั้งสองแบบ ได้มีการผลิตขึ้นของหัวฉีดทั้งสองแบบ โดยวิธี EDM ที่เคยถูกใช้แล้ว ในการกัดเซาะด้านในของหัวฉีด หัวฉีดที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางของปากเท่ากับ 1.0 mm เท่านั้นที่สามารถทำได้ เนื่องจากความยากในการจัดเตรียมของท่อนทองแดง (สำหรับ EDM) เพื่อให้หัวฉีดมีเส้นผ่าศูนย์กลางที่เล็กลง รูปที่ 2.29 แสดงให้เห็นถึงรูปร่างของหัวฉีด หัวฉีดทั้งสองอย่างนี้ยังมีความยาว D_c ที่ทางเข้าของหัวฉีดก่อนที่จะเริ่มมีลักษณะโค้ง หัวฉีดแบบ hyperbolic มีเส้นเนินลาดที่สูงกว่าจากตอนต้นของส่วนที่แคบและยาวตลอดทางออกของหัวฉีด ในขณะที่หัวฉีดแบบ exponential นั้นมีเส้นที่เรียบเล็กลง

2.8.4 หัวฉีดแข็งทรงกรวย

หัวฉีดที่แข็งทรงกรวยถูกผลิตขึ้นเพื่อทดสอบว่าความทนทานของพื้นผิวหัวฉีดนั้นส่งผลต่ออัตราความเร็วของการฉีดของเหลว รูปทรงภายในของหัวฉีดนั้นคล้ายกับการออกแบบของหัวฉีดทรงกรวยเหล็กอ่อน (ในส่วนของ 2.9.3.1.1) หัวฉีดที่แข็งนั้นทำมาจากเหล็ก Bohler K110 (เหมือนกับ วัสดุ AISI D2) Bohler K110 คือเหล็กคาร์บอนสูง (มีคาร์บอนอยู่ 55%) กับโครเมียม

12% และแวนาเดียม 1% หัวฉีดถูกทำให้แข็งแรงโดยน้ำมันหลังที่ได้มีความร้อนที่อุณหภูมิถึง 1,000 °C ในเวลา 40 นาที ซึ่งกระบวนการทำให้แข็งนั้นไม่ได้ดำเนินขึ้นเนื่องจากกระบวนการนี้ลดความแข็งแรงของพื้นผิวของหัวฉีด ความแข็งแรงของพื้นผิวนั้นลดลงจาก 25 HRC ถึง 50 HRC หลังจากกระบวนการทำให้แข็ง ที่ได้เปรียบเทียบกับ 15-20 HRC ของหัวฉีดเหล็กอ่อน รูปที่ 2.30 แสดงให้เห็นถึงรูปร่างภายนอกของหัวฉีดทรงกรวยทั้งเหล็กอ่อนและเหล็กแข็งที่มีคาร์บอนสูง



รูปที่ 2.30 หัวฉีดทรงกรวยตรง (a) คือเหล็กอ่อน (b) คือ เหล็กแข็งคาร์บอนสูง

2.8.5 ผลลัพธ์ของอัตราความเร็วของการฉีด

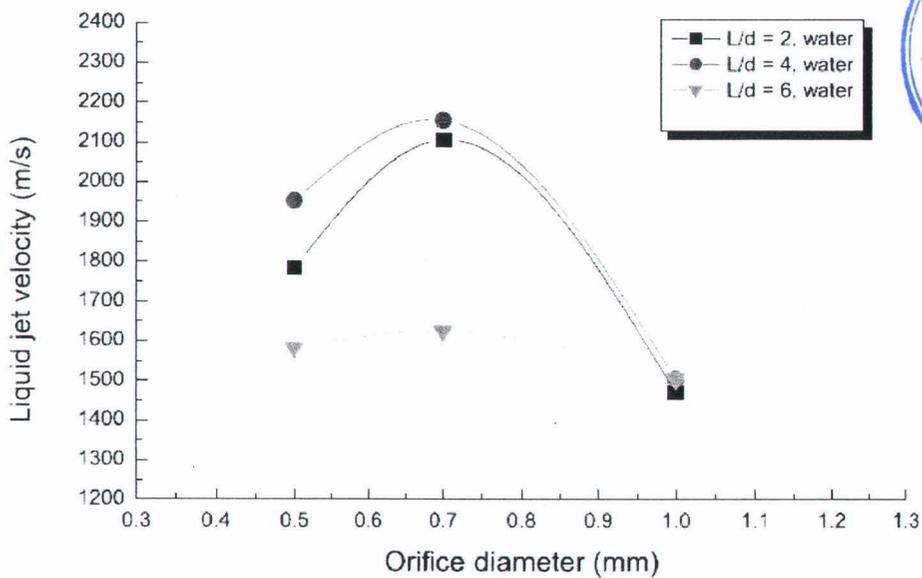
ผลลัพธ์จากการทดลองสิ่งที่ส่งผลกระทบต่อของรูปทรงหัวฉีดที่มีต่ออัตราความเร็วในการฉีดของเหลว ซึ่งได้รวมถึงอัตราความเร็วในการฉีดจากหัวฉีดเหล็กอ่อนทรงกรวย หัวฉีดรูปทรงโค้ง และหัวฉีดแข็งทรงกรวยตรง ในการทดลองทั้งหมดนี้ มีการสันนิษฐานว่ารูปแบบการกระแทกนั้นเหมือนกัน นั่นคืออัตราความเร็วของการกระแทก 1,100 m/s ของกระสุนโพลีคาร์บอเนต (PC) โดยมีพลังขับเคลื่อนถึง 0.83 g

2.8.6 หัวฉีดเหล็กอ่อนทรงกรวยตรง

สำหรับหัวฉีดทรงกรวยตรงนั้น ขอบเขตในการกำหนดที่จะศึกษาได้ถูกพิจารณาในการทดลองคือเส้นผ่านศูนย์กลางปากหัวฉีด (d), มุมทำรูปทรงกรวย (α) และอัตราส่วนของความยาวตรงของปากกับเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/d) โดยใช้ทั้งน้ำและเชื้อเพลิงดีเซลในการทดลองดังกล่าว

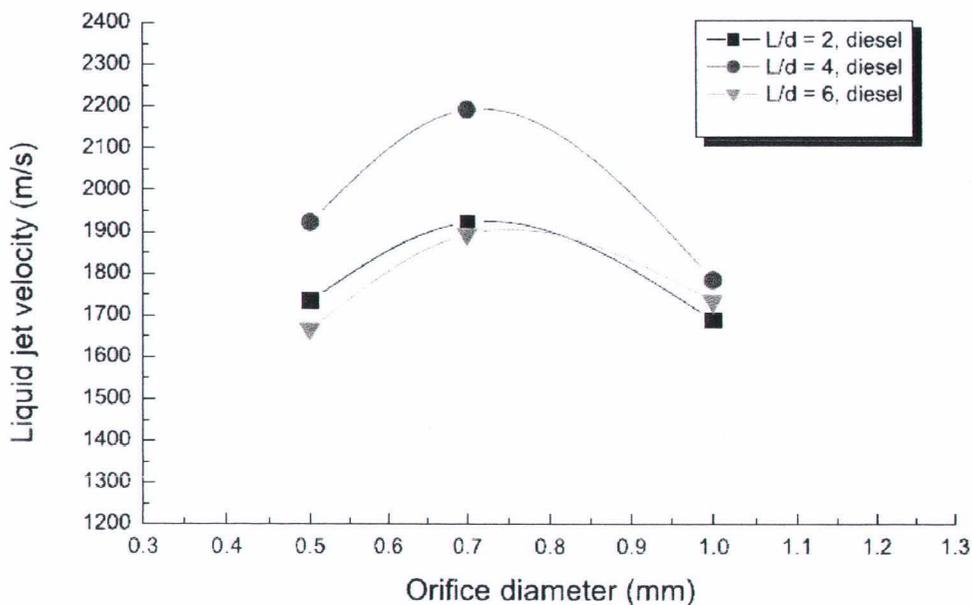
รูปที่ 2.31 เป็นการแสดงถึงอัตราความเร็วของการฉีดน้ำจากเส้นผ่านศูนย์กลางทั้งสามแบบคือ 0.5, 0.7 และ 1.0 mm ในขณะที่รูปที่ 2.32 แสดงถึงการเปรียบเทียบของการฉีดด้วยเชื้อเพลิง

ดิเซล เส้นผ่านศูนย์กลางแต่ละปากของหัวฉีดนั้นมีค่าอัตราส่วน L/d ที่ได้กำหนดไว้ จุดที่น่าสนใจจุดหนึ่งคือปากหัวฉีดที่มีขนาด 0.7 mm ที่ทำให้เกิดการฉีดที่มีความเร็วมากกว่าหัวฉีดที่มีขนาด 0.5 mm ในอัตราส่วน L/d ของของเหลวทั้งสองอย่าง อย่างไรก็ตามหัวฉีดที่มีช่องขนาด 0.5 mm นั้นยังทำให้การฉีดนั้นเร็วกว่าหากเทียบกับหัวฉีดที่มีขนาด 1.0 mm สังเกตได้ว่าอัตราความเร็วของการฉีดของของเหลวแต่ละอย่างนั้นได้กำหนดค่าโดยเฉลี่ยจากการทดลองทั้งสามครั้ง



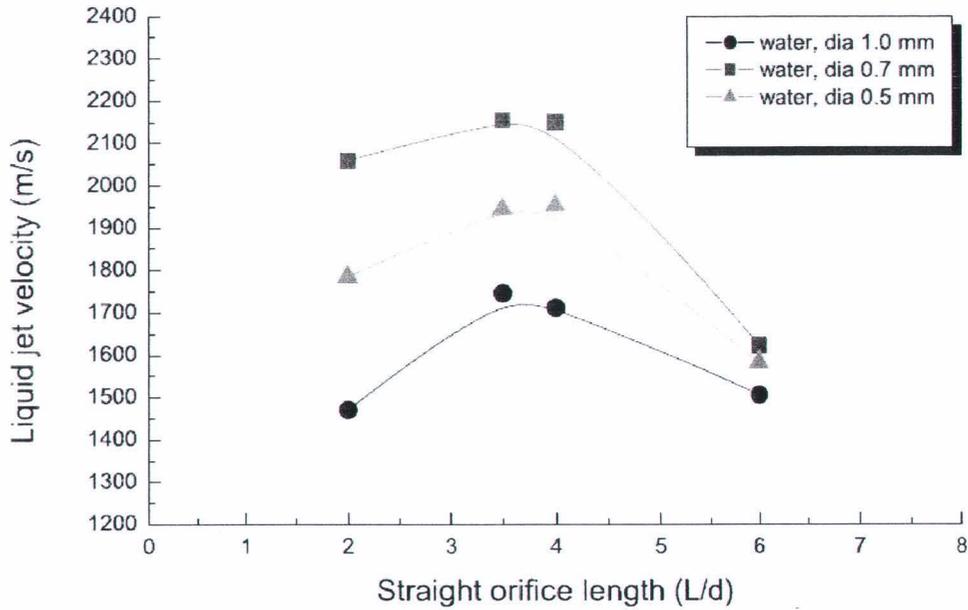
รูปที่ 2.31 ผลของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดที่มีต่อความเร็วของการฉีดลำพ่นน้ำจากหัวฉีดเหล็กอ่อน

ทรงกรวยตรง

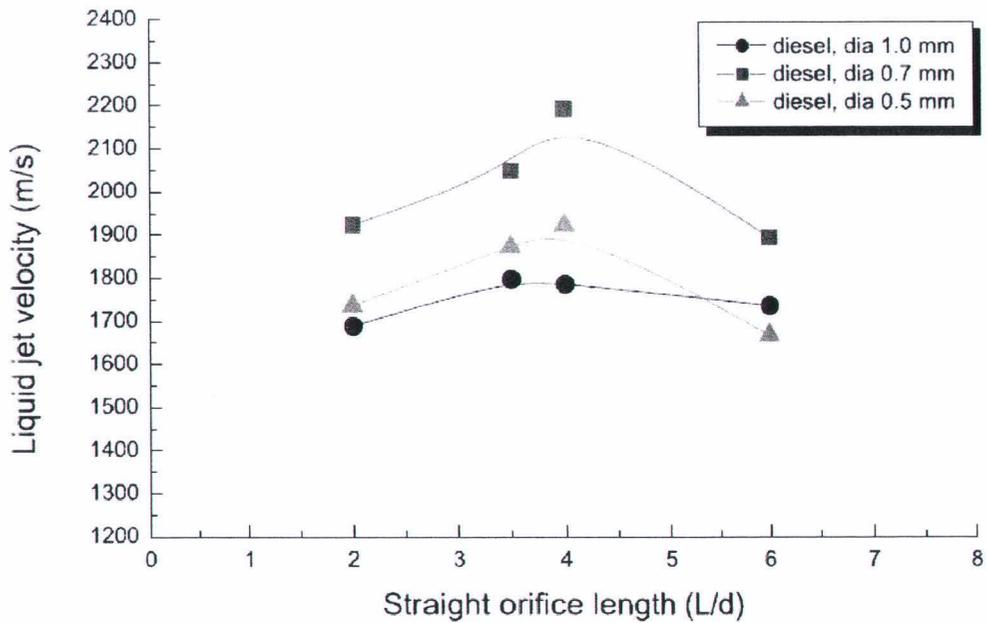


รูปที่ 2.32 ผลของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดที่มีต่อความเร็วการฉีดลำพุงดีเซลจากหัวฉีดเหล็กอ่อน

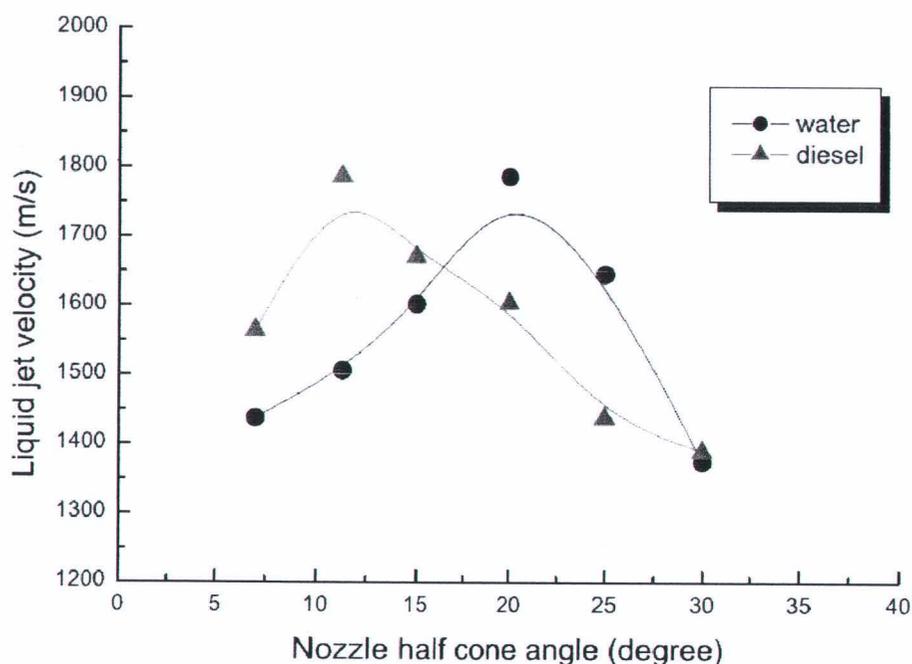
ทรงกรวยตรง



รูปที่ 2.33 ผลของอัตราส่วน L/d ที่มีต่อความเร็วในการฉีดน้ำจากหัวฉีดเหล็กอ่อนทรงกรวยตรง



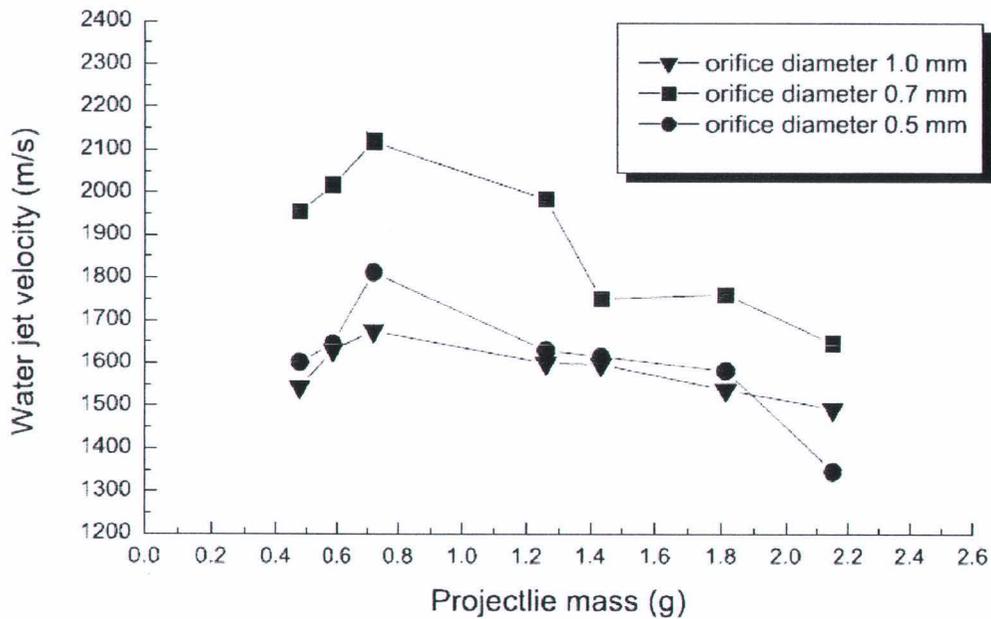
รูปที่ 2.34 ผลกระทบของอัตราส่วน L/d ที่มีต่ออัตราความเร็วในการฉีดด้วยเชื้อเพลิงดีเซลจากหัวฉีดเหล็กอ่อนทรงกรวยตรง



รูปที่ 2.35 ผลกระทบของมุมทรงกรวยของหัวฉีดที่มีต่ออัตราการความเร็วในการฉีดน้ำและเชื้อเพลิงดีเซลด้วยหัวฉีดเหล็กอ่อนทรงกรวย

ผลกระทบของอัตราส่วน L/d ที่มีต่ออัตราการความเร็วในการฉีดน้ำและเชื้อเพลิงดีเซลนั้นได้แสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.33 และ 2.34 ตามลำดับ รูปทั้งสองได้แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วน L/d ที่ดีที่สุดเป็น 3.5 ในการฉีดน้ำที่เร็วที่สุดจากเส้นผ่านศูนย์กลางแต่ละหัวฉีด ในขณะที่ผลที่ดีที่สุดในการฉีดเชื้อเพลิงดีเซลอัตราส่วน L/d อยู่ที่ 4 ซึ่งสิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วน L/d ส่งผลกระทบต่ออัตราการความเร็วในการฉีดด้วยเชื้อเพลิงดีเซลน้อยกว่าอัตราการความเร็วในการฉีดด้วยน้ำ จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราการเร็ว นั้นจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วน L/d แต่ละอัน

รูปที่ 2.35 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการความเร็วในการฉีดของเหลวและมุมทรงกรวยครึ่งหนึ่งของหัวฉีดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของปากหัวฉีดที่ 1.0 mm และมีอัตราส่วน L/d ที่แน่นอนอยู่ที่ 3.5 ผลปรากฏว่าอัตราการความเร็วสูงสุดของของเหลวแต่ละชนิดนั้นมีมุมทรงกรวยที่แตกต่างกันไป ซึ่งหัวฉีดที่ทำมุม 12° ทำให้การฉีดเชื้อเพลิงดีเซลมีอัตราการความเร็วสูงสุด โดยที่การฉีดน้ำที่มีอัตราการเร็วสูงสุดนั้นมีหัวฉีดทำมุมที่ 20°



รูปที่ 2.36 ผลกระทบของมวลกระสุนที่มีต่ออัตราความเร็วในการฉีดน้ำจากหัวฉีดเหล็กอ่อนทรงกรวยตรง

ผลกระทบของมวลกระสุน (เช่น วัสดุที่ใช้ทำกระสุน) ที่มีต่ออัตราความเร็วในการฉีดของเหลว ซึ่งมีมวล 0.83 g ที่ได้แสดงในรูปที่ 2.36 โดยได้มีการเปรียบเทียบของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดที่แตกต่างกันทั้งสามแบบ มวลของกระสุนแต่ละแบบนั้น การฉีดที่เร็วที่สุดเกิดจากแบบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของปากหัวฉีดอยู่ที่ 0.7 mm จากการทดลองพบว่ากระสุนที่น้ำหนักมากที่สุดไม่จำเป็นที่จะมีการฉีดที่เร็วที่สุด แม้ว่าจะมีโมเมนตัมที่สูงที่สุด อัตราความเร็วในการยิงนั้นจัดว่าเป็นองค์ประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งในการศึกษาครั้งนี้ น้ำหนักของกระสุนที่เหมาะสมที่สุดคือ 0.6-0.7 g ในทุกๆเส้นผ่านศูนย์กลางของปากหัวฉีด

ตารางที่ 2.3 ค่าผันแปรและอัตราความเร็วสูงสุดในการฉีดของเหลว

Liquid	Nozzle Configuration				Jet velocity(m/s)
	d(mm)	Cone angle(°)	L/d	Volume(cm ³)	
water	0.7	35-40	3.0-3.5	0.90	2155
diesel	0.7	20-25	3.5-4.0	0.90	2193

กล่าวโดยสรุปคือ อัตราความเร็วและค่าตัวแปร โดยหัวฉีดเหล็กอ่อนทรงกรวยตรงได้สรุปไว้ดังตารางที่ 2.3 อัตราความเร็วของของเหลวทั้งสองชนิดมีอัตราความเร็วของการยิงที่ 1,100 m/s โดยกระสุนเป็นโพลีคาร์บอเนตน้ำหนัก 0.60 g

2.8.7 หัวฉีดที่มีรูปร่างโค้งและหัวฉีดแข็งทรงกรวยตรง

ตารางที่ 2.4 เป็นการวัดอัตราความเร็วของหัวฉีดที่มีรูปร่างโค้งและหัวฉีดแข็งทรงกรวยตรง ผลปรากฏว่าหัวฉีดรูปโค้งนั้นสามารถเพิ่มอัตราความเร็วในการฉีดของเหลวทั้งสองได้เล็กน้อย เมื่อเทียบกับหัวฉีดทรงกรวยเมื่อมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน เช่นเดียวกับหัวฉีดทรงกรวยในทุกการศึกษาที่อัตราความเร็วในการฉีดเชื้อเพลิงดีเซลสูงกว่า (50 m/s) อัตราความเร็วในการฉีดน้ำ

ตารางที่ 2.4 อัตราความเร็วในการฉีดของเหลวโดยหัวฉีดรูปโค้งและหัวฉีดแข็ง

Nozzle	Water Jet Velocity (m/s)	Diesel fuel jet velocity (m/s)
Exponential (d=1.0 mm)	1820	1850
Hyperbolic (d=1.0 mm)	1800	1850
Hardened (d=1.0 mm)	2315	2350
Hardened (d=0.7 mm)	2430	2500



รูปที่ 2.37 ความเสียหายของหัวฉีดแข็งที่ยิงเพียงครั้งเดียว

อัตราความเร็วในการฉีดได้มีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากหัวฉีดแข็ง โดยที่มีอัตราความเร็วสูงกว่าการฉีดของเหลวจากการใช้หัวฉีดเหล็กอ่อนทรงกรวยที่ 350-450 m/s อัตราความเร็วสูงสุดอยู่ที่ 2,500 m/s จากเส้นผ่านศูนย์กลางปากหัวฉีดที่ 0.7 mm ผลดังกล่าวสามารถบอกได้ว่าความแข็งแรงของพื้นผิวของหัวฉีดนั้นสามารถส่งผลกระทบต่ออัตราความเร็วในการฉีดของเหลวได้ อย่างไรก็ตามหลังจากการยิงแต่ละนัดพบว่าหัวฉีดนั้นมีการแตก พื้นที่ระหว่างส่วนที่เป็นกรวยและปากของ

หัวฉีดนั้นมีการแยกและแตกเป็นชิ้นเล็กๆ ซึ่งเป็นการชี้ให้เห็นว่าการสะสมของความดันในช่องหัวฉีดนั้นต้องมีค่าสูง นอกจากนี้หัวฉีดแข็งยังทนทานและเปราะมาก ดังนั้นจึงแตกหลังจากที่มีความดันสูงมาก ดังเช่นที่มีการแสดงรูปที่ 2.37 ของหัวฉีดแข็งที่มีการแตก