

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ลำพุ่งความเร็วสูงและวิธีการสร้างลำพุ่งความเร็วสูง

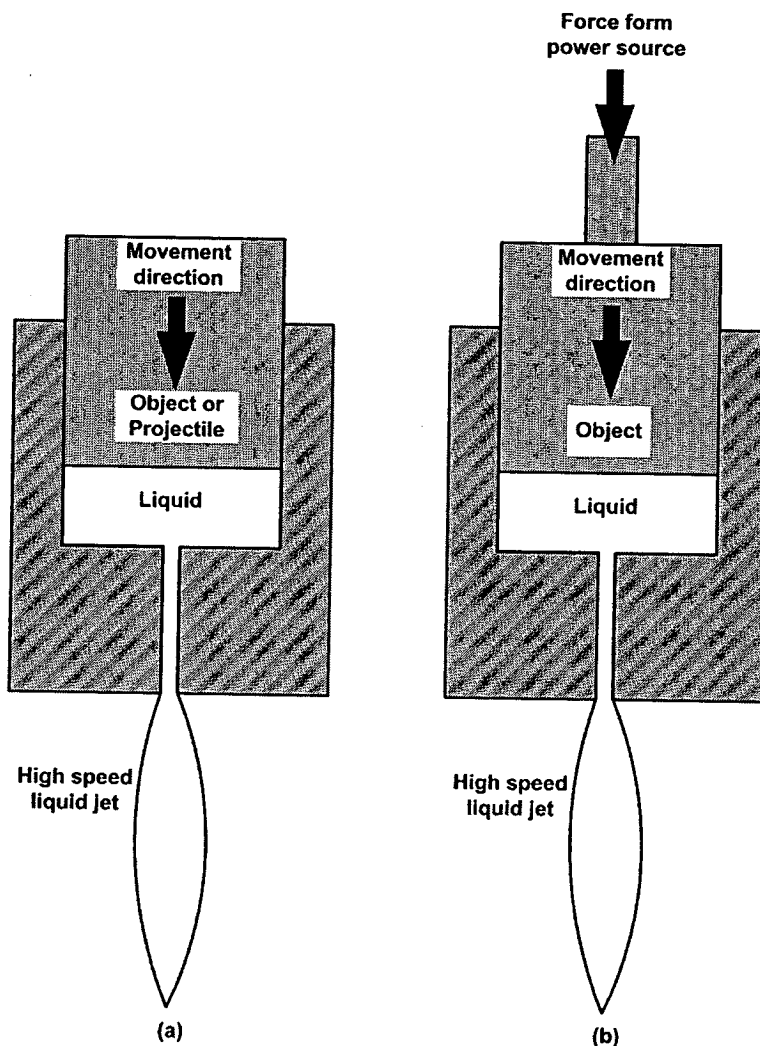
ลำพุ่งความเร็วสูง (High speed liquid jet) คือ ลำพุ่งของเหลวที่ถูกขับออกจากรูขนาดเล็ก ด้วยแรงดันสูง ลำพุ่งความเร็วสูงมีการนำไปประยุกต์ใช้กับงานหลากหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมสมัยใหม่ ลำพุ่งความเร็วสูงถูกนำมาใช้งาน ตัด เจาะ หรือขึ้นรูปวัสดุ ส่วนในทางการแพทย์ ลำพุ่งความเร็วสูงถูกนำมาใช้ ในการผ่าตัดแทนมีด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

ลำพุ่งความเร็วสูงเกิดขึ้นจากหลักการพื้นฐานที่ว่า ของเหลวความดันสูงไหลผ่านคอขวด ก่อนพุ่งออกสู่บรรยากาศ 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 เนื่องจากด้วยวิธีการนี้สามารถสร้างแรงดันขับซึ่งเพิ่มขึ้นทันทีทันใดในหัวฉีดให้มีค่าสูงมากระดับ GPa [1, 2] ทั้งนี้สามารถแบ่งการอัดของเหลวให้มีแรงดันสูงด้วยการเคลื่อนที่ของวัตถุ ออกเป็นสองวิธีตามลักษณะการขับระหว่างสร้างลำพุ่ง 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 ทั้งนี้ยังไม่พบการนำวิธีนี้ไปใช้ในงานจริง เนื่องจากควบคุมปัจจัยการทำงานได้ยาก



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

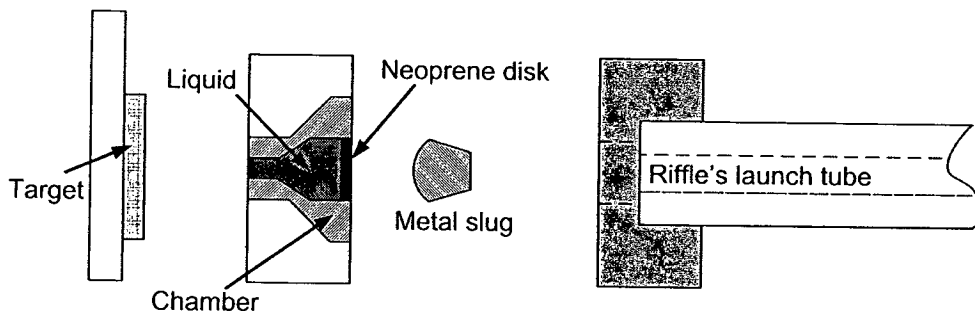
การกดอัดของเหลวให้มีแรงดันสูงด้วยการเคลื่อนที่ของวัตถุ อีกวิธี คือแบบกด ดังแสดงหลักการดังรูปที่ 2.1 (b) ซึ่งจะแตกต่างจากการกระแทก ระหว่างการสร้างลำพุ่งวัตถุยังมีแรงผลักดันเนื่องจากแหล่งกำลังงานที่มาจาก สปริงหรือก๊าซแรงดันสูง จนกระทั่งของเหลวในหัวฉีดหมด หลักการนี้ถูกนำมาใช้จริงในการสร้างลำพุ่งเพื่อนำส่งยาผ่านผิวหนัง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

## 2.2 ลำพุ่งความเร็วสูงที่สร้างด้วยวิธีการกระแทก

ดังที่กล่าวไว้เบื้องต้น เกี่ยวกับวิธีสร้างลำพุ่งความเร็วสูงด้วยการเคลื่อนที่ของวัตถุแบบการกระแทก ซึ่งหัวข้อนี้จะทำการอธิบายและลงในรายละเอียดของวิธีการสร้าง พลศาสตร์การกำเนิดคุณลักษณะ และความดันกระแทกของลำพุ่งที่สร้างด้วยวิธีการกระแทก

### 2.2.1 การสร้างลำพุ่งด้วยวิธีการกระแทก

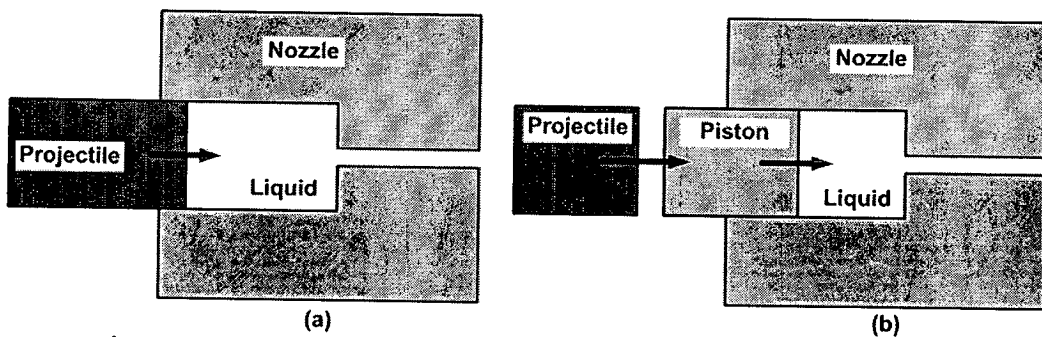
การสร้างลำพุ่งความเร็วสูงด้วยวิธีการกระแทก เป็นวิธีให้กำเนิดลำพุ่งที่สามารถสร้างลำพุ่งที่มีความเร็วสูงมากๆ ด้วยหลักการอย่างง่าย คือ ให้วัตถุที่มีความเร็วสูงกระแทกบนของเหลวที่บรรจุในหัวฉีดและขับของเหลวให้พุ่งออกมาด้วยความเร็วสูง ด้วยวิธีการนี้สามารถสร้างลำพุ่งที่มีความเร็วระดับเหนือเสียงได้ (Supersonic และ hypersonic jet) ความเร็วลำพุ่งจะขึ้นอยู่กับความเร็วของวัตถุก่อนกระแทกและเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดเป็นหลัก การสร้างลำพุ่งด้วยวิธีการนี้ ถูกนำไปใช้ครั้งแรกในปี 1958 ในการศึกษาของ Bowden-Brunton ในปี ค.ศ. 1958 [3] เพื่อทำการศึกษาและถ่ายภาพลำพุ่งความเร็วสูง อุปกรณ์และหลักการสร้างลำพุ่งเบื้องต้นแสดงดังรูปที่ 2.2 ของเหลวปริมาตร 0.1 cm<sup>3</sup> ที่บรรจุในห้องหัวฉีด ถูกผนึกด้วยแผ่น 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] สามารถสร้างฟุ้งที่มีความเร็วระดับไฮเปอร์โซนิก (Hypersonic jet) ที่ความเร็ว 4580 m/s ด้วยการปรับปรุงวิธีการจับของเหลว และชุดหัวฉีด พร้อมกับยิงลูกปืนด้วยปืนที่จับด้วยดินปืน ทำให้ลูกปืนมีความเร็วก่อนกระแทกสูงถึง 1900 m/s จากความสำเร็จในการศึกษาของ Bowden – Bruton [3] และ O'Keefe และคณะ [9] ทำให้นักวิจัยรุ่นหลังได้นำหลักการนี้ไปใช้เพื่อสร้างลำฟุ้งความเร็วสูงอย่างหลากหลาย แม้จะมีข้อแตกต่างกันบ้างในรายละเอียดการออกแบบ กำลังงานที่ใช้จับลูกปืน และวิธีจับของเหลว

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



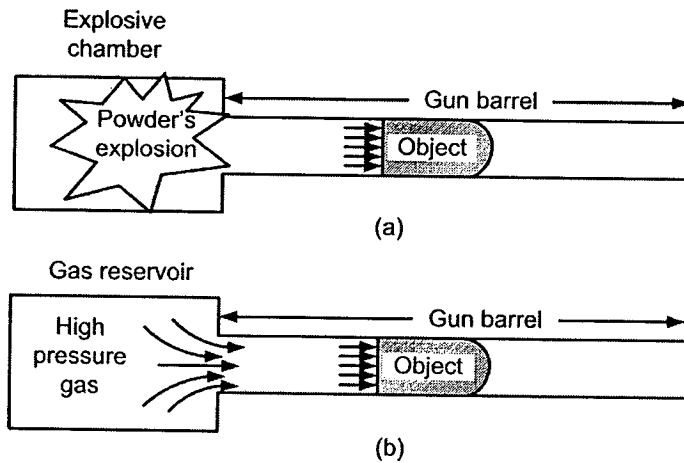
รูปที่ 2.3 การกำเนิดลำฟุ้งด้วยการกระแทกแบบ (a) จับตรง และ (b) จับผ่านตัวกลาง

การกระแทกและจับโดยตรง (DIM) เป็นวิธีสร้างลำฟุ้งด้วยการกระแทกแบบอย่างง่าย โดยการใช้วัตถุกระแทกลงบนของเหลวในหัวฉีดโดยตรงไม่ผ่านวัตถุตัวกลางใดๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (a) วิธีสร้างลำฟุ้งด้วยการกระแทกแบบที่สอง คือ แบบกระแทกและจับผ่านตัวกลาง (MEM) จะต่างจากวิธีแรก คือแทนที่จะกระแทกลงบนของเหลวโดยตรง ลูกปืนจะกระแทกลงบนวัตถุอื่นก่อนจับของเหลวออกจากหัวฉีด เพื่อให้การจับของเหลวระหว่างฉีดลำฟุ้งเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (b)

Shi และคณะ [4, 10, 11] ทำการศึกษาเปรียบเทียบคุณลักษณะเชิงพลศาสตร์ของการกำเนิดลำฟุ้งด้วยวิธีทั้งสองแบบ โดยวัดความเร็วลำฟุ้งและความดันในหัวฉีด พบว่าการจับลำฟุ้งด้วยวิธี DIM จะให้แรงดันจับสูงกว่าแบบ MEM นอกจากนี้ การกำเนิดลำฟุ้งด้วย MEM ยังใช้เวลามากกว่าแบบ DIM ด้วยเหตุนี้ทำให้รูปแบบการเปลี่ยนแปลงความดันในหัวฉีด และรูปร่างลำฟุ้งที่กำเนิดจากทั้งสองวิธีมีความแตกต่างกันมาก

## 2.2.2 วิธีขับวัตถุให้มีความเร็ว

ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่าความเร็วของวัตถุที่กระทบบนของเหลว มีผลกับคุณลักษณะของลำพุ่ง ดังนั้นวิธีการขับวัตถุให้มีความเร็วจึงมีความสำคัญ โดยทั่วไปวัตถุจะถูกขับให้มีความเร็วด้วยปืนสองประเภท คือ แบบดินปืน (Powder gun) และ แบบก๊าซ (Gas gun)



รูปที่ 2.4 วิธีการขับวัตถุ (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 การขับลูกปืนแบบดินปืนเพื่อสร้างลำพุ่งความเร็วสูงจึงไม่เป็นที่นิยม

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

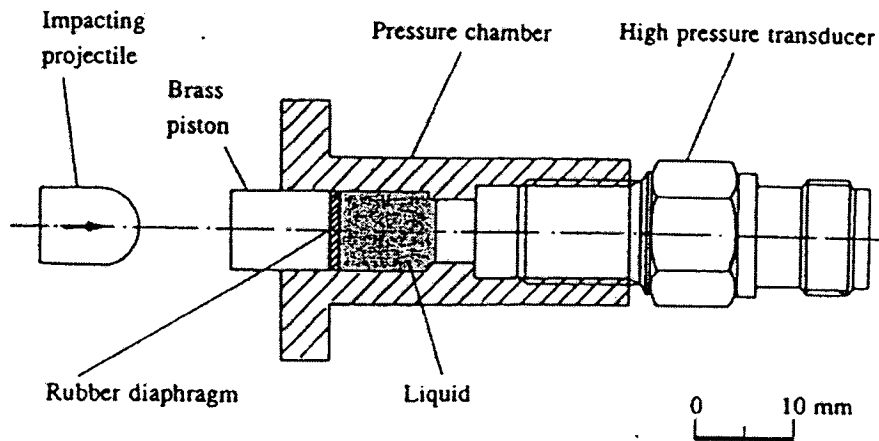
หลายประเภท ขึ้นอยู่กับการออกแบบ ประโยชน์การใช้งาน และงบประมาณการสร้าง ซึ่งปืนก๊าซเบาแบบสองต่อ (Two Stage Light Gas Gun, TSLG) จะเป็นชนิดที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุด ทั้งเพื่อการศึกษาการกระแทกของวัตถุหรือลำฟุ้งลำฟุ้งความเร็วสูงจากการกระแทก TSLG เป็นปืนที่มีวัตถุและท่อสองส่วน โดยส่วนที่หนึ่ง คือ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

### 2.2.3 ความดันฉีดกับการกำเนิดลำฟุ้งด้วยวิธีการกระแทก

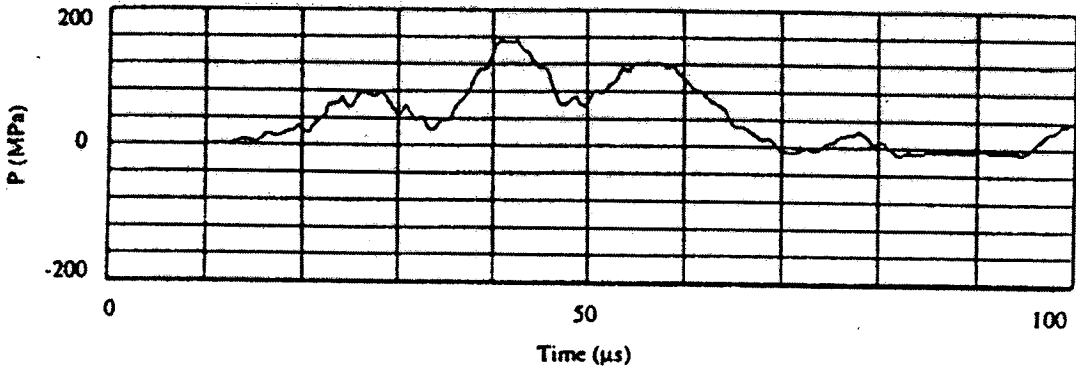
ที่ผ่านมา คุณลักษณะการไหลในหัวฉีด จากการกระแทกเพื่อสร้างลำฟุ้งความเร็วสูง เป็นประเด็นสำคัญที่นักวิจัยพยายามที่จะทำความเข้าใจและศึกษา วิจัยอย่างต่อเนื่อง ด้วยเหตุที่พฤติกรรมการไหลในหัวฉีด ส่งผลต่อคุณลักษณะลำฟุ้งโดยตรงนั่นเอง การพิจารณาการของเหลวในหัวฉีด จะมีอิทธิพลของการอัดตัวได้ของของเหลวเข้ามาเกี่ยวข้องกับเสมอและเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลา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

ในปี 1995 Shi และคณะ [10] ได้แสดงกระบวนการการสะท้อนของคลื่นช็อคในหัวฉีดในเทอมของรูปแบบความดันที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา พร้อมกับอธิบายผลกระทบของการสะท้อนของช็อคที่มีต่อคุณลักษณะของลำฟุ้งด้วย โดยอาศัยการทดลองและระเบียบวิธีเชิงตัวเลขช่วยในการศึกษา ชุดเครื่องมือวัดความดันในหัวฉีดของ Shi แสดงในรูปที่ 2.5 โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ ลูกปืน (Projectile) แท่งกดทองเหลือง (Brass piston) แผ่นยาง (Rubber diaphragm) ท่อบรรจุ

ของเหลว (Pressure chamber) และ แท่งวัดความดัน (Pressure transducer หรือ PVDF gauge) ซึ่งใช้วัดการเปลี่ยนแปลงความดันในหัวฉีดที่แกว่งเคลื่อนที่ หลังการกระแทกของลูกปืน ผลการศึกษาของ Shi แสดงดังรูปที่ 2.6 ซึ่งเป็นผลจากการกระแทกของลูกปืนที่ความเร็ว 414 m/s พบว่าความดันมีค่าสูงสุดประมาณ 125 MPa และเปลี่ยนแปลงเป็นสัญญาณขึ้นลงถี่ครั้ง (Pressure pluses) ซึ่งเขาอธิบายว่าเกิดจากการเคลื่อนที่ของคลื่นช็อคในหัวฉีดระหว่างการกระแทกของลูกปืน



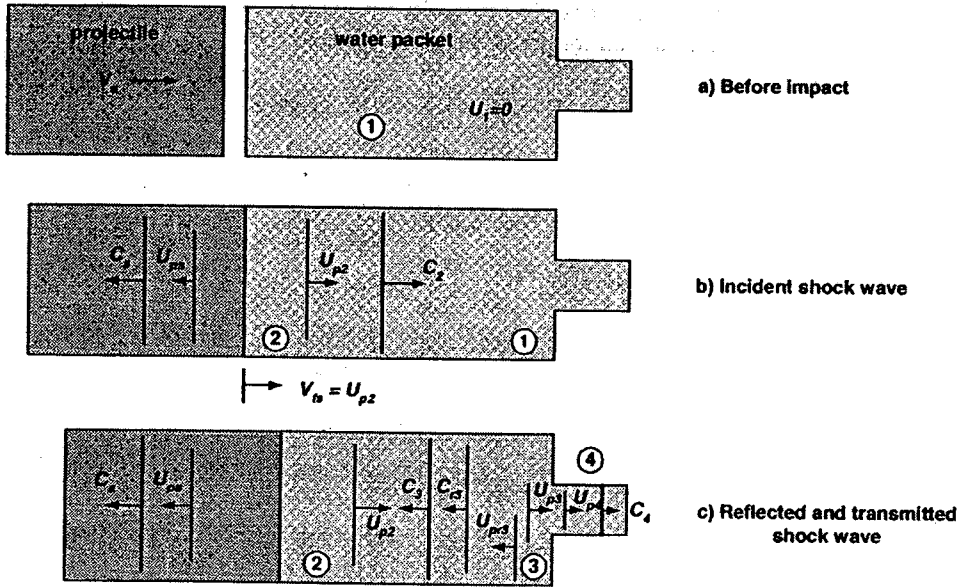
รูปที่ 2.5 ชุดเครื่องมือวัดความดันของ Shi [10]



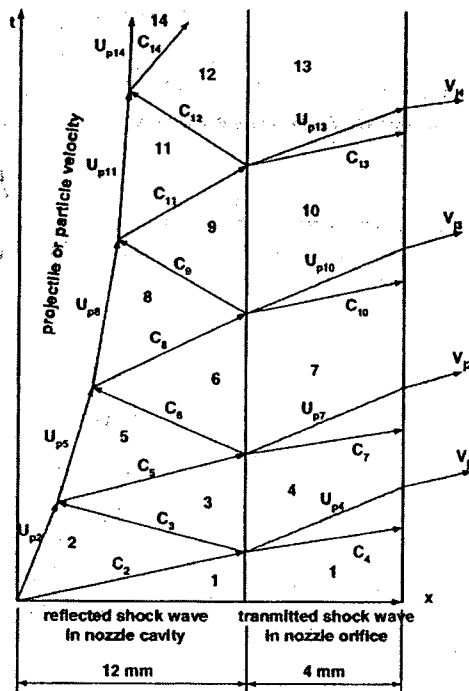
รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงความดันในหัวฉีดจากผลการศึกษาของ Shi

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

จากคลื่นช็อกในหัวฉีด ทำให้ลำพู่มีลักษณะออกจากหัวฉีดเป็นลูกๆ ซึ่งคุณสมบัติและค่าตัวแปรที่สำคัญในบริเวณที่แสดงในรูปที่ 2.8 ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1 โดยเป็นค่าที่ได้จากการกระแทกของลูกปืนความเร็ว 1100 m/s บนน้ำที่บรรจุในหัวฉีดที่มีอัตราส่วนคอขวด 64:1 จะเห็นได้ว่าความเร็วและความดันของลำพู่จะสูงขึ้นเรื่อยตามการสะท้อนของคลื่นช็อก



รูปที่ 2.7 แผนภาพการเคลื่อนที่ของคลื่นช็อกในหัวฉีดของ Pianthong และคณะ [19]

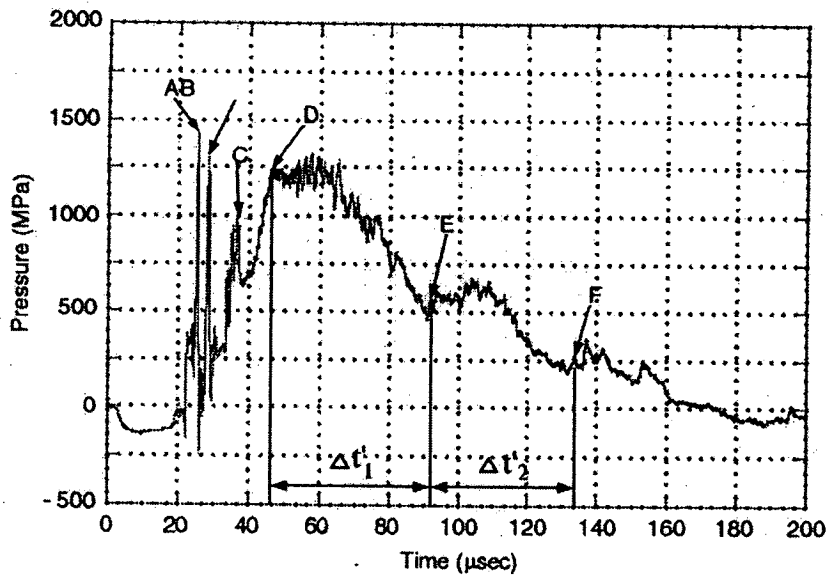


รูปที่ 2.8 แผนภูมิ x-t ของการเคลื่อนที่ของช็อกในหัวฉีดแบบบ่าของ Pianthong และคณะ [13]

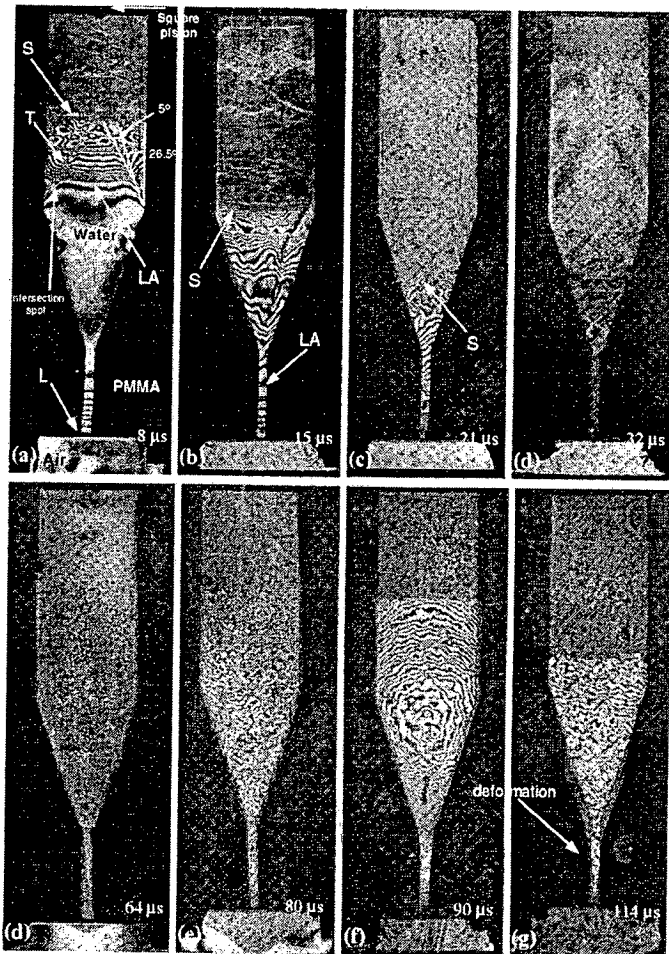
ตาราง 2.1 คุณสมบัติและค่าตัวแปรต่างๆแกน x-t ของ Pianthong และคณะ [13] ที่ความเร็วลูกปืน 1100 m/s และหัวฉีดป่าตรงที่มีอัตราส่วนคอขวด 64:1

Region	$P$ (GPa)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$U_p$ (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] จึงได้ทำการทดลองที่ใกล้เคียงกับความจริงที่เกิดขึ้นระหว่างการกำเนิดลำพุ่งด้วยการกระแทก โดยทำการวัดความดันที่ปากทางออกหัวฉีด และถ่ายภาพด้วยเทคนิค โฮโลกราฟีค อินเตอร์เฟอโรเมตริก (Holographic interferometric) เพื่อจับปรากฏการณ์ในหัวฉีดบ่ากรวย (Conical nozzle) ระหว่างลูกปืนเคลื่อนที่เพื่อสร้างลำพุ่ง ผลของกราฟความดันแสดงดังรูปที่ 2.9 และภาพแสดงคลื่นช็อคในหัวฉีดขณะกำเนิดลำพุ่ง 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 DE และ F ในรูปที่ 2.9 และคลื่น S ในรูป 2.10 (a-c)



รูปที่ 2.9 รูปแบบความดันในหัวฉีดจากการศึกษาของ Mutthujak และ คณะ [5]



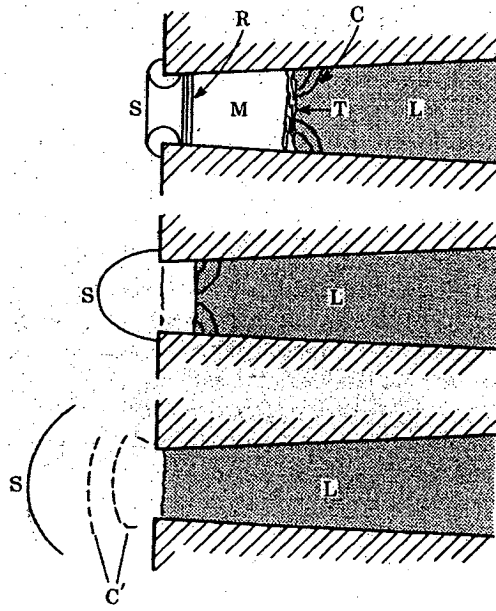
รูปที่ 2.10 คลื่นชอล์ค ในหัวฉีดขณะกำเนิดลำพู่ จากการศึกษากอง  
Mutthujak และ คณะ [5]

#### 2.2.4 คุณลักษณะของลำพุงที่กำเนิดด้วยวิธีการกระแทก

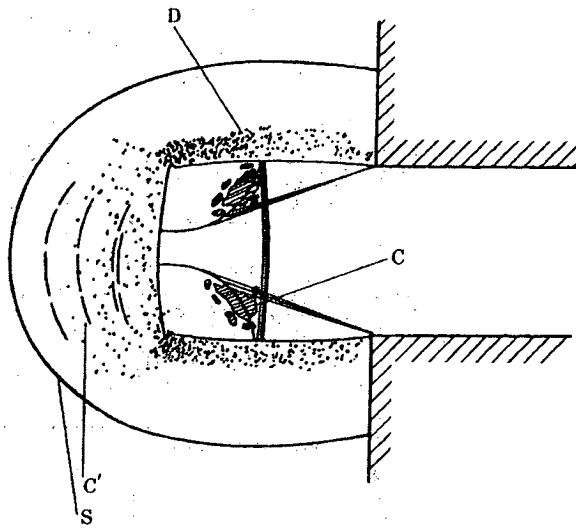
โดยทั่วไปคุณลักษณะของลำพุงที่มีการศึกษากันอยู่อย่างกว้างขวางและมีการเผยแพร่ในปัจจุบัน จะเป็นลำพุงที่กำเนิดจากเครื่องมือกลหรือปั๊มแรงดันสูงเป็นส่วนใหญ่ ในขณะที่ลำพุงที่กำเนิดด้วยวิธีการกระแทกยังมีการทำวิจัยและศึกษากันน้อยมาก อย่างไรก็ตามมีนักวิจัยหลายกลุ่มที่ทำการศึกษาเฉพาะเจาะจงถึงคุณลักษณะของลำพุงที่กำเนิดด้วยการกระแทก ซึ่งลำพุงที่กำเนิดด้วยวิธีการนี้จะมีคุณลักษณะหลายประการที่แตกต่างจากลำพุงที่ผลิตจากปั๊ม เช่น ลำพุงมีลักษณะฉีกครึ่งเดียว 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 ของเหลวจะไหลเข้าสู่ท่อรอยขนาดเล็กด้วยความเร็วและความหนาแน่นสูง (L) ซึ่งด้านหน้าของของเหลวจะมีอากาศกับไอของเหลวที่ถูกบีบอัดผสมกันอยู่ (Compressed air and droplets, M) และเกิดบริเวณปะทะกันระหว่างของเหลวกับก๊าซ (Frontal compression zone, T) บริเวณนี้จะมี ความดันสูง และเกิดคลื่นสะท้อนที่มุมของเหลว (Corner compression signals, C) ขณะที่ของเหลวเคลื่อนที่เข้าไปในหัวฉีด อากาศที่อยู่ด้านหน้าก๊าซผสมจะถูกระบายออกเป็นกลุ่มคลื่น (Air relief waves, R) และเริ่มมีคลื่นช็อคกในอากาศเกิดขึ้นด้านนอกหัวฉีด (S) เมื่อก๊าซออกจากหัวฉีดจะเหนี่ยวนำให้มีอากาศและไอของเหลวออกมาก่อนเมื่อของเหลวออกจากหัวฉีดความดันที่เกิดจากการอัดจะคลายตัวและเมื่อของเหลวปะทะกับแรงต้านจากอากาศภายนอกหัวฉีด ของเหลวจะมีการเปลี่ยนสถานะ ซึ่งรูปแบบการไหลและโซนของของไหล ตามนิยามของ Field และ Lesser ได้แสดงไว้ในดังรูปที่ 2.12 โดยมีไอของเหลวอยู่รอบๆ (D) ลำของของเหลว มีคลื่นช็อคกในอากาศ (S) และกลุ่มของคลื่นอัด (C') นำหน้าลำพุงออกมา เมื่อลำพุงเคลื่อนที่ออกห่างจากหัวฉีดได้ระยะทางที่เหมาะสมคลื่นช็อคกจะหายไป และของเหลวจะเริ่มแตกตัวเนื่องจากแรงต้านของอากาศ กระบวนการนี้จะคงอยู่จนกว่าของเหลวในหัวฉีดจะหมดไป



รูปที่ 2.11 การไหลผ่านหัวฉีดของของเหลวเนื่องจากการกระแทกของลูกปืน

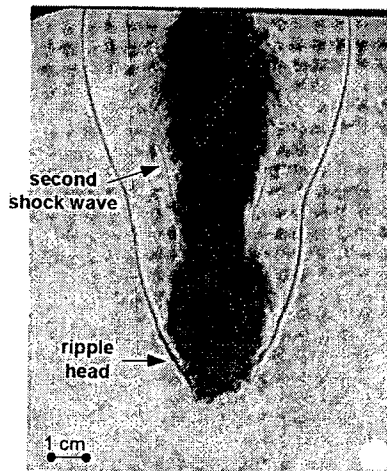


รูปที่ 2.12 รูปแบบการไหลของลำพุ่งที่เริ่มออกจากหัวฉีด

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  $V_f$  เป็นความเร็วของลูกปืน  $D$  และ  $d$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อและคอของหัวฉีด ตามลำดับ สมการ (2.1) และทฤษฎีของ Field และ Lesser เป็นรากฐานสำคัญในการประยุกต์ใช้ลำพุ่งสำหรับการตัดหรือเจาะวัสดุ ที่นักวิจัยรุ่นต่อมาได้นำมาพัฒนาต่อยอดกันอย่างกว้างขวาง แต่อย่างไรก็ตามทฤษฎีเหล่านี้ก็ไม่ได้พิจารณาอิทธิพลของการไหลในหัวฉีดที่มีต่อลำพุ่ง ซึ่งในความเป็นจริง การเคลื่อนที่ของชอว์คในหัวฉีดจะมีผลต่อลำพุ่งที่ถูกฉีดออกมา ซึ่งโดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นชุดหรือลูกๆ (Pulsed jets) ลำพุ่งลักษณะนี้ถูกถ่ายภาพได้เป็นครั้งแรกในการศึกษาของ Pianthong และคณะ [13] ดังแสดงในรูปที่ 2.13 จะสังเกตเห็นว่าเกิดคลื่นชอว์คของอากาศรอบลำพุ่งมากกว่าหนึ่งครั้ง นอกจากนี้ พวกเขาได้ทำการยืนยันผลในการศึกษาต่อมา [5, 19, 21-24] โดยอาศัยการทดลองจากการถ่ายภาพด้วยความเร็วสูงและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในหนึ่งมิติ ซึ่งเป็นที่แน่ชัดว่าลักษณะลำพุ่งที่ออกจากหัวฉีดเป็นลูกๆ มีสาเหตุจากการสะท้อน และเคลื่อนที่ของชอว์คในของเหลวระหว่างการกำเนิดลำพุ่ง



รูปที่ 2.13 ลำพุ่งความเร็วสูงที่ออกเป็นลูก [13]

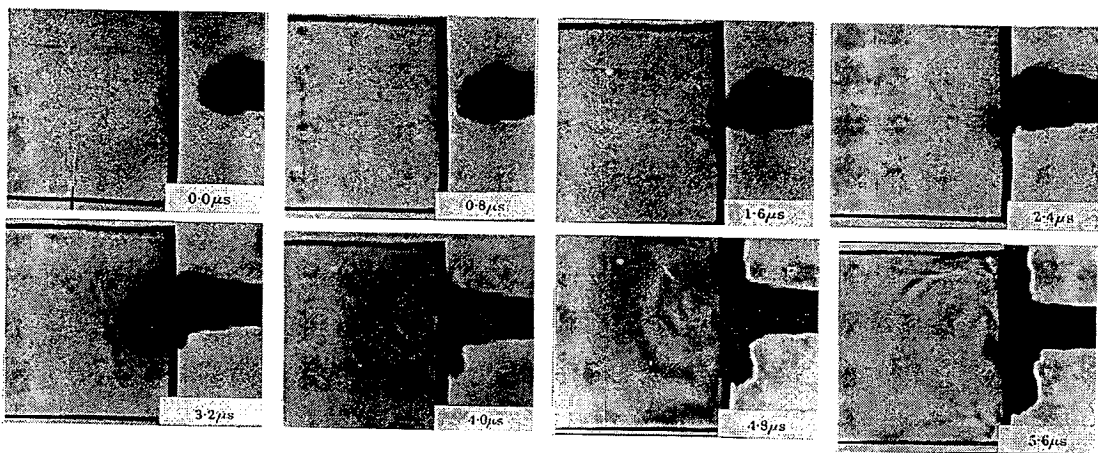
### 2.2.5 การกระแทกของลำพุ่งความเร็วสูงที่กำเนิดด้วยวิธีการกระแทก

การศึกษาการผุกร่อนของวัสดุจากการกระแทกของของเหลวความเร็วสูง (ทั้งที่เป็นเม็ดและลำพุ่ง) มีความสำคัญกับการพัฒนาและประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีหลากหลายด้าน เช่น เทคโนโลยีการตัดวัสดุ การผุกร่อนของผิวเครื่องบินจากเม็ดฝนขณะทำการบิน และการเสียหายของไบจังก์ทันทันที่หมุนด้วยความเร็วสูง

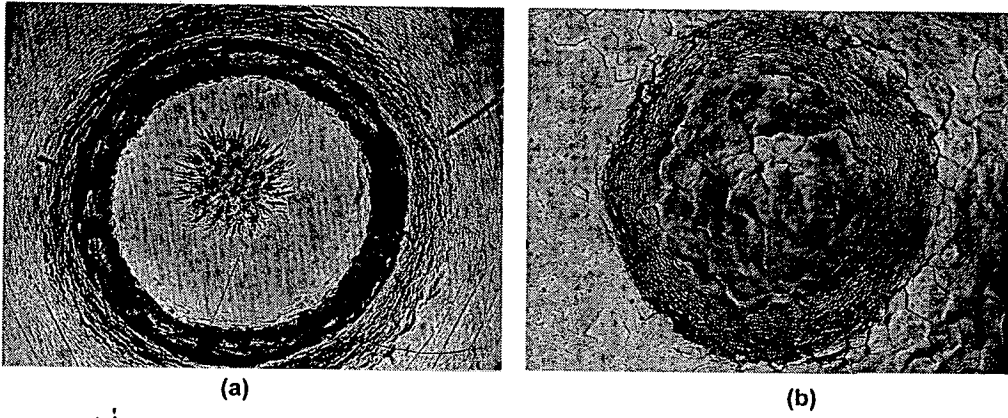
ภายใต้มุมมองสำหรับงานตัดหรือเจาะหิน ในปี ค.ศ. 1966 Leach และ Walker [25] ได้เสนอผลศึกษาการกระแทกของลำพุ่งน้ำที่มีความเร็วประมาณ 1000 m/s พบว่า ประสิทธิภาพการเจาะของลำพุ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของหิน ความดันฉีด มุมฉีด รูปร่างหัวฉีดและระยะห่างจากชิ้นงาน ต่อมา มีนักวิจัยหลายกลุ่มได้ทำการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยเหล่านั้น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

ของลำพุง [26-33] เพื่อหาค่าหรือความสัมพันธ์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับนำไปใช้จริง ซึ่งผลจากการศึกษาเหล่านี้ ทำให้เทคโนโลยีการตัดหรือเจาะวัสดุด้วยลำพุงความเร็วสูง ข้ามการศึกษาและพัฒนาไปสู่การผลิตเพื่อจำหน่ายและแข่งขันกันในท้องตลาด 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) ทั้งนี้จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาพอสรุปได้ว่า [34-39] รอยแตกบนวัสดุเกิดจากภาวะ 3 อย่างได้แก่ แรงกระแทกและคลื่นช็อคจากและในลำพุง แรงเฉือนจากการไหลของลำพุง และคลื่นความเค้นในของแข็งที่เกิดจากการกระแทกของลำพุง ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ซึ่งเป็นการกระแทกของลำพุงบนแผ่น Polymethylmethacrylate (PMMA) จะเห็นได้ว่า ผิววัสดุต้องรับการกระแทกของลำพุง การไหลของของเหลวหลังกระแทก (จากช่วง 3.2  $\mu$ s เป็นต้นไป) และคลื่นความเค้นใน PMMA (จากช่วง 4.0 ถึง 5.6  $\mu$ 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]

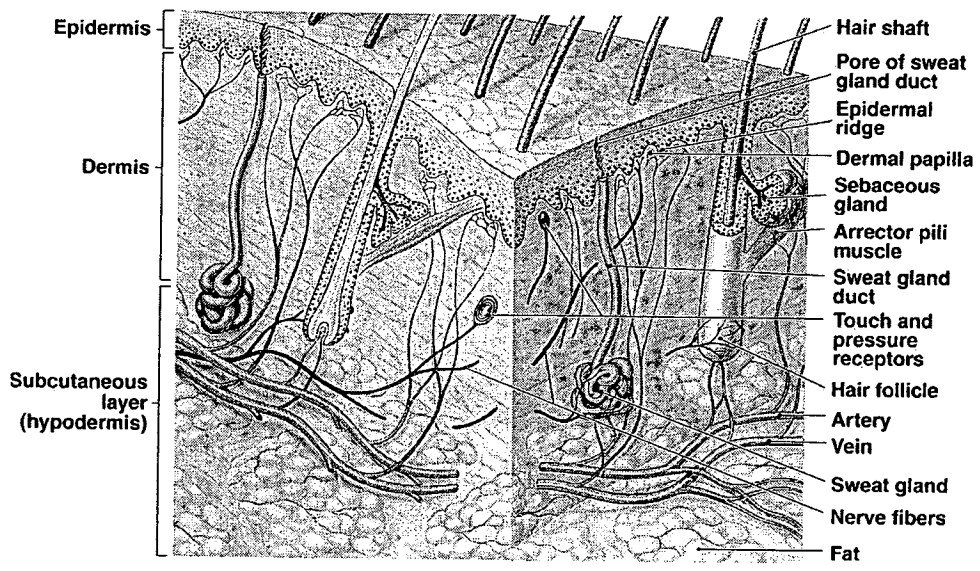


รูปที่ 2.15 ความเสียหายจากการกระแทกของลำพุ่งความเร็วสูง (950 m/a) บนผิว  
 (a) PMMA และ (b) อลูมิเนียม [34]

2.3 ลำพุ่งความเร็วสูงที่สร้างด้วยวิธีการกดสำหรับนำส่งยาผ่านผิวหนัง

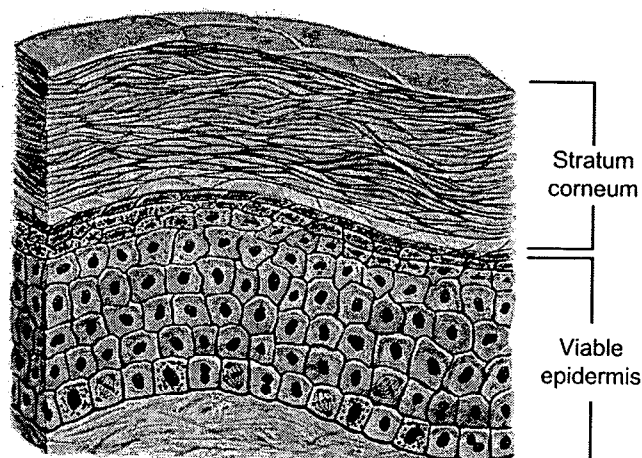
2.3.1 ลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกลของชั้นผิวหนัง

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



รูปที่ 2.16 โครงสร้างและชั้นผิวหนังของร่างกาย [41]

ชั้นหนังกำพร้า มีหน้าที่สำคัญคือป้องกันเชื้อโรคเข้าสู่ร่างกาย และป้องกันของเหลวออกจากร่างกายผิวหนัง โดยทั่วไปชั้นหนังกำพร้าจะมีความหนาอยู่ที่ประมาณ 0.007-0.12 mm [42] ประกอบด้วยอีก 2 ชั้นย่อย คือ ชั้นเซลล์ที่ตายแล้ว (Stratum corneum) เป็นบริเวณทับถมของเซลล์รูปร่างสี่เหลี่ยมยาว 30 - 40  $\mu\text{m}$  และหนา 0.5  $\mu\text{m}$  โดยรวมจะมีความหนาประมาณ 15-20  $\mu\text{m}$  และชั้นเซลล์ที่ยังมีชีวิต (Viable epidermis) ซึ่งเป็นชั้นมีเซลล์หลายชนิดเป็นโครงสร้าง มีความหนาแตกต่างกันไปตามแต่บริเวณ อาทิบริเวณที่แขน มีความหนาเฉลี่ย 56.6  $\mu\text{m}$  และบริเวณที่หัวไหล่ มีความหนาเฉลี่ยประมาณ 70.3  $\mu\text{m}$  [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 โดยเป็นความดันพลศาสตร์ของลำพุ่งที่น้อยที่สุดที่สามารถเจาะผิวหนังผิวหนังให้ทะลุได้ จากการศึกษาของ Oliver และคณะ [44] พบว่าที่ลำพุ่งเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 – 0.5 mm ผิวหนังมนุษย์หรือเนื้อหมูจะมีความดันเจาะประมาณ  $1.5 \times 10^4$  kPa

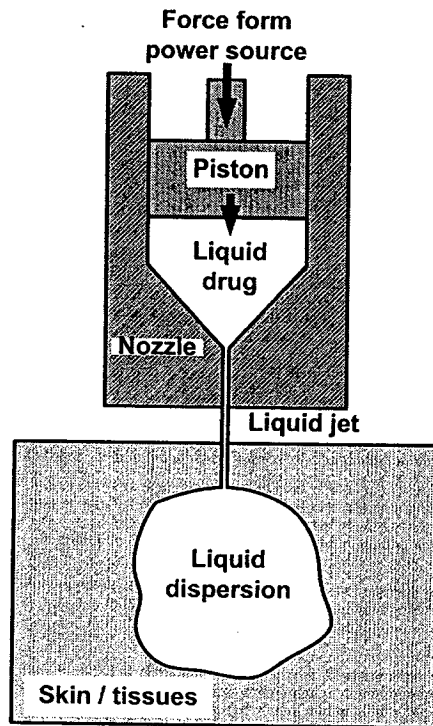
### 2.3.2 การนำส่งยาผ่านผิวหนังด้วยลำพุ่งความเร็วสูง

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 โดยแทงสอดที่รับแรงจากจากแหล่งต้นกำลัง อัดยาที่เป็นของเหลวในหัวฉีดให้มีแรงดันสูงขึ้น และสร้างลำพุ่งความเร็วสูง เพื่อเจาะผิวหนัง พร้อมกับนำส่งยาไปยังตำแหน่งที่ต้องการ ทัวไปแล้วแหล่งกำลังงานของอุปกรณ์จะได้จากสปริงหรือก๊าซความดันสูง

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

ความเร็วสูง ยาจะกระจายเป็นวงกว้าง ทำให้พื้นที่สัมผัสระหว่างเนื้อเยื่อและยามีมากกว่าแบบใช้เข็มทั่วไป อีกทั้งรอยแผลจากการฉีดยามีขนาดเล็กมาก อยู่ในระดับไมโครเมตร



รูปที่ 2.18 หลักการฉีดยาด้วยลำพุงความเร็วสูง

แต่อย่างไรก็ตาม การฉีดยาด้วยลำพุงความเร็วสูงยังถือว่าเป็นเทคโนโลยีใหม่ และยังมีการพัฒนา มาได้ไม่นาน ทำให้การฉีดยาด้วยลำพุงความเร็วสูง มีข้อเสียและมีอุปสรรคในด้านการแข่งขันกับ การฉีดยาแบบทั่วไปอยู่ เช่น ราคาของอุปกรณ์ที่มีราคาแพง บางการศึกษาพบว่า ระดับความเจ็บจาก การฉีดยามีสูงกว่าแบบใช้เข็มทั่วไป [47, 48] ในขณะที่การติดเชื้อของผู้ป่วยจากการใช้อุปกรณ์ร่วมกัน ก็ยังเกิดขึ้น เพราะการฉีดยาด้วยลำพุงของเหลวที่มีความเร็วสูงมากๆ การกระแทกผิวหนังทำให้เกิด การกระเด็นของเลือดจากผู้ป่วยติดไปกับอุปกรณ์ ซึ่งเป็นสาเหตุของการติดเชื้อ [6, 7, 49, 50] นอกจากนี้ ยังไม่เป็นที่แน่ชัดว่าแรงกดอัดหรือแรงเฉือนจากกระบวนการส่งถ่ายมีผลกับ ประสิทธิภาพของยาหรือไม่ เนื่องจากตัวยาบางชนิดเป็นสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก จากเหตุนี้จึงทำให้ ประสิทธิภาพของยาลดลงได้ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากมีปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการฉีดยา มากมาย ทำให้การศึกษาค้นคว้าจากนักวิจัยปรับปรุงอุปกรณ์และประเมินประสิทธิภาพ ยังมีอยู่อย่าง ต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน

### 2.3.3 อุปกรณ์นำส่งยาด้วยลำพุ่งความเร็วสูง

ปัจจุบันผลิตภัณฑ์สำหรับฉีดยาด้วยลำพุ่งความเร็วสูงที่จำหน่ายในท้องตลาด มีมากมายหลายประเภท ซึ่งข้อมูลเบื้องต้นของอุปกรณ์ฉีดยาที่มีจำหน่ายในท้องตลาด 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] ที่จะทำหน้าที่ขับหัวกดแทนสปริงหรือก๊าซ กรณีที่ใช้ Piezoelectric นั้น ลำพุ่งจะมีความเร็วอยู่ระหว่าง 50 – 160 m/s และมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 40 – 130  $\mu\text{m}$  ด้วยหลักการนี้ สามารถควบคุมความเร็วและระยะเจาะของลำพุ่งได้อย่างแม่นยำ แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากลำพุ่งที่มีขนาดเล็กและมีความเร็วไม่สูงทำให้วิธีนี้สามารถประยุกต์ใช้กับการนำส่งยาได้เฉพาะการฉีดที่ตำแหน่งบนชั้นผิวหนัง (Intradermal injection ) เท่านั้น อีกทั้งอุปกรณ์ยังอยู่ในขั้นตอนของการศึกษาวิจัย ยังไม่มีจำหน่ายในท้องตลาด

ตารางที่ 2.3 ข้อมูลเบื้องต้นของอุปกรณ์การฉีดยาด้วยลำพุ่งที่มีจำหน่ายในท้องตลาด [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 <sub>2</sub> )	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 <sub>2</sub> )	Insulin	NA
Crossject SA	Crossject	yes	Gas	NA	ID, SC,IM
PenJet Corp.	PenJet	NA	Gas (N <sub>2</sub> )	Vaccines	ID, SC,IM
Aradigm	Intraject	NA	Gas (Co <sub>2</sub> )	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 <sub>2</sub> )	Vaccines	NA
DCI Inc.	LectraJet	yes	Spring	Vaccines	SC, IM
MIT Inc	Med-Jet	NA	Gas (CO <sub>2</sub> )	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

### 2.3.4 คุณลักษณะการนำส่งยาด้วยลำพุ่งความเร็วสูง

#### 1) ความดันฉีดและการกระแทกของลำพุ่ง

ความดันในหัวฉีดระหว่างการฉีดยาเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์และการนำส่งยา ที่ผ่านมานักวิจัยพยายามที่จะทำความเข้าใจและศึกษา โดยทั่วไปรูปแบบความดันที่เปลี่ยนแปลงในหัวฉีด (ที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่ง) จะมีลักษณะแกว่งขึ้นลง เนื่องจากอิทธิพลของการกดอัดได้ของของเหลว (Compressibility effect) [57] โดยจะมีค่าสูงสุดในช่วงแรกและจะลดลงเรื่อยๆตามเวลา รูปแบบความดันในหัวฉีดนี้จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของกำลังงาน ความเร็วเริ่มของหัวฉีด ปริมาณของของเหลว และขนาดของหัวฉีด [58, 59] ในความเป็นจริง เนื่องจากขนาดคอคอดที่เล็กมากของหัวฉีด ทำให้การบรรจุของยาที่เป็นของเหลวก็มีฟองอากาศผสมอยู่ 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  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของของเหลว และ  $v$  คือ ความเร็วของลำพุ่ง

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

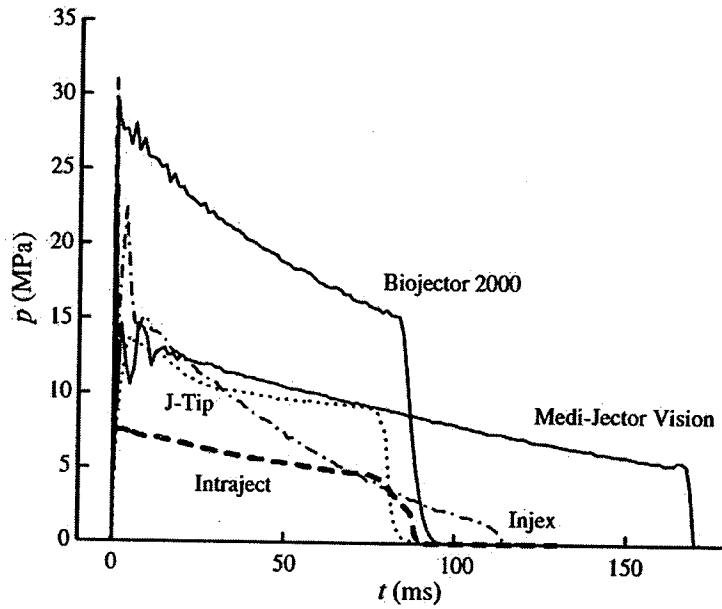
เมื่อ  $P$  คือ ความดันสถิตของของไหล  $\gamma$  คือ อัตราส่วนความร้อนจำเพาะของของไหล และ  $M$  คือ ความเร็วของของไหล

ความดันกระแทกของอุปกรณ์แต่ละชนิดจะมีค่าแตกต่างกันออกไป ซึ่งรูปแบบความดันกระแทกของอุปกรณ์ฉีดยาแต่ละประเภท จากการศึกษารายงานของ Shergold และ คณะ [44] ดังแสดงในรูปที่ 2.19 จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของความดันกระแทกก็มีลักษณะคล้ายกับความดันฉีด นั่นคือ จะเปลี่ยนแปลงแบบขึ้นลงและมีค่าสูงในช่วงเวลาแรกและลดลงอย่างต่อเนื่อง จากอุปกรณ์ที่มีอยู่ในปัจจุบัน ความดันกระแทกสูงสุดมีค่าอยู่ในช่วง 15 - 35 MPa โดยส่วนใหญ่ค่าสูงสุดจะเกิดที่ความดันฉีดครั้งที่หนึ่งหรือครั้งที่สอง ความดันกระแทกสูงสุดขึ้นอยู่กับปัจจัยการฉีดหลายอย่าง โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาตรการฉีดและพื้นที่หน้าตัดหัวฉีดลดลง [59]

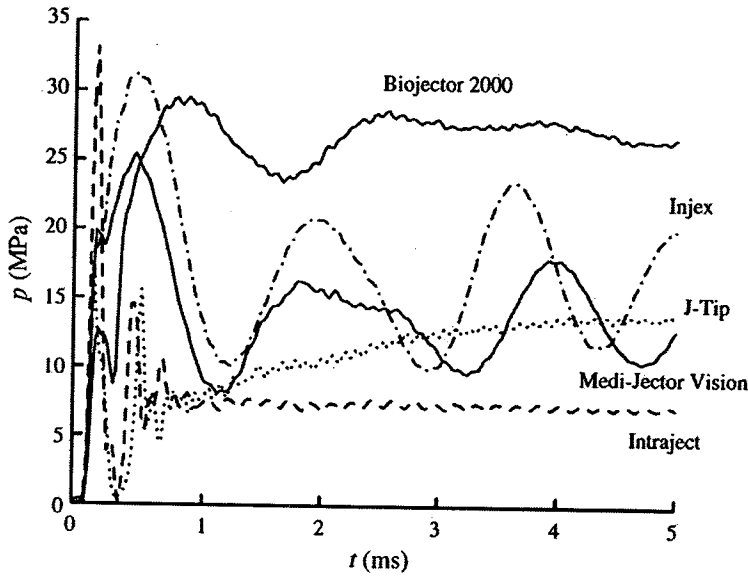
เนื่องจากประสิทธิภาพ การฉีดยาด้วยลำพุ่งความเร็วสูงไม่ได้ขึ้นกับความเร็วและความหนาแน่นของลำพุ่งเท่านั้น แต่ยังเชื่อมโยงกับเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดด้วย ดังนั้นนักวิจัยจึงได้นิยามพารามิเตอร์ตัวใหม่ขึ้นมาเพื่อใช้บอกประสิทธิภาพของลำพุ่ง โดยจัดให้อยู่ในรูปของกำลังของลำพุ่ง (Jet power,  $P_j$ ) มีหน่วยเป็น วัตต์ (W) ซึ่งเขียนได้ดังสมการ (2.4)

$$P_j = \frac{1}{8} \pi \rho D_0^2 v_0^3 \quad (2.4)$$

เมื่อ  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของของเหลว,  $D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด และ  $v$  คือ ความเร็วออกของลำพู่ การเปลี่ยนแปลงค่ากำลังของลำพู่ จะมีความสอดคล้องกับความดันกระแทกโดยตรง [61] ซึ่งกำลังงานของลำพู่มักจะถูกใช้ในลักษณะของค่าเฉลี่ยมากกว่าจะจัดอยู่ในเทอมที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้นค่านี้จึงเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกกำลังของการฉีดแต่ละครั้งนั่นเอง



(a)



(b)

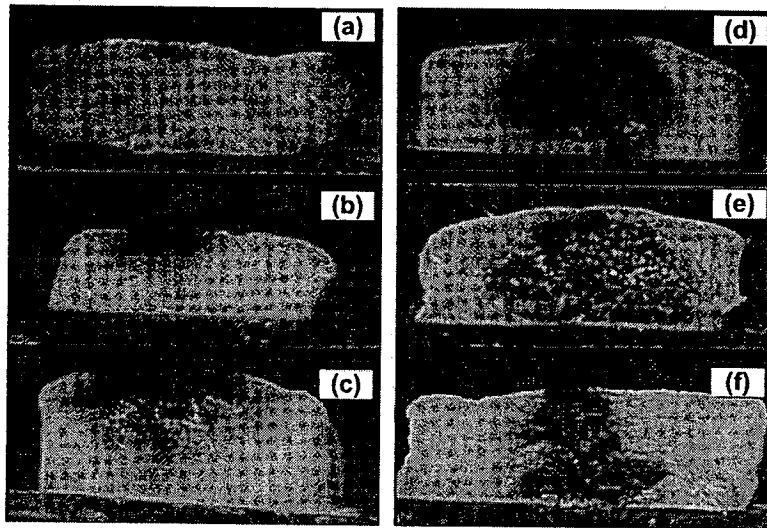
รูปที่ 2.19 ความดันกระแทกตามช่วงเวลาฉีดจากอุปกรณ์ฉีดยาที่มีจำหน่ายในท้องตลาด [44] (a) ตลอดช่วงเวลาฉีด (b) ช่วง 5 ms แรกของการฉีด

## 2) การเจาะเนื้อเยื่อและการกระจาย

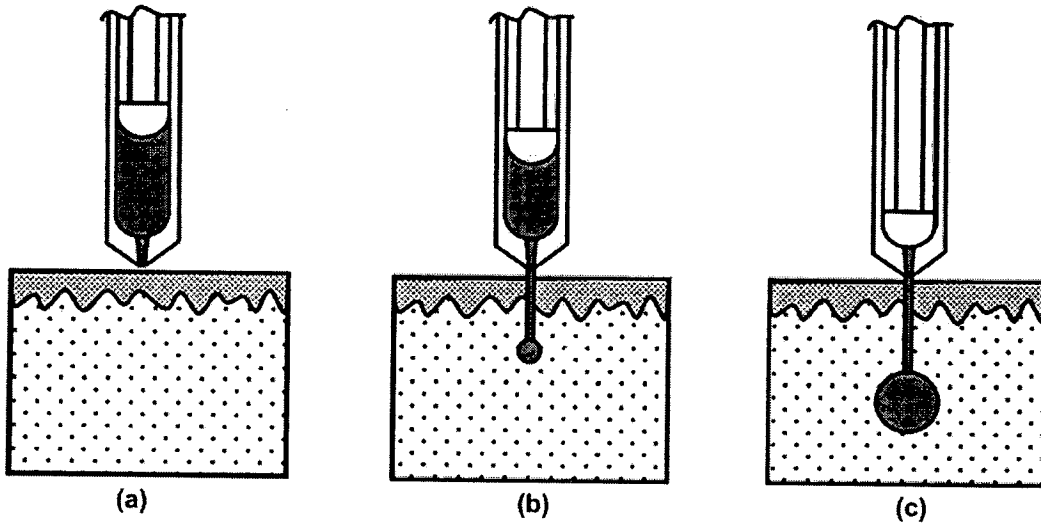
กระบวนการฉีดและประสิทธิภาพของการฉีดด้วยลำพุง ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์จากลำพุง และคุณสมบัติของเนื้อเยื่อ เช่น ปริมาณของเหลว เส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด ระยะระหว่างหัวฉีดกับผิวเนื้อเยื่อ เป็นต้น การเจาะเนื้อเยื่อของลำพุงเป็นคุณลักษณะการฉีดที่สำคัญและมีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง โดยจะศึกษาความลึกสูงสุดจากการแพร่ ความลึกและความกว้างของรูเจาะ ซึ่งจะขึ้นกับปัจจัยการฉีด รูเจาะจะลึก เมื่อลำพุงมีความเร็วสูง หัวฉีดมีขนาดเล็ก หรือมีกำลังของลำพุงสูง [45] และเมื่อเนื้อเยื่อมีค่ามอดุลัสของยังต่ำ [55, 56, 62] หรือความแข็งแรงต่ำ [63] สำหรับอิทธิพลของปริมาณของเหลวนั้น Baxter และ Mitragotri [46] ศึกษาแล้วพบว่า รูเจาะจะลึกขึ้นเรื่อยจนถึงตามปริมาณเหลวที่ฉีด ก่อนจะมีค่าคงที่ซึ่งเรียกค่านี้อันว่า Asymptotic value นั้นหมายความว่า หากใช้ปริมาณของเหลวมากเกินไป ประสิทธิภาพการเจาะจะไม่สูงขึ้นแต่กลับจะทำให้เกิดปัญหาการกระเซ็นกลับของยา และการเปื้อนเลือดและเชื้อต่างๆจากผู้รับยาบนหัวฉีด

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

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



รูปที่ 2.20 รูปแบบการกระจายของของเหลวในเนื้อเยื่อ [45]



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