

สมรรถนะของชุดขับโดยใช้แม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อการส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็ม Performance of Electromagnetic Actuator for Needle-Free Jet Injection

กิตติพงษ์ ศรีพนากุล และ อนิรุตต์ มัทธจักร์

ห้องปฏิบัติการการประยุกต์ใช้ลำเจ็ทและการเผาไหม้ (CJARL) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ตำบลเมืองศรีไค อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190

E-mail: gittiphong.sr.57@ubu.ac.th, Anirut.M@ubu.ac.th Tel: 0-4535-3309

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและศึกษาสมรรถนะของชุดขับโดยใช้แม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อใช้เป็นชุดขับในการผลิตลำเจ็ท สำหรับการส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็ม โดยศึกษาอิทธิพลของแรงดันไฟฟ้า วัสดุที่ใช้ทำแกนขดลวดทองแดง (อลูมิเนียมและพลาสติก) วิธีการผลิตลำเจ็ท (วิธีแบบขับเคลื่อนและวิธีแบบกระแทก) ต่อความเร็วของขดลวดทองแดงและความเร็วของลำเจ็ทที่ตรวจวัดโดยวิธี Laser beam interruption นอกจากนี้ยังได้ศึกษาลักษณะของลำเจ็ทที่เกิดขึ้น เบื้องต้นโดยการถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูงอีกด้วย จากการศึกษาพบว่า เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับขดลวดทองแดงเพิ่มขึ้น จะทำให้ขดลวดทองแดงเคลื่อนที่เร็วขึ้น โดยความเร็วของขดลวดทองแดงที่ใช้แกนอลูมิเนียมและพลาสติกมีความเร็วสูงสุดที่แรงดันไฟฟ้า 500 โวลต์ มีค่าเท่ากับ 2.55 m/s และ 4.59 m/s ซึ่งสามารถทำให้เกิดความเร็วของลำเจ็ทสูงสุดเท่ากับ 200 m/s และ 190 m/s ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า ความเร็วของลำเจ็ท ที่ใช้วิธีแบบขับเคลื่อนจะขึ้นอยู่กับความเร็วของขดลวดทองแดง ในขณะที่ความเร็วของลำเจ็ทที่ใช้วิธีแบบกระแทกจะขึ้นอยู่กับโมเมนตัม ซึ่ง สมรรถนะของชุดขับโดยใช้แม่เหล็กไฟฟ้ามีศักยภาพเพียงพอในการนำไปประยุกต์ใช้ในการส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็ม

คำหลัก: ชุดขับแบบแม่เหล็กไฟฟ้า, การส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็ม, Laser beam interruption

Abstract

This research aims to study the design and performance of the electromagnetic actuator for drug delivery using needleless free injection. Effects of voltage, the bobbin materials (aluminum and plastic) and jet generation methods (driving method and impact method) on coil and jet velocities are studied. The coil and jet velocities were measured by laser beam interruption method. The preliminary characteristics of generated jets were visualized by high-speed video camera. From the experimental results, it was found that the coil velocity increased when the voltage supplying to the coil increased. The maximum coil velocity at 500 volt of aluminum bobbin and plastics bobbin are 2.55 m/s and 4.59 m/s, respectively, which generated the jet velocity of 200 m/s and 190 m/s, respectively. Moreover, the jet velocity generated by the driving method depended on the coil velocity, while it generated by impact method depended on the momentum of the coil. It can be concluded that this actuator has enough potential for needleless free injection.

Keywords: Electromagnetic actuator, Needle-free jet injection, Laser beam interruption

AME-06

1. บทนำ

ในปัจจุบันการศึกษาลำ เจ็ท ของเหลว ความเร็วสูง (High speed liquid jet) ได้มีการศึกษาอย่างต่อเนื่อง เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมสมัยใหม่ เช่น การเกิด cavitations [1, 2] ประยุกต์ใช้กับเครื่องดับเพลิง (Fire extinguisher) ประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีการตัดด้วยลำเจ็ท (Jet cutting technology) การทำความสะอาดด้วยลำเจ็ท (Material cleaning by jets) การเจาะอุโมงค์ด้วยลำเจ็ท (Mining and tunneling by means of high-speed jet impingements) [3, 4] การฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง (Fuel direct injection) [5-7] เป็นต้น และนอกจากทางด้านวิศวกรรมแล้ว ยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้งาน ทางด้านการแพทย์ได้อีกด้วย เช่น ใช้ลำ เจ็ท ในการผ่าตัด (Micro jet cutting) [8] ใช้ลำเจ็ท ในการทำลายก้อนเลือดที่อุดตันในเส้นเลือด (Blood clot dissolution) [9-11] และที่นิยมมากในปัจจุบัน คือ ใช้ในการ ส่งถ่ายยา ด้วยลำ เจ็ท [12, 13] โดยการทำให้ยากลายเป็นลำเจ็ท ที่มีความเร็วประมาณ 100-200 m/s ซึ่งสามารถ จะชั้นผิวหนัง ได้ ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องใช้เข็มฉีดยาอีกต่อไป

ปัจจุบันการส่งถ่ายยาด้วย ลำเจ็ท ส่วนใหญ่จะใช้ต้นกำลังในการผลิตลำเจ็ท จากการสะสมพลังงาน ของสปริง [14] ซึ่งข้อดีคือ อุปกรณ์มีขนาดเล็ก ทำให้สะดวกในการใช้งาน แต่ข้อเสียคือ เมื่อต้องการเพิ่มความเร็วของลำเจ็ท จะต้องทำการปรับแต่งอุปกรณ์ใหม่ ซึ่งมีความยุ่งยาก และที่สำคัญ เมื่อใช้งานบ่อยครั้ง จะทำให้ความแข็งแรงของสปริงลดลงตามอายุการใช้งาน ทำให้ความเร็วของลำเจ็ท ที่ผลิตได้ลดลง ซึ่งส่งผลกระทบต่อส่งถ่ายยา ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้มีการศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์ส่งถ่ายยาด้วยลำเจ็ท ในส่วนของชุดขับ ให้สามารถควบคุมความเร็วของลำเจ็ทได้ และเมื่อไม่นานมานี้ Stachowiak J.C. และคณะ [13] ได้ใช้ระบบไฟฟ้าเป็นต้นกำลังในการผลิตลำ เจ็ท โดยใช้หลักการทางกายภาพของ Piezoelectric คือ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะทำให้ Piezoelectric ยืดหดตัว จึงใช้หลักการนี้เป็น ต้นกำลังของ ชุดขับ (Actuator) ในการผลิตลำเจ็ท ซึ่งข้อดีคือ สามารถควบคุมความเร็ว และความลึกของลำเจ็ทได้ แต่มีข้อเสียคือ ปริมาณยาที่ใช้ในการส่งถ่าย มีปริมาณน้อย อยู่ในระดับนาโนลิตรถึงไมโครลิตรเท่านั้น ทำให้ต้องทำการส่งถ่ายยาหลายครั้ง

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึง มีแนวคิดในการออกแบบชุดขับ (Actuator) โดยใช้หลักการของ แม่เหล็ก ไฟฟ้า เพื่อใช้ในการ

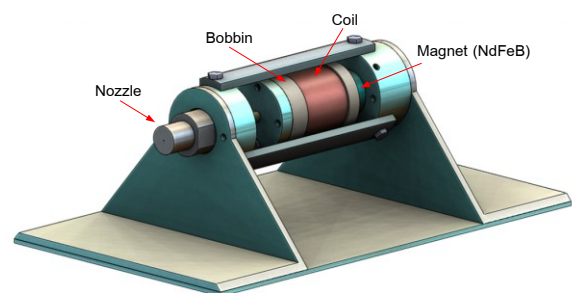
การผลิตลำเจ็ท ซึ่งข้อดีของชุดขับนี้ คือ ความเร็วของลำเจ็ทจะคงที่ตลอดอายุการใช้งาน และยังสามารถควบคุมความเร็วของลำเจ็ท ได้อีกด้วย โดยในการออกแบบ ชุดขับ จะใช้หลักการ การตัดกันของสนามแม่เหล็ก ระหว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็กถาวร ซึ่งการตัดกันของสนามแม่เหล็กทั้งสอง จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ขึ้น จึงใช้การเคลื่อนที่นี้ไปขับเคลื่อน หรือกระแทกของเหลวที่บรรจุในหัวฉีด แล้วเกิดเป็นลำเจ็ทขึ้น

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาอิทธิพลของแรงดันไฟฟ้า วัสดุที่ใช้ทำแกนขดลวดทองแดง ระหว่างอลูมิเนียม (Aluminum) กับพลาสติกซูเปอร์ไลน์ (Superline plastic) วิธีการผลิตลำเจ็ท ระหว่างวิธีแบบขับเคลื่อน (Drive) กับวิธีแบบกระแทก (Impact) ซึ่งอิทธิพลเหล่านี้จะมีผลต่อความเร็วของขดลวดทองแดง และความเร็วของลำเจ็ทที่ผลิตได้ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาลักษณะของลำเจ็ทที่เกิดขึ้นด้วย ในการศึกษา นี้จะใช้น้ำปริมาตร 1 mL เป็นของเหลวในขั้นตอนการผลิตลำเจ็ท

2. การทดลอง

2.1 ชุดทดลอง

ในการศึกษานี้ได้ทำการออกแบบ และสร้าง ชุดขับ (Actuator) ที่ใช้ในการผลิตลำเจ็ท ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นสามส่วนสำคัญ ดังนี้

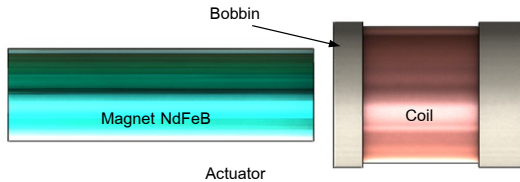


รูปที่ 1 อุปกรณ์ส่งถ่ายยาด้วยลำเจ็ท ที่ใช้ชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้า

1. ส่วนของชุดขับ (Actuator) การออกแบบในส่วนนี้จะใช้หลักการ การตัดกันของสนามแม่เหล็ก ระหว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็กถาวร ซึ่งการตัดกันของสนามแม่เหล็กทั้งสอง จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ขึ้น จึงใช้การเคลื่อนที่นี้ไปขับเคลื่อน หรือกระแทกของเหลวที่บรรจุในหัวฉีด (Nozzle) แล้ว เกิดเป็นลำเจ็ทขึ้น โดย ส่วนนี้ประกอบด้วย ขดลวดทองแดง (Coil) ที่พันรอบแกน

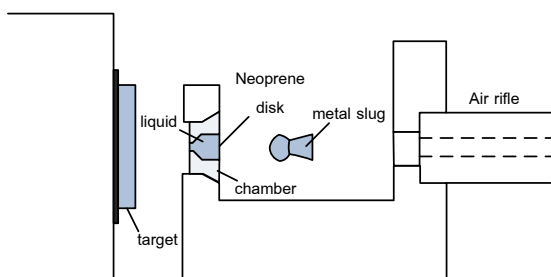
AME-06

ขดลวดทองแดง (Bobbin) จำนวน 1,600 รอบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นลวดทองแดงเท่ากับ 0.32 mm และแม่เหล็กถาวรชนิด NdFeB หรือเรียกว่าแม่เหล็กแรงสูง โดยมีรายละเอียดของส่วนประกอบดังแสดงในรูปที่ 2

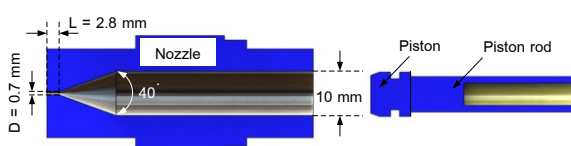


รูปที่ 2 ชุดขับ (Actuator)

2. หัวฉีด (Nozzle) หรือส่วนผลิตลำเจ็ท ในการผลิตลำเจ็ทจะใช้หลักการ Impact driven method [15, 16] ดังแสดงในรูปที่ 3 กล่าวคือ จะใช้การเคลื่อนที่ของขดลวดทองแดง (Coil) ไปขับเคลื่อน หรือกระแทกของเหลวที่บรรจุในหัวฉีด แทนการใช้ลูกกระสุน (Metal slug) ในส่วนนี้ประกอบด้วย หัวฉีด (Nozzle) ลูกสูบ (Piston) และก้านสูบ (Piston rod) ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูหัวฉีด (D) เท่ากับ 0.7 mm ค่า L/D เท่ากับ 4.0 และมุมกรวยเท่ากับ 40° เนื่องจากการศึกษาที่ผ่านมา [17] พบว่า ขนาดและลักษณะของหัวฉีดดังกล่าวสามารถผลิตลำเจ็ทได้ความเร็วสูงที่สุด ดังนั้นจึงได้ใช้องค์ความรู้นี้เป็นพื้นฐานในการออกแบบขนาดของหัวฉีดเพื่อใช้ในการศึกษาทางด้านลำเจ็ทความเร็วสูง เรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน [18-21]



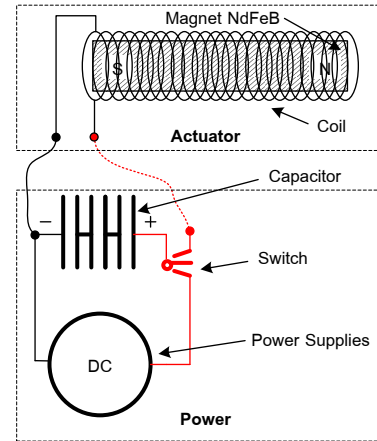
รูปที่ 3 Impact driven method [15, 16]



รูปที่ 4 หัวฉีด หรือส่วนผลิตลำเจ็ท

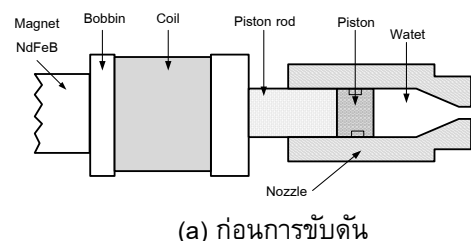
3. ส่วนของต้นกำลัง (Power) ทำหน้าที่ในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับขดลวดทองแดง เพื่อใช้ในการสร้าง

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดทองแดง ในส่วนนี้ประกอบด้วย ตัวเก็บประจุ (Capacitor) ขนาด 5,400 μF , 600 VDC และเครื่องพาวเวอร์ซัพพลาย (Power supply) การต่อวงจรไฟฟ้าของส่วนต้นกำลังและส่วนของชุดขับ ดังแสดงในรูปที่ 5

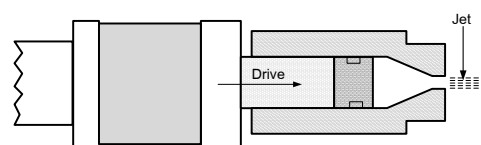


รูปที่ 5 วงจรไฟฟ้าของอุปกรณ์ส่งถ่ายด้วยลำเจ็ทที่ใช้ชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้า

ในการทำงานของชุดทดลอง หรือ อุปกรณ์ส่งถ่ายด้วยลำเจ็ทที่ใช้ชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้า เริ่มจากใช้เครื่องพาวเวอร์ซัพพลายทำการประจุไฟฟ้าให้กับตัวเก็บประจุ (Capacitor) จนถึงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการ จากนั้นทำการปล่อย แรงดันไฟฟ้าจาก ตัวเก็บประจุ ให้กับขดลวดทองแดง เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้น ตัดกับสนามแม่เหล็กถาวร ของแม่เหล็กแรงสูง จะทำให้ขดลวดทองแดงเกิดการเคลื่อนที่ไปขับเคลื่อน (Drive) หรือกระแทก (Impact) กับของเหลวที่บรรจุภายในหัวฉีด (Nozzle) ทำให้ของเหลวเกิดการเคลื่อนที่ผ่านหัวฉีดอย่างรวดเร็ว แล้วเกิดเป็นลำเจ็ท (Jet) ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6 และรูปที่ 7



(a) ก่อนการขับเคลื่อน

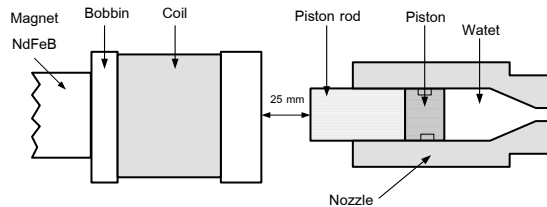


(b) ระหว่างการขับเคลื่อน

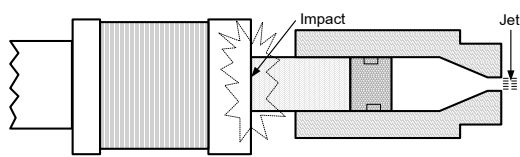
รูปที่ 6 วิธีการผลิตลำเจ็ทแบบขับเคลื่อน (Driving method)

AME-06

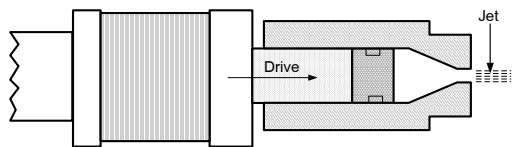
รูปที่ 6 แสดงวิธีการผลิตลำเจ็ทแบบขับเคลื่อน (Driving method) โดยมีหลักการ คือ จะใช้การเคลื่อนที่ของขดลวดทองแดง (Coil) ที่เชื่อมต่อกับก้านของลูกสูบ (Piston rod) ดังแสดงในรูปที่ 5(a) เคลื่อนที่เข้า ขั้วดันของเหลวที่อยู่ภายในหัวฉีด แล้วเกิดเป็นลำเจ็ทขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5(b)



(a) ก่อนการกระแทก



(b) ขณะเกิดการกระแทก



(c) ระหว่างการขับเคลื่อน

รูปที่ 7 วิธีการผลิตลำเจ็ทแบบกระแทก (Impact method)

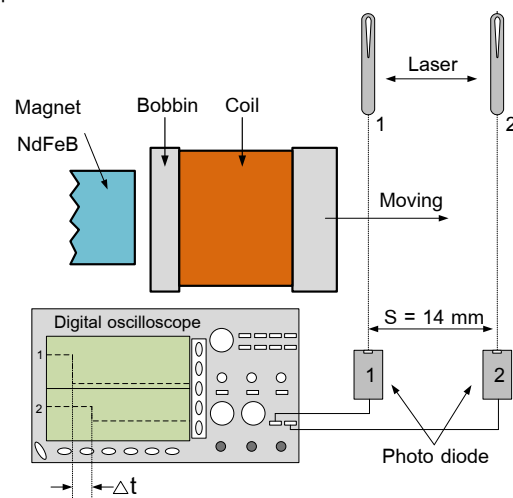
รูปที่ 7 แสดงวิธีการผลิตลำเจ็ทแบบกระแทก (Impact method) โดยมีหลักการ คือ จะใช้การเคลื่อนที่ของขดลวดทองแดง เคลื่อนที่เข้ากระแทกกับก้านของลูกสูบ (Piston rod) โดยมีระยะการกระแทกเท่ากับ 25 mm ดังแสดงในรูปที่ 7(a) หลังจากเกิดการกระแทก ดังแสดงในรูปที่ 7(b) ขดลวดทองแดงก็เคลื่อนที่เข้าขั้วดันของเหลวที่อยู่ภายในหัวฉีด แล้วเกิดเป็นลำเจ็ทขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 7(c)

2.2 การวัดความเร็ว

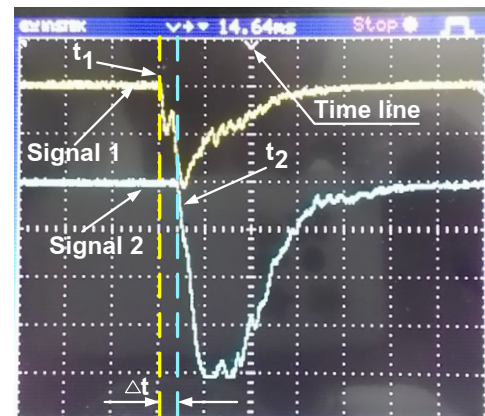
ในการตรวจวัดความเร็วของขดลวดที่เคลื่อนที่ และความเร็วของลำเจ็ทจะใช้วิธี Laser beam interruption ดังแสดงในรูปที่ 8(a) โดยจะใช้การเคลื่อนที่ของวัตถุตัดกับแสงเลเซอร์ ซึ่งมีเลเซอร์จำนวน 2 ตัว ห่างกัน 14 mm และใช้ Photodiode จำนวน 2 ตัว เป็นอุปกรณ์รับแสงจากแสงเลเซอร์ โดย Photodiode จะเชื่อมต่อกับเครื่อง Digital oscilloscope ในช่องสัญญาณที่ 1 และ 2 เมื่อวัตถุเคลื่อนที่ตัดกับแสงเลเซอร์ ตัวที่ 1 และ 2 จะทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้าแสดงขึ้น บนหน้าจอของ Digital oscilloscope ดังแสดงในรูปที่ 8(b) ซึ่งสัญญาณทั้งสองที่

เกิดขึ้นสามารถทราบผลต่างของเวลาที่เกิดสัญญาณได้จากเครื่อง Digital oscilloscope ดังนั้นในการคำนวณหาความเร็วของวัตถุที่เคลื่อนที่ตัดกับแสงเลเซอร์จะสามารถหาได้จากสมการ $V = S/\Delta t$ เมื่อ V คือ ความเร็วของวัตถุ มีหน่วยเป็น m/s, S คือ ระยะห่างของเลเซอร์ (14 mm) มีหน่วยเป็น m และ Δt คือ ผลต่างของเวลาที่เกิดสัญญาณที่ 1 และ 2 มีหน่วยเป็น วินาที (s)

นอกจากนี้ยังทำการถ่ายภาพของลำเจ็ทที่ผลิตได้ โดยใช้กล้อง High speed video camera รุ่น APX RS ของ Photron อัตราการถ่ายภาพ 10,000 fps เพื่อศึกษาพฤติกรรมของลำเจ็ทที่เกิดขึ้นอีกด้วย



(a) ไดอะแกรมการวัดความเร็ว



(b) ตัวอย่างสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากการวัดความเร็ว
รูปที่ 8 Laser beam interruption technique

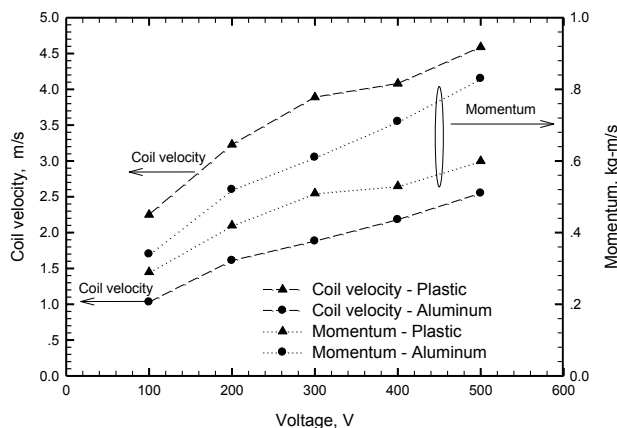
3. ผลการศึกษา

3.1 ความเร็วของขดลวดทองแดง

จากรูปที่ 9 แสดงอิทธิพลของแรงดัน ไฟฟ้าต่อความเร็วของขดลวดทองแดง และโมเมนต์ ของแกนขดลวดที่ทำจากอลูมิเนียม และพลาสติก พบว่า เมื่อแรงดันไฟฟ้า (Voltage) เพิ่มขึ้น จะทำให้ความเร็วของขด

AME-06

ลวดทองแดง (Coil velocity) ที่ใช้แกนขดลวดที่ทำจากอลูมิเนียมและพลาสติก จะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจาก ขดลวดทองแดงเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ถ้ามีแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ขดลวดทองแดงมาก ขดลวดทองแดงก็จะสร้างสนามแม่เหล็ก ไฟฟ้ามาก ทำให้ขดลวดทองแดง มีความเร็วสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาที่แรงดันไฟฟ้าเดียวกัน พบว่า ความเร็วของขดลวดทองแดงที่ใช้แกนพลาสติกมีความเร็วสูงกว่าขดลวดทองแดงที่ใช้แกนอลูมิเนียม เนื่องจากแกนขดลวดที่ทำจากอลูมิเนียมมีน้ำหนักมาก ความเร็วจึงสูญเสียไปกับความเฉื่อยของน้ำหนักที่มากกว่า โดยความเร็วสูงสุดของขดลวดทองแดงที่ใช้แกนอลูมิเนียม และพลาสติกมีค่าเท่ากับ 2.55 m/s และ 4.59 m/s ที่แรงดันไฟฟ้า 500 โวลต์ ตามลำดับ



รูปที่ 9 อิทธิพลของแรงดันไฟฟ้าต่อความเร็วของขดลวดทองแดงและโมเมนตัม ของแกนขดลวดที่ทำจากอลูมิเนียมและพลาสติก

เมื่อพิจารณาแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น จะทำให้โมเมนตัม (Momentum เท่ากับ mV เมื่อ m คือ มวลรวมของขดลวดทองแดงกับแกนขดลวดทองแดง มีหน่วยเป็น g ส่วน V คือ ความเร็วของขดลวดทองแดงที่เคลื่อนที่ มีหน่วยเป็น m/s) ของขดลวดทองแดงที่ใช้แกนอลูมิเนียมและพลาสติกจะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากความเร็วของขดลวดทองแดงมีค่าสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาที่แรงดันไฟฟ้าเดียวกัน พบว่า โมเมนตัมของขดลวดทองแดงที่ใช้แกนอลูมิเนียมจะมีค่าสูงกว่าโมเมนตัม ขดลวดทองแดงที่ใช้แกนพลาสติก เนื่องจากแกนขดลวดที่ทำจากอลูมิเนียมมีน้ำหนักมากกว่า แกนขดลวดที่ทำจากพลาสติก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 324.20 g และ 131.20 g ตามลำดับ ถึงแม้ว่าความเร็วของขดลวดทองแดงที่ใช้แกนอลูมิเนียมจะต่ำกว่า

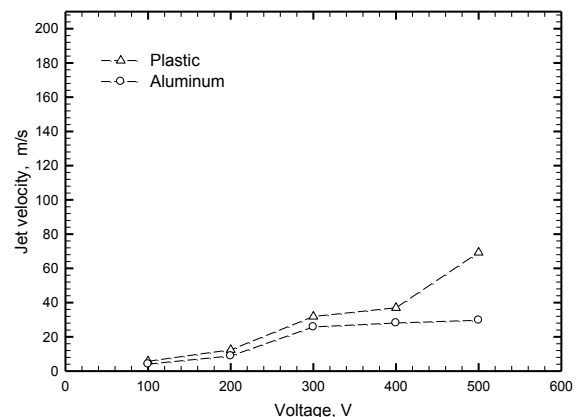
ก็ตาม โดยโมเมนตัมสูงสุดของขดลวดทองแดงที่ใช้แกนอลูมิเนียมและพลาสติกมีค่าเท่ากับ 0.83 kg-m/s และ 0.60 kg-m/s ที่แรงดันไฟฟ้า 500 โวลต์ตามลำดับ

3.2 ความเร็วของลำเจ็ท

ในการศึกษา นี้ได้ใช้วิธี การผลิตลำเจ็ท สองแบบ คือแบบขับเคลื่อน (Driving method) และแบบกระทบ (Impact method) ดังนั้นผลการศึกษาก็จะแบ่งตามวิธีการผลิตลำเจ็ท ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

3.2.1 การผลิตลำเจ็ทโดยใช้วิธีแบบขับเคลื่อน

รูปที่ 10 แสดงอิทธิพลของแรงดันไฟฟ้าต่อความเร็วของลำเจ็ท ของแกนขดลวดที่ทำจากอลูมิเนียม และพลาสติก โดยใช้วิธีแบบขับเคลื่อน พบว่า เมื่อแรงดันไฟฟ้า (Voltage) เพิ่มขึ้น จะทำให้ความเร็วของลำเจ็ท (Jet velocity) ของ แกนขดลวดที่ทำจากอลูมิเนียม และพลาสติก มีค่าสูงขึ้น และ เมื่อพิจารณาที่แรงดันไฟฟ้าเดียวกัน พบว่า ความเร็วของลำเจ็ทที่ใช้แกนขดลวดอลูมิเนียม มีความเร็วสูงกว่าความเร็วของลำเจ็ทที่ใช้ แกนขดลวดอลูมิเนียม เนื่องจากความเร็วของขดลวดทองแดงที่ใช้แกนพลาสติกมีค่าสูงกว่า ดังแสดงในรูปที่ 9 โดยความเร็วของลำเจ็ทสูงสุดของ แกนขดลวดอลูมิเนียมและพลาสติกมีค่าเท่ากับ 29.66 m/s และ 69.23 m/s ที่แรงดันไฟฟ้า 500 โวลต์ ตามลำดับ



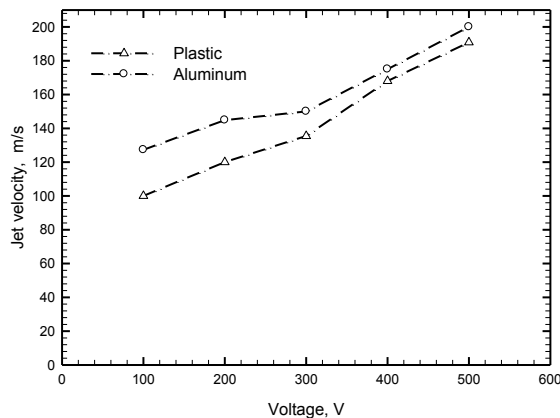
รูปที่ 10 อิทธิพลของแรงดันไฟฟ้าต่อความเร็วของลำเจ็ทของแกนขดลวดที่ทำจากอลูมิเนียมและพลาสติก โดยใช้วิธีแบบขับเคลื่อน

3.2.2 การผลิตลำเจ็ทโดยใช้วิธีแบบกระทบ

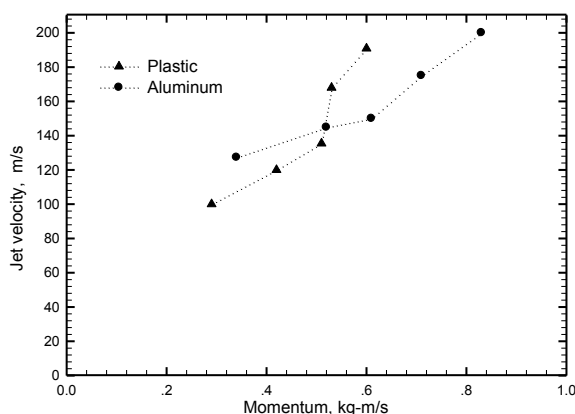
รูปที่ 11 แสดงอิทธิพลของแรงดันไฟฟ้าต่อความเร็วของลำเจ็ท ของแกนขดลวดที่ทำจากอลูมิเนียม และพลาสติก โดยใช้วิธีแบบกระทบ พบว่า เมื่อแรงดันไฟฟ้า (Voltage) เพิ่มขึ้น ทำให้ความเร็วของลำเจ็ท (Jet

AME-06

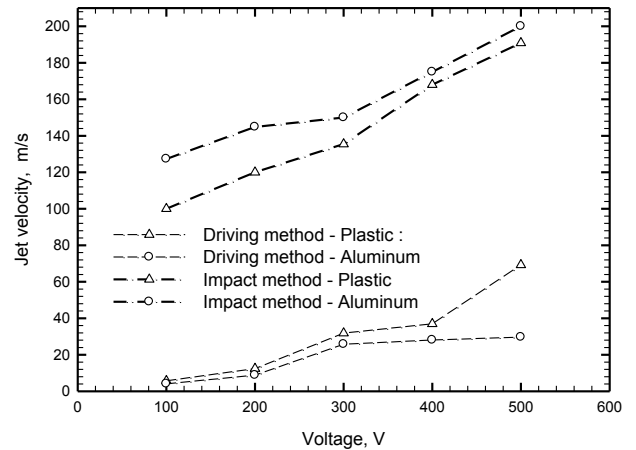
velocity) ของแกนขดลวดที่ทำจากอลูมิเนียมและพลาสติก มีค่าสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาที่แรงดันไฟฟ้าเดียวกัน พบว่า ความเร็วของลำเจ็ทที่ใช้ แกนขดลวดอลูมิเนียมมีความเร็ว สูงกว่าความเร็วของลำเจ็ทที่ใช้ แกนขดลวด พลาสติก เนื่องจากโมเมนตัม (Momentum) ของขดลวดทองแดงที่ ใช้แกนอลูมิเนียมมีค่าสูงกว่าโมเมนตัมของขด ลวดทองแดงที่ใช้แกนพลาสติก ดังแสดงในรูปที่ 9 ซึ่ง แตกต่างจากความเร็วของลำเจ็ท ที่ผลิตได้จากวิธีแบบขับ ดัน ดังแสดงในรูปที่ 10 เนื่องจากการผลิตลำเจ็ทโดยใช้วิธี แบบกระแทก จะอาศัยการถ่ายโอนโมเมนตัม ดังนั้นเมื่อ โมเมนตัมมีค่าสูงขึ้นจึงทำให้ความเร็วของลำเจ็ทที่ผลิตได้ มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 11 อิทธิพลของแรงดันไฟฟ้าต่อความเร็วของลำเจ็ท ของแกนขดลวดที่ทำจากอลูมิเนียมและพลาสติก โดยใช้ วิธีแบบกระแทก



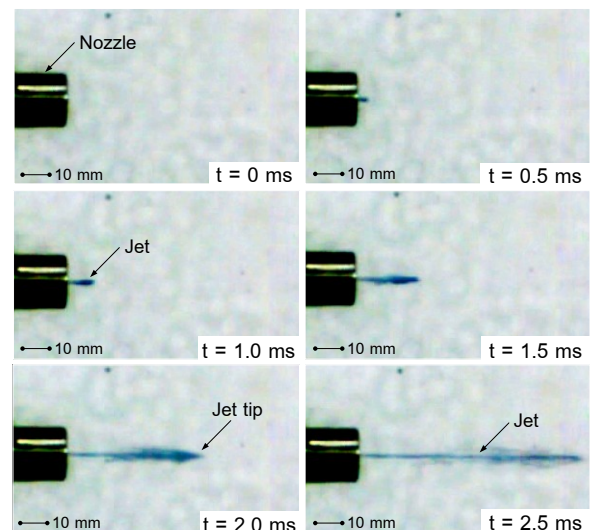
รูปที่ 12 อิทธิพลของโมเมนตัมต่อความเร็วของลำเจ็ท ของแกนขดลวดที่ทำจากอลูมิเนียมและพลาสติก โดยใช้ วิธีแบบกระแทก



รูปที่ 13 การเปรียบเทียบความเร็วของลำเจ็ทจากวิธีแบบ ขับดันและวิธีแบบกระแทก ของแกนขดลวดที่ทำจาก อลูมิเนียมและพลาสติก

รูปที่ 13 แสดงการเปรียบเทียบความเร็วของลำเจ็ท จากวิธีแบบขับดันและวิธีแบบกระแทก ของแกนขดลวดที่ ทำจากอลูมิเนียมและพลาสติก พบว่า เมื่อแรงดันไฟฟ้า เพิ่มขึ้น (Voltage) ทำให้ความเร็วของลำเจ็ท (Jet velocity) ที่ใช้แกนขดลวดอลูมิเนียมและพลาสติก ของวิธี แบบขับดันและวิธีแบบกระแทกมีค่าสูงขึ้น ด้วยสาเหตุที่ได้ กล่าวไว้แล้ว และเมื่อพิจารณาที่ชนิดแกนของขด ลวดทองแดงชนิดเดียวกัน พบว่า วิธีผลิตลำเจ็ทแบบ กระแทกจะผลิตลำเจ็ทได้ความเร็วสูงกว่าวิธีแบบขับดัน

3.3 ลักษณะของลำเจ็ท

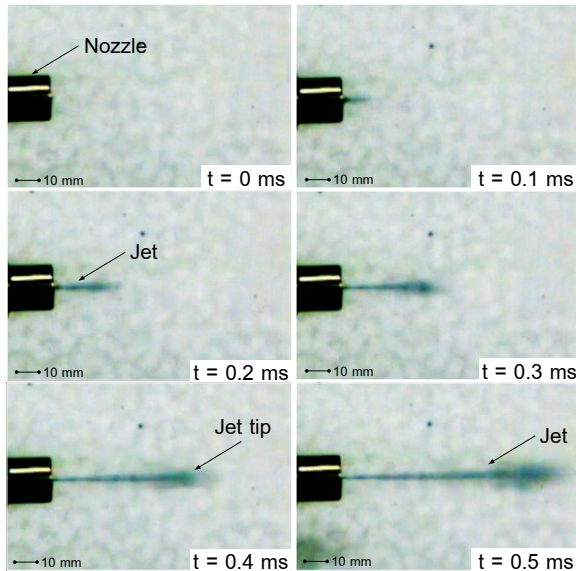


รูปที่ 14 ลักษณะของลำเจ็ทที่ผลิตได้ โดยใช้วิธีแบบขับดัน

จากการถ่ายภาพของลำเจ็ทด้วยกล้องวีดีโอความเร็ว สูง พบว่า ลักษณะของลำเจ็ทที่ผลิตได้จากวิธีแบบขับดัน ดังแสดงในรูปที่ 14 จะมีลักษณะเป็นลำเจ็ทตรงยาวตลอด

AME-06

การฉีด ซึ่งต่างกับวิธีการผลิตลำเจ็ทแบบกระแทก ซึ่งลำเจ็ทที่ผลิตได้จะมีลักษณะกระจายเป็นละอองตรงส่วนปลายหรือส่วนหัว (Jet tip) ของลำเจ็ท ดังแสดงในรูปที่ 15 และมีหลายลำเจ็ทที่พุ่งออกมาจากหัวฉีด



รูปที่ 15 ลักษณะของลำเจ็ทที่ผลิตได้ โดยใช้วิธีแบบกระแทก

4. สรุปผลการศึกษา

จากการออกแบบ สร้าง และ ศึกษาสมรรถนะของชุดขับที่ใช้แม่เหล็กไฟฟ้าในการผลิตลำเจ็ทเพื่อ ใช้ในการ ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็ม สามารถสรุปได้ ดังนี้

1. เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ขดลวดทองแดงเพิ่มขึ้น จะทำให้ความเร็วของขดลวดทองแดง และโมเมนตัมเพิ่มขึ้น ของแกนขดลวดที่ทำจากอลูมิเนียม และแกนพลาสติก
2. เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ขดลวดทองแดงเพิ่มขึ้น จะทำให้ความเร็วของลำเจ็ทเพิ่มขึ้น ของแกนขดลวดที่ทำจากอลูมิเนียมและแกนพลาสติก
3. ความเร็วของลำเจ็ท ของแกนขดลวดที่ทำจากพลาสติกจะมีความเร็วสูงกว่าแกนขดลวดที่ทำจากอลูมิเนียม สำหรับวิธีแบบขับเคลื่อน ส่วนวิธี แบบ กระแทก ความเร็วของลำเจ็ทของแกนขดลวดที่ทำจากอลูมิเนียมจะมีความเร็วสูงกว่าแกนขดลวดที่ทำจากพลาสติก
4. ความเร็วของขดลวดทองแดงจะมีผลต่อความเร็วของลำเจ็ท สำหรับวิธีแบบขับเคลื่อน แต่วิธีแบบกระแทก โมเมนตัมจะมีผลกับความเร็วของลำเจ็ท

5. ความเร็วของลำเจ็ทสูงสุดสำหรับวิธีแบบขับเคลื่อนของแกนขดลวดที่ทำจากอลูมิเนียม และแกนพลาสติกมีค่าเท่ากับ 29.66 m/s และ 69.23 m/s ตามลำดับ ส่วนวิธีแบบกระแทกความเร็วของลำเจ็ทสูงสุดของแกนขดลวดที่ทำจากอลูมิเนียม และแกนพลาสติก มีค่าเท่ากับ 200 m/s และ 190 m/s ตามลำดับ

6. จากการศึกษาสมรรถนะของชุดขับที่ใช้แม่เหล็กไฟฟ้า พบว่า ชุดขับนี้มีศักยภาพเพียงพอสำหรับนำมาประยุกต์ใช้ทำอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่เข็ม เนื่องจากความเร็วของลำเจ็ทที่ผลิตได้เพียงพอสำหรับการส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็ม แต่อย่างไรก็ตาม ยังจำเป็นต้องทำการศึกษาและพัฒนาเพิ่มเติมต่อไปในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการการประยุกต์ใช้ลำเจ็ทและการเผาไหม้ (CJARL) ภาควิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย สัญญาเลขที่ RSA5780001 ที่ให้ทุนสนับสนุน และภาควิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานวิทยาเขตสุรินทร์ ที่ อนุเคราะห์ กล้องวิดีโอความเร็วสูงในการถ่ายภาพลำเจ็ท

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Lesser, M., Field, J. (1991). Studies in shock waves, liquid impact, jets and cavitation, 1991, pp. 61–72.
- [2] Bourne, N.K., Field, J.E. (1995). A high-speed photographic study of cavitation damage, *J App Physics*, vol. 78, 1995, pp. 4423-4427.
- [3] Obara, T., Bourne, N.K., Field, J.E. (1995). Liquid-jet impact on liquid and solid surfaces, *Wear*, vol. 186-187(2), 1995, pp. 388-394.
- [4] Shi, H.H., Takayama, K., Nagayasu, N. (1995). The Measurement of impact pressure and solid surface response in liquid-solid impact up to hypersonic range, *Wear*, vol. 186-187, 1995, pp. 352-359.
- [5] Shi, H.H., Takayama, K., Onodera, O. (1994). Supersonic diesel fuel injection through a single-hole nozzle in a compact gas gun (part 2), *JSME Int J Series B*, vol. 37 (3), 1994, pp. 509-516.
- [6] Lee, S., Tanaka, D., Kusaka, J., Daisho, Y. (2002). Effects of diesel fuel characteristics on spray and combustion in a diesel engine, *JSAE Review*, vol. 23 (4), 2002, pp. 407-414.

AME-06

- [7] Lee, K.H., Lee, C.H., Lee, C.S. (2004). An experimental study on the spray behavior and fuel distribution of GDI injectors using the entropy analysis and PIV method, *Fuel*, vol. 83(7-8), 2004, pp. 971-980.
- [8] Horst G. Rau, Eckart R. Buttler, Gustav Baretton, Hans M. Schardey and Friedrich W. Schildberg. (1997). Jet-cutting Supported by High Frequency Current: New Technique for Hepatic Surgery. *WORLD Journal of SURGERY*. Vol. 21(3), 1997, pp. 259-260.
- [9] Ohki, T., Nakagawa, A., Tominaga, T., Takayama, K. (2004). Experimental application of Pulsed Ho: YAG laser-induced liquid jet as a novel device for rigid neuroendoscope, *Laser Surg Med*, vol. 34(3), 2004, pp. 237-234.
- [10] Nakagawa, A., Hirano, T., Komatsu, M., Sato, M., Uenohara, H., Ohgawa, H., Kusada, Y., Shirane, R., Takayama, K., Yoshimoto, T. (2002). Holmium: YAG laser-induced liquid jet knife: possible novel method for dissection, *Lasers Surg Med*, Vol.31(2), August 2002, pp. 129-135.
- [11] Hirono, T., Uenohara, H., Komatsu, M., Nakagawa, A., Satoh, M., Ohyama, H., Takayama, K., Yoshimoto, T. (2003). Holmium YAG laser-induced liquid jet dissector: A novel prototype device for dissection organs without impairing vessels, *Minim Invas Neurosurg*, vol. 46(2), 2003, pp. 121-125.
- [12] Joy Baxter, Samir Mitragotri. (2005). Jet-induced skin puncture and its impact on needle-free jet injections: Experimental studies and a predictive model, *Journal of Controlled Release*, vol. 106(3), 2005, pp. 361-373.
- [13] Stachowiak JC, von Muhlen MG, Li TH, Jalilian L, Parekh SH, Fletcher DA. (2007). Piezoelectric control of needle-free transdermal drug delivery, *J Control Release*, Vol. 124(1-2), December 2007, pp. 88-97.
- [14] Bioject Needle-free Injection Systems. URL: <http://www.bioject.com>, access on 5/09/2014.
- [15] Bowden, F.P., Brunton, J.H. (1958). Damage to solids by liquid impact at supersonics speeds, *Nature* vol. 181, 1958, pp. 873 - 875.
- [16] Bowden, F.P., Brunton, J.H. (1961). The deformation of solids by liquid impact at supersonic speeds, *Proc Royal Society London* vol. 263, 1961, pp. 433 – 450.
- [17] K. Pianthong, S. Zakrzewski, M. Behnia, B.E. Milton. (2002). Supersonic liquid jets: Their generation and shock wave characteristics, *Shock Waves*, vol. 11(6), May 2002, pp. 457-466.
- [18] A. Matthujak, C. Kasamnimitporn, W. Sitthinwong and K. Pianthong, (2011). Effect of stand-off distance on impact pressure of high speed water jets injected into water, *Applied Mechanics and Materials*, 2011, pp. 1873-1878.
- [19] A. Matthujak, C. Kasamnimitporn, W. Sitthinwong and K. Pianthong, (2011). Effects of different liquid properties on the characteristics of impact-generated high speed liquid jets, *Applied Mechanics and Materials*, 2011, pp. 370-376.
- [20] A. Matthujak, C. Kasamnimitporn, W. Sittiwong and K. Pianthong, (2012). Visualization of supersonic non-Newtonian liquid jets, *Applied Mechanics and Materials*, 2012, pp. 63-67.
- [21] A. Matthujak, C. Kasamnimitporn, W. Sittiwong, K. Pianthong, K., Takayama and B.E. Milton, (2013). Characteristics of impact driven high speed liquid jets in water, *Shock Waves*, vol. 23 (2), 2013, pp. 105-114.