การทดสอบการใช้งานจริงของอุปกรณ์ส่งฉีดยาแบบไม่ใช้เข็มด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับฟาร์มสุกร

Practical Test of Needle-Free Medical Injector using Electromagnetic for Pig Farm

สารสิน โคตรธาดา[1] อนิรุตต์ มัทธุจักร์[1*] ประชา คำภักดี[2] จินดา กลิ่นอุบล[3] ชวลิต ศิริบูรณ์[3] และ อินทร์ ศาลางาม[3]

Sarasin Khotthada[1], Anirut Mattujak[1], Pracha Kampakdi[2] Jinda Glinubon[3] Chawalit Siriboon[3] and Intr Salangam[3]

[1*]ห้องปฏิบัติการการประยุกต์ใช้ลำเจ็ตและการเผาไหม้ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

[2]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

[3]ภาควิชาสัตวศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

[1]Combustion and Jet Application Research Laboratory, (CJARL) Department of Mechanical Engineering Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University

[2]Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University

[3]Department of Animal Science Faculty of Agriculture, Ubon Ratchathani University

* E-mail: anirut.m@ubu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบการใช้งานของอุปกรณ์ส่งฉีดยาด้วยลำเจ็ตแบบไม่ใช้เข็มโดยใช้แม่เหล็กไฟฟ้าเป็นต้นกำลังเพื่อใช้ในการฉีดยาสำหรับฟาร์มสุกรที่พัฒนาขึ้นจากห้องปฏิบัติการการประยุกต์ใช้ลำเจ็ตและการเผาไหม้ (CJARL) ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวได้ถูกออกแบบและสร้างขึ้นโดยอาศัยหลักการการขับด้วยการกระแทก ในการศึกษานี้จะทำศึกษาการวัดความเร็วด้วยการถ่ายภาพจากกล้องวิดีโอความเร็วสูงและทำการวัดความดันกระแทกของลำเจ็ต นอกจากนี้ยังศึกษาการแพร่กระจายของลำเจ็ตในเนื้อสุกรที่ไม่มีชีวิตและทดสอบการใช้งานจริงกับสุกรเพื่อตรวจฮอร์โมนคอร์ติซอลที่เป็นสารหลั่งเกิดจากความเครียดโดยการฉีดยาแบบไม่ใช้เข็ม จากการศึกษาพบว่า ความเร็วและความดันของลำเจ็ตจะเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยลำเจ็ตมีความเร็วสูงสุดเท่ากับ 233.33 m/s และความดันกระแทก 37 MPa ที่ 250 Volt ซึ่งเมื่อนำไปฉีดในเนื้อสุกรสามารถส่งยาได้เข้าสู่ชั้นผิวหนังได้ และมีความเครียดของสุกรไม่ต่างจากการฉีดแบบใช้เข็ม ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ลำเจ็ตที่ผลิตจากชุดขับแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกแบบและสร้างขึ้นนี้มีศักยภาพในการพัฒนาเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริงในการฉีดยาแบบไม่ใช้เข็มสำหรับฟาร์มสุกรต่อไปในอนาคต

คำสำคัญ: การส่งยาแบบไม่ใช้เข็ม ชุดขับแม่เหล็กไฟฟ้า ฟาร์มสุกร ความเร็วลำเจ็ต ฮอร์โมนคอร์ติซอล

Abstract

This research aims to test the needle-free medical jet injector using Electromagnetic actuator for vaccine delivery in pig farm. It was developed by Combustion and Jet Application Research Laboratory (CJARL). The device was designed and built based on impact driven method. In this study, the jet behavior, the jet velocity and impact pressure were investigated by high-speed video camera. Moreover, the dispersion inside inanimate pig was studied and tested to investigate the stress exudate cortisol hormone provided by needleless injection. From the results, it was found that the jet penetration and the dispersion inside the simulated tissue were clearly observed. The jet velocity and impact pressure increased as the electrical power increased. A maximum jet velocity and impact pressure were 233.33 m/s and 37 MPa at

250 Volts. The stress of pigs obtained the device was not different from the needle injection. Therefore, it can be concluded that the jet generated from the device manufactured and designed have the potential to be developed for needleless injections in pig farm in the near future.

Keywords: Needle-Free Jet Injection, Electromagnetic Actuator, Pig Farm, Jet Velocity, Cortisol

บทนำ

ก่อนหน้านี้ได้มีศึกษาเพื่อนำเอาเทคโนโลยีลำพุ่งหรือลำเจ็ตความเร็วสูง (High speed jet) มาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมใต้สมุทร (Hirono et al., 2003; Soyama et al., 1996) เช่น การตัดโครงสร้างใต้ทะเลด้วยลำเจ็ต (Jet cutting marine structures) หรือการเจาะใต้ทะเลด้วยลำเจ็ต (Jet drilling at the bottom of the sea) นอกจากนี้แล้วยังมีแนวคิดในการประยุกต์ใช้กับงานด้านการแพทย์ (Ohtani et al., 2009; Ohki et al., 2004; Nakagawa et al., 2002) เช่น การใช้ลำเจ็ตความเร็วสูงในการผ่าตัด (Micro jet cutting) (Rau et al., 1997) การรักษาการอุดตันของก้อนเลือดในเส้นเลือดในสมองโดยการฉีดลำเจ็ตความเร็วสูงเข้าไปกระแทกทำลายเม็ดเลือด (Blood clot dissolution) (Ohki et al., 2004; Nakagawa et al., 2002; Hirono et al., 2003) และโดยเฉพาะการฉีดยาแบบไม่ใช้เข็ม (Needleless) โดยการใช้ลำเจ็ตความเร็วสูงของตัวยาฉีดเข้าไปในผิวหนังโดยตรง (Baxter et al., 2005; Stachowiak et al., 2007) ซึ่งถือได้ว่าเป็นเทคโนโลยีนี้มีความสำคัญและเป็นประโยชน์มากเกี่ยวกับการรักษาพยาบาลมนุษย์ วิธีการส่งถ่ายยาหรือวัคซีนเข้าสู่ร่างกายสามารถทำได้หลากหลายวิธีด้วยกัน เช่น การฉีดยาด้วยเข็มฉีดยาร่วมกับกระบอกฉีดยา การติดแปะด้วยแผง Microneedle การพ่นละอองยาเพื่อสูดดมเข้าสู่ร่างกาย การกิน การทาที่ผิวหนัง รวมถึงการฉีดยาโดยไม่ใช้เข็ม (Needle-free injection) เป็นการส่งถ่ายยาเข้าสู่ร่างกายที่สามารถทำได้โดยการทำให้ยานั้นเป็นลำเจ็ตความเร็วสูง (High-speed jet) ซึ่งมีคุณสมบัติเจาะทะลุชั้นผิวหนังในแต่ละชั้นได้ ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้เข็มฉีดยาในการส่งถ่ายยาเข้าสู่ร่างกายอีกต่อไป จะเห็นได้ว่าวิธีนี้มีความเป็นไปได้สูงที่จะมาทดแทนการส่งถ่ายยาเข้าสู่ร่างกายโดยใช้เข็มได้ดีที่สุด เพราะลักษณะการส่งถ่ายยาเข้าสู่ร่างกายส่วนใหญ่มีความคล้ายคลึงกัน และจากการศึกษาที่ผ่านมายังพบว่า วิธีการฉีดยาแบบไม่ใช้เข็มหรือฉีดยาด้วยลำเจ็ตความเร็วสูงนี้ยาที่ถูกฉีดเข้าไปสามารถออกฤทธิ์ได้เร็วกว่าวิธีการฉีดยาโดยใช้เข็ม เนื่องจากยาที่ถูกฉีดเข้าไปมีการแพร่กระจายของยาได้ดีกว่าการฉีดโดยใช้ วิธีการส่งถ่ายยาด้วยลำเจ็ตส่วนใหญ่แล้วจะใช้เทคนิคพิเศษที่เรียกว่า การขับด้วยการกระแทก (Impact driven method) (Bowden and Brunton, 1958; 1961) โดยวิธีการนี้ทำได้โดยการยิงลูกกระสุนที่มีความเร็วสูง (High-speed projectile) เข้าไปกระแทกกับของเหลวที่บรรจุอยู่ภายในหัวฉีด (Nozzle) เมื่อลูกกระสุนกระแทกกับของเหลวที่บรรจุอยู่ภายในหัวฉีด จากนั้นของเหลวที่บรรจุอยู่ภายในหัวฉีดก็จะพุ่งออกมาโดยผ่านรูของหัวฉีดที่มีขนาดเล็กด้วยความเร็วสูง ซึ่งต้นกำลัง (Energy source) ที่ใช้ในการขับลูกกระสุนให้มีความเร็วสูงที่พบในอดีต และปัจจุบันในการใช้ผลิตลำเจ็ตเพื่อการฉีดยาแบบไม่ใช้เข็มนั้นจะใช้วิธีการสะสมพลังงานเป็นหลัก ซึ่งได้แก่ 1) การสะสมพลังงานที่เกิดจากการกดอัดของสปริง (Compressed springs) ซึ่งข้อดีของวิธีนี้คือ มีความสะดวกในการฉีดและระบบมีขนาดเล็ก แต่มีข้อเสียคือ จะต้องทำการปรับแต่งอุปกรณ์ใหม่โดยการเพิ่มค่านิจของสปริง (Spring constant, k) ให้สูงขึ้น 2) การสะสมพลังงานที่เกิดจากแรงดันของแก๊สต่าง ๆ หรืออากาศ (Compressed gases) ซึ่งข้อดีของวิธีนี้ คือ มีความสะดวกในการฉีดและสามารถควบคุมระยะของยาที่ผ่านเข้าไปในชั้นผิวหนังได้ แต่มีข้อเสียคือระบบอัดอากาศที่มีขนาดใหญ่และมีราคาแพง และ 3) การระเบิดทางเคมีของสารประกอบ (Explosive chemicals) ซึ่งข้อดีของวิธีนี้ คือ ระยะของยาที่ผ่านเข้าไปในชั้นผิวหนังลึกที่สุด แต่มีข้อเสีย คือ การควบคุมการระเบิดทางเคมีของสารประกอบทำได้ยาก ระบบค่อนข้างเป็นอันตราย

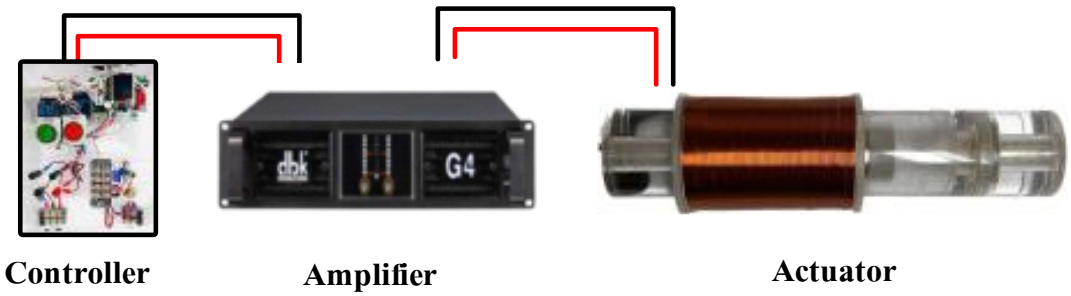
นอกจาก 3 วิธีที่กล่าวมาข้างต้นแล้วยังพบว่า มีการใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นอีกต้นกำลัง (Energy source) ที่สามารถนำมาใช้ในการขับลูกกระสุนให้มีความเร็วสูงได้ ซึ่งข้อดีของการใช้พลังงานไฟฟ้า คือ สามารถนำวงจรอิเล็กโทรนิคเซ็นเซอร์มาควบคุมการทำงานของระบบผลิตลำเจ็ตความเร็วสูงได้โดยจากการตรวจวัดค่าต่าง ๆ ที่ได้จากเซ็นเซอร์แล้วทำการประมวลผลปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ซึ่งหากนำมาใช้ในการฉีดยาด้วยลำเจ็ตแบบไม่ใช้เข็มจะทำให้การฉีดยามีประสิทธิภาพสูงสุด โดยวิธีการที่นิยมใช้ในการผลิตลำเจ็ตความเร็วสูงโดยใช้พลังงานไฟฟ้ามีด้วยกันสองระบบ คือ การผลิตลำเจ็ตด้วย Piezoelectric และด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic) โดยการผลิตลำเจ็ตด้วย Piezoelectric ได้มีการศึกษาเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการฉีดยาแบบไม่ใช้เข็ม (Stachowiak et al., 2007; Arora et al., 2007) ต่อมาได้มีการคิดค้นชุดขับที่ใช้หลักการการตัดกันของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็กถาวร (Taberner et al., 2012) เพื่อปรับปรุงชุดขับที่ใช้ Piezoelectric โดยในการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะจ่ายพลังงานไฟฟ้าจาก Power supply ให้กับขดลวดทองแดง เมื่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็กถาวรเกิดการตัดกัน จะทำให้ขดลวดทองแดงเกิดการเคลื่อนที่ และใช้การเคลื่อนที่นี้ในการขับดันของเหลวที่อยู่ภายในหัวฉีดเพื่อผลิตลำเจ็ต ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ความเร็วของลำเจ็ตที่ผลิตได้มีค่าสูงสุดเท่ากับ 200 m/s ที่ปริมาตรของเหลว 0.2 ml ขนาดรูหัวฉีด 0.22 mm และแรงดันไฟฟ้า 200 Volt พบว่า การผลิตลำเจ็ตจะเป็นแบบการผลิตเพียงครั้งเดียวหรือเรียกว่า Impulsive jet ซึ่งหากต้องการผลิตลำเจ็ตในครั้งถัดไปจะต้องทำการเตรียมอุปกรณ์ใหม่ทุกครั้ง ซึ่งต้องใช้เวลาในการเตรียมก่อนการฉีดลำเจ็ตในครั้งต่อไป รวมถึงงานวิจัยที่ผ่านมาทั้งหมดจะเน้นการผลิตอุปกรณ์ที่ใช้กับคนเท่านั้น ในขณะที่ อุตสาหกรรมการผลิตเนื้อสัตว์ เป็นอุตสาหกรรมที่สามารถสร้างรายได้และเป็นอาชีพที่มีความสำคัญโดยเฉพาะในประเทศไทย ซึ่งอุตสาหกรรมผลิตสุกร จะเป็นอุตสาหกรรมที่นิยมมากเป็นอันดับต้น ๆ โดยการเลี้ยงสุกรเพื่อการอุตสาหกรรมจะถูกจัดการในรูปแบบฟาร์ม ซึ่งการฉีดยาแต่ละครั้ง อาจจะส่งผลให้เกิดปัญหาเข็มฉีดยาแตกหักและตกค้างในเนื้อสุกร ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อผู้บริโภค ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการนำเอาเทคโนโลยีการฉีดยาด้วยลำเจ็ตแบบไม่ใช้เข็ม (Needle-free jet injection) มาใช้ในการฉีดยาให้กับสุกรโดยเฉพาะในต่างประเทศ ซึ่งหากจำเป็นต้องสั่งนำเข้าจะมีราคาสูงถึง 200,000-500,000 บาท ซึ่งปัญหาดังกล่าวได้เกิดขึ้นจริงกับฟาร์มสุกรในประเทศไทยที่สั่งนำเข้าอุปกรณ์ดังกล่าวมาใช้งาน นอกจากนี้ยังมีปัญหาด้านการซ่อมบำรุงอีกด้วย

ในการศึกษาวิจัยนี้ที่ได้ศึกษาด้านเทคโนโลยีลำพุ่งหรือลำเจ็ตความเร็วสูงมาอย่างต่อเนื่องพบว่า ต้นกำลังที่มีศักยภาพและเหมาะสมในการใช้งานจริงในฟาร์มสุกร คือ ต้นกำลังจากไฟฟ้า ซึ่งจะทำการการออกแบบ สร้างและพัฒนาอุปกรณ์ฉีดยาด้วยลำเจ็ตแบบไม่ใช้เข็มด้วยพลังงานไฟฟ้าให้มีความเหมาะสมในการใช้งานในฟาร์มสุกร คือ ความเร็วของลำเจ็ต (Jet velocity) และความดันกระแทกหรือความดันเจาะ (Impact pressure or penetration pressure) ที่ผลิตได้จากอุปกรณ์ เป็นตัวแปรที่สำคัญในการเจาะทะลุผิวหนัง รวมถึงการฉีดยาเข้าเนื้อสุกร เพื่อศึกษาการส่งถ่ายยาเข้าสู่ผิวหนัง และศึกษาพฤติกรรมของลำเจ็ตยาที่ผ่านเข้าไปในชั้นผิวหนัง รวมถึงการศึกษาสมรรถนะต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ก่อนที่จะนำไปทดสอบใช้งานจริงในฟาร์มสุกรทดสอบ เพื่อยืนยันศักยภาพการใช้งานจริงของอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบขึ้น จากนั้น ทำการเก็บตัวอย่างเลือดสุกรเพื่อตรวจวัดระดับฮอร์โมนคอร์ติซอล ตามวิธีของ Brown et al. (2004) เพื่อเป็นการสร้างองค์ความรู้พื้นฐานในด้านการประยุกต์ใช้ลำเจ็ตและนำไปสู่การสร้างนวัตกรรมเพื่อใช้งานเองในประเทศได้อย่างเหมาะสมกับสภาพการทำงานจริงของเกษตรกรไทย

วิธีการวิจัย

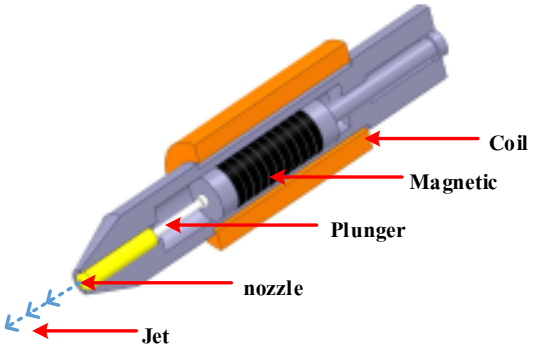
1. หลักการทำงานของชุดการทดลอง

ในการทำงานของชุดทดลอง หรืออุปกรณ์ผลิตลำเจ็ตที่ใช้ชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้า โดยเริ่มจากชุดควบคุม (Controller) จะส่งสัญญาณทางไฟฟ้าไปที่เครื่องขยายสัญญาณขนาด 9,680 W (Amplifier) เพื่อทำการขยายสัญญาณไฟฟ้าให้สูงขึ้น แล้วสัญญาณไฟฟ้าที่ถูกขยายจะไปยังชุดขับ (Actuator) เพื่อทำการฉีดยาต่อไป



ภาพที่ 1 ชุดอุปกรณ์ฉีดยาแบบไม่ใช้เข็ม

โดยในตัวชุดขับมีส่วนประกอบหลักคือ ขดลวดทองแดง (Coil) และแม่เหล็กถาวรชนิด (Magnetic) เมื่อขดลวดทองแดงได้รับกำลังไฟฟ้าจากเครื่องขยายสัญญาณ ขดลวดทองแดงจะสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น และเมื่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตัดกับสนามแม่เหล็กถาวร แม่เหล็กถาวรจะเกิดการเคลื่อนที่ไปกระแทกลูกสูบ (Plunger) ที่อยู่ภายในหัวฉีด (Nozzle) ทำให้ลูกสูบเกิดการเคลื่อนที่เข้าไปภายในหัวฉีดและยาที่อยู่ภายในหัวฉีดนั้นจะถูกผลักดันเคลื่อนที่ไปยังรูหัวฉีดที่มีขนาดเล็กอยู่ที่ปลายสุดของหัวฉีดทำให้เกิดเป็นลำเจ็ตยาขึ้นดังแสดงในภาพที่ 2 และสำหรับพารามิเตอร์ในการทดลองได้แสดงในตารางที่ 1



ภาพที่ 2 ชุดขับลำจ็ตยา (Actuator)

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของชุดทดลอง

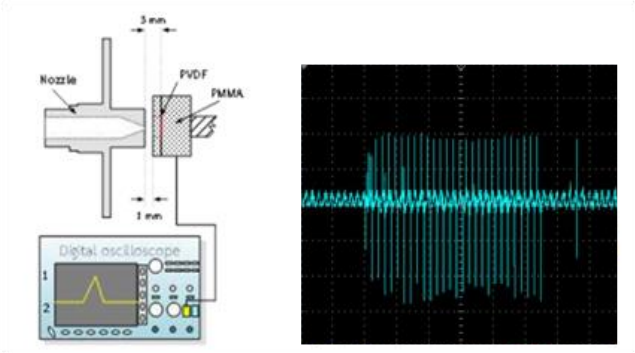
ส่วนประกอบ	พารามิเตอร์	หน่วย
ต้นกำลัง Power part	DC Voltage 250	Volt
	Frequency 50	Hz
ชุดขับ Actuator part	Magnetic 1.2	T
	Coil 1000	rev
หัวฉีด Nozzle part	Nozzle diameter 0.2	mm
	Drug volume 0.1-0.5	mL

2. การทดลอง

2.1 การวัดแรงดันกระแทกและความเร็วของลำเจ็ต

ในการวัดความดันกระแทก จะใช้แผ่น Polyvinylidene Fluoride (PVDF) ขนาดกว้าง 15 mm ยาว 25 mm และหนา 28 μm ติดตั้งไว้บน PMMA ขนาด 45 x 45 mm^2 และหนา 25 mm ดังแสดงในภาพที่ 3 เมื่อลำเจ็ตเคลื่อนที่เข้ากระแทกกับแผ่น PVDF ที่มีระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่น PVDF (Stand of distance) เท่ากับ 3 mm แผ่น PVDF จะตอบสนองต่อการกระแทกของลำเจ็ต และแสดงสัญญาณจากการกระแทกของลำเจ็ตขึ้นบนหน้าจอของเครื่อง Digital oscilloscope ในรูปแบบของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าโดยจะนำค่าแรงดันไฟฟ้า (V_e) มาแทนในสมการที่ 1 เพื่อคำนวณหาแรงดันกระแทกของลำเจ็ตจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและความดันกระแทกจากการสอบเทียบ

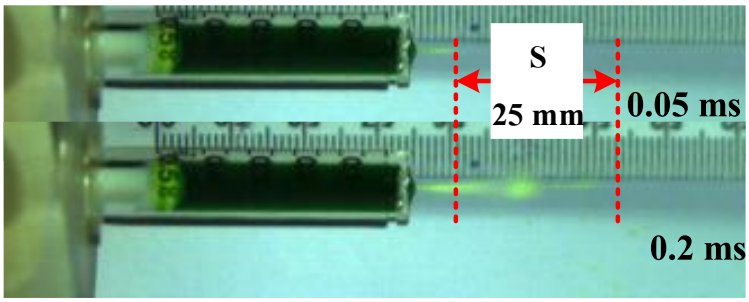
$$P = \mathbf{23.961}V_e \tag{1}$$



ภาพที่ 3 การวัดแรงดันกระแทกของลำเจ็ต

สำหรับการวัดความเร็วจะใช้กล้อง High speed video camera โดยการถ่ายภาพและนำมาทำการคำนวณหาความเร็วของวัตถุที่เคลื่อนที่จะสามารถหาได้จากสมการที่ 2

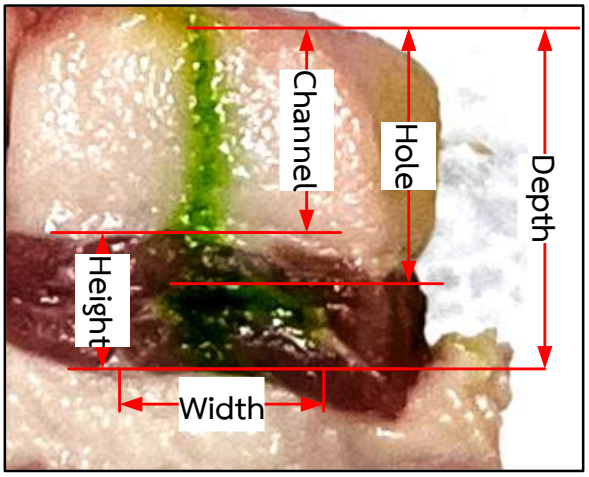
$$v = \frac{s}{t} \tag{2}$$



ภาพที่ 4 การถ่ายวัดความเร็วของลำเจ็ต

2.2 การทดสอบการฉีดลำเจ็ตยาในเนื้อสุกร

ในการศึกษาพฤติกรรมการแพร่กระจายของลำเจ็ตยา เมื่อฉีดเข้าสู่ชั้นผิวหนังของเนื้อสุกรโดยบริเวณที่ฉีด คือ บริเวณที่เป็นสันคอซึ่งเป็นบริเวณในการให้วัคซีนต่าง ๆ เพื่อทำการศึกษารูปแบบของการกระจายตัวยาที่ประกอบด้วย ดังนี้ Chanel คือ ความลึกขอบบนของการแพร่กระจาย, Hole คือ ความลึกของการเจาะ, Width คือ ความกว้างของการแพร่กระจาย, Height คือความสูงของการแพร่กระจาย และ Depth คือ ความลึกสูงสุดของการแพร่กระจายดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 บริเวณของเนื้อสุกรที่ทำการฉีดยา

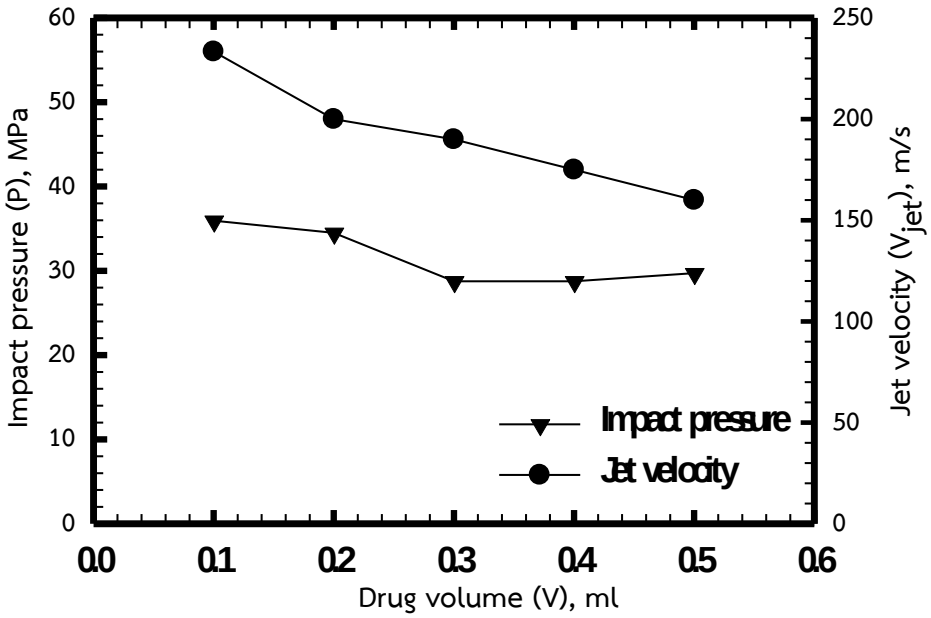
2.3 การทดสอบการใช้งานจริงของอุปกรณ์

ในการทดสอบการใช้งานจริงของอุปกรณ์ฉีดยา จะทำการทดสอบในฟาร์มทดลองของคณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี โดยทำการฉีดวัคซีนป้องกันโรคอหิวาต์และทำการถ่ายภาพแผลหลังการฉีด จากนั้น ทำการเก็บตัวอย่างเลือดสุกรบริเวณเส้นเลือด jugular vein ปริมาณ 4-6 mm ใส่หลอดที่บรรจุสารป้องกันการแข็งตัวของเลือด (EDTA) ส่งตัวอย่างเลือดเข้าห้องปฏิบัติการ เพื่อตรวจวัดระดับฮอร์โมนคอร์ติซอล โดยการปั่นแยกซีรั่มออกจากเม็ดเลือดด้วยเครื่อง centrifuge ที่ 12,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ดูดเก็บสารส่วนที่อยู่ด้านบน (Serum) นำซีรั่มมาตรวจวิเคราะห์ด้วยวิธี Enzyme immunoassay แบบ Competitive ELISA โดยการส่งตรวจที่ห้องปฏิบัติการตรวจวิเคราะห์ฮอร์โมนสัตว์ จากนั้นนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบระดับคอร์ติซอลจากกลุ่มการทดลองที่ใช้เข็ม

ผลการวิจัย

1. ผลการวัดแรงกระแทกและความเร็วของลำเจ็ต

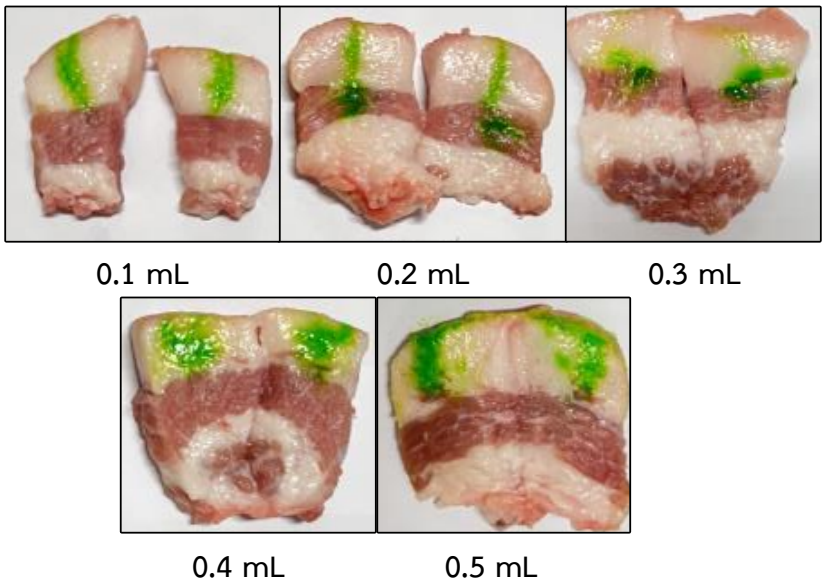
จากการทดลองวัดค่าความดันกระแทกและการถ่ายภาพวัดค่าความเร็วของปริมาณยาตั้งแต่ 0.1 mL ถึง 0.5 mL ที่แรงดันไฟฟ้า 250 Volt. พบว่า เมื่อปริมาณของของยาในหลอดฉีดยาเพิ่มสูงขึ้นความดันกระแทกและความเร็วของลำเจ็ตพบว่า มีค่าลดลงเล็กน้อย เนื่องจากการความหนาแน่นของของเหลวมีแรงต้านต่อแรงผลักของลูกสูบเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน แต่ยังมีความดันกระแทกที่สูงพอที่จะส่งของเหลวเข้าสู่ชั้นผิวหนังได้ โดยมีค่าความดันกระแทกและความเร็วของลำเจ็ตสูงสุดมีค่าเท่ากับ 37 MPa และ 233.33 m/s ตามลำดับ ที่ปริมาณยา 0.1 mL ที่แรงดันไฟฟ้า 250 Volt.



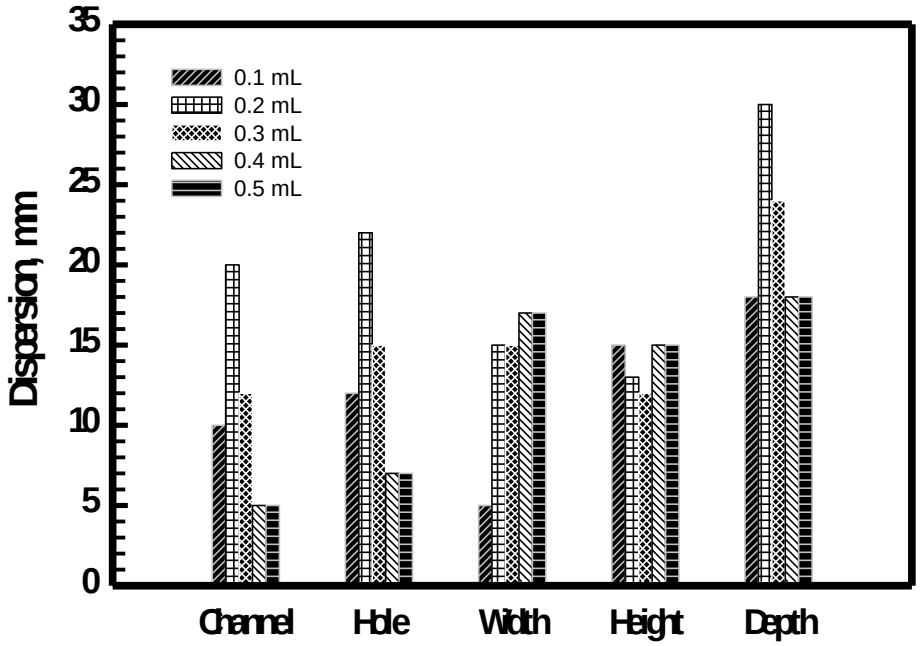
ภาพที่ 7 กราฟแสดงอิทธิผลของแรงดันไฟฟ้าที่มีผลต่อแรงดันกระแทกและความเร็วของลำเจ็ตยา

2. ผลการทดลองฉีดลำเจ็ตยาในเนื้อสุกร

ผลการศึกษาการแพร่กระจายของลำเจ็ตน้ำในเนื้อสุกร ทดลองฉีดน้ำในปริมาณ 0.1 mL, 0.2 mL, 0.3 mL, 0.4 mL และ 0.5 mL ดังแสดงในภาพที่ 8 พบว่า การแพร่กระจายของการฉีดยาในเนื้อสุกรพบว่า ในปริมาณของยา 0.1 mL ถึง 0.3 mL จะมีความสามารถในการเจาะเข้าผ่านชั้นผิวหนังชั้นนอกผ่านชั้นใขมันจนถึงชั้นกล้ามเนื้อ แล้วจะค่อยเกิดการแพร่กระจายของตัวยา ในปริมาณยา 0.4 mL และ 0.5 mL ตัวยาที่ถูกฉีดเข้าไปจะผ่านถึงชั้นใต้ผิวหนังเกิดการกระจุกของตัวยาอยู่ที่ชั้นไขมัน เนื่องจากปริมาณของยาค่อนข้างสูงจึงทำให้ความเร็วลดลงก่อนจะเจาะถึงชั้นกล้ามเนื้อ จากผลการศึกษาการแพร่กระจายของลำเจ็ตน้ำในเนื้อสุกร ทดลองฉีดน้ำในปริมาณ 0.1 mL, 0.2 mL, 0.3 mL, 0.4 mL และ 0.5 mL ดังแสดงในภาพที่ 9 พบว่า การแพร่กระจายของเข็มฉีดยาในเนื้อสุกรพบว่า ส่วน Channel ที่ปริมาณ 0.2 mL มีค่าสูงสุดและแนวโน้มลดลงตามปริมาตรของของเหลวที่มีปริมาตรที่เพิ่มขึ้น ส่วน Hole ระยะการเจาะที่ปริมาณ 0.2 mL สูงสุด ส่วน Width, Height จะไม่แตกต่างกันกันมากในทุกปริมาณ และที่ปริมาณ 0.2 mL สามารถแพร่กระจายสูงสุดในส่วนของ Depth ซึ่งมีค่าเท่ากับ 30 mm



ภาพที่ 8 การแพร่กระจายของยาในเนื้อสุกร



ภาพที่ 9 ระยะการแพร่กระจายของยาในเนื้อสุกร

3. ผลการทดสอบการใช้งานจริงของอุปกรณ์ฉีดยา

หลังจากทำการทดลองฉีดวัคซีนในชิ้นเนื้อของสุกรแล้ว เพื่อเป็นการยืนยันความสามารถของอุปกรณ์ฉีดยา จึงได้นำมาทดสอบในการฉีดสุกรที่มีชีวิตอายุ 6 สัปดาห์ ทั้งหมด 12 ตัว ฉีดแบบไม่ใช้เข็ม 6 ตัว และใช้เข็ม 6 ตัว หลังจากมีการฉีดวัคซีนตามโปรแกรมโดยการฉีดยาด้วยลำเจ็ตยาแบบไม่ใช้เข็ม (Needle-free jet injector) และการฉีดยาด้วยเข็มแบบทั่วไป จากนั้น ทำการเก็บตัวอย่างเลือดสุกรบริเวณเส้นเลือด jugular vein ปริมาณ 4-6 mm ใส่หลอดที่บรรจุสารป้องกันการแข็งตัว

ของเลือด (EDTA) ส่งตัวอย่างเลือดเข้าห้องปฏิบัติการ เพื่อตรวจวัดระดับฮอร์โมนคอร์ติซอล ตามวิธีของ Brown et al. (2004) โดยการปั่นแยกซีรั่มออกจากเม็ดเลือดด้วยเครื่อง centrifuge ที่ 12,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ดูดเก็บสารส่วนที่อยู่ด้านบน (Serum) นำซีรั่มมาตรวจวิเคราะห์ด้วยวิธีด้วยวิธี Enzyme immunoassay แบบ Competitive ELISA โดยการส่งตรวจที่ห้องปฏิบัติการตรวจวิเคราะห์ฮอร์โมนสัตว์ จากนั้นนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบระดับคอร์ติซอลจากกลุ่มการทดลอง พบว่าเมื่อทดสอบฉีดลำเจ็ตยาปริมาณ 0.5 mL จำนวน 2 Dose ลำเจ็ตยาก็สามาฉีดเข้าชั้นผิวหนังของตัวสุกรนี้ได้เช่นกัน ซึ่งจะมีรอยบาดแผลของลำเจ็ตยาที่ฉีดผ่านรูหัวฉีดขนาดเล็กดังแสดงในภาพที่ 10 หลังจากนั้นบาดแผลก็หายเป็นปกติเหมือนกับการฉีดยาแบบใช้เข็ม สำหรับการฉีดยาโดยอุปกรณ์ฉีดยาแบบไม่ใช้เข็มมี ได้ผลจากแลปของปศุสัตว์จังหวัด ได้ผลของการหลั่งความเข้มข้นของฮอร์โมนคอร์ติซอล อยู่ในระดับ 8.62 ng/ml และแบบใช้เข็มมีความเข้มข้นของฮอร์โมนคอร์ติซอล อยู่ในระดับ 8.29 ng/ml ซึ่งจากผลตรวจของการฉีดทั้งแบบไม่ใช้เข็มและแบบใช้เข็มมีค่าการหลั่งความเข้มข้นของฮอร์โมนคอร์ติซอล ที่เป็นฮอร์โมนมีความเครียดของสุกรที่หลั่งออกมามีค่าไม่ต่างกันมาก

(a) Needle-free injector

(b) Control

ภาพที่ 10 รอยบาดแผลจากการฉีดยา (a) แบบไม่ใช้เข็ม (b) แบบใช้เข็ม

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาพัฒนาและออกแบบอุปกรณ์ฉีดยาด้วยลำเจ็ตแบบไม่ใช้เข็มโดยใช้พลังงานไฟฟ้า และการทดสอบการใช้งานของอุปกรณ์ฉีดยาสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1) อุปกรณ์ฉีดยาด้วยลำเจ็ตแบบไม่ใช้เข็มโดยใช้พลังงานไฟฟ้าที่ใช้หลักการขับด้วยการกระแทกของชุดแม่เหล็กไฟฟ้า (Impact driving method) ในการขับดันลำเจ็ตยาสามารถ

สร้างความดันกระแทกและความเร็วของลำเจ็ตยาในอากาศสูงสุดเท่ากับ 37 MPa และ 233.33 m/s ตามลำดับที่ปริมาณยา 0.1 mL และปริมาณยาที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้แรงดันกระแทกและความเร็วลำเจ็ตยาลดลงตามลำดับ

2) เมื่อทำการทดสอบการฉีดลำเจ็ตยาเข้าสู่เนื้อสุกรแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ฉีดยาด้วยลำเจ็ตแบบไม่ใช้เข็มโดยใช้พลังงานไฟฟ้านั้นมีความสามารถส่งยาเข้าสู่ชั้นผิวหนังได้ถึงชั้นกล้ามเนื้อของสุกร

3) หลังจากทำการทดสอบการฉีดลำเจ็ตยาเข้าสู่เนื้อสุกร เมื่อนำมาวิเคราะห์ความเครียดของสุกรแล้ว แสดงให้เห็นว่าการฉีดทั้งแบบไม่ใช้เข็มและแบบใช้เข็มนั้น การหลั่งฮอร์โมนคอร์ติซอลของสุกรมีความเครียดไม่แตกต่างกัน

4) อุปกรณ์ฉีดยาด้วยลำเจ็ตแบบไม่ใช้เข็มโดยใช้พลังงานไฟฟ้าสามารถนำไปเป็นข้อมูลเพื่อพัฒนาและออกแบบให้สามารถใช้ในการฉีดวัคซีนหรือยาในฟาร์มสุกรได้จริงในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

1) งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีงบประมาณสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund, FF) ประจำปีงบประมาณ 2565-2566

2) ขอขอบคุณคณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์การขอใบรับรองการอนุมัติให้ดำเนินการเลี้ยงสัตว์และสัตว์ (ID # 06/2566/IACUC) และสถานที่โรงเรือนทดลองเลี้ยงสุกรในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

Arora, A., Hakim, I., Baxter, J., Rathnasingham, R., Srinivasan, R. and Fletcher, D.A. (2007). Needle-free delivery of macromolecules across the skin by nanoliter-volume pulsed microjets. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 104*, 4255-4260.

Baxter, J. and Samir, M. (2005). Jet-induced skin puncture and its impact on needle-free jet injections: experimental studies and a predictive model. *Journal of Controlled Release, 106*(3), 361-373.

Bowden, F. P. and Brunton, J. H. (1958). Damage to solids by liquid impact at supersonics speeds. *Nature*, *181*, 873-875.

Bowden, F. P. and Brunton, J. H. (1961). “The deformation of solids by liquid impact at supersonic speeds”. *Proceedings of the Royal Society of London*, *263* (series A), 433-450.

Brown, J. L., Walker, S. and Steinman, K. (2015). Effect of feeding longan dimocarpus longan residue before estrus synchronization on reproductive performance in Ewes. *World Journal of Agricultural Research*, *3*(3), 113-118.

Hirono, T., Uenohara, H., Komatsu, M., Nakagawa, A., Satoh, M., Ohyama, H., Takayama, K., and Yoshimoto, T. (2003). Holmium YAG laser-induced liquid jet dissector: A novel prototype device for dissection organs without t impairing vessels. *Minim Invas Neurosurg*, *46*, 121.

Nakagawa, A., Hirano, T., Komatsu, M., Sato, M., Uenohara, H., Ohgawa, H., Kusada, Y., Shirane, R., Takayama, K. and Yoshimoto, T. (2002). Holmium: YAG laser-induced liquid jet knife: possible novel method for dissection. *Lasers in Surgery and Medicine*, *31*, 125.

Ohki, T., Nakagawa, A., Tominaga, T. and Takayama, K. (2004). Experimental application of pulsed Ho: YAG laser-induced liquid jet as a novel device for rigid neuroendoscope. *Lasers in Surgery and Medicine*, *34*, 227.

Ohtani, K. Numata, D. Takayama, K. Kobayashi and T. Okatsu, K. (2009). Experimental study of underwater rock drilling using a pulsed Ho: YAG laser-indued jets. *Shock wave*, *19*, 403-412.

Rau, H. G., Buttler, E. R., Baretton, G. H., Schardey, M. and Friedrich W. Schildberg. (1997). Jet-cutting supported by high frequency current: new technique for hepatic surgery. *WORLD Journal of SURGERY*, *21*(3), 254-260.

Soyama, H., Yanauchi, Y., Sato, K., Ikohagi, T., Oba, R. and Oshima, R. (1996). High-speed observation of ultrahigh-speed submerged water jets. *Experimental Thermal and Fluid Science*, *12*, 411-416.

Stachowiak, J. C., Muhlen, M. G., Li, T. H., Jalilian, L., Parekh, S. H. and Fletcher, D. A. (2007). Piezoelectric control of needle-free transdermal drug delivery. *Journal of Controlled Release*, *124*, 88-97.

Taberner, A., Hogan, N. C. and Hunter, I. W. (2012). Needle-free jet injection using real-time controlled linear Lorentz-force actuators. *Medical Engineering & Physics*, *34* (9), 1228-1235.