

# คุณลักษณะของการส่งถ่ายยาแบบไร้เข็มโดยใช้วิธีการกระแทก

## Characteristics of a needle free drug delivery by using impact driven method

ปริญญ มุกดา<sup>1</sup>

Prachya Mukda<sup>1</sup>

Received: 13 April 2023 ; Revised: 14 July 2023 ; Accepted: 10 August 2023

### บทคัดย่อ

ในปัจจุบันการส่งถ่ายยาด้วยอุปกรณ์ฉีดจะเป็นกระบวนการกดด้วยแรงจากกระบอกฉีดผ่านเข็มฉีดเข้าสู่ชั้นใต้ผิวหนัง ซึ่งยังมีข้อเสียคือประสิทธิภาพในการออกฤทธิ์ของยาและสิ้นเปลืองเวลาในการฉีด ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้อุปกรณ์ฉีดด้วยหลักการใหม่ ที่เรียกว่า การฉีดด้วยลำพุ่งความเร็วสูงด้วยหลักการการกระแทก โดยจะส่งถ่ายยาด้วยลำพุ่งความเร็วสูงเจาะทะลุผ่านผิวหนังปราศจากการใช้เข็ม เงื่อนไขของงานวิจัยนี้คือ ใช้ปริมาตรของเหลวในหัวฉีด 2 ml เพื่อเปรียบเทียบคุณลักษณะของลำพุ่งด้วยหลักการกดด้วยแรง (ระยะ 0 mm) และหลักการการกระแทก (ระยะกระแทก 5, 7, 9, 11, 13, 15 และ 17 mm) อาทิ แรงกระแทกของต้นกำลัง ความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่ง ความดันกระแทกของลำพุ่ง กำลังการกระแทก และพฤติกรรมของลำพุ่ง ซึ่งตรวจสอบด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูง ผลการวิจัยปรากฏว่า เมื่อระยะกระแทกเพิ่มขึ้นจะทำให้แรงกระแทกของต้นกำลังเพิ่มขึ้น โดยระยะกระแทกที่ 17 mm ให้ค่าแรงกระแทกของสุด 475 N หลังจากนั้น เปรียบเทียบความเร็วเฉลี่ยและความดันกระแทกของลำพุ่ง ซึ่งระยะกระแทกที่ 11 mm ค่าความเร็วเฉลี่ยและความดันกระแทกของลำพุ่งสูงสุดที่ 62 m/s และ 2.28 MPa ตามลำดับ หลังจากนั้น ค่าระยะกระแทก 13, 15 และ 17 mm จะมีค่าลดลง ค่าความดันกระแทกของลำพุ่งกรณีด้วยหลักการกดด้วยแรง (ระยะ 0 mm) จะให้ค่าระดับความกระแทกของลำพุ่งต่ำกว่าระดับมาตรฐานที่จะสามารถเจาะผ่านผิวหนังได้ เมื่อเทียบกับระยะกระแทกเป็น 5,7,9,11,13, 15 และ 17 mm จะให้ค่าความดันกระแทกของลำพุ่งที่สูงพอที่จะสามารถเจาะผ่านผิวหนังได้

**คำสำคัญ:** อุปกรณ์ฉีด, การส่งถ่ายยา, ลำพุ่งความเร็วสูง, หลักการการกระแทก

### Abstract

At present, animal drug delivery using an injection device is a process involving a pressing force from a syringe directed through a syringe needle into the subcutaneous layer. However, there are disadvantages for drug action efficiency and time consuming injection. Therefore, this research aims to study the feasibility of application of the animal injection device using a new concept involving a high speed liquid jet with impact driven method. It delivered a high speed liquid jet penetrating through the skin without the use of a needle. The volume of liquid in the nozzle was 2 ml in experiments to compare the characteristics using the driving object method (distance 0 mm) and impact driven method (impact distances are 5, 7, 9, 11, 13, 15 and 17 mm). The characteristics such as, impact force of power source, average jet velocity, impact pressure of the jet, jet power and the behavior of jet were examined using a high-speed video camera. The results showed that, the impact distance increased, the impact force value of the power source increased, which an impact distance of 17 mm gave a maximum impact force of 475 N. The average velocity and the impact pressure of the jet are compared. An impact distance of 11 mm gave the maximum value of the average velocity and the impact pressure of jet to be 62 m/s and 2.28 MPa, respectively. Subsequently, the values of the impact distance were

<sup>1</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี 76000

<sup>1</sup> Assistant Professor, Division of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Phetchaburi Rajabhat University 76000

\* Corresponding author: E-mail: prachya.muk@mail.pbru.ac.th

reduced to 13, 15 and 17 mm. The impact jet pressure value of the driving object method (distance 0 mm), and the level of impact jet pressure values was lower than the standard value such that it could not penetrate through the skin. Impact distances of 5, 7, 9, 11, 13, 15 and 17 mm provided a high enough impact jet pressure to penetrate the skin.

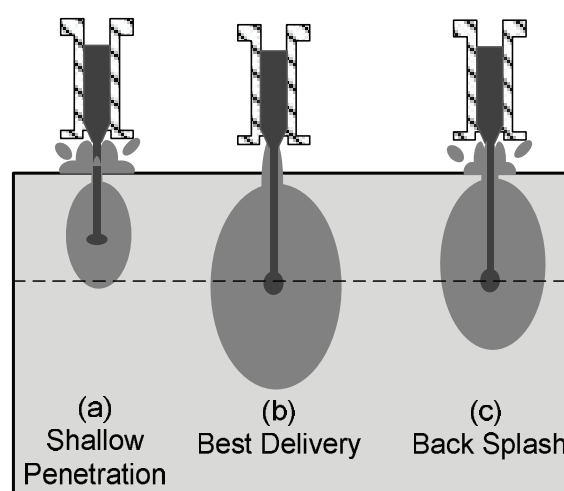
**Keywords:** Animal injection device, drug delivery, high speed liquid jet, impact driven method

## บทนำ

หลายทศวรรษที่ผ่านมา การให้ยาในทางปศุสัตว์จะเป็นการให้ยาด้วยการฉีดผ่านเข็ม ซึ่งเป็นวิธีการที่แพร่หลายและใช้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากเป็นวิธีที่บริหารจัดการได้ง่าย และทำให้ตัวยาออกฤทธิ์ได้ดีกว่าวิธีอื่น เช่นการพ่นยาในโรงเลี้ยงสัตว์ หรือการให้ยากินกับสัตว์ แต่การให้ยาด้วยเข็มฉีดดยาก็ยังมีข้อด้อย ปัญหาและอุปสรรคต่อการบริหารจัดการอยู่หลายประการ อาทิ เกิดการติดเข็มระหว่างผู้ฉีดยากับสัตว์ ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการเปลี่ยนเข็มโดยใช้เพียงครั้งเดียว ซึ่งจะเป็นการสิ้นเปลืองในการฉีดยาให้กับสัตว์ อีกทั้ง หากเรานำเข็มฉีดยาไปใช้กับสัตว์ใหญ่ บางกรณีมีการต่อต้านทำให้เข็มหักและเกิดอาการบาดเจ็บของสัตว์ ซึ่งผู้ฉีดยาจะต้องมีความเชี่ยวชาญหรือได้รับการอบรมมาอย่างดี ซึ่งต้องใช้บุคลากรทางสัตวแพทย์ จึงเป็นการสิ้นเปลืองโดยใช้เหตุ และที่สำคัญคือความสิ้นเปลืองเวลาของการให้ยา โดยเฉพาะการฉีดยาให้กับสัตว์ในเชิงพาณิชย์ที่มีจำนวนมาก ดังนั้นการให้ยาสัตว์โดยวิธีฉีดดยาผ่านเข็มจึงไม่เป็นคำตอบที่ดีที่สุด (วิระพันธ์ สีหามาน, 2557)

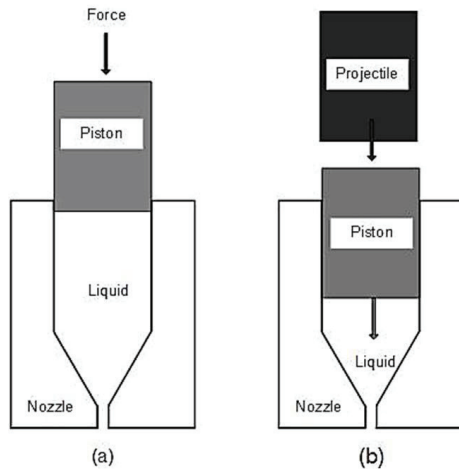
จากปัญหาดังกล่าว ปัจจุบันจึงพยายามคิดค้นวิธีการส่งถ่ายยาสู่สัตว์ด้วยวิธีใหม่ด้วยการส่งถ่ายยาโดยไม่ใช้เข็ม (needle-free drug delivery) โดยใช้หลักการด้วยวิธีสร้างลำพุ่งความเร็วสูงเจาะเข้าสู่ชั้นใต้ผิวหนัง ซึ่งปัจจุบันก็ยังมีการผลิตอุปกรณ์ส่งถ่ายยาโดยไม่ใช้เข็มในเชิงพาณิชย์ โดยหลักการการทำงานของอุปกรณ์นี้จะเป็นการสร้างลำพุ่งด้วยวิธีการใช้กำลังอาทิ สปริง แก๊ส หรือไฟฟ้า ขับแท่งกดด้วยแรงอัดของเหลวในหัวฉีดผ่านรูขนาดเล็ก แล้วปลดปล่อยออกมาเป็นลำพุ่งความเร็วสูง เพื่อเจาะผ่านผิวหนัง โดยทั่วไประดับกำลังของลำพุ่งของอุปกรณ์ฉีดยาที่มีขายในท้องตลาดทั่วไปที่สามารถจะเข้าสู่เนื้อของสุกร (ปราศจากหนัง) ได้จะมีแรงดันกระแทกของลำพุ่งอยู่ที่ 1.88 MPa โดยจะสามารถแบ่งระยะการส่งถ่ายยาได้เป็น 3 ระยะคือ ระยะการเจาะ ระยะฉีด และระยะแพร่กระจายของยา โดยเฉพาะอย่างยิ่งช่วงเวลาของระยะแรก คือระยะการเจาะจะเป็นเวลาที่ความเร็วของลำพุ่งเริ่มจากศูนย์และมีอัตราเร่งจนกระทั่งถึงระยะฉีด ซึ่งระยะนี้ เริ่มต้นลำพุ่งจะไม่สามารถเจาะผ่านผิวหนังได้ เนื่องจากแรงกระแทกหรือความเร็วของลำพุ่งไม่เพียงพอ จึงทำให้เกิดการสาดกลับของตัวยาหรือมีบางส่วนที่ไม่สามารถเจาะผ่านผิวหนังได้

ทำให้ประสิทธิภาพในการส่งถ่ายยาลดลงมากกว่า 40% ดังแสดงใน Figure 1 จากข้อเสียดังกล่าวจะเป็นเหตุผลโดยตรงที่ทำให้เกิดอาการบาดเจ็บจากการส่งถ่ายยาด้วยอุปกรณ์ฉีดที่มีขายในท้องตลาดในปัจจุบัน (Baxter et al., 2004)



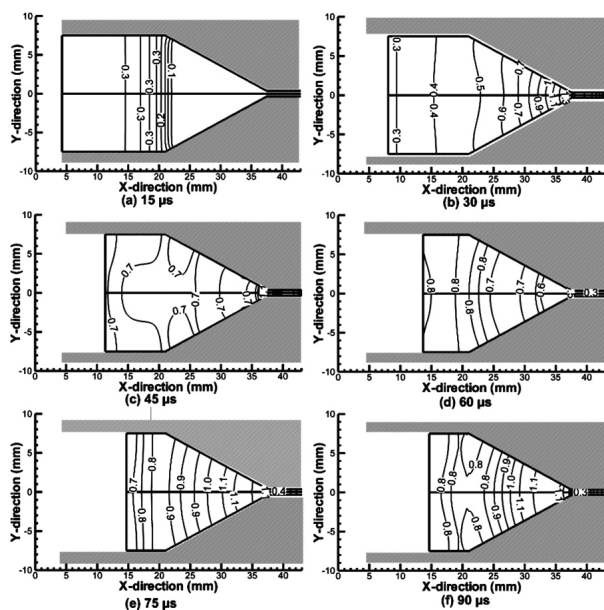
**Figure 1** Drug delivery to the skin as a function of impact peak pressure (Baxter & Mitragotria, 2004)

ตามที่กล่าวมาข้างต้น หลักการขับลำพุ่งที่ว่านี้ เป็นกระบวนการขับด้วยแรง (driving object method: DOM) แสดงใน Figure 2 (a) ต่อมา ได้มีนักวิจัยได้ศึกษากระบวนการผลิตลำพุ่งและประยุกต์เป็นอุปกรณ์ส่งถ่ายยาด้วยลำพุ่ง ที่ให้กำลังและความเร็วของลำพุ่งสูงกว่าแบบเดิมที่เรียกว่ากระบวนการผลิตลำพุ่งด้วยการกระแทก (impact driven method: IDM) แสดงใน Fig 2 (b) โดยใช้หลักการการส่งถ่ายโมเมนตัมด้วยการยิงตัวกระแทก (projectile) ไปกระแทกแท่งกด (piston) ไปอัดของเหลวผ่านรูเล็กเป็นลำพุ่งความเร็วสูง ซึ่งลำพุ่งที่เกิดจากกระบวนการนี้มีข้อสันนิษฐานว่าจะสามารถเจาะผิวหนังได้อย่างรวดเร็ว ประสิทธิภาพการส่งถ่ายยาสูงกว่าแบบเดิม (Shi, 1994; Shi & Takayama, 1995; Shi et al., 1996)



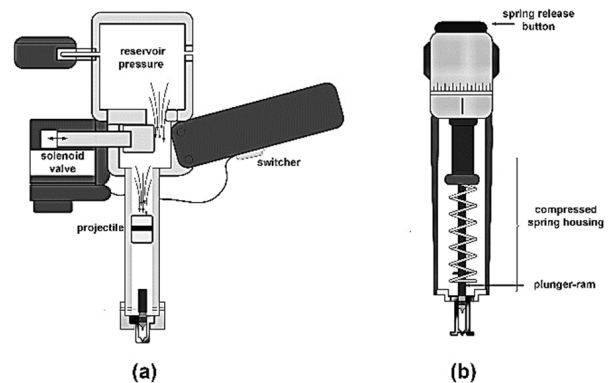
**Figure 2** Jet generation method by (a) Driving Object Method (DOM) and (b) Impact Driven Method (IDM) (Shi, 1994; Shi & Takayama, 1995; Shi *et al.*, 1996)

จากการศึกษาด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (computational fluid dynamics: CFD) เพื่อศึกษาและอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในหัวฉีดจากหลักการกระแทก พบว่ารูปแบบการไหลและค่าความดันของของเหลวในหัวฉีดทรงกรวย แสดงใน Figure 3 พบว่าในช่วงเวลาแรก (Figure 3 (a)) คลื่นช็อค ไหลเข้าทางออกหัวฉีด ทำให้ความดันสะสมของลำพุ่งแรกมีค่าสูงที่สุด ซึ่งหลังจากนั้นความดันในหัวฉีดจะลดลงเนื่องจากการปล่อยไหลออก และเกิดความดันสะสมอีกในลูกที่สองแล้วปลดปล่อยออก ทำให้ลำพุ่งที่ปลดปล่อยออกมา มีลักษณะเป็นหัวลำพุ่งที่ติดต่อกัน ซึ่งจำนวนของหัวลำพุ่งจะขึ้นกับค่าของโมเมนตัมที่สูงขึ้น (แสดงใน Figure 3 (c)) (Seehanam *et al.*, 2012)



**Figure 3** Pressure contours (GPa) inside a conical nozzle caused by IDM (Seehanam *et al.*, 2012)

นักวิจัยได้นำหลักการการกระแทก (IDM) มาสร้างอุปกรณ์ฉีดลำพุ่งที่เรียกว่า (IDM jet injector) ด้วยการใช้อากาศแรงดันสูงขับแท่งกระแทก ไปชนหรือส่งถ่ายโมเมนตัมให้กับแท่งกวดอัดของไหลผ่านหัวฉีด ซึ่งได้มีการเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ฉีดแบบ (DOM: Cool.click) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ฉีดที่มีขายตามท้องตลาด โดยใช้สปริงเป็นกำลังในการขับ ตาม Figure 4 (Mukda *et al.*, 2017)



**Figure 4** Details of jet injectors: (a) IDM Jet Injector and (b) DOM Cool.Click (Mukda *et al.*, 2017)

ซึ่งจากผลการเปรียบเทียบผลของการเจาะ แสดงให้เห็นว่า IDM Jet Injector สามารถเจาะผ่านเนื้อเยื่อจำลองได้อย่างรวดเร็วและฉีดเข้าสู่เนื้อเยื่อจนหมด แตกต่างจาก DOM Cool.Click ซึ่งไม่สามารถเจาะผ่านเนื้อเยื่อจำลองในระยะแรก มีการสาดตัวยากกลับมากกว่า 2 เท่า (Akihito *et al.*, 2019) แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการ IDM จำเป็นจะต้องมีการถูกพัฒนา โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ต้นกำลังในการขับ ซึ่ง IDM Jet Injector ที่กล่าวมาข้างต้นนั้น มีข้อด้อยในเรื่องของลมซึ่งเป็นต้นกำลังนั้น ควบคุมการปลดปล่อยได้ยาก ทำให้การฉีดไม่มีความสม่ำเสมอ และต่อเนื่อง มากกว่านั้นการควบคุมกำลังให้เหมาะสมกับผิวหนังค่อนข้างลำบาก

ตามที่กล่าวมา การสร้างความเร็วของลำพุ่งที่สูงและความสามารถในการควบคุมกำลังของลำพุ่งจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ส่งผลกับประสิทธิภาพของการส่งถ่ายยาที่สูงขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงเป็นการนำหลักการการกระแทกมาประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ฉีดยาตัว ซึ่งเป็นอุปกรณ์ฉีดที่มีขายตามท้องตลาด (animal injection device) แบบใช้เข็ม หัวฉีดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2 mm แท่งกวดภายในกระบอกมีขนาด 100 mm และลูกสูบขนาด 20 mm ในการนำมาทดลองจะไม่ใช้เข็มแล้วนำมาประกอบเข้ากับตัวโซลินอยด์ (solenoid) ขนาด 220 V เป็นต้นกำลัง ดังแสดงใน Figure 5 เพื่อตรวจสอบความเร็วเฉลี่ย ความดันกระแทก กำลัง รวมทั้งพฤติกรรมของลำพุ่งที่เกิดขึ้นจากการกวดและหลักการการกระแทก รวมทั้งนำมาวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการนำหลักการดังกล่าวมาใช้ในการส่งถ่ายยาให้กับสัตว์ในเชิงพาณิชย์ต่อไปในอนาคต

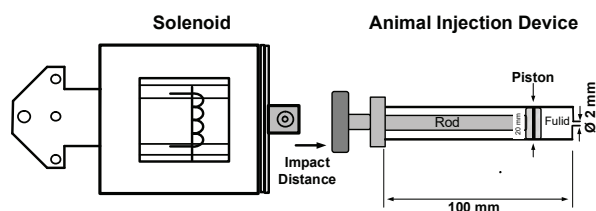


Figure 5 Experimental Diagram

## การทดลอง

### 1. เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง

(1) อุปกรณ์ฉีด (animal injection device) ที่นำมาทดสอบในงานวิจัยนี้ เป็นกระบอกฉีดยาสูตรที่ขายในท้องตลาด ด้วยกระบอกเข็มขนาด 30 ml หัวฉีดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2 mm แท่งกดยาวในกระบอกมีขนาดความยาว 100 mm และลูกสูบความยาว 20 mm

(2) ต้นกำเนิด (solenoid) โดยใช้แม่เหล็กไฟฟ้าเป็นต้นกำเนิดในการขับ ซึ่งเป็นคือโซลินอยด์ที่นำมาดัดแปลงเป็นต้นกำเนิดใช้ไฟฟ้า AC ขนาดแรงดัน 220 V กำลังไฟฟ้าขนาด 1,950 W และมีระยะชักของก้านอยู่ที่ 35 mm

(3) เครื่องมือวัดแรงกระแทก (digital force gauge) ใช้เกจวัดแรงแบบดิจิตอลความละเอียด 0.01 N สามารถวัดโหลดสูงสุดได้ 500 N เพื่อใช้ในการวัดแรงกระแทกของลำพุง โดยเครื่องมือนี้สามารถวัดค่าได้ทั้งแรงกระแทกของต้นกำเนิดโซลินอยด์และแรงกระแทกจากลำพุง

(4) เครื่องมือวัดความเร็วและปรากฏการณ์ของลำพุง (high speed VDO camera) ปรับความเร็วในการจับภาพของลำพุงที่ 1,000 f/s (หรือ 1 ภาพจะเท่ากับเวลา 1ms) ปรับความถี่ของไฟสปอร์ไลท์ที่ 920 Hz และความละเอียดของภาพที่ใช้คือ 2,048 x 1,080 Pixel

### 2. การวัดค่าและการเก็บผลการทดลอง

การทดสอบจะมีทั้งหมด 3 ขั้นตอนคือ (1) การทดสอบแรงกระแทกของต้นกำเนิด (impact force) (2) การทดสอบความดันกระแทกของลำพุง (impact jet pressure) (3) การวัดความเร็วเฉลี่ยของลำพุง (average jet velocity) และการตรวจสอบพฤติกรรมของลำพุง โดยมีรายละเอียดดังนี้

(1) การทดสอบแรงกระแทกของต้นกำเนิด โดยใช้โซลินอยด์ไปกระแทกเครื่องมือวัดแรงกระแทกเพื่อเปรียบเทียบแรงกระแทกกับระยะที่แตกต่างกันคือ 5, 7, 9, 11, 13, 15 และ 17 mm โดยแรงกระแทกจะแสดงที่หน้าจอดิจิตอลของตัววัดแรงกระแทกที่แสดงในหน่วยนิวตัน (N) ดังแสดงใน Figure 6

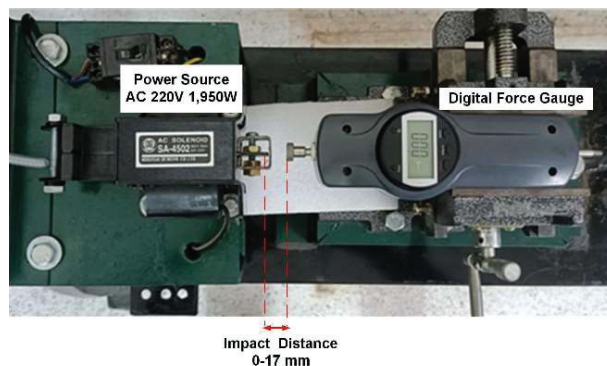


Figure 6 Detail of Impact force testing

(2) การทดสอบความดันกระแทกของลำพุง จะเป็นการปริมาตรของน้ำในกระบอกฉีด 2 ml อุณหภูมิที่ 25 C° ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูหัวฉีด 2 mm เพื่อเปรียบเทียบกระแทกของลำพุง ที่ระยะกระแทกของตัวของต้นกำเนิดกับแท่งกดยาว 0, 5, 7, 9, 11, 15 และ 17 mm โดยเว้นระยะห่างระหว่างปลายหัวฉีดกับตัววัดแรงกระแทกที่ 1 mm (เนื่องจากเป็นระยะที่ใกล้ที่สุด ที่จะไม่ได้รับผลจากการกระแทกของปลายหัวฉีดกับเครื่องมือวัดแรงกระแทก) ดังแสดงใน Figure 7 ซึ่งสามารถคำนวณความดันกระแทกของลำพุง (P) หน่วยเป็น MPa ได้จากสมการที่ 1

$$P = \frac{4F}{\pi D_o^2} \quad (1)$$

เมื่อ F คือแรงกระแทกของลำพุง (N) และ D<sub>o</sub> คือเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายหัวฉีด มีค่า 2 mm

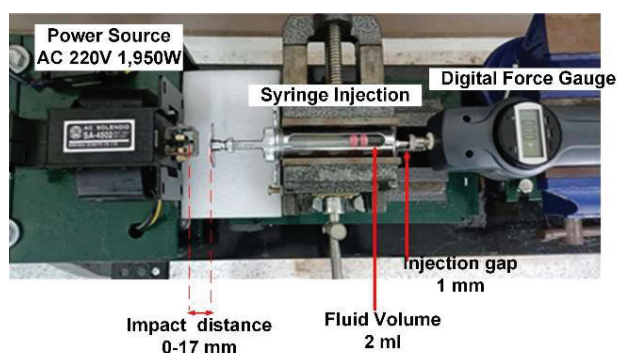


Figure 7 Detail of impact pressure of jet testing

(3) การวัดความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่ง และการตรวจสอบพฤติกรรมของลำพุ่ง ด้วยการกำหนดระยะทางของการเคลื่อนที่ของลำพุ่ง 50 cm กับกำหนดเวลาจากภาพถ่ายด้วยความเร็วของกล้อง 1,000 f/s ซึ่งจะเป็นการตรวจสอบพฤติกรรมของลำพุ่งไปพร้อมกัน ผ่านโปรแกรม pco camware ดังแสดงใน Figure 8 หลังจากนั้นนำมาคำนวณเป็นความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่ง ตามสมการที่ (2)

$$v_j = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (2)$$

เมื่อ  $V_j$  คือความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่ง  $\Delta x$  คือระยะทางระหว่างปลายของหัวฉีดถึงตำแหน่งสุดท้าย และ  $\Delta t$  คือเวลาลำพุ่งถูกแรกเดินทาง (โดยจะวัดเวลาของลำพุ่งถูกแรกในเวลาเดียวกันคือที่ 7 ms) หลังจากนั้นนำความเร็วเฉลี่ยที่ได้นำมาคำนวณเป็นกำลังของลำพุ่งได้จากสมการที่ (3)

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

เมื่อ  $P_o$  คือกำลังของลำพุ่ง (W),  $D_o$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายหัวฉีด  $V_j$  คือความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่ง (m/s) ซึ่งได้จากสมการ (1) และ  $\rho$  คือความหนาแน่นของลำพุ่งโดยใช้น้ำเป็นของเหลว (998 kg/m<sup>3</sup>)



Figure 8 The testing of velocity and phenomena of jet

### ผลและการอภิปรายผล

การทดสอบเบื้องต้นเป็นการเปรียบเทียบแรงกระแทกของต้นกำลัง จาก Figure 9 แสดงผลการเปรียบเทียบของแรงกระแทก (impact force) ที่เกิดจากแท่งกระแทกจากโซลินอยด์กระทำกับเครื่องวัดแรงกระแทก จากผลแสดงให้เห็นว่า เมื่อระยะกระแทกเพิ่มขึ้น (impact distance) จะทำให้แรงกระแทกนั้นเพิ่มขึ้นตามหรือแปรผันตรงกัน ซึ่งจากภาพระยะกระแทกสูงสุดที่ 17 mm จะให้ค่าแรงกระแทกสูงสุดเช่นเดียวกันที่ 475 N เนื่องจากแท่งกระแทกถูกขับเริ่มต้นจากความเร็วเป็นศูนย์และเพิ่มความเร็วขึ้นตามอัตราเร่ง จึงทำให้แรงกระแทกหรือโมเมนตัมที่ชนกับตัวรับของตัววัดแรงกระแทกมีค่าสูงตามไปด้วย

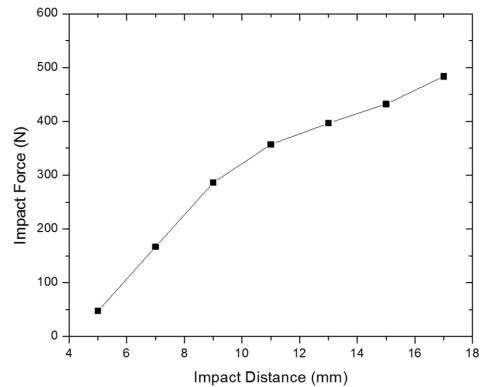


Figure 9 The impact force of power source versus impact distance

ต่อมาเป็นการเปรียบเทียบความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่ง (average jet velocity) และแรงดันกระแทกของลำพุ่ง (impact jet pressure) โดยเริ่มต้นระยะที่ 0 mm ซึ่งถือว่าไม่มีระยะกระแทก ดังนั้นระยะนี้จึงเป็นการขับด้วยแรงหรือแบบกด (DOM) เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับระยะกระแทกที่เพิ่มขึ้น โดยระยะที่ 0 จะให้ค่าความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่งที่ 30 m/s และจะเพิ่มขึ้นที่ระยะ 5, 7, 9, จนกระทั่งถึงระยะกระแทกที่ 11 mm จะให้ค่าความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่งสูงสุดที่ 62 m/s หลังจากนั้นจะลดลงที่ระยะ 13, 15 และ 17 mm ตามลำดับ (ค่าจะแสดงใน Figure 10 แกนตั้งด้านซ้าย) ซึ่งจะสอดคล้องกับค่าแรงดันกระแทกของลำพุ่ง (ค่าจะแสดงใน Figure 10 แกนตั้งด้านขวา) โดยค่าแรงดันกระแทกจะเพิ่มขึ้นตามระยะที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งระยะกระแทกที่ 11 mm จะให้ค่าแรงดันกระแทกของลำพุ่งสูงสุดที่ 2.28 MPa หลังจากนั้น ระยะกระแทกที่ 13, 15 และ 17 mm จะลดลงตามลำดับ ซึ่งโดยทั่วไป ระดับแรงดันกระแทกของลำพุ่งที่มีขายในท้องตลาดทั่วไปที่สามารถเจาะเข้าสู่เนื้อสุกร (ไม่มีหนัง) ได้จะอยู่ที่ 1.88 MPa (เป็นค่าแรงดันกระแทกที่สามารถเจาะเนื้อสุกร ตามเส้นประ) ดังแสดงใน Figure 10

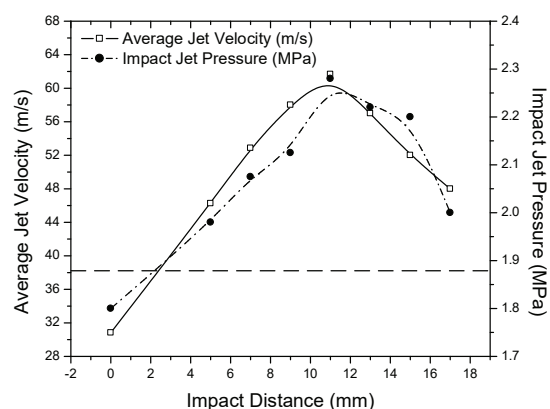


Figure 10 Average jet velocity and impact jet pressure versus impact distance

หลังจากนั้นนำความเร็วของลำพุงเฉลี่ยมาคำนวณเป็นกำลังของลำพุง (jet power) ด้วยสมการ (3) เพื่อตรวจสอบค่ามาตรฐานในความสามารถเจาะผิวหนังของลำพุง โดยจาก Figure 11 แสดงให้เห็นว่าค่ากำลังของลำพุงจะแปรผันตรงกับค่าความเร็วเฉลี่ยของลำพุง ซึ่งจะมีค่าสูงสุดที่ 370 W ที่ระยะกระแทก 11 mm เช่นเดียวกัน ดังนั้นจากความสัมพันธ์ของความเร็วของลำพุงและระดับกำลังของลำพุงที่สามารถเจาะผ่านผิวหนังได้จะอยู่ที่ระดับ 100 W (ของเนื้อสุกรไม่มีหนัง ตามเส้นประ) ซึ่งจากภาพจะแสดงให้เห็นว่า การใช้แรงกด (ระยะ 0 mm) จะไม่สามารถเจาะผ่านผิวหนังได้ แต่ถ้ามีระยะกระแทก (ระยะกระแทก 5, 7, 9, 11, 13, 15 และ 17 mm) จะสามารถเจาะผ่านผิวหนังได้ทุกค่า

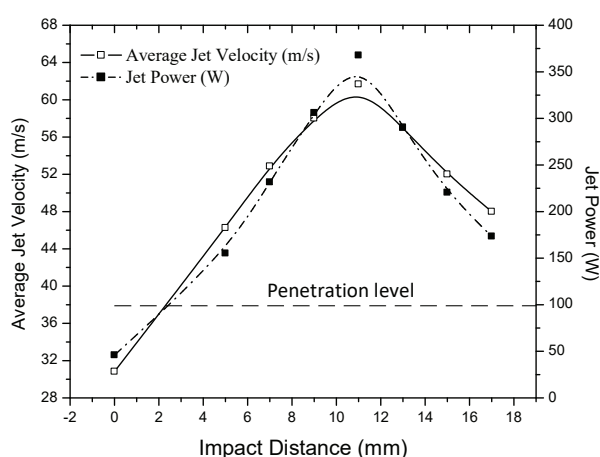


Figure 11 Average jet velocity and jet power versus impact distance

จากความเร็วเฉลี่ยและแรงดันกระแทกของลำพุงดังกล่าว เมื่อเรานำภาพมาวิเคราะห์ ที่ได้จากการแยกภาพจากวิดีโอด้วยกล้องที่มีความเร็ว 1,000 f/s ดังนั้น 1 ภาพที่ได้จากแยกไฟล์วิดีโอจะมีค่าเวลาเท่ากับ 0.001 วินาที หรือ 1 ms โดยใช้ตำแหน่งเริ่มต้นเพื่ออ้างอิงระยะทางของการเคลื่อนที่ของลำพุงคือตำแหน่งของปลายของหัวฉีดและห่างออกไปในแนวนอน ดังแสดงใน Figure 12 ค่าที่ได้จากวิเคราะห์เป็นความเร็วเฉลี่ยของลำพุง ได้จากการวัดจำนวนภาพของหัวของลำพุงลูกแรก เนื่องจากเป็นหัวลำพุงที่ใช้ในกระบวนการเจาะ ซึ่งเป็นกระบวนการที่สำคัญของหลักการกระแทก (IDM) จาก Figure 12 (a) (b) (c) และ (d) เป็นการเปรียบเทียบพฤติกรรมของลำพุงแบบเวลาต่อเวลา (Real time) ที่ระยะระหว่างการใช้แรงกด (0 mm) และระยะกระแทกที่ 5, 11 และ 15 mm ตามลำดับการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบจะใช้ช่วงเวลาที่ 7 ms (สังเกตช่วงเวลาในวงกลมเส้นประ) เทียบกับระยะในแนวนอนจนสุดเฟรมคือ 50 cm

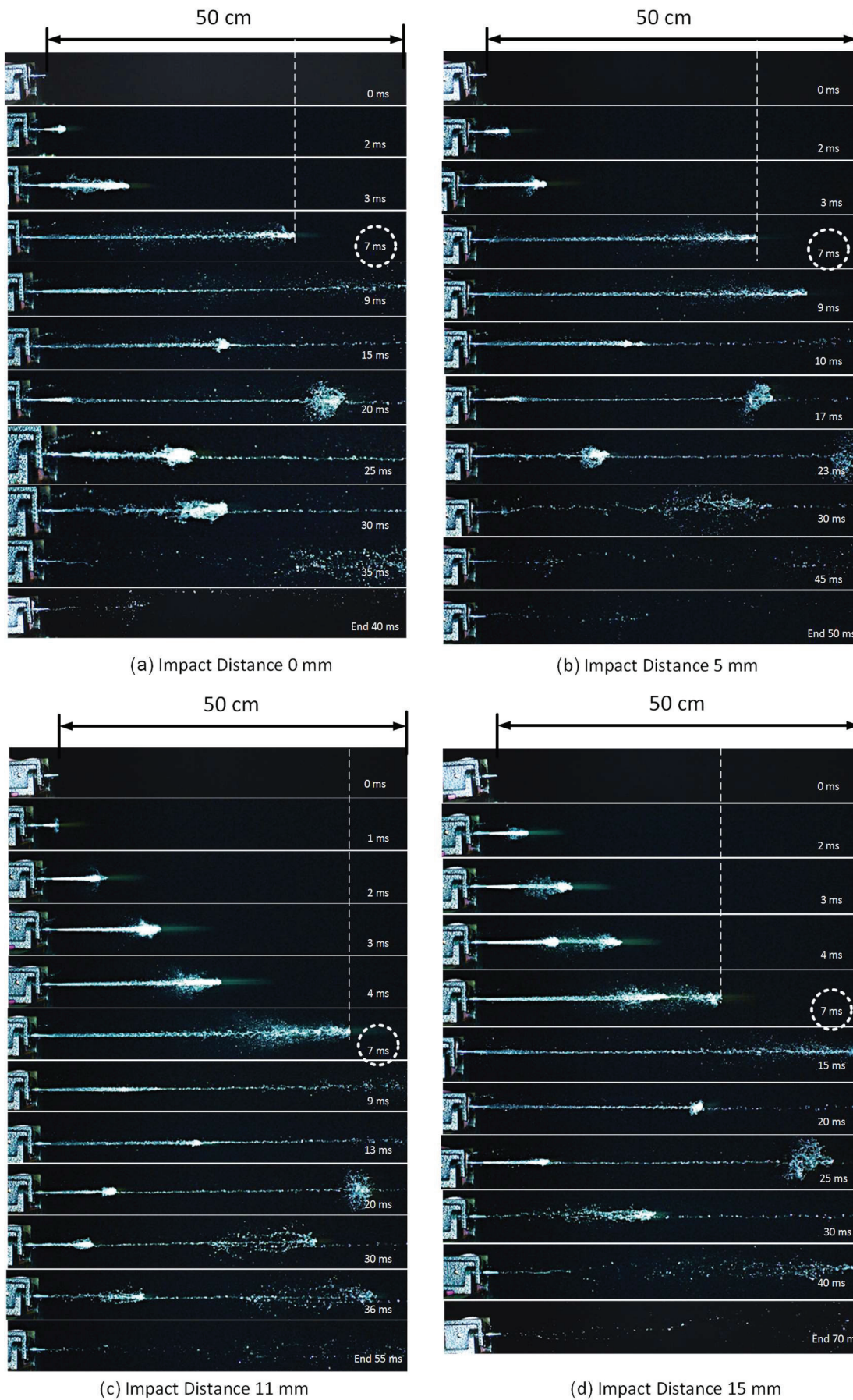
จาก Figure 12 เป็นการเปรียบเทียบระยะทางในการเคลื่อนที่ของลำพุงในช่วงเวลาเดียวกันที่ 7 ms จะเห็นได้

ว่า การใช้ระยะกระแทกที่ 0 mm (Figure 12 (a)) จะมีระยะของตำแหน่งหัวลำพุงลูกแรกสั้นที่สุด จึงทำให้ค่าความเร็วของลำพุงที่ได้จากการคำนวณนั้นมีค่าน้อยที่สุดที่ ต่อมาเป็นระยะกระแทกที่ 5 mm (Figure 12 (b)) จะมีค่าระยะของตำแหน่งหัวลำพุงและความเร็วของลำพุงที่สูงขึ้น และระยะกระแทก 11 mm (Figure 11 (c)) จะมีระยะตำแหน่งของหัวลำพุงที่มากที่สุด (เส้นประที่ระยะ 40 cm) หลังจากนั้น ที่ระยะกระแทก 15 mm (Figure 12 (d)) ระยะตำแหน่งของหัวลำพุงจะลดลงและจะลดลงมากที่สุดที่ระยะ 17 mm ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวจะมีความสอดคล้องกับผลของความเร็วเฉลี่ยของลำพุงที่แสดงใน Figure 10 และ Figure 11 แต่จะมีความขัดแย้งกับผลการทดสอบแรงกระแทกของต้นกำลังที่เพิ่มขึ้นเมื่อระยะกระแทกที่เพิ่มขึ้นในภาพ Figure 9 อย่างมีนัยสำคัญ และมากกว่านั้นจะสังเกตเห็นหัวของลำพุงที่ออกมาจากปลายหัวฉีดมากกว่าหนึ่งหัวทุกระยะกระแทก

ซึ่งพฤติกรรมของลำพุงดังกล่าว มีความสอดคล้องกับพฤติกรรมของเหลวที่เกิดขึ้นในหัวฉีดที่เกิดขึ้นจากการกระแทกด้วยการใช้วิธีจำลองของไหลพลศาสตร์เชิงคำนวณ (CFD) ที่แสดงใน Figure 3 โดยพฤติกรรมของไหลที่เกิดจากการกระแทกในหัวฉีดจะทำให้เกิดคลื่นช็อก หรือแรงดันย้อนกลับ เนื่องจากของไหลที่ถูกโมเมนตัมจากการกระแทกจะเกิดแรงดันสูงอย่างฉับพลันในหัวฉีด ไม่สามารถปลดปล่อยความดันได้ทัน จึงทำให้เกิดความดันย้อนกลับแล้วถูกแท่งกีดตันกลับไป - มา จึงทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เกิดหัวของลำพุงเกิดขึ้นมากกว่าหนึ่งขึ้นอยู่กับแรงกระแทก ซึ่งหากมีแรงกระแทกหรือระยะกระแทกที่สูง ก็จะทำให้เกิดปรากฏการณ์คลื่นช็อกในหัวฉีดที่มาก หัวของลำพุงที่ปลดปล่อยออกมาจะมากตาม

ดังนั้น จากผลของความเร็วของลำพุงที่เกิดขึ้น ของระยะกระแทกที่มากกว่า 11 mm จะมีค่าที่ลดลงเนื่องจากแรงกระแทกมีค่าสูงจะแปรผันโดยตรงกับความดันที่เกิดขึ้นในหัวฉีด แต่จะแปรผกผันกับความเร็วของลำพุง เนื่องจากของเหลวที่อยู่ในหัวฉีดเกิดขึ้นช็อกดันกลับ - มาอยู่ในช่วงระยะเวลาหนึ่งแล้วจึงค่อยปลดปล่อยออกมาช้ากว่า และยังเพิ่มระยะกระแทกเป็น 17 mm ความเร็วของลำพุงที่ปลดปล่อยออกมาจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ ตามเหตุผลที่กล่าวมา

อย่างไรก็ตามสิ่งที่น่าสังเกตอีกอย่างหนึ่งก็คือระยะเวลาในการฉีดตั้งแต่เริ่มต้น ตั้งแต่หัวของลำพุงออกจากปลายหัวฉีดจนกระทั่งฉีดหมด โดยระยะกระแทกที่ 0 mm จะมีระยะเวลาที่สั้นที่สุดที่ 40 ms และจะมีระยะเวลาฉีดเพิ่มขึ้นตามระยะกระแทกที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากระยะกระแทกจะแปรผันตรงกับจำนวนคลื่นช็อกในหัวฉีดและจำนวนหัวของลำพุง ทำให้เวลาในการปลดปล่อยลำพุงจนกระทั่งฉีดของเหลวจนหมดเพิ่มขึ้นตามระยะกระแทก



**Figure 12** Visualization of the IDM jet by a high speed camera versus impact distances:

(a) 0 mm (b) 5 mm and (c) 11 mm and 15 mm

## สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยนี้ เป็นการนำอุปกรณ์ฉีดยาตัว มาประยุกต์เป็นอุปกรณ์ส่งถ่ายยาด้วยลำพุ่งความเร็วสูง โดยหลักการสร้างลำพุ่งด้วยหลักการกระแทก (IDM) ซึ่งจะให้ค่าความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่งสูงกว่าการใช้หลักการกดแบบเดิม (DOM) ทำให้ความดันกระแทกของลำพุ่งสูงขึ้นตาม ซึ่งสันนิษฐานว่า IDM จะส่งผลที่ดีต่อการเจาะรวมทั้งการฉีดเข้าสู่ผิวหนัง ดังนั้นอุปกรณ์ฉีดยาตัว จะสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการส่งถ่ายยาด้วยลำพุ่งด้วย IDM ได้ในอนาคต โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การใช้ต้นกำลังจากแม่เหล็กไฟฟ้าหรือใช้โซลินอยด์ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ สามารถสร้างแรงกระแทกเพื่อผลิตลำพุ่งและควบคุมกำลังได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อย่างไรก็ตาม การส่งถ่ายยาด้วยลำพุ่งจะเป็นการส่งถ่ายยาในปริมาณที่ไม่มาก อาทิ การฉีดอินซูลินในผู้ป่วยเบาหวาน การฉีดโครโมโซม หรือดีเอ็นเอ เข้าสู่ร่างกาย หรือการวัดขึ้นในปริมาณไม่เกิน 0.5 ml ดังนั้นควรลดขนาดของหัวฉีดจึงจะมีความเหมาะสมกับการใช้หลักการส่งถ่ายยาด้วยลำพุ่งมากที่สุด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูหัวฉีดไม่ควรเกิน 0.5 mm (ซึ่งเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอุปกรณ์ฉีดที่ขายตามท้องตลาดแบบ DOM ทั่วไป) จะทำให้ค่าความเร็วเฉลี่ยและความดันกระแทกของลำพุ่งมีค่าสูงขึ้น (เจาะได้ง่ายขึ้น) มากกว่านั้นสิ่งที่ควรปรับปรุงคือการทำงานทางด้านเทคนิคของอุปกรณ์ฉีดให้มีการทำงานได้อย่างต่อเนื่อง และสามารถกำหนดปริมาตรของยาที่จะฉีดได้อย่างแม่นยำ

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (กองทุน ววน.) ที่สนับสนุนงบประมาณด้านวิจัยและนวัตกรรม ประเภท Fundamental Fund ประจำปีงบประมาณ 2565 รวมทั้งมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี ที่ส่งเสริม ผลักดัน ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงอย่างมีประสิทธิภาพ

## เอกสารอ้างอิง

- วิระพันธ์ สีหานาม. (2557). การฉีดยาแบบไร้เข็มด้วยลำพุ่งความเร็วสูง: อุปกรณ์และพฤติกรรมการฉีด. *วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.*, 7(2), 113-124.
- Akihito, K., Nanami, E., Sennosuke, K., Chihiro, K., Kumido, O., Akane, T., & Yoshiyuki, T. (2019). Visualization of penetration of a high-speed focused microjet into gel and animal skin. *J Vis*, 22, 449-457.
- Baxtera, J. S., Katrencikb, J., & Mitragotria, S. (2004). Jet injection into polyacrylamide gels: investigation of jet injection mechanics. *Journal of Biomechanics*, 37, 1181-1188.
- Baxtera, J. S., & Mitragotria, S. (2004). Needle-free jet injection: dependence of jet penetration and dispersion in the skin on jet power. *Journal of Controlled Release*, 97, 527-535.
- Mukda, P., Seehanam, W., & Pianthong, K. (2017). A new concept of needle-free jet injector by the impact driven method. *ASME Journal of Medical Devices*, 11(1), 1-10.
- Shi, H. H. (1994). *Study of hypersonic liquid jet*, doctor of thesis Sendai. Tohoku University.
- Shi, H. H., & Takayama, K. (1995). Generation of high speed liquid jets by high speed impact of a projectile. *JSME International Journal*, 3(8), 181-190.
- Shi, H. H., Takayama, K., & Itoh, M. (1996). Further study of the generation technique of high speed liquid jets and related shock wave phenomena using a helium gas gun. *Japanese Journal of Applied Physics*, 35, 4147-4156.
- Seehanam, W., Kianthong, K. and Sittiwong, W., Milton, B.E. & Takayama, K. (2012). Investigation on the generation process of impact-driven high-speed liquid jets using a CFD technique. *Shock Waves*, 22, 465-475.