

บทที่ 5

คุณลักษณะการนำส่งยาด้วยลำพุงความเร็วสูงจากอุปกรณ์ที่ขับเคลื่อนด้วยสปริง

บทนี้จะกล่าวถึงคุณลักษณะ ของลำพุงที่ขับเคลื่อนด้วยสปริง อุปกรณ์ฉีดยา รุ่น Cool. Click ซึ่งรายละเอียดกล่าวไว้แล้วในบทที่ผ่านมาเช่นเดียวกับรายละเอียดของเครื่องมือวัด ความเร็วและความดันกระแทกของลำพุง นอกจากนี้ ในบทนี้จะได้ทำการศึกษา กระบวนการขับเคลื่อนของลำพุง การเจาะของลำพุงในเนื้อเยื่อจำลอง (Tissue simulant) ที่ทำจาก PAMG (Polyacrylamide gel) และลักษณะของลำพุงที่ฉีดในอากาศ โดยใช้กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง (High Speed Video Camera, HSVC) และยังได้นำเอาระเบียบวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงตัวเลข (Computational Fluid Dynamics, CFD) มาช่วยในการศึกษาเพื่อจำลองพฤติกรรมของไหลของของไหลในหัวฉีดที่ขับเคลื่อนด้วยสปริง

5.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ถ่ายภาพลำพุง

5.1.1 การเตรียม Polyacrylamide gel เพื่อใช้เป็นเนื้อเยื่อจำลอง

PAMG (Polyacrylamide Gel) คือ เจลโพลิเมอร์ที่เกิดจากการรวมตัวของสารอะครีลาไมด์ (Acrylamide) และบิสอะครีลาไมด์ (Bisacrylamide) โมเลกุลเดี่ยวมารวมตัวกันเกิดเป็น โพลิเมอร์ มีลักษณะเป็นร่างแห มีความใส สามารถปรับความหนาแน่นหรือคุณสมบัติเชิงกลของเจลด้วยการปรับอัตราส่วนผสมของบิสอะครีลาไมด์ สารตั้งต้นของ PAMG ประกอบด้วย

- น้ำปราศจากไอออน (Deionized)
- Acrylamide
- Bisacrylamide
- Ammonium persulfate
- TEMED

โดยทั่วไปสารอะครีลาไมด์และบิสอะครีลาไมด์จะผสมกันอยู่รูปของสารละลาย (Acrylamide solution) การจับตัวเป็นโพลิเมอร์ ของอะครีลาไมด์และบิสอะครีลาไมด์เริ่มต้นโดยเติมสารแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (Ammonium persulfate) และใส่ TEMED (N,N,N,N – Tetramethylethylenediamine) เพื่อเร่งให้เกิดปฏิกิริยาการจับตัวเป็นโพลิเมอร์อะครีลาไมด์และบิสอะครีลาไมด์ขึ้น โดยแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต และ TEMED จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการจับตัวของสารให้เป็นโพลิเมอร์ หากเพิ่มปริมาณ TEMED หรือแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต ปฏิกิริยาให้การจับตัวเป็นโพลิอะครีลาไมด์จะเร็วขึ้น

การเกิดปฏิกิริยาการจับตัวกันเป็นโพลีเมอร์ของอะครีลาไมด์จะเกิดได้ช้าหรือไม่เกิดเลย ขึ้นอยู่กับ pH และปริมาณออกซิเจนของปฏิกิริยา ซึ่งหาก มีค่า pH ต่ำและมีปริมาณออกซิเจนมาก ปฏิกิริยาโพลีเมอร์ของอะครีลาไมด์อาจไม่เกิด ดังนั้นบางครั้งจึงต้องกำจัดออกซิเจนก่อนโดยใช้ปั๊ม ดูดอากาศออก ก่อนที่จะเติม TEMED และแอมโมเนียเปอร์ซัลเฟต

ทั้งนี้ในการศึกษา 20 % PAMG ถูกนำมาใช้ทดสอบคุณลักษณะการเจาะของลำฟุ้งที่ใช้ นำส่งยา จากการทดสอบของ Schramm-Baxter และคณะ [1] พบว่า 20 % PAMG มีค่า ยังก์โมดูลัส (Young's modulus) และ ความแข็ง (Hardness) เท่ากับ 0.22 MPa and 41 Hoo ตามลำดับ ซึ่งมี ปริมาณสารตั้งต้น และวิธีการเตรียมดังต่อไปนี้

- น้ำปราศจากไอออน (Deionized) 200 มิลลิลิตร
- 40 % สารละลายอะครีลาไมด์ (Acrylamide solution) 50 มิลลิลิตร
- ผงแอมโมเนียเปอร์ซัลเฟต (Ammonium persulfate) 10 กรัม
- TEMED 0.12 มิลลิลิตร

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมสารละลาย 20 % อะครีลาไมด์ ด้วยการนำปราศจากไอออน 100 มิลลิลิตร ผสมกับ 40 % สารละลายอะครีลาไมด์ 50 มิลลิลิตร

ขั้นตอนที่ 2 เตรียมสารละลาย 10 % แอมโมเนียเปอร์ซัลเฟต ด้วยการนำปราศจากไอออน 100 มิลลิลิตร ผสมกับผงแอมโมเนียเปอร์ซัลเฟต 10 กรัม

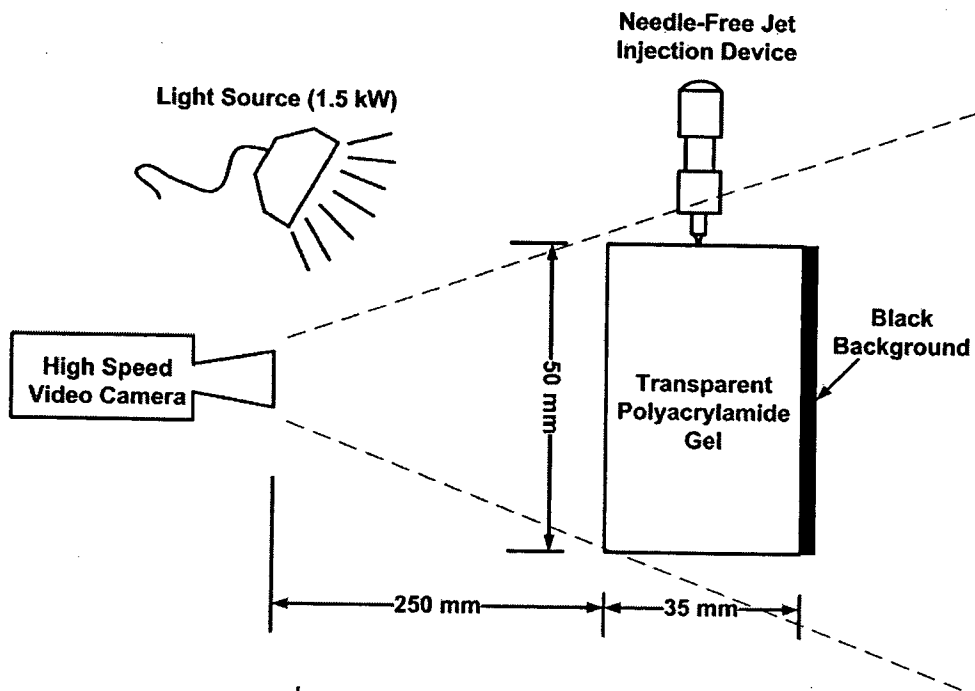
ขั้นตอนที่ 3 ผสมสารละลาย 10 % แอมโมเนียเปอร์ซัลเฟต 0.6 มิลลิลิตร กับ TEMED 0.12 มิลลิลิตร

ขั้นตอนที่ 4 ผสมสารละลาย 20 % อะครีลาไมด์ 60 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลายที่ได้จาก ขั้นตอนที่ 3 ทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยาการจับตัวของอะครีลาไมด์เจล ในบริเวณที่มีแสง สว่างเพียงพอ

สารละลายจากขั้นตอนที่ 4 จะบรรจุและปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาในกล่องสี่เหลี่ยมโปร่งแสง ขนาด 50×35×50 มิลลิเมตร

5.1.2 ระบบถ่ายภาพด้วยกล้องจับภาพความเร็วสูง

เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการออกแบบและสร้างอุปกรณ์นำส่งยาโดยใช้ลำฟุ้งความเร็วสูง จึงจำเป็นต้องพิจารณาคุณลักษณะทางพลศาสตร์ของลำฟุ้ง โดยใช้กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง (High Speed Video Camera, HSVC) Photron รุ่น Fastcam SA5 ซึ่งสามารถถ่ายภาพด้วยความเร็ว สูงสุด 1,000,000 เฟรม ต่อวินาที สำหรับกรณีศึกษาที่ใช้อัตราความเร็วถ่ายที่ 15,000 – 30,000 เฟรม ต่อวินาที เพื่อการถ่ายลำฟุ้งความเร็วสูงจากอุปกรณ์ฉีดยา Bioject รุ่น Cool click 2 มีหัวฉีดขนาด 0.17 mm รูปที่ 5.1 แสดงชุดทดลองและกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง



รูปที่ 5.1 ระบบถ่ายภาพความเร็วสูง

จากรูปที่ 5.1 จะเห็นได้ว่า ระบบถ่ายภาพความเร็วสูงประกอบด้วย

- กล้อง HSVC ของ Photron รุ่น Fastcam SA5 ทำหน้าที่ถ่ายปรากฏการณ์เกิดขึ้น วางห่างจาบริเวณที่ตำแหน่งของปรากฏการณ์ที่จะถ่าย 250 มิลลิเมตร
- แหล่งกำเนิดแสง (Light source) ให้แสงสว่างที่เหมาะสมกับการถ่ายภาพที่ความเร็วซัดเตอร์สูงๆ ของกล้อง ในที่นี้ใช้ไฟ ขนาด 1.5 kW
- อุปกรณ์นำส่งยาด้วยลำพุ่งความเร็วสูงของ Bioject รุ่น Cool. click
- เจลโปร่งแสง (Transparent gel) ทำหน้าที่เป็นวัสดุเนื้อเยื่อจำลองที่สามารถมองเห็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในได้ โดยการศึกษาที่เราใช้ 20% PAMG
- พื้นหลังสีดำ (Black background) วางไว้ด้านหลังเจลโปร่งแสง เพื่อช่วยตัดแสงรบกวนจากด้านหลังของเจล

5.2 คุณสมบัติของลำพุ่ง

ในการศึกษา ของเหลวที่ใช้ฉีดเป็นน้ำ ที่ปริมาตรต่างๆ โดยฉีดในอากาศ และ 20% PAMG และทำการถ่ายภาพรูปร่างและปรากฏการณ์ลำพุ่งที่เกิดขึ้น จากภาพถ่ายสามารถเห็น การแหวกอากาศ เนื้อเยื่อจำลองของลำพุ่ง และกลไกการอัดของแท่งกคบนของเหลวในหัวฉีด นอกจากนี้แล้วยังทำการวัดความเร็วและความดันกระแทกของลำพุ่ง ด้วยหลักการตัดแสงของวัตถุและแผ่น PVDF ตามลำดับ ซึ่งรายละเอียดของเครื่องมือกล่าวไว้แล้วในบทที่ 4

5.2.1 ความเร็วออก และกำลังของลำพุ่ง

โดยทั่วไปลำพุ่งที่จะนำมาใช้ในการนำส่งยา นั้นคุณลักษณะตัวแรกที่จะต้องศึกษา คือ ความเร็วที่ออกจากหัวฉีด เนื่องจากการเจาะผิวหนัง ลำพุ่งต้องมีโมเมนตัมหรือพลังงานเพียงพอในการเอาชนะความแข็งแรงของผิวหนังได้ ดังนั้น ในการศึกษานี้จึงได้ทำการวัดความเร็วออกของลำพุ่ง ด้วยวิธี หลักการตัดแสงของวัตถุ ด้วยชุดตรวจจับความเข้มแสง (Photo detector) และกล้อง HSVC แต่อย่างไรก็ตาม ความเร็วไม่ใช่เพียงปัจจัยเดียวที่มีผลต่อประสิทธิภาพการนำส่งยาของลำพุ่ง โดยจะเกี่ยวข้องกับ ความลึกของการเจาะ ลักษณะการแพร่กระจายของยา โดยปัจจัยอื่นที่มีผลกับประสิทธิภาพเหล่านี้ นอกเหนือจากความเร็วออกแล้ว คือ คุณสมบัติของของเหลว เช่น ความหนาแน่น รูปร่างของหัวฉีด เช่น เส้นผ่านศูนย์กลาง ดังนั้นจึงได้มีการกำหนด พารามิเตอร์ ตัวใหม่ขึ้น เรียกว่า “กำลังของลำพุ่ง” หรือ “Jet power (P_o)” มีหน่วยเป็นวัตต์ (W) นั่นคือ

$$P_o = \frac{1}{8} \pi \rho D_o^2 u_o^3 \quad (5.1)$$

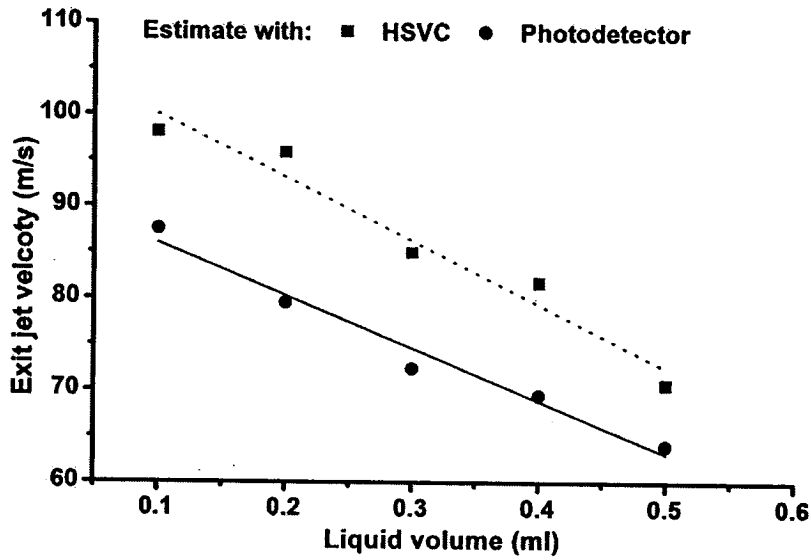
เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของของเหลว มีค่าเท่ากับ 998 kg/m^3

D_o คือ เส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด มีค่าเท่ากับ 0.17 มิลลิเมตร

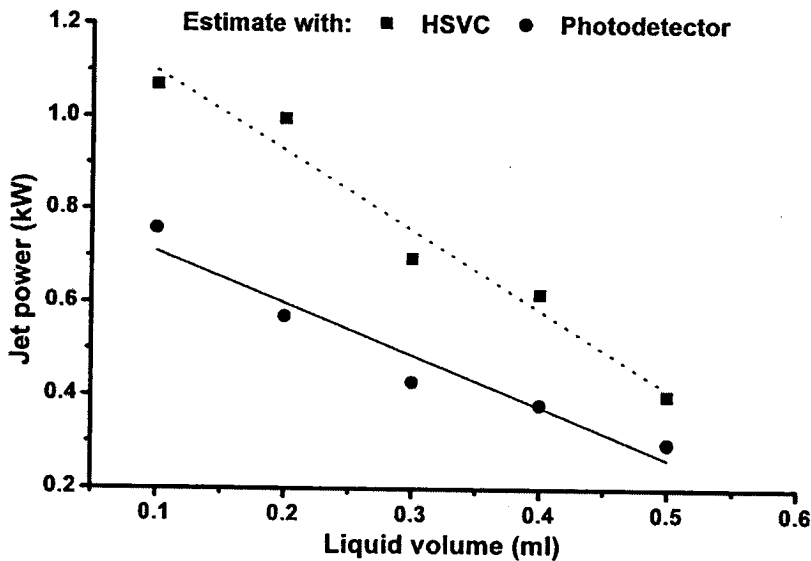
u_o คือ ความเร็วออกของลำพุ่ง ได้จากการทดลอง

รูปที่ 5.2 แสดงความเร็วออกของลำพุ่งที่วัดได้ และ กำลังของลำพุ่งที่ได้จากการคำนวณ โดยสมการ (5.1) จะพบว่า ที่ปริมาตรบรรจุ 0.1 ml ให้ค่าทั้งสองมากที่สุด และจะลดลงเรื่อยๆเมื่อปริมาณของเหลวเพิ่มขึ้น เป็นผลเนื่องจาก พลังงานสะสมต่อมวลต่างกัน เมื่อพลังงานที่สปริงถ่ายเทให้น้ำมีค่าเท่ากันทุกกรณี แต่ปริมาณมวลที่รับพลังต่างกัน ส่งผลให้กรณีที่ของเหลวมีปริมาณน้อย จะมีพลังงานสะสมมากกว่าของเหลวที่มีปริมาณมาก ความเร็วของลำพุ่งที่ออกมาจึงเร็วกว่า

ความเร็วออกของลำพุ่งจากการทดลองนั้น ได้มาจาก ชุดตรวจจับความเข้มแสง และรูปถ่ายจากกล้อง HSVC จากรูป 5.2 (a) จะเห็นว่ามีความต่างกัน โดยค่าที่วัดจากรูปถ่าย จะสูงกว่าจากชุดตรวจจับความเข้มแสง ทั้งนี้เนื่องจากใช้หลักการวัดความเร็วต่างกัน เมื่อความเร็วที่ได้จากชุดตรวจจับระยะของตัววัด (โฟโตไดโอด) จะคงที่ เท่ากับ 12.5 มิลลิเมตร ซึ่งเวลาของลำพุ่งที่วัดได้จะอยู่ในช่วง $141-194 \text{ us}$ แต่ขณะเดียวกัน ความเร็วที่ได้จากภาพถ่ายของกล้อง HSVC นั้น วัดระยะทางจากหัวฉีดถึงปลายลำพุ่งที่เวลาคงที่ที่ 200 us โดยระยะของลำพุ่งที่วัดได้จะประมาณ $14 - 19$ มิลลิเมตร หากเปรียบเทียบกันจะพบว่า การหาความเร็วด้วยกล้อง HSVC ใช้เวลาและระยะห่างกว้างกว่าการหาความเร็วด้วยชุดตรวจจับความเข้มแสง ทำให้ค่าที่ได้จากกล้องสูงกว่าที่ได้จากชุดตรวจจับความเข้มแสง เพราะ ยิ่งระยะและเวลาเดินทางของลำพุ่งเพิ่มขึ้น ความเร็วของลำพุ่งยิ่งสูงขึ้น



(a)



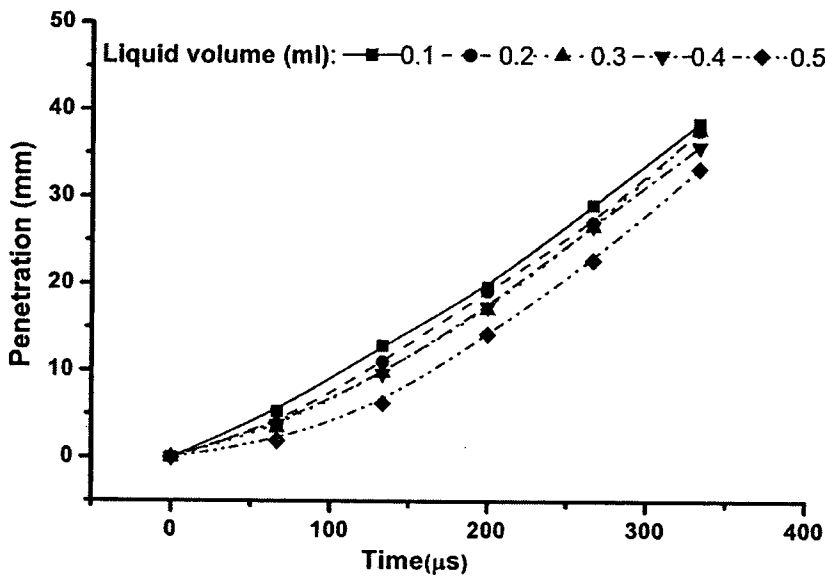
(b)

รูปที่ 5.2 ความเร็วออก (a) และกำลังของลำพุ่ง (b)

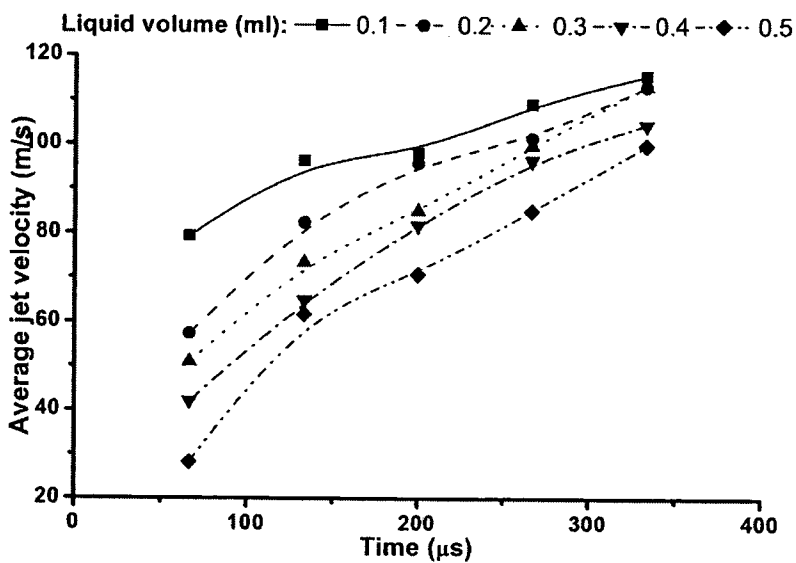
5.2.2 รูปร่างและความเร็วเฉลี่ยเฉพาะกาลของลำพุ่ง

จากภาพถ่าย HSVC ของลำพุ่งที่ออกจากหัวฉีดจะ เราสามารถคำนวณหาระยะแหวกอากาศและความเร็วเฉลี่ยเฉพาะกาลของลำพุ่ง (Average jet velocity) ได้ดังแสดงในรูปที่ 5.3 และ 5.4 ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่า อัตราการแหวกอากาศและความเร็วเฉพาะการของลำพุ่ง จะเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาและระยะเดินทางเพิ่มขึ้น ที่ปริมาณน้ำ 0.1 ml ให้ค่าสูงสุด ความเร็วเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 110 m/s ลำพุ่งยาว 37 มิลลิเมตร ที่เวลา 340 us และจะลดลงตามปริมาณน้ำที่บรรจุ ณ เวลาเดียวกัน เนื่องจากพลังงานที่สปริงถ่ายเทให้น้ำกัน แต่ปริมาณมวลที่รับพลังต่างกัน ส่งผลให้กรณีที่น้ำน้อยจะมีพลังงานสะสมมาก ความเร็วของลำพุ่งที่ออกมาจึงเร็วกว่ากรณีที่น้ำมาก

สำหรับการการนำส่งส่งยาโดยใช้ลำพุงนั้น ความเร็วเฉพาะกาลอาจไม่มีความจำเป็นที่ต้องศึกษา เนื่องจากกระบวนการหัวฉีดกับผิวหนังนั้นใกล้เคียงกันมาก ทำให้ความเร็วกระแทกเริ่มแรกของลำพุงบนผิวหนังจึงมีค่าไม่สูงมากนัก แต่จากการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่า ความเร็วออกของลำพุง ที่วัดด้วยเครื่องมือวัดต่างๆ ที่กล่าวในหัวข้อที่ผ่านมา จะมีความคลาดเคลื่อนจากความเร็วเริ่มแรกที่กระแทกบนผิวหนังอยู่ แต่อย่างไรก็ตามจากการทดลองทำให้เราทราบถึงแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงความเร็วตามปริมาณของเหลวที่ฉีด

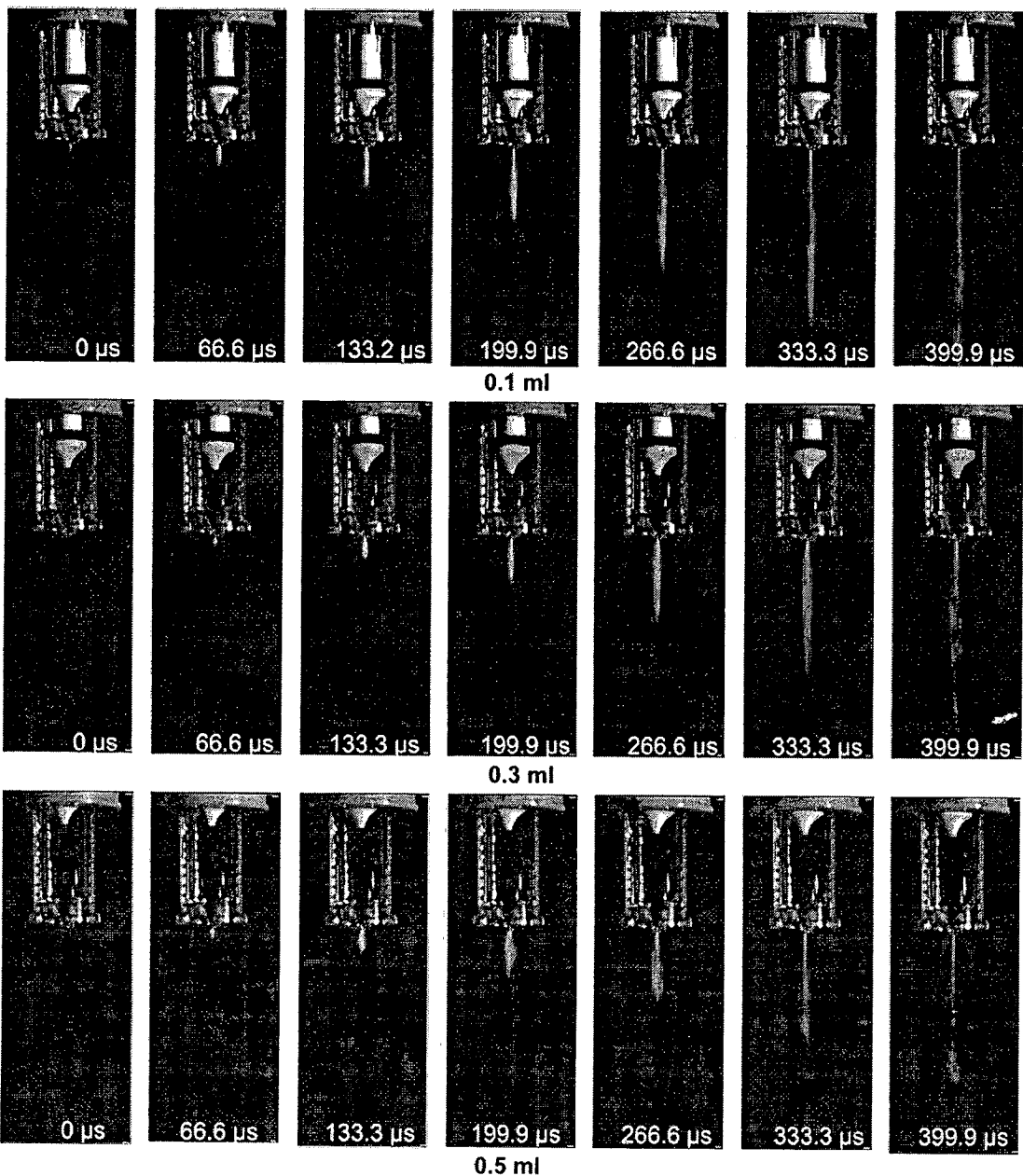


รูปที่ 5.3 การแหวกอากาศของลำพุง



รูปที่ 5.4 ความเร็วเฉลี่ยเฉพาะกาลของลำพุง

เมื่อพิจารณารูปร่างของลำพุ่ง (ดังแสดงในรูปที่ 5.5) จะเห็นได้ว่าลักษณะลำพุ่งที่เริ่มออก จากหัวฉีดจะมีรูปร่างแหลมเรียว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเจาะผ่านผิวหนัง และลำพุ่งจะแตกเป็น ฝอยเมื่อลำพุ่งออกห่างจากหัวฉีด หรือลำพุ่งเดินทางในอากาศนานขึ้น ซึ่งหากปริมาณของเหลวน้อย (ที่ 0.1 ml) ลำพุ่งที่ออกมาในช่วงเวลาแรก จะมีรูปร่างปลายหัวเรียวแหลมมากกว่ากรณีที่มีของเหลว มากกว่า (ที่ 0.5 ml) ซึ่งช่วงเริ่มต้นหัวของลำพุ่งมีรูปร่างโต และจะมีแกนรูปร่างแหลมเรียว เมื่อเวลา ผ่านไป นั้นหมายความว่า ปริมาณของเหลวในหัวฉีด มีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการนำส่งยา โดยเฉพาะขนาดของรูเจาะหรือแผลที่เกิดหลังการฉีด



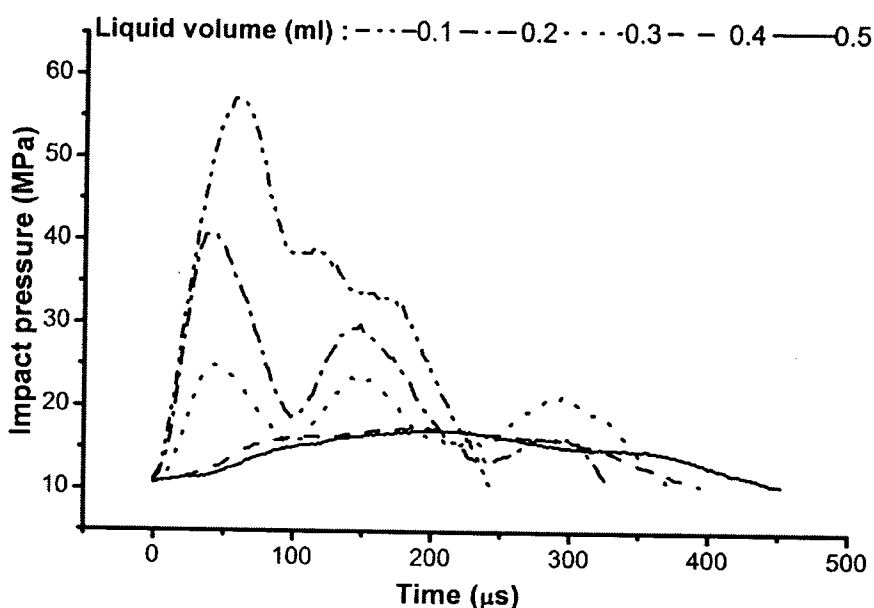
รูปที่ 5.5 ลักษณะรูปร่างของลำพุ่งตามปริมาตรการฉีด

5.2.3 ความดันกระแทกของลำพุ่ง

ความดันกระแทกของลำพุ่งเป็นคุณลักษณะอีกประการของลำพุ่งที่เชื่อมโยงกับประสิทธิภาพการนำส่งยา ในการศึกษาครั้งนี้ ความดันกระแทก (Impact pressure) จะวัดด้วยแผ่น PVDF ซึ่งหลักการทำงาน และการปรับเทียบได้กล่าวไว้อย่างละเอียดแล้วในบทที่ 4 ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.6 ซึ่งแสดงกราฟความดันและเวลาจากการกระแทกของลำพุ่ง ด้วยน้ำในหัวฉีดที่มีปริมาณของแต่ละตัวต่างกัน ที่ 0.1 ml ความดันกระแทกมีค่าสูงสุดประมาณ 56 MPa และใช้เวลากระแทกน้อยที่สุด ประมาณ 250 μ s เมื่อน้ำมีปริมาณมากขึ้น ความดันกระแทกจะลดลงแต่ใช้เวลากระแทกมากขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อน้ำในหัวฉีดน้อย (ที่ 0.1 - 0.3) กราฟความดัน จะมีลักษณะเพิ่มขึ้น-ลดลง เป็นช่วง (Pulse) มากขึ้น ในขณะที่ หากน้ำในหัวฉีดมาก (ที่ 0.4 - 0.5 ml) กราฟจะมีลักษณะราบเรียบขึ้น

การที่กราฟมีลักษณะเพิ่มขึ้น-ลดลงเป็นช่วงนั้น เป็นผลเนื่องจากคุณสมบัติการอัดตัวได้ (Compressible liquid) ของน้ำในขณะถูกขับออกจากหัวฉีด โดยจะเกิดคลื่นอัด (Compressed wave) ซึ่งเคลื่อนด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วของเสียงในน้ำ โดยจะเคลื่อนที่กลับไปกลับมาในของเหลวขณะฉีด ทำให้ลำพุ่งออกมาจะมีลักษณะเป็นก้อนของเหลว ทั้งนี้หาก น้ำในหัวฉีดมีมากลักษณะความเป็นก้อนของลำพุ่งจะน้อยลง (สังเกตได้ในรูปที่ 5.6 ที่ 0.4 - 0.5 ml) เนื่องจาก คลื่นอัดจะสูญเสียพลังงานมากจากการเคลื่อนที่

ดังนั้น การประยุกต์นำลำพุ่งความเร็วสูงไปใช้ในการนำส่งยา จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเข้าใจพฤติกรรมการไหลแบบอัดตัวได้ของของเหลว (Compressible liquid flow) ในหัวฉีด เพื่อการออกแบบหัวฉีดหรือคอกการอัดของเหลวให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งาน



รูปที่ 5.6 ความดันกระแทกของลำพุ่ง

5.2.4 การเจาะผ่านเนื้อเยื่อจำลอง

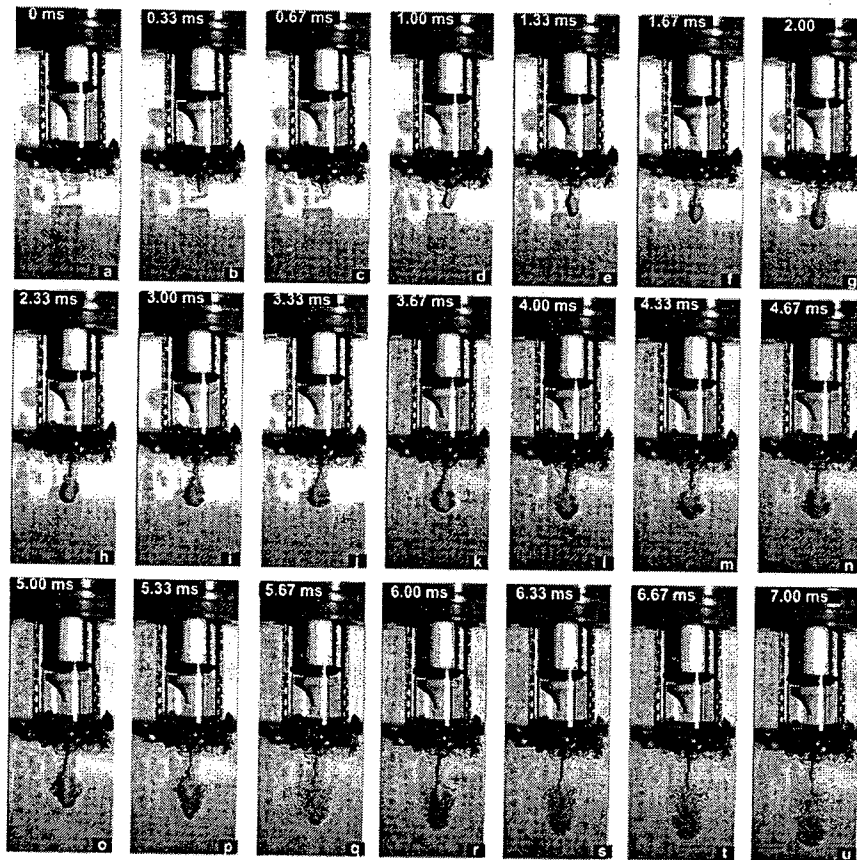
จากผลการทดลอง รูปที่ 5.7 – 5.9 แสดงคุณลักษณะการเจาะของลำฟุ้งใน 20% PAMG รูปที่ 5.6 แสดง รูปถ่ายจากกล้อง HSVC เมื่อลำฟุ้งเจาะ 20% PAMG ด้วยของเหลวในหัวฉีด 0.2 และ 0.4 ml (รูป 5.7 (a) และ 5.7 (b) ตามลำดับ) พบว่า การเจาะประกอบด้วยสามช่วง คือ

ช่วงที่หนึ่ง คือ ช่วงเริ่มต้น (Threshold stage) ซึ่งหัวกดเริ่มเคลื่อนที่ แต่ผิวของ 20% PAMG ยังไม่ทะลุ (ดังแสดงในรูป 5.7 (a (a-b) และ 5.7 (b-1)) เพราะความดันกระแทกและโมเมนตัมของลำฟุ้งยังไม่สามารถเอาชนะความแข็งแรงของผิว 20% PAMG ได้ ทั้งนี้ช่วงเริ่มต้นจะใช้เวลาสั้นลง เมื่อปริมาณของเหลวในหัวฉีดลดลง ดังเห็นได้จากรูป 5.7(a) ซึ่งแสดงการเจาะของลำฟุ้งจากปริมาณของเหลว 0.2 ml

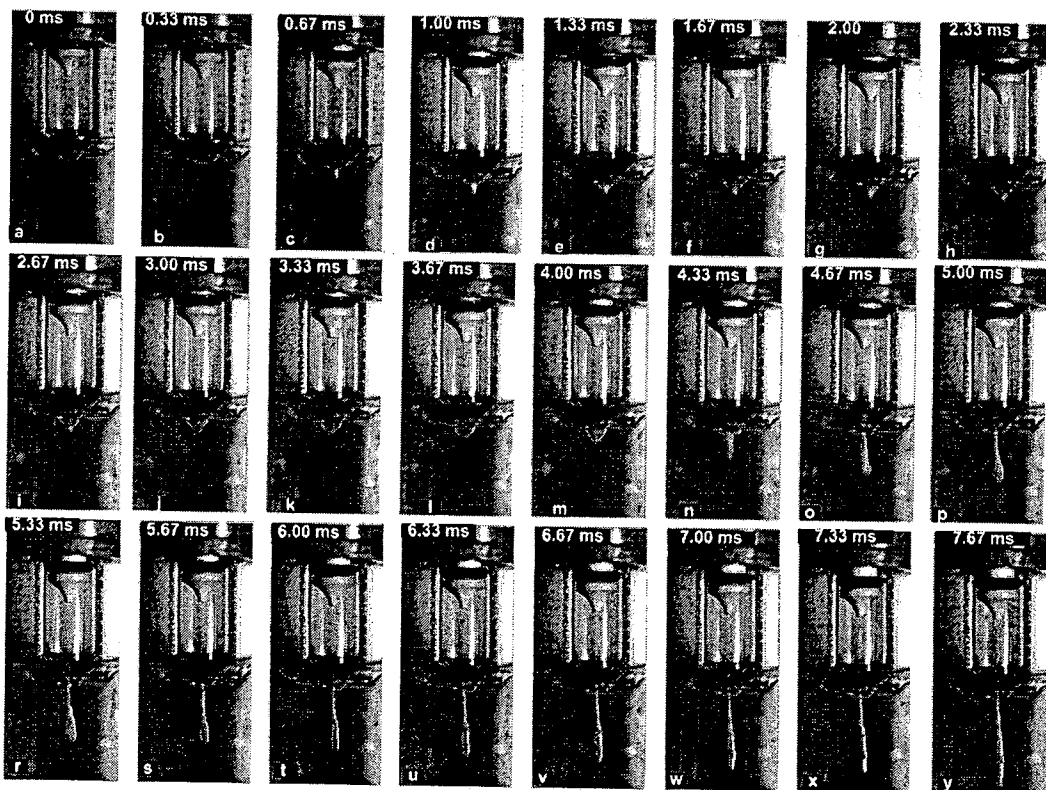
ช่วงที่สอง คือ ช่วงเจาะ (Penetrative stage) ซึ่งเป็นช่วงหลังจากความดันกระแทกและโมเมนตัมของลำฟุ้งสามารถเอาชนะความแข็งแรงบนผิว 20% PAMG ได้ ทำให้ลำฟุ้งสามารถเจาะทะลุผ่านเนื้อเยื่อจำลอง ดังแสดงในรูปที่ 5.7 (a (c-g)) และ 5.6 (b (m-o)) ที่ช่วงนี้ การแพร่ของของเหลวเกิดขึ้นเล็กน้อยและสามารถสังเกตเห็นขนาดรูเจาะแคบๆได้ ซึ่งช่วงเจาะจะใช้เวลาสั้นกว่าช่วงเริ่มต้นและช่วงแพร่กระจาย

ช่วงที่สาม คือ ช่วงแพร่กระจาย (Dispersion stage) ช่วงนี้ความเร็วเจาะของลำฟุ้งจะค่อยๆลดลง ขณะที่ของเหลวเริ่มแพร่กระจายดังแสดงในรูปที่ 5.7 (a (h-u)) และ 5.7 (b (p-y)) สถานะนี้จะดำเนินอยู่จนกระทั่งการฉีดสิ้นสุด

โดยทั่วไปแล้วช่วงเวลาของกระบวนการเจาะของลำฟุ้งจะขึ้นอยู่กับปริมาณของของเหลวในหัวฉีด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณน้ำที่ใช้ในการฉีด จากเริ่มจาก 0.1 จนถึง 0.5 ml รูปที่ 5.8 และ 5.9 แสดง ระยะแหวกและความเร็วเฉลี่ยของลำฟุ้ง ที่เจาะผ่าน 20% PAMG ตามลำดับ ค่าที่ได้สอดคล้องกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในรูปที่ 5.7 โดยสามารถสังเกตเห็นช่วงเจาะทั้งสามช่วง ช่วงแรกระยะแหวกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (อยู่ในช่วงเวลา 0 - 1 ms) ก่อนจะเริ่มคงที่ และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้งในช่วงเจาะ หลังจากนั้นระยะแหวกจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆในช่วงการแพร่ (ดังแสดงในรูปที่ 5.8) ซึ่งสอดคล้องกับความเร็วเฉลี่ย ที่แสดงในรูปที่ 5.9 โดยค่าจะเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างรวดเร็ว ก่อนที่จะมีแนวโน้มคงที่ช่วงเวลาหนึ่ง (ช่วงเริ่มต้น) จากนั้นจะเพิ่มขึ้นอีกครั้ง (ช่วงเจาะ) และค่อยๆลดลง (ช่วงแพร่กระจาย) ทั้งนี้ช่วงเริ่มต้นจะใช้เวลาเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของเหลวในหัวฉีดเพิ่มมีมาก เนื่องจากความเร็วและโมเมนตัมเริ่มฉีดของลำฟุ้งมีน้อย เมื่อปริมาณของเหลวมีมาก

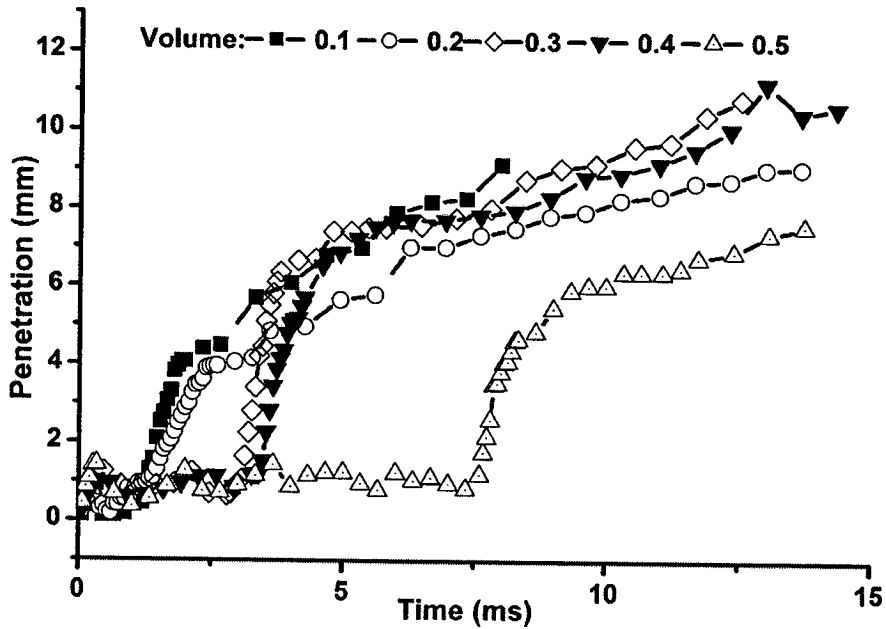


(a)

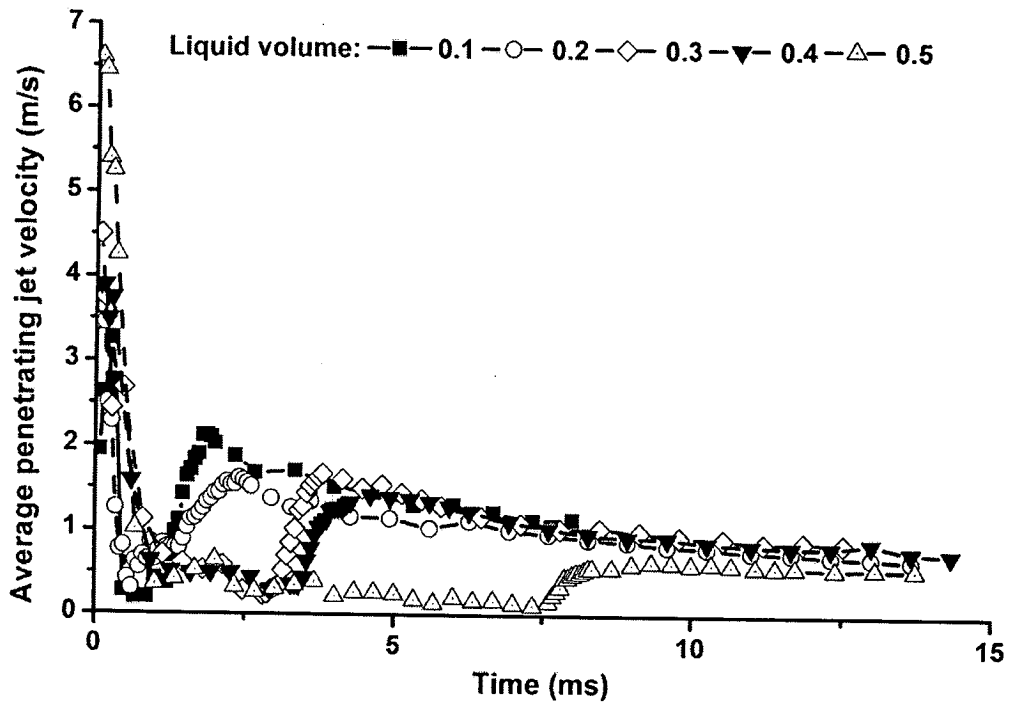


(b)

รูปที่ 5.7 การเจาะของลำพุงบน 20% PAMG เมื่อปริมาตรของเหลว (a) 0.2 ml และ (b) 0.4 ml



รูปที่ 5.8 ระยะแหวกของลำพุ่งใน 20% PAMG



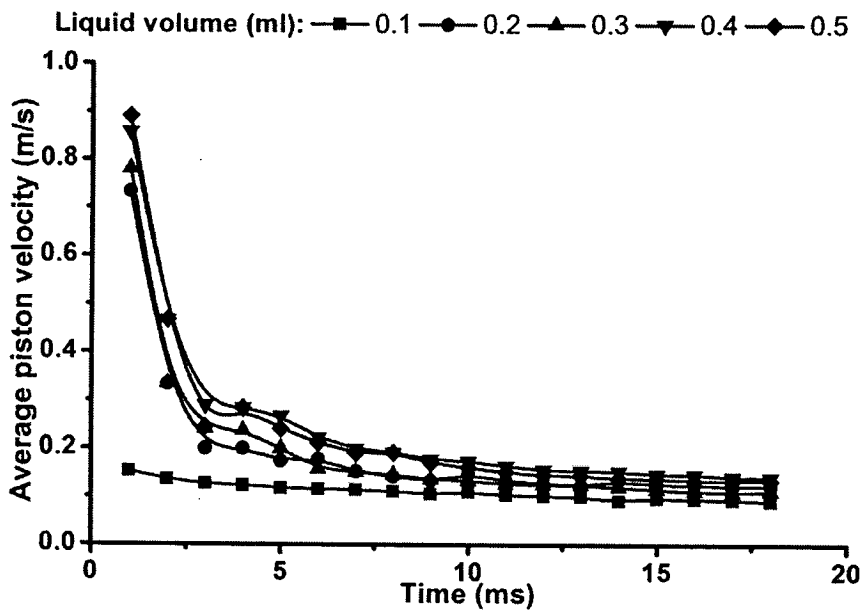
รูปที่ 5.9 ความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่งใน 20% PAMG

5.2.5 พฤติกรรมของหัวกด

เมื่อทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณของเหลวในหัวฉีดที่มีต่อพฤติกรรมของหัวกด ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 5.10 โดยแสดงในรูปของความเร็วเฉลี่ย พบว่า หัวกดจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วในช่วงแรก (0 – 5 ms) เนื่องจากของเหลวมีช่วงยุบตัว (Compressed liquid stage) จากการกด ก่อนที่จะ

ช้าลงในช่วงถัดมา ซึ่งปริมาณของเหลวในหัวฉีดไม่มีผลกับความเร็วเฉลี่ยหัวฉีด ในช่วงยุบตัวมีค่าประมาณ 0.3 – 0.35 m/s และหลังช่วงยุบตัว มีค่าประมาณ 0.15 - 0.17 m/s แต่อย่างไรก็ตาม ปริมาณของเหลวในหัวฉีดมีผลกับช่วงเวลายุบตัว โดยเมื่อปริมาณของเหลวมากขึ้น ช่วงเวลาการยุบตัวจะนานขึ้นด้วย สังเกตได้จาก รูปที่ 5.10 เปรียบเทียบระหว่างกรณีปริมาณของเหลว 0.1 และ 0.5 ml ที่จะมีช่วงเวลายุบตัวประมาณ 5 ms และ 11 ms ตามลำดับ

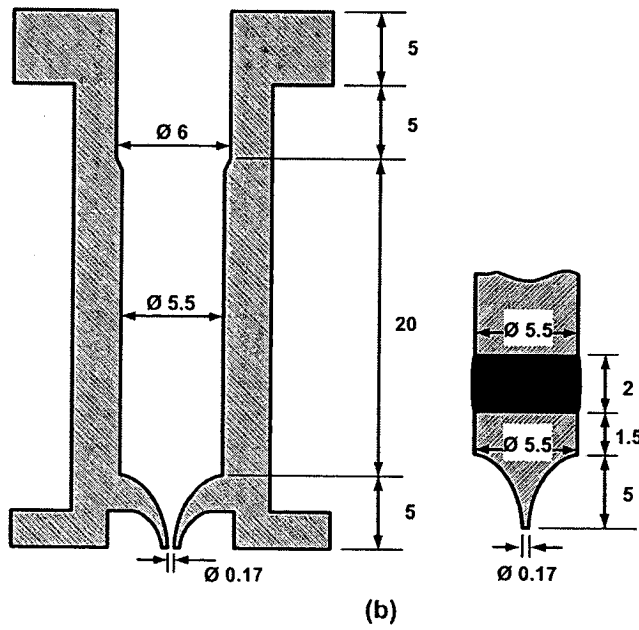
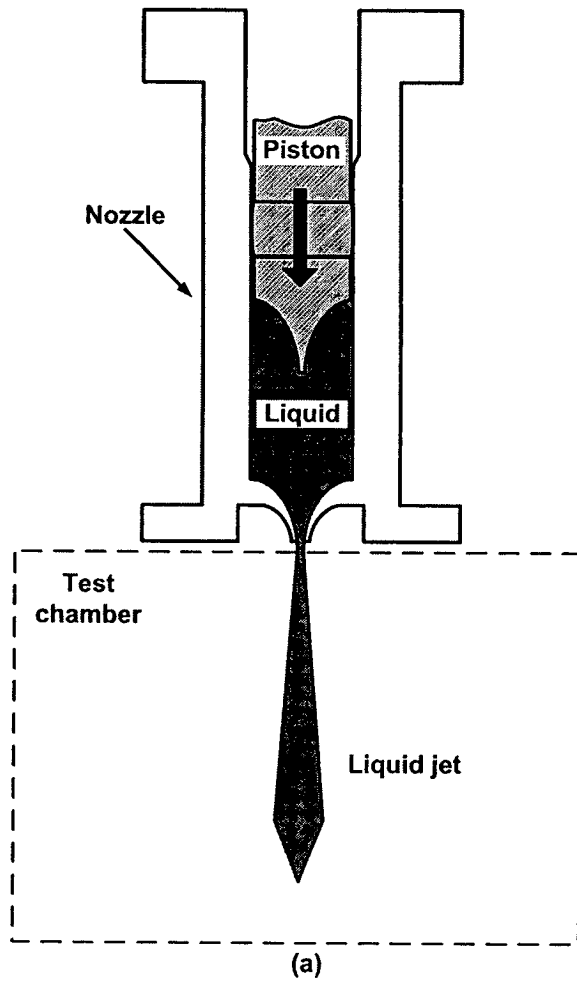
จากการศึกษา ไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างช่วงยุบตัวหรือคุณสมบัติการยุบตัวของของไหล ที่มีผลกับคุณลักษณะของลำพุ่ง เนื่องจากช่วงแรกลำพุ่งถูกขับเคลื่อนด้วยคลื่นอัด (Compressed wave) ในของเหลวซึ่งเคลื่อนที่เร็วเท่ากับความเร็วเสียงที่เดินทางในน้ำ ซึ่งเร็วกว่าการเคลื่อนที่ของหัวฉีดมาก ทำให้ลำพุ่งที่ออกมา (Exit jet) จึงขึ้นอยู่กับระยะทางการเคลื่อนที่ของคลื่นอัด ซึ่งก็คือปริมาตรของของเหลวในหัวฉีด และความเร็วกระแทกของหัวฉีด



รูปที่ 5.10 ความเร็วเฉลี่ยของหัวแทงกด

5.3 การศึกษาลำพุ่งด้วยระเบียบวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงตัวเลข (CFD)

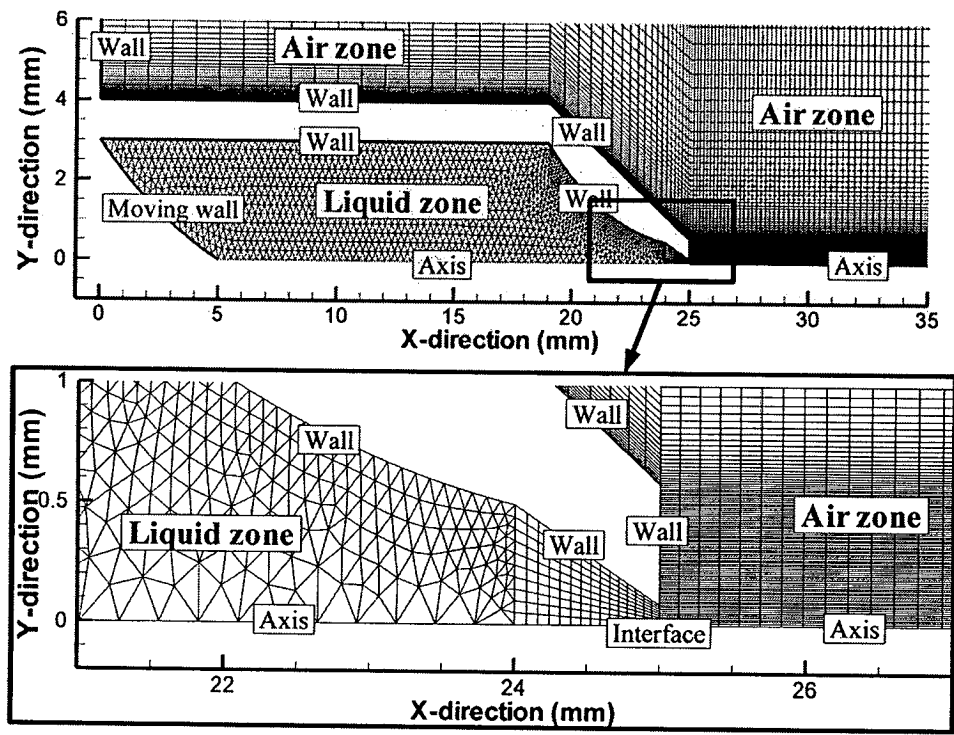
จากการทดลองที่ผ่านมาทำให้เราได้ทราบคุณลักษณะเบื้องต้นของลำพุ่ง และเพื่อเพิ่มความเข้าใจเกี่ยวกับปรากฏการณ์การกำเนิดลำพุ่ง ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเอาระเบียบวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาช่วยคำนวณและอธิบาย ปรากฏการณ์ดังกล่าว ทั้งนี้ แบบจำลอง และ ระเบียบวิธีคำนวณจะคล้ายกับ การจำลองการไหลของการกำเนิดลำพุ่งด้วยวิธีการกระแสทกในบทที่ 3 แต่มีรายละเอียดบางประการที่แตกต่างออกไป ตามหัวข้อต่อไปนี้



รูปที่ 5.11 กลไก (a) และรูปร่างของหัวฉีด (b)

5.3.1 ขอบเขตและรูปร่างของปัญหา

รูปร่างของหัวฉีดและขอบเขตของการปัญหาของการสร้างลำพุ่งจากอุปกรณ์ฉีดยาแสดงขนาดดังในรูปที่ 5.11 ซึ่งแสดงกลไกการขับและขนาดรูปร่างหัวฉีดกับแท่งกวดของอุปกรณ์ CoolClick ที่จะใช้คำนวณใน CFD แท่งกวดจะรับแรงกวดจากสปริง เพื่อขับของเหลวที่บรรจุในหัวฉีดทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 mm ให้ผ่านคอกอดที่มีขนาด 0.17 mm และเป็นรูปโค้งพาราโบลา เพื่อให้ลำพุ่งมีความเร็วและรูปร่างแหลมคมสำหรับเจาะผิวหนังแต่อย่างไรก็ตามในแบบจำลอง CFD ของการศึกษานี้ จะไม่ได้ศึกษาการเจาะผ่านผิวหนัง แต่จะจำลองให้ไหลผ่านอากาศที่อยู่กับที่เพื่อตัดความซับซ้อนของปัญหาการไหลและการแพร่ในเนื้อเยื่อ ทำให้ในแบบจำลอง การไหลเป็นแบบสองสถานะ (ของเหลวและก๊าซ) โดยมีขอบเขตของปัญหาและกริดแสดงดังรูปที่ 5.12 รูปร่างของแบบจำลองจะเป็น แบบ Axis-symmetric ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนหัวฉีดที่บรรจุของเหลวหรือยา และส่วนที่สองจะเป็นห้องทดสอบที่บรรจุอากาศ กริดที่ใช้มีสองประเภท คือ สามเหลี่ยม (Triangle) สำหรับบริเวณในหัวฉีดและ สี่เหลี่ยม (Rectangle) สำหรับบริเวณในห้องผสม ซึ่งทั้งหมดอยู่ภายใต้ขอบเขตแบบระบบปิด ล้อมรอบด้วยผนัง (Wall boundary condition) รูปร่างขอบเขตและกริด เขียนขึ้น โดยใช้โปรแกรม GAMBIT ผนังและกริดด้านหัวกดจะถูกกำหนดให้เคลื่อนที่ได้ (Moving wall) โคนความเร็วจะเปลี่ยนแปลงตามแรงลัพธ์ที่กระทำบนหัวกด



รูปที่ 5.12 กริด และขอบเขตของปัญหา

5.3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

1) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ดังที่กล่าวไว้ในตอนต้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใน CFD ที่ถูกนำมาใช้กับการไหลของลำพุ่งจาก Cool.Click นี้เป็นแบบจำลองที่ใช้กับการกำเนิดลำพุ่งจากการกระแทก รายละเอียดสมการควบคุมและสมการถ่ายเท มีรายละเอียดดังในบทที่ 3 ซึ่งสามารถสรุปสาระสำคัญไว้ในตารางที่ 5.1 การไหลจะอยู่ในระบบปิด (Closed domain) ที่ประกอบด้วยของไหล สองชนิด คือ น้ำซึ่งเป็นของเหลว และอากาศ ซึ่งการผสมกันของทั้งสองสาร จำลองด้วยการไหลแบบของไหลสองสถานะแบบ Mixture การจำลองความปั่นป่วนใช้แบบจำลอง $k-\epsilon$ การไหลเป็นแบบเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยขนาดช่วงเวลาคำนวณ เท่ากับ $10 \mu\text{s}$

ตารางที่ 5.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของลำพุ่งของเหลวใน 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

2) การเคลื่อนที่ของแท่งกด

การเคลื่อนที่ของแท่งกดในหัวฉีดระหว่างกำเนิดลำพุ่งสามารถกำหนดให้เสมือนการเคลื่อนที่ของผนังและเปลี่ยนกริดภายในหัวฉีดดังกรณีของการขับเคลื่อนการกระแทกของลูกปืนในบทที่ 3 ความเร็วของหัวกด เมื่อเริ่มกระบวนการสามารถคำนวณได้จาก สมการอนุรักษ์โมเมนตัมอย่างง่ายบนหัวแท่งกด จากแรงลัพธ์ที่กระทำบนหัวกดของสปริง นั่นคือ

$$\int_{t_0}^t dV = \int_{t_0}^t (F(t)/m) dt \quad (5.2)$$

เมื่อ V คือ ความเร็วของหัวกด F คือ แรงลัพธ์ที่กระทำบนหัวกด และ m คือ มวลของแท่งกด ซึ่งความเร็วของหัวกด ณ ช่วงเวลา t สามารถแจกแจงและคำนวณด้วยสมการ ออยเลอร์ (Explicit Euler formula) ดังนี้

$$V_t = V_{t-\Delta t} + (F(t)/m)\Delta t \quad (5.3)$$

ความเร็วของการเคลื่อนที่ของหัวกดหรือผนัง สามารถคำนวณด้วย สมการ (5.3) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น ในช่วงเวลา Δt ผ่าน ฟังก์ชันของผู้ใช้ (User Define Function, UDF) ซึ่งโปรแกรม Fluent เปิดช่องทางไว้ให้ ในการคำนวณ มวลของแท่งกดมีค่าเท่ากับ 22 กรัม

แรงลัพธ์ที่กระทำบนหัวกด ได้จากการรวมแรงสองแรง คือ อันที่ 1 แรงกดจากสปริง ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามระยะยุบ และขยายตัวของสปริง มีอัตราส่วนที่ค่าคงที่เท่ากับ 17.8 kN/m และ อันที่ 2 แรงต้านจากแรงดันของของเหลวที่ถูกอัดในหัวฉีด แรงทั้งสองนี้จะมีทิศทางตรงข้ามกันตามแนวแกน ทั้งนี้ไม่พิจารณาแรงเสียดทานระหว่างหัวกดกับผนังหัวฉีด และกำหนดให้ความเร็วเริ่มต้นของหัวกดเท่ากับศูนย์และสิ้นสุดกระบวนการเมื่อหัวกดชนกับบ่าหัวฉีด

3) คุณสมบัติของของไหล

ที่เงื่อนไขเริ่มต้นของทั้งสองสถานะถูกแบ่งให้อยู่หัวฉีดและห้องสอบสำหรับของเหลวและอากาศตามลำดับ อากาศกำหนดให้มีคุณสมบัติเป็นก๊าซอุดมคติ (Ideal gas) เพื่อรองรับการไหลแบบอัดตัวได้ (Compressible flow) เช่นเดียวกันในส่วนของเหลวในหัวฉีด ต้องกำหนดให้มีคุณสมบัติอัดตัวได้ แต่เนื่องจากมีความแตกต่างจากก๊าซ คุณสมบัติสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการอัดตัวได้ของของเหลว ได้แก่ ความหนาแน่น และความเร็วเสียงในของเหลว ต้องกำหนดผ่านฟังก์ชันภายนอกโปรแกรม Fluent ที่เขียนขึ้นเองผ่าน UDF โดย คุณสมบัติทั้งสองจะขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงความดัน ณ ช่วงเวลา ก่อนและหลัง ดังแสดงในสมการ (5.4) และ (5.5) การศึกษานี้ใช้น้ำเป็นของไหลหลัก โดยมีคุณสมบัติที่สำคัญแสดงดังในตารางที่ 5.2

$$\rho_1 = \frac{\rho_o}{[1.0 - (P_1 - P_o)/B]} \quad (5.4)$$

$$a_1 = \frac{1 - (P_1 - P_o)}{B} \times \frac{\sqrt{B}}{\rho_o} \quad (5.5)$$

- เมื่อ ρ_0 คือ ค่าความหนาแน่นเริ่มต้นของของเหลว เท่ากับ (kg/m^3)
 P_0 คือ ความดันเริ่มต้นของของไหล (Pa)
 P_1 คือ ความดันที่สภาวะต่อมาของของไหล (Pa)
 B คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกักอัดของของเหลว ซึ่งมีค่าแสดงดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 คุณสมบัติของของไหล

Liquid	Bulk modulus (GPa)	Vapor pressure ($\times 10^{-6}$ GPa)	Molecular weight (g)	Specific heat (J/(kg.K))	Surface tension coefficient (N/m)
Water	2.49	3,169	18	4182	0.0717

4) ระเบียบวิธีคำนวณ

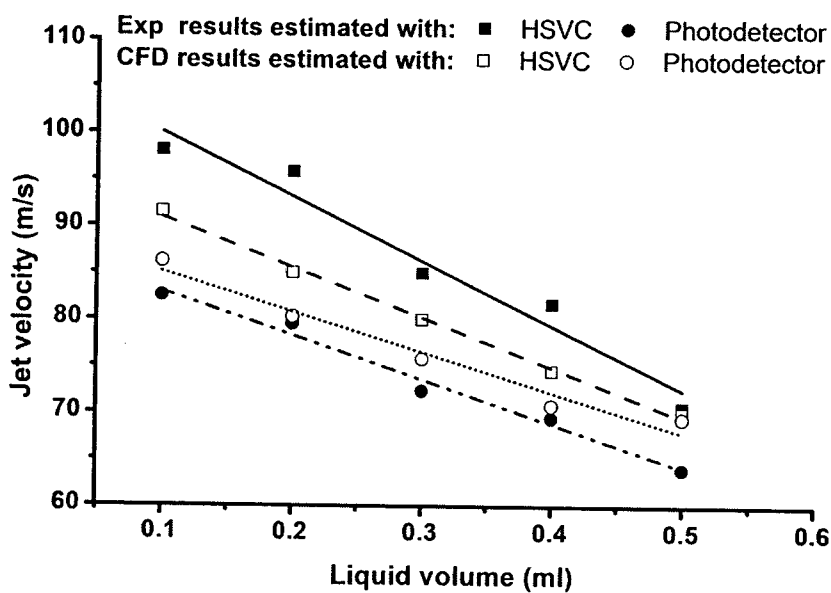
งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม CFD สำเร็จรูป Fluent ในการแก้คำนวณแก้ปัญหา สมการควบคุมเชิงอนุพันธ์หาคำตอบจากระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite volume method) ด้วยการประมาณค่าจากระเบียบวิธีผลต่างอันดับที่หนึ่ง (First order upwind) บนสมการโมเมนตัม สมการพลังงาน สมการความปั่นป่วน และสมการส่งถ่ายของของผสม สำหรับค่าความดันใช้ แบบ Body-force weighted ขั้นตอนวิธีคำนวณสำหรับใช้แบบจำลองเชื่อมต่อความเร็วและความดัน (Pressure-velocity coupling) แบบ SIMPLE การคำนวณเป็นแบบขึ้นกับเวลา โดยขนาดช่วงเวลา เท่ากับ 10^{-5} วินาที โดยผลคำนวณได้ในแต่ละช่วงเวลาจะถูกบันทึกลงคอมพิวเตอร์

5.3.3 การยืนยันผลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของอุปกรณ์ Cool. Click ที่กล่าวจะยืนยันความถูกต้องด้วยการนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง โดยจะเทียบตัวแปรที่วัดจากกล้องความเร็วสูง (HSVC) และชุดตรวจจับความเข้มแสง (Photo detector) ซึ่งผลการเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 5.13 ถึง 5.16

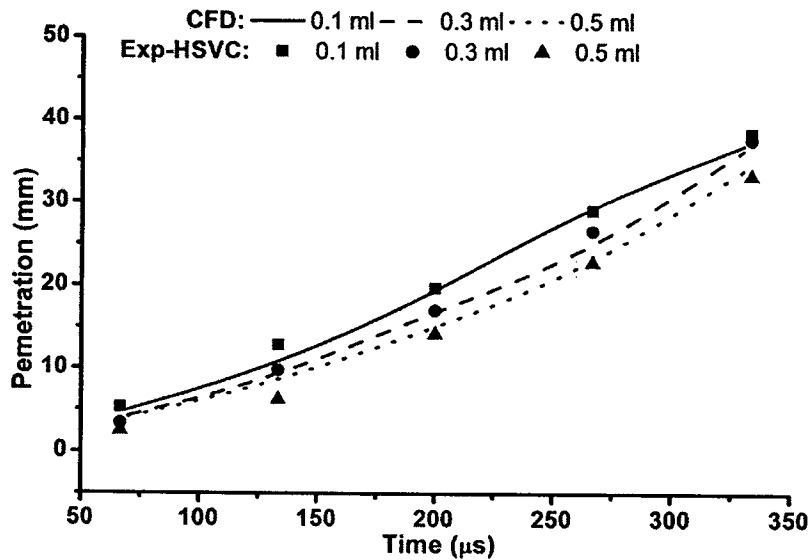
รูปที่ 5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วออกของลำพุ่ง (Exit jet velocity) กับปริมาณของของเหลวในหัวฉีด ที่วัดได้จากภาพถ่ายของ HSVC และชุดตรวจจับความเข้มแสง พบว่าเมื่อปริมาณปริมาณของเหลวเพิ่มขึ้นความเร็วออกของลำพุ่งจะลดลง ซึ่งค่าที่วัดด้วยกล้องจะมีค่าสูงกว่า วัดด้วยชุดตรวจจับความเข้มแสง เนื่องจากกำหนดค่าคงที่ในการหาความเร็วไม่เหมือนกัน การวัดด้วยชุดตรวจจับความเข้มแสงอ้างอิงที่ระยะคงที่เท่ากับ 12.5 mm ขณะที่ การวัดจากภาพถ่ายอ้างอิงที่ช่วงเวลาต่างคงที่เท่ากับ 66.667 μs ด้วยเหตุผลเดียวกัน ผล CFD ที่วัดด้วยการอ้างอิงระยะจากชุดตรวจจับความเข้มแสง มีค่าน้อยกว่าผล CFD ที่วัดด้วยการอ้างอิงเวลาของกล้อง HSVC

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและผล CFD พบว่ามีแนวโน้มเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตาม หากเปรียบเทียบที่ระยะของพุ่งเดินทางไปได้ไม่ไกลมากนัก (กรณีวัดด้วย HSVC) การทดลองจะมีค่าสูงกว่า CFD แต่ เมื่อระยะลำพุ่งไกลมากขึ้น (กรณีวัดด้วยชุดคักจับความเข้มแสง) การทดลองจะให้ผลต่ำกว่า CFD นั้นหมายความว่า ความคลาดเคลื่อนของผลจากการคำนวณ เกิดขึ้นจากการจำลองปรากฏการณ์การปะทะกันระหว่างลำพุ่งของเหลวและอากาศในห้องทดสอบเป็นแบบอย่างง่ายที่ไม่ได้พิจารณากระบวนการแตกตัวของลำพุ่ง อีกทั้งในแบบจำลองไม่ได้พิจารณาอิทธิพลของแรงต้านของอากาศที่มีต่อลำพุ่งด้วย

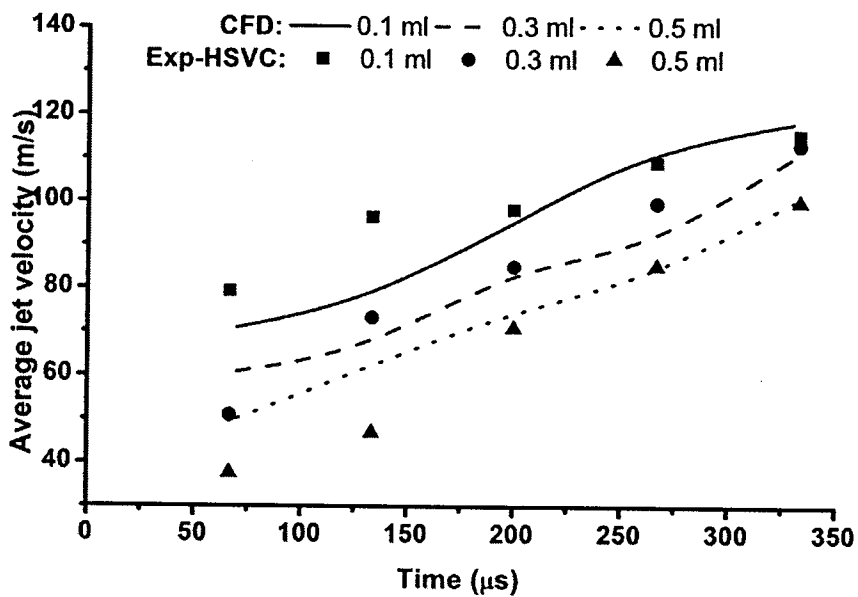


รูปที่ 5.13 ความเร็วลำพุ่งระหว่าง CFD กับ ผลการทดลอง

รูปที่ 5.14 และ 5.15 แสดงระยะแหวกอากาศและความเร็วเฉพาะกาลของลำพุ่ง โดยเปรียบเทียบผลที่ได้จากกล้องความเร็วสูงและ CFD พบว่ามีแนวโน้มใกล้เคียงกัน เมื่อเวลาเดินทางของลำพุ่งมากขึ้น และปริมาณของของเหลวในหัวฉีดน้อยลง ระยะแหวกอากาศและความเร็วเฉพาะกาลของลำพุ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่ง CFD และการทดลองให้ผลที่สอดคล้องกัน เนื่องจาก การที่ปริมาณของน้ำในหัวฉีดน้อย ทำให้ลำพุ่งที่ออกมาจากหัวฉีดจะมีขนาดเร็วแหลมมากกว่าที่มีน้ำมาก ส่งผลต่ออัตราการเปลี่ยนสถานะของลำพุ่งจะน้อยกว่า เมื่อปะทะกับอากาศ ดังจะเห็นได้จากรูปถ่ายจากกล้องความเร็วสูง รูปที่ 5.5



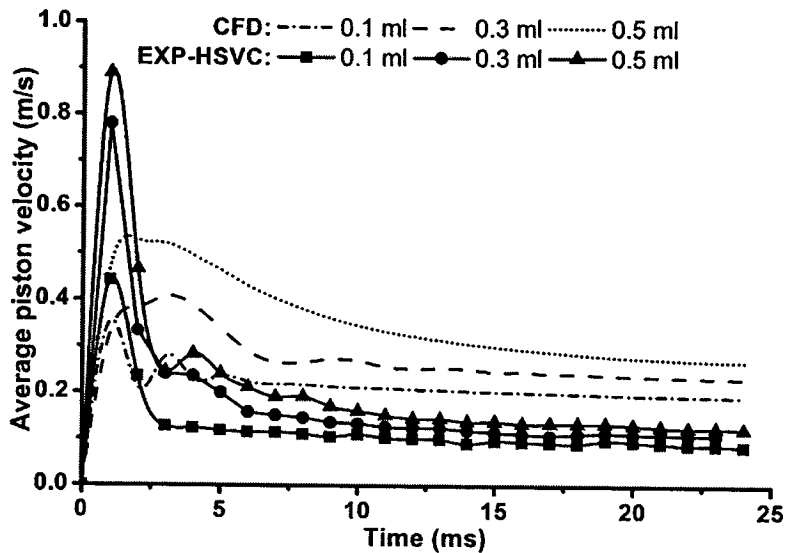
รูปที่ 5.14 ระยะแหวกของลำพู่จาก CFD กับ ผลการทดลอง



รูปที่ 5.15 ความเร็วเฉพาะกาลของลำพู่จาก CFD กับ ผลการทดลอง

รูปที่ 5.16 แสดงการเปรียบเทียบความเร็วเฉพาะการของหัวฉีดที่เคลื่อนที่ระหว่างฉีดลำพู่ที่มีปริมาณน้ำในหัวฉีดต่างๆ พบว่า ผลจาก CFD และการทดลองมีความสอดคล้องกัน ความเร็วของหัวฉีดในช่วง 5 ms แรกจะมีค่าสูงและลดต่ำลง อย่างรวดเร็ว จากนั้นจึงค่อยๆ ลดลงที่ละน้อย อันเป็นผลจากการยุบตัวของน้ำเพราะแรงกดเมื่อเริ่มการฉีด และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณน้ำพบว่า หากน้ำในหัวฉีดมีมากขึ้นความเร็วของหัวฉีด จะมากขึ้นด้วย การที่ในช่วง 5 ms แรก ผล CFD ต่ำ

กว่าแต่หลังจากนั้น กลับมีค่าสูงกว่าการทดลอง บ่งบอกถึงการคำนวณสมบัติการยุบตัวของของไหล ใน CFD ยังมีความคลาดเคลื่อน จากความเป็นจริงอยู่ เนื่องจากยังมีหลายปัจจัยที่ไม่ได้พิจารณาในแบบจำลอง เช่น อุณหภูมิของของไหลที่เกิดจากการอัดตัวและส่งผลต่อการยุบตัวของของเหลว เป็นต้น

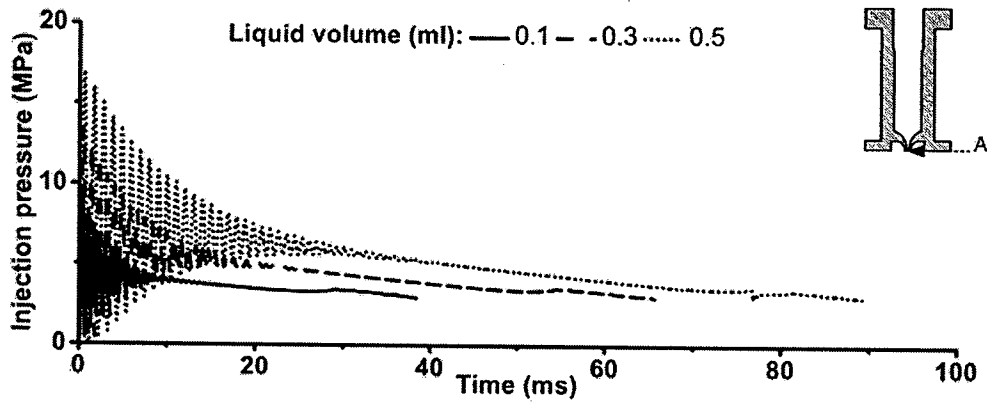


รูปที่ 5.16 ความเร็วเฉพาะกาลของหัวกดจาก CFD และการทดลอง

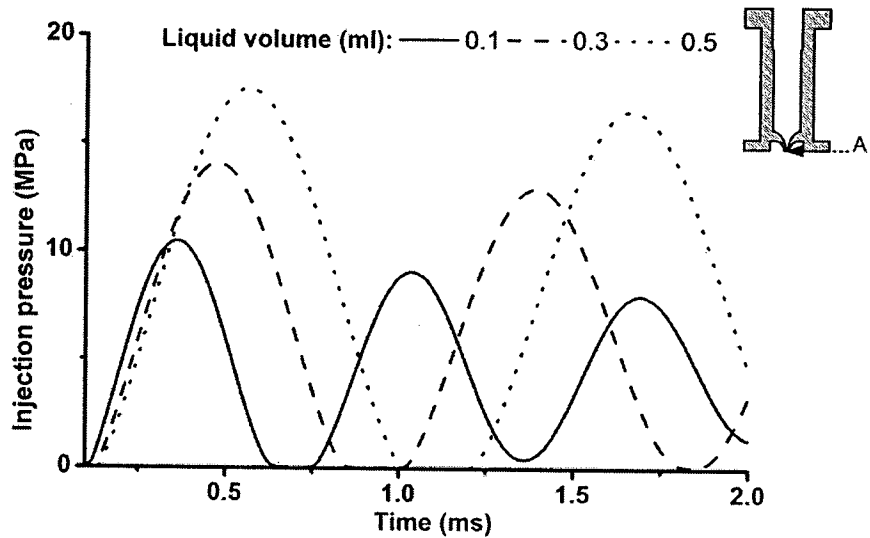
จากการเปรียบเทียบผลระหว่าง CFD กับการทดลอง ดังที่ผ่านมา เป็นการยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง CFD ของ Cool. Click และผลที่ได้จากการคำนวณ ดังนั้นจึงสามารถที่จะนำเอาแบบจำลองนี้มาคำนวณกรณีศึกษาอื่นๆเพิ่มเติมได้ หรือนำผลที่ได้จากการยืนยันแล้ว มาวิเคราะห์และอภิปราย เพื่อให้เกิดความเข้าใจกระบวนการสร้างลำพุ่งสำหรับนำส่งยาเพิ่มมากขึ้น

5.3.4 กระบวนการกำเนิดลำพุ่ง

เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วถึงข้อได้เปรียบของการนำ CFD มาช่วยในการคำนวณปัญหาการไหล คือ ให้ผลบางอย่างที่ไม่สามารถทำได้ หรือทำได้ยากในการทดลอง สำหรับปัญหาการกำเนิดลำพุ่งความเร็วสูงจากอุปกรณ์ Cool. Click ก็เช่นเดียวกัน ซึ่งในหัวข้อนี้จะนำเสนอและอภิปรายกระบวนการสร้างลำพุ่ง จากผลการคำนวณปรากฏการณ์ด้วย CFD โดยจะอ้างอิง ค่าความดันฉีด (Local injection pressure) ที่ปากทางออกหัวฉีด ค่าความเร็วเฉพาะที่ (Local velocity) ณ จุดห่างจากปากหัวฉีด 1 mm และรูปแบบความดันและเวกเตอร์การไหลในหัวฉีด



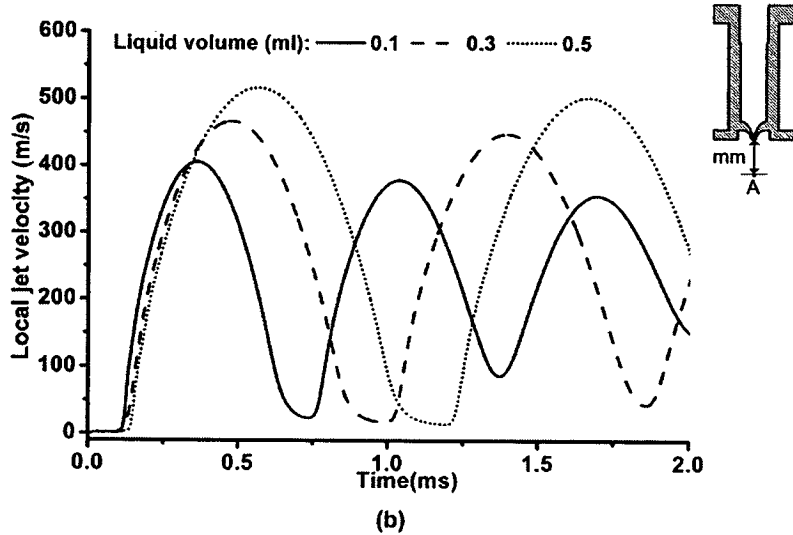
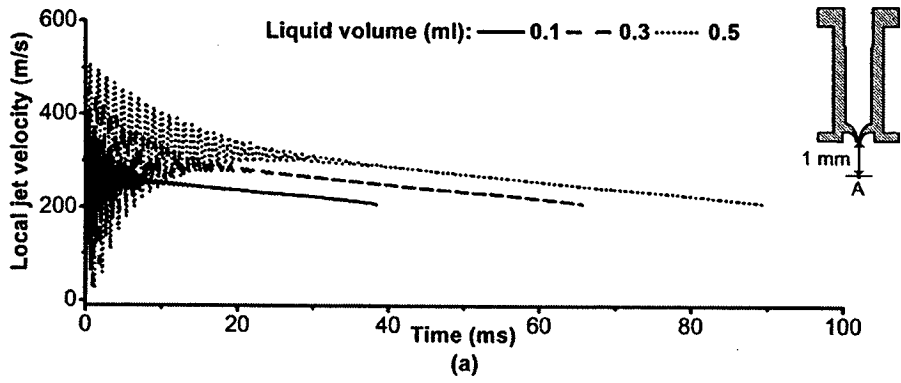
(a)



(b)

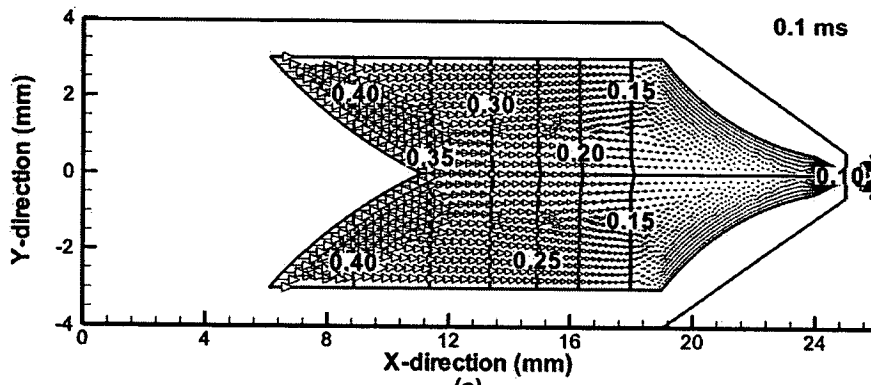
รูปที่ 5.17 ความดันฉีดที่ปากทางออกหัวฉีด (a) แบบเต็มกระบวนกร (b) ช่วงเวลา 2 ms

รูปที่ 5.17 และ 5.18 แสดงค่าความดันฉีดและความเร็วเฉพาะที่ ณ ตำแหน่ง A ที่เวลา และ ปริมาณฉีดของของเหลวต่างๆ พบว่าค่า ความดันและความเร็วมีลักษณะแกว่งกลับไปกลับมาในช่วงแรก ก่อนจะนิ่งพร้อมค่อยๆลดลงอย่างต่อเนื่อง ที่ปริมาตรของไหลมากดูเหมือนว่าความเร็วและความดันจะมีสูงกว่า กรณีหัวฉีดบรรจุของเหลวน้อย และต้องใช้เวลาในการฉีดนาน แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาช่วงเริ่มแรกของกระบวนการ (ที่เวลา 0 – 0.25 ms) พบว่า ลำพุ่งมีความดันฉีดและความเร็วสูงกว่ากรณีอื่น ก่อนจะลดต่ำลงเมื่อเวลาผ่านไป ด้วยเหตุนี้ ความเร็วออก (Exit velocity) ของลำพุ่งกรณีปริมาตรของเหลวน้อยจึงมีค่าสูง

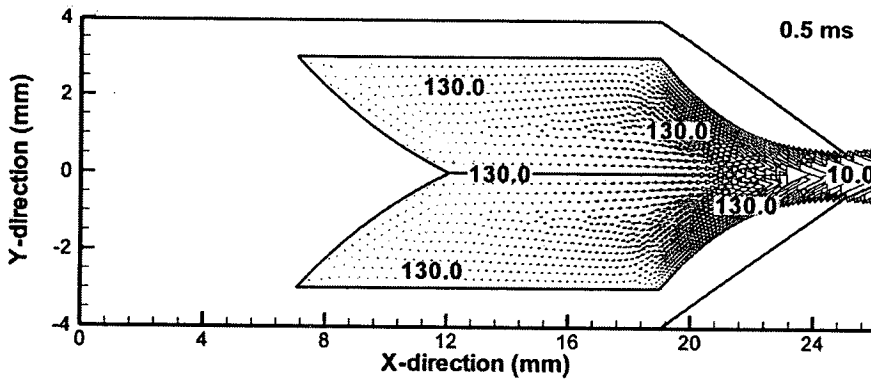


รูปที่ 5.18 ความเร็วที่จุดห่างปากทางออกหัวฉีด 1 mm (a) แบบเต็มกระบวนการ (b) ช่วงเวลา 2 ms

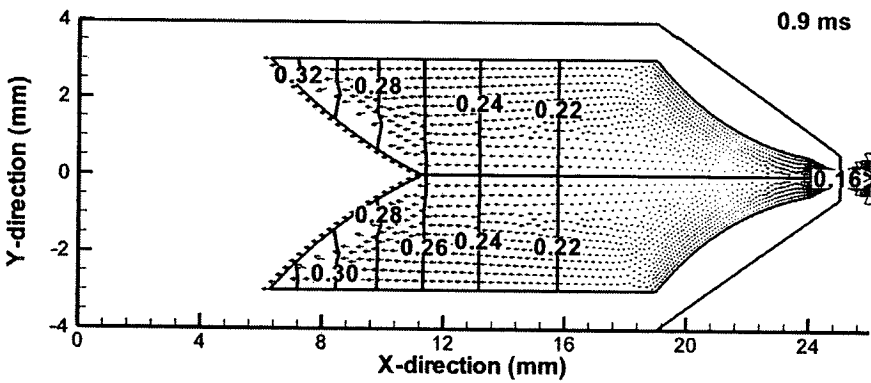
มีข้อสังเกตว่า ความเร็วเฉพาะที่ และความดันฉีดสูงสุดจะเกิดขึ้นกับกรณีบรรจุน้ำ 0.5 ml (มีค่าสูงถึง 515 m/s และ 17 MPa ตามลำดับ) แต่ในทางกลับกัน ความเร็วออก (Exit velocity) (มีค่าประมาณ 70 m/s) และ ความเร็วเฉพาะกาลของลำพุ่ง กลับมีค่าต่ำที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 5.13 นั้นหมายความว่า ปริมาตรของเหลวฉีดยังมีมาก ยิ่งทำให้ความเร็วของอนุภาคของเหลวที่หลุดออกเริ่มแรก (Exit jet) มีค่าต่ำ แต่อนุภาคที่ไหลผ่านหัวฉีดตามออกมา จะมีความเร็วสูงแน่นอนว่าพฤติกรรมนี้ มีผลกับประสิทธิภาพการนำส่งยา เนื่องจากความเร็วออกเป็นความเร็วกระแทกและเจาะผิวหนังซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพการเจาะและแหวกเนื้อเยื่อเพื่อนำส่งยา ขณะที่ความเร็วของอนุภาคที่ตามออกมา มีผลต่อการแพร่กระจายของเนื้อยา ในเนื้อเยื่อ ดังนั้น หากมีการศึกษาเพิ่มเติม จะช่วยให้สามารถพัฒนาอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพการนำส่งยาเพิ่มขึ้นได้ในอนาคต



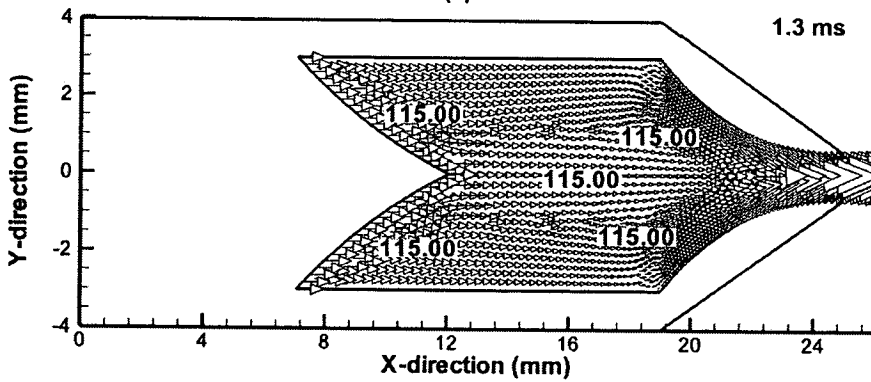
(a)



(b)



(c)



(d)

รูปที่ 5.19 ระดับความดันและเวกเตอร์ของการไหลระหว่างการกำเนิดลำพุ่ง (MPa) ที่ (a) 0.1 ms (b)

0.5 ms (c) 0.9 ms และ (d) 1.3 ms

จากรูปที่ 5.17 และ 5.18 พบการแกว่งของค่าความดันฉีดและความเร็วเฉพาะที่ ซึ่งพฤติกรรมนี้มีสาเหตุมาจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคหรือคลื่นช็อคในหัวฉีดระหว่างการฉีดลำพุ่ง ดังนั้น เพื่อให้ความเข้าใจมากขึ้น รูปที่ 5.19 จึงแสดงรูปแบบการกระจายความดันและเวกเตอร์การไหลของอนุภาค ที่เวลาต่างๆภายในหัวฉีดที่บรรจุน้ำปริมาตร 0.3 ml จากรูปจะพบการกระจายความดันและทิศทางของอนุภาค ช่วงเริ่มการฉีดที่ 0.1 ms รูป 5.19 (a) ความดันด้านบริเวณใกล้หัวฉีด (มีค่าประมาณ 0.4 MPa) จะมีค่าสูงกว่าบริเวณคอขวด (มีค่าประมาณ 0.15 MPa) และอนุภาคจะเคลื่อนที่พร้อมหัวฉีดในทิศที่จะไปทางออกของหัวฉีด สาเหตุที่อนุภาคของเหลวเคลื่อนที่เกิดจากการยุบตัวของของเหลวในช่วงเริ่มฉีด ช่วงเวลานี้ความดันที่ใกล้ทางออกหัวฉีดจะสูงขึ้นเรื่อยๆ จากการสะสมของอนุภาค จนถึงช่วงเวลา 0.5 ms (รูปที่ 5.19 (b)) ความดันเพิ่มขึ้นสูงสุดมีค่าประมาณ 130 MPa และกระจายทั่วบริเวณ อนุภาคจะมีการเคลื่อนที่น้อยลง หลังจากนั้นอนุภาคเริ่มเคลื่อนที่กลับพร้อมหัวฉีด ความดันในหัวฉีดเริ่มลดลงเนื่องจากอนุภาคบางส่วนถูกปล่อยออกจากหัวฉีด (ดังแสดงในรูปที่ 5.19 (c) ช่วงเวลา 0.9 ms) เพื่อสะสมอนุภาคและสร้างแรงดันใหม่ให้สูงดังรูปที่ 5.19 (d)

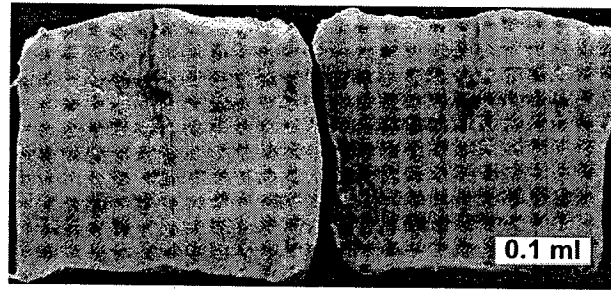
5.4 การกระจายของลำพุ่งในเนื้อหมู

การศึกษาพฤติกรรมการไหลและกำเนิดลำพุ่งของ อุปกรณ์ Cool.Click ที่ผ่านมา เป็นการทำความเข้าใจถึงการไหลที่เกิดขึ้น ระหว่างการฉีดและเป็นพฤติกรรมของการฉีดลำพุ่งในอากาศเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นเพื่อทำความเข้าใจคุณลักษณะการกระจายตัวของของเหลวในเนื้อเยื่อหลังการฉีด งานวิจัยนี้จึงได้ทำการฉีดของเหลวในเนื้อหมูที่ควบคุมตัวแปรที่ไม่เกี่ยวข้องให้ได้มากที่สุด

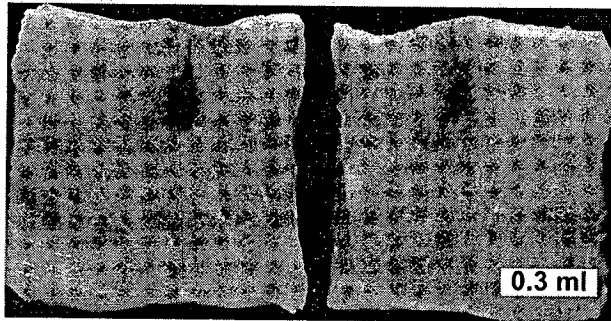
เนื้อหมูที่ใช้เป็นส่วนสันนอกของหมูตัวเดียวกันชำแหละมาแล้ว และแช่แข็งมา 10 ชั่วโมง ตัดเป็นชิ้นหนา 5 mm สูง 100 mm กว้าง 100 mm วางในกล่องยัดก้อนฉีดด้วยน้ำผสมสีผสมอาหารสีแดง อัตราส่วน 50 mg ต่อ น้ำ 500 ml หลังการฉีดทิ้งไว้ 30 นาทีก่อนผ่าเนื้อดูลักษณะการกระจายของน้ำในเนื้อ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.20 โดยแสดงลักษณะการกระจายของของเหลวในเนื้อหมูหลังการฉีดด้วยน้ำปริมาตรต่างๆ สิ่งที่พบ คือ ที่ปริมาตร 0.5 ml ของเหลวสามารถแพร่กระจายได้ลึกและกว้างที่สุด แต่มีข้อสังเกตว่า ความลึกของ 0.1 และ 0.3 ml ไม่ต่างกันมาก และดูเหมือนว่ากรณี 0.3 ml การแพร่กระจายของน้ำไม่ดีเท่ากรณี 0.1 และ 0.5 ml เพราะสังเกตเห็นก้อนมวลของเหลวที่ปลายรูเจาะของลำพุ่งอยู่

ปรากฏการณ์ การกระจายของของเหลวหลังการฉีด สามารถอธิบายจากการศึกษาที่ผ่านมา ได้ดังนี้ ความลึกของการเจาะและการกระจายจะขึ้นอยู่กับความเร็วออกและความเร็วตามของอนุภาคลำพุ่งที่ออกจากหัวฉีด สังเกตได้จาก ความลึกของการแพร่กรณี 0.1 ml ใกล้เคียงกับ 0.3 ml แต่สั้นกว่า 0.5 ml มาก (จากการศึกษาที่ผ่านมา กรณี 0.1 ml มีความเร็วออกสูงที่สุด) บ่งชี้ว่า ที่ 0.3 ml มีโมเมนตัมออกน้อย และโมเมนตัมของอนุภาคตามมาก็มีไม่เพียงพอ (แม้จะสูงกว่ากรณี 0.1 ml

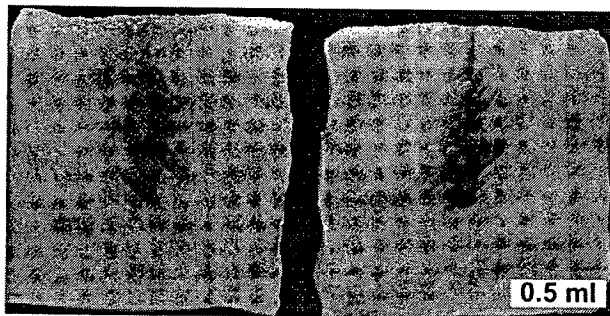
จากความเร็วเฉพาะที่ รูปที่ 5.18) ที่จะขับให้อนุภาคแทรกซึมผ่านเนื้อหมูได้ ทำให้เกิดก้อนของเหลวข้างตัวในเนื้อหมู ซึ่งแตกต่างจากกรณี 0.1 ml ที่ลักษณะของการแพร่จะไปในทิศทางแนวลึก มีการกระจายด้านข้างน้อย เนื่องจากความเร็วออกสูง (โมเมนต์ของอนุภาคออกสูง) แต่ความเร็วของอนุภาคของเหลวตามไม่สูงนั่นเอง สำหรับกรณี 0.5 ml นั้นแม้ ความเร็วออกจะไม่สูงเท่ากับกรณี 0.1 ml แต่กำลังของลำพุ่งหรือโมเมนต์ตามของอนุภาคของเหลวจากการฉีด มีสูงที่สุด ของเหลวที่กระจายในเนื้อหมูจึงมีลักษณะ แพร่ลงในแนวลึกและออกด้านข้างด้วยดังรูปที่ 5.20 (c)



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 5.20 การกระจายของลำพุ่งในเนื้อหมู