



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การส่งถ่ายยาหรือวัคซีนผ่านผิวหนังโดยใช้
ลำพุงความเร็วสูง
(RMU5180020)

โดย รองศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง

พฤศจิกายน พ.ศ. 2554

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การส่งถ่ายยาหรือวัคซีนผ่านผิวหนังโดยใช้
ลำพุงความเร็วสูง

รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ คุ้มทอง
ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา
และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

ชื่อเรื่อง : การส่งถ่ายยาหรือวัคซีนผ่านผิวหนังโดยใช้ลำพุ่งความเร็วสูง

โดย : รศ.ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง

ศัพท์สำคัญ : ลำพุ่งความเร็วสูง การส่งถ่ายยา การฉีดด้วยลำพุ่งความเร็วสูง
วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงตัวเลข

ลำพุ่งความเร็วสูงสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานหลากหลายสาขา รวมทั้งงานวิศวกรรม และการแพทย์ งานวิจัยนี้ เน้นศึกษาคุณลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูง เพื่อประยุกต์ใช้กับการนำส่งยาผ่านผิวหนัง ซึ่งรู้จักกันโดยทั่วไปว่า Needle-free jet injection ในการสร้างแรงดันให้กับยา ใช้วิธีการขับยาด้วยการเคลื่อนที่ของวัตถุ ทั้งที่เป็นแบบกระแทก และ กดต่อเนื่อง โดยทำการศึกษาคุณลักษณะของลำพุ่งน้ำที่ฉีดในอากาศ และ ฉีดในเนื้อเยื่อจำลอง จากอุปกรณ์ฉีดสองประเภท คือ Cool.Click (ของ บริษัท Bioject2000) และ Med-jet NFIS (ชุดทดลองต้นแบบ) ซึ่งใช้แรงขับลำพุ่งจากด้วยการกดของสปริงและการกระแทกด้วยลูกปืนขับโดยก๊าซแรงดันสูงตามลำดับ นอกจากนี้ ยังได้นำวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงตัวเลข (CFD) ยืนยันผลการทดลองในอดีต และ นำมาช่วยอธิบายการกำเนิดลำพุ่งความเร็วสูง ทำนายผลและกำหนดค่าในการออกแบบชุดทดลองต้นแบบ ผลการศึกษา พบว่าลำพุ่งที่ฉีดจาก Cool. Click มีความเร็วและความดันกระแทกของลำพุ่งที่เหมาะสมสำหรับการนำส่งยาผ่านผิวหนัง อยู่ในช่วง 80 - 150 m/s และ 15 - 55 MPa ตามลำดับ และ พบว่ากระบวนการเจาะเนื้อเยื่อของลำพุ่งแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงเริ่มต้น ช่วงเจาะ และ ช่วงแพร่กระจาย ส่วนการศึกษาลำพุ่งจากชุด Med-jet NFIS พบว่า กรณีขับแบบไม่ใช้การกระแทก ความเร็วและความดันกระแทกของลำพุ่งเปลี่ยนแปลงตามปริมาณของเหลวที่บรรจุน้อย ส่วนกรณีขับแบบใช้การกระแทก พบว่าความเร็วและความดันกระแทกมีค่าสูงกว่า คือ 150 m/s และ 25 MPa แต่ความดันกระแทกเปลี่ยนแปลงขึ้นลงตลอดช่วงการฉีด ผลที่ได้จากการทดลองเหล่านี้มีความสอดคล้องกับผลที่จำลองได้จาก CFD ซึ่งทำให้สามารถนำผลจาก CFD ที่คำนวณได้มาช่วยอธิบายพฤติกรรมของไหลระหว่างการฉีดลำพุ่งได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้น ผลจากการศึกษานี้เป็นองค์ความรู้ใหม่ เกี่ยวกับพฤติกรรมและการออกแบบ อุปกรณ์ในการนำส่งยาผ่านผิวหนังด้วยลำพุ่งความเร็วสูง และ เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับพัฒนาอุปกรณ์สำหรับฉีดต่อไป

Abstract

TITLE : Drug delivery through skin using pulsed high-speed jets

BY : Assoc. Prof. Dr. Kulachate Pianthong

KEYWORDS : High speed liquid jet, Needle-free jet injection, Drug delivery, Computational Fluid Dynamics (CFD)

High speed liquid jets can be applied to many fields including engineering and biomedical applications. This research focus on investigating the characteristics of high speed liquid jets especially for the application called “Needle free jet injection”. To build the injection pressure, the driving object method is used by both impulse driving and continuous compression. Jet characteristics in air and in simulant tissue are investigated from Cool. Click (Bioject2000) and Med-jet NFIS (prototype test rig). The Cool. Click uses the spring compression to drive the drug through the nozzle orifice while the Med-jet NFIS uses the impact from the projectile driven by high pressure gas. In addition, the Computational Fluid Dynamics (CFD) technique is employed to calculate and validate the previous studies. CFD results are useful to elucidate the behavior and data on the generation of the jets and helpful to design the test rig. From the study, the appropriate exit velocity and injection pressure from Cool. Click are 80-150 m/s and 15-55 MPa respectively. The drug delivery into tissue can be separated into 3 phases; initial stage (pressure build up), penetration, and dispersion. For the Med-jet NFIS, case of non-impact driving, the jet velocity and the driving pressure are slightly varied with the volume of the liquid. In the case of impact driving, the exit velocity and the injection pressure are 150 m/s and 25 MPa respectively, but always fluctuates during the injection process. These results agree well with the CFD predictions. These are new findings associated with needle free jet injection behaviors and can be applied to further development of the needle free jet injection equipments.

บทสรุปผู้บริหาร (Executive summary)

ชื่อเรื่อง : การส่งถ่ายยาหรือวัคซีนผ่านผิวหนังโดยใช้ลำพุ่งความเร็วสูง
โดย : รศ.ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง

สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.) สนับสนุนทุนวิจัยร่วมกับสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) และมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ให้กับโครงการวิจัย เรื่อง การส่งถ่ายยาหรือวัคซีนผ่านผิวหนังโดยใช้ลำพุ่งความเร็วสูง โดยมี รศ.ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง เป็นผู้ดำเนินโครงการใช้ระยะเวลา 3 ปี ซึ่งภาพรวมและผลจากโครงการวิจัย สามารถสรุปได้ดังรายละเอียดดังนี้

1. บทนำ

ลำพุ่งความเร็วสูง (High speed liquid jet) คือ ลำพุ่งของเหลวที่ถูกขับออกจากรูขนาดเล็กด้วยแรงดันสูง โดยทั่วไป การสร้างแรงดันเพื่อขับลำพุ่ง มี 2 วิธี คือ สร้างแรงดันด้วยเครื่องมือกล และสร้างแรงดันด้วยการเคลื่อนที่ของวัตถุ ซึ่งการขับด้วยวิธีเคลื่อนที่ของวัตถุ สามารถแบ่งออกเป็นแบบกดและแบบกระแทก ในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ลำพุ่งความเร็วสูงกับงานหลากหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมการขึ้นรูป ถ่านหิน ยานยนต์ หรือแม้แต่ในทางการแพทย์ เช่น การผ่าตัด ศัลยกรรมตกแต่งหลอดเลือด และการนำส่งยาผ่านผิวหนังแทนเข็ม (Needle free jet injection)

การนำส่งยาผ่านผิวหนังด้วยลำพุ่งความเร็วสูง อาศัยการเจาะทะลุผิวหนังและเนื้อเยื่อของลำพุ่งยาที่มีความเร็วไปยังตำแหน่งใต้ชั้นผิวหนังที่ต้องการให้ยาแพร่กระจาย จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า การฉีดด้วยหลักการนี้ มีข้อดี คือ ยาสามารถออกฤทธิ์ได้เร็ว รูเจามีขนาดเล็ก รู้สึกเจ็บปวดน้อยกว่าเข็ม ให้ยาได้เร็วและสามารถลดความเสี่ยงของการติดเชื้อ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณลักษณะการให้ยาที่มีความคล้ายกับการฉีดด้วยเข็ม ทั่วไปแล้วอุปกรณ์ฉีดที่มีจำหน่ายในท้องตลาด แรงดันขับของลำพุ่งจะถูกสร้างด้วยหลักการเคลื่อนที่ของวัตถุแบบกดและใช้แหล่งกำลังงานจากสปริงหรือก๊าซแรงดันสูงเป็นหลัก ถึงแม้จะมีการผลิตอุปกรณ์ฉีดเพื่อจำหน่ายในท้องตลาดแล้ว แต่นักวิจัยยังจำเป็นต้องมีการศึกษาและประเมินผลของการฉีด เพราะเป็นเทคโนโลยีใหม่และมีผู้ทำวิจัยเชิงลึกน้อยมาก

ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษา คุณลักษณะของลำพุ่งที่เกี่ยวข้องกับการนำส่งยา อันได้แก่ ความเร็ว รูปร่าง ความดันกระแทก กำลังงานและการแพร่กระจายในเนื้อเยื่อของลำพุ่งที่ออกจากหัวฉีด จากอุปกรณ์ฉีดยาเร่งการเจริญเติบโตในเด็ก ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด รุ่น Cool Click ของบริษัท Bioject2000 ที่ใช้แหล่งกำลังจากสปริง และจากอุปกรณ์ฉีด Med-jet NFIS ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำหรับทดลองที่ใช้แรงขับจากก๊าซแรงดันสูง พร้อมด้วยทำการศึกษาเปรียบเทียบกับอิทธิพล

ของวิธีขั้บลำพุงแบบกระแทกและอัด ที่มีต่อคุณลักษณะของลำพุง นอกจากนี้แล้ว โครงการวิจัยนี้ยังได้นำวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงตัวเลข (Computational Fluid Dynamics, CFD) โปรแกรม Fluent มาช่วยศึกษาปรากฏการณ์การไหลระหว่างการกำเนิดลำพุง

2. ขอบเขตของงานวิจัย

- 2.1 ค้นคว้าศึกษาถึงงานวิจัยต่างๆ เกี่ยวกับการนำส่งยาด้วยลำพุงความเร็วสูง ที่เป็นการฉีดยาหรือวัคซีนเจาะทะลุด้านผิวหนังด้วยลำพุงความเร็วสูง
- 2.2 จำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ CFD code ที่เหมาะสม เทียบเคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมา เพื่อใช้เป็นเครื่องมือสำหรับการออกแบบอุปกรณ์การทดลอง และ อธิบายปรากฏการณ์การกำเนิดลำพุง
- 2.3 นำความรู้จากงานวิจัยและประสบการณ์ที่มีจากงานที่ผ่านมา ทำการออกแบบและจัดสร้างชุดอุปกรณ์ต้นแบบ ของการนำส่งยาผ่านผิวหนังด้วยลำพุงความเร็วสูงที่สามารถขั้บลำพุงด้วยวิธีการกดและกระแทกจากแหล่งกำลังงานจากก๊าส
- 2.4 ศึกษา ตัวแปรต่างๆ ทดสอบคุณลักษณะของลำพุงน้ำที่เกี่ยวข้องกับการนำส่งยาผ่านผิวหนัง ได้แก่ ความเร็ว รูปร่าง ความดันกระแทก กำลังงานและการแพร่กระจายในเนื้อเยื่อของลำพุงที่ออกจากหัวฉีด โดยนิคจากอุปกรณ์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด และอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเอง จากข้อ 2.3.3
- 2.5 ทดสอบและปรับปรุงอุปกรณ์การทดลอง
- 2.6 ทำการทดลองและเก็บข้อมูล วิเคราะห์และเปรียบเทียบกับผลที่ได้จาก CFD
- 2.7 ปรับปรุงแก้ไข เสนอแนวทางในการประยุกต์ใช้จริง

3. งานที่ได้ดำเนินการ

3.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ การกำเนิดลำพุงความเร็วสูงด้วยวิธีการกระแทก คุณลักษณะด้านการเจาะและกระแทกของลำพุง คุณสมบัติของเนื้อเยื่อได้ผิวหนังมนุษย์ ลักษณะอุปกรณ์นำส่งยาด้วยลำพุงความเร็วสูงที่มีจำหน่ายในท้องตลาดและยังอยู่ในขั้นพัฒนา คุณลักษณะการนำส่งยาด้วยลำพุงความเร็วสูง

3.2 ศึกษาการกำเนิดและคุณลักษณะของลำพุงที่เกิดจากการกระแทกด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงตัวเลข (CFD)

ทำการจำลองกระบวนการกำเนิดลำพุงความเร็วสูงจากการกระแทก ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังสรุปในตารางที่ 1 ทำการยืนยันผล โดยเปรียบเทียบผลของ CFD กับการทดลองจากนักวิจัยที่ได้ทำไว้ก่อนหน้านี้ พบว่า CFD ให้ผลระดับที่ยอมรับได้ ซึ่งผลที่ได้จาก CFD สามารถนำมาอธิบายปรากฏการณ์การกำเนิดลำพุงได้ชัดเจนมากขึ้น และได้นำมาเป็นเครื่องมือช่วยศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆที่มีต่อคุณลักษณะของลำพุง พบว่า ปรากฏการณ์การไหลในหัวฉีดระหว่างการกำเนิดลำพุงมีผลโดยตรงต่อคุณลักษณะของลำพุงที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 5.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของลำพุงของเหลวใน CFD

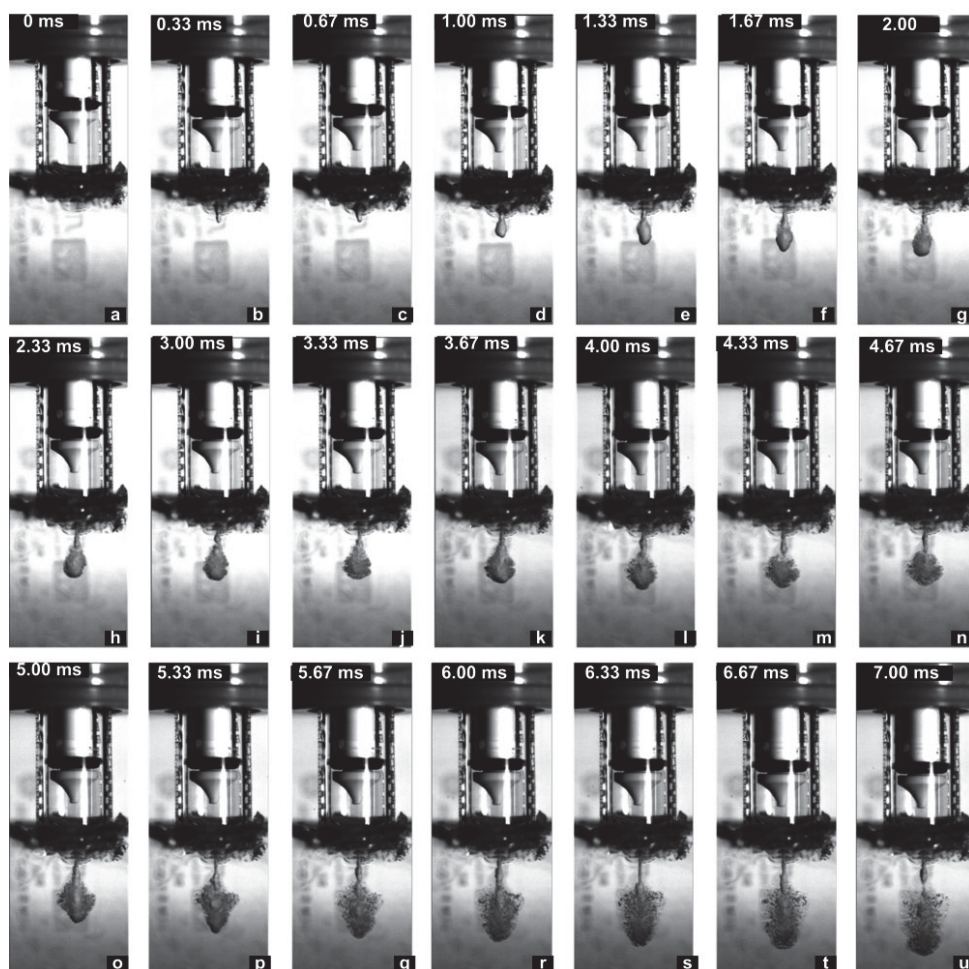
ปัญหา	แบบจำลอง
Fluid flow	Unsteady
Turbulent flow	Standard k-e
Two phase flow	Mixture
Space	Axisymmetric
Domain	Closed system
Time interval	10 microsecond
Solver	Segregate

3.3 สร้าง ติดตั้ง และปรับเทียบเครื่องมือสำหรับวัดคุณลักษณะของลำพุง

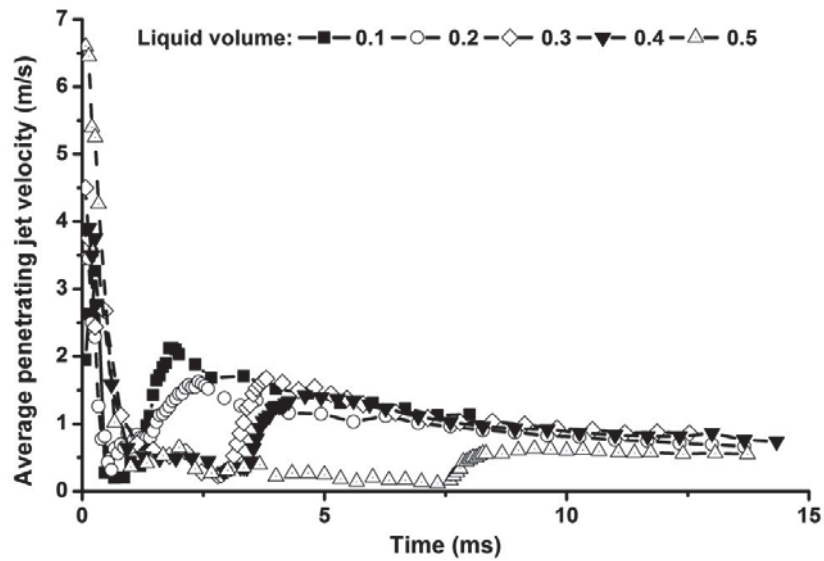
ความเร็ว ความดันกระแทก และรูปร่างของลำพุงขณะออกจากหัวฉีด เป็นตัวแปรที่ทำการวัดในการทดลองเกี่ยวกับลำพุงที่จะถูกนำไปใช้นำส่งยา โดยความเร็วของลำพุงวัดด้วยหลักการตัดแสงของวัตถุและอาศัยภาพถ่ายจากกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง ความดันกระแทกของลำพุงวัดจากแรงดันไฟฟ้าที่ปล่อยออกมาขณะลำพุงกระแทกบนแผ่น PVDF ซึ่งทำการปรับเทียบกับความดันด้วยการตกกระแทกของวัตถุแข็ง รูปร่างของลำพุงและการกระแหวกบนเนื้อเยื่อของลำพุงศึกษาด้วยการถ่ายภาพจากกล้องความเร็วสูง

3.4 ศึกษาคุณลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูงจากอุปกรณ์ที่ขับเคลื่อนด้วยสปริง

ทำการศึกษาคุณลักษณะของลำพุ่งที่ฉีดออกมาจากอุปกรณ์ Cool.Click ของบริษัท Bioject 2000 โดยศึกษาอิทธิพลของปริมาณบรรจุของของน้ำที่มีต่อ ความเร็ว กำลังงาน และความดันกระแทกของลำพุ่ง ศึกษากระบวนการเจาะในเนื้อเยื่อจำลองที่ทำจาก 20% PAMG (Polyacrylamide gel) นอกจากนี้ได้นำเอา CFD มาช่วยศึกษาปรากฏการณ์การไหลของของไหลระหว่างกระบวนการฉีดของอุปกรณ์ พบว่า ปริมาณของเหลวที่มากขึ้นจะทำให้ ความเร็ว กำลังงาน และความดันกระแทกของลำพุ่งลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า กระบวนการเจาะเนื้อเยื่อจำลองของลำพุ่งแบ่งออกเป็น 3 ช่วง (ดังรูปที่ 1 และ 2) คือ ช่วงเริ่มต้น (1a-b) ช่วงเจาะ (1c-g) และ ช่วงแพร่กระจาย (1h-u)



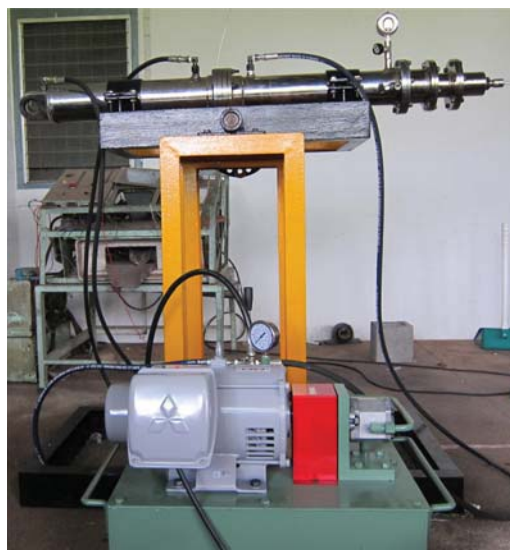
รูปที่ 1. การเจาะของลำพุ่งบน 20% PAMG เมื่อปริมาตรของเหลว



รูปที่ 2. ความเร็วเฉลี่ยของลำพุงใน 20% PAMG

3.5 ศึกษาคุณลักษณะของลำพุงความเร็วสูงจากอุปกรณ์ขับเคลื่อนด้วยก๊าซแรงดันสูง

ทำการออกแบบและสร้างระบบ เพื่อกำเนิดลำพุงที่ขับเคลื่อนด้วยก๊าซแรงดันสูง เรียกอุปกรณ์นี้ว่า Med-jet NFIS ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งเป็นระบบที่อาศัยแรงไฮดรอลิกที่จะเพิ่มความดันของก๊าซให้ได้ตามที่กำหนดก่อนจะใช้ในการขับเคลื่อนลำพุง ซึ่งได้ทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณของเหลวที่บรรจุและวิธีการขับที่มีผลต่อ ความเร็ว กำลังงาน และความดันกระแทกของลำพุง พบว่าการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะเหล่านี้ตามปริมาณของเหลวที่บรรจุมีน้อยกว่าการใช้แรงขับจากสปริง



รูปที่ 3. ชุดต้นแบบเพื่อนำส่งยาด้วยลำพุงความเร็วสูง (Med-jet NFIS)

4. สรุป

งานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการศึกษาคุณลักษณะของลำพุงที่ใช้สำหรับนำส่งยาผ่านผิวหนัง ซึ่งสร้างแรงดันด้วยการเคลื่อนที่ของวัตถุ ทั้งที่เป็นแบบกระแทกและกด โดยทำการศึกษาคุณลักษณะของลำพุงน้ำที่ฉีดในอากาศ และฉีดในเนื้อเยื่อ จากอุปกรณ์ฉีดสองประเภท คือ Cool.Click (ของ บริษัท Bioject2000) และ Med-jet NFIS (ชุดทดลองที่ทีมวิจัยสร้างขึ้น) ซึ่งใช้แรงขับลำพุงจากสปริงและก๊าซแรงดันสูงตามลำดับ นอกจากนี้ ยังได้นำวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงตัวเลข (CFD) ที่ทำการยืนยันผลกับการทดลองที่ผ่านมา ช่วยศึกษาและอธิบายการกำเนิดลำพุงความเร็วสูง ผลที่ได้จากการศึกษานี้จะช่วยเพิ่มองค์ความรู้สำหรับอธิบายปรากฏการณ์การนำส่งยาผ่านผิวหนังด้วยลำพุงความเร็วสูง และเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการออกแบบอุปกรณ์สำหรับฉีดยาต่อไป

สารบัญ

	หน้าที่
สารบัญ	I
สารบัญรูป	IV
สารบัญตาราง	IV
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1-1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1-3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	1-3
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย	1-3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ลำพุงความเร็วสูงและวิธีการสร้างลำพุงความเร็วสูง	2-1
2.2 ลำพุงความเร็วสูงที่สร้างด้วยวิธีการกระแทก	2-3
2.2.1 การสร้างลำพุงด้วยวิธีการกระแทก	2-3
2.2.2 วิธีขับวัตถุให้มีความเร็ว	2-5
2.2.3 ความดันที่เกิดกับการกำเนิดลำพุงด้วยวิธีการกระแทก	2-6
2.2.4 คุณลักษณะของลำพุงที่เกิดด้วยวิธีการกระแทก	2-11
2.2.5 การกระแทกของลำพุงความเร็วสูงที่เกิดด้วยวิธีการกระแทก	2-13
2.3 ลำพุงความเร็วสูงที่สร้างด้วยวิธีการกดสำหรับนำส่งยาผ่านผิวหนัง	2-15
2.3.1 ลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกลของชั้นผิวหนัง	2-15
2.3.2 การนำส่งยาผ่านผิวหนังด้วยลำพุงความเร็วสูง	2-17
2.3.3 อุปกรณ์นำส่งยาด้วยลำพุงความเร็วสูง	2-19
2.3.4 คุณลักษณะการนำส่งยาด้วยลำพุงความเร็วสูง	2-20
1) ความดันฉีดและการกระแทกของลำพุง	2-20
2) การเจาะเนื้อเยื่อและการกระจาย	2-23
บทที่ 3 การศึกษาลำพุงความเร็วสูงจากการกระแทกด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงตัวเลข (CFD)	
3.1 กลไกการกำเนิดลำพุงความเร็วสูงด้วยวิธี IDM	3-1
3.2 แบบจำลองคณิตศาสตร์	3-2
3.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของของไหลผสม แบบ Mixture	3-3
3.2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเกิดโพรงอากาศ (Cavitation)	3-6
3.2.3 ขอบเขตและรูปร่างของปัญหา	3-7

สารบัญ (ต่อ)

	หน้าที่
3.2.4 การเปลี่ยนกริดและการเคลื่อนที่ของลูกปืน	3-9
3.2.5 คุณสมบัติของของไหล	3-10
3.2.6 ระเบียบวิธีคำนวณ	3-11
3.3 การยืนยันผลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	3-11
3.4 ผลการศึกษา	3-17
3.4.1 รูปแบบการไหลในหัวฉีดและลำพุ่ง	3-17
3.4.2 พฤติกรรมการไหลในหัวฉีด	3-19
3.4.3 การเปลี่ยนสถานะของลำพุ่ง	3-23
3.4.4 อิทธิพลของพารามิเตอร์ที่มีต่อลำพุ่งความเร็วสูง	3-24
1) เส้นผ่านศูนย์กลางคอขวด	3-24
2) ความยาวของท่อหัวฉีด	3-24
3) ความยาวคอขวด	3-26
4) ความหนาแน่นของลูกปืน	3-26
5) ความเร็วของลูกปืน	3-27
บทที่ 4 การดำเนินการทดลอง	
4.1 อุปกรณ์กำเนิดลำพุ่ง เพื่อนำส่งของเหลวผ่านผิวหนึ่ง	4-1
4.1.1 อุปกรณ์ขับเคลื่อนด้วยสปริง: Cool. Click	4-1
4.1.2 อุปกรณ์ขับเคลื่อนด้วยแก๊สแรงดันสูง: Med-jet NFIS	4-4
1) ส่วนประกอบและขั้นตอนการทำงาน	4-4
2) การปรับเทียบชุดทดลองของ Med-jet NFIS	4-7
4.2 หลักการวัดความเร็วและความดันกระแทกของลำพุ่ง	4-9
4.2.1 การวัดเร็วความเร็วด้วย หลักการดัดแสงของวัตถุ	4-9
4.2.2 การปรับเทียบและหลักการวัดความดันกระแทกด้วยแผ่น PVDF	4-11
บทที่ 5 คุณลักษณะการนำส่งยาด้วยลำพุ่งความเร็วสูงจากอุปกรณ์ที่ขับเคลื่อนด้วยสปริง	
5.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ถ่ายภาพลำพุ่ง	5-1
5.1.1 การเตรียม Polyacrylamide gel เพื่อใช้เป็นเนื้อเยื่อจำลอง	5-1
5.1.2 ระบบถ่ายภาพด้วยกล้องจับภาพความเร็วสูง	5-2
5.2 คุณลักษณะของลำพุ่ง	5-3
5.2.1 ความเร็วออก และกำลังของลำพุ่ง	5-4
5.2.2 รูปร่างและความเร็วเฉลี่ยเฉพาะกาลของลำพุ่ง	5-5

สารบัญ (ต่อ)

	หน้าที่
5.2.3 ความดันกระแทกของลำพุง	5-8
5.2.4 การเจาะผ่านเนื้อเยื่อจำลอง	5-9
5.2.5 พฤติกรรมของห้วกด	5-11
5.3 การศึกษาลำพุงด้วยระเบียบวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงตัวเลข (CFD)	5-12
5.3.1 ขอบเขตและรูปร่างของปัญหา	5-14
5.3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	5-15
1) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	5-15
2) การเคลื่อนที่ของแท่งกด	5-15
3) คุณสมบัติของของไหล	5-16
4) ระเบียบวิธีคำนวณ	5-17
5.3.3 การยืนยันผลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	5-17
5.3.4 กระบวนการกำเนิดลำพุง	5-20
5.4 การกระจายของลำพุงในเนื้อหมู	5-24
บทที่ 6 คุณลักษณะการนำส่งยาด้วยอุปกรณ์ขับเคลื่อนจากแก๊สแรงดันสูง: Med-jet NFIS	
6.1 เงื่อนไขและรูปแบบการศึกษา	6-1
6.2 ความเร็วออกของลำพุง	6-4
6.3 ความดันกระแทกของลำพุง	6-5
6.4 การกระจายลำพุงในเนื้อหมู	6-7
บทที่ 7 สรุปและข้อเสนอแนะ	
7.1 สรุปผลการศึกษา	7-1
7.2 ข้อเสนอแนะ	7-2
เอกสารอ้างอิง	ก-1
Out put จากโครงการ	ข-1
ภาคผนวก: ผลงานวิชาการจากผลงานวิจัย	ผ-1

สารบัญรูป

	หน้าที่
รูปที่ 2.1 การสร้างแรงดันด้วยการเคลื่อนที่ของวัตถุ	2-2
รูปที่ 2.2 หลักการสร้างลำพุ่งความเร็วสูงของ Bowden และ Brunton	2-3
รูปที่ 2.3 การกำเนิดลำพุ่งด้วยการกระแทก	2-4
รูปที่ 2.4 วิธีการขับวัตถุ	2-5
รูปที่ 2.5 ชุดเครื่องมือวัดความดันของ Shi	2-7
รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงความดันในหัวฉีดจากผลการศึกษาของ Shi	2-7
รูปที่ 2.7 แผนภาพการเคลื่อนที่ของคลื่นช็อกในหัวฉีดของ Pianthong และคณะ	2-8
รูปที่ 2.8 แผนภูมิ x-t ของการเคลื่อนที่ของช็อกในหัวฉีดแบบบ่าของ Pianthong และคณะ	2-8
รูปที่ 2.9 รูปแบบความดันในหัวฉีดจากการศึกษาของ Mutthujak และ คณะ	2-10
รูปที่ 2.10 คลื่นช็อก ในหัวฉีดขณะกำเนิดลำพุ่ง จากการศึกษาของ Mutthujak และคณะ	2-10
รูปที่ 2.11 การไหลผ่านหัวฉีดของของเหลวเนื่องจากการกระแทกของลูกปืน	2-12
รูปที่ 2.12 รูปแบบการไหลของลำพุ่งที่เริ่มออกจากหัวฉีด	2-12
รูปที่ 2.13 ลำพุ่งความเร็วสูงที่ออกเป็นลูก	2-13
รูปที่ 2.14 การกระแทกของลำพุ่งความเร็วสูงบน PMMA ที่ความเร็วลำพุ่ง 680 m/s	2-14
รูปที่ 2.15 ความเสียหายจากการกระแทกของลำพุ่งความเร็วสูง (950 m/a)	2-15
รูปที่ 2.16 โครงสร้างและชั้นผิวหนังของร่างกาย	2-15
รูปที่ 2.17 ชั้นย่อยของหนังกำพร้า	2-16
รูปที่ 2.18 หลักการฉีดด้วยลำพุ่งความเร็วสูง	2-17
รูปที่ 2.19 ความดันกระแทกตามช่วงเวลาฉีดจากอุปกรณ์ฉีดที่มีจำหน่ายในท้องตลาด	2-22
รูปที่ 2.20 รูปแบบการกระจายของของเหลวในเนื้อเยื่อ	2-24
รูปที่ 2.21 กระบวนการฉีดในเนื้อเยื่อ	2-24
รูปที่ 3.1 การกำเนิดลำพุ่งด้วยการกระแทก	3-2
รูปที่ 3.2 ขนาดหัวฉีด	3-8
รูปที่ 3.3 ขนาดหัวฉีดของ H. H. Shi	3-8
รูปที่ 3.4 กริดและขอบเขตปัญหา	3-9
รูปที่ 3.5. ความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่งจากการกระแทกตรงบนหัวฉีดแบบบ่าเป็นกรวย	3-12
รูปที่ 3.6. ความดันฉีดจากการกระแทกตรงบนหัวฉีดแบบบ่าเป็นกรวย	3-13
รูปที่ 3.7 ระยะแหวกอากาศและความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่งจากการหัวฉีดแบบบ่าตรง	3-13

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้าที่
รูปที่ 3.8 ความดันฉีดจากการกระแทกตรงบนหัวฉีดของ Shi	3-13
รูปที่ 3.9 ความดันฉีดจากการกระแทกผ่านตัวกลางแท่งทองเหลืองบนหัวฉีดของ Shi	3-16
รูปที่ 3.10 อิทธิพลของน้ำหนักระเบิดแท่งทองเหลืองที่มีต่อความเร็วและความดันสูงสุด	3-16
รูปที่ 3.11 ระดับความดัน (GPa) ของของเหลวไหลในหัวฉีด และความเร็วของลำพุ่ง (km/s)	3-18
รูปที่ 3.12 ระดับความดัน (GPa) ของน้ำมันดีเซลในหัวฉีดแบบบ่าตรง	3-19
รูปที่ 3.13 ระดับความดัน (GPa) ของน้ำมันดีเซลในหัวฉีดแบบบ่าเป็นกรวย	3-20
รูปที่ 3.14 ระดับความดัน (GPa) ของน้ำมันดีเซลในหัวฉีดของ Shi แบบกระแทกผ่านตัวกลาง	3-21
รูปที่ 3.15 ระดับความดัน (GPa) ของน้ำมันดีเซลในหัวฉีดของ Shi จากการกระแทกตรง	3-22
รูปที่ 3.16 สัดส่วนปริมาตรของเหลวตามแนวแกน	3-23
รูปที่ 3.17 ความดันฉีดและความเร็วกับเส้นผ่านศูนย์กลางคอขวดที่เปลี่ยนแปลง	3-25
รูปที่ 3.18 ความดันฉีดและความเร็วกับความยาวของท่อหัวฉีดที่เปลี่ยนแปลง	3-25
รูปที่ 3.19 ความดันฉีดและความเร็วกับความยาวของคอขวดที่เปลี่ยนแปลง	3-26
รูปที่ 3.20 ความดันฉีดและความเร็วกับความหนาแน่นของลูกปืนที่เปลี่ยนแปลง	3-27
รูปที่ 3.21 ความดันฉีดและความเร็วกับความเร็วของลูกปืน	3-28
รูปที่ 4.1 ลักษณะและกลไกของอุปกรณ์นำส่งยาด้วยลำพุ่งความเร็วสูงแบบขับเคลื่อนด้วยสปริง	4-2
รูปที่ 4.2 การทดสอบแรงกดของสปริง	4-3
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะยุบกับแรงกดของสปริง	4-3
รูปที่ 4.4 Med-jet NFIS	4-4
รูปที่ 4.5 ระบบสร้างลำพุ่งด้วยแก๊สแรงดันสูง	4-5
รูปที่ 4.6 อุปกรณ์ต่อพ่วงของ Med-jet NFIS	4-6
รูปที่ 4.7 ลักษณะการวางแผนไดอะแฟรมและการแตกหลังการใช้งาน	4-7
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนา และชนิดของวัสดุ กับความดันแตก	4-8
รูปที่ 4.9 การวัดความเร็วลำพุ่งด้วยหลักการตัดเลเซอร์	4-9
รูปที่ 4.10 วงจรไฟฟ้าของชุดชักจูงความเข้มแสง	4-10
รูปที่ 4.11 ลักษณะการเกิดแรงดันไฟฟ้าจากการขงของแผ่น PVDF	4-11
รูปที่ 4.12 ตัวเรือนรับการกระแทกและแผ่น PVDF	4-11
รูปที่ 4.13 ระบบปรับเทียบแรงดันไฟฟ้ากับความดันกระแทกบนแผ่น PVDF	4-12
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของแรงกระแทกกับแรงดันไฟฟ้าจากแผ่น PVDF	4-13
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ของความดันกระแทกกับแรงดันไฟฟ้าจากแผ่น PVDF	4-14

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้าที่
รูปที่ 5.1 ระบบถ่ายภาพความเร็วสูง	5-1
รูปที่ 5.2 ความเร็วออก และกำลังของลำพุ่ง	5-5
รูปที่ 5.3 การแหวกอากาศของลำพุ่ง	5-6
รูปที่ 5.4 ความเร็วเฉื่อยเฉพาะกาลของลำพุ่ง	5-6
รูปที่ 5.5 ลักษณะรูปร่างของลำพุ่งตามปริมาตรการฉีด	5-7
รูปที่ 5.6 ความดันกระแทกของลำพุ่ง	5-8
รูปที่ 5.7 การเจาะของลำพุ่งบน 20% PAMG เมื่อปริมาตรของเหลว	5-10
รูปที่ 5.8 ระยะแหวกของลำพุ่งใน 20% PAMG	5-11
รูปที่ 5.9 ความเร็วเฉื่อยของลำพุ่งใน 20% PAMG	5-11
รูปที่ 5.10 ความเร็วเฉื่อยของหัวแทงกด	5-12
รูปที่ 5.11 กลไกและรูปร่างของหัวฉีด	5-13
รูปที่ 5.12 กริดและขอบเขตของปัญหา	5-14
รูปที่ 5.13 ความเร็วลำพุ่งระหว่าง CFD กับผลการทดลอง	5-18
รูปที่ 5.14 ระยะแหวกของลำพุ่งจาก CFD กับผลการทดลอง	5-19
รูปที่ 5.15 ความเร็วเฉพาะกาลของลำพุ่งจาก CFD กับผลการทดลอง	5-19
รูปที่ 5.16 ความเร็วเฉพาะกาลของหัวกดจาก CFD และการทดลอง	5-20
รูปที่ 5.17 ความดันฉีดที่ปากทางออกหัวฉีด	5-21
รูปที่ 5.18 ความเร็วที่จุดห่างปากทางออกหัวฉีด 1 mm	5-22
รูปที่ 5.19 ระดับความดันและเวกเตอร์ของการไหลระหว่างการกำเนิดลำพุ่ง (MPa)	5-23
รูปที่ 5.20 การกระจายของลำพุ่งในเนื้อหมู	5-25
รูปที่ 6.1 ชุดต้นแบบของอุปกรณ์นำส่งยาด้วยลำพุ่งความเร็ว Med-jet NFIS	6-1
รูปที่ 6.2 แท่งกด ขนาดต่างๆ	6-2
รูปที่ 6.3 ลักษณะของลูกสูบขับเคลื่อนที่ใช้ขับเคลื่อนแท่งกด	6-3
รูปที่ 6.4 การวัดความเร็วออกของลำพุ่งด้วยหลักการตัดแสงของวัตถุ	6-4
รูปที่ 6.5 ความเร็วออกของลำพุ่งจาก Med-jet NFIS	6-4
รูปที่ 6.6 การวัดความดันด้วยแผ่น PVDF (ภาพถ่ายมุมมองด้านบน)	6-5
รูปที่ 6.7 ความดันกระแทก ของลำพุ่งที่ขับโดยไม่มีการกระแทก	6-6
รูปที่ 6.8 ความดันกระแทก ของลำพุ่งที่ขับด้วยการกระแทกลูกสูบแบบไม่มีโอริง	6-7

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้าที่
รูปที่ 6.9 เปรียบเทียบความดันกระแทกของลำพุงที่ ปริมาตรของเหลว 0.5 ml	6-7
รูปที่ 6.10 การกระจายของลำพุงในเนื้อหมูจากการฉีดด้วย Med-jet NFIS	6-8

สารบัญตาราง

	หน้าที่
ตาราง 2.1 คุณสมบัติและค่าตัวแปรต่างๆแกน x-t ของ Pianthong และคณะ	2-9
ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติเชิงกลของชั้นผิวหนัง	2-17
ตารางที่ 2.3 ข้อมูลเบื้องต้นของอุปกรณ์การฉีดด้วยลำพุงที่มีจำหน่ายในท้องตลาด	2-19
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของของเหลว	3-11
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลเบื้องต้นของ Cool.Click	4-2
ตารางที่ 4.2 แสดงลักษณะการฝึกขาของแผ่นไดอะแฟรมแต่ละชนิด	4-8
ตารางที่ 4.3 รายละเอียดจำเพาะของชุดดักจับความเข้มแสง	4-10
ตารางที่ 5.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของลำพุงของเหลวใน CFD	5-15
ตารางที่ 5.2 คุณสมบัติของของไหล	5-17

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันการศึกษาเกี่ยวกับลำพุงความเร็วสูง (High speed liquid jet) ของของไหลเพื่อประยุกต์ใช้กับทางวิศวกรรมสมัยใหม่มีอย่างกว้างขวาง เช่น การฉีดเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ การตัดโลหะ การขุดเจาะดินหรือ อุโมงค์ การทำความสะอาดชิ้นส่วน ในลักษณะต่างๆ และที่สำคัญ ลำพุงความเร็วสูงยังถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านการแพทย์อีกด้วย ตัวอย่างเช่น การใช้ High speed liquid jet ในการผ่าตัด ใช้ในการทำลายก้อนเลือดที่อุดตันในเส้นเลือด และ การส่งถ่ายยา DNA หรือวัคซีน ซึ่งถือเป็นเทคโนโลยีอันมีประโยชน์ต่อสุขภาพและชีวิตของมนุษย์โดยตรง

เทคนิคการส่งถ่ายยาหรือวัคซีนในปัจจุบันมีหลากหลายวิธี เช่น การฉีดด้วยเข็มฉีดยา กับกระบอกฉีดยา การติดแปะด้วยแผ่น Microneedle การฟ่นละอองยาเพื่อสูดเข้าสู่ร่างกาย การกิน และ การฉีดด้วยลำพุงของเหลวความเร็วสูง จากวิธีดังกล่าว การฉีดด้วยเข็มฉีดยา กับกระบอกฉีดยา เป็นวิธีที่นิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ถึงแม้ว่าวิธีนี้จะมีข้อดีหลายประการ แต่ก็ยังมีข้อเสีย เช่น ความไม่ปลอดภัยกับผู้ฉีดที่มีความเสี่ยงต่อการติดเชื้อจากเข็ม ความเจ็บปวดจากการแทงของเข็ม ผู้ฉีดต้องมีความรู้และความชำนาญเป็นอย่างดี และผู้ถูกฉีดยังเสี่ยงต่อการที่เข็มจะแทงถูกเส้นประสาทที่มีอยู่ทั่วร่างกายอีกด้วย เนื่องด้วยจุดอ่อนเหล่านี้ จึงมีความพยายามที่จะพัฒนาเทคนิคการฉีดยา หรือ การส่งถ่ายยา เข้าสู่ร่างกาย โดยวิธีอื่นๆ ดังที่กล่าวไปแล้วในตอนต้น

เทคนิคการส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็ม (Needle free injection) โดยส่งถ่ายยาด้วยลำพุงความเร็วสูงถือเป็นเทคนิคทางเลือกที่มีความเป็นไปได้สูงที่จะมาแทนการใช้เข็มฉีดยา กับกระบอกฉีดยาได้ดีที่สุด เพราะคุณลักษณะการให้ยาที่มีความคล้ายกันแตกต่างกันเพียงไม่ใช้เข็มฉีดยา แต่ใช้ลำพุงความเร็วสูงนำตัวยาเข้าสู่ร่างกายแทน จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ด้วยวิธีนี้ ยาสามารถออกฤทธิ์ได้เร็ว ผู้ที่ถูกฉีดจะรู้สึกเจ็บปวดน้อยกว่าเข็ม สามารถฉีดยาได้เร็วขึ้นและสามารถลดความเสี่ยงของการติดเชื้อจากเข็มได้ นอกจากนี้แล้ว ด้วยเทคนิคนี้เราสามารถประยุกต์เอาลำพุงความเร็วสูงมาใช้ในการให้วัคซีนโดยการเคลือบ DNA หรือ ยีน ไวรัส โลหะหนักขนาดเล็ก ระดับไมโครเมตร และใช้ลำพุงของแก๊สเพื่อเหนี่ยวนำเม็ดโลหะ DNA ไปยังเป้าหมายหรือผิวหนัง ซึ่งจากการศึกษาพบว่า มีประสิทธิภาพการส่งถ่ายสูงกว่าวิธีอื่นๆ

การส่งถ่ายยาหรือวัคซีนด้วยลำพุงความเร็วสูง เป็นเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่เพิ่งศึกษามานานนัก ยังต้องมีการศึกษาและวิจัยอย่างต่อเนื่อง กล่าวคือเป็นเทคโนโลยีทางการแพทย์ ที่จำเป็นต้องมีองค์ความรู้จากหลากหลายสาขาร่วมกัน ในที่นี้ จะยกตัวอย่างสองด้าน ได้แก่ 1) ทางด้านเทคนิควิศวกรรม เช่น การศึกษาคุณลักษณะของลำพุงของยาชนิดต่างๆ ในวัสดุชนิดต่างๆ อิทธิพลของพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อการควบคุมลำพุงให้นำส่งยาให้ได้ตามจุดประสงค์มากที่สุด 2)

ทางด้านการแพทย์ เช่น การออกฤทธิ์ของยาหรือวัคซีน ตำแหน่งหรือความลึกที่เหมาะสมของยาหรือวัคซีน ผลทางเคมีชีวภาพอื่นๆ ที่เกิดขึ้นหลังจากการฉีด ถึงแม้ว่าประเด็นเหล่านี้ได้รับความสนใจศึกษากันอย่างกว้างขวางในต่างประเทศ แต่กลับไม่พบว่าในประเทศไทยมีการศึกษาวิจัย หรือแม้แต่ทดลองนำอุปกรณ์เหล่านี้มาใช้ในการรักษาพยาบาล แต่กลับพบว่าในประเทศไทยยังไม่มีการศึกษาวิจัย

ในปัจจุบัน เทคนิคการสร้างลำพุ่งสำหรับส่งถ่ายยาผ่านผิวหนัง โดยส่วนใหญ่ ใช้แก๊สที่เก็บไว้ในถังความดันสูง จากนั้นจึงปล่อยก๊าซด้วยความเร็วอัดของเหลวให้เหนียวนาวยาวไปยังเป้าหมาย (เซลล์หรือเนื้อเยื่อใต้ผิวหนัง) ซึ่งความเร็วของลำพุ่งที่ได้เป็นตัวแปรสำคัญที่เชื่อมโยงกับขนาดความลึก (Penetration length) ของรูเจาะบนผิวหนัง ดังนั้น หากอุปกรณ์ฉีดสามารถสร้างลำพุ่งให้มีความเร็วสูง รูเจาะจะลึกขึ้น นั่นหมายความว่า ช่วงการประยุกต์ใช้งานจะยิ่งกว้างขึ้น (สามารถควบคุมความเร็วได้ด้วยการกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด) ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้ขนาดหัวฉีดที่เล็กเกินไป ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการผลิตในงานอุตสาหกรรม นอกจากนี้แล้ว อาจเป็นไปได้ว่า การฉีดด้วยลำพุ่งจะช่วยลดปริมาณยาได้ โดยให้ผลเช่นเดียวกับการฉีดทั่วไป เพราะการเกิดละอองฝอยของตัวยาจะช่วยให้การกระจายของตัวยาทำได้ดี

สำหรับกรณีการส่งถ่ายวัคซีน DNA ด้วยการเหนียวนาเม็ดโลหะก็เช่นเดียวกัน ความเร็วของลำพุ่งก็สำคัญมาก เพราะอุปสรรคสำคัญของเทคนิคนี้ คือความเร็วไม่เพียงพอในการเจาะทะลุผิวหนัง และความเร็วไม่สม่ำเสมอ เม็ดโลหะกระจายตัวไม่เป็นระเบียบ ซึ่งการออกแบบหัวฉีดที่ดี ร่วมกับการเพิ่มความเร็วของลำพุ่งจะช่วยลดปัญหาเหล่านี้ได้

จากการศึกษาของผู้วิจัย เกี่ยวกับลำพุ่งความเร็วสูงของเชื้อเพลิงเหลวที่ระดับความเร็วสูงกว่าเสียงมากๆ (Hypersonic) ที่สร้างด้วยหลักการการกระแทกของลูกปืนความเร็วสูง ความดันในการฉีดของเหลวอยู่ในระดับ GPa จากหลักการนี้ จึงเป็นไปได้ว่า เราสามารถสร้างลำพุ่งที่มีความเร็วสูงกว่าที่เครื่องฉีดยาแบบลำพุ่งในท้องตลาดต้องการสองถึงสามเท่า

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเทคนิคการสร้างลำพุ่งด้วยการกระแทกของลูกปืน หรือ การกระแทก ด้วยคลื่นช็อค (Shock wave) เพื่อสร้างลำพุ่งความเร็วสูงมากๆ สำหรับการประยุกต์ใช้กับการส่งถ่ายยาหรือวัคซีน (สารละลายยา ยาผง หรือผงโลหะเคลือบ DNA) โดยจะศึกษาคุณลักษณะและออกแบบหัวฉีด เพื่อควบคุมคุณลักษณะของลำพุ่ง อันเป็นประโยชน์ต่อเทคโนโลยีส่งถ่ายยาหรือวัคซีนและสามารถนำมาประยุกต์ ให้เหมาะสมกับการนำไปใช้จริงตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการได้ โดยจะทำการศึกษาคำนวณการไหลพลศาสตร์ (Computational Fluid Dynamics, CFD) และการทดลองควบคู่กัน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการนำส่งยาด้วยลำพุงความเร็วสูงจากอุปกรณ์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด
- 1.2.2 เพื่อออกแบบและสร้างอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลอง สำหรับทำการศึกษาด้านการนำส่งยาด้วยลำพุงความเร็วสูง สำหรับพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง
- 1.2.3 เพื่อจำลองปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับการนำส่งยาด้วยลำพุงความเร็วสูงด้วย CFD สำหรับอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น พร้อมเป็นเครื่องมือสำหรับการออกแบบรูปร่างบางส่วน ของอุปกรณ์การทดลอง
- 1.2.4 เพื่อสร้างอุปกรณ์นำส่งยาต้นแบบที่ใช้ลำพุงความเร็วสูง หรือ การกระแทก

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ค้นคว้าศึกษาถึงงานวิจัยต่างๆ เกี่ยวกับการนำส่งยาด้วยลำพุงความเร็วสูง ที่เป็นการฉีดยาหรือวัคซีนเจาะทะลุผ่านผิวหนังด้วยลำพุงความเร็วสูง
- 1.3.2 จำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ CFD code ที่เหมาะสม เทียบเคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมา เพื่อใช้เป็นเครื่องมือสำหรับการออกแบบอุปกรณ์การทดลอง และ อธิบายปรากฏการณ์
- 1.3.3 นำความรู้จากงานวิจัยและประสบการณ์ที่มีจากงานที่ผ่านมา ทำการออกแบบและจัดสร้างชุดอุปกรณ์ต้นแบบ ของการนำส่งยาผ่านผิวหนังด้วยลำพุงความเร็วสูงที่สามารถขับลำพุงด้วยวิธีการกดและกระแทกจากแหล่งกำลังงานจากก๊าซ
- 1.3.4 ศึกษา ตัวแปรต่างๆ ทดสอบคุณลักษณะของลำพุงน้ำที่เกี่ยวข้องกับการนำส่งยาผ่านผิวหนัง ได้แก่ ความเร็ว รูปร่าง ความดันกระแทก กำลังงานและการแพร่กระจายในเนื้อเยื่อของลำพุงที่ออกจากหัวฉีด โดยฉีดจากอุปกรณ์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด และอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเองจากข้อ 1.3.3
- 1.3.5 ทดสอบและปรับปรุงอุปกรณ์การทดลอง
- 1.3.6 ทำการทดลองและเก็บข้อมูล วิเคราะห์และเปรียบเทียบกับผลที่ได้จาก CFD
- 1.3.7 ปรับปรุงแก้ไข เสนอแนวทางในการประยุกต์ใช้จริง

1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

- 1.4.1 เน้น วิธีการส่งถ่ายยาเข้าสู่ร่างกาย ผ่านผิวหนัง และ ผลที่เกิดจากวิธีการนั้นๆ
- 1.4.2 ตัวยาที่จะศึกษา เป็นยาที่เป็นของเหลวและใช้น้ำบริสุทธิ์เป็นสารทำงาน
- 1.4.3 สามารถสร้างอุปกรณ์ต้นแบบของการนำส่งยาด้วยลำพุ่งความเร็วสูงจากหลักการสร้างลำพุ่งด้วยการกระแทก สามารถเจาะทะลุผิวหนังและส่งยาที่ ความลึกของเนื้อเยื่อเป้าหมายได้

- 1.4.4 เน้นที่ ผลทางวิศวกรรม ของคุณลักษณะของลำพุง และวิธีการ ส่งถ่าย ในเนื้อเชื้อ หรือ วัสดุอื่นที่ ไกล่เคียง ผลทางการรักษา ยังไม่อยู่ในขอบเขตการวิจัยนี้
- 1.4.5 ศึกษาลำพุงที่มีความเร็วของ อยู่ในช่วง 80 – 200 m/s หรืออยู่ในช่วงที่อุปกรณ์ในปัจจุบัน ทำได้
- 1.4.6 ใช้ CFD ร่วมในการศึกษา หรือ ร่วมตรวจสอบ ผลการศึกษา

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.1 ลำพุ่งความเร็วสูงและวิธีการสร้างลำพุ่งความเร็วสูง

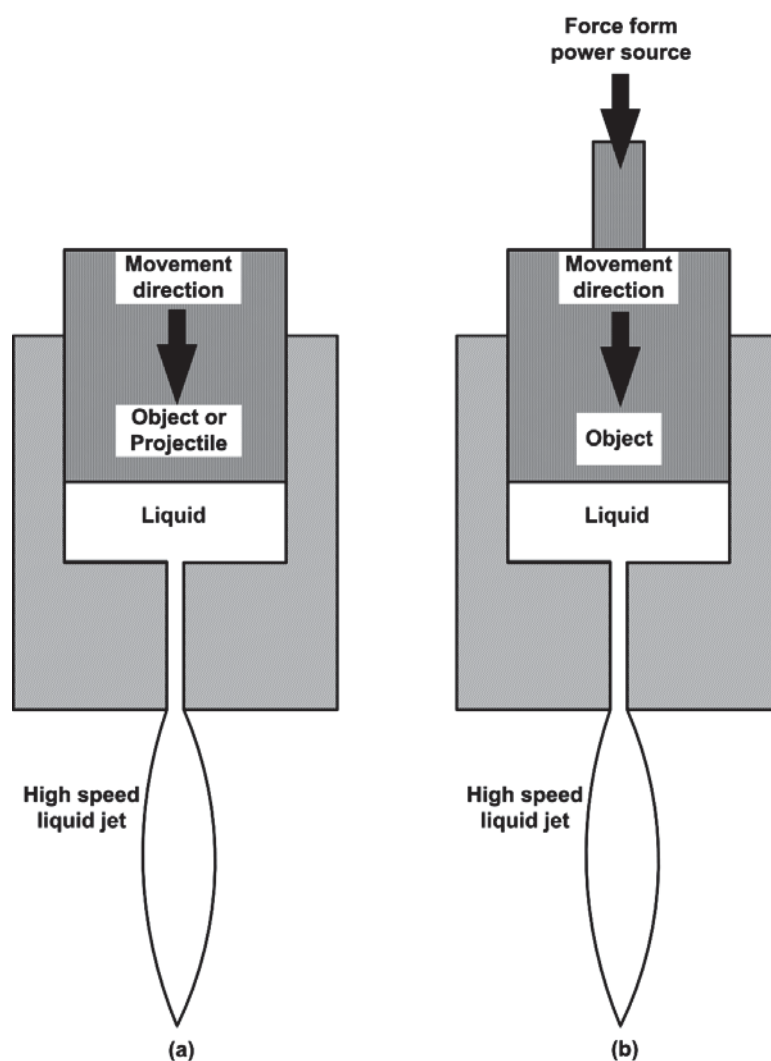
ลำพุ่งความเร็วสูง (High speed liquid jet) คือ ลำพุ่งของเหลวที่ถูกขับออกจากรูขนาดเล็ก ด้วยแรงดันสูง ลำพุ่งความเร็วสูงมีการนำไปประยุกต์ใช้กับงานหลากหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมสมัยใหม่ ลำพุ่งความเร็วสูงถูกนำมาใช้งาน ตัด เจาะ หรือขึ้นรูปวัสดุ ส่วนในทางการแพทย์ ลำพุ่งความเร็วสูงถูกนำมาใช้ ในการผ่าตัดแทนมีด (Water-jet dissection) ศัลยกรรมตกแต่งหลอดเลือด (Water jet angioplasty) และการนำส่งยาผ่านผิวหนังแทนเข็ม (Needle free jet injection) นอกจากนี้แล้ว องค์ความรู้ของลำพุ่งความเร็วสูงยังมีส่วนสำคัญกับเทคโนโลยีบางประเภท เช่น เทคโนโลยีการพ่นสี และโดยเฉพาะอย่างยิ่ง เทคโนโลยีการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ซึ่งเชื่อมโยงโดยตรงกับคุณลักษณะของลำพุ่งที่ถูกฉีดภายในห้องเผาไหม้

ลำพุ่งความเร็วสูงเกิดขึ้นจากหลักการพื้นฐานที่ว่า ของเหลวความดันสูงไหลผ่านคอขวด ก่อนพุ่งออกสู่อากาศ ซึ่งวิธีการสร้างลำพุ่งความเร็วสูงสามารถแบ่งตามวิธีสร้างความดันให้ของเหลว คือ สร้างแรงดันด้วยเครื่องมือกล (Building-up device method) และสร้างแรงดันด้วยการเคลื่อนที่ของวัตถุ (Building-up object method)

การอัดของเหลวให้มีแรงดันสูงด้วยเครื่องมือกลเพื่อใช้ในการสร้างลำพุ่งนั้น ของเหลวจะถูกเพิ่มความดันด้วยการทำงานของปั๊มแรงดัน จากนั้นจะถูกเก็บไว้ในถังพักและควบคุมการปล่อยของเหลวไปยังหัวฉีดด้วยวาล์ว วิธีการนี้มักจะถูกนำไปใช้งานกับลำพุ่งที่เป็นการฉีดอย่างต่อเนื่อง เช่น การขึ้นรูปวัสดุ การผ่าตัด และการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้ในเครื่องยนต์ เป็นต้น ด้วยวิธีการนี้ คุณลักษณะของลำพุ่งถูกควบคุมอย่างมีประสิทธิภาพผ่านวาล์วและปรับกำลังของปั๊ม แต่อย่างไรก็ตาม ความดันของของเหลวจะถูกจำกัดด้วยสมรรถนะของปั๊ม จึงทำให้ความเร็วของลำพุ่งอยู่ในช่วงที่ไม่สูงมากนัก

การสร้างลำพุ่งจากการกดอัดของเหลวให้มีแรงดันสูงด้วยการเคลื่อนที่ของวัตถุ เป็นอีกวิธีที่ใช้ในการสร้างแรงดันให้ของเหลวเพื่อสร้างลำพุ่ง กระบวนการสร้างจะเกิดขึ้นเร็ว และส่วนใหญ่แล้วลำพุ่งจะถูกฉีดเพียงครั้งเดียว วิธีการนี้ โดยมากจะถูกประยุกต์ใช้สำหรับการนำส่งยาผ่านผิวหนัง หรือเพื่อการศึกษากรณีลำพุ่งที่มีความเร็วสูงมากๆ ในห้องทดลอง เนื่องจากด้วยวิธีการนี้สามารถสร้างแรงดันขึ้นซึ่งเพิ่มขึ้นทันทีทันใดในหัวฉีดให้มีค่าสูงมากระดับ GPa [1, 2] ทั้งนี้สามารถแบ่งการอัดของเหลวให้มีแรงดันสูงด้วยการเคลื่อนที่ของวัตถุ ออกเป็นสองวิธีตามลักษณะการขับเคลื่อนสร้างลำพุ่ง คือ แบบกด (Driving object method) และ แบบกระแทก (Impact driven method) แสดงหลักการดังรูปที่ 2.1

การสร้างแรงดันและลำพุ่งด้วยการกระแทก ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (a) อาศัยหลักการปล่อยให้วัตถุหรือลูกปืนที่มีความเร็วสูงวิ่งเข้าชนของเหลวในหัวฉีดให้มีความดันเพิ่มขึ้นทันทีทันใด และขับของเหลวให้ไหลผ่านหัวฉีดด้วยความเร็วสูง วิธีการนี้ถูกใช้ในการทดลองเพื่อสร้างลำพุ่งความเร็วสูงเป็นครั้งแรก ในปี ค.ศ. 1961 โดย Bowden และ Brunton [3] ซึ่งด้วยวิธีการนี้ลำพุ่งของพวกเขามีความเร็วสูงถึง 1200 m/s ทำให้นักวิจัยรุ่นต่อมา [1, 4, 5] นำหลักการนี้มาสร้างลำพุ่งให้มีความเร็วสูงในระดับที่เครื่องมือกลในปัจจุบันไม่สามารถทำได้ เพื่อการศึกษาและทดลอง เช่น การศึกษาลำพุ่งที่มีความเร็วระดับเหนือเสียง เป็นต้น ทั้งนี้ยังไม่พบการนำวิธีนี้ไปใช้งานจริง เนื่องจากควบคุมปัจจัยการทำงานได้ยาก



รูปที่ 2.1 การสร้างแรงดันด้วยการเคลื่อนที่ของวัตถุ (a) แบบกระแทก และ (b) แบบกด

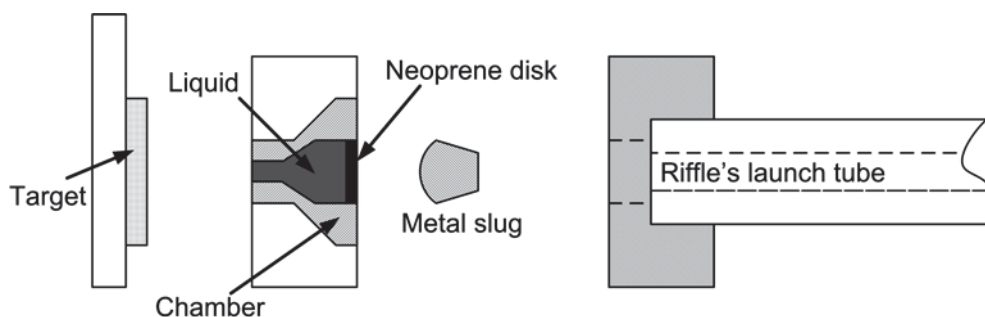
การกดอัดของเหลวให้มีแรงดันสูงด้วยการเคลื่อนที่ของวัตถุ อีกวิธี คือแบบกด ดังแสดงหลักการดังรูปที่ 2.1 (b) ซึ่งจะแตกต่างจากการกระแทก ระหว่างการสร้างลำพุ่งวัตถุยังมีแรงผลักดันเนื่องจากแหล่งกำลังงานที่มาจาก สปริงหรือก๊าซแรงดันสูง จนกระทั่งของเหลวในหัวฉีดหมด หลักการนี้ถูกนำมาใช้จริงในการสร้างลำพุ่งเพื่อนำส่งยาผ่านผิวหนัง [6-8] เนื่องจากลำพุ่งที่ออกมามีความเร็วสูงต่อเนื่อง และง่ายในการควบคุมปัจจัยการทำงานมากกว่าวิธีการกระแทก

1.2 ลำพุ่งความเร็วสูงที่สร้างด้วยวิธีการกระแทก

ดังที่กล่าวไว้เบื้องต้น เกี่ยวกับวิธีสร้างลำพุ่งความเร็วสูงด้วยการเคลื่อนที่ของวัตถุแบบการกระแทก ซึ่งหัวข้อนี้จะทำการอธิบายและลงในรายละเอียดของวิธีการสร้าง พลศาสตร์การกำเนิดคุณลักษณะ และความดันกระแทกของลำพุ่งที่สร้างด้วยวิธีการกระแทก

1.2.1 การสร้างลำพุ่งด้วยวิธีการกระแทก

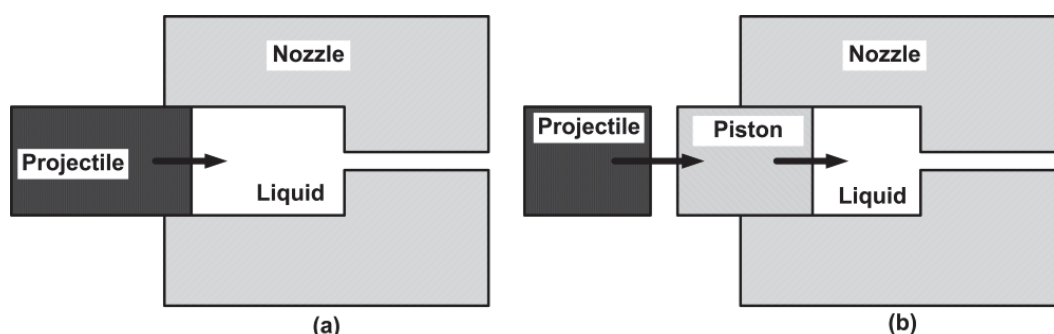
การสร้างลำพุ่งความเร็วสูงด้วยวิธีการกระแทก เป็นวิธีให้กำเนิดลำพุ่งที่สามารถสร้างลำพุ่งที่มีความเร็วสูงมากๆ ด้วยหลักการอย่างง่าย คือ ให้อวัตถุที่มีความเร็วสูงกระแทกบนของเหลวที่บรรจุในหัวฉีดและขับของเหลวให้พุ่งออกมาด้วยความเร็วสูง ด้วยวิธีการนี้สามารถสร้างลำพุ่งที่มีความเร็วระดับเหนือเสียงได้ (Supersonic และ hypersonic jet) ความเร็วลำพุ่งจะขึ้นอยู่กับความเร็วของวัตถุก่อนกระแทกและเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดเป็นหลัก การสร้างลำพุ่งด้วยวิธีการนี้ ถูกนำไปใช้ครั้งแรกในปี 1958 ในการศึกษาของ Bowden-Brunton ในปี ค.ศ. 1958 [3] เพื่อทำการศึกษาและถ่ายภาพลำพุ่งความเร็วสูง อุปกรณ์และหลักการสร้างลำพุ่งเบื้องต้นแสดงดังรูปที่ 2.2 ของเหลวปริมาตร 0.1 cm^3 ที่บรรจุในห้องหัวฉีด ถูกฉีกด้วยแผ่น Neoprene จากนั้น ปืนไรเฟิลกำลังลม จะยิงลูกปืนโลหะให้ชนแผ่น Neoprene และขับของเหลวในหัวฉีดให้พุ่งออกมาด้วยความเร็วสูง ไปชนเป้าหมาย ด้วยวิธีการนี้ที่หัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm สามารถสร้างลำพุ่งน้ำที่มีความเร็ว 1200 m/s



รูปที่ 2.2 หลักการสร้างลำพุ่งความเร็วสูงของ Bowden และ Brunton [3]

ด้วยหลักการเดียวกับ Bowden และ Bruton ต่อมา O'Keefe และคณะ [9] สามารถสร้างพู่ที่มีความเร็วระดับไฮเปอร์โซนิก (Hypersonic jet) ที่ความเร็ว 4580 m/s ด้วยการปรับปรุงวิธีการจับของเหลว และชุดหัวฉีด พร้อมกับยังถูกบีบด้วยปืนที่จับด้วยดินปืน ทำให้ลูกปืนมีความเร็วก่อนกระแทกสูงถึง 1900 m/s จากความสำเร็จในการศึกษาของ Bowden – Bruton [3] และ O'Keefe และคณะ [9] ทำให้นักวิจัยรุ่นหลังได้นำหลักการนี้ไปใช้เพื่อสร้างลำพู่ความเร็วสูงอย่างหลากหลาย แม้จะมีข้อแตกต่างกันบ้างในรายละเอียดการออกแบบ กำลังงานที่ใช้ขับเคลื่อน และวิธีจับของเหลว

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การสร้างลำพู่จากการกระแทก มีวิธีการจับของเหลวอยู่ 2 วิธี คือ แบบกระแทกและจับโดยตรง (Direct impact method, DIM) และ แบบกระแทกและจับผ่านตัวกลาง (Momentum exchange method, MEM) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



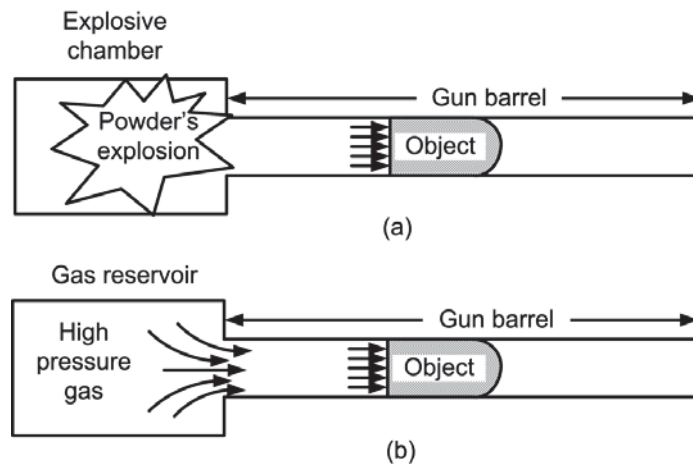
รูปที่ 2.3 การกำเนิดลำพู่ด้วยการกระแทกแบบ (a) จับตรง และ (b) จับผ่านตัวกลาง

การกระแทกและจับโดยตรง (DIM) เป็นวิธีสร้างลำพู่ด้วยการกระแทกแบบอย่างง่าย โดยการใช้วัตถุกระแทกลงบนของเหลวในหัวฉีดโดยตรงไม่ผ่านวัตถุตัวกลางใดๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (a) วิธีสร้างลำพู่ด้วยการกระแทกแบบที่สอง คือ แบบกระแทกและจับผ่านตัวกลาง (MEM) จะต่างจากวิธีแรก คือ แทนที่จะกระแทกลงบนของเหลวโดยตรง ลูกปืนจะกระแทกลงบนวัตถุอื่นก่อนจับของเหลวออกจากหัวฉีด เพื่อให้การจับของเหลวระหว่างฉีดลำพู่เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (b)

Shi และคณะ [4, 10, 11] ทำการศึกษาเปรียบเทียบคุณลักษณะเชิงพลศาสตร์ของการกำเนิดลำพู่ด้วยวิธีทั้งสองแบบ โดยวัดความเร็วลำพู่และความดันในหัวฉีด พบว่าการจับลำพู่ด้วยวิธี DIM จะให้แรงดันขับสูงกว่าแบบ MEM นอกจากนี้ การกำเนิดลำพู่ด้วย MEM ยังใช้เวลามากกว่าแบบ DIM ด้วยเหตุนี้ทำให้รูปแบบการเปลี่ยนแปลงความดันในหัวฉีด และรูปร่างลำพู่ที่เกิดจากทั้งสองวิธีมีความแตกต่างกันมาก

1.2.2 วิธีขับเคลื่อนให้มีความเร็ว

ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่าความเร็วของวัตถุที่กระทบบนของเหลว มีผลกับคุณลักษณะของลำพุ่ง ดังนั้นวิธีการขับเคลื่อนให้มีความเร็วจึงมีความสำคัญ โดยทั่วไปวัตถุจะถูกขับเคลื่อนให้มีความเร็วด้วยปืนสองประเภท คือ แบบดินปืน (Powder gun) และ แบบก๊าซ (Gas gun)



รูปที่ 2.4 วิธีการขับเคลื่อน (a) แบบแบบดินปืน และ (b) แบบก๊าซ

ปืนแบบดินปืน เป็นปืนหรือเครื่องมือสร้างวัตถุความเร็วสูง โดยใช้หลักการ ขยายตัวจากการจุดระเบิดของดินปืนและดันวัตถุให้มีความเร็ว [12] ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (a) เป็นวิธีที่ง่ายในการติดตั้ง ประหยัดค่าใช้จ่าย เนื่องจากเป็นหลักการที่ใช้กันอยู่แล้วในปืนจริง O'Keefe และคณะ [9] เป็นกลุ่มนักวิจัยแรกๆที่ใช้ ปืนแบบดินปืน มาประยุกต์สำหรับสร้างลำพุ่งความเร็วสูง โดยใช้ดินปืนไร้ควันในการยิงลูกปืนกระแทกน้ำในหัวฉีด ความเร็วลูกปืน ที่ได้จะอยู่ในช่วง 714 – 1900 m/s และต่อมา Piathong และคณะ [13] ได้นำวิธีการเดียวกันนี้มาใช้ศึกษาลำพุ่งความเร็วสูง ด้วยวิธีการนี้ ชุดทดลองจำเป็นต้องมีการปรับเทียบ ปริมาณดินปืนกับความเร็วของลูกปืนก่อนการทดลองเสมอ แต่อย่างไรก็ตาม การยิงด้วยดินปืน มีตัวแปรหลายอย่างที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอนในการทดลอง [1, 4] เช่น ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของดินปืน ความชื้นในดินปืน และความไม่สม่ำเสมอของการขยายตัวจากการระเบิดของดินปืน ด้วยเหตุเหล่านี้ทำให้การทดลองมีช่วงความคลาดเคลื่อนสูง ทำให้ในเวลาต่อมาจนถึงปัจจุบัน การขับเคลื่อนแบบดินปืนเพื่อสร้างลำพุ่งความเร็วสูงจึงไม่เป็นที่นิยม

ปืนแบบก๊าซ เป็นปืนที่ใช้แรงขับเคลื่อนจากการขยายตัวของก๊าซแรงดันสูง หลักการทำงานแสดงดังรูปที่ 2.4 (b) โดย ก๊าซแรงดันสูงจะบรรจุในถังเก็บ (Gas reservoir) ก่อนจะถูกปล่อยให้ขยายตัวและดันลูกปืนให้มีความเร็ว เริ่มแรกหลักการนี้ถูกนำไปยิงวัตถุ สำหรับศึกษาการกระทบของวัตถุความเร็วสูงบนวัสดุ เนื่องจาก การใช้ก๊าซเป็นตัวขับเคลื่อน สามารถควบคุมความดันและการขยายตัวได้อย่างแม่นยำมากกว่าการระเบิดของดินปืน [14, 15] ทั้งนี้ปืนแบบก๊าซยังสามารถแบ่งแยกออกเป็น

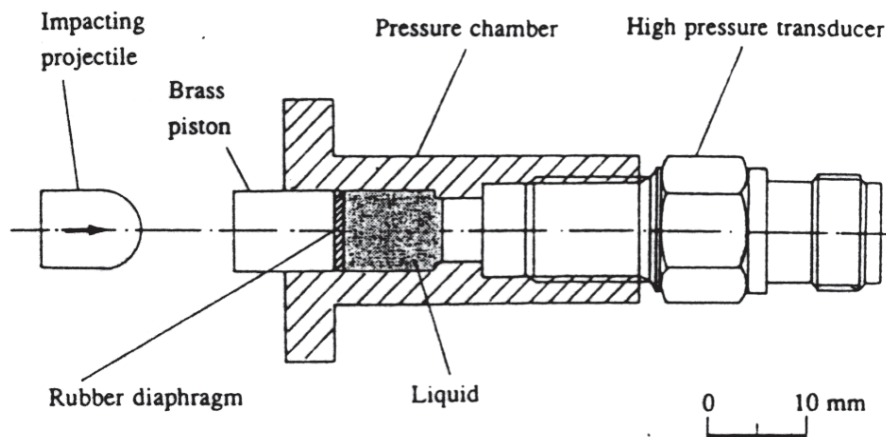
หลายประเภท ขึ้นอยู่กับการออกแบบ ประโยชน์การใช้งาน และงบประมาณการสร้าง ซึ่งปืนก๊าซเบาแบบสองต่อ (Two Stage Light Gas Gun, TSLG) จะเป็นชนิดที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุด ทั้งเพื่อการศึกษาการกระแทกของวัตถุหรือลำฟุ้งลำฟุ้งความเร็วสูงจากการกระแทก TSLG เป็นปืนที่มีวัตถุและท่อสองส่วน โดยส่วนที่หนึ่ง คือ ปัมความดัน ประกอบด้วยวัตถุเคลื่อนที่ (Piston) และท่อขับ (Pump tube) ทำหน้าที่สร้างก๊าซแรงดันสูงจากการเคลื่อนที่ด้วยก๊าซแรงดันสูงจากถังเก็บหรือในบางกรณีจะใช้แรงขับจากการระเบิดของดินปืน และส่วนที่สอง คือ ส่วนลำกล้องปืน ซึ่งจะทำหน้าที่ปล่อยลูกปืน (Projectile) ไปยังเป้าหมายที่ต้องการ ทั้งนี้ระหว่างส่วนทั้งสองจะแยกกันด้วยแผ่นไดอะแฟรม (Diaphragm) ซึ่งจะแตกหรือปล่อยก๊าซจากส่วนที่หนึ่ง เพื่อขับลูกปืน เมื่อแรงดันถึงจุดที่ต้องการ [16]

1.2.3 ความดันฉีดกับการกำเนิดลำฟุ้งด้วยวิธีการกระแทก

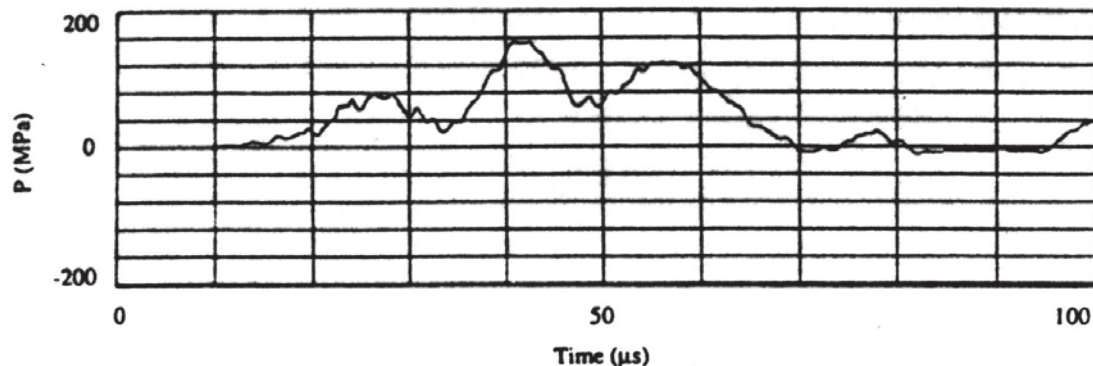
ที่ผ่านมา คุณลักษณะการไหลในหัวฉีด จากการกระแทกเพื่อสร้างลำฟุ้งความเร็วสูง เป็นประเด็นสำคัญที่นักวิจัยพยายามที่จะทำความเข้าใจและศึกษา วิจัยอย่างต่อเนื่อง ด้วยเหตุที่พฤติกรรมของการไหลในหัวฉีด ส่งผลต่อคุณลักษณะลำฟุ้งโดยตรงนั่นเอง การพิจารณาการของเหลวในหัวฉีด จะมีอิทธิพลของการอัดตัวได้ของของเหลวเข้ามาเกี่ยวข้องเสมอและเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลา ดังนั้นการไหลในหัวฉีดจึงเป็นการไหลแบบสภาวะไม่คงที่และอัดตัวได้ (Unsteady and compressible liquid flow) ซึ่ง O' Keefe และคณะ [9] เป็นกลุ่มนักวิจัยแรกๆ ที่พยายามอธิบายการเคลื่อนที่ของน้ำในท่อคอคอด โดยใช้ระบบสมการที่ประดิษฐ์จากสมการการไหลแบบสภาวะไม่คงที่และอัดตัวได้ในหนึ่งมิติ ต่อมาในปี ค.ศ. 1973 Ryhming [17] ได้ทำการศึกษาการไหลในหัวฉีดเช่นเดียวกับ O' Keefe แต่นิยามให้การไหลเป็นแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible liquid flow) โดยทั่วไปของไหลที่บรรจุในท่อคอคอดแล้วถูกกระแทกด้วยวัตถุความเร็วสูง จะเกิดช็อกในของเหลวและเคลื่อนที่ สะท้อนกลับไปกลับมาในหัวฉีด ซึ่งปรากฏการณ์นี้ส่งผลต่อลำฟุ้งที่ฉีดออกไปโดยตรง แต่อย่างไรก็ตามในงานวิจัยของ O' Keefe และ Ryhming ไม่ได้พิจารณาเงื่อนไขในการศึกษา ดังนั้น ในปี ค.ศ. 1977 Lesser [18] ได้เสนองานวิจัยที่เกี่ยวกับกลศาสตร์พื้นฐานของลำฟุ้งที่เกิดด้วยหลักการกระแทก โดยใช้ทฤษฎีการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียง (Guide acoustic waves) และแบบจำลองประดิษฐ์จากหลักการเคลื่อนที่ของช็อกในของเหลวเพื่อคำนวณหาความเร็วของลำฟุ้งที่เกิดจากการกระแทก

ในปี 1995 Shi และคณะ [10] ได้แสดงกระบวนการการสะท้อนของคลื่นช็อกในหัวฉีดในเทอมของรูปแบบความดันที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา พร้อมกับอธิบายผลกระทบของการสะท้อนของช็อกที่มีต่อคุณลักษณะของลำฟุ้งด้วย โดยอาศัยการทดลองและระเบียบวิธีเชิงตัวเลขช่วยในการศึกษา ชุดเครื่องมือวัดความดันในหัวฉีดของ Shi แสดงในรูปที่ 2.5 โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ ลูกปืน (Projectile) แท่งทองเหลือง (Brass piston) แผ่นยาง (Rubber diaphragm) ท่อบรรจุ

ของเหลว (Pressure chamber) และ แท่งวัดความดัน (Pressure transducer หรือ PVDF gauge) ซึ่งใช้วัดการเปลี่ยนแปลงความดันในหัวฉีดแท่งกดเคลื่อนที่ หลังการกระทบของลูกปืน ผลการศึกษาของ Shi แสดงดังรูปที่ 2.6 ซึ่งเป็นผลจากการกระทบของลูกปืนที่ความเร็ว 414 m/s พบว่าความดันมีค่าสูงสุดประมาณ 125 MPa และเปลี่ยนแปลงเป็นสัญญาณขึ้นลงถี่ครั้ง (Pressure pluses) ซึ่งเขาอธิบายว่าเกิดจากการเคลื่อนที่ของคลื่นช็อคในหัวฉีดระหว่างการกระทบของลูกปืน



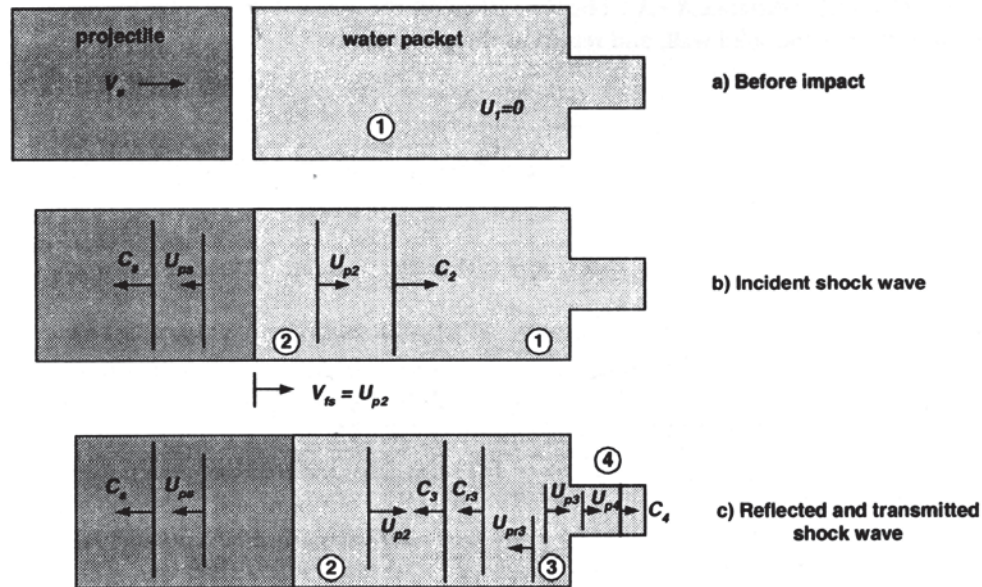
รูปที่ 2.5 ชุดเครื่องมือวัดความดันของ Shi [10]



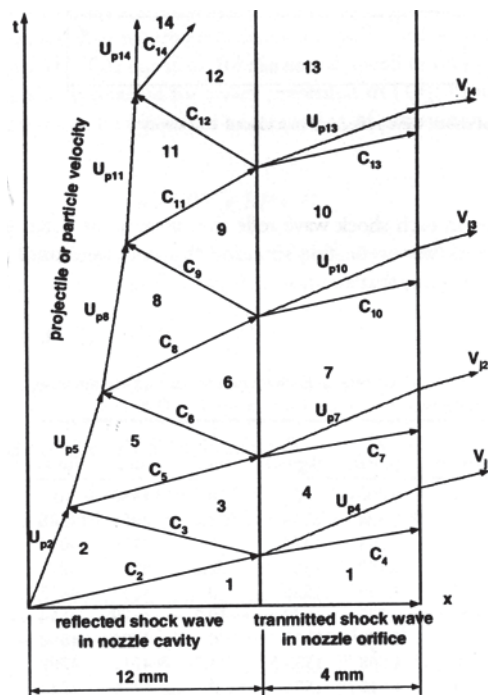
รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงความดันในหัวฉีดจากผลการศึกษาของ Shi

ต่อมา ในปี ค.ศ. 2003 Pianthong และคณะ[19] ได้เสนอแบบจำลองในหนึ่งมิติที่สามารถอธิบายการเคลื่อนที่ของคลื่นช็อคและความสัมพันธ์ระหว่างปรากฏการณ์ในหัวฉีดกับการกำเนิดลำพุ่งได้อย่างครอบคลุม โดยพิจารณาการเคลื่อนที่และการสะท้อนของช็อคเพื่อใช้หาค่าความดันของของน้ำและความเร็วของลำพุ่งที่ออกจากหัวฉีดแบบปาดตรง (Step nozzle) แผนภาพการเคลื่อนที่ของช็อคแสดงดังรูปที่ 2.7 จากรูป ระบบสมการของแบบจำลองจะถูกประดิษฐ์ ด้วยการพิจารณาสมการอนุรักษ์มวลและโมเมนตัมของลูกปืนและการเคลื่อนที่ของอนุภาค รูปที่ 2.8 แสดงแผนภูมิคลื่นช็อคและการกำเนิดลำพุ่งที่เปลี่ยนแปลงตามระยะทางและเวลา (x-t diagram) จะเห็นได้ว่า ผล

จากคลื่นช็อกในหัวฉีด ทำให้ลำพุงมีลักษณะออกจากหัวฉีดเป็นลูกๆ ซึ่งคุณสมบัติและค่าตัวแปรที่สำคัญในบริเวณที่แสดงในรูปที่ 2.8 ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1 โดยเป็นค่าที่ได้จากการกระทบของลูกปืนความเร็ว 1100 m/s บนน้ำที่บรรจุในหัวฉีดที่มีอัตราส่วนคอขวด 64:1 จะเห็นได้ว่าความเร็วและความดันของลำพุงจะสูงขึ้นเรื่อยๆตามการสะท้อนของคลื่นช็อก



รูปที่ 2.7 แผนภาพการเคลื่อนที่ของคลื่นช็อกในหัวฉีดของ Pianthong และคณะ [19]

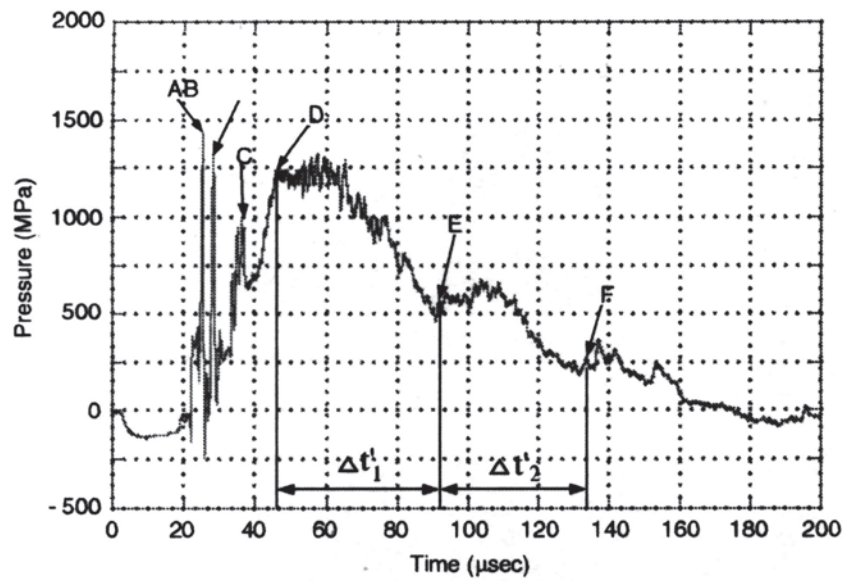


รูปที่ 2.8 แผนภูมิ x-t ของการเคลื่อนที่ของช็อกในหัวฉีดแบบบ่าของ Pianthong และคณะ [13]

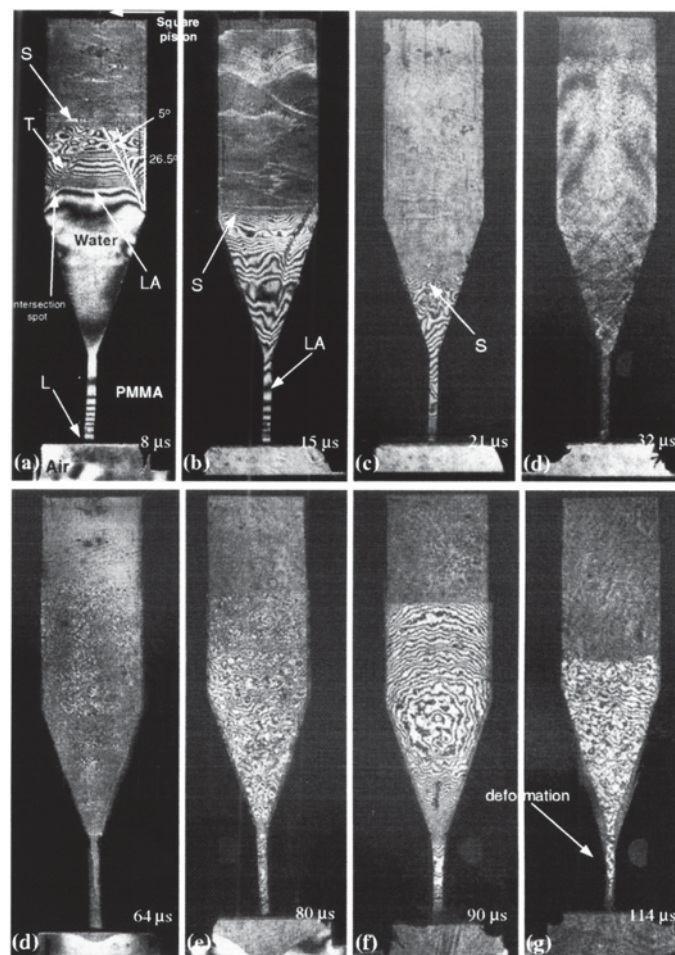
ตาราง 2.1 คุณสมบัติและค่าตัวแปรต่างๆแกน x-t ของ Pianthong และคณะ [13] ที่ความเร็วลูกปืน 1100 m/s และหัวฉีดป่าตรงที่มีอัตราส่วนคอขวด 64:1

Region	P (GPa)	ρ (kg/m ³)	U_p (m/s)	a (m/s)	C (m/s)	V_j (m/s)
1	0.0001	1000	0	1480	0	—
2	1.323	1261	523.3	2550	2527	—
3	3.625	1472	12.2	4084	3048	—
4	2.662	1480	840.9	3493	3162	2219
5	4.081	1498	73.3	4339	4231	—
6	4.558	1523	2.1	4588	4408	—
7	4.517	1532	199	4567	3891	2447
8	4.633	1526	10.6	4625	4609	—
9	4.706	1530	0.3	4661	4635	—
10	4.705	1539	31.5	4661	4630	2481
11	4.718	1530	1.62	4667	4665	—
12	4.729	1531	0.05	4673	4669	—
13	4.729	1541	4.9	4673	4670	2486

เนื่องจากการศึกษาของ Shi และการวิเคราะห์ของ Pianthong ยังมีข้อจำกัดด้านอุปกรณ์การทดลองและการลดความยุ่งยากของแบบจำลอง ตามลำดับ ดังนั้น Mutthujak และ คณะ [5] จึงได้ทำการทดลองที่ใกล้เคียงกับความจริงที่เกิดขึ้นระหว่างการกำเนิดลำพู่ด้วยการกระแทก โดยทำการวัดความดันที่ปากทางออกหัวฉีด และถ่ายภาพด้วยเทคนิค โฮโลกราฟีค อินเตอร์เฟอโรเมตริก (Holographic interferometric) เพื่อจับปรากฏการณ์ในหัวฉีดป่ากรวย (Conical nozzle) ระหว่างลูกปืนเคลื่อนที่เพื่อสร้างลำพู่ ผลของกราฟความดันแสดงดังรูปที่ 2.9 และภาพแสดงคลื่นช็อคในหัวฉีดขณะกำเนิดลำพู่ แสดงดังรูปที่ 2.10 จากรูปทั้งสอง พบว่าให้ผลสอดคล้องกัน โดยสัญญาณความดันจะมีลักษณะขึ้นลงหลายครั้ง Mutthujak ได้แบ่งสัญญาณของช็อคหรือคลื่นที่วัดได้ออกมาจากสองส่วน คือ จากคลื่นความเค้นของวัสดุที่ใช้บรรจุของเหลวหรือหัวฉีด ดังแสดงตำแหน่ง A B และ C ในรูปที่ 2.9 และ คลื่น L LA และ T ในรูป 2.10(a) และ จากคลื่นช็อคในของเหลว ที่ตำแหน่ง D E และ F ในรูปที่ 2.9 และคลื่น S ในรูป 2.10 (a-c)



รูปที่ 2.9 รูปแบบความดันในหัวฉีดจากการศึกษาของ Mutthujak และ คณะ [5]



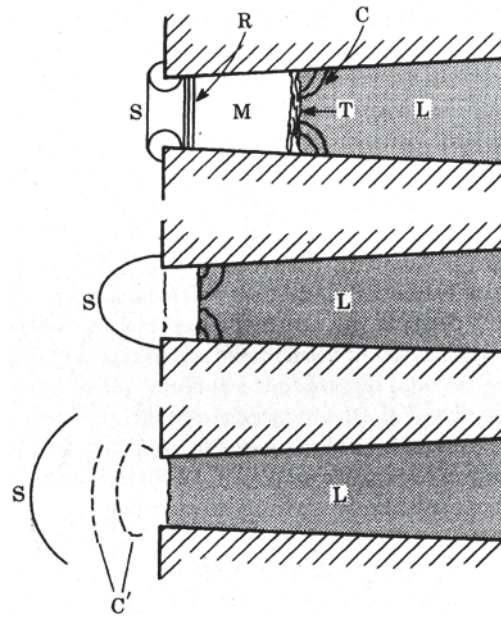
รูปที่ 2.10 คลื่นช็อคในหัวฉีดขณะกำเนิดลำพ่น จากการศึกษากอง
Mutthujak และ คณะ [5]

1.2.4 คุณสมบัติของลำพุงที่เกิดด้วยวิธีการกระแทก

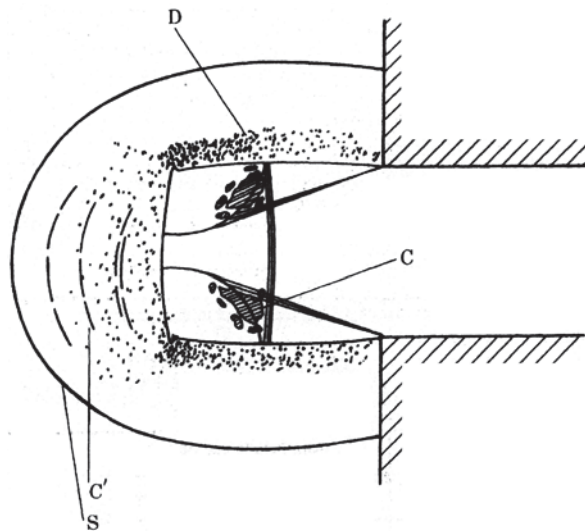
โดยทั่วไปคุณสมบัติของลำพุงที่มีการศึกษากันอยู่อย่างกว้างขวางและมีการเผยแพร่ในปัจจุบัน จะเป็นลำพุงที่เกิดจากเครื่องมือกลหรือปั๊มแรงดันสูงเป็นส่วนใหญ่ ในขณะที่ลำพุงที่เกิดด้วยวิธีการกระแทกยังมีการทำวิจัยและศึกษากันน้อยมาก อย่างไรก็ตามมีนักวิจัยหลายกลุ่มที่ทำการศึกษาเฉพาะเจาะจงถึงคุณสมบัติของลำพุงที่เกิดด้วยการกระแทก ซึ่งลำพุงที่เกิดด้วยวิธีการนี้จะมีคุณสมบัติหลายประการที่แตกต่างจากลำพุงที่ผลิตจากปั๊ม เช่น ลำพุงมีลักษณะฉีกครั้งเดียว การกำเนิดลำพุงเกิดขึ้นเร็วและใช้เวลาที่สั้นมาก มีปัจจัยของของไหลที่ถูกกดอัดเข้ามาเกี่ยวข้องและลำพุงมักจะมีความเร็วสูงมาก

Field และ Lesser [20] เป็นนักวิจัยกลุ่มแรกๆ ที่ได้พยายามอธิบายการกำเนิดลำพุงจากการกระแทก โดยแบ่งพิจารณากระบวนการออกเป็นสามช่วง ได้แก่ การไหลผ่านหัวฉีดของของเหลว ลำพุงเริ่มออกจากหัวฉีด และลำพุงเริ่มแตกตัวในอากาศ และนำทฤษฎีการไหลของของไหลที่อัดตัวได้แบบสองสถานะ มาพิจารณาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นระหว่างการไหลของลำพุง

ตามนิยามของ Field และ Lesser [20] ช่วงการไหลผ่านหัวฉีดของของเหลวที่ถูกกระแทกด้วยลูกปืนของเหลวจะถูกขับให้ออกจากหัวฉีด ผ่านทางท่อขนาดเล็กและสามารถแบ่งของไหลออกเป็นโซนได้ตามรูปที่ 2.11 หลังจากการกระแทกของลูกปืน ของเหลวจะไหลเข้าสู่ท่อทรวงขนาดเล็กด้วยความเร็วและความหนาแน่นสูง (L) ซึ่งด้านหน้าของของเหลวจะมีอากาศกับไอของเหลวที่ถูกบีบอัดผสมกันอยู่ (Compressed air and droplets, M) และเกิดบริเวณปะทะกันระหว่างของเหลวกับก๊าซ (Frontal compression zone, T) บริเวณนี้จะมีมีความดันสูง และเกิดคลื่นสะท้อนที่มุมของเหลว (Corner compression signals, C) ขณะที่ของเหลวเคลื่อนที่เข้าไปในหัวฉีด อากาศที่อยู่ด้านหน้าก๊าซผสมจะถูกกระเบาออกเป็นกลุ่มคลื่น (Air relief waves, R) และเริ่มมีคลื่นช็อคในอากาศเกิดขึ้นด้านนอกหัวฉีด (S) เมื่อก๊าซออกจากหัวฉีดจะเหนี่ยวนำให้มีอากาศและไอของเหลวออกมาก่อนเมื่อของเหลวออกจากหัวฉีดความดันที่เกิดจากการอัดจะคลายตัวและเมื่อของเหลวปะทะกับแรงต้านจากอากาศภายนอกหัวฉีด ของเหลวจะมีการเปลี่ยนสถานะ ซึ่งรูปแบบการไหลและโซนของของไหล ตามนิยามของ Field และ Lesser ได้แสดงไว้ในดังรูปที่ 2.12 โดยมีไอของเหลวอยู่รอบๆ (D) ถ้าของของเหลว มีคลื่นช็อคในอากาศ (S) และกลุ่มของคลื่นอัด (C') นำหน้าลำพุงออกมา เมื่อลำพุงเคลื่อนที่ออกห่างจากหัวฉีดได้ระยะทางที่เหมาะสมคลื่นช็อคจะหายไป และของเหลวจะเริ่มแตกตัวเนื่องจากแรงต้านของอากาศ กระบวนการนี้จะคงอยู่จนกว่าของเหลวในหัวฉีดจะหมดไป



รูปที่ 2.11 การไหลผ่านหัวฉีดของของเหลวเนื่องจากการกระแทกของลูกปืน

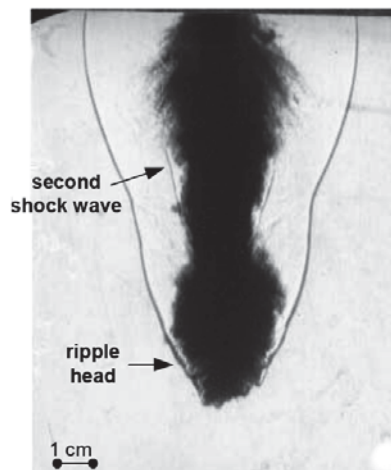


รูปที่ 2.12 รูปแบบการไหลของลำพุ่งที่เริ่มออกจากหัวฉีด

จะเห็นได้ว่าลักษณะการวิเคราะห์การไหลตามทฤษฎีของ Field และ Lesser [20] นั้นมีความยุ่งยากและซับซ้อนมาก เป็นอุปสรรคสำหรับการนำไปใช้งานจริง ดังนั้นเพื่อให้ง่ายขึ้น ในปี ค.ศ. 1995 Lesser [18] ได้เสนอความสัมพันธ์แบบสมการเดียวระหว่าง ความเร็วลำพุ่ง ความเร็วของลูกปืน และรูปร่างหัวฉีด ดังสมการที่ (2.1) โดยพิจารณาการไหลของของเหลวเป็นแบบอัดตัวไม่ได้

$$V_j = \frac{4 \times V_i}{(1 + d/D)} \quad (2.1)$$

เมื่อ V_j เป็น ความเร็วของลำพุ่ง V_i เป็นความเร็วของลูกปืน D และ d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อและคอของหัวฉีด ตามลำดับ สมการ (2.1) และทฤษฎีของ Field และ Lesser เป็นรากฐานสำคัญในการประยุกต์ใช้ลำพุ่งสำหรับการตัดหรือเจาะวัสดุ ที่นักวิจัยรุ่นต่อมาได้นำมาพัฒนาต่อยอดกันอย่างกว้างขวาง แต่อย่างไรก็ตามทฤษฎีเหล่านี้ก็ไม่ได้พิจารณาอิทธิพลของการไหลในหัวฉีดที่มีต่อลำพุ่ง ซึ่งในความเป็นจริง การเคลื่อนที่ของชอคในหัวฉีดจะมีผลต่อลำพุ่งที่ถูกฉีดออกมา ซึ่งโดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นชุดหรือลูกๆ (Pulsed jets) ลำพุ่งลักษณะนี้ถูกถ่ายภาพได้เป็นครั้งแรกในการศึกษาของ Pianthong และคณะ [13] ดังแสดงในรูปที่ 2.13 จะสังเกตเห็นว่าเกิดคลื่นชอคของอากาศรอบลำพุ่งมากกว่าหนึ่งครั้ง นอกจากนี้ พวกเขาได้ทำการยืนยันผลในการศึกษาต่อมา [5, 19, 21-24] โดยอาศัยการทดลองจากการถ่ายภาพด้วยความเร็วสูงและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในหนึ่งมิติ ซึ่งเป็นที่แน่ชัดว่าลักษณะลำพุ่งที่ออกจากหัวฉีดเป็นลูกๆ มีสาเหตุจากการสะท้อน และเคลื่อนที่ของชอคในของเหลวระหว่างการกำเนิดลำพุ่ง



รูปที่ 2.13 ลำพุ่งความเร็วสูงที่ออกเป็นลูก [13]

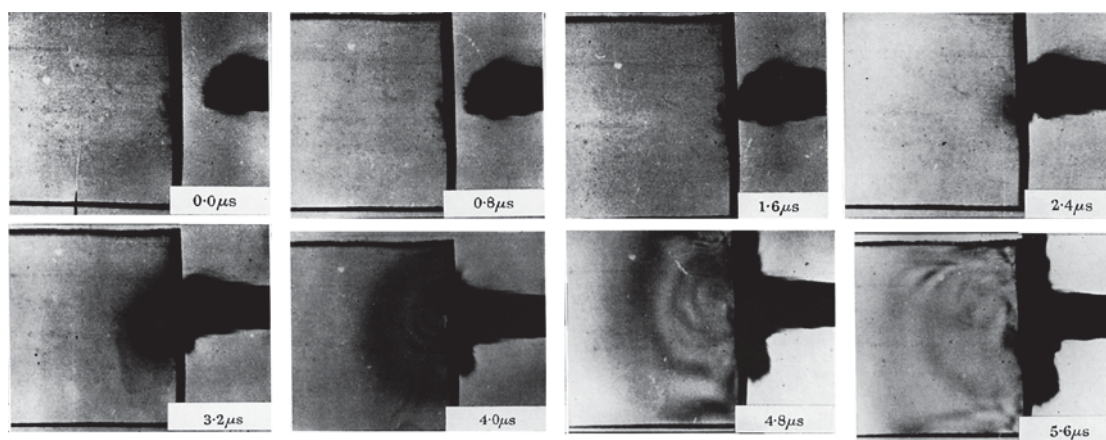
1.2.5 การกระแทกของลำพุ่งความเร็วสูงที่เกิดด้วยวิธีการกระแทก

การศึกษากการผุกร่อนของวัสดุจากการกระแทกของของเหลวความเร็วสูง (ทั้งที่เป็นเม็ดและลำพุ่ง) มีความสำคัญกับการพัฒนาและประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีหลากหลายด้าน เช่น เทคโนโลยีการตัดวัสดุ การผุกร่อนของผิวเครื่องบินจากเม็ดฝนขณะทำการบิน และการเสียหายของใบจักรกังหันที่หมุนด้วยความเร็วสูง

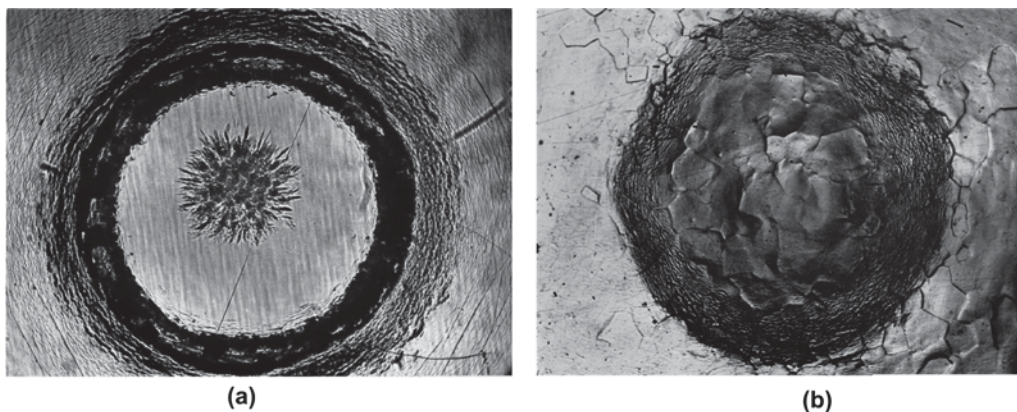
ภายใต้มุมมองสำหรับงานตัดหรือเจาะหิน ในปี ค.ศ. 1966 Leach และ Walker [25] ได้เสนอผลศึกษาการกระแทกของลำพุ่งน้ำที่มีความเร็วประมาณ 1000 m/s พบว่า ประสิทธิภาพการเจาะของลำพุ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของหิน ความดันฉีด มุมฉีด รูปร่างหัวฉีดและระยะห่างจากชิ้นงาน ต่อมา มีนักวิจัยหลายกลุ่มได้ทำการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยเหล่านั้น ที่มีต่อคุณลักษณะการเจาะหิน

ของลำพุง [26-33] เพื่อหาค่าหรือความสัมพันธ์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับนำไปใช้จริง ซึ่งผลจากการศึกษาเหล่านี้ ทำให้เทคโนโลยีการตัดหรือเจาะวัสดุด้วยลำพุงความเร็วสูง ข้ามการศึกษาและพัฒนาไปสู่การผลิตเพื่อจำหน่ายและแข่งขันกันในตลาด แต่อย่างไรก็ตาม ลำพุงของงานตัดวัสดุในปัจจุบันเป็นแบบฉีดต่อเนื่อง และความดันฉีดมีขีดจำกัด (สูงสุดได้ประมาณ 700 MPa) เพราะข้อจำกัดของเครื่องมือกลในการสร้างแรงดันขับ

ดังนั้นเพื่อการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับการตัดหรือเจาะวัสดุด้วยความดันฉีดที่สูงมากๆ นักวิจัยจำเป็นต้องนำหลักการสร้างลำพุงด้วยการกระแทกมาใช้ ซึ่งด้วยวิธีดังกล่าวสามารถสร้างแรงดันฉีดและความเร็วได้สูงถึงระดับ GPa และ เกินความเร็วเสียง ตามลำดับ ความเสียหายของผิววัสดุจากการกระแทกของลำพุงความเร็วสูง สามารถแบ่งออกเป็น 5 ลักษณะ [3] คือ ผิวแตกเป็นวง (Circumferential surface fracture) ผิวไหลและแตก (Surface flow and fracture) เสียรูปแบบพลาสติกเป็นบริเวณกว้าง (Large-scale plastic deformation) เสียรูปแบบเฉือนรอบบริเวณกระแทก (Shear deformation around the periphery of the impact zone) และแบบเสียหาย (Fracture) ทั้งนี้จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพอสรุปได้ว่า [34-39] รอยแตกบนวัสดุเกิดจากภาวะ 3 อย่างได้แก่ แรงกระแทกและคลื่นช็อคจากและในลำพุง แรงเฉือนจากการไหลของลำพุง และคลื่นความเค้นในของแข็งที่เกิดจากการกระแทกของลำพุง ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ซึ่งเป็นการกระแทกของลำพุงบนแผ่น Polymethylmethacrylate (PMMA) จะเห็นได้ว่า ผิววัสดุต้องรับการกระแทกของลำพุง การไหลของของเหลวหลังกระแทก (จากช่วง 3.2 μ s เป็นต้นไป) และคลื่นความเค้นใน PMMA (จากช่วง 4.0 ถึง 5.6 μ s เป็นต้นไป) รูปที่ 2.15 แสดงรอยแตกจากการกระแทกของลำพุงความเร็วสูง จะเห็นว่า เกิดรอยแตกแตกต่างกันระหว่างวัสดุต่างชนิดกัน นอกจากลักษณะของรอยแตกจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุแล้ว ยังมีอีกหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้อง [40] เช่น คุณสมบัติของของเหลว ความเร็ว และระยะห่างของการกระแทก เป็นต้น



รูปที่ 2.14 การกระแทกของลำพุงความเร็วสูงบน PMMA ที่ความเร็วลำพุง 680 m/s [34]

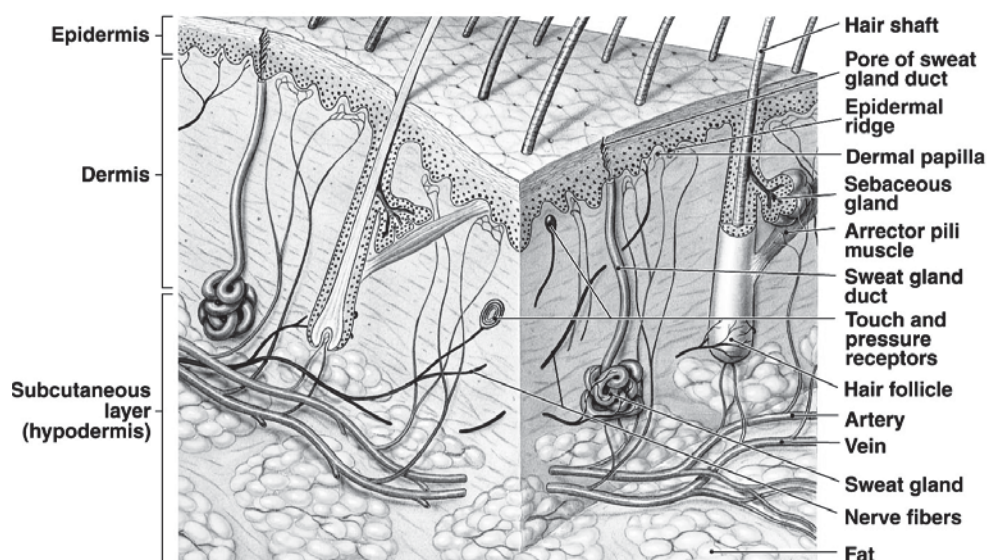


รูปที่ 2.15 ความเสียหายจากการกระแทกของลำพุ่งความเร็วสูง (950 m/a) บนผิว
(a) PMMA และ (b) อลูมิเนียม [34]

1.3 ลำพุ่งความเร็วสูงที่สร้างด้วยวิธีการกดสำหรับนำส่งยาผ่านผิวหนัง

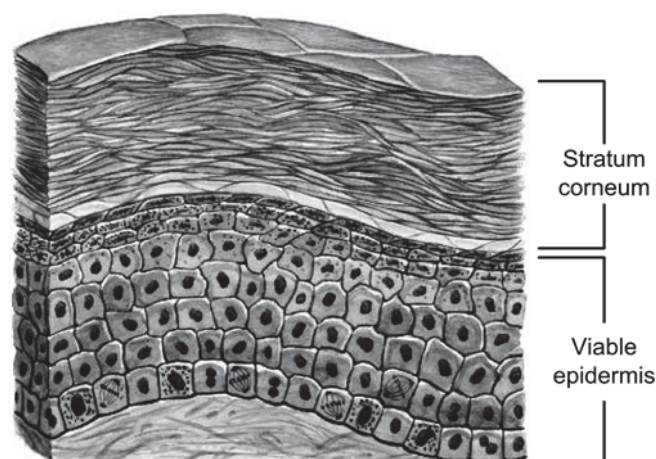
1.3.1 ลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกลของชั้นผิวหนัง

ผิวหนังเป็นส่วนหนึ่งของระบบปกคลุมร่างกาย (Integumentary system) ซึ่งโครงสร้างของผิวหนังประกอบด้วย 3 ชั้น ได้แก่ ชั้นนอกสุดเรียกว่าหนังกำพร้า (Epidermis) ชั้นที่อยู่ล่างลงไปเรียกว่า หนังแท้ (Dermis) ชั้นที่อยู่ใต้หนังแท้ลงไปเรียกว่า ชั้นใต้ผิวหนัง (Subcutaneous หรือ Hypodermis) ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ผิวหนังมีความหนาตั้งแต่ 0.1 – 4 mm เฉลี่ยประมาณ 1.5 mm ขึ้นอยู่กับว่าอยู่บริเวณใดของร่างกาย ผิวหนังเป็นอวัยวะที่ประกอบด้วย เซลล์เนื้อเยื่อ หลายชนิด จึงเป็นอวัยวะที่นิยมใช้สำหรับนำส่งยา โดยเฉพาะด้วยการฉีด เพราะร่างกายสามารถดูดซึมได้โดยตรงผ่านเซลล์เหล่านี้



รูปที่ 2.16 โครงสร้างและชั้นผิวหนังของร่างกาย [41]

ชั้นหนังกำพร้า มีหน้าที่สำคัญคือป้องกันเชื้อโรคเข้าสู่ร่างกาย และป้องกันของเหลวออกจากร่างกายผิวนอก โดยทั่วไปชั้นหนังกำพร้าจะมีความหนาอยู่ที่ประมาณ 0.007-0.12 mm [42] ประกอบด้วยอีก 2 ชั้นย่อย คือ ชั้นเซลล์ที่ตายแล้ว (Stratum corneum) เป็นบริเวณที่บวมของเซลล์รูปร่างสี่เหลี่ยมยาว 30 - 40 μm และหนา 0.5 μm โดยรวมจะมีความหนาประมาณ 15-20 μm และชั้นเซลล์ที่ยังมีชีวิต (Viable epidermis) ซึ่งเป็นชั้นมีเซลล์หลายชนิดเป็นโครงสร้าง มีความหนาแตกต่างกันไปตามแต่บริเวณ อาทิบริเวณที่แขน มีความหนาเฉลี่ย 56.6 μm และบริเวณที่หัวไหล่ มีความหนาเฉลี่ยประมาณ 70.3 μm [43]



รูปที่ 2.17 ชั้นย่อยของหนังกำพร้า

ชั้นหนังแท้ เป็นชั้นของผิวหนังที่อยู่ใต้หนังกำพร้าประกอบด้วยเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน เพื่อลดการกระแทกจากแรงดึงต่างๆ หนังแท้ยึดติดกับหนังกำพร้าอย่างแน่นหนาโดยเยื่อฐาน (Basement membrane) และมีปลายประสาทมากมาย ในหนังแท้มีต่อมและท่อมากมาย เช่น ต่อมเหงื่อ (Sweat gland) ต่อมไขมัน (Sebaceous gland) และหลอดเลือด (Blood vessel) ความหนาของชั้นหนังแท้ จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งบนร่างกาย โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.1 mm

ชั้นใต้ผิวหนัง เป็นชั้นที่อยู่ระหว่างผิวหนังกับกล้ามเนื้อ ประกอบไปด้วย เซลล์ ไขมัน เป็นหลัก ทำหน้าที่ป้องกันอวัยวะส่วนอื่นๆ ใต้ผิวหนัง ช่วยทำให้ผิวหนังมีความหนาและนุ่ม ซึ่งคนที่รูปร่างอวบจะเห็นได้ชัดกว่าคนที่รูปร่างผอม ความหนาของชั้นนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณไขมันของแต่ละบุคคล ตำแหน่งบนร่างกาย โดยทั่วไปจะหนามากกว่า 1 mm

คุณสมบัติเชิงกลของชั้นผิวหนังต่างๆจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย หลายอย่าง เช่น ความชื้น อุณหภูมิ และตำแหน่งของชั้นผิวหนัง เป็นต้น ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติเชิงกลของชั้นผิวหนัง จากผลการศึกษาของ Geerligns [43] โดยคุณสมบัติที่แสดง คือ ค่ามอดุลัสของยัง (Young's Modulus) ที่เกิดจากการทดสอบด้วยแรงเฉือน (Shear) และแรงดึง (Tensile) โดยทดสอบแบบนอกสิ่งมีชีวิต (In vitro) กับผิวหนังส่วนท้อง

ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติเชิงกลของชั้นผิวหนัง [43]

Layer	Conditions	Young's Modulus [kPa]	
		Shear	Tensile
Stratum corneum	25% RH	30	$0.04 - 10 \times 10^6$
	98% RH	10	$6 - 10 \times 10^4$
Viable epidermis	25% RH	30	-
	98% RH	10	-
Dermis	-	8	$1 - 20 \times 10^3$
Hypodermis	-	24	-

นอกจากค่า Young's Modulus แล้วที่บ่งบอกความแข็งแรงของผิวหนังแล้ว ในการฉีดด้วยลำพุ่งความเร็วสูง จะมีค่าความดันเจาะ (Threshold pressure or penetration pressure) เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย โดยเป็นความดันพลศาสตร์ของลำพุ่งที่น้อยที่สุดที่สามารถเจาะผิวหนังให้ทะลุได้ จากการศึกษาของ Oliver และคณะ [44] พบว่าที่ลำพุ่งเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 – 0.5 mm ผิวหนังมนุษย์หรือเนื้อหมูจะมีความดันเจาะประมาณ 1.5×10^4 kPa

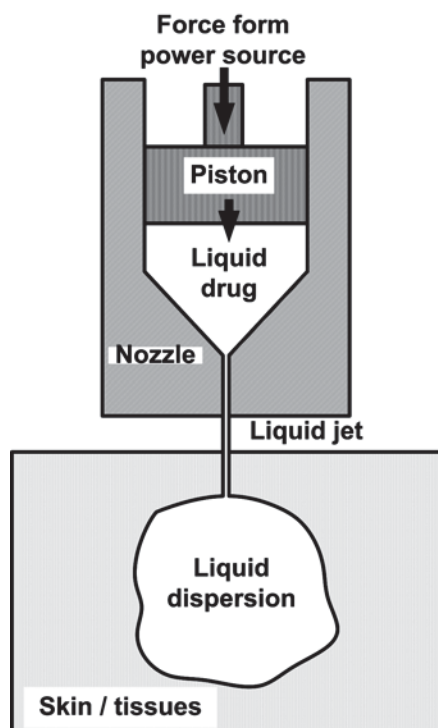
1.3.2 การนำส่งยาผ่านผิวหนังด้วยลำพุ่งความเร็วสูง

โดยทั่วไปการฉีดด้วยเข็ม สามารถแบ่งเป็น 3 ประเภท ตามตำแหน่งของความลึกของการฉีด คือ แบบที่ 1 การฉีดที่ผิวหนัง (Intradermal injection) เป็นการฉีดให้ยาแพร่กระจายที่ชั้นหนังกำพร้าหรือชั้นหนังแท้ แบบที่ 2 การฉีดที่เนื้อเยื่อ (Subcutaneous or hypodermis injection) เป็นการฉีดที่มีเป้าหมายอยู่ที่ชั้นใต้ผิวหนัง และ แบบที่ 3 การฉีดที่กล้ามเนื้อ (Intramuscular injection) มีเป้าหมายในการฉีดเข้ากล้ามเนื้อ ซึ่งเป็นชั้นที่อยู่ลึกลงไปต่ำกว่าชั้นใต้ผิวหนัง

การนำส่งยาด้วยลำพุ่งความเร็วสูงสามารถที่จะแบ่งลักษณะตามความลึกของการฉีด การเจาะได้เช่นเดียวกับการฉีดแบบทั่วไป แต่เปลี่ยนจากการใช้เข็มเป็นลำพุ่งความเร็วสูงแทน การฉีดด้วยวิธีนี้เริ่มมีการใช้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1940 [6] หลักการนำส่งยาด้วยลำพุ่งแสดงดังรูปที่ 2.18 โดยแท่งกวดที่รับแรงจากจากแหล่งต้นกำลัง อัดยาที่เป็นของเหลวในหัวฉีดให้มีแรงดันสูงขึ้น และสร้างลำพุ่งความเร็วสูง เพื่อเจาะผิวหนัง พร้อมกับการนำส่งยาไปยังตำแหน่งที่ต้องการ ทัวไปแล้วแหล่งกำลังงานของอุปกรณ์จะได้จากสปริงหรือก๊าซความดันสูง

การฉีดด้วยหลักการนี้ มีข้อดีหลายประการ ได้แก่ สามารถประยุกต์ใช้กับยาที่ฉีดด้วยเข็มได้โดยไม่ต้องมีการปรับเปลี่ยนสภาพของยา จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า สามารถจ่ายยาให้กับผู้ป่วยได้ในปริมาณมากในเวลาอันสั้น [7] สามารถออกฤทธิ์ได้ดีกว่าแบบฉีดด้วยเข็ม เนื่องจากการกระจายของยาดีกว่า [7, 8] ซึ่งจากการศึกษาของ Baxter และคณะ [45, 46] พบว่าการฉีดด้วยลำพุ่ง

ความเร็วสูง ยาจะกระจายเป็นวงกว้าง ทำให้พื้นที่สัมผัสระหว่างเนื้อเยื่อและยามีมากกว่าแบบใช้เข็มทั่วไป อีกทั้งรอยแผลจากการฉีดจะมีขนาดเล็กมาก อยู่ในระดับไมโครเมตร



รูปที่ 2.18 หลักการฉีดยาด้วยลำพุ่งความเร็วสูง

แต่อย่างไรก็ตาม การฉีดด้วยลำพุ่งความเร็วสูงยังถือว่าเป็นเทคโนโลยีใหม่ และยังมีการพัฒนา มาได้ไม่นาน ทำให้การฉีดด้วยลำพุ่งความเร็วสูง มีข้อเสียและมีอุปสรรคในด้านการแข่งขันกับ การฉีดยาแบบทั่วไปอยู่ เช่น ราคาของอุปกรณ์ที่มีราคาแพง บางการศึกษาพบว่า ระดับความเจ็บจาก การฉีดมีสูงกว่าแบบใช้เข็มทั่วไป [47, 48] ในขณะที่การติดเชื้อของผู้ป่วยจากการใช้อุปกรณ์ร่วมกัน ก็ยังเกิดขึ้น เพราะการฉีดด้วยลำพุ่งของเหลวที่มีความเร็วสูงมากๆ การกระแทกผิวหนังทำให้ เกิด การกระเด็นของเลือดจากผู้ป่วยติดไปกับอุปกรณ์ ซึ่งเป็นสาเหตุของการติดเชื้อ [6, 7, 49, 50] นอกจากนี้ ยังไม่เป็นที่แน่ชัดว่าแรงกดอัดหรือแรงเฉือนจากกระบวนการส่งถ่ายมีผลกับ ประสิทธิภาพของยาหรือไม่ เนื่องจากตัวยาบางชนิดเป็นสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก จากเหตุนี้อาจทำให้ ประสิทธิภาพของยาลดลงได้ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากมีปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการฉีด มากมาย ทำให้การศึกษาค้นคว้าจากนักวิจัยปรับปรุงอุปกรณ์และประเมินประสิทธิภาพ ยังมีอยู่อย่าง ต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน

1.3.3 อุปกรณ์นำส่งยาด้วยลำพุ่งความเร็วสูง

ปัจจุบันผลิตภัณฑ์สำหรับฉีดด้วยลำพุ่งความเร็วสูงที่จำหน่ายในท้องตลาด มีมากมายหลายประเภท ซึ่งข้อมูลเบื้องต้นของอุปกรณ์ฉีดที่มีจำหน่ายในท้องตลาด ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.3 [44, 51] จะเห็นได้ว่า อุปกรณ์เหล่านี้มีทั้งที่สามารถฉีดได้ครั้งเดียวต่อการบรรจุยาหนึ่งครั้ง หรือฉีดได้หลายครั้งต่อการบรรจุยาครั้งเดียว รูปลักษณะภายนอกและกลไกการทำงานภายใน ปริมาณขนาดบรรจุยา แตกต่างกันไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการใช้งานและแนวคิดการออกแบบ จะเห็นว่าอุปกรณ์นำส่งยาด้วยลำพุ่งความเร็วสูงสามารถนำส่งยาได้ทุกประเภทเช่นเดียวกับเข็มฉีดยาทั่วไป มีข้อสังเกตว่าแหล่งกำลังงานของอุปกรณ์มีเพียงสองประเภทเท่านั้นที่ใช้กัน คือ แบบก๊าซ และแบบสปริง

อุปกรณ์ที่ใช้สปริงและก๊าซเป็นกำลังจะมีข้อด้อย คือ ความแม่นยำในการควบคุมลำพุ่ง และความลึกหลังการเจาะ ทำให้ตำแหน่งการฉีดเกิดความไม่แน่นอนและเกิดความเจ็บปวดระหว่างการฉีด ดังนั้นจึงมีการพยายามใช้ระบบไฟฟ้าเข้ามาควบคุมการฉีด เช่น ผ่าน Actuator [52, 53] หรือ Piezoelectric transducer [54-56] ที่จะทำหน้าที่ขับเคลื่อนสปริงหรือก๊าซ กรณีที่ใช้ Piezoelectric นั้น ลำพุ่งจะมีความเร็วอยู่ระหว่าง 50 – 160 m/s และมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 40 – 130 μm ด้วยหลักการนี้ สามารถควบคุมความเร็วและระยะเจาะของลำพุ่งได้อย่างแม่นยำ แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากลำพุ่งที่มีขนาดเล็กและมีความเร็วไม่สูงทำให้วิธีนี้สามารถประยุกต์ใช้กับการนำส่งยาได้เฉพาะการฉีดที่ตำแหน่งบนชั้นผิวหนัง (Intradermal injection) เท่านั้น อีกทั้งอุปกรณ์ยังอยู่ในขั้นตอนของการศึกษาวิจัย ยังไม่มีจำหน่ายในท้องตลาด

ตารางที่ 2.3 ข้อมูลเบื้องต้นของอุปกรณ์การฉีดด้วยลำพุ่งที่มีจำหน่ายในท้องตลาด [44, 51]*

Company	Injector name	Disposable nozzle	Energy source	Drug	Delivery location
Bioject	Vitajet	yes	Spring	Insulin	SC
Bioject (With serano)	SeroJet	yes	Spring	Serostim	SC
Bioject	Biojector 2000	yes	Gas (CO ₂)	Wide range	SC, IM
Bioject (With saizen)	Cool.Click	yes	Spring	GH	SC
Bioject	Iject	NA	Gas	Wide range	ID, SC,IM
Bioject	ZetaJet	yes	Spring	Vaccines	SC,IM
Antares Pharma	Medi-Jector VISION	yes	Spring	Insulin	SC
Antares Pharma	Medi-Jector Choice	yes	Spring	Insulin	SC
Antares Pharma	MJ6	yes	Spring	Insulin	SC
Injex	Injex	yes	-	Insulin and GH	SC
Active Brand Product	AdvacetaJet	no	Spring	Insulin	SC

Active Brand Product	GentleJet	no	Spring	Insulin	SC
Active Brand Product	AdvacetaJet ES	no	Spring	Insulin	SC
Mada Medical Products	MadaJet XL Medical	no	Spring	Anestasia	All
Mizzy and Keystone Ind.	SytiJet Mark II	no	Spring	Anestasia	Dental
R.P. Schere Corp.	Hyprospray	no	Spring	Insulin	SC
R.P. Schere Corp.	Hyprospray Pro.	no	NA	Vaccines	NA
National Medical Product	J-Tip	NA	Gas (CO ₂)	Insulin	NA
Crossject SA	Crossject	yes	Gas	NA	ID, SC,IM
PenJet Corp.	PenJet	NA	Gas (N ₂)	Vaccines	ID, SC,IM
Aradigm	Intraject	NA	Gas (CO ₂)	NA	SC
Valeritas Inc.	Mini-Ject	yes	NA	Wide range	ID, SC,IM
Robbins Instrument	Dermojet	no	Spring	Wide range	NA
SICUM Medical jet	Sicum Jet 2000	no	Spring	NA	NA
Med-E-Ject Corp.	Med-E-Jet	no	NA	NA	NA
Felton Medical Inter.	BI-100	no	Spring	Vaccines	SC, IM
Felton Medical Inter.	BI-3M	no	Spring	Vaccines	SC, IM
Aventis Pasteur	Mini-imojet	yes	Gas (CO ₂)	Vaccines	NA
DCI Inc.	LectraJet	yes	Spring	Vaccines	SC, IM
MIT Inc	Med-Jet	NA	Gas (CO ₂)	Wide range	ID, SC,IM
Endos Pharma	Hipirin	yes	Spring	NA	NA
Pharmajet	Pharmajet	yes	Spring	Vaccines	SC, IM

*หมายเหตุ: “ID” คือ การฉีดยาที่ผิวหนัง (Intradermal injection) “SC” คือ การฉีดยาที่เนื้อเยื่อ (Subcutaneous or hypodermis injection) “IM” คือ การฉีดที่กล้ามเนื้อ (Intramuscular injection) และ “NA” คือ ไม่มีข้อมูล

1.3.4 คุณสมบัติการนำส่งยาด้วยลำพุ่งความเร็วสูง

1) ความดันฉีดและการกระแทกของลำพุ่ง

ความดันในหัวฉีดระหว่างการฉีดยาเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์และการนำส่งยา ที่ผ่านมามีนักวิจัยพยายามที่จะทำความเข้าใจและศึกษา โดยทั่วไปรูปแบบความดันที่เปลี่ยนแปลงในหัวฉีด (ที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่ง) จะมีลักษณะแกว่งขึ้นลง เนื่องจากอิทธิพลของการกดอัดได้ของของเหลว (Compressibility effect) [57] โดยจะมีค่าสูงสุดในช่วงแรกและจะลดลงเรื่อยๆตามเวลา รูปแบบความดันในหัวฉีดนี้จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของกำลังงาน ความเร็วเริ่มของหัวฉีด ปริมาณของของเหลว และขนาดของหัวฉีด [58, 59] ในความเป็นจริง เนื่องจากขนาดคอขวดที่เล็กมากของหัวฉีด ทำให้การบรรจุของยาที่เป็นของเหลวมักมีฟองอากาศผสมอยู่ ซึ่งฟองอากาศนี้

มีผลให้ความดันและความเร็วที่ทางออกหัวฉีดแตกต่างจากกรณีที่มีเฉพาะของเหลวอย่างเดียว โดยจะมีค่าความเร็วและความดันสูงขึ้นทันทีทันใดในช่วงเวลา ทำให้การควบคุมไม่ให้มีฟองอากาศในหัวฉีดจึงเป็นสิ่งสำคัญ [60]

กำลังของลำพุ่งที่ออกจากหัวฉีด จะมีความเชื่อมโยงกับความดันฉีดและความเร็วของลำพุ่งในแต่ละช่วงเวลา โดยทั่วไปสามารถอธิบายได้ด้วยค่าความดันกระแทกหรือความดันหยุดไหล (Stagnation pressure) ของลำพุ่ง ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ของความดันกระแทก (P_{st}) กรณีการไหลแบบไม่อัดตัว และกรณีการไหลแบบอัดตัวได้ ได้ดังสมการ (2.2) และ (2.3) ตามลำดับ

$$P_{st} = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (2.2)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของของเหลว และ v คือ ความเร็วของลำพุ่ง

$$\frac{P_{st}}{P} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (2.3)$$

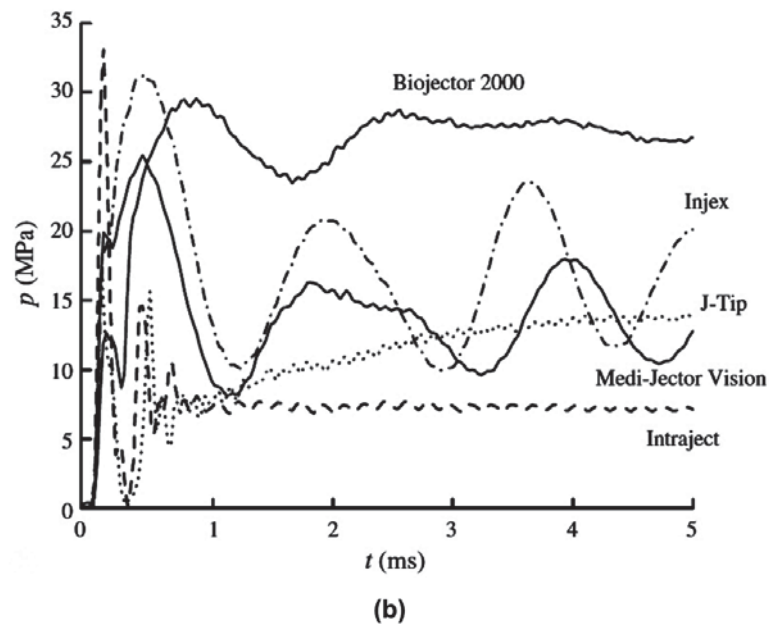
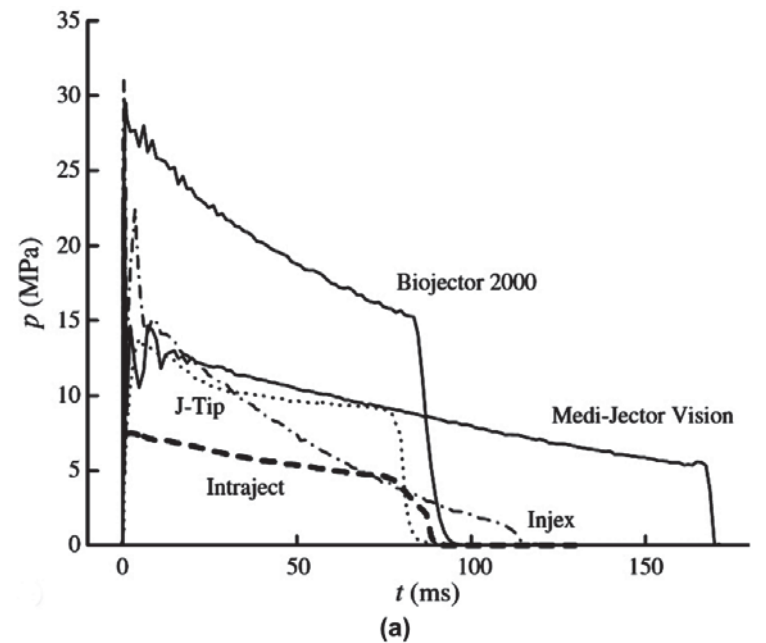
เมื่อ P คือ ความดันสถิตของของไหล γ คือ อัตราส่วนความร้อนจำเพาะของของไหล และ M คือ ความเร็วของของไหล

ความดันกระแทกของอุปกรณ์แต่ละชนิดจะมีค่าแตกต่างกันออกไป ซึ่งรูปแบบความดันกระแทกของอุปกรณ์ฉีดแต่ละประเภท จากการศึกษาของ Shergold และ คณะ [44] ดังแสดงในรูปที่ 2.19 จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของความดันกระแทกก็จะมีลักษณะคล้ายกับความดันฉีด นั่นคือ จะเปลี่ยนแปลงแบบขึ้นลงและมีค่าสูงในช่วงเวลาแรกและลดลงอย่างต่อเนื่อง จากอุปกรณ์ที่มีอยู่ในปัจจุบัน ความดันกระแทกสูงสุดมีค่าอยู่ในช่วง 15 - 35 MPa โดยส่วนใหญ่ค่าสูงสุดจะเกิดที่ความดันฉีดครั้งที่หนึ่งหรือครั้งที่สอง ความดันกระแทกสูงสุดขึ้นอยู่กับปัจจัยการฉีดหลายอย่าง โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาตรการฉีดและพื้นที่หน้าตัดหัวฉีดลดลง [59]

เนื่องจากประสิทธิภาพ การฉีดด้วยลำพุ่งความเร็วสูงไม่ได้ขึ้นกับความเร็วและความหนาแน่นของลำพุ่งเท่านั้น แต่ยังเชื่อมโยงกับเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดด้วย ดังนั้นนักวิจัยจึงได้นิยามพารามิเตอร์ตัวใหม่ขึ้นมาเพื่อใช้ออกประสิทธิภาพของลำพุ่ง โดยจัดให้อยู่ในรูปของกำลังของลำพุ่ง (Jet power, P_o) มีหน่วยเป็น วัตต์ (W) ซึ่งเขียนได้ดังสมการ (2.4)

$$P_o = \frac{1}{8} \pi \rho D_o^2 v_o^3 \quad (2.4)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของของเหลว, D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด และ v คือ ความเร็วออกของลำพุ่ง การเปลี่ยนแปลงค่ากำลังของลำพุ่ง จะมีความสอดคล้องกับความดันกระแทกโดยตรง [61] ซึ่งกำลังงานของลำพุ่งมักจะถูกใช้ในลักษณะของค่าเฉลี่ยมากกว่าจะจัดอยู่ในเทอมที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้นค่านี้จึงเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกกำลังของการฉีดแต่ละครั้งนั่นเอง



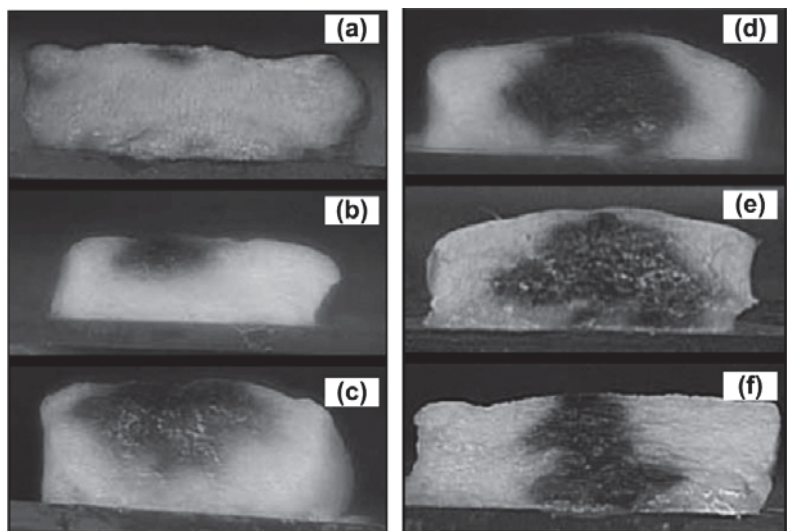
รูปที่ 2.19 ความดันกระแทกตามช่วงเวลาฉีดจากอุปกรณ์ฉีดยาที่มีจำหน่ายในท้องตลาด [44] (a) ตลอดช่วงเวลาที่ฉีด (b) ช่วง 5 ms แรกของการฉีด

2) การเจาะเนื้อเยื่อและการกระจาย

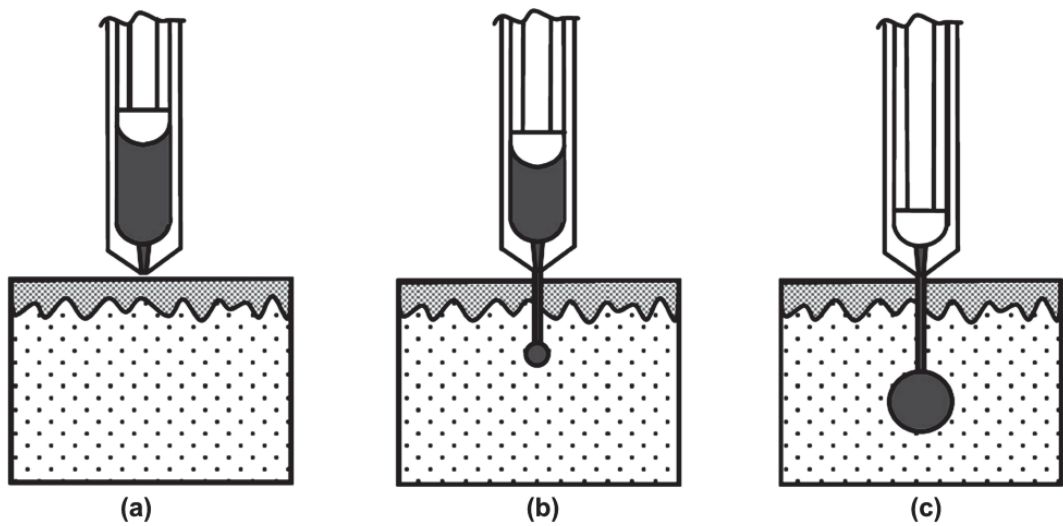
กระบวนการฉีดและประสิทธิภาพของการฉีดด้วยลำพุง ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์จากลำพุง และคุณสมบัติของเนื้อเยื่อ เช่น ปริมาณของเหลว เส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด ระยะระหว่างหัวฉีดกับผิวเนื้อเยื่อ เป็นต้น การเจาะเนื้อเยื่อของลำพุงเป็นคุณลักษณะการฉีดที่สำคัญและมีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง โดยจะศึกษาความลึกสูงสุดจากการแพร่ ความลึกและความกว้างของรูเจาะ ซึ่งจะขึ้นกับปัจจัยการฉีด รูเจาะจะลึก เมื่อลำพุงมีความเร็วสูง หัวฉีดมีขนาดเล็ก หรือมีกำลังของลำพุงสูง [45] และเมื่อเนื้อเยื่อมีค่ามอดุลัสของยังต่ำ [55, 56, 62] หรือความแข็งแรงต่ำ [63] สำหรับอิทธิพลของปริมาณของเหลวใน Baxter และ Mitragotri [46] ศึกษาแล้วพบว่า รูเจาะจะลึกขึ้นเรื่อยจนถึงตามปริมาณเหลวที่ฉีด ก่อนจะมีค่าคงที่ซึ่งเรียกค่านี้อาสมптotic value นั้นหมายความว่า หากใช้ปริมาณของเหลวมากเกินไป ประสิทธิภาพการเจาะจะไม่สูงขึ้นแต่กลับจะทำให้เกิดปัญหาการกระเด็นกลับของยา และการเปื้อนเลือดและเชื้อต่างๆจากผู้รับยานหัวฉีด

การศึกษาลักษณะการกระจายของของเหลวในเนื้อเยื่อหลังการฉีด โดยส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาด้วยเซลล์ไร้ชีวิต (In vitro) ทั้งที่เป็น เนื้อเยื่อจำลอง อาทิ เช่น เจลทั่วไป หรือ Polyacrylamide gel และเนื้อเยื่อจริงที่เป็นเนื้อเยื่อหมูซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายกับของมนุษย์ หรือเนื้อเยื่อของมนุษย์จริงๆ สำหรับรูปแบบการกระจายในเนื้อเยื่อมนุษย์นั้น Baxter และ Mitragotri [45] ได้แบ่งออกเป็น 4 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.20 แบบที่ 1 Lower hemisphere (รูป 2.20a-c) แบบที่ 2 Ellipsoid (รูป 2.20d) แบบที่ 3 Upper hemisphere (รูป 2.20e) และ แบบที่ 4 Cylinder (รูป 2.20f) โดยส่วนใหญ่ เมื่อกำลังของลำพุงต่ำ ของเหลวจะกระจายในรูปแบบที่ 1 และหากมีค่าสูงการกระจายจะเป็นแบบที่ 3 หรือ 4 แต่อย่างไรก็ตามเชื่อว่ารูปแบบที่ 2 เป็นรูปแบบการกระจายที่เหมาะสมที่สุด เพราะของเหลวกระจายได้ทั่วถึงเนื้อเยื่อไม่สะสมบริเวณใดบริเวณหนึ่ง สำหรับการกระจายในเนื้อเยื่อจำลองนั้นของเหลวจะแพร่ในรูปแบบวงกลม

กระบวนการฉีดเข้าสู่เนื้อเยื่อ สามารถนิยามเพื่อการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยแบ่งออกเป็นสองช่วง [46, 64, 65] ดังแสดงในรูปที่ 2.20 คือ ช่วงเจาะรูในเนื้อเยื่อ รูจะลึกลงเรื่อยๆ จากกระบวนการฉีดของเนื้อเยื่อเพราะการเจาะของหัวลำพุงและช่วงการกระจายหรือแพร่ เมื่อลำพุงมีความเร็วเจาะลดลงหรือหยุดการเจาะ ของเหลวจะกระจายด้วยกระบวนการแทรกซึมผ่านเนื้อเยื่อ โดยมักจะกำหนดให้ตรงจุดปลายของลำพุงจากช่วงเจาะ เป็นจุดศูนย์กลางการแพร่



รูปที่ 2.20 รูปแบบการกระจายของของเหลวในเนื้อเยื่อ [45]



รูปที่ 2.21 กระบวนการฉีดยาในเนื้อเยื่อ (a) ช่วงก่อนฉีด (b) ช่วงเจาะรูในเนื้อเยื่อ และ (c) ช่วงการกระจายหรือแพร่ [65]

บทที่ 3

การศึกษาลำพุ่งความเร็วสูงจากการกระแทก ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงตัวเลข (CFD)

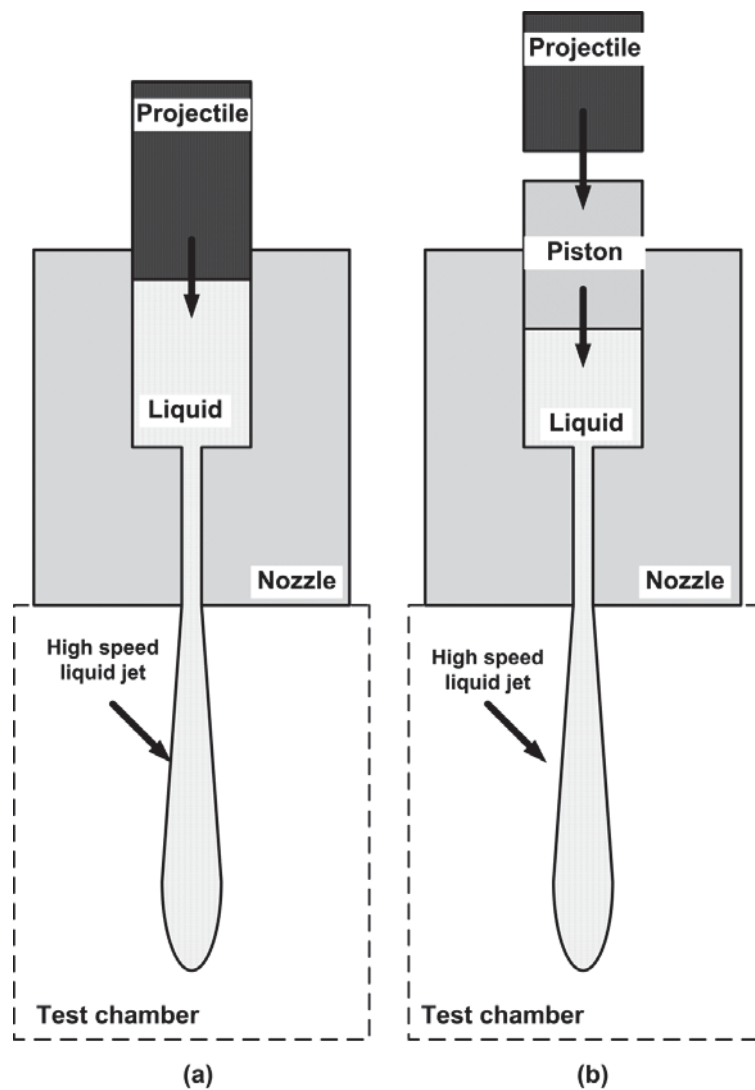
ในบทนี้จะได้กล่าวถึงการศึกษา การกำเนิดและคุณลักษณะของลำพุ่ง จากการกระแทก โดยใช้ระเบียบวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics) หรือที่นิยมเรียกว่า “CFD” งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Fluent คำนวณด้วยระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่อง (Finite volume) โดยรายละเอียดของบทนี้จะกล่าวถึง ขอบเขตปัญหา แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ระเบียบวิธีคำนวณของลำพุ่งที่สร้างด้วยหลักการการกระแทก ทั้งนี้ เจาะใจปัญหา และกรณีศึกษา ได้จากงานวิจัยที่ผ่านมาของผู้ทำรายงานและนักวิจัยท่านอื่นที่ได้ทำการทดลองไว้ เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง และศึกษาคุณลักษณะของลำพุ่ง จากอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่างๆ

1.1 กลไกการกำเนิดลำพุ่งความเร็วสูงด้วยวิธี IDM

ลำพุ่งของเหลวความเร็วสูง โดยทั่วไปสร้างจากการอัดความดันของเหลวให้มีความดันสูง และปล่อยให้ไหลออกผ่านช่องทางขนาดเล็ก ซึ่งความดันสามารถสร้างขึ้นด้วยหลักการ 2 ประเภท คือ การทำงานของอุปกรณ์เชิงกล (Mechanical device driving) เช่น ปัม หลักการนี้นิยมใช้กับการฉีดลำพุ่งในห้องเผาไหม้ หรือ ลำพุ่งสำหรับการตัดวัตถุ และการอัดหรือกดของเหลวด้วยวัตถุ (Driving object) ที่มีพลังงานจลน์สูงหรือถ่ายทอดจากแหล่งพลังงานสูง

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาการสร้างลำพุ่งด้วยหลักการการกระแทกของวัตถุ (Impact driven method) ซึ่ง ใช้หลักการการกระแทกของวัตถุหรือลูกปืนที่มีความเร็ว บนของเหลวในหัวฉีด ให้มีความดันสูงและไหลออกจากหัวฉีดด้วยความเร็ว แสดงหลักการนี้ดังรูปที่ 3.1 ด้วยหลักการนี้สามารถแบ่งได้อีก 2 แบบ คือ แบบที่ 1 กระแทกและขับโดยตรง (Direct impact method) ซึ่งลูกปืนจะกระแทกลงโดยตรงบนของเหลว และขับของเหลวออกจากหัวฉีดจนสิ้นสุดกระบวนการ (ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (a)) และ แบบที่ 2 กระแทกและขับผ่านตัวกลาง (Momentum exchange method) โดยลูกปืนจะกระแทกบนวัตถุตัวกลางในการขับของเหลว (ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (b))

ในการรายงานวิจัยนี้จะนำเสนอ การศึกษาของการกำเนิดลำพุ่งจากวิธีการการกระแทกด้วยวัตถุ ทั้งสองรูปแบบ ซึ่งจะอาศัยเงื่อนไขการศึกษาและข้อมูล จากงานวิจัยที่ผ่านมา ของ Pianthong [22, 23] [1-2] Mattujak [5] และ Shi[4, 10]



รูปที่ 3.1 การกำเนิดลำพุ่งด้วยการกระแทก (a) กระแทกและขับโดยตรง และ (b) กระแทกและขับผ่านตัวกลาง

1.2 แบบจำลองคณิตศาสตร์

ในหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการแก้ปัญหากลไกของลำพุ่งความเร็วสูง ที่เกิดจากการกระแทก ซึ่งจะมีรายละเอียดของสมการควบคุมปัญหา (Governing equation) แบบจำลองการไหลแบบสองสถานะ ของการเคลื่อนที่ของลูกปืน คุณสมบัติของของไหลแบบอัดตัวได้ และ ระเบียบวิธีคำนวณ ที่ใช้ในการศึกษานี้

1.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของของไหลผสม แบบ Mixture

พฤติกรรมของไหลและการเปลี่ยนสถานะระหว่างของเหลวและไอ ถูกจำลองด้วยแบบจำลองการผสมกันแบบ Mixture ระหว่างอากาศและของเหลว โดยแบบจำลองนี้จะพิจารณาให้มีของไหลชนิดเดียวหรือของผสมที่มีของไหลสองสถานะ ซึ่งเกาะติดกันอย่างมั่นคง โดยแต่ละสถานะจะมีค่าความเร็วเป็นของตัวเอง และมีสัดส่วนปริมาตรของแต่ละสถานะในปริมาตรควบคุมนั้นสามารถเขียนสมการเชิงอนุพันธ์ ของสมการอนุรักษ์มวลแบบไม่คงตัว (Unsteady state continuity equation) ของของผสมได้ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho_m)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m u_{m,i})}{\partial x_i} = 0 \quad (3.1)$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัมของของผสม สามารถหาได้จากผลรวมของโมเมนตัมของแต่ละสถานะเข้าด้วยกันจะได้ดังสมการ (3.2) ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho_m u_{m,j})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_m u_{m,i} u_{m,j}) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu_m \left(\frac{\partial u_{m,i}}{\partial x_k} + \frac{\partial u_{m,k}}{\partial x_i} \right) \right] + F_j + \sum_{k=1}^n \frac{\partial}{\partial x_i} (\alpha_k \rho_k u_{dr,k,i} u_{dr,k,j}) \quad (3.2)$$

เมื่อ i และ j คือ ตัวบ่งชี้พิกัด (Coordinate index) F คือ แรงเนื่องจากน้ำหนักของตัวเอง (body force) α_k คือ สัดส่วนปริมาตร (Volume fraction) ของสถานะ k

จากสมการ (3.1 และ 3.2) ค่า μ_m และ ρ_m คือ ค่าความหนืดและความหนาแน่นของของผสมตามลำดับ ได้จากสมการดังนี้

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k \quad (3.3)$$

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (3.4)$$

นอกจากนี้ค่า u_m คือ ค่าความเร็วเฉลี่ยมวล (Mass-averaged velocity) หรือความเร็วของของผสม ขณะที่ค่า $u_{dr,k}$ คือ ความเร็วลอยเลื่อน (Drift velocity) ของสถานะ k ได้จากสมการ

$$u_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k u_k}{\rho_m} \quad (3.5)$$

$$u_{dr,k} = u_k - u_m \quad (3.6)$$

ความเร็วลอยเลื่อน (u_{dr}) จะมีความสัมพันธ์กับค่าความเร็วสัมพัทธ์ (Relative velocity or slip velocity) u_{pq} ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการ (3.7) ดังนี้

$$u_{dr,p} = u_{pq} - \sum_{k=1}^n c_k u_{qk} \quad (3.7)$$

เมื่อ c_k คือ สัดส่วนมวล (Mass fraction) ของสถานะ k และ ความเร็วสัมพัทธ์ (u_{pq}) เป็น ความเร็วของสถานะทุติยภูมิ (Secondary phase) p ที่สัมพันธ์กับความเร็วสถานะปฐมภูมิ (Primary phase) q ดังนี้

$$u_{pq} = u_p - u_q \quad (3.8)$$

จากคู่มือใช้งานของ FLUENT [66], นิยามค่าความเร็วสัมพัทธ์หาได้จาก

$$u_{pq} = \frac{\rho_p d_p^2 (\rho_p - \rho_m)}{18\mu_q f_{drag} \rho_p} a \quad (3.9)$$

เมื่อ τ_p คือ เวลาคืนตัวของอนุภาค (Particle relaxation time) d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของของไหลสถานะทุติยภูมิ p และ ค่าฟังก์ชันการต้าน (Drag function) f_{drag} หาได้จาก

$$f_{drag} = \begin{cases} 1 + 0.15 \text{Re}^{0.687} & \text{Re} \leq 1000 \\ 0.0183 \text{Re} & \text{Re} \geq 1000 \end{cases} \quad (3.10)$$

และ ความเร่ง (a) จะอยู่ในรูปของ

$$a = g - u_m \frac{\partial u_m}{\partial x_i} - \frac{\partial u_m}{\partial t} \quad (3.11)$$

สมการพลังงานของของผสมอยู่ในรูปของสมการดังนี้

$$\sum_{k=1}^n \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_k \rho_k E_k) + \sum_{k=1}^n (\rho_k E_k + p) \frac{\partial}{\partial x_i} \alpha_k u_{k,i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i}) \quad (3.12)$$

ทั้งนี้ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน k_{eff} (Effective conductivity) คำนวณได้จาก

$$k_{eff} = \sum \alpha_k (k_k + k_t) \quad (3.13)$$

เมื่อ k_k คือ ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) และ k_t คือ ค่าการนำความร้อนปั่นป่วน (Turbulent thermal conductivity) นิยามจากแบบจำลองความปั่นป่วน เนื่องจากในการศึกษานี้ใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ standard $k - \varepsilon$ ดังนั้น k_t สามารถคำนวณได้จาก

$$k_t = \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \quad (3.14)$$

เมื่อ c_p คือ ความร้อนจำเพาะของของไหลทุกชนิด Pr_t คือ ตัวเลข Prandtl ความปั่นป่วน (Turbulent Prandtl number) ในที่นี้ $Pr_t = 0.85$ และ ความหนืดปั่นป่วน μ_t (Turbulent viscosity) สามารถคำนวณได้จากพลังงานจลน์ปั่นป่วน k (Turbulence kinetic energy) และ อัตราการเปลี่ยนรูป ε (Rate of dissipation) ตามสมการดังนี้

$$\mu_t = \rho_m C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.15)$$

เมื่อ C_μ คือ ค่าคงที่ในแบบจำลองความปั่นป่วน เพื่อให้สมการควบคุมสามารถหาคำตอบได้ แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ standard $k - \varepsilon$ ถูกนำมาใช้สำหรับปรากฏการณ์การปั่นป่วนของการไหล ซึ่งจะมีสมการใหม่เพิ่มขึ้นมาอีกสองสมการ คือ สมการพลังงานจลน์ปั่นป่วน k และ สมการอัตราการเปลี่ยนรูป ε ซึ่งทั้งสองสมการสามารถเขียนในรูปสมการส่งถ่าย (Transport equations) ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_m k u_{m,i}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\rho_m C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \rho_m C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \left(\frac{\partial u_{m,i}}{\partial x_i} + \frac{\partial u_{m,j}}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_{m,i}}{\partial x_i} - \rho \varepsilon - 2\rho \varepsilon M_t^2 \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_m \varepsilon u_{m,i}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\rho_m C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} C_\mu \rho_m k \left(\frac{\partial u_{m,i}}{\partial x_i} + \frac{\partial u_{m,l}}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_{m,i}}{\partial x_i} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.17)$$

ในการศึกษานี้ค่าคงที่ของสมการ $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, และ C_μ ในสมการ (3.16) และ (3.17) กำหนดให้มีค่าเท่ากับ

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09$$

และ M_t คือ ค่าตัวเลขมาร์คความปั่นป่วน (Turbulent Mach number) จากอิทธิพลของการอัดตัวได้ของของไหลในสมการของแบบจำลองความปั่นป่วน

สมการสัดส่วนปริมาตรของสถานะทุติยภูมิ เขียนได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p \rho_p) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha_p \rho_p u_{m,i}) = -\frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha_p \rho_p u_{dr,p,i}) + \sum_{q=1}^n \left(m_{qp}^{\square} - m_{pq}^{\square} \right) \quad (3.18)$$

เมื่อ $m_{qp}^{\square}$ คือ การถ่ายเทมวลจากสถานะปฐมภูมิ q เป็นสถานะทุติยภูมิ p และกลับกัน $m_{pq}^{\square}$ คือ การถ่ายเทมวลจากสถานะทุติยภูมิ p กลับเป็นสถานะปฐมภูมิ q

1.2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเกิดโพรงอากาศ (Cavitation)

เนื่องจากการเปลี่ยนสถานะของปัญหาล้าพุงความเร็วสูงที่เกิดจากการกระแทกโดยมากเกิดขึ้นจากการระเหย (Evaporation) เนื่องจากการเกิดโพรงอากาศ (Cavitation) ในของเหลวระหว่างการกระแทกของลูกปืน ซึ่งเกิดขึ้นเร็วและค่าความดันของของไหลเปลี่ยนแปลงมาก ในเวลาอันสั้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาปรากฏการณ์ในการคำนวณด้วยโดยมีรายละเอียดของแบบจำลองดังต่อไปนี้

ในการศึกษานี้ แบบจำลองปรากฏการณ์เกิดโพรงอากาศแบบสมบูรณ์ (Full cavitation models) ของการไหล (เสนอโดย Singhal และ คณะ[67] ในปี ค.ศ. 2002) จะถูกนำมาใช้ในการจำลองปรากฏการณ์เกิดโพรงอากาศผ่านค่าความดันไอ (Vapor pressure) และ อัตราการเกิดโพรงอากาศ (Cavitation rate) ในการไหลของของน้ำและอากาศ ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว ข้อสมมติฐานนี้ไม่ถูกต้องนักเนื่องจากน้ำจะต้องเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำเท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามหากทำเช่นนั้นระบบสมการและการแก้คำตอบจะซับซ้อนมาก ดังนั้น เพื่อลดตัวแปรและปัญหาดังกล่าว จึงจำเป็นต้องนิยามปัญหาให้ง่ายขึ้นต่อการหาคำตอบโดยให้น้ำระเหยกลายเป็นอากาศ อีกทั้งคุณสมบัติของไอน้ำและอากาศ สามารถยอมรับแทนกันได้

แบบจำลองปรากฏการณ์เกิดโพรงอากาศแบบสมบูรณ์ จะพิจารณาทุกอิทธิพลอันดับที่หนึ่งของการเกิดโพรงอากาศที่มีต่อการไหลของของไหล ได้แก่ การเปลี่ยนสถานะ (Phase change) การเคลื่อนที่ของฟองอากาศ (Bubble dynamics) การเปลี่ยนแปลงความดันปั่นป่วน (Turbulent pressure fluctuations) ก๊าซที่ไม่กลั่นตัว (Non-condensable gases) โดยของไหลจะนิยามให้เป็นของผสมที่

ประกอบด้วย ของเหลว ไอ์ และก๊าซที่ไม่กลั่นตัว ซึ่งความหนาแน่นของไอลจะเป็นฟังก์ชันของ สัดส่วนมวลของไอ์ f ซึ่ง สามารถคำนวณได้จากสมการอนุรักษ์มวลและโมเมนตัม ควบคู่กับ สมการถ่ายโอนของไอดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m f) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_{v,i} f) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\gamma \frac{\partial f}{\partial x_i} \right) + R_e + R_c \quad (3.19)$$

ณ ที่นี้ ρ_m คือ ความหนาแน่นของของผสม u_v คือ เวกเตอร์ความเร็วของไอ์ γ คือ สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนสถานะ (Effective exchange coefficient)

R_e และ R_c คือ อัตราการเกิดไอ์ (Vapor generation rate) และอัตราการกลั่นตัว (Condensation rate) ตามลำดับ สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ตามสมการ (3.20) และ (3.21) ตามเงื่อนไขความดันของของไหล p ดังนี้

เมื่อ $p < p_v$

$$R_e = C_e \frac{\sqrt{k}}{\sigma} \rho_l \rho_v \sqrt{\frac{2(p_v - p)}{3p_l}} (1 - f_v - f_g) \quad (3.20)$$

เมื่อ $p > p_v$

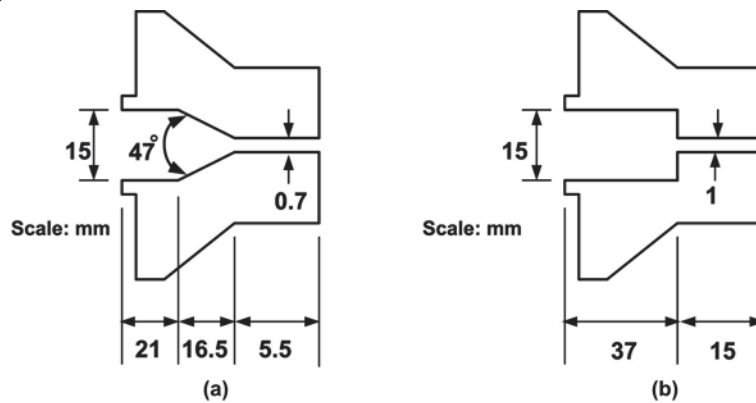
$$R_c = C_c \frac{\sqrt{k}}{\sigma} \rho_l \rho_l \sqrt{\frac{2(p - p_v)}{3p_l}} f_v \quad (3.21)$$

ทั้งนี้ C_e และ C_c คือ ค่าคงที่จากการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.02 และ 0.01 ตามลำดับ k คือ ค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วน σ คือ สัมประสิทธิ์แรงตึงผิว (Surface tension coefficient) ของของไหลในสถานะของเหลว โดยตัวอักษรห้อย l, v และ g คือ ของเหลว ไอ์ และ ก๊าซที่ไม่กลั่นตัว ตามลำดับ

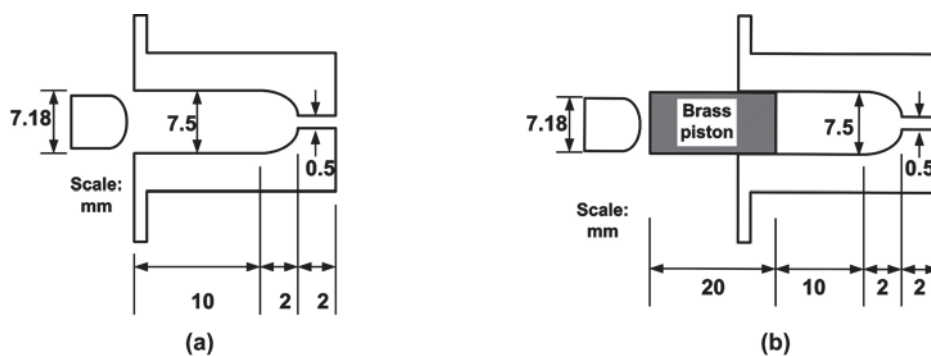
1.2.3 ขอบเขตและรูปร่างของปัญหา

ในเบื้องต้นของการคำนวณปัญหาการไหลของของไหลนั้น จำเป็นต้องยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองคณิตศาสตร์ โดยเทียบเคียงผลการคำนวณกับผลจากการศึกษาที่ผ่านมา ดังนั้น ใน การศึกษานี้จึงได้นำเอาเงื่อนไขการศึกษาที่ผ่านมา โดยเฉพาะขนาดหัวฉีด ขนาดและความเร็วลูกปืน ของ Pianthong และคณะ [22, 23] Mattujak [5] และ Shi [4, 10] มาใช้ทดสอบพร้อมกับยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง CFD โดยรูปร่างและขนาดหัวฉีด แสดงดังรูปที่ 3.2 และ 3.3

รูปที่ 3.2 แสดงขนาดและรูปร่างของหัวฉีดที่ใช้ในการศึกษาของ Pianthong และคณะ [22, 23] Mattujak [5] โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ แบบปาดตรง (Stepped nozzle) และปาดเป็นกรวย (Conical nozzle) ซึ่งมีปริมาตรบรรจุของไหล 4.68 cm^3 และ 6.54 cm^3 ตามลำดับ ขณะที่ รูปที่ 3.3 แสดงรูปร่างหัวฉีดของ Shi [4, 10] โดยมีปาดแบบโค้ง (Parabolic cavity) บรรจุปริมาตรของเหลว 0.42 cm^3 และแบ่งลักษณะการกระแทกออกเป็น 2 แบบ คือ กระแทกและจับโดยตรง (Direct impact) ดังในรูป 3.3(a) และ กระแทกและจับผ่านตัวกลาง (Momentum exchange) ดังในรูป 3.3 (b)

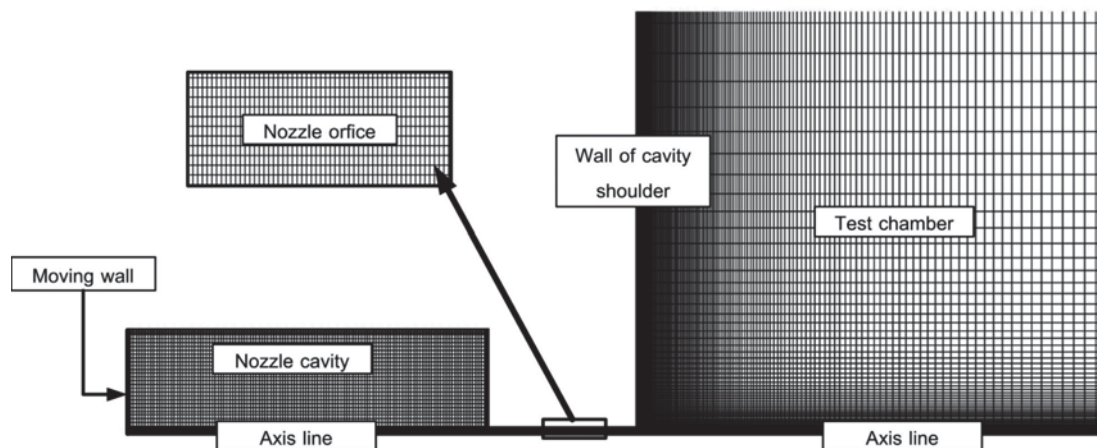


รูปที่ 3.2 ขนาดหัวฉีดแบบ (a) ปาดเป็นกรวย (Conical nozzle) และ (b) ปาดตรง (Stepped nozzle)



รูปที่ 3.3 ขนาดหัวฉีดของ H. H. Shi (a) กระแทกและจับโดยตรง (b) กระแทกและจับผ่านตัวกลาง

จากกลไกการเกิดลำพุ่งที่แสดงในหัวข้อ 3.1 และรูปที่ 3.1 สามารถจำลองบนขอบเขตปิด (Closed system domain) ที่สมมาตรตามแนวแกน (Axi-symmetric geometry) และแบ่งพื้นที่ออกเป็นสองส่วน คือ หัวฉีด และห้องทดสอบ ที่เริ่มต้นบรรจุของเหลวและอากาศตามลำดับ ห้องผสมมีขนาด สูง 50 mm และ ยาว 250 mm มีจำนวนกริดประมาณ 60,000 หน่วย ซึ่งจะมีจำนวนคงที่ทุกกรณีศึกษา สังเกตว่ากริดจะหนาแน่นที่แกนกลางของห้องผสม ทั้งนี้เพื่อรองรับการคำนวณปฏิกิริยาที่มีต่อกันระหว่างของเหลวที่ออกจากหัวฉีดกับอากาศ ขณะที่ส่วนหัวฉีด รูปร่างและกริดจะเปลี่ยนแปลง (Moving mesh) ตามการเคลื่อนที่ของลูกปืน ซึ่งจะนิยามให้มีความเร็วเท่ากับความเร็วของผนังด้านซ้ายสุด (Moving wall) ดังแสดงในรูป 3.4



รูปที่ 3.4 กริดและขอบเขตปัญหา

1.2.4 การเปลี่ยนกริดและการเคลื่อนที่ของลูกปืน

การเคลื่อนที่ของลูกปืนในหัวฉีดระหว่างกำเนิดลำพุ่งสามารถกำหนดให้เสมือนการเคลื่อนที่ของผนังและเปลี่ยนกริดภายในหัวฉีด ความเร็วของลูกปืนหลังจากกระแทกของเหลวสามารถคำนวณได้จาก สมการอนุรักษ์โมเมนตัมอย่างง่ายบนลูกปืน จากแรงดันของของเหลวในหัวฉีดตามแนวแกนสมมาตร นั่นคือ

$$\int_{t_0}^t dV = \int_{t_0}^t (F(t)/m) dt \quad (3.22)$$

เมื่อ V คือ ความเร็วลูกปืน F คือ แรงขับลูกปืน และ m คือ มวลของลูกปืน ซึ่งความเร็วลูกปืน ณ ช่วงเวลา t สามารถแจกแจงและคำนวณด้วยสมการ ออยเลอร์ (Explicit Euler formula) ดังนี้

$$V_t = V_{t-\Delta t} + (F(t)/m)\Delta t \quad (3.23)$$

ความเร็วของการเคลื่อนที่ของลูกปืนหรือผนัง สามารถคำนวณด้วย สมการ (3.23) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น ในช่วงเวลา Δt ผ่าน ฟังก์ชันของผู้ใช้ (User Define Function, UDF) ซึ่งโปรแกรม Fluent เปิดช่องทางไว้ให้ ในการคำนวณ มวลลูกปืนมีค่าเท่ากับ 4.2 และ 0.038 กรัม ซึ่งจะเท่ากับการศึกษาของ Pianthong และคณะ [22, 23] Mattujak [5] และ Shi [4, 10] แรงที่กระทำบนลูกปืนกำหนดให้มีเพียงแรงด้านจากแรงดันของเหลวที่กดอัดในหัวฉีด โดยสมมติให้ไม่มีแรงเสียดทานจากผนังของหัวฉีด กรณีกระแทกโดยตรง ความเร็วลูกปืนหรือความเร็วเริ่มต้นของผนังมีค่า

เท่ากับ 300 700 และ 414 m/s ตามงานวิจัยที่ผ่านมา ขณะที่กรณีกระแทกผ่านตัวกลาง ความเร็วของลูกปืนคำนวณจากสมการอนุรักษ์โมเมนตัมของลูกปืนกับแท่งกวด สถานะเริ่มต้นคำนวณกำหนดที่ความดันและอุณหภูมิบรรยากาศทั้งในหัวฉีดและห้องทดสอบ ในบางกรณีที่ลูกปืนเหลือโมเมนตัมจากการขับของเหลวอยู่มาก ลูกปืนจะชนบ่าของหัวฉีดกำหนดให้โมเมนตัมที่เหลือเหล่านั้นจะถูกส่งถ่ายไปยังตัวหัวฉีดจนหมด ดังนั้นความเร็วของลูกปืนจะมีค่าเป็นศูนย์ทันทีทันใดหลังการชน ก่อนที่จะถูกดันกลับด้วยแรงดันจากของเหลวที่โดนอัด และการคำนวณจะสิ้นสุดลงเมื่อลูกปืนเคลื่อนที่กลับมายังจุดเริ่มต้น

1.2.5 คุณสมบัติของของไหล

ที่เงื่อนไขเริ่มต้นของทั้งสองสถานะ ถูกแบ่งให้อยู่หัวฉีดและห้องทดสอบสำหรับของเหลวและอากาศตามลำดับ อากาศกำหนดให้มีคุณสมบัติเป็นก๊าซจิตภาพ (Ideal gas) เพื่อรองรับการไหลแบบอัดตัวได้ (Compressible flow) เช่นเดียวกันในส่วนของเหลวในหัวฉีด ต้องกำหนดให้มีคุณสมบัติอัดตัวได้ แต่เนื่องจากแตกต่างจากก๊าซ คุณสมบัติสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการอัดตัวได้ของของเหลว ได้แก่ ความหนาแน่น และความเร็วเสียงในของเหลว ต้องกำหนดผ่านฟังก์ชันภายนอกโปรแกรม Fluent ที่เขียนขึ้นเองผ่าน UDF โดย คุณสมบัติทั้งสองจะขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงความดัน ณ ช่วงเวลาก่อนและหลัง ดังแสดงในสมการ (3.24) และ (3.25) ดังนี้

$$\rho_1 = \frac{\rho_o}{[1.0 - (P_1 - P_o) / B]} \quad (3.24)$$

$$a_1 = \frac{1 - (P_1 - P_o)}{B} \times \frac{\sqrt{B}}{\rho_o} \quad (3.25)$$

ค่า P และ ρ คือ ความดันและความหนาแน่นของของเหลวตามลำดับ ค่าคงที่ B คือ บัลมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่นของเหลว (Bulk modulus of elasticity) โดยตัวอักษรห้อย 0 และ 1 คือ ค่าที่สถานะเริ่มต้นและที่เวลานั้นๆ ตามลำดับ การศึกษาที่ใช้ของเหลว 3 ชนิด คือ น้ำ และน้ำมัน ดิเซล โดยมีคุณสมบัติที่สำคัญแสดงดังในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของของเหลว

Liquid	Bulk modulus (GPa)	Vapor pressure ($\times 10^{-6}$ GPa)	Molecular weight (g)	Specific heat (J/(kg.K))	Surface tension coefficient (N/m)
Water	2.24	3.17	18	4,182	0.0717
Diesel	1.6	1.378	170	1,850	0.0244

1.2.6 ระเบียบวิธีคำนวณ

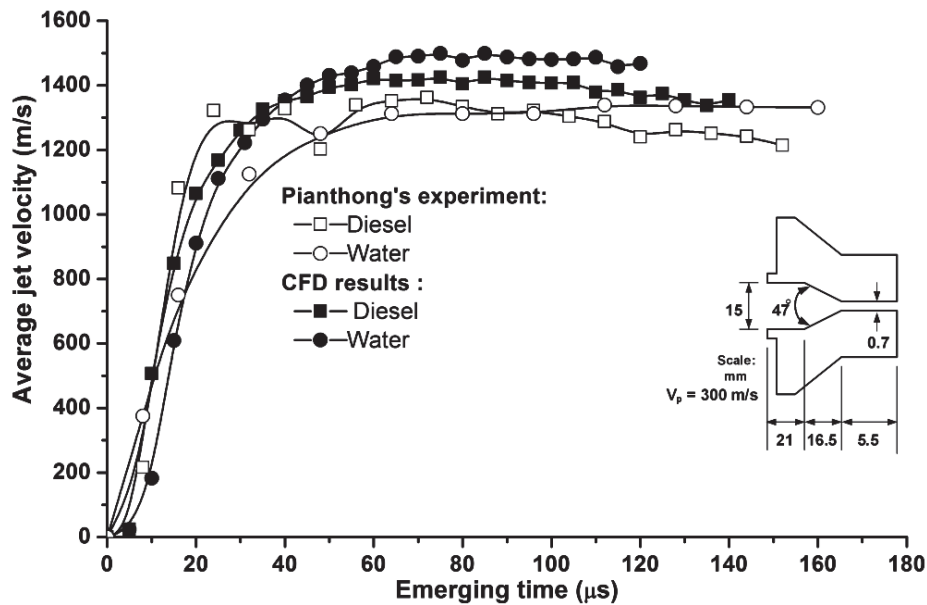
งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม CFD สำเร็จรูป Fluent ในการคำนวณแก้ปัญหา สมการควบคุมเชิงอนุพันธ์หาคำตอบจากระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite volume method) ด้วยการประมาณค่าจากระเบียบวิธีผลต่างอันดับที่หนึ่ง (First order upwind) บนสมการโมเมนตัม สมการพลังงาน สมการความปั่นป่วน และสมการส่งถ่ายของของผสม สำหรับค่าความดันใช้แบบ Body-force weighted ขั้นตอนวิธีคำนวณสำหรับใช้แบบจำลองเชื่อมต่อความเร็วและความดัน (Pressure-velocity coupling) แบบ SIMPLE การคำนวณเป็นแบบขึ้นกับเวลา โดยขนาดช่วงเวลา เท่ากับ 10^{-7} วินาที โดยผลคำนวณได้ในแต่ละช่วงเวลาจะถูกบันทึกลงคอมพิวเตอร์

1.3 การยืนยันผลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

หัวข้อที่จะนำเสนอต่อไปนี้คือการยืนยันผลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของ CFD ด้วยคุณลักษณะพลศาสตร์ของการกำเนิดลำพุ่งความเร็วสูง โดยใช้การเทียบเคียงผลระหว่างผลของแบบจำลองกับผลของทดลองจากการศึกษาที่ผ่านมา น้ำ น้ำมันดีเซล น้ำมันก๊าด คือ ของเหลวที่ใช้ในการศึกษาเปรียบเทียบ คุณลักษณะลำพุ่งที่ศึกษา คือ ความดันในหัวฉีด ระยะแหวกอากาศ และความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.5 - 3.10

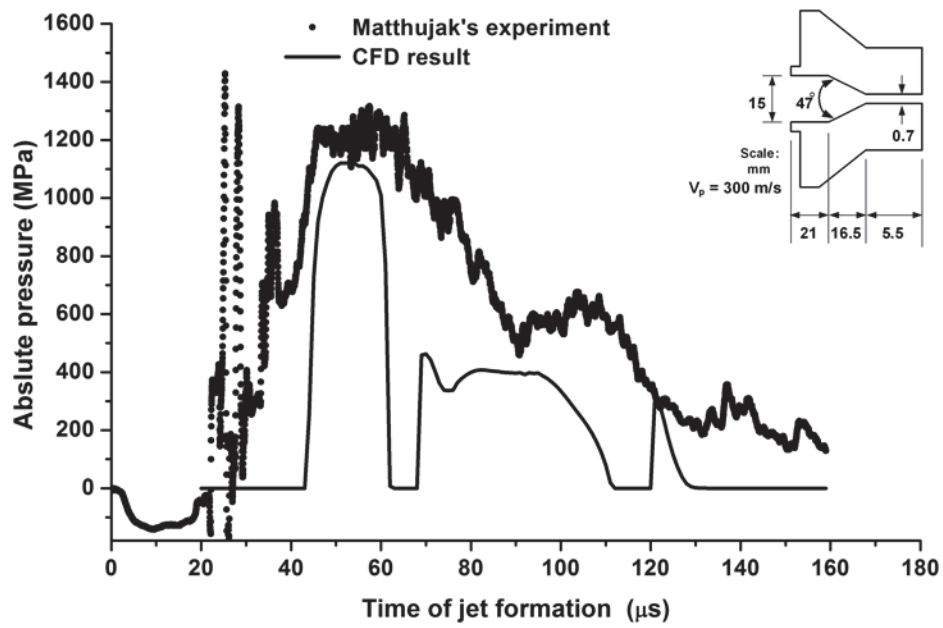
รูปที่ 3.5 แสดง ความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่งจากการกระแทกตรงบนหัวฉีดแบบบ่าเป็นกรวย โดยแสดง ผลของ CFD เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Pianthong และคณะ [22, 23] ซึ่งความเร็วลูกปืนมีค่าเท่ากับ 300 m/s กระแทกลงบนหัวฉีดที่มีรูปร่างและขนาดตามรูปที่ 3.2(a) พบว่า ความเร็วแนวโน้มของความเร็วเฉลี่ยของกราฟทั้งสองแตกต่างกันเล็กน้อย ในช่วงเวลา 30 μ s แรก ผลจาก CFD และ การทดลอง มีค่าใกล้เคียงกันมาก แต่เมื่อเวลาเดินทางของลำพุ่งเพิ่มขึ้น พบว่า ผลจาก CFD มีค่าสูงกว่า การทดลอง อีกทั้งสังเกตพบว่า ในช่วงเวลานี้ความเร็วเฉลี่ยจากการคำนวณของน้ำมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ของสภาพยืดหยุ่นของน้ำสูงกว่าของน้ำมันดีเซล นั้นหมายความว่า ปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงของน้ำเนื่องจากการกระแทกของลูกปืนจะสร้าง

ความดันภายในหัวฉีดได้สูงกว่าน้ำมันดีเซล นอกจากนี้แล้วเหตุผลอีกประการ คือ น้ำมันดีเซลมีแรงตึงผิว (Surface tension) น้อยกว่าน้ำ ทำให้การแตกตัวเป็นละอองของลำพุน้ำมันดีเซลมีมาก (เมื่อเดินทางในอากาศนานขึ้น) ดังนั้นความเร็วจึงลดลงเมื่อเทียบกับน้ำ

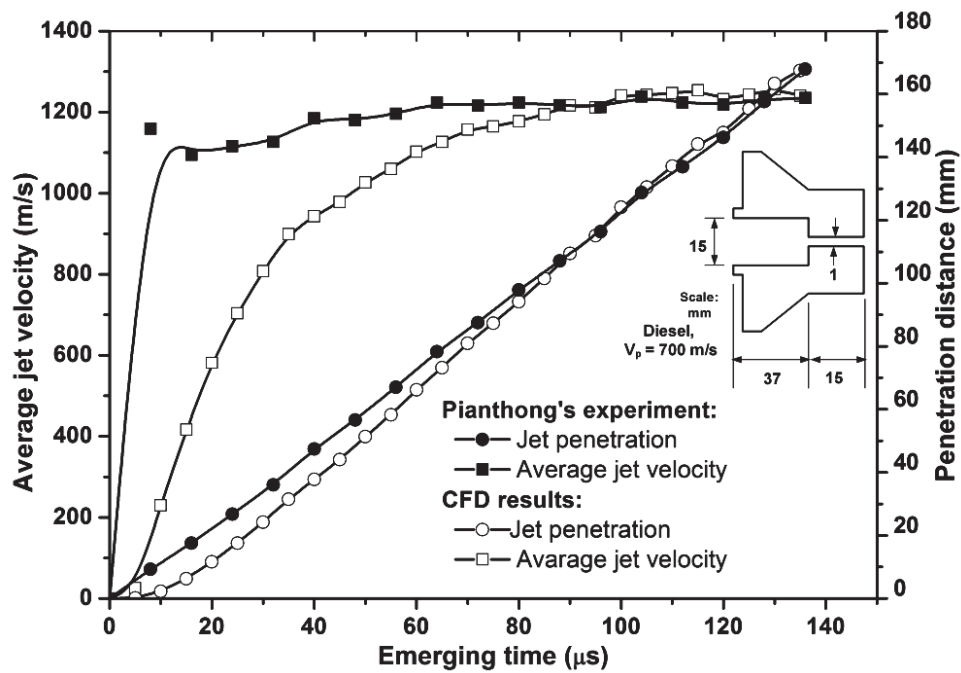


รูปที่ 3.5. ความเร็วเฉลี่ยของลำพุนจากการกระแทกตรงบนหัวฉีดแบบบ่าเป็นกรวย

รูปที่ 3.6 แสดงความดันฉีดจากการกระแทกตรงบนหัวฉีดแบบบ่าเป็นกรวย โดยเปรียบเทียบผลจาก CFD กับการทดลองของ Mattujak [5] ในกรณีนี้ ลูกปืนความเร็ว 300 m/s กระแทกบนน้ำในหัวฉีดบ่าเป็นกรวย จากกราฟความดันที่ทางออกหัวฉีดพบ การขึ้นลงของความดันฉีด ซึ่งเป็นผลที่คล้ายกันของการทดลองและ CFD โดยพบว่าความดันเพิ่มขึ้นและลดลง 3 ครั้ง เนื่องจากการเคลื่อนที่และสะท้อนของ คลื่นช็อค (Shock wave) บนของเหลวในหัวฉีดระหว่างการกำเนิดลำพุน แต่อย่างไรก็ตาม ในช่วงเวลา 20 μ s แรก กราฟความดันจาก CFD จึงมีค่าแตกต่างจากการทดลองอยู่มาก เนื่องจากในช่วงนี้ ความดันได้รับอิทธิพลจากการปล่อยคลื่นช็อคออกมาจากเนื้อวัสดุของหัวฉีด ซึ่งการคำนวณด้วย CFD ไม่สามารถพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยนี้ในแบบจำลองได้ จากการทดลอง ในช่วงกำเนิดลำพุน ความดันขยับเพิ่มขึ้นถึงค่าสูงสุด 3 ค่า คือ 1.24, 0.6 และ 0.27 GPa เช่นเดียวกับผลจาก CFD คือ 1.1, 0.4 และ 0.3 GPa (สังเกตได้จากรูปที่ 3.6) จะเห็นได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกัน แต่ช่วงห่างของเวลา มีค่าต่างกันอยู่ โดยเฉพาะช่วงความดันที่ 2 และ 3 ผล CFD จะเกิดขึ้นเร็วกว่าการทดลองอยู่ 20 – 30 μ s เนื่องจากแบบจำลองการเกิดโพรงอากาศอย่างง่ายที่ใช้ไม่สามารถคำนวณปรากฏการณ์โพรงอากาศขนาดใหญ่ (Supercavitation) ที่เกิดขึ้นในหัวฉีดได้ครอบคลุม จะเห็นได้ว่า บางช่วงเวลาคความดันฉีดเป็นศูนย์ระหว่างการกำเนิดลำพุน



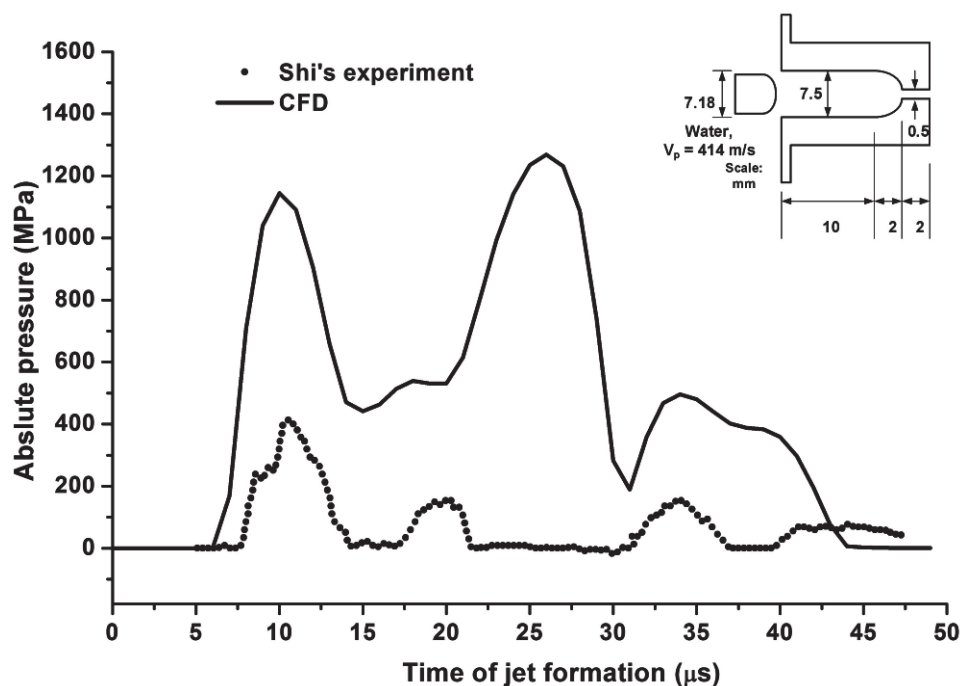
รูปที่ 3.6. ความดันที่เกิดจากการกระแทกตรงบนหัวฉีดแบบบ่าเป็นกรวย



รูปที่ 3.7 ระยะแหวกอากาศและความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่งจากหัวฉีดแบบบ่าตรง

รูปที่ 3.7 แสดง คุณลักษณะของลำพุงในเทอมของระยะแหวกอากาศและความเร็วเฉลี่ยของลำพุงจากการกระแทกบนหัวฉีดแบบปาดตรง ลูกปืนความเร็ว 700 m/s กระแทกลงบนน้ำมันดีเซลที่บรรจุในหัวฉีดที่มีขนาดและรูปร่างตามรูปที่ 3.2 (b) ซึ่งเป็นเงื่อนไขการศึกษาของ Pianthong [22, 23] พบว่า ความเร็วเฉลี่ยสูงจากการทดลองและ CFD มีแนวโน้มและค่าใกล้เคียงกัน ประมาณ 1,100 m/s ถึงแม้ว่า ความเร็วจากการคำนวณจะมีค่าต่ำกว่าการทดลองบ้างเล็กน้อย จากการสังเกตระยะแหวกอากาศและความเร็วเฉลี่ยของลำพุง ในช่วงเวลาเริ่มแรก 0 ถึง 60 μ s ความเร็วลำพุงจากการทดลองมีค่าสูงกว่าการคำนวณด้วย CFD และการเร่งของลำพุงจนถึงความเร็วสูงสุด ของ CFD จะใช้ช่วงเวลานานกว่าการทดลอง ทั้งนี้อาจจะเกิดขึ้นจาก การปล่อยคลื่นช็อคของเนื้อวัสดุหัวฉีด จากการกระแทกของลูกปืน ซึ่งความเร็วเสียงเดินทางในโลหะเร็วกว่าในของเหลว ส่งผลต่อการกำเนิดลำพุงในช่วงแรก แต่ใน CFD ไม่ได้พิจารณาปัจจัยนี้ในแบบจำลอง

นอกจากการเปรียบเทียบกับรูปร่างหัวฉีดแบบทั่วไปแล้ว การศึกษานี้ยังได้นำเอาแบบจำลองมาคำนวณปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นใน หัวฉีดที่มีลักษณะและวิธีการสร้างลำพุงที่แตกต่างออกไป โดยทำการจำลองการไหลตามเงื่อนไขการศึกษาของ Shi [4, 10] ซึ่งสร้างลำพุงด้วยการกระแทกตรงและผ่านตัวกลาง ตามรายละเอียดในหัวข้อ 3.2.3 ซึ่งของเหลวในหัวฉีดถูกกระแทกด้วยลูกปืนหนัก 0.384 กรัม เร็ว 414 m/s ผลเปรียบเทียบความดันฉีด และความเร็วเฉลี่ยของลำพุงระหว่าง CFD และ การทดลองแสดงดังรูปที่ 3.8 - 3.10

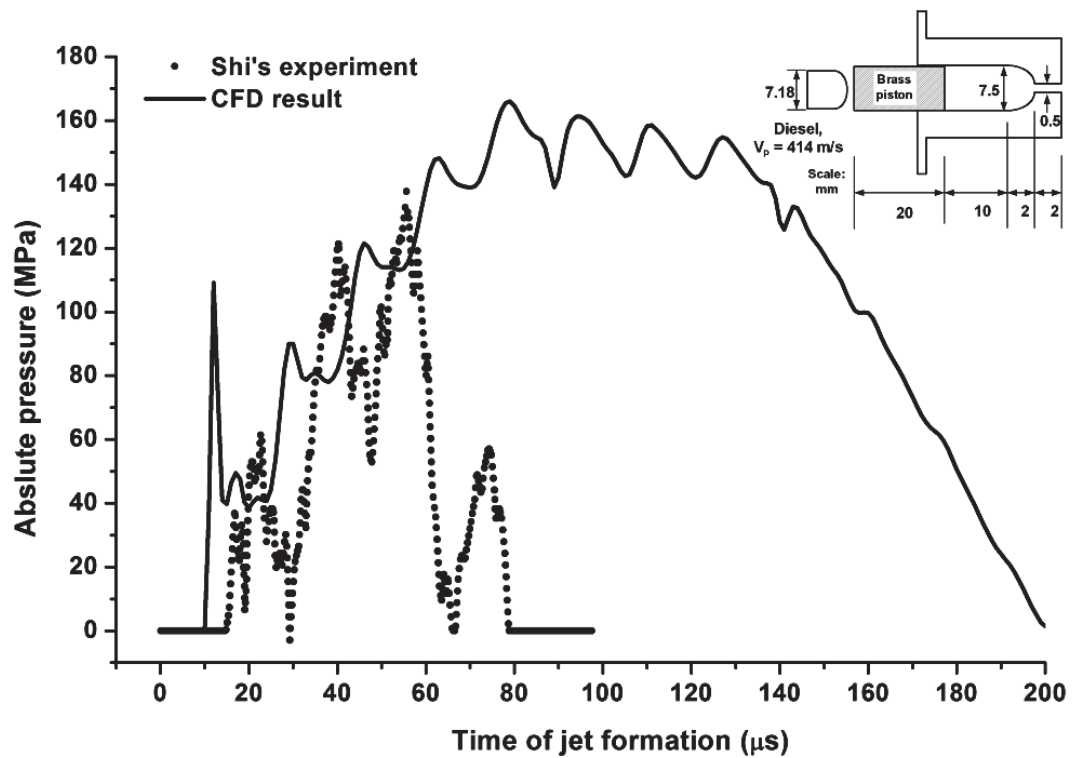


รูปที่ 3.8 ความดันฉีดจากการกระแทกตรงบนหัวฉีดของ Shi [4, 10]

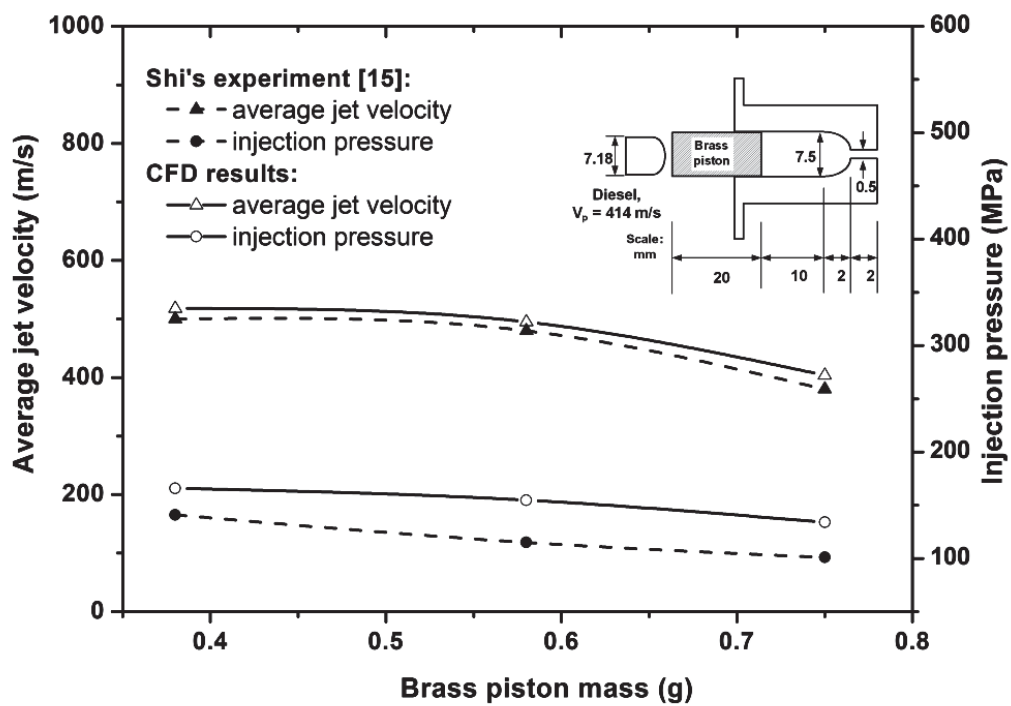
การเปรียบเทียบระหว่างผลของ CFD และการทดลองของ Shi [4, 10] กรณีการกระแทกตรง พบว่าผลที่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 แต่อย่างไรก็ตาม แนวโน้มของการเกิดความดันสูงสุดตามช่วงเวลามีความคล้ายกัน สาเหตุที่ผลต่างกันเนื่องมาจากในแบบจำลอง CFD ขอบเขตเป็นผนังปิดหมดทุกด้าน ดังนั้นการรั่วไหลของของเหลวและการสูญเสียแรงดันที่ด้านข้างของลูกปืนขณะขับเคลื่อน จึงไม่ได้พิจารณา ซึ่งทำให้ความดันจาก CFD มีค่าสูงกว่าจากการทดลองมาก ซึ่งหาก เมื่อพิจารณาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดและลูกปืน ในการทดลองพบว่า มีพบว่ามีช่องว่าง กว้างถึง 0.3 mm (เส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด และลูกปืนมีค่าเท่ากับ 7.8 mm และ 7.18 mm ตามลำดับ) นอกจากนี้ การทดลองแต่ละครั้ง การกระแทกของลูกปืนมีความไม่แน่นอนเกิดขึ้น จากประสิทธิภาพการกระแทกของชุดทดลอง ซึ่งทำให้ผลที่ได้มีค่าความไม่แน่นอนเกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ตามอิทธิพลนี้มีผลน้อยมากกับการเคลื่อนที่ของคลื่นช็อคในของเหลว ระหว่างการกำเนิดลำพุ่งสังเกตได้จากจำนวนความดันสูงสุด และช่วงเวลาของการสร้างลำพุ่งมีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.8

สำหรับการกระแทกผ่านตัวกลาง ในการศึกษาของ Shi ลูกปืนจะกระแทกบนแท่งทองเหลือง เพื่อขับของเหลวในหัวฉีด ความดันฉีดสูงสุดจากการทดลองมีค่าประมาณ 140 MPa ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่ได้ CFD ที่มีค่าประมาณ 160 MPa ดังแสดงในรูปที่ 3.9 และเมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของน้ำหนักของแท่งทองเหลืองที่มีต่อความเร็วเฉลี่ยและความดันฉีดสูงสุด พบว่าให้ผลที่ใกล้เคียงเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.10 โดยหากน้ำหนักแท่งกดเพิ่มขึ้น ความเร็วและความดันจะลดลง เนื่องจากการอนุรักษ์โมเมนตัมทำให้ความเร็วแท่งกดลดลง แต่อย่างไรก็ตามผลของ CFD และการทดลองยังมีค่าแตกต่างกันในช่วงเวลากำเนิดลำพุ่ง ซึ่งมีข้อสังเกตว่า ค่าจากการคำนวณยาวนานกว่าการทดลองอยู่สองเท่า เนื่องจากการคำนวณ นิยามให้ลูกปืนและแท่งกดติดกันตลอดระยะเวลาที่ขับของเหลว แต่ในความเป็นจริงหรือในการทดลอง ลูกปืนมีโอกาสที่หลุดออกจากแท่งกดได้ ในช่วงเวลาดังกล่าว ทำให้การถ่ายเทโมเมนตัมมีสั้นลงและด้อยประสิทธิภาพ อีกทั้ง แรงเสียดทานระหว่างแท่งกดและผนังหัวฉีดยังเป็นปัจจัยที่ทำให้ความดันฉีดน้อยลงด้วย นอกจากนี้ การเคลื่อนที่ของคลื่นช็อคในเนื้อแท่งกดยังส่งผลให้การส่งถ่ายโมเมนตัมจากแท่งกดไปยังของเหลวล่าช้าลงด้วย

จากการเปรียบเทียบผลระหว่าง CFD กับการทดลองที่ผ่านมา พบว่าให้ผลที่ยอมรับได้ ถึงแม้จะมีบางกรณีที่ให้ผลแตกต่างกัน แต่ก็ยังเป็นผลที่เกิดขึ้นจาก ปัจจัยของประสิทธิภาพจากการทดลอง และบางปรากฏการณ์ที่ไม่ได้พิจารณาในแบบจำลอง CFD ซึ่งปัจจัยเหล่านี้สามารถอธิบายได้ ดังรายละเอียดที่กล่าวมาทั้งหมด ดังนั้นจึงสามารถที่จะนำเอาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วย CFD นี้ ไปใช้ในการคำนวณปรากฏการณ์ ของการกำเนิดลำพุ่งด้วยการกระแทก สำหรับกรณีอื่นๆ ได้



รูปที่ 3.9 ความดันที่เกิดจากการกระแทกผ่านตัวกลางแท่งทองเหลืองบนหัวฉีดของ Shi [4, 10]

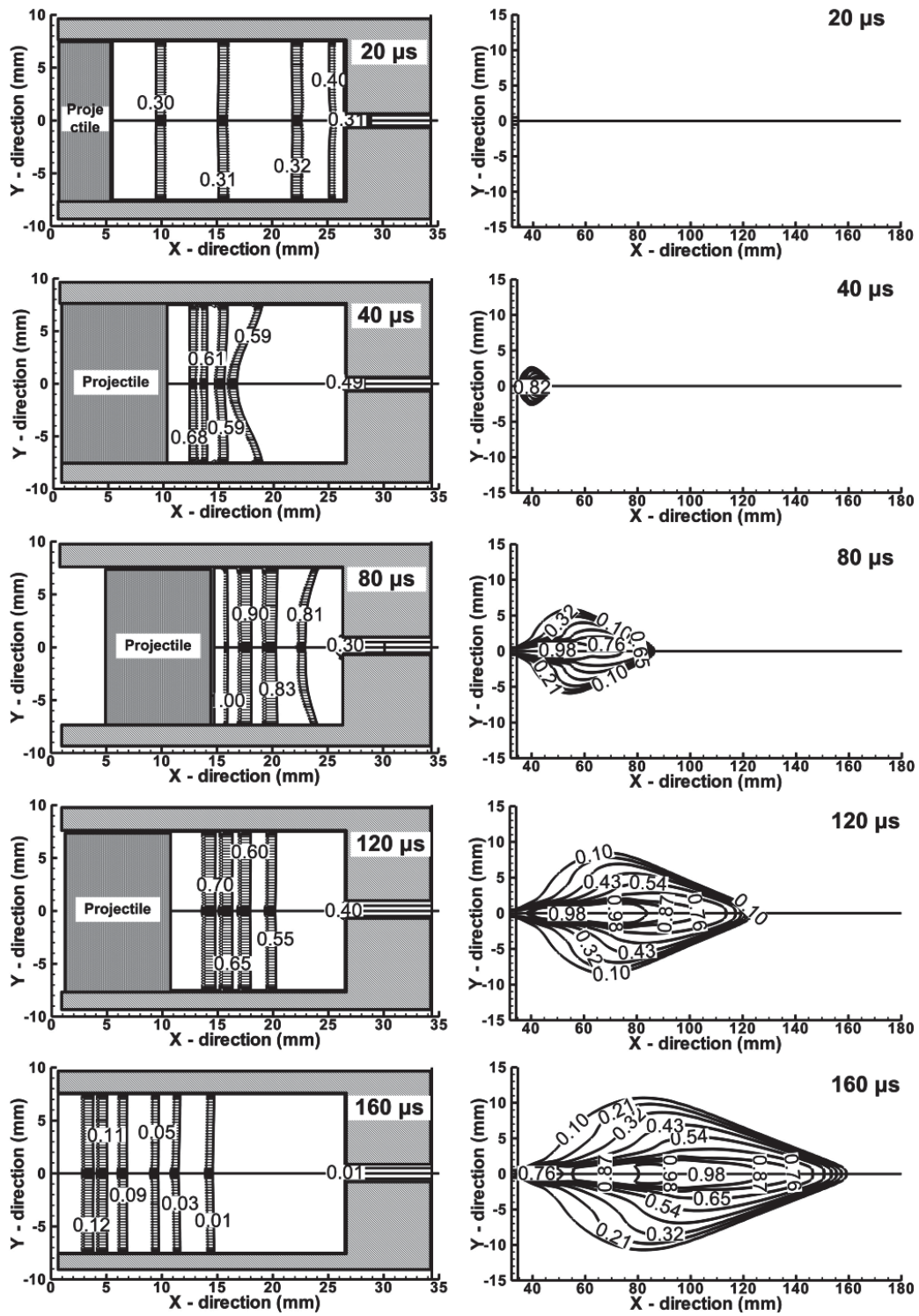


รูปที่ 3.10 อิทธิพลของน้ำหนักแท่งทองเหลืองที่มีต่อความเร็วและความดันสูงสุด

1.4 ผลการศึกษา

1.4.1 รูปแบบการไหลในหัวฉีดและลำพู่

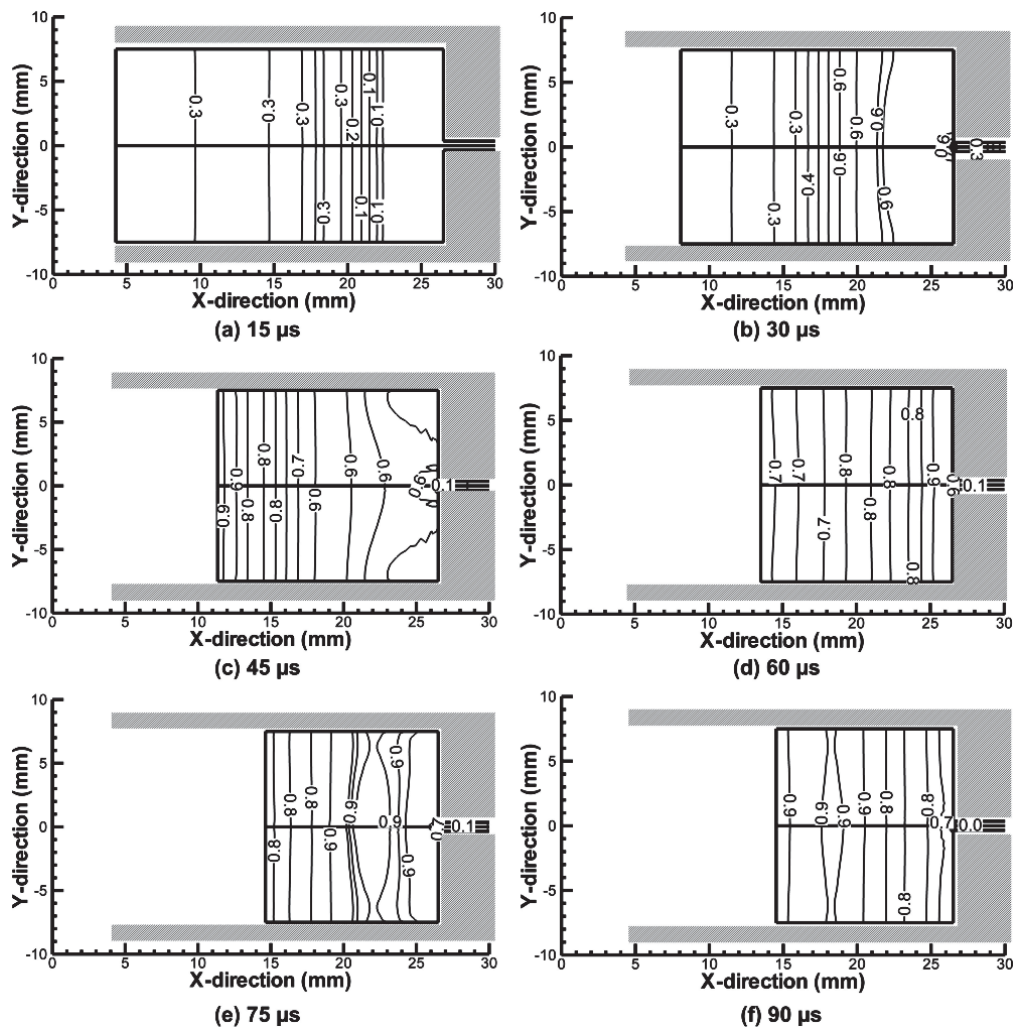
เนื่องจากพฤติกรรมการสะท้อนของคลื่นช็อคกบนของไหลในหัวฉีดมีอิทธิพลกับคุณลักษณะของลำพู่ความเร็วสูง ดังนั้น ด้วยการคำนวณจาก CFD ผลที่ได้ทำให้เราได้เห็นการเปลี่ยนแปลงรูปแบบความดันในหัวฉีด และความเร็วของลำพู่ ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ซึ่งการไหลจะเปลี่ยนแปลงตามเวลาและแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบความเร็วของลำพู่กับการเคลื่อนที่ของคลื่นช็อคกในน้ำมันดีเซลที่บรรจุในหัวฉีดแบบบ่าตรง ที่มีปริมาตร 4.68 cm^3 ความเร็วลูกปืน 300 m/s จากรูปแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นและความดันที่เกิดขึ้นจากการกระแทกของลูกปืน ซึ่งพฤติกรรมนี้สอดคล้องกับ การเกิดลำพู่ที่เป็นช่วงๆ (Jet pulses) โดยในช่วง $20 \mu\text{s}$ แรกคลื่นที่อยู่ด้านหน้าผนังลูกปืนจะเคลื่อนที่ในแนวแกน x ไปยังคอขวดของหัวฉีด จากนั้นที่เวลา $40 \mu\text{s}$ ความดันที่บริเวณใกล้ปากทางออกหัวฉีดเริ่มเพิ่มขึ้นเนื่องจากการสะสมของเหลวจากคลื่นลำพู่ ซึ่งลำพู่ลูกแรกเกิดขึ้นในช่วงเวลานี้ มีความเร็วประมาณ 820 m/s ที่เวลา $80 \mu\text{s}$ เมื่อความดันสูงขึ้นเกินกว่าความดันด้านหน้าลูกปืน จะเกิดคลื่นสะท้อนกลับจากทางออกหัวฉีด และสะสมความดันให้สูงขึ้นถึง 0.68 GPa และสูงขึ้นเรื่อยๆ จนถึง 1 GPa ณ เวลานี้ ลำพู่ลูกที่สองเริ่มออกจากหัวฉีด ซึ่งมีความเร็วประมาณ 980 m/s ซึ่งสูงกว่าลำพู่ลูกแรก (ดังแสดงในรูปที่ 3.11) ทั้งนี้เนื่องจากความดันฉีดมีค่าสูงกว่าความดันที่เกิดจากคลื่นช็อคกในช่วงเวลาเริ่มแรก ลูกปืนเริ่มเคลื่อนที่กลับเนื่องจากความดันในหัวฉีดที่สูงและการสูญเสียโมเมนตัมให้กับของเหลว ซึ่งหลังจากนี้ความดันจะเริ่มลดลง (สังเกตจากรูปที่ 3.11 ในช่วงเวลา 120 และ $160 \mu\text{s}$) ที่เวลา $120 \mu\text{s}$ สังเกตว่าก่อนความเร็ว 980 m/s เริ่มออกห่างจากหัวฉีด และยังชัดเจนที่เวลา $160 \mu\text{s}$ อันเป็นผลเนื่องจากแรงดันฉีดที่ลดลงนั่นเอง ซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องและสามารถนำมาอธิบายการเกิดลำพู่ความเร็วสูงลักษณะเป็นช่วงๆ (Multiple pulses) จากการทดลองของงานวิจัยที่ผ่านมาได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 3.11 ระดับความดัน (GPa) ของของเหลวไหลในหัวฉีด และความเร็วของลำพุ่ง (km/s)

1.4.2 พฤติกรรมการไหลในหัวฉีด

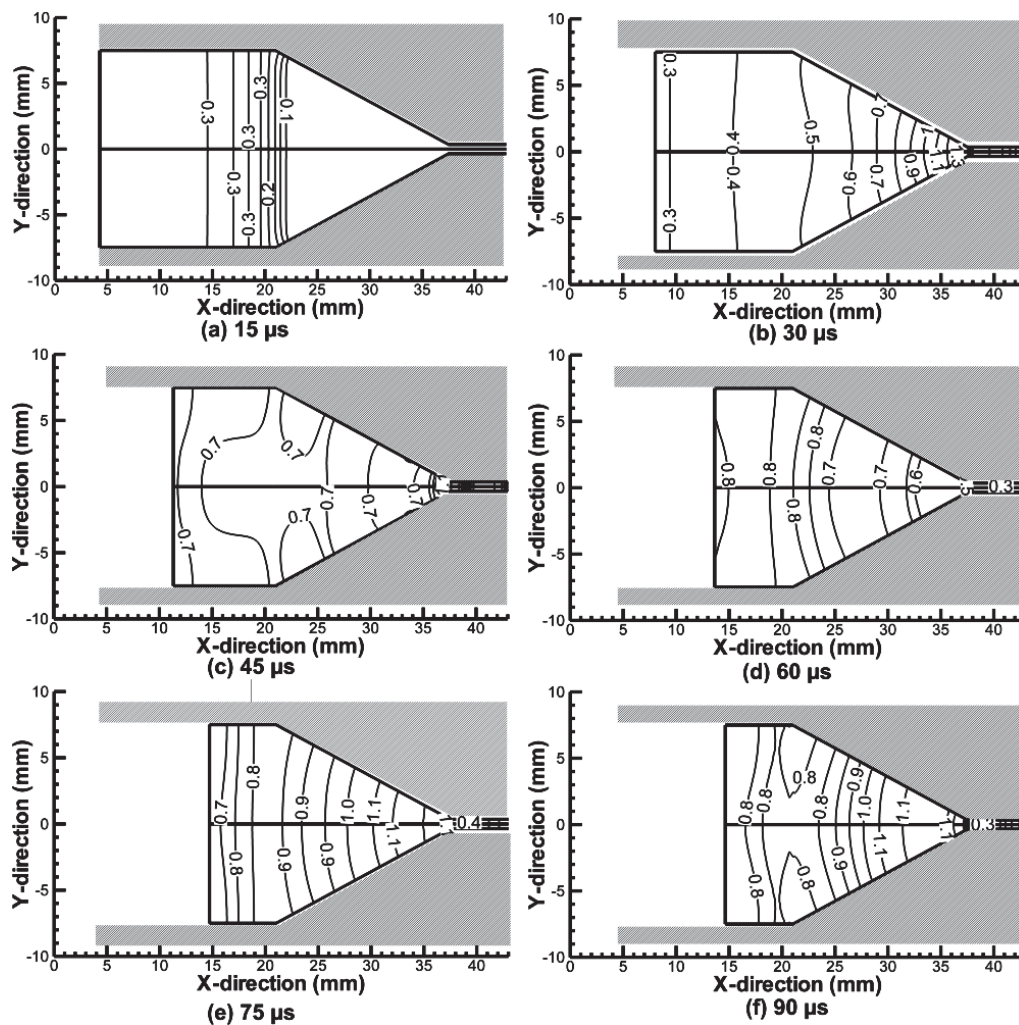
หัวข้อนี้จะเสนอ คุณลักษณะเชิงพลศาสตร์ของกระบวนการกำเนิดลำพุ่งในหัวฉีด จากการคำนวณของ CFD ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา ถึงอิทธิพลของการเคลื่อนที่ของคลื่นช็อคในหัวฉีดที่มีต่อคุณลักษณะของลำพุ่ง ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงเสนอพร้อมอธิบายรูปแบบความดันที่เกิดขึ้นในหัวฉีดจากอิทธิพลของรูปร่างหัวฉีดและรูปแบบการขับของเหลว ดังแสดงในรูปที่ 3.12 - 3.15



รูปที่ 3.12 ระดับความดัน (GPa) ของน้ำมันดีเซลในหัวฉีดแบบบ่าตรง

รูปที่ 3.12 และ 3.13 แสดง ความดันในหัวฉีดแบบบ่าตรงและบ่าเป็นกรวยตามลำดับ จากการกระแทกของลูกปืนความเร็ว 300 m/s บนน้ำมันดีเซลปริมาตร 4.68 cm³ สำหรับหัวฉีดแบบบ่าตรง พบว่าความดันก่อตัวขึ้นสามครั้งที่บริเวณใกล้ปากทางออกหัวฉีด ซึ่งสอดคล้องกับจำนวนลูกลำพุ่งที่ออกจากหัวฉีด ช่วงแรกที่ 15 μ s (รูปที่ 3.12(a)) ความดันบริเวณด้านหน้าหัวฉีดมีค่า 0.3 GPa และลดลงตามระยะที่ห่างออก จากนั้นที่เวลา 30 μ s มวลของเหลวเริ่มสะสมและมีความดันสูงขึ้นที่

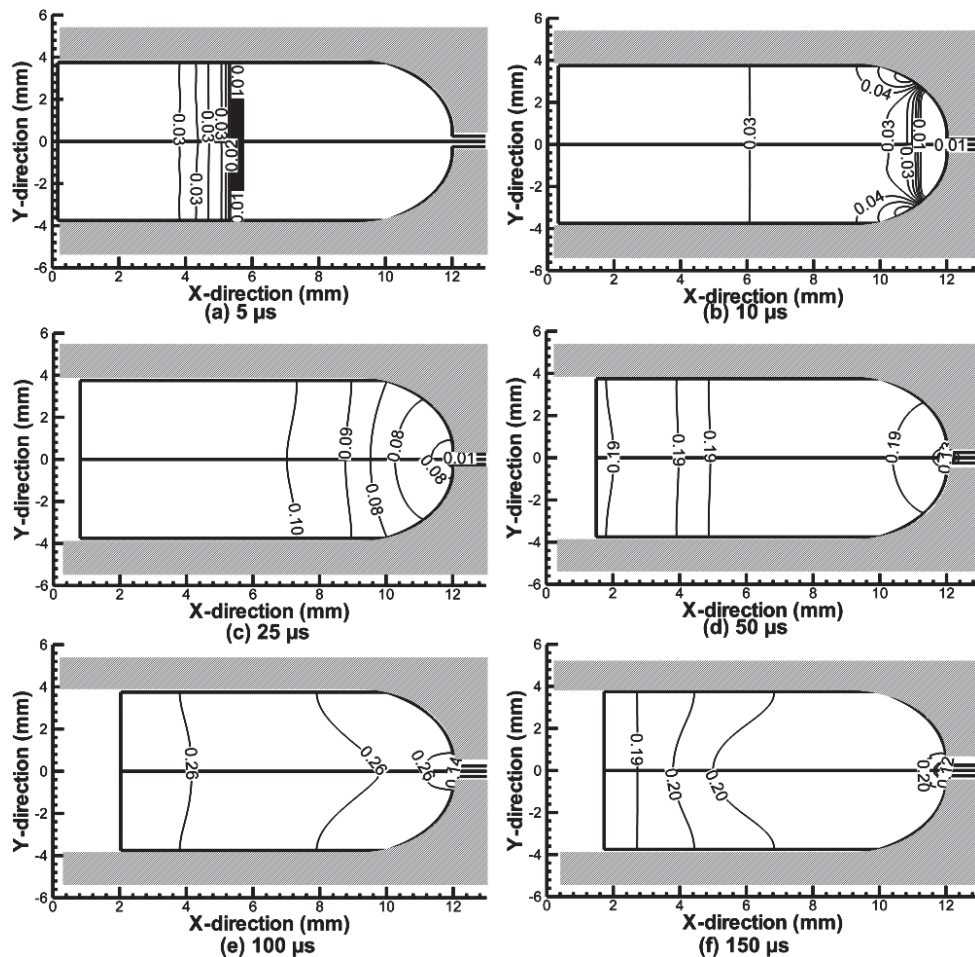
บริเวณใกล้หัวฉีด จนเมื่อมีความดันเกินกว่าที่เกิดขึ้นในช่วงก่อนหน้านี้ คลื่นช็อคก็เริ่มสะท้อนกลับไปยังผนังลูกปืนพร้อมกับลำพุงลูกแรกถูกขับออกจากหัวฉีด เป็นเหตุให้ความดันที่บริเวณดังกล่าวเพิ่มขึ้น ก่อนสะท้อนกลับไปยังบริเวณบ่าหัวฉีด ด้วยเหตุนี้ความดันขั้วและความเร็วของลำพุงลูกที่สองมีค่าสูงกว่าลูกแรก ดังแสดงในรูปที่ (รูปที่ 3.12(b) ถึง 3.12(f)) ซึ่งหลังจากนี้ลูกปืนจะเริ่มเคลื่อนที่กลับเนื่องจากโมเมนตัมถูกถ่ายเทให้ของเหลวทั้งหมด และความดันของเหลวที่สูงขึ้น



รูปที่ 3.13 ระดับความดัน (GPa) ของน้ำมันดีเซลในหัวฉีดแบบบ่าเป็นกรวย

จากการศึกษาด้วยการคำนวณ CFD พบว่ารูปแบบการไหลและค่าความดันของของเหลวในหัวฉีดแบบบ่าตรงและบ่าเป็นกรวย มีความแตกต่างกันมาก เนื่องจากรูปร่างที่ทางเข้าหัวฉีดแตกต่างกัน ซึ่งการไหลในหัวฉีดแบบบ่าเป็นกรวย แสดงในรูปที่ 3.13 พบว่าในช่วงเวลาแรก (รูปที่ 3.13(a)) คลื่นช็อค ไหลเข้าทางออกหัวฉีดเสมือนปรากฏการณ์การไหลในท่อคู่ข้าวของก๊าซความดันสูง ทำให้ความดันสะสมของลำพุงลูกแรกมีค่าสูงที่สุด ซึ่งหลังจากนั้นความดันในหัวฉีดจะลดลงเนื่องจาก

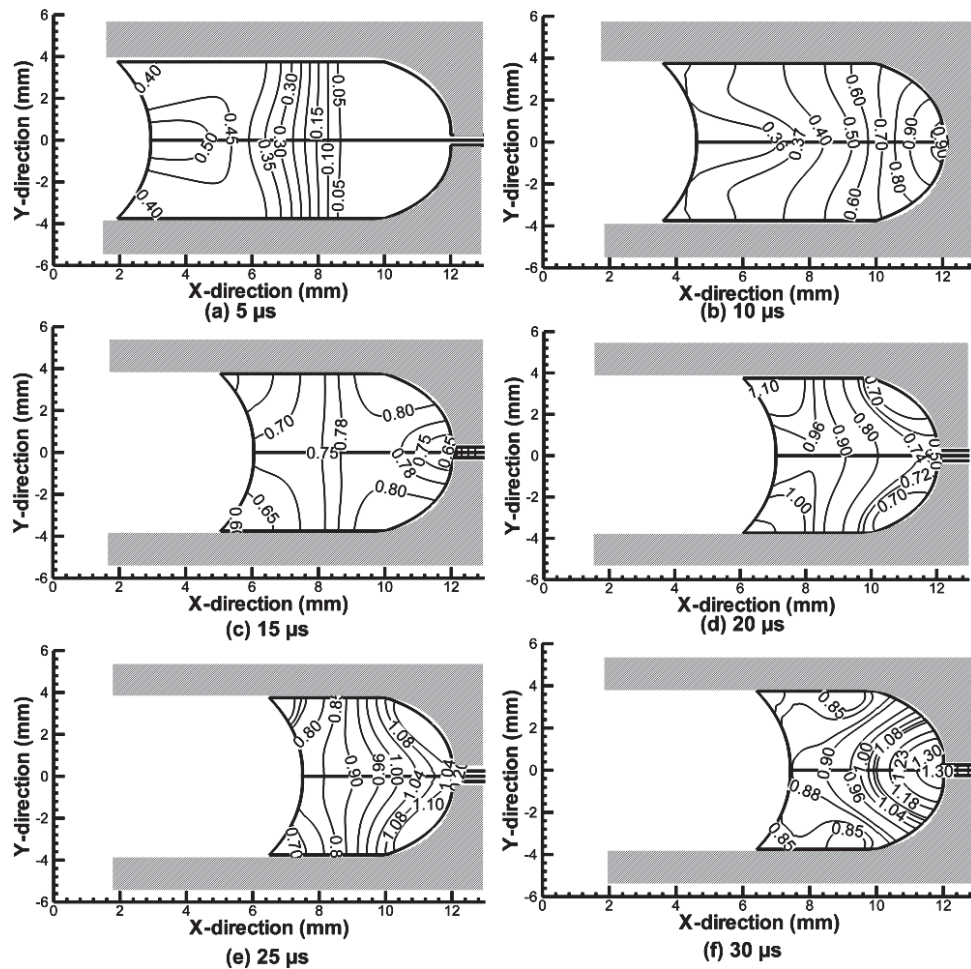
การปล่อยไหลออก (แสดงในรูปที่ 3.13(c)) ถึงแม้ลูกปืนยังคงเคลื่อนที่เข้าหาบ่าของหัวฉีด ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะต่างออกไปจากหัวฉีดแบบบ่าตรงที่ความดันฉีดสูงสุดจะเกิดกับลำพุงลูกที่สอง เนื่องจากในหัวฉีดแบบบ่าตรง การลดของความดันใกล้ทางออกหัวฉีดเพื่อกำเนิดลำพุงลูกแรก ลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งทำให้ทำดันถูกทำให้สูงขึ้นได้อีก จากการเคลื่อนที่กลับมาของคลื่นช็อค แต่อย่างไรก็ตาม พบว่าลำพุงลูกที่สามเกิดขึ้นในช่วงที่ลูกปืนเคลื่อนที่กลับแล้ว



รูปที่ 3.14 ระดับความดัน (GPa) ของน้ำมันดีเซลในหัวฉีดของ Shi แบบกระแทกผ่านตัวกลาง

รูปที่ 3.14 และ 3.15 แสดงรูปแบบการไหลในหัวฉีดรูปร่างบ่าโค้งของ Shi จากวิธีการกระแทกผ่านตัวกลางและกระแทกตรง ตามลำดับ โดยความเร็วลูกปืน 414 m/s หัวฉีดบรรจุน้ำมันดีเซล พบว่าวิธีการวิธีการกระแทกผ่านตัวกลาง (แสดงในรูป 3.14) มีความดันขั้วต่ำกว่าแบบกระแทกตรง อีกทั้งความดันสะสมเพิ่มขึ้นค่อนข้างช้า การเคลื่อนที่ของคลื่นไม่ชัดเจน (สอดคล้องกับผลในรูปที่ 3.9) และที่สำคัญพบว่าระยะกดของลูกปืนบนน้ำมันดีเซลสั้นมาก ประมาณ 1.8 mm เนื่องจาก โมเมนตัมบางส่วนจากลูกปืนยังคงเหลืออยู่ภายในแท่งทดแทนที่จะถูกส่งถ่ายเทให้กับ

ของเหลวทั้งหมด และความดันของเหลวค่อนข้างต่ำ แต่อย่างไรก็ตามโมเมนต์รวมของลูกปืนกับแท่งกด ยังคงมีค่าเท่ากับกรณีการกระแทกตรงทำให้ต้องใช้เวลานานขึ้นเพื่อถ่ายเทไปยังของเหลว ซึ่งเป็นสาเหตุให้ความเร็วและความดันนิจของลำพุ่งลดลง เมื่อมวลหรือความยาวแท่งกดเพิ่มขึ้นตามรูป 3.10

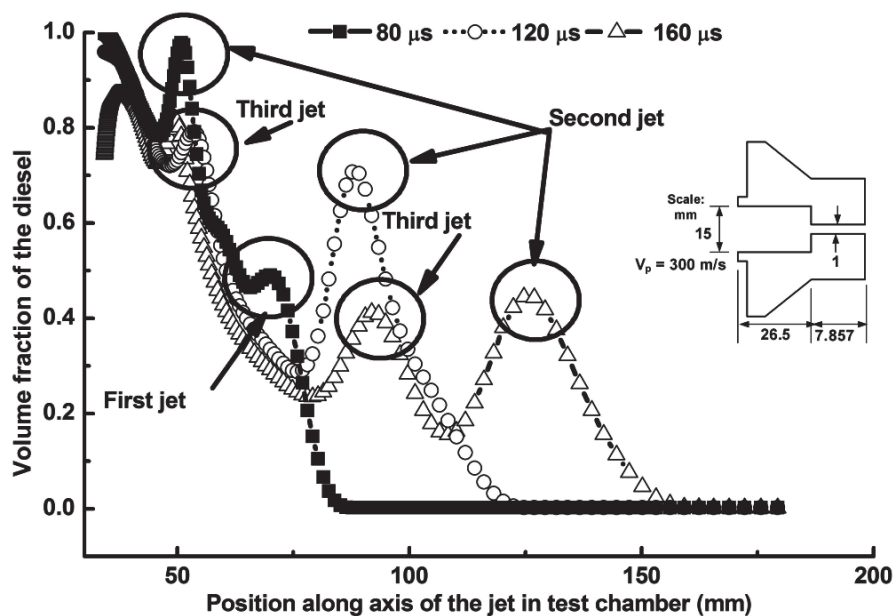


รูปที่ 3.15 ระดับความดัน (GPa) ของน้ำมันดีเซลในหัวฉีดของ Shi จากการกระแทกตรง

สำหรับกรณีการกระแทกตรง การไหลในหัวฉีดแสดงดังรูปที่ 3.15 ซึ่งจะมีความแตกต่างจากกรณีการกระแทกผ่านตัวกลางอยู่มาก กล่าวคือ สามารถสังเกตเห็นการกระจายความดันในระหว่างการกำเนิดลำพุ่งและการเคลื่อนที่ของคลื่นที่ไม่เป็นระเบียบ เนื่องจากปฏิกิริยาที่เป็นลักษณะโค้ง ทำให้เกิดการสะท้อนและประทะกันของคลื่นจนรูปแบบการเคลื่อนที่ไม่แน่นอน การกระแทกโดยตรงบนของเหลว ทำให้โมเมนต์ถูกถ่ายเทอย่างรวดเร็วทำให้ของเหลวมีความดันนิจสูง รูปแบบการไหลคล้ายกับกรณีหัวฉีดแบบบ่าตรงที่อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ แต่ก็มีรูปแบบความดันที่แตกต่างกันเนื่องจากรูปร่างของบ่าที่ทางออกหัวฉีด

1.4.3 การเปลี่ยนสถานะของลำพู่

โดยปกติการแตกตัวเป็นละออง (Breaking up) ของของเหลวจะเกิดขึ้นเสมอ เมื่อลำพู่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว เนื่องจากแรงเฉือนระหว่างผิวของของเหลวกับอากาศทำให้แตกเป็นละอองขนาดเล็ก ก่อนจะเปลี่ยนสถานะเป็นไอหรือก๊าซ ด้วยการระเหย (Vaporization) กรณีลำพู่ความเร็วสูงที่กำหนดจากการกระแทกก็เช่นเดียวกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยผลการคำนวณ CFD ดังแสดงในรูปที่ 3.16 ซึ่งเป็นสัดส่วนปริมาตรตามแนวแกนของน้ำมันดีเซลที่เวลา 80 120 และ 160 μs ของลำพู่ที่กำหนดจากการกระแทกตรงบนหัวฉีดแบบบ่าตรง พบว่าสัดส่วนของเหลวมีลักษณะเพิ่มขึ้นสูงต่ำ (Pulse) 3 ครั้ง สอดคล้องกับปรากฏการณ์ในหัวฉีดที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.4.1 จากรูปที่ 3.16 ช่วงเวลา 80 μs แรกจะสังเกตเห็นลำพู่ลูกแรกและลูกสองอย่างชัดเจน โดยลูกที่สองจะอยู่ใกล้หัวฉีดและมีสัดส่วนปริมาตรเท่ากับหนึ่งหรือยังคงเป็นของเหลวอยู่ ขณะที่ ลูกแรกจะอยู่ห่างหัวฉีดและปริมาตรบางส่วนเปลี่ยนสถานะเป็นก๊าซแล้ว จากการแตกตัวเป็นละอองและระเหยเป็นไอ แรงเฉือนบนผิวของเหลวสูงขึ้น จากการปะทะกับอากาศ ในห้องทดสอบ ดังนั้นสัดส่วนปริมาตรของเหลวจึงลดลง เมื่อลำพู่เคลื่อนที่ออกห่างจากหัวฉีด และใช้เวลาเดินทางมากขึ้น ดังแสดงในช่วงเวลา 120 μs และ 160 μs ซึ่งพบว่าลำพู่ลูกแรกได้หายไปแล้วเพราะการเปลี่ยนสถานะเป็นก๊าซจนหมด ขณะที่ลูกที่สองและสามมีสัดส่วนของเหลวน้อยลง



รูปที่ 3.16 สัดส่วนปริมาตรของเหลวตามแนวแกน

1.4.4 อิทธิพลของพารามิเตอร์ที่มีต่อลำพุ่งความเร็วสูง

หัวข้อนี้จะเป็นการอภิปรายคุณลักษณะของการกำเนิดลำพุ่ง ที่เป็นผลจากพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางคอขวด ความยาวท่อหัวฉีด ความยาวคอขวด ความหนาแน่นและความเร็วของลูกปืน โดยจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปรากฏการณ์ภายในหัวฉีดกับการกำเนิดลำพุ่ง ด้วยค่าความดันและความเร็วที่ตำแหน่งทางเข้าคอขวดและทางออกหัวฉีดตามลำดับ ในการศึกษาใช้หัวฉีดแบบบ่าตรงที่มีขนาดพื้นฐาน ดังนี้ เส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 1 mm ท่อหัวฉีดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 mm ยาว 26.5 mm คอขวดยาว 7.857 ลูกปืนหนัก 4.2 g มีความเร็ว 300 m/s กระแทกบนน้ำมันดีเซล ซึ่งค่าเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงเฉพาะกรณีที่ต้องการศึกษาพารามิเตอร์นั้น ๆ โดยกำหนดให้ค่าอื่นคงที่ไว้

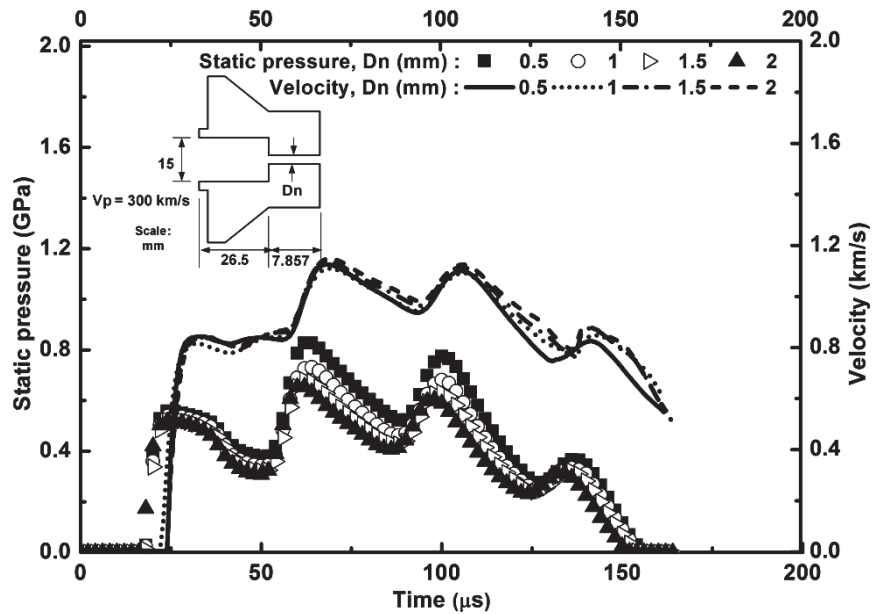
1) เส้นผ่านศูนย์กลางคอขวด

เป็นที่ทราบกันดีว่าเส้นผ่านศูนย์กลางคอขวดเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่มีผลกับการฉีดของลำพุ่ง ดังนั้นในหัวข้อนี้ จึงจะเสนอการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ดังกล่าวด้วย CFD โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอขวด ดังนี้ 0.5 1.0 1.5 และ 2 mm ขณะที่ค่าอื่นกำหนดให้คงที่ ผลที่ได้ในเทอมของความดันและความเร็วที่ตำแหน่งทางเข้าคอขวดและทางออกหัวฉีด แสดงดังรูปที่ 3.17 พบว่าความดันในหัวฉีดถูกสร้างขึ้นในลักษณะเป็นช่วงๆ อันเป็นผลจากการเคลื่อนที่และสะท้อนของคลื่นช็อคกับบนน้ำมันดีเซล ในหัวฉีด ซึ่งทำให้ความเร็วที่ปากทางออกหัวฉีดมีลักษณะเป็นช่วงๆ เช่นกัน สอดคล้องกับรายละเอียดที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา โดยค่าสูงสุดจะเกิดในช่วงที่สอง และทั้งสามช่วงของความดันและความเร็วจะต่างกันอยู่ประมาณ 5 μ s เหมือนกันทุกกรณี เส้นผ่านศูนย์กลางคอขวดมีผลกับแนวโน้มของกราฟความเร็วเพียงเล็กน้อย และดูเหมือนไม่เปลี่ยนแปลงในช่วงเวลา 100 μ s แรก แม้ว่าความดันจะสูงขึ้นในช่วงที่สองและสาม เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงเนื่องอัตราการเกิดโพรงอากาศขณะกำเนิดลำพุ่ง และการแตกตัวเป็นละออง มีมากขึ้นเมื่อของเหลวความดันสูงไหลผ่านช่องคอขวดขนาดเล็ก นอกจากนี้ ดูเหมือนว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใช้จะมีขนาดโตไม่เพียงพอที่จะมีผลกับการไหลของลำพุ่ง

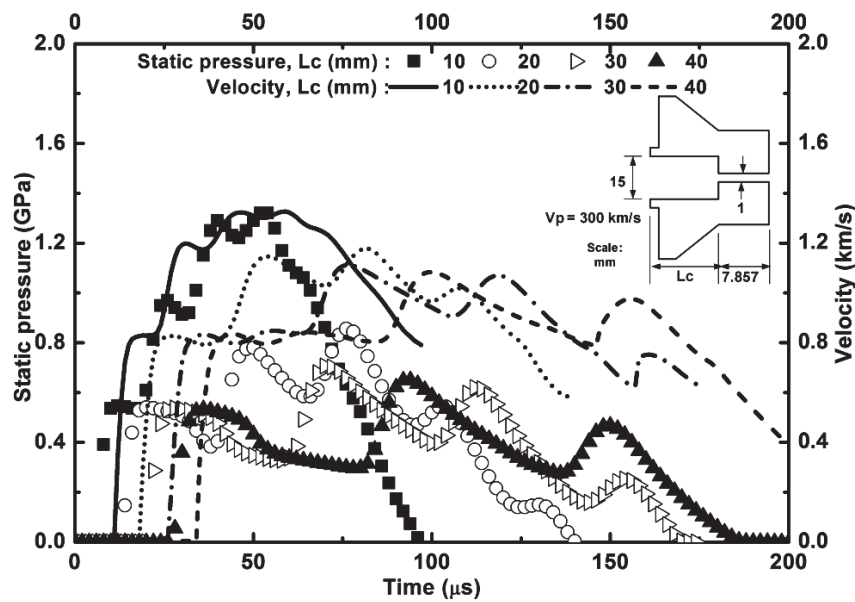
2) ความยาวของท่อหัวฉีด

การเปลี่ยนความยาวของท่อหัวฉีดใน CFD ช่วยศึกษาอิทธิพล ของความถี่ในการสะท้อนคลื่นช็อคในหัวฉีด และปริมาตรบรรจุของไหลที่มีต่อความดันฉีดและการไหลของลำพุ่ง ความยาวที่ใช้ คือ 10 20 30 และ 40 mm เส้นผ่านศูนย์กลางคอขวด 1 mm และ ลูกปืนมีความเร็ว 300 m/s รูปที่ 3.18 แสดง การเปลี่ยนแปลงความดันฉีดและความเร็วลำพุ่ง จากความยาวท่อหัวฉีดขนาดต่างๆ พบว่าลำพุ่งลูกที่สามของหัวฉีดที่มีท่อสั้นสุด 10 mm มีความเร็วสูงสุดประมาณ 1300 m/s ที่ความดันฉีด 1.3 GPa เนื่องจากความยาวท่อที่เพิ่มขึ้นทำให้กระบวนการกำเนิดลำพุ่งเพิ่มใช้เวลานานขึ้น

ความดันจึงลดลงสอดคล้องกับความเร็วด้วย แต่น่าแปลกที่ไม่พบว่าลูกปืนกระแทกบ่าหัวฉีดถึงแม้ท่อจะสั้นลงมากก็ตาม เพราะความดันของน้ำมันดีเซลที่สูงขึ้นนั่นเอง อีกประการที่เกิดปรากฏการณ์ที่น่าสนใจ คือ เราพบว่าเกิดลำพุ่งขึ้นสี่ลูก ทุกกรณี เพราะโมเมนตัมของลูกปืนเท่ากัน ที่ถูกถ่ายทอดให้กับของเหลว เมื่อท่อหัวฉีดที่ยาวทำให้กระบวนการสร้างลำพุ่งกินเวลานานขึ้น หมายความว่าคลื่นช็อกก็ต้องเดินทางเป็นระยะไกลขึ้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ ปริมาตรบรรจุที่เพิ่มขึ้นเท่ากับมีมวลจำนวนมากช่วยดูดซับพลังงานจากลูกปืน ดังนั้นกระบวนการจึงต้องใช้เวลานานขึ้นเพื่อลดพลังงานการกระแทกของลูกปืนลง



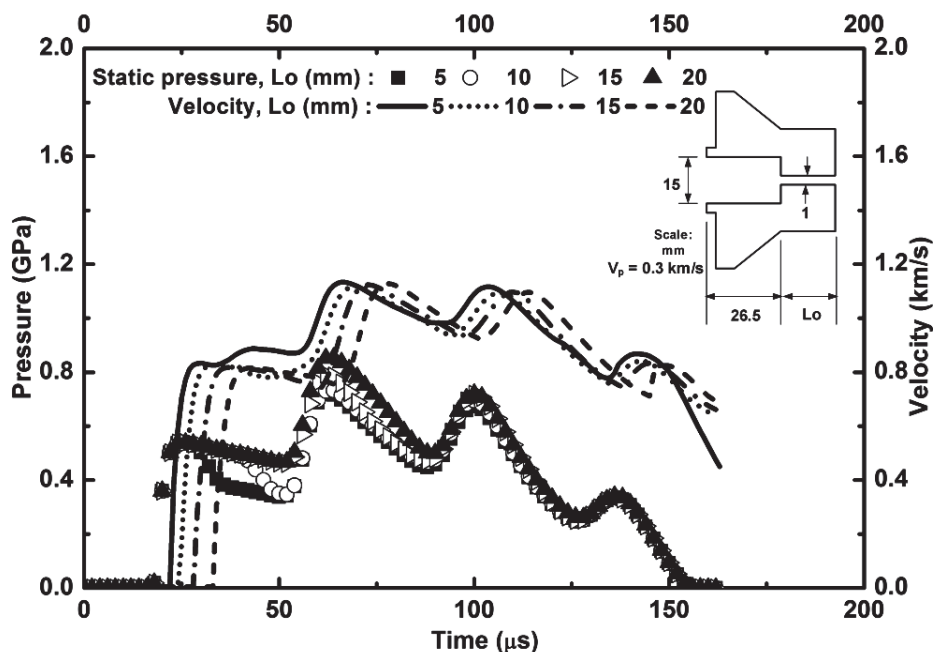
รูปที่ 3.17 ความดันและความเร็วกับเส้นผ่านศูนย์กลางคอขวดที่เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 3.18 ความดันและความเร็วกับความยาวของท่อหัวฉีดที่เปลี่ยนแปลง

3) ความยาวคอขวด

เนื่องจากการไหลผ่านคอขวดมีผลโดยตรงกับคุณลักษณะการฉีด ซึ่งการศึกษานี้ก็ได้พยายามศึกษาผลกระทบของรูปร่างคอขวดเช่นกัน ด้วยการเปลี่ยนความยาวคอขวด จาก 0.5 mm ถึง 20 mm และกำหนดพารามิเตอร์อื่นให้คงที่ เพื่อศึกษาอิทธิพลของความยาวคอขวดที่มีต่อการกำเนิดและคุณลักษณะลำพุ่ง ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 3.19 พบว่าเมื่อ คอขวดมีความยาวเพิ่มขึ้น ลำพุ่งจะถูกบีบลำช้าลงเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามพบว่า แนวโน้มของกราฟความเร็วแตกต่างกันน้อยมาก แม้ช่วงเวลาลำช้าจะยาวขึ้นและความดันขับในช่วงแรกจะเพิ่มขึ้น เมื่อคอขวดมีความยาวเพิ่มขึ้นก็ตาม อีกทั้งความเร็วสูงสุดเกิดขึ้นที่ลำพุ่งลูกที่สองเหมือนกันทุกกรณี หลังจากลำพุ่งลูกแรก และลูกที่สองพบว่าแนวโน้มของกราฟความดันไม่ขึ้นกับความยาวคอขวด ที่ความยาว 5 และ 10 mm กราฟความดันในช่วงเวลา 20 - 80 μs มีความแตกต่างจากกรณีความยาวอื่น (แต่ช่วงเวลานั้นแตกต่างกันน้อยมาก) เนื่องจากการเคลื่อนที่ของลำพุ่งให้มีความเร็ว ออกจากหัวฉีดส่งผลให้ความดันในคอขวดลดลงเล็กน้อย เพราะระยะของบ่าหัวฉีดใกล้กับทางออกนั่นเอง

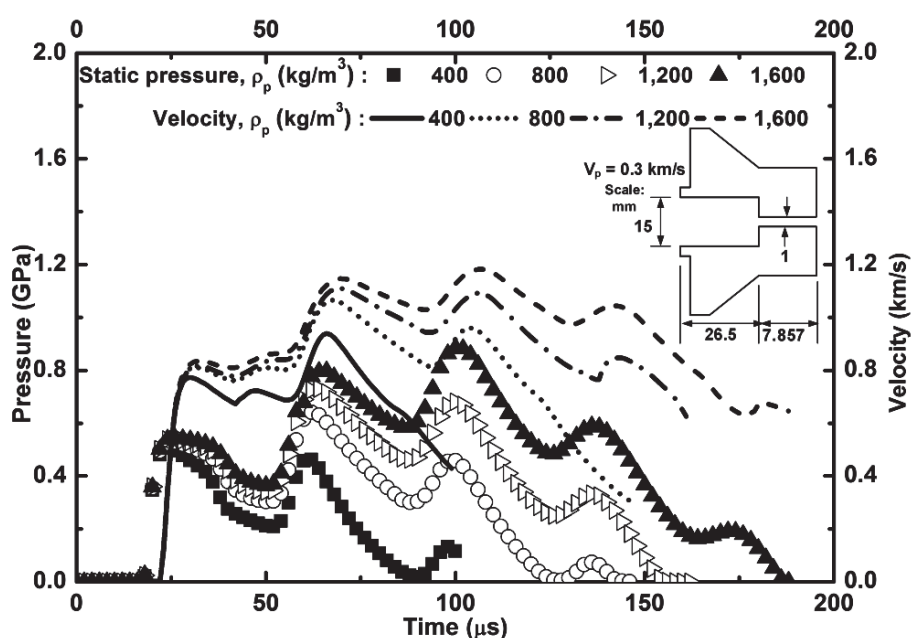


รูปที่ 3.19 ความดันฉีดและความเร็วกับ ความยาวของคอขวดที่เปลี่ยนแปลง

4) ความหนาแน่นของลูกปืน

การกระแทกลูกปืนบนของเหลวเพื่อขับของเหลวให้ฉีดเป็นลำพุ่ง น้ำหนักลูกปืนเป็นปัจจัยสำคัญอีกอย่าง ที่จะกำหนดลักษณะลำพุ่ง เนื่องจากเป็นค่าบ่งชี้ระดับพลังงานจลน์ที่จะใช้สร้างความดันฉีดให้กับการขับลำพุ่ง แต่อย่างไรก็ตาม การทดลองที่ผ่านมา ยังไม่มีการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยดังกล่าวอย่างจริงจัง ดังนั้นการศึกษานี้จึงเป็นครั้งแรกที่จะได้นำเสนอผลกระทบของน้ำหนักลูกปืน

ที่มีต่อการกำเนิด และคุณลักษณะของลำพุ่ง เพื่อให้ง่ายต่อการประยุกต์ใช้งานจริง กำหนดให้รูปร่าง และปริมาตรของลูกปืนคงที่ หมายความว่า การเปลี่ยนน้ำหนักลูกปืนมีผลโดยตรงกับความหนาแน่น ของลูกปืนนั้น ซึ่งในการปฏิบัติจริง สามารถปรับด้วยการเปลี่ยนชนิดวัสดุของลูกปืน ในการศึกษา นี้ ใช้ความหนาแน่นของลูกปืน 400 800 1200 และ 1600 kg/m³ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.20 พบว่า ความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความเร็วและลำพุ่งเพิ่มขึ้น ขณะที่เวลาของกระบวนการสร้างลำพุ่ง เพิ่มขึ้นด้วย ความเร็วและความดันสูงสุดที่พบมีค่าเท่ากับ 1200 m/s และ 0.9 GPa ตามลำดับ ที่กรณี ความหนาแน่นสูงสุด (1600 kg/m³) และพบว่าความหนาแน่นของลูกปืนมีผลโดยตรงกับแนวโน้ม ของกราฟความดันและความเร็ว ซึ่งเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น พลังงานจลน์ของลูกปืนจะมีมาก ส่งผลให้ช่วงเวลาของกระบวนการกำเนิดลำพุ่งยาวขึ้น และการถ่ายเทโมเมนตัมมีมากขึ้น ด้วยเหตุนี้ ความดันฉีดและความเร็วของลำพุ่งสูงขึ้น ที่ความเร็วกระแทกของลูกปืนเท่ากัน

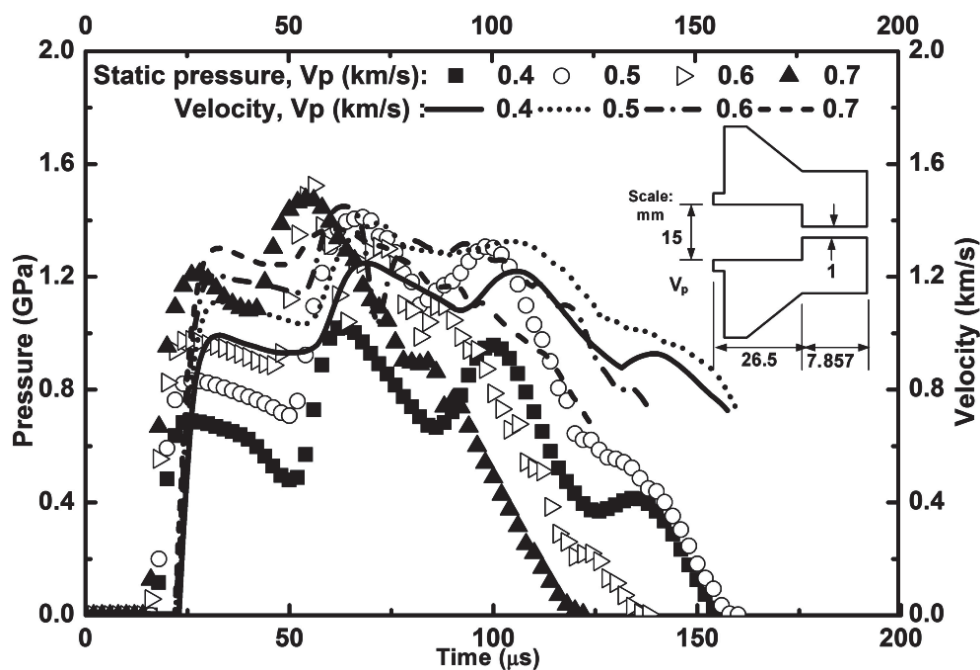


รูปที่ 3.20 ความดันฉีดและความเร็วกับความหนาแน่นของลูกปืนที่เปลี่ยนแปลง

5) ความเร็วของลูกปืน

หัวข้อนี้จะได้อภิปรายอิทธิพลของ ความเร็วลูกปืน ที่มีต่อการกำเนิดลำพุ่ง เนื่องจาก เกี่ยวข้องกับขนาดโมเมนตัมของลูกปืนโดยตรง ทำให้นักวิจัยพยายามที่จะศึกษาผลกระทบของ ความเร็วของลูกปืน ด้วยการทดลองและหรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แต่อย่างไรก็ตาม ยังไม่มี การอธิบายผลได้อย่างชัดเจนว่าความเร็วลูกปืนมีผลกับคุณลักษณะและการกำเนิดลำพุ่งอย่างไร เนื่องจาก ควบคุมปัจจัยการทดลองได้ยากและเป็นกรณีการไหลที่ยู่ยากซับซ้อน ที่จะอธิบายด้วย สมการคณิตศาสตร์อย่างง่าย แต่อย่างไรก็ตาม ผลจาก CFD ของการศึกษานี้ เราสามารถนำมาช่วย

ศึกษาและอธิบายอิทธิพลของความเร็วลูกปืนได้อย่างชัดเจน กว่าการศึกษาที่ผ่านมาได้ ด้วยการเปลี่ยนแปลงความเร็วลูกปืน จาก 300 ถึง 700 m/s ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.21 พบว่า ความเร็วและความดันนิวเคลียสสูงขึ้น เมื่อความเร็วลูกปืนสูงขึ้น พบค่าพุงสี่ลูกและเวลาลำบากของการเกิดลำพุงประมาณ 10 μ s ทุกกรณี นอกจากนี้ยังพบว่าที่ความเร็วลูกปืนสูงกว่า 600 m/s ลูกปืนจะกระทบกับเป้าหมาย ซึ่งทำให้เวลาของกระบวนการสร้างลำพุงสั้นลง และเช่นเดียวกับความดันและความเร็วที่ลดลงหลังลำพุงลูกที่สอง ทำให้กราฟของกรณีลูกปืนกระแทกแตกต่างจากกรณีไม่กระแทกของลูกปืน เนื่องจากโมเมนต์ของลูกปืนไม่ได้ถ่ายให้กับของเหลวในหัวนิวเคลียสเท่านั้น แต่บางส่วนถูกถ่ายเทให้กับเนื้อวัสดุของลูกหัวนิวเคลียสด้วย



รูปที่ 3.21 ความดันนิวเคลียสและความเร็วกับความเร็วของลูกปืน

บทที่ 4

การดำเนินการทดลอง

การศึกษาปรากฏการณ์การไหล คุณลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูง เพื่อประยุกต์ใช้สำหรับการนำส่งยาผ่านผิวหนังนั้น จำเป็นจะต้องมีเครื่องมือ อุปกรณ์ หรือวิธีที่เหมาะสม ในบทนี้เราจะได้เสนอ หลักการและรายละเอียดของอุปกรณ์ในการทดลอง ที่เป็นชุดทดลองและเครื่องมือวัดต่างๆ อุปกรณ์ที่ใช้สร้างลำพุ่งมี 2 ลักษณะ แบ่งตามลักษณะของต้นกำเนิดกำลังขับ ได้แก่ แบบที่ 1 ใช้กำลังจากสปริง และ แบบที่ 2 ใช้กำลังจากแก๊ส คุณลักษณะของลำพุ่ง คือ ความเร็ว (Jet velocity) และความดันกระแทก (Impact pressure) จะวัดด้วย Photo detector และ PVDF film ตามลำดับ นอกจากนี้ ยังมีระบบถ่ายภาพด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง (High Speed Video Camera, HSVC) เพื่อจับภาพปรากฏการณ์การกำเนิดลำพุ่งและการเจาะผ่านเนื้อเยื่อจำลอง

1.1 อุปกรณ์กำเนิดลำพุ่งเพื่อนำส่งของเหลวผ่านผิวหนัง

ดังที่กล่าวไว้ในตอนต้นแล้วว่าในการศึกษานี้ เราใช้อุปกรณ์ 2 แบบ แบ่งตามลักษณะของต้นกำเนิดกำลังขับ ได้แก่ แบบที่ 1 กำลังขับจากสปริง โดยเป็นอุปกรณ์ที่มีการจัดจำหน่ายในท้องตลาดของบริษัท Merck ผลิตโดยบริษัท Bioject รุ่น Cool.Click และ แบบที่ 2 กำลังขับจากแก๊ส ซึ่งจะเป็นอุปกรณ์เพื่อการทดลองโดยต้นกำลังสร้างแรงดันแก๊สได้จากระบบไฮดรอลิก รายละเอียดของอุปกรณ์การทดลอง แสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.1.1 อุปกรณ์ขับเคลื่อนด้วยสปริง: Cool. Click

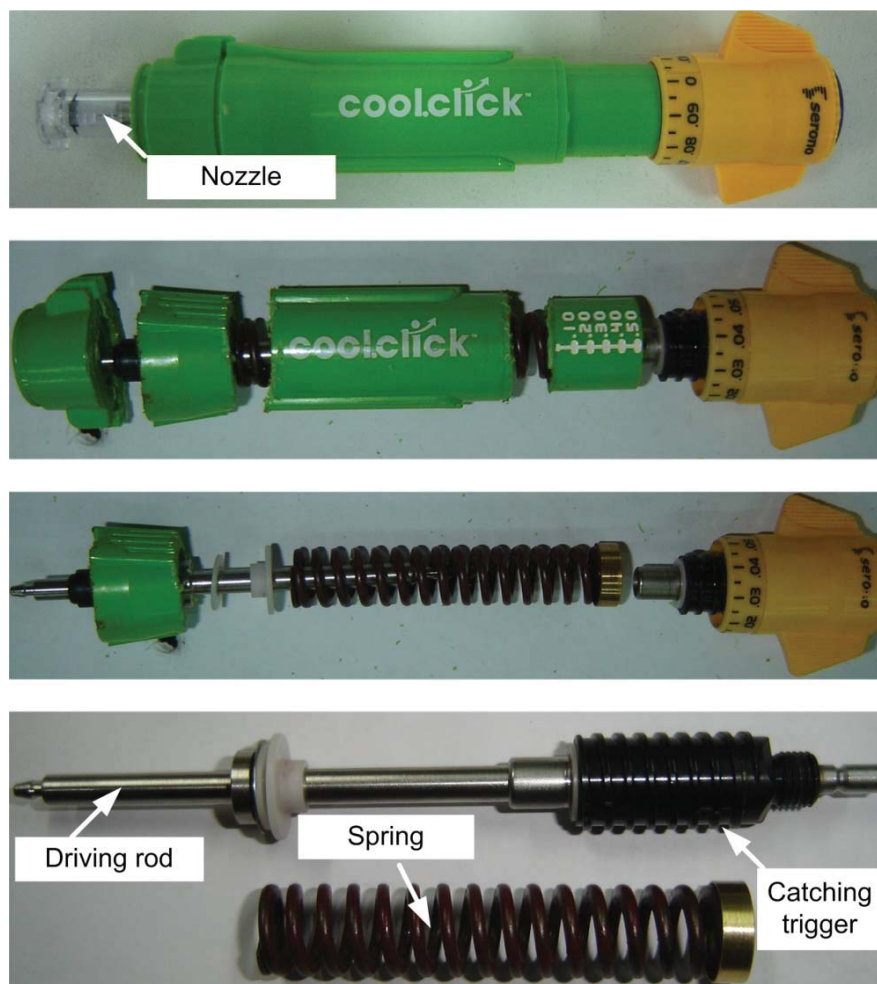
Cool.Click เป็นอุปกรณ์นำส่ง โสโมนเร้งการเจริญเติบโต Saizen ซึ่งจัดจำหน่ายโดยบริษัท Merck ประจำประเทศไทย ตัวอุปกรณ์ผลิตโดยบริษัท Bioject Medical Technologies ซึ่งข้อมูลเบื้องต้นของอุปกรณ์แสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีน้ำหนักเบาและขนาดเล็ก อีกทั้งยังสามารถบรรจุยาได้ในปริมาตรระดับ 0.02 ml เป็นอุปกรณ์ที่ใช้แรงขับจากสปริงฉีดได้ความลึกระดับปานกลาง (ถึงชั้น Subcutaneous แต่ไม่ถึงชั้นการฉีด Intramuscular)

รูปร่างลักษณะภายนอกและกลไกการทำงานภายในของ Cool.Click แสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งมีองค์ประกอบหลัก 4 ส่วน คือ อันที่ 1 หัวฉีด (Nozzle) อันที่ 2 แท่งกด (Driving rod) อันที่ 3 สปริง (Spring) และอันสุดท้าย คือ ไกยัดแท่งกด (Catching trigger) ซึ่งแต่ละส่วนจะทำงานสอดคล้องกันเพื่อสร้างลำพุ่งความเร็วสูงโดยหัวฉีดซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.17 mm ทำหน้าที่บรรจุยาที่เป็นของเหลว ซึ่งจะถูกอัดให้มีความดันสูงด้วยแท่งกดที่ถูกดันจากแรงขยายตัวของสปริง ทั้งนี้ในขั้นแรกของการทำงานของไกยัดแท่งกดจะหมุนเลื่อนตำแหน่งเพื่อกดให้สปริงยุบตัวพร้อมกับเข้าจับแท่งกด ก่อนจะปล่อยไกให้แท่งกดขับของเหลวในหัวฉีด

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลเบื้องต้นของ Cool.Click¹

ลักษณะ	ข้อมูล
ความยาว	155 mm
น้ำหนัก	158 g
ช่วงอุณหภูมิการทำงาน	14°-38° C
ต้นกำเนิดกำลังขับ	สปริง
ขนาดบรรจุยา	0.02 – 0.5 ml
ช่วงเวลาทำงาน	300 ms
ชั้นความลึกของการฉีด	Subcutaneous

¹ที่มาจาก เว็บไซต์ของ บริษัท Bioject Medical Technologies (<http://www.bioject.com>)

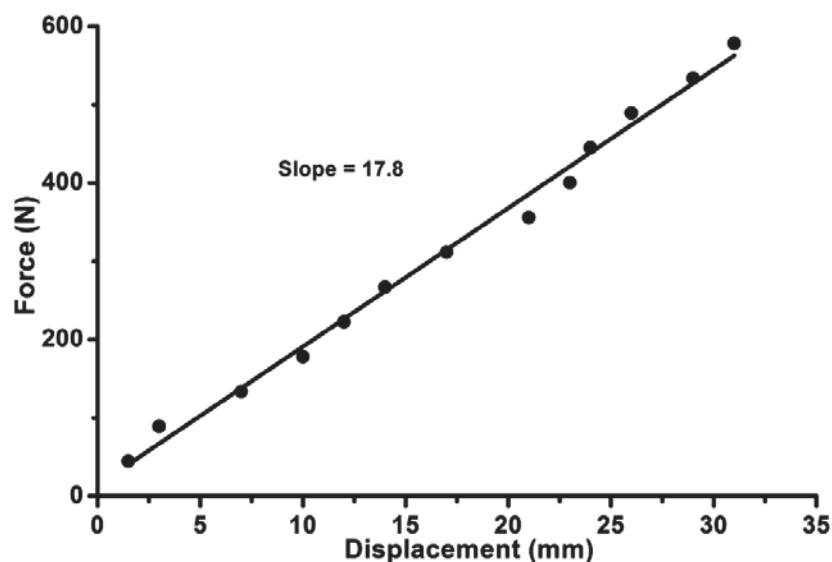


รูปที่ 4.1 ลักษณะและกลไกของอุปกรณ์นำส่งยาด้วยลำพุ่งความเร็วสูงแบบขับเคลื่อนด้วยสปริง

จากรายละเอียดข้างต้น จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติของสปริงเป็นปัจจัยที่จะกำหนด ความแรงของลำฟุ้ง ความลึกของการเจาะ และลักษณะการกระจายตัวในเนื้อเยื่อของยา ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะยุบกับแรงกดสปริงด้วยเครื่องทดสอบแรงกดของสปริง (RIMAC) แสดงการทดสอบ และผลที่ได้ ดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 การทดสอบแรงกดของสปริง

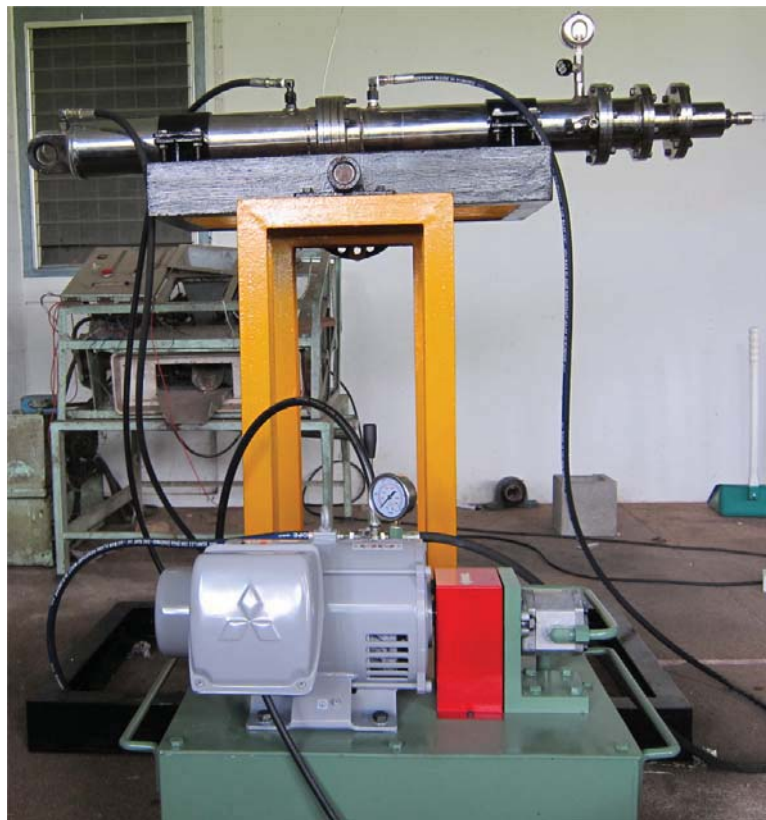


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะยุบกับแรงกดของสปริง

จากรูปที่ 4.3 จะพบว่าหากระยะยุบของสปริงเพิ่มมากขึ้นแรงกดจะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น โดยกราฟมีความชัน หรือค่าคงที่ของสปริง (Spring constant) เท่ากับ 17.8 N/mm

1.1.2 อุปกรณ์ขับเคลื่อนด้วยแก๊สแรงดันสูง: Med-jet NFIS

เพื่อการศึกษาคุณลักษณะต่างๆของการฉีดลำพ่นด้วยแรงขับจากก๊าซแรงดันสูง งานวิจัยนี้จึงได้ทำการสร้างชุดต้นแบบเพื่อการทดลองที่สามารถปรับเปลี่ยนเงื่อนไข ได้ตามที่ต้องการศึกษา ทีมผู้วิจัยเรียกชุดทดลองนี้ว่า Med-jet NFIS ซึ่งย่อมาจาก คำว่า “Medical Jet Needle Free Injection System” โดยใช้แรงขับเคลื่อนกำลังจาก ระบบไฮดรอลิก ดังแสดงในรูปที่ 4.4 แต่อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์ค่อนข้างมีขนาดใหญ่และนำไปใช้จริงได้ยาก เนื่องจากเป็นชุดต้นแบบเพื่อการทดลอง ชุดทดลองนี้มีส่วนประกอบ หลักการทำงานและการปรับเทียบ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

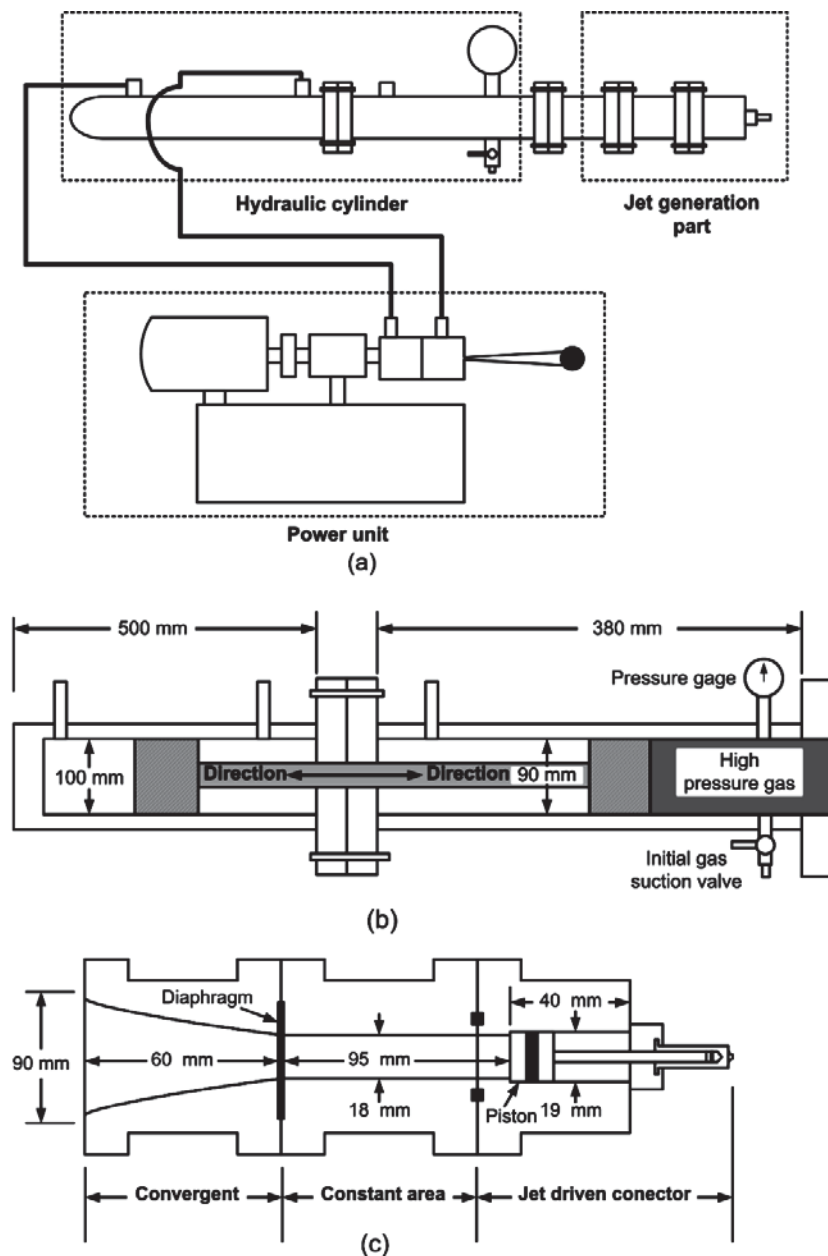


รูปที่ 4.4 Med-jet NFIS

1) ส่วนประกอบและขั้นตอนการทำงาน

แผนภาพการทำงานและส่วนประกอบของ Med-jet NFIS แสดงดังรูปที่ 4.5 (a) ซึ่งส่วนประกอบหลักของระบบที่สำคัญ ได้แก่ ชุดต้นกำลัง (Power unit) กระบอกไฮดรอลิก (Hydraulic cylinder) และชุดขับลำพ่น ซึ่งแต่ละส่วนจะทำหน้าที่ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ชุดต้นกำลัง ของระบบไฮดรอลิก ประกอบไปด้วย ถังพักน้ำมัน ปั๊มไฮดรอลิก มอเตอร์ไฟฟ้า 1 เฟส และ วาล์วไฮดรอลิกแบบ 3/4 โดยชุดต้นกำลังจะทำหน้าที่ควบคุม การไหลเวียนเข้า-ออกของน้ำมันในกระบอกไฮดรอลิกผ่านวาล์วเป็นควบคุมการเคลื่อนที่ ไป-กลับ ของลูกสูบในกระบอกไฮดรอลิก

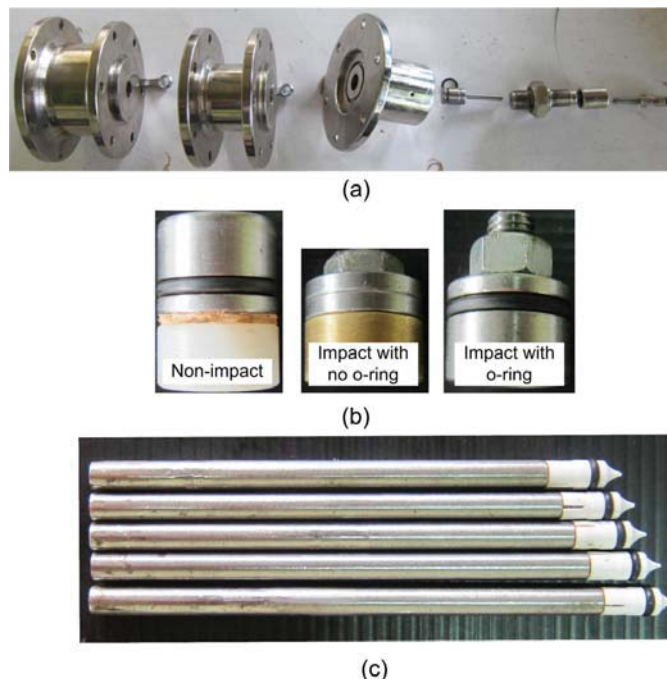


รูปที่ 4.5 ระบบสร้างลำพู่ด้วยแก๊สแรงดันสูง: (a) แผนภาพโดยรวมของ Med-jet NFIS
(b) กระบอกไฮดรอลิก และ (c) ชุดขับลำพู่

กระบอกไฮดรอลิก ทำหน้าที่อัดแก๊สที่อยู่ด้านหน้าลูกสูบให้มีแรงดันเพิ่มขึ้น รายละเอียดของกระบอกไฮดรอลิก แสดงในรูปที่ 4.5 (b) จะเห็นได้ว่าเป็นกระบอกไฮดรอลิกสองอันที่มีแกนลูกสูบแกนเดียว โดยกระบอกตัวที่ 2 จะมีเฉพาะทางเข้าเพื่อดันไปข้างหน้าอย่างเดียว ทั้งนี้ส่วนปลายของกระบอกจะถูกทำเป็นห้องรับก๊าซแรงดันสูง (High pressure gas) พร้อมกับป้องกันการรั่วไหลของก๊าซ ซึ่งที่ปลายของกระบอกไฮดรอลิกจะมีที่เติมก๊าซเริ่มต้น (Initial gas suction valve) และเกจวัดแรงดัน เพื่อใช้อ่านค่าขณะทำการทดลอง

ชุดขับลำพุ่ง เป็นชุดต่อที่ทำหน้าที่นำก๊าซแรงดันสูง ไปสร้างลำพุ่ง โดยมีรายละเอียดดังรูปที่ 4.5 (c) และ แสดงหน้าแปลนประกอบดังรูป 4.6 ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

1) ท่อฉู่เข้า (Convergence) ทำหน้าที่เพิ่มความเร็วและทำให้การไหลของแก๊สขณะกระบวนการสร้างลำพุ่งมีความสม่ำเสมอ โดยที่ทางออกของท่อจะมีแผ่นไดอะแฟรม ซึ่งจะแตกเมื่อแรงดันที่ห้องท่อฉู่เข้าสูงถึงระดับที่ไดอะแฟรมทนต่อแรงดันไม่ได้ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า แผ่นไดอะแฟรม เป็ดวาล์วแรงดันสูง ที่เปิด – ปิด ได้เร็ว เมื่อไดอะแฟรมแตก ก๊าซแรงดันสูงจะไหลเข้าสู่ส่วนของท่อพื้นที่หน้าตัดคงที่



รูปที่ 4.6 อุปกรณ์ต่อพ่วงของ Med-jet NFIS (a) หน้าแปลนประกอบ (b) ลักษณะของลูกสูบขับ และ (c) แท่งกชขนาดต่างๆ

2) ท่อหน้าตัดคงที่ (Constant area) จะติดตั้งอยู่ระหว่างแผ่นไดอะแฟรมกับส่วนต่อขับลำพุ่ง ทำหน้าที่ควบคุมความสม่ำเสมอของก๊าซที่ไหลจากท่อฉู่เข้า หลังการแตกของแผ่นไดอะแฟรม ซึ่งก๊าซแรงดันสูงนี้จะไหลผ่านท่อหน้าตัดคงที่ ไปดันลูกสูบในห้องส่วนต่อขับพุ่งให้เคลื่อนที่

3) ส่วนต่อขับลำพุ่ง (Jet driven connector) ทำหน้าที่สร้างลำพุ่งความเร็วสูง ด้วยการเคลื่อนที่ของลูกสูบให้ดันแท่งกช เพื่ออัดของเหลวในหัวฉีดให้มีความเร็ว ในการศึกษาี้ลูกสูบมีน้ำหนักเท่ากับ 43 กรัม และมี 3 ลักษณะ ตามเงื่อนไขการชนบนแท่งกช ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (b) คือ แบบที่ 1 ไม่กระแทกแท่งกช (Non-impact) ตำแหน่งเริ่มต้นจะวางชิดกับแท่งกช แบบที่ 2 และ 3 จะเป็นแบบกระแทกแท่งกช ตำแหน่งเริ่มต้นวางห่างจากแท่งกช 10 มิลลิเมตร โดยลูกสูบเป็นแบบไม่มีโอริง (Impact with no o-ring) และมีโอริง (Impact with o-ring) ตามลำดับ นอกจากนี้