

สัญญาเลขที่ RSA5780001

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การศึกษาเชิงทดลองการกระแทกของลำพุงความเร็วสูง
บนพื้นผิวในของเหลว

คณะผู้วิจัย

สังกัด

นายอนิรุตต์ มัทธจักร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
และมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. และมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณลักษณะการกระแทกของลำเจ็ทของเหลวความเร็วสูงด้วยเทคนิคการขับลำเจ็ทด้วยการกระแทกเมื่อฉีดในอากาศและในน้ำ โดยทำการศึกษาอิทธิพลของลำเจ็ท Newtonian และ Non-Newtonian ต่อความดันกระแทกจากการตรวจวัดด้วย PVDF pressure sensor ที่ถูกออกแบบ สร้างและสอบเทียบขึ้นเพื่อการศึกษา รวมถึงศึกษาพฤติกรรมของลำเจ็ท Non-Newtonian โดยการถ่ายภาพด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงอีกด้วย จากการศึกษาพบว่า 1) ลำเจ็ท Newtonian ที่ฉีดในอากาศจะมีความดันกระแทกสูงกว่าเมื่อฉีดในน้ำ ทุกลำเจ็ทและทุกระยะห่างจากหัวฉีด 2) เมื่อระยะห่างจากหัวฉีดมากขึ้น ความดันกระแทกของลำเจ็ท Newtonian จะมีค่าลดลง 3) ลำเจ็ทน้ำจะมีความดันกระแทกสูงสุดเมื่อฉีดในอากาศ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 699.55 MPa แต่เมื่อฉีดในน้ำลำเจ็ทน้ำมันดิเซลมีความดันกระแทกสูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 674.50 MPa และลำเจ็ทน้ำมันแก๊สโซลีนจะมีความดันกระแทกต่ำที่สุดทั้งกรณีฉีดในอากาศและในน้ำ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 232.32 และ 123.26 MPa ตามลำดับ 4) คุณสมบัติทางกายภาพที่มีผลต่อความดันกระแทกคือ ความหนาแน่นและน้ำหนักโมเลกุลของของเหลว 5) เมื่อระยะห่างจากหัวฉีดเพิ่มขึ้น ความเร็วของลำเจ็ท Non-Newtonian ทั้ง 4 ชนิด ซึ่งได้แก่ นม น้ำสลัด ซอสมะเขือเทศ และยาสีฟัน เมื่อฉีดในอากาศ มีค่าเพิ่มขึ้นแต่ความดันกระแทกมีค่าลดลง และ 6) ความดันกระแทกของลำเจ็ทยาาสีฟันมีค่าสูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 127.61 MPa และ 85.36 MPa ที่ระยะห่างจากหัวฉีดเท่ากับ 20 mm เมื่อฉีดในน้ำและในอากาศ ตามลำดับ

นอกจากนี้ยังทำการศึกษาการประยุกต์ใช้เบื้องต้นของลำเจ็ทที่ถูกผลิตจากชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้าในการส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็ม การเจาะกระดูก และการเจาะหิน จากการศึกษาพบว่า 1) สำหรับการส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็ม ปริมาตรของเหลวมีผลกับการแพร่กระจายของลำเจ็ทในเนื้อเยื่อจำลอง Polyacrylamide gel และมีลักษณะการแพร่กระจายคล้ายคลึงกันกับอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มที่วางขายทั่วไป 2) สำหรับการเจาะกระดูก ลำเจ็ทสามารถเจาะกระดูกได้ความลึกสูงสุดเท่ากับ 5.52 mm ที่จำนวน pulse เท่ากับ 80 pulses ซึ่งคิดเป็นอัตราส่วนความลึกต่อปริมาตร (DPV) มีค่าเท่ากับ 0.113 mm/mL และ 3) สำหรับการเจาะหิน จำนวน Pulse ของลำเจ็ทเพิ่มขึ้นจะทำให้ความลึกของหินทรายเพิ่มขึ้น โดยหินทรายเกิดความเสียหายแบบ Shear และ Tensile ขึ้นที่รูเจาะ และเมื่อทำการเจาะทั้งหมด 74 Pulses ลำเจ็ทสามารถเจาะทะลุหินทรายหนา 3.18 mm ได้ ดังนั้น ลำเจ็ทที่ถูกผลิตจากชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้ามีศักยภาพในการประยุกต์ใช้ในงานดังกล่าวได้ในอนาคต

ABSTRACT

The objective of this research is to study on the impact characteristics of high-speed liquid jet injected in air and water. The liquid jets were generated by impact driven method. Effect of Newtonian and Non-Newtonian jets on impact pressure, which was investigated by PVDF pressure sensor being designed, manufactured and calibrated for this measurement, were studied. Moreover, characteristics of Non-Newtonian jets were visualized by high-speed video camera. From the study, it was found that 1) The impact pressure of Newtonian jets injected in air were higher than that in water for all jets and all stand-off distances 2) The impact pressure of Newtonian jets decreased as the stand-off distance increased 3) The maximum impact pressure injected in air and in water were water jet and diesel jet, being 699.55 MPa and 674.50, respectively. The minimum impact pressure of the jet injected in both air and water was gasoline jet, being 232.32 and 123.26 MPa, respectively. 4) Density and molecular weight of liquid were the significantly physical property for the impact pressure. 5) When the stand-off distance increased, jet velocities of Non-Newtonian jets (milk, salad dressing, tomato sauce and toothpaste) increased but their impact pressures decreased, and 6) The maximum impact pressures injected in air and water were toothpaste jet, being 127.61 MPa and 85.36 MPa, respectively.

Moreover, applications of liquid jet generated by the electromagnetic actuator for needle-free jet injection, bone drilling and stone drilling were preliminarily studied. From the study, it was found that 1) For needle-free jet injection, liquid volume affected on jet dispersion in polyacrylamide gel and such dispersion was similar to the dispersion injected by commercial needle free jet injector. 2) For bone drilling, the 5.52 mm of maximum depth could be drilled by the jet at 80 pulses, being the depth per volume of 0.113 mm/mL, and 3) For stone drilling, the hole depth depended on a number of jet pulses. The damage deformation at the hole in this study was shear and tensile. The 74 pulses of water jet could drill through the 3.18 mm thickness of sandstone. Therefore, the liquid jet generated by the electromagnetic actuator is possible to apply such applications in the future.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ นายกิตติพงษ์ ศรีพนากุล นักศึกษาระดับปริญญาเอก รวมถึงนักศึกษาระดับปริญญาตรีของห้องปฏิบัติการการประยุกต์ใช้ลำเจ็ทและการเผาไหม้ (Combustion and Jet Application Research Laboratory, CJARL) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ระหว่างปีการศึกษา 2558-2560 ที่ช่วยทำการทดลองและเก็บข้อมูลจนแล้วเสร็จโครงการ และขอขอบคุณ นพ.สุริยง แผลงงาม วิทยาลัยแพทยศาสตร์และการสาธารณสุข มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี รวมถึงภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือในทดสอบ

โครงการวิจัยนี้ได้รับงบประมาณอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี สัญญาเลขที่ RSA5780001

นายอนิรุตต์ มัทธจักร์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
Abstract	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ลำเจ้าทความเร็วสูง	4
2.2 การอนุรักษ์โมเมนตัม	4
2.3 ความเร็วเสียง	6
2.4 ความดันย้อนกลับ	9
2.5 ต้นกำลังที่ใช้ในการผลิตลำเจ้าทความเร็วสูง	12
2.6 เทคนิคการถ่ายภาพ	18
2.7 การประยุกต์ใช้งานในอนาคต	24
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	26
บทที่ 3 อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	44
3.1 การผลิตลำเจ้าทด้วยชุดทดลองแบบ Horizontal Single State Gas Gun	44
3.2 การผลิตลำเจ้าทด้วยชุดทดลองแบบต้นกำลังจากแม่เหล็กไฟฟ้า	51
3.3 การวัดความเร็วของลำเจ้าท	54

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ความดันกระแทกของลำเจ็ท	59
4.1 ความดันกระแทกของลำเจ็ท Newtonian ในอากาศ	59
4.2 ความดันกระแทกของลำเจ็ท Newtonian ในน้ำ	60
4.3 การเปรียบเทียบความดันกระแทกของลำเจ็ท Newtonian ในอากาศและน้ำ	61
4.4 ความเร็วของลำเจ็ท Non-Newtonian ในอากาศ	63
4.5 ความดันกระแทกของลำเจ็ท Non-Newtonian ในอากาศ	64
4.6 ความเร็วของลำเจ็ท Non-Newtonian ในน้ำ	65
4.7 ความดันกระแทกของลำเจ็ท Non-Newtonian ในน้ำ	66
4.8 พฤติกรรมของลำเจ็ท Non-Newtonian ในอากาศ	67
4.9 พฤติกรรมของลำเจ็ท Non-newtonian ในน้ำ	70
บทที่ 5 การประยุกต์ใช้ลำเจ็ท	73
5.1 การประยุกต์ใช้ลำเจ็ทเพื่อการฉีดยา	73
5.2 การประยุกต์ใช้ลำเจ็ทเพื่อการเจาะกระดูก	81
5.3 การประยุกต์ใช้ลำเจ็ทเพื่การเจาะหิน	87
บทที่ 6 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	93
6.1 สรุปผลการทดลอง	93
6.2 ข้อเสนอแนะ	94
เอกสารอ้างอิง	95
ภาคผนวก	100
ภาคผนวก ก รูปการทดลอง	101
ภาคผนวก ข ผลสำเร็จจากการดำเนินโครงการ	108

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ความเร็วเสียงในแก๊สอุดมคติ	7
2.2	ความเร็วเสียงในตัวกลางที่อุณหภูมิ 20 °C	10
2.3	ค่าคงที่ของแก๊ส	19
3.1	สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของกระสุนที่ได้จากการทดลอง กับความดันขับของ อากาศอัดทั้ง 3 ระยะ	50
4.1	คุณสมบัติทางกายภาพของของเหลวที่ใช้ในการทดลอง	60
5.1	คุณสมบัติของหินทราย	88

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การผลิตลำเจ็ทจากการกระแทกของลูกกระสุน	4
2.2 ลักษณะการไหลที่ปลายหัวฉีดเมื่อ $P_b < P^*$	11
2.3 แผนภาพการทำงานของ Powder gun	12
3.1 แผนภาพ Horizontal single stage gas gun	44
3.2 ตัวอย่างกระสุน (projectile) ที่ใช้ในการทดลอง	45
3.3 ส่วนประกอบของกลไกการยิงกระสุน	45
3.4 ขั้นตอนการยิงกระสุน	46
3.5 ไดอะแกรมการวัดความเร็วของกระสุนปืน	47
3.6 ตัวอย่างการแสดงผลของ digital oscilloscope ในการวัดความเร็วของกระสุนปืน	47
3.7 อิทธิพลของความดันขับของอากาศอัดต่อความเร็วของกระสุนที่ระยะต่างๆ (range)	48
3.8 ร้อยละความคลาดเคลื่อนเทียบกับทฤษฎี (% error) ของความเร็วกระสุนที่วัดได้ในทั้ง 3 ระยะ (range)	49
3.9 การผลิตลำเจ็ทความเร็วสูง (High-speed liquid jet generation)	51
3.10 รูปทรงของหัวฉีด (Nozzle geometry)	51
3.11 ส่วนประกอบของชุดขับ (Actuator)	52
3.12 ลักษณะโครงสร้างของหัวฉีด	52
3.13 วงจรไฟฟ้าของอุปกรณ์ส่งถ่ายด้วยลำเจ็ท ที่ใช้ชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้า	52
3.14 อุปกรณ์ส่งถ่ายด้วยลำเจ็ทความเร็วสูง ที่ใช้ระบบแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นต้นกำลัง	53
3.15 วิธีการผลิตลำเจ็ทแบบกระแทก (Impact method)	54
3.16 Laser beam interruption method	55
3.17 Piezoelectricpolyvinylidenefluoride film, PVDF	56
3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า และความดันกระแทก	58
3.19 วิธีวัดความดันกระแทก	58
4.1 อิทธิพลของชนิดของเหลวของลำพุ่งต่อความดันกระแทก กรณีฉีดในอากาศ	59
4.2 อิทธิพลของชนิดของเหลวของลำพุ่งต่อความดันกระแทกในน้ำที่กรณีฉีดในน้ำ	61
4.3 การเปรียบเทียบความดันกระแทกของลำพุ่งเมื่อฉีดในอากาศและน้ำ	62
4.4 ความเร็วของลำเจ็ท Non-Newtonian ทั้ง 4 ชนิดในอากาศ	64
4.5 อิทธิพลของระยะในการวัดความดันกระแทก ต่อความดันกระแทกของลำเจ็ทในอากาศ	65
4.6 ความเร็วของลำเจ็ท Non-Newtonian ทั้ง 4 ชนิดในน้ำ	66

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 อิทธิพลของระยะในการวัดความดันกระแทก ต่อความดันกระแทกของลำเจ็ทในน้ำ	67
4.8 พฤติกรรมของลำเจ็ทในอากาศ	68
4.9 พฤติกรรมของลำเจ็ทน้ำสลัดในอากาศ	68
4.10 พฤติกรรมของลำเจ็ทขอสมะเขือเทศในอากาศ	69
4.11 พฤติกรรมของลำเจ็ทยาสีฟันในอากาศ	69
4.12 พฤติกรรมของลำเจ็ทในน้ำ	70
4.13 พฤติกรรมของลำเจ็ทน้ำสลัดในน้ำ	71
4.14 พฤติกรรมของลำเจ็ทมะเขือเทศในน้ำ	71
4.15 พฤติกรรมของลำเจ็ทยาสีฟันในน้ำ	72
5.1 (a) อุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า โดยมีแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นชุดขับ และ (b) ลักษณะของหัวฉีด	74
5.2 อุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มยี่ห้อ Comfort in [79]	75
5.3 อิทธิพลของปริมาตรต่อความเร็ว และความดันกระแทกของลำเจ็ทของ อุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า โดยมีแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นชุดขับ	76
5.4 อิทธิพลของปริมาตรต่อความเร็ว และความดันกระแทกของลำเจ็ทของ อุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มที่ใช้ต้นกำลังจากสปริง	77
5.5 พฤติกรรมการแพร่กระจายของลำเจ็ทของอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็ม ที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า โดยมีแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นชุดขับ	78
5.6 พฤติกรรมการแพร่กระจายของลำเจ็ทของอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็ม ที่ใช้ต้นกำลังจากสปริง	78
5.7 ลักษณะรูปร่างการแพร่กระจายของลำเจ็ท	79
5.8 การแพร่กระจายของอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า โดยมีแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นชุดขับ	79
5.9 การแพร่กระจายของอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มที่ใช้ต้นกำลังจากสปริง	80
5.10 อิทธิพลของปริมาตรต่อความเร็วของลำเจ็ทที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 100 Volt, 300 Volt และ 500 Volt	82
5.11 อิทธิพลของปริมาตรต่อความดันกระแทกของลำเจ็ทที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 100 Volt, 300 Volt และ 500 Volt	82
5.12 อิทธิพลของปริมาตรต่อความลึกของกระดุก	84
5.13 โครงสร้างของกระดุกจากการใช้เครื่อง CT Scan	85

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.14 อิทธิพลของจำนวน pulse ของลำเจ็ทต่อความลึกของกระดุก	86
5.15 โครงสร้างของกระดุกที่จำนวน 10-80 pulses	86
5.16 อิทธิพลของขนาดรูหัวฉีด และระยะ travelling distance ต่อความเร็วของลำเจ็ทที่ปริมาตร 0.5 mL และแรงดันไฟฟ้า 500 V	88
5.17 อิทธิพลของปริมาตรต่อความเร็วของลำเจ็ท ที่แรงดันไฟฟ้า 100 V, 300 V และ 500 V	89
5.18 อิทธิพลของปริมาตรต่อความดันกระแทกของลำเจ็ทที่แรงดันไฟฟ้า 100 V, 300 V และ 500 V	90
5.19 การเสียหายของหินทราย	91
5.20 อิทธิพลของจำนวน Pulse ของลำเจ็ทต่อความลึกของหินทราย	92
ก.1 Horizontal single stage gas gun	102
ก.2 กระสุนปืน	102
ก.3 เลเซอร์	102
ก.4 ตัวรับสัญญาณเลเซอร์	103
ก.5 ออสซิลโลสโคป รุ่น GWINSTER GDS 2102	103
ก.6 ปัมลมโรตารี PUMA รุ่น XM-2525 Puma 3 Hp ขนาดถังลม 260 x 700 แรงอัด 8 bar แรงลม 260 L/min	103
ก.7 เครื่องชั่งดิจิตอล รุ่น GPS-3001 พิกัดกำลัง 3000 g ความละเอียด 0.1 g	104
ก.8 หัวฉีด	104
ก.9 ภาพ PVDF Pressure sensor	104
ก.10 ภาพลูกตุ้ม	105
ก.11 การปล่อยลูกตุ้มแบบอิสระ	105
ก.12 สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จาก Digital Oscilloscope ในการวัดความเร็วของลำพุ่ง	105
ก.13 สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จาก Digital Oscilloscope ในการวัดความดันกระแทกของลำพุ่ง	106
ก.14 ชุดผลิตลำเจ็ทที่ใช้ต้นกำลังจากแม่เหล็กไฟฟ้า	106
ก.15 ชุดจ่ายไฟฟ้า	106
ก.16 การเตรียมเนื้อหมูก่อนทำการทดลอง	107
ก.17 การส่งถ่ายยาโดยใช้อุปกรณ์ยี่ห้อ Comfort in	107
ก.18 ทำการถ่ายภาพเพื่อทำการวัดอิทธิพลต่างๆ	107

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

พฤติกรรมการกระแทกของลำเจ็ทน้ำความเร็วสูงบนพื้นผิวในอากาศได้มีการศึกษาเพื่องานทางด้านวิศวกรรมหลายๆ ด้าน เช่น การศึกษาเกี่ยวกับ Cavitations [1, 2] เครื่องดับเพลิง (Fire extinguisher) เทคโนโลยีเกี่ยวกับการตัดโดยลำพุง (jet cutting technology) การทำสะอาดวัสดุโดยลำพุง (Material cleaning by jets) การทำเหมืองแร่และการเจาะอุโมงค์โดยการกระแทกของลำพุงความเร็วสูง (mining and tunneling by means of high-speed jet impingements) [3-12] การฉีดน้ำมันในเครื่องยนต์ดีเซล การฉีดน้ำมันแก๊ซโซลีนในเครื่องยนต์แก๊ซโซลีน (Direct injection gasoline engine, GDI engine) และเครื่องยนต์ SCRAM jet (Supersonic Combustion Ram Jet engine, SCRAM jet engine) [13-28] ซึ่งเป็นที่ทราบกันว่าลำเจ็ทน้ำความเร็วสูงสามารถทำความเสียหายหรือทำการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรของวัสดุได้ โดยหากลำเจ็ทกระแทกกับพื้นผิวของของแข็ง ลำเจ็ทจะทำให้เกิดความดันสูงมากบนพื้นผิว โดยความดันดังกล่าวทำให้เกิดความเค้นบนพื้นผิวซึ่งทำให้พื้นผิวเกิดการเสียหายขึ้น โดยเริ่มแรกความเสียหายที่เกิดขึ้นจะเกิดจากการกัดกร่อนจากเม็ดฝน (Rain corrosion) [29-36] หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการชนของเม็ดฝน (Rain impact) และยังมี ความเสียหายของใบจักรของกังหันไอน้ำ และการทำความสะอาดด้วยลำเจ็ท เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยที่ผ่านมาจะให้ความสำคัญไปที่การกระแทกของลำเจ็ทในอากาศเป็นหลัก ซึ่งจะมุ่งเน้นไปที่ความพยายามในการผลิตลำเจ็ทความเร็วสูงด้วยวิธีและเครื่องมือต่างๆ ตามวัตถุประสงค์ในแต่ละงานวิจัย ซึ่งหนึ่งในประเด็นที่ให้ความสนใจคือการออกแบบหัวฉีดให้มีความเหมาะสมในการผลิตลำเจ็ทให้ความเร็วสูงที่สุด นอกจากนี้ การศึกษาเรื่องการกระแทกของลำเจ็ทยังให้ความสนใจไปที่ความเสียหายที่เกิดขึ้นบนพื้นผิว และการตรวจวัดความดันกระแทกที่เกิดขึ้นในอากาศ อย่างไรก็ตาม พฤติกรรมการกระแทกของลำเจ็ท Non-Newtonian และ Newtonian อื่นๆ นอกจากลำเจ็ทน้ำ ยังไม่มีการรายงานผลมาก่อน

ในปัจจุบัน การกระแทกของลำเจ็ทน้ำบนพื้นผิวในน้ำได้มีการศึกษาวิจัยเพื่อ มาประยุกต์ใช้กับด้านการแพทย์ [37-39] เช่น การใช้ลำเจ็ทในการผ่าตัด (Micro jet cutting) การใช้ลำเจ็ทในการทำลายก้อนเลือดที่อุดตันในเส้นเลือด (Blood clot dissolution) และ การส่งถ่ายยาหรือวัคซีน [40, 41] นอกจากนี้ ยังมีความพยายามศึกษาเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้ท้องทะเลอีกด้วย [42, 43] เช่น การตัดโครงสร้างใต้ทะเลโดยลำพุงความเร็วสูง (jet cutting marine structures) หรือการเจาะใต้ทะเล (jet drilling at the bottom of the sea) เนื่องจาก พลังงานของลำเจ็ทมีค่าสูงเพียงพอในการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมดังกล่าวได้ ถึงแม้ว่าจะมีการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับลำเจ็ทในน้ำบ้างแล้วก็ตาม [42-44] แต่ความเร็วของลำเจ็ทที่ศึกษายังมีความเร็วต่ำ ด้วยข้อจำกัดในด้านเทคนิคการผลิตลำเจ็ท นอกจากนี้ ยังมีเพียงการศึกษาลำเจ็ทน้ำเมื่อฉีดในน้ำเท่านั้น ดังนั้น พฤติกรรมกระแทกของลำเจ็ทความเร็วสูงในของเหลวอื่นจึงยังไม่มีการศึกษามาก่อน

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการตรวจวัดความดันกระแทกของลำเจ็ทความเร็วสูงเมื่อฉีดเข้าไปในน้ำที่ระยะห่างจากหัวฉีด โดยศึกษาอิทธิพลของลำเจ็ท Newtonian และ Non-Newtonian เมื่อฉีดในน้ำ การผลิตลำเจ็ทด้วยเทคนิค Impact driven method [2, 3] ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตลำเจ็ทความเร็วสูง ความดันกระแทกจะถูกตรวจวัดจาก Pressure sensor ที่ได้ออกแบบ สร้างและทำการสอบเทียบขึ้นเพื่องานวิจัยนี้ นอกจากนี้ พฤติกรรมการกระแทกของลำเจ็ทจะถึงบันทึกด้วย High-speed video camera พฤติกรรมการเจาะบนพื้นผิวต่างๆ จะถูกศึกษาเพื่อนำไปสู่การประยุกต์ใช้ในงานด้านการแพทย์และอุตสาหกรรมได้ต่อเนื่องต่อไปในอนาคตอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการกระแทกของลำเจ็ทความเร็วสูงในน้ำ
- 1.2.2 เพื่อทำความเข้าใจถึงอิทธิพลของ Newtonian และ Non-Newtonian ในน้ำต่อพฤติกรรมการกระแทกของลำเจ็ท
- 1.2.3 เพื่ออธิบายข้อแตกต่างระหว่างคุณลักษณะการกระแทกของลำเจ็ทความเร็วสูงในน้ำกับในอากาศ
- 1.2.4 เพื่อทำการตรวจสอบความดันกระแทกของลำเจ็ทความเร็วสูงในน้ำที่ระยะห่างออกจากหัวฉีด
- 1.2.5 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเสียหายที่เกิดขึ้นจากการกระแทกของลำเจ็ทความเร็วสูง
- 1.2.6 เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการกระแทกของลำเจ็ทเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในงานด้านการแพทย์และอุตสาหกรรมได้ต่อเนื่อง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ทำการผลิตลำเจ็ทความเร็วสูงแบบ pulse โดยวิธี Impact driven method จากชุดทดลองแบบ horizontal single-stage gas gun หรือชุดทดลองอื่นที่เหมาะสม
- 1.3.2 ทำการออกแบบและพัฒนาชุดทดลองแบบ Horizontal single-stage gas gun หรือชุดทดลองอื่นที่เหมาะสม รวมถึงชุดวัดความดันกระแทกเพื่อใช้ในงานวิจัยนี้
- 1.3.3 ความเร็วของลำเจ็ทมีค่าสูงกว่า 150 m/s ในอากาศหรือความเร็วในระดับความเร็วเสียง
- 1.3.4 Newtonian liquid ที่ใช้ในการทดลองมีไม่น้อยกว่า 4 ชนิด
- 1.3.5 Non-Newtonian liquid ที่ใช้ในการทดลองเป็นประเภท Pseudoplastic, Dilatant และ Bingham plastic
- 1.3.6 ตัวแปรที่ให้ความสนใจคือชนิดของเหลว และชนิดของไหลในห้องทดสอบ ที่ระยะห่างจากหัวฉีดต่าง
- 1.3.7 พฤติกรรมการกระแทกจะถูกอธิบายด้วยความดันกระแทก และการถ่ายภาพ
- 1.3.8 หินทราย และของแข็งที่มีความนุ่มจะถูกใช้เป็นวัสดุทดสอบการกระแทกในการศึกษาเพื่องานทางด้านอุตสาหกรรม และทางด้านการแพทย์

1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

1.4.1 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องจากวารสารวิชาการทั้งในประเทศและต่างประเทศที่เกี่ยวข้องกับ

1.4.2 ทำการออกแบบ สร้างชุดทดลองสำหรับการผลิตลำเจ็ทความเร็วสูงด้วยเทคนิค Impact driven method และทำการทดลองเพื่อให้ชุดทดลองมีความสามารถในการผลิตเจ็ทที่มีความเร็วสูงได้

1.4.3 ทดลองผลิตเจ็ทความเร็วสูงในอากาศและในน้ำ ตามขอบเขตการวิจัย

1.4.4 ออกแบบ สร้างอุปกรณ์วัดความดันกระแทก (Pressure sensor) และทำการสอบเทียบ

1.4.5 ศึกษาอิทธิพลของชนิดของเจ็ทในอากาศ และในของน้ำที่ระยะห่างจากหัวฉีดต่างๆ ต่อความดันกระแทกและถ่ายภาพเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น

1.4.6 ศึกษาลักษณะการเสียหายของพื้นผิวเมื่อได้รับการกระแทกจากลำเจ็ทความเร็วสูง

1.4.7 สรุปและเขียนรายงานผลการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.5.1 รู้ถึงคุณลักษณะของพฤติกรรมการกระแทกของเจ็ทความเร็วสูงในน้ำ

1.5.2 ความเข้าใจถึงอิทธิพลของ Newtonian และ Non - Newtonian ในน้ำต่อพฤติกรรมการกระแทกของลำเจ็ท

1.5.3 เข้าใจข้อแตกต่างระหว่างคุณลักษณะการกระแทกของลำเจ็ทความเร็วสูงในน้ำกับในอากาศ

1.5.4 เข้าใจอิทธิพลของระยะห่างระหว่างหัวฉีดต่อความดันกระแทก และพฤติกรรมการกระแทก

1.5.5 ได้ข้อมูลพื้นฐานของพฤติกรรมของการกระแทกของลำเจ็ทในงานด้านการแพทย์และอุตสาหกรรมได้ทั้งหมด

บทที่ 2

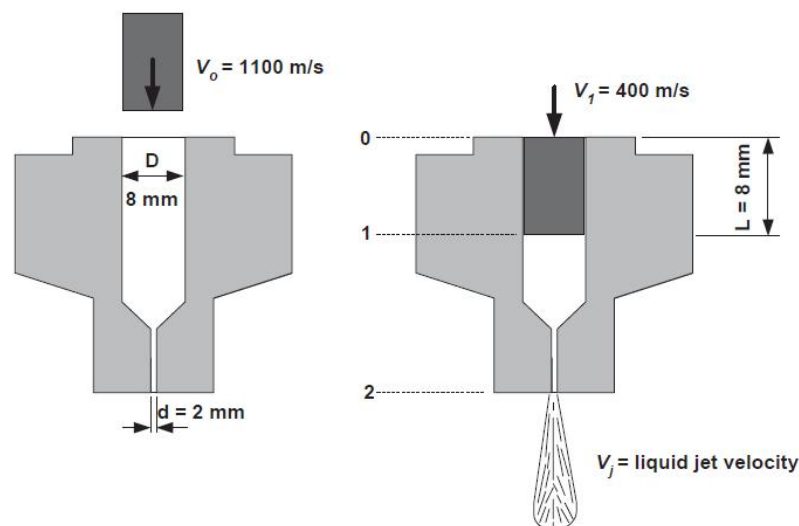
ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลำเจ็ทความเร็วสูง

ลำเจ็ทของเหลวความเร็วสูง (High speed liquid jet) คือ ของเหลวที่เคลื่อนที่ออกจากรูหัวฉีดที่มีขนาดเล็กอย่างรวดเร็วทำให้เกิดเป็นลำเจ็ทขึ้น ซึ่งในการเกิดลำเจ็ทสามารถทำได้โดยทำให้ของเหลวที่อยู่ภายในหัวฉีดมีความดันเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยการใช้การเคลื่อนที่ของวัตถุกระทบกับของเหลวที่อยู่ภายในหัวฉีด ที่มีต้นกำเนิดจาก การระเบิดของดินปืน จากสปริง จากความดันของแก๊ส และต้นกำเนิดอื่นๆ ในการขับเคลื่อนวัตถุ

2.2 การอนุรักษ์โมเมนตัม

จากหลักการอนุรักษ์โมเมนตัมสามารถคาดการณ์ความเร็วของลำเจ็ทที่ผลิตได้จากวิธี Impact driven method ได้โดยใช้หลักการการถ่ายโอนโมเมนตัมของลูกกระสุนไปเป็นโมเมนตัมของลำเจ็ท โดยในการอธิบายจะสมมติให้ลูกกระสุนหนัก 0.47 g ทำจาก High density polyethylene (HDPE) เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 1100 m/s ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เมื่อลูกกระสุนเคลื่อนที่กระทบกับของเหลว ความเร็วของลูกกระสุนจะลดลง (V_1) ซึ่งสมมติให้เป็น 400 m/s จากนั้นลูกกระสุนจะเคลื่อนที่เข้าไปในหัวฉีดเป็นระยะ 8 mm (L) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 หลังจากนั้นลำเจ็ทก็จะเคลื่อนที่ออกจากหัวฉีด ในการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงต่างๆ สามารถคำนวณได้ ดังนี้



รูปที่ 2.1 การผลิตลำเจ็ทจากการกระทบของลูกกระสุน

การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของลูกกระสุน (ΔM_p) สามารถหาได้จากสมการที่ 2.1

$$\Delta M_P = m\Delta V_P = m(V_0 - V_1) \quad (2.1)$$

การเปลี่ยนแปลงของเวลา (Δt_j) ของลำเจ็ทหาได้จากสมการที่ 2.2

$$\Delta t_j = \frac{L}{\frac{1}{2}(V_0 + V_1)} = \frac{L}{V_{av}} \quad (2.2)$$

โมเมนตัมของลำเจ็ทสามารถหาได้จากสมการที่ 2.3

$$M_j = \left(\dot{m}\right)(V_j)(\Delta t_j) = (\rho_2 A_2 V_j) \left(\frac{L}{V_{av}}\right) \quad (2.3)$$

เมื่อการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเท่ากับ โมเมนตัมของลำเจ็ท $\Delta M_P = M_j$ จะได้สมการที่ 2.4

$$m\Delta V_P = (\rho_2 A_2 V_j)(V_j) \left(\frac{L}{V_{av}}\right) \quad (2.4)$$

ดังนั้นความเร็วของลำเจ็ทที่ออกจากหัวฉีดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.5

$$V_j = \sqrt{\frac{m\Delta V_P}{\rho_2 A_2} \left(\frac{V_{av}}{L}\right)} \quad (2.5)$$

เมื่อ

ρ_2	คือ ความหนาแน่นของน้ำในหัวฉีด ซึ่งสันนิษฐานให้เพิ่มขึ้น 20% หรือมีค่าเท่ากับ 1200 kg/m^3
A_2	คือ พื้นที่หน้าตัดของรูหัวฉีด
m	คือ มวลของลูกกระสุน
V_0	คือ ความเร็วของลูกกระสุนเริ่มแรก
V_1	คือ ความเร็วของลูกกระสุนเมื่อกระทบกับของเหลว
V_{av}	คือ ความเร็วเฉลี่ยของลูกกระสุน
L	คือ ระยะที่ลูกกระสุนเคลื่อนที่เข้าไปในหัวฉีด

ซึ่งจากการใช้ข้อมูลต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 คำนวณโดยใช้สมการที่ 2.5 พบว่า ความเร็วของลำเจ็ทจะมีค่าเท่ากับ 2860.34 m/s ซึ่งค่าที่ได้จากสมการที่ 2.5 จะเป็นค่าที่ได้จากผลของการกระแทกของลูกกระสุนเท่านั้น ซึ่งยังไม่ได้คิดผลเนื่องจากแรงเสียดทาน ดังนั้นค่าที่ได้จริงจะต้องมีค่าลดลงจากค่าที่คำนวณได้

2.3 ความเร็วเสียง

ความเร็วเสียง (Speed of sound) [45] คือ ระยะทางที่เสียงเดินทางไปในตัวกลางใดๆ ได้ในหนึ่งหน่วยเวลา โดยทั่วไปเสียงเดินทางในอากาศที่มีอุณหภูมิ 25 °C จะมีความเร็วเท่ากับ 346 m/s และถ้าในอากาศที่อุณหภูมิ 20 °C จะมีความเร็วเท่ากับ 343 m/s ดังนั้นความเร็วเสียงจะมีค่ามากหรือน้อยลงจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของตัวกลาง และอาจได้รับอิทธิพลจากความชื้นบ้างเล็กน้อย แต่จะไม่ขึ้นกับความดันอากาศ เนื่องจากการเดินทางของเสียงอาศัยการสั่นของโมเลกุลของตัวกลาง ดังนั้นเสียงจะเดินทางได้เร็วขึ้นหากตัวกลางมีความหนาแน่นมาก เช่นของแข็ง แต่เสียงไม่สามารถเดินทางได้ในอวกาศได้ เนื่องจากอวกาศเป็นสุญญากาศจึงไม่มีโมเลกุลของตัวกลาง สมการของความเร็วเสียง (a) ทั่วไปสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 2.6

$$a = \sqrt{\frac{c}{\rho}} \quad (2.6)$$

เมื่อ

c คือ สัมประสิทธิ์ของความแข็งแรง (Coefficient of stiffness)
 ρ คือ ความหนาแน่น (Density)

จากสมการที่ 2.6 ความเร็วเสียงจะมีค่ามากขึ้น เมื่อความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และจะลดลงเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น

2.3.1 ความเร็วเสียงในแก๊ส

ค่าความเร็วเสียง (a_{gas}) ในตัวกลางที่มีสถานะเป็นแก๊สสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.7

$$a_{gas} = \gamma p \quad (2.7)$$

เมื่อ

γ คือ ดัชนีอะเดียบาติก (Adiabatic index) ของแก๊ส หรือค่าความร้อนจำเพาะ
 p คือ ความดัน (Pressure)

ดังนั้น ความเร็วเสียงในแก๊สสามารถคำนวณจากสมการที่ 2.8

$$a_{gas} = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}} \quad (2.8)$$

ในกรณี แก๊สในอุดมคติ (Ideal gas) สามารถหาความเร็วเสียงได้จากสมการที่ 2.9

$$a_{ideal\ gas} = \sqrt{\gamma RT} \quad (2.9)$$

เมื่อ

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (Gas constant) (287.05 J/(kg.K) สำหรับอากาศ)
 ปกติในทางอากาศพลศาสตร์ค่านี้หาจาก การหารค่าคงที่ของแก๊สสากล
 R (J/(mol.K)) ด้วย ค่ามวลโมล (molar mass)
 T คือ ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) ที่สภาพบรรยากาศมาตรฐาน

ตารางที่ 2.1 ความเร็วเสียงในแก๊สอุดมคติ [45]

ระดับความสูง	อุณหภูมิ	m/s	km/h	mph	knot
ระดับน้ำทะเล	15°C (59°F)	340	1225	761	661
11,000 m - 20,000 m	-57°C (-70°F)	295	1062	660	573
29,000 m	-48°C (-53°F)	301	1083	673	585

ในกรณีของแก๊สในอุดมคติ ความเร็วเสียง a จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเท่านั้น โดยไม่ขึ้นอยู่กับความดันและความสูง สำหรับอากาศนั้นเกือบถือได้ว่าเป็นแก๊สในอุดมคติ อุณหภูมิของอากาศจะเปลี่ยนแปลงตามระดับความสูง ซึ่งจะเป็นผลให้ความเร็วของเสียงที่ระดับความสูงต่างๆ นั้นแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1

2.3.2 ความเร็วเสียงในของเหลว

ของเหลวจะมีความแข็งแกร่งต่อแรงอัดเท่านั้น โดยจะไม่มีผลของความแข็งแกร่งต่อแรงเฉือน ดังนั้นความเร็วของเสียงในของเหลว (a_{fluid}) สามารถหาได้จากสมการที่ 2.10

$$a_{fluid} = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (2.10)$$

เมื่อ

K คือ โมดูลัสของการอัดอะเดียบาติก (Adiabatic bulk modulus)

2.3.3 ความเร็วเสียงในของแข็ง

ของแข็งนั้นมีค่าความแข็งเกร็งไม่เป็นศูนย์ทั้งต่อแรงบีบอัด หรือการเปลี่ยนปริมาตร (Volumetric deformation) และแรงเฉือน (shear deformation) ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะกำหนดคลื่นเสียงที่มีความเร็วต่างกันขึ้นกับรูปแบบของคลื่นในแท่งของของแข็งนั้น ซึ่งมีขนาด และความหนาแตกต่างกัน ความเร็วเสียงในของแข็งสามารถหาได้จากสมการที่ 2.11

$$a_{solid(thin) \text{ longitudinal}} = \sqrt{\frac{E_{plane}}{\rho}} \quad (2.11)$$

เมื่อ

E_{plane} คือ ยิงโมดูลัสคลื่นหน้าราบ (Plane wave modulus)

ρ คือ ความหนาแน่น

ดังนั้น ความเร็วเสียงในตัวกลางที่เป็นเหล็กจะมีค่าประมาณ 5,100 m/s ความเร็วของเสียงของของแข็งสามารถหาได้จากการแทนค่ายังโมดูลัสด้วยโมดูลัสคลื่นหน้าราบ (Plane wave modulus) (E_{plane}) ซึ่งหาได้จาก ยิงโมดูลัสของเหล็ก (E) และ อัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's ratio) ดังแสดงในสมการที่ 2.12

$$E_{plane} = E \frac{1-\nu}{1-\nu-2\nu^2} \quad (2.12)$$

เมื่อ

E คือ ค่ายังโมดูลัส

ดังนั้น ความเร็วของเสียงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.13

$$a_{solid(thick) \text{ longitudinal}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1-\nu-2\nu^2)}} \quad (2.13)$$

สำหรับคลื่นตามขวาง (Transverse wave) นั้นยังโมดูลัส (E) จะถูกแทนด้วยค่าโมดูลัสของแรงเฉือน (Shear modulus) G ดังนั้นความเร็วเสียงในของแข็งสามารถหาได้จากสมการที่ 2.14

$$a_{solid \text{ transverse}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.14)$$

เมื่อ

G คือ โมดูลัสของแรงเฉือน (Shear modulus)

จะเห็นได้ว่า ความเร็วของเสียงในของแข็งจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของตัวกลางเท่านั้น โดยไม่ขึ้นกับอุณหภูมิของแข็ง

2.3.4 ความเร็วเสียงในอากาศ

ความเร็วของเสียงในอากาศสามารถหาค่าได้จากสมการที่ 2.15 และสมการที่ 2.16

$$a_{air} = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} \quad (2.15)$$

$$a_{air} = \sqrt{\gamma RT} \quad (2.16)$$

เมื่อ

a คือ ความเร็วเสียงของแก๊สตัวกลาง, m/s

γ คือ Specific Heat Ratio, ตัวแปรไร้มิติ

P คือ ความดัน, Pa , $kg/m \cdot s^2$

R คือ ค่านิชแก๊สของแก๊สตัวกลาง, $J/kg \cdot K$, $m^2/s^2 K$

T คือ อุณหภูมิ, K

จะเห็นได้ว่าความเร็วเสียงจะขึ้นอยู่กับตัวกลางต่างๆ ทั้งที่เป็นของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ซึ่งจะทำให้มีค่าความเร็วเสียงที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.2

2.4 ความดันย้อนกลับ

ความดันย้อนกลับ (Back pressure) คือ ความต้านทานการเคลื่อนที่ของของไหลที่อยู่ภายในหัวฉีด ซึ่งจะขึ้นอยู่กับระยะที่ของไหลเคลื่อนที่ภายในหัวฉีด (l) และค่าความเสียดทานที่ผนังท่อกระทำกับลูกสูบที่เคลื่อนที่เพื่อขับเคลื่อนของเหลวในหัวฉีด (f) ในการพิจารณา กำหนดให้ความดันที่จะใช้ขับเคลื่อนของเหลวที่อยู่ภายในหัวฉีดคือ P_0 ถ้าความดันย้อนกลับ (P_b) มีค่าเท่ากับ P_0 ในกรณีนี้จะไม่มีการเคลื่อนที่ของของไหลผ่านหัวฉีดเกิดขึ้น แต่ถ้า P_b มีค่าลดลง ซึ่งน้อยกว่าค่า P_0 ในกรณีเช่นนี้ของไหลที่อยู่ภายในหัวฉีดจะเริ่มเกิดการเคลื่อนที่ในระดับ Subsonic ผ่านหัวฉีด โดยที่ความดันที่ทางออก

ของหัวฉีด (P_e) จะมีค่าเท่ากับ P_b ที่ลดลงนั้น และค่า Mach number จะคงยังมีค่าน้อยกว่า 1 การลดลงของ P_b จะทำให้เกิดการไหลที่อัตราการไหล (m) อย่างต่อเนื่องจนกระทั่ง P_b ลดลงจนถึงจุดที่ความดันวิกฤต (P^*) ที่ทำให้ Mach number มีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของความดัน P^* ต่อ P_0 ได้จากสมการที่ 2.17

$$\frac{P^*}{P_0} = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (2.17)$$

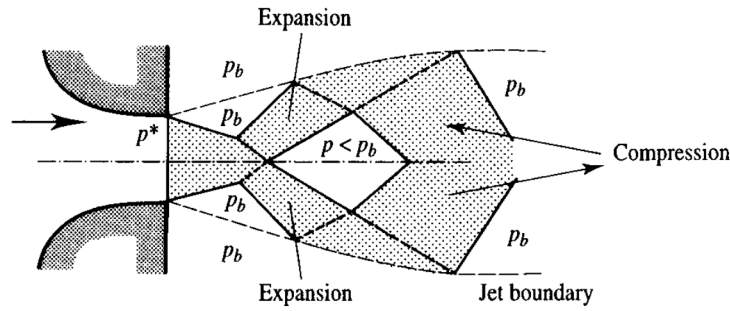
เมื่อ

P_0 คือ ความดัน Stagnation pressure เริ่มต้นที่ทางออกของหัวฉีด

ตารางที่ 2.2 ความเร็วเสียงในตัวกลางที่อุณหภูมิ 20 °C [45]

ชนิดวัสดุ	ความเร็ว (m/s)
อากาศ	343
น้ำ	1,480
น้ำแข็ง	3,200
แก้ว	5,300
เหล็ก	5,200
ตะกั่ว	1,200
ชนิดวัสดุ	ความเร็ว (m/s)
ไทเทเนียม	4,950
พีวีซี (อ่อน)	80
พีวีซี (แข็ง)	1,700
คอนกรีต	3,100

เมื่อ P_b ลดลงจนค่า Mach number ที่ทางออกของหัวฉีดเริ่มมีค่าใกล้เคียง 1 มากๆ อิทธิพลของ P_b จะไม่มีผลต่อการไหลในหัวฉีด ซึ่งค่า P_b จะเริ่มมีค่าเท่ากับ P^* ค่าอัตราการไหลจะคงที่ และค่า Mach number จะเริ่มเท่ากับ 1 แต่ถ้าในกรณีที่ $P_b < P_e$ จะเกิดการขยายตัวของของไหล หรือการขยายตัวของคลื่นขึ้นที่ปลายหัวฉีดดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ลักษณะการไหลที่ปลายหัวฉีดเมื่อ $P_b < P^*$ [46]

การพิจารณาความดันย้อนกลับตลอดความยาวของท่อที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดของหัวฉีด (P_x) สามารถพิจารณาโดยกำหนดให้เป็นการไหลตามกระบวนการ Isentropic เป็นการไหลใน 1 มิติ ในการพิจารณาจะใช้ค่าความเร็วของของไหลที่ทางออก V_e คำนวณหาค่า Mach number ที่ทางออก M_e โดยใช้สมการที่ 2.18

$$V_e = M_e a_e \quad (2.18)$$

เมื่อ

a_e คือ ความเร็วเสียงของของไหลที่ทางออกของหัวฉีด

ใช้ค่า M_e ที่ได้จากการคำนวณเพื่อหาค่า $4fL_e/D$ จากตารางความสัมพันธ์ของการไหลแบบ adiabatic ที่เป็นการไหลใน 1 มิติ และคิดผลของความเสียดทานด้วย

คำนวณค่า $4fL_x/D$ โดยการแทนค่า L_x, f และ D ซึ่งค่า L_x จะวัดจากปลายหัวฉีดจนถึงตำแหน่งที่สนใจที่จะพิจารณาค่า P_b

คำนวณค่า $4fL_{x-e}/D$ โดยใช้สมการที่ 2.19

$$4fL_{x-e}/D = 4fL_e/D - 4fL_x/D \quad (2.19)$$

เมื่อ

f คือ friction factor ของพื้นผิวท่อกับลูกสูบ

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ, m

ใช้ค่า $4fL_{x-e}/D$ หาค่า P_x/P^* จากตารางความสัมพันธ์ของการไหลใน 1 มิติที่เป็นแบบ adiabatic และคิดความเสียดทาน แทนค่า P^* จากสมการ $P_x/P^* = 4fL_{x-e}/D$ ในสมการที่ 2.17 ซึ่งจะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่าง P_x กับ P_0 โดยที่ค่า P_0 คือความดันของของไหลที่ปลายหัวฉีดขณะนั้น ดังนั้นจะได้ความดันย้อนกลับ back pressure ที่ตำแหน่งที่สนใจ (P_x)

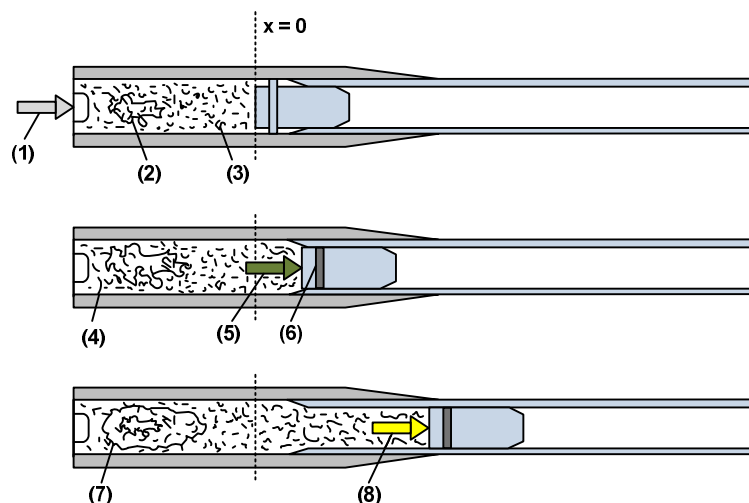
2.5 ต้นกำเนิดที่ใช้ในการผลิตลำเจ็ทความเร็วสูง

ต้นกำเนิดที่ใช้ในการขับลูกกระสุนให้มีความเร็วสูงเพื่อผลิตลำเจ็ทที่ใช้ในอดีต และในปัจจุบัน จะใช้วิธีการสะสมพลังงาน หรือเรียกว่าต้นกำเนิดซึ่งได้แก่ 1) ต้นกำเนิดจากการระเบิด (Explosive chemicals) [46] 2) ต้นกำเนิดจากการกดอัดของสปริง (Including compressed springs) [47] 3) ต้นกำเนิดจากความดันของแก๊สต่างๆ หรืออากาศ (Compressed gases) [48] และเมื่อไม่นานมานี้ก็ได้มีการคิดค้นต้นกำเนิดใหม่ที่ใช้ไฟฟ้าในการขับลูกกระสุนในการผลิตลำเจ็ท รายละเอียดของต้นกำเนิดที่ใช้ในการขับลูกกระสุนเพื่อผลิตลำเจ็ทมีดังนี้

2.5.1 ต้นกำเนิดจากการระเบิดของสารประกอบทางเคมี (Explosive chemicals)

ต้นกำเนิดจากการระเบิดของสารประกอบทางเคมี โดยส่วนมากจะใช้ดินปืน ซึ่งดินปืนที่ใช้จะเป็นชนิดเดียวกันกับดินปืนที่บรรจุอยู่ในลูกกระสุนปืนไรเฟิล (Rifle gun) หรือลูกปืนชนิดอื่นๆ ซึ่งดินปืนที่บรรจุอยู่ในลูกกระสุนของปืนชนิดต่างๆ จะมีคุณสมบัติแตกต่างกันตามส่วนผสม และจุดประสงค์ของปืนนั้น

ในการขับ หรือยิงลูกกระสุนให้เคลื่อนที่ จะใช้หลักการคือ เมื่อดินปืนที่บรรจุอยู่ในปลอกกระสุนเกิดการระเบิดหรือการเผาไหม้ขึ้น จะทำให้ความดันภายในปลอกกระสุนเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จนทำให้ลูกกระสุนเกิดการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า เมื่อลูกกระสุนเคลื่อนที่จนพ้นปากลำกล้องปืน แก๊สร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ก็จะถูกระบายออกไป โดยขั้นตอนในการขับ หรือยิงลูกกระสุนสามารถอธิบายได้เป็นข้อๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ดังนี้



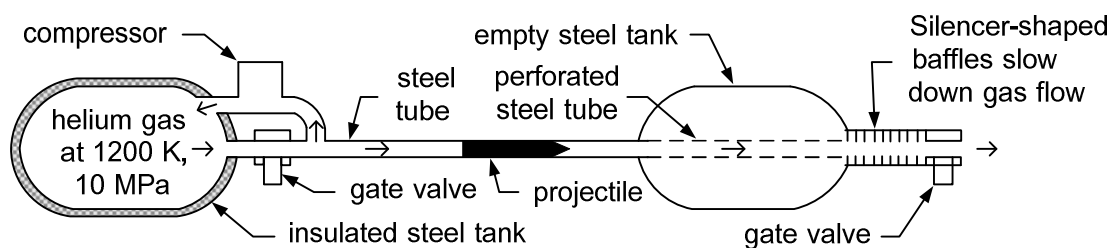
รูปที่ 2.3 แผนภาพการทำงานของ Powder gun

- (1) ชนวนของลูกกระสุนถูกจุด
- (2) เริ่มมีการเผาไหม้ของดินปืนภายในปลอกกระสุน
- (3) จากการเผาไหม้ของดินปืนทำให้เกิดความดัน และแก๊สร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว
- (4) ความดันที่เกิดขึ้นภายในปลอกกระสุนประมาณ 14 - 68 MPa

- (5) ลูกกระสุนเริ่มเคลื่อนที่ เนื่องจากอิทธิพลของความดันภายในปลอกกระสุน
- (6) เริ่มมีแรงต้านการเคลื่อนที่ของลูกกระสุน
- (7) ความดันสูงขึ้น เนื่องจากการเผาไหม้ของดินปืนใกล้จะหมด
- (8) ลูกกระสุนเคลื่อนที่ได้ระยะทางมากขึ้น และความดันภายในปลอกกระสุนเริ่มลดลง เนื่องจากปริมาตรที่อยู่ด้านหลังของลูกกระสุนเพิ่มมากขึ้น
- (9) เมื่อลูกกระสุนเคลื่อนที่พ้นปากลำกล้องปืน แก๊สร้อนจากการเผาไหม้ก็จะถูกระบายออกสู่บรรยากาศ และความดันภายในปลอกกระสุนก็จะเท่ากับความดันบรรยากาศ

2.5.2 ต้นกำเนิดจากแรงดันของแก๊สต่างๆ หรืออากาศ (Compressed gases)

ต้นกำเนิดของวิธีนี้จะใช้แก๊สเบา (Light gas) เช่น ไฮโดรเจน (H_2) หรือ ฮีเลียม (He) เป็นต้น กำลังในการยิงลูกกระสุน โดยมีส่วนประกอบหลักคือ ถังเก็บความดันสูง (High pressure reservoir) แผ่นฟิล์มบาง (Diaphragm) ท่อปล่อยลูกกระสุน (Launch tube) และลูกกระสุน (Projectile) โดยทั่วไปลูกกระสุนจะถูกติดตั้งตรงบริเวณทางเข้าของท่อปล่อยลูกกระสุน ซึ่งจะติดกับแผ่น diaphragm เมื่อแก๊สเบาที่บรรจุอยู่ภายใน Reservoir ถูกทำให้มีความดันสูงขึ้น ด้วยวิธีต่างๆ เช่น จากการเผาไหม้ (Combustion) จากแหล่งความร้อนภายนอก (External heat) จากการชาร์จประจุ (Electric charge) จาก Shock wave และจากการดันตัวของ Piston (Piston compress) ทั้งนี้ที่ความดันของแก๊สเบาเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งแผ่น Diaphragm ทรุดรับไม่ได้ แล้วเริ่มฉีกขาด ความดันที่อยู่ภายใน Reservoir จะขับลูกกระสุนให้มีความเร็วเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.4 หากประยุกต์กฎของการเคลื่อนที่ของนิวตัน จะสามารถหาความเร็วที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่างๆ ตลอดความยาวลำกล้องปืนได้ดังนี้



รูปที่ 2.4 แผนภาพส่วนประกอบของ Single-stage light gas gun

มวลของลูกกระสุนที่เคลื่อนที่คำนวณได้จากสมการที่ 2.20

$$m \frac{dv_p}{dt} = m \frac{dv_p}{dx} v_p = PA \quad (2.20)$$

เมื่อ

m คือ น้ำหนักของลูกกระสุน

v_p คือ ความเร็วของลูกกระสุน ณ ตำแหน่ง x ใดๆ
 P คือ ความดัน
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของลำกล้องปืน

หาก อินทิเกรตตลอดความยาวของลำกล้องปืน (L) จะได้สมการที่ 2.21

$$\frac{mv_0^2}{2} = A \int_0^L P dx \quad (2.21)$$

เมื่อ

v_0 คือ ความเร็วของลูกกระสุนที่ทางออกของลำกล้องปืน

เพื่อให้่ายต่อการพิจารณาจะกำหนดให้ $\bar{P}$ มีค่าคงที่ตลอดการเคลื่อนที่ของลูกกระสุนในลำกล้องปืน จะได้สมการที่ 2.22

$$v_o = \sqrt{2\bar{P} \frac{AL}{m}} \quad (2.22)$$

โดยสมการนี้จะมีค่าความผิดพลาดเนื่องจาก ความเสียหายระหว่างลูกกระสุนกับพื้นผิวภายในลำกล้องปืน และค่าความดัน $\bar{P}$ ซึ่งในความเป็นจริงค่าความดันจะไม่คงที่ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ของปริมาตรลำกล้องปืนจากการเคลื่อนที่ของลูกกระสุน ซึ่งความดัน $\bar{P}$ ดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับแก๊สเบาและความดันภายใน Pressure reservoir (P_0) ถ้าพิจารณาเป็นแก๊สอุดมคติ (Idea gas) ซึ่งมีค่าความดันเป็น P_0 และความเร็วเสียง (Sound speed) เป็น a ดังนั้นความดันของ P ในขณะแก๊สขยายตัวจะมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.23

$$P = P_0 \left(1 - \frac{v_g}{\left(\frac{2}{\gamma} - 1 \right) a} \right)^{\frac{2\gamma}{\gamma-1}} \quad (2.23)$$

เมื่อ

v_g คือ ความเร็วของการขยายของแก๊ส
 γ คือ Ratio of the specific heats

ถ้าสมการที่ (2.23) ใช้ในการหาค่าความเร็วของแก๊สหลังลูกกระสุน จะได้อัตราส่วนของ P/P_0 จะขึ้นอยู่กับพจน์

$$\frac{v_g(\gamma-1)}{2a}$$

จากกระบวนการขยายตัวของแก๊ส จะขยายตัวจาก High pressure reservoir ซึ่งเป็นการแปลงพลังงานที่สะสมภายใน High pressure reservoir เพื่อไปขับ หรือเร่งความเร็วของลูกกระสุน ความเร็วสูงสุดของการไหลของแก๊สจะเกิดขึ้นเมื่อ แก๊สเปลี่ยนพลังงานทั้งหมดที่มีให้กับการขับ หรือเร่งความเร็วของลูกกระสุนให้มีความเร็วสูงสุด ซึ่งในขณะนั้นความดันของแก๊สจะลดลงจนเป็นศูนย์ โดยความเร็วของแก๊สที่เคลื่อนที่สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.24

$$v_{esc} = \left(\frac{2}{\gamma-1} \right) a \quad (2.24)$$

ดังนั้นความเร็วสูงสุดที่ทางออกของแก๊ส (Escape velocity, v_{esc}) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.25

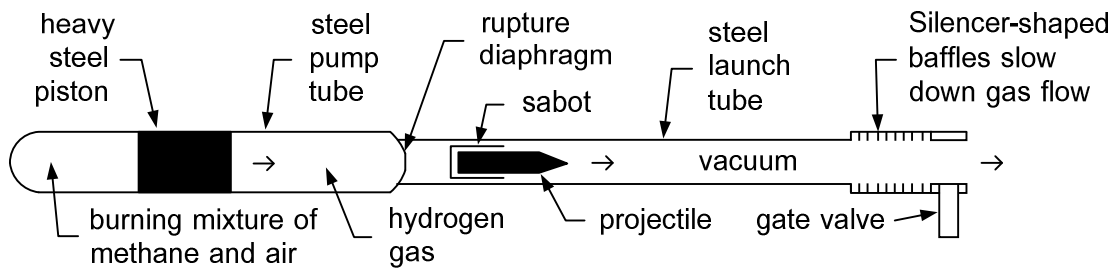
$$v_{esc} = \left(\frac{2}{\gamma-1} \right) a = \frac{2}{\gamma-1} \sqrt{\frac{\gamma R T_0}{M_{mol}}} \quad (2.25)$$

เมื่อ

v_{esc}	คือ ความเร็วสูงสุดของแก๊สที่ทางออก
T_0	คือ อุณหภูมิภายใน Pressure reservoir
M_{mol}	คือ มวลโมเลกุลของแก๊สภายใน Pressure reservoir
R	คือ Universal gas constant

ซึ่งความสัมพันธ์นี้แสดงว่า Light gas gun จะมีความเร็วสูงสุดก็ต่อเมื่อใช้แก๊สที่มีค่ามวลโมเลกุลต่ำ และแก๊สจะต้องมีอุณหภูมิสูง

ชุดยิงลูกกระสุนที่ใช้แก๊สเบายังสามารถเพิ่มความดันในการขับลูกกระสุนให้สูงขึ้น โดยใช้แก๊สเบาแบบสองช่วง หรือเรียกว่า ชุดยิงลูกกระสุนแบบใช้แก๊สเบาสองช่วง (Two stage light gas gun) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งเป็นชุดยิงที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยหลักการทำงาน จะมีแก๊สเบาที่บรรจุอยู่ภายในท่อที่มีผนังหนาและเรียบเป็นตัวขับลูกสูบ เรียกว่า Pump tube และอีกด้านหนึ่งจะปิดโดย Steel diaphragm เมื่อลูกสูบเคลื่อนที่เข้าใกล้ Steel diaphragm จะทำให้เกิดความดันสูงมาก จนทำให้แผ่น Steel diaphragm ฉีกขาด หลังจากนั้นแก๊สเบาก็จะไปขับลูกกระสุนให้เคลื่อนที่



รูปที่ 2.5 แผนภาพส่วนประกอบของ Two stage light gas gun

2.5.3 ต้นกำลังจากการกดอัดของสปริง (Including compressed springs)

ต้นกำลังของวิธีนี้จะใช้แรงที่ได้จากการกดอัดของสปริง ในการขับเคลื่อนกระสุน หรือลูกสูบ โดยที่แรงจากสปริงที่กระทำกับลูกกระสุนจะขึ้นอยู่กับค่าความแข็งของสปริง (K) ซึ่งค่าความแข็งของสปริงนี้มีผลต่อความเร็วของลำเจ็ท โดยแรงที่กระทำกับลูกกระสุนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.26

$$F = KX \quad (2.26)$$

เมื่อ

F	คือ แรงกดอัดของสปริง
K	คือ ค่าคงที่ของสปริง
X	คือ ระยะที่สปริงถูกการกดอัด

2.5.4 ต้นกำลังจากไฟฟ้า (Power of Electricity)

ต้นกำลังจากไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตลำเจ็ท ซึ่งในปัจจุบันเพิ่งได้มีการคิดค้น และถูกนำมาใช้งาน โดยหลักการที่ใช้ในการผลิตลำเจ็ทคือ จะทำการจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่มีให้กับชุดขับ (Actuator) จากนั้นชุดขับจะทำหน้าที่ขับเคลื่อน หรือกระแทกของเหลวที่อยู่ภายในหัวฉีด แล้วเกิดเป็นลำเจ็ทขึ้น ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมา [49] ได้ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า และใช้ชุดขับจาก Piezoelectric ในการผลิตลำเจ็ท แต่ยังมีข้อเสียคือ ปริมาตรของลำเจ็ทที่ผลิตได้ค่อนข้างน้อย จึงทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้คิดค้นชุดขับใหม่ที่ใช้แม่เหล็กไฟฟ้าในการกระแทกของเหลวที่อยู่ภายในหัวฉีดเพื่อผลิตลำเจ็ท โดยทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้ามีดังนี้

1. ทฤษฎีพลังงานจลน์ของวัตถุ พลังงานจลน์ของวัตถุคือ พลังงานที่อยู่ในวัตถุมวล (m) ที่กำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว (v) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.27 ซึ่งจะเห็นว่าพลังงานจลน์จะขึ้นอยู่กับมวล และความเร็วของลูกกระสุน

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.27)$$

เมื่อ

E_k	คือ พลังงานจลน์, J
m	คือ มวลของลูกกระสุน, kg
v	คือ ความเร็วของลูกกระสุน, m/s

2. ทฤษฎีของพลังงานไฟฟ้าที่สะสมในตัวเก็บประจุ ในการออกแบบชุดยิงจะใช้วิธีการเก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าไว้ในตัวเก็บประจุมีค่าความจุ (C) ที่แรงดันไฟฟ้า (V) ซึ่งสามารถคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่สะสมในตัวเก็บประจุได้จากสมการที่ 2.28 ซึ่งจะเห็นว่าพลังงานสะสมที่ใช้ในการยิงจะขึ้นอยู่กับความจุของตัวเก็บประจุ และแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

$$E_c = \frac{1}{2} CV^2 \quad (2.28)$$

เมื่อ

E_c	คือ พลังงานของตัวเก็บประจุ, J
C	คือ ความจุของตัวเก็บประจุ, F
V	คือ แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ, V

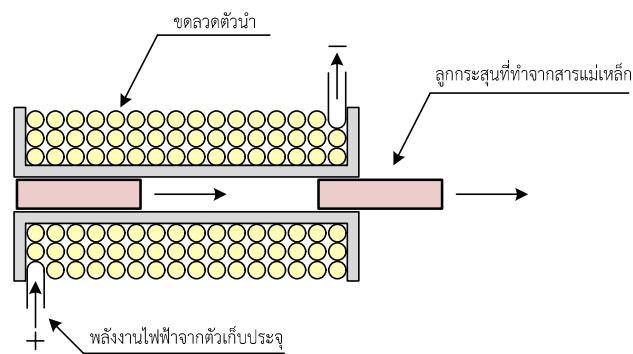
3. ทฤษฎีของแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อลวดตัวนำไฟฟ้ามีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในลวดตัวนำนั้น ซึ่งความแรงของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จะขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านลวดตัวนำ ยังมีกระแสไหลผ่านมากยิ่งมีสนามแม่เหล็กมาก โดยค่าที่บ่งบอกว่ามีสนามแม่เหล็กมากหรือน้อย คือ ค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก (B) มีหน่วยเป็น เทสลา และกรณีที่เป็นขดลวดตัวนำไฟฟ้า ความแรงของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จะขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดตัวนำ และจำนวนรอบของขดลวด (n) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.29

$$B = \frac{\mu_0 n I}{L} \quad (2.29)$$

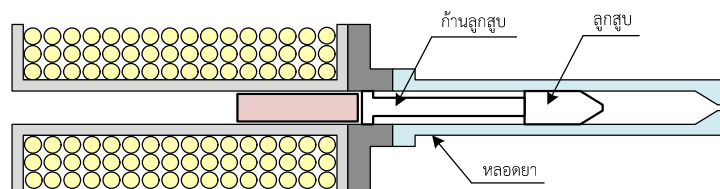
เมื่อ

B	คือ ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก (T)
μ_0	คือ สภาพซึมได้ของสนามแม่เหล็กในสุญญากาศ ($4\pi \times 10^{-7}$ T.A-1.m, Hm)
n	คือ จำนวนรอบของขดลวด (รอบ)
I	คือ กระแสไฟฟ้าในขดลวด (A)
L	คือ ความยาวของลวด (m)

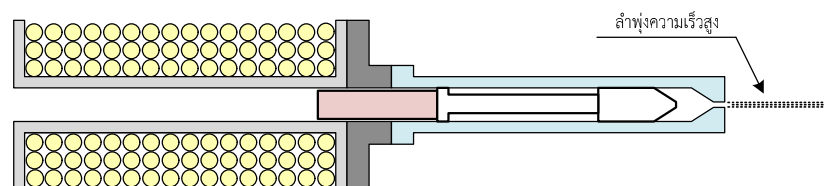
4. หลักการทำงานของชุดยิงลูกกระสุน ที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า และใช้ชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้า ในการยิงลูกกระสุน จะทำการประจุไฟฟ้าให้กับตัวเก็บประจุจนถึงระดับแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการ หลังจากนั้นทำการจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่อยู่ในตัวเก็บประจุให้กับขดลวดตัวนำเมื่อขดลวดตัวนำได้รับพลังงานไฟฟ้าก็จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น จากนั้นลูกกระสุนที่ทำมาจากสารแม่เหล็ก ที่บรรจุอยู่ในขดลวดตัวนำก็จะเคลื่อนที่ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ไปขับดัน หรือกระแทกกับก้านลูกสูบ ลูกสูบที่อยู่ภายในหัวฉีด จากนั้นก็จะเกิดเป็นลำเจ็ทดังแสดงในรูปที่ 2.7 และ 2.8



รูปที่ 2.6 หลักการทำงานของชุดยิงลูกกระสุน โดยใช้ระบบไฟฟ้าแม่เหล็ก



รูปที่ 2.7 ลูกกระสุนขณะเคลื่อนที่เข้ากระแทกกับก้านลูกสูบที่อยู่ภายในหลอดยา



รูปที่ 2.8 ก้านลูกสูบและลูกสูบเคลื่อนที่ผลักดันของเหลวหรือยาให้ผ่านรูเล็กของหลอดยา

2.6 เทคนิคการถ่ายภาพ

เทคนิคในการถ่ายภาพลำเจ็ทที่นิยมใช้ในงานวิจัย สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 เทคนิค โดยทั้ง 3 เทคนิคจะอาศัยหลักการหักเหของแสงเมื่อผ่านแก๊สที่มีความหนาแน่นเปลี่ยนแปลง โดยดัชนีการหักเหของแสงจะเป็นฟังก์ชันความหนาแน่นของแก๊สดังสมการที่ 2.30

$$n = \text{function} (\rho) \quad (2.30)$$

หรือสามารถประมาณเป็นสมการเส้นตรงได้จากสมการที่ 2.31

$$n = 1 + \beta \frac{\rho}{\rho_s} \quad (2.31)$$

เมื่อ

ρ_s คือ ความหนาแน่นของแก๊สที่ 0°C ที่ความดันบรรยากาศ

β คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของแก๊ส ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่าคงที่ของแก๊ส [46]

Gas	β
Air	0.000292
Nitrogen	0.000297
Oxygen	0.000271
Water vapor	0.000254
Carbon dioxide	0.000451

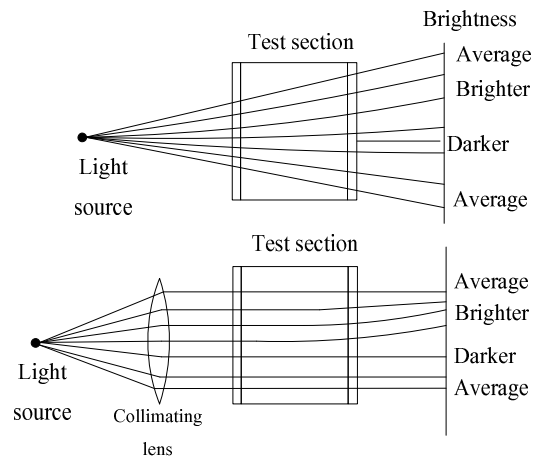
ดังนั้นหากพิจารณาว่า ความหนาแน่นของแก๊สที่เปลี่ยนแปลงไปในแนวแกน y ($d\rho/dy$) จะได้ ดัชนีการหักเหของแสงที่เปลี่ยนแปลงในแนวแกน y (dn/dy) เช่นกัน โดยหลักการถ่ายภาพทั้ง 3 เทคนิคสามารถอธิบายได้ ดังนี้

2.6.1 การถ่ายภาพด้วยเทคนิคชาโดว์กราฟ (Shadowgraph technique)

เมื่อพิจารณาการฉายแสงผ่านแก๊สในห้องทดสอบดังแสดงในรูปที่ 2.9 ลำแสงจะเกิดการหักเหเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของแก๊ส ถ้าวางจอร์รับแสงเพื่อแสดงรูปที่เกิดขึ้นจากการหักเหของแสงที่เคลื่อนที่ผ่านแก๊สจะพบว่า ลำแสงจะเกิดการหักเหโดยบางส่วนจะรวมกัน แสงที่ปรากฏที่จอจะสว่างมากกว่าปกติ ในขณะที่ลำแสงเกิดการกระจายตัวออกจากกัน แสงที่ปรากฏบนจอร์รับแสงจะมีมืดดังแสดงในรูปที่ 2.9

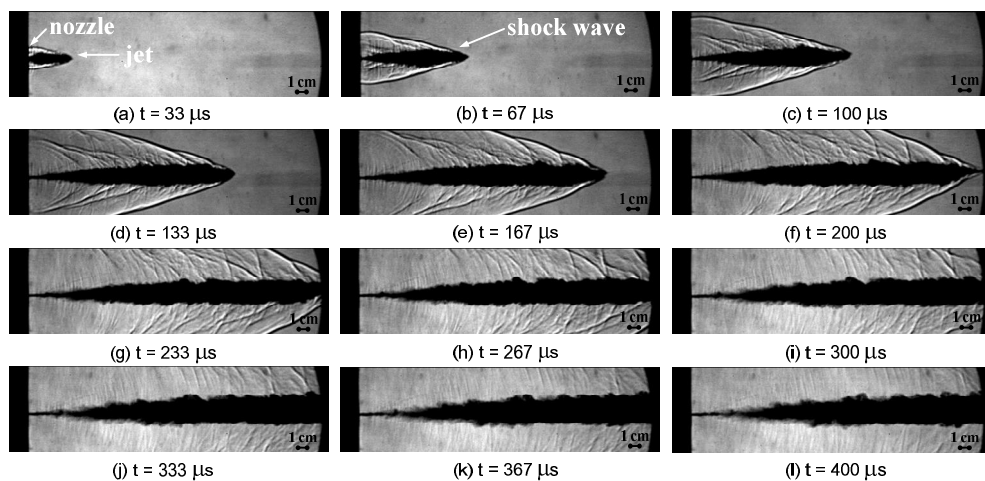
ถ้าพิจารณาการเบี่ยงเบนของลำแสงที่แสดงในรูปที่ 2.9 จะพบว่า ลำแสงที่ส่องผ่านแก๊สนั้น ถ้าไม่มีเลนส์ที่ทำให้แสงขนานกันภาพที่ปรากฏบนจอร์รับภาพจะมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของจริง ดังนั้นหากใช้เลนส์จะทำให้ภาพที่ขึ้นที่จอร์รับภาพมีขนาดเท่ากับขนาดจริง จากสมการของการหักเหของแสงในสมการที่ 2.30 จะพบว่า การถ่ายภาพด้วยเทคนิค Shadowgraph จะไวต่อความหนาแน่นที่เปลี่ยนแปลงด้วยความสัมพันธ์ $d^2\rho/dy^2$ เช่นเดียวกับดัชนีหักเหของแสง d^2n/dy^2 โดยในธรรมชาตินั้นจะสามารถพบลักษณะของภาพแบบ Shadowgraph ได้ เช่น แสงแวววาวจากหลังคาที่

ร้อนในฤดูร้อนทำให้เกิดภาพการไหลของความร้อนถึงแม้ว่าจะไม่มีควันทวีเรนหลังคาโดยภาพที่เห็นดังกล่าว คือ ภาพแบบ Shadowgraph โดยที่ดวงอาทิตย์ในภาพนี้เป็นแหล่งกำเนิดของแสง



รูปที่ 2.9 เทคนิคการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph [46]

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา ก็พบว่า ได้มีการใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph ในการศึกษาคุณลักษณะของลำเจ็ท ดังแสดงในรูปที่ 2.10

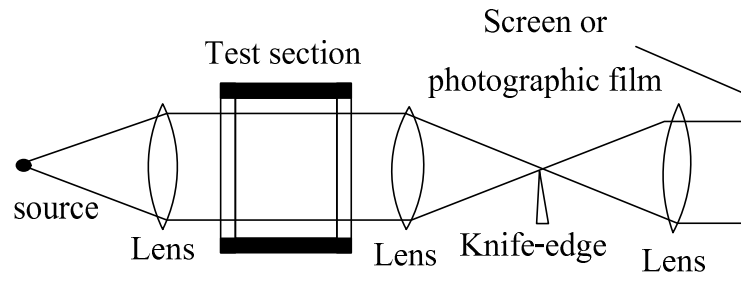


รูปที่ 2.10 ภาพถ่ายโดยเทคนิค Shadowgraph ของลำเจ็ทน้ำในอากาศ (Water jet in air, V_j , max = 1,669 m/s, Mach number = 4.9) [50]

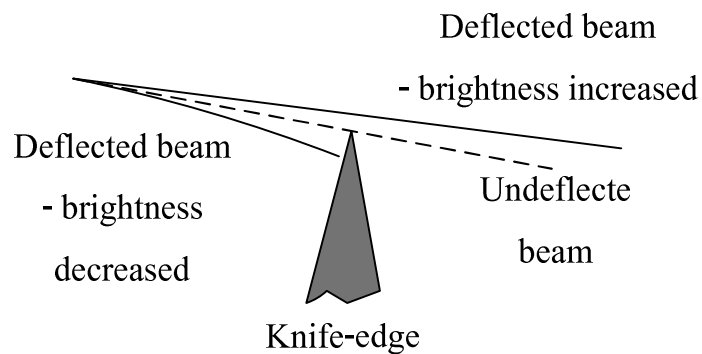
2.6.2 การถ่ายภาพเทคนิคชไลเรน (Schlieren technique)

หลักการพื้นฐานของการถ่ายภาพด้วยเทคนิค Schlieren ดังแสดงในรูปที่ 2.11 คือ เมื่อแสงจากแหล่งกำเนิดแสงเดินทางผ่านเลนส์ จะทำให้ลำแสงมีทิศทางขนานกันผ่านห้องทดสอบ จากนั้นจะส่องผ่านเลนส์อีกตัวซึ่งทำหน้าที่รวมแสงไปยังจุดโฟกัสซึ่ง ณ บริเวณนี้จะมี knife-edge วางติดตั้งอยู่

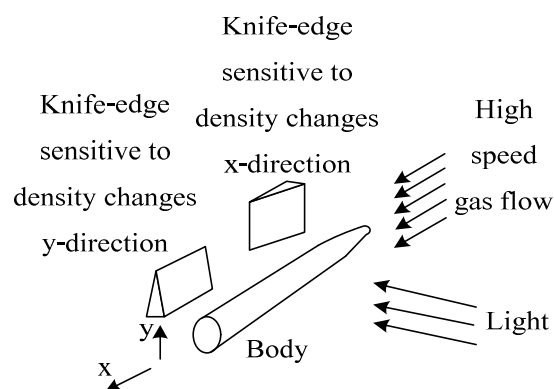
โดย Knife-edge จะทำหน้าที่ตัดแสงที่รบกวนออกไป ลำแสงที่ผ่าน Knife-edge จะสว่างมากขึ้นจึงทำให้รูปที่ปรากฏออกมามีความคมชัดมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.12 แสดงหลักการทำงานของ Knife-edge



รูปที่ 2.11 เทคนิคการถ่ายภาพแบบ (Schlieren) [46]

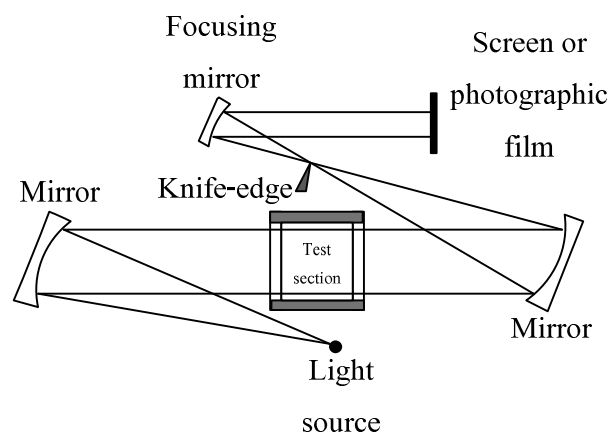


รูปที่ 2.12 หลักการทำงานของ Knife-edge [46]



รูปที่ 2.13 ผลจากการเปลี่ยนทิศทางของคมมีด [46]

รูปที่ 2.13 แสดงผลจากการเปลี่ยนทิศทางของ knife-edge เมื่อต้องการสังเกตการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของแก๊สในแนวแกน y ให้ปรับ knife-edge ให้อยู่ในแนวแกน x และเมื่อต้องการสังเกตการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของแก๊สในแนวแกน x ให้ปรับ knife-edge ให้อยู่ในแนวแกน y นอกจากนี้จะใช้เลนส์ในการทำให้แสงที่ส่องผ่านห้องทดสอบขนานแล้วยังสามารถใช้กระจกโค้ง (Parabolic mirror) ได้ ซึ่งจะสามารถช่วยลดขนาดพื้นที่ที่ใช้ในการทดลองลงดังแสดงในรูปที่ 2.14



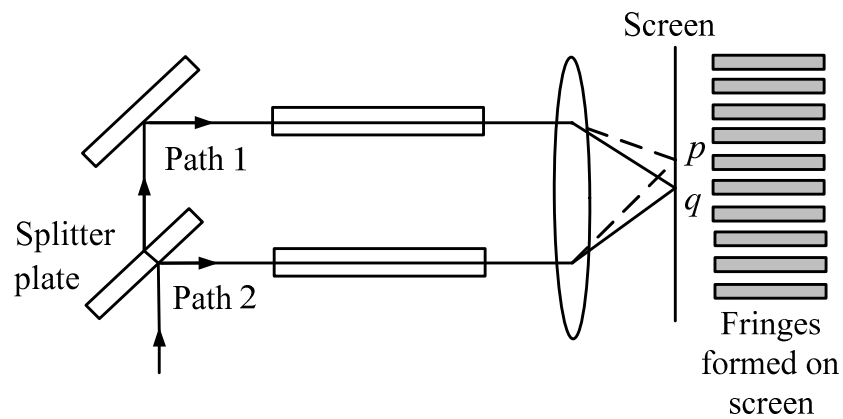
รูปที่ 2.14 เทคนิคถ่ายภาพแบบชไลเรนกับกระจกสะท้อน (Schlieren system with mirrors) [46]

2.6.3 การถ่ายภาพด้วยเทคนิคอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์ (Interferometer system)

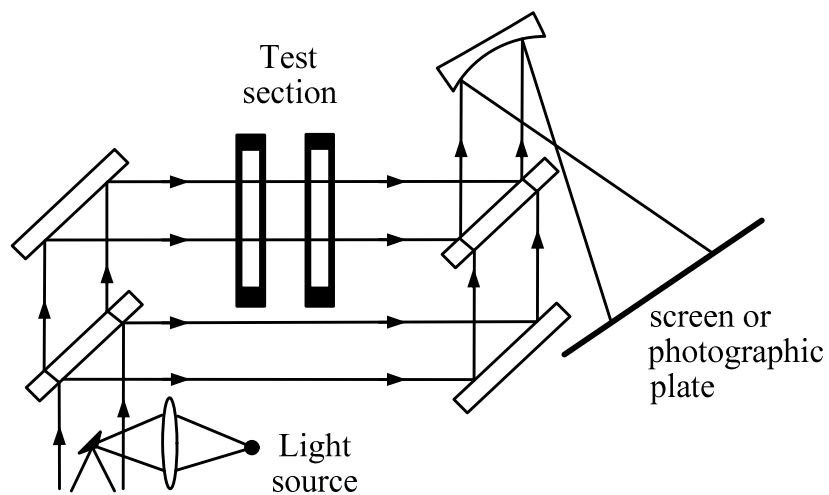
จากรูปที่ 2.15 แสดงการแยกลำแสงออกเป็นสองทิศทางโดย Splitter plate ซึ่ง Splitter plate จะมีคุณสมบัติเป็นกระจกสามารถสะท้อนแสงบางส่วนที่ตกกระทบ และสามารถส่งทะลุผ่านได้ในบางส่วน จึงทำให้เกิดการเดินทางของแสงออกเป็นสองเส้นทาง หากทำให้ลำแสงทั้งสองขนานกัน ดังรูป ซึ่งลำแสงสองลำมีระยะทางในการเดินทางต่างกัน จึงทำให้เฟสต่างกัน เมื่อนำลำแสงทั้งสองมาส่องผ่านเลนส์เพื่อรวมแสงจะทำให้เกิดบริเวณมืดและสว่างบนจอรับแสงที่เรียกว่า Fringes โดยหลักการดังกล่าวคือ หลักการพื้นฐานของการถ่ายภาพด้วยเทคนิคอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์

หากเพิ่มลำแสงอีกคู่หนึ่งให้ส่องผ่านแก๊สที่มีความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงในห้องทดสอบ ดังในรูปที่ 2.16 ลำแสงดังกล่าวจะมีเวลาในการเดินทางที่แตกต่างกันออกไปเป็นผลให้รูปแบบ Fringes ที่เกิดขึ้นแตกต่างกันไปด้วย เมื่อนำลำแสงทั้งสองฉายลงบนจอรับภาพ จะได้ภาพที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงการไหล ซึ่งเป็นหลักการที่เรียกว่า Mach-Zehnder interferometer โดยส่วนใหญ่ระบบอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์ มักจะใช้กระจกแทนการใช้เลนส์ด้วยเหตุผลเดียวกับรูปที่ 2.14

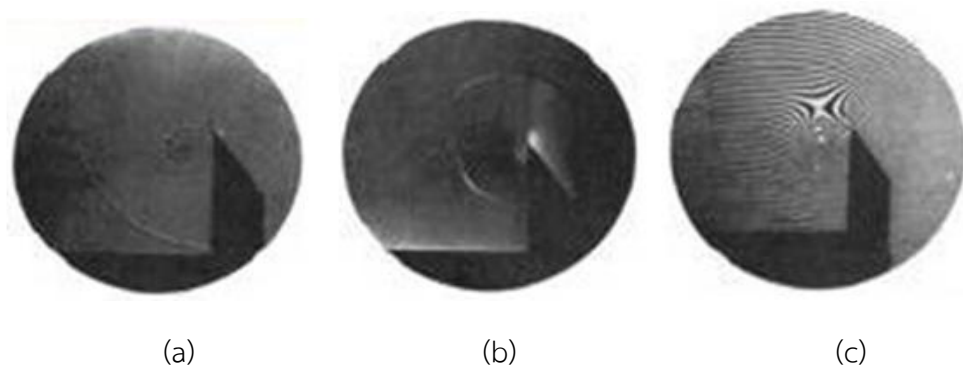
รูปที่ 2.17 แสดงภาพถ่ายจากเทคนิคการถ่ายภาพต่างกันจากการสังเกตพฤติกรรมการไหลในเงื่อนไขเดียวกัน ซึ่งจะพบว่า ภาพถ่ายด้วยเทคนิค Shadowgraph จะสังเกตพฤติกรรมการไหลได้ไม่ชัดเจนเท่ากับภาพถ่ายด้วยเทคนิค Schlieren ในขณะที่ภาพถ่ายด้วยเทคนิค Interferometer จะสังเกตพฤติกรรมการไหลได้จาก Fringes ในภาพได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 2.15 ระบบอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์ขั้นพื้นฐานโดยใช้ Beam splitter



รูปที่ 2.16 Mach-Zehnder interferometer.



รูปที่ 2.17 การถ่ายภาพของการไหลเดียวกันด้วยเทคนิค (a) Shadowgraph photograph, (b) Schlieren photograph และ (c) Interferometer photograph

2.7 การประยุกต์ใช้งานในอนาคต

อุปกรณ์ผลิตลำเจ็ท ที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า และใช้ชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้า ในอนาคตอุปกรณ์นี้อาจทดแทนอุปกรณ์ส่งถ่ายแบบใช้เข็มได้ และนอกจากนี้อาจประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ทางการแพทย์อย่างอื่นได้เช่น เครื่องผ่าตัดโดยใช้ลำเจ็ท (Micro jet cutting) [51] เครื่องทำลายก้อนเลือดที่อุดตันในเส้นเลือด (Blood clot dissolution) [52] เป็นต้น ซึ่งทั้งสองเครื่องที่กล่าวมานี้จะใช้หลักการทำงานคล้ายกันกับอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็ม แต่จะแตกต่างกันที่ จะต้องสามารถผลิตลำเจ็ทได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งก็สามารถทำได้โดยการสลับขั้วของแม่เหล็กไฟฟ้าของอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็ม ทำให้ลูกกระสุนเคลื่อนที่ไปข้างหน้า และถอยหลังได้ ส่วนการเติมของเหลวที่ใช้ในการผลิต ลำเจ็ทจะต้องทำการออกแบบหัวฉีดที่สามารถเติมของเหลวได้ในระหว่างการผลิตลำเจ็ท จะเห็นได้ว่าอุปกรณ์ผลิตลำเจ็ท ที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า และใช้ชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้านี้ อาจกล่าวได้ว่าเป็นอุปกรณ์ต้นแบบที่จะใช้ในการพัฒนาเครื่องมือหรืออุปกรณ์อื่นๆ ทางด้านการแพทย์ได้ต่อไปในอนาคต และทางด้านวิศวกรรม อาทิเช่น

2.7.1 Water jet cutting technology

การประยุกต์ใช้ลำเจ็ทในงานด้าน Water jet cutting ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.18 พบว่า วัสดุที่หลุดออกเกิดจากการกัดเซาะของลำเจ็ทที่ความเร็วเหนือเสียง (Supersonic) ไม่ได้เกิดจากความดันแต่เกิดจากความเร็วของกระแสลำเจ็ทที่กัดเซาะเอาอนุภาคหรือเกรนของวัสดุให้หายไป โดยความเร็วของลำเจ็ทเกิดจากความดันที่อยู่ภายในหัวฉีด ซึ่งหัวฉีดจะมีขนาดเล็กมาก โดยทั่วไปความดันที่ใช้ในอุตสาหกรรมจะมีความดันประมาณ 40 ksi ซึ่งทำให้ได้ลำเจ็ทที่ความเร็ว Mach number เท่ากับ 2 และที่ความดันประมาณ 60 ksi จะให้ความเร็วของน้ำที่ประมาณ Mach number เท่ากับ 3



รูปที่ 2.18 Water jet cutting technology [2, 3]

2.7.2 Water jet cleaning technology

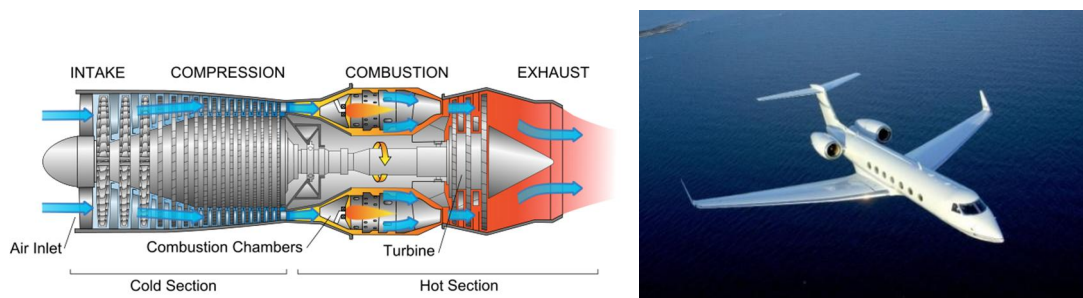
การประยุกต์ใช้ลำเจ็ทในงานด้าน Water jet cleaning ดังแสดงในรูปที่ 2.19 เป็นเทคโนโลยีที่ประยุกต์ใช้ลำเจ็ทความเร็วสูงเพื่อทำความสะอาดวัสดุมีหลักการคล้ายกับ Water jet cutting โดยการใช้ความเร็วของลำเจ็ทที่ความเร็วเหนือเสียง (Supersonic) เพื่อที่จะขจัดสิ่งสกปรกให้ออกไปได้

อย่างรวดเร็ว แต่มีความแตกต่างจาก Water jet cutting ตรงที่ใช้ความดันในการผลิต ลำเจ็ท และลักษณะของหัวฉีดที่ต่างกัน โดยใช้ความดันในการผลิตลำเจ็ทประมาณ 1,500-3,500 psi



รูปที่ 2.19 Water jet cleaning technology [53]

2.7.3 Jet engine technology



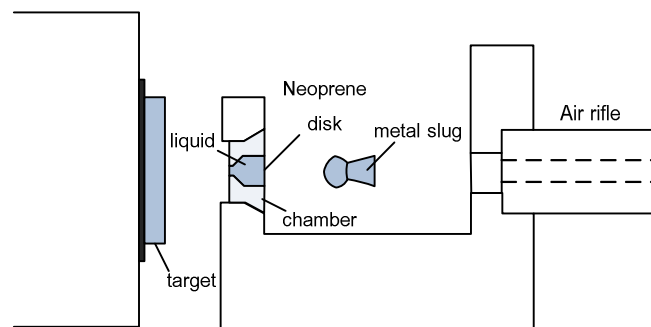
รูปที่ 2.20 Jet engine technology [46]

จากรูปที่ 2.20 แสดง Jet engine technology ซึ่งเครื่องยนต์ Jet เป็นเครื่องจักรที่ถูกออกแบบมาเพื่อผลิตแก๊สที่มีความเร็วสูงไหลผ่านช่องแคบที่กำหนด โดยเครื่องยนต์เริ่มต้นจากการหมุนของ Compressor ด้วย Starter เพื่ออัดอากาศจากภายนอกเครื่องยนต์เข้าไปในส่วนของห้องเผาไหม้ภายในเครื่องยนต์ ซึ่งความดันของอากาศที่อัดเข้าไปจะมีความดันเพิ่มขึ้นถึง 12 เท่าของอากาศก่อนเข้าเครื่องยนต์ ในส่วนห้องเผาไหม้หัวจุดไฟ (Igniter) ก็จะทำให้การจุดเครื่องยนต์ โดยจุดส่วนผสมของน้ำมันเชื้อเพลิง และอากาศในห้องเผาไหม้ โดยใช้หัวจุดไฟหนึ่งหรือสองหัว ซึ่งก็คล้ายกับหัวเทียนในรถยนต์ เมื่อเครื่องยนต์ติด Compressor จะหมุนด้วยความเร็วตามที่กำหนด แล้ว Starter และ Igniters ก็จะหยุดการทำงาน ต่อจากนั้นเครื่องยนต์ก็จะทำงานด้วยตัวเอง โดยไม่ต้องได้รับความช่วยเหลือจาก Starter และ Igniters トラบใดที่มีส่วนผสมของน้ำมันเชื้อเพลิง และอากาศไหลเข้าไปในห้องเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง ในการเผาไหม้จะใช้อากาศที่อัดเข้าไปประมาณ 25% ส่วนอากาศที่เหลือ

อีก 75% จะผสมกับแก๊สไอเสีย หรือแก๊สที่ผ่านการเผาไหม้เพื่อลดอุณหภูมิของ แก๊สไอเสีย ก่อนที่แก๊สไอเสียจะเข้าไปยังส่วนของกังหัน (Turbine) ส่วนของกังหันก็จะนำเอาพลังงานจากการเคลื่อนที่ของแก๊สที่ไหลผ่านเข้าไปใช้ในการหมุน Compressor และอุปกรณ์ต่างๆ แรงขับของเครื่องยนต์ (Thrust) ก็มาจากมวลของอากาศที่เกิดจากการเคลื่อนที่จากด้านหน้าของเครื่องแล้วก็ขับออกทางด้านหลังเครื่องยนต์ด้วยความเร็วสูง เมื่อเทียบกับความเร็วเมื่อตอนที่เข้ามาที่ด้านหน้า Compressor หากสามารถฉีดน้ำมันที่ความเร็วสูงมากเท่าใดก็จะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ดีขึ้นเท่านั้น ส่งผลให้เครื่องบินที่ติดตั้งเครื่องยนต์ Jet สามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยความเร็วสูงขึ้นนั่นเอง

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาคุณลักษณะ และพฤติกรรมของลำเจ็ททั้งในอดีต และในปัจจุบันได้มีการศึกษาอย่างกว้างขวาง ซึ่งที่มาของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาลำเจ็ทเริ่มต้นจากการเคลื่อนที่ของเครื่องบินที่บินด้วยความเร็วสูงๆ ผ่านพายุฝน ทำให้พื้นผิวของเครื่องบิน และใบพัดของเครื่องบินเกิดความเสียหายขึ้น เนื่องจากกระแทกของเม็ดฝน หลังจากนั้นเป็นต้นมาก็ได้มีการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับลำเจ็ทในด้านต่างๆ เพื่อนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาไปประยุกต์ใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมต่อไป เช่น การประยุกต์ใช้ในงานชุดเจาะ การตัด การทำความสะอาด การทำเหมืองแร่ การฉีดเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ SCRAM การเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ และการศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของวัตถุเมื่อเกิดการกระแทกจากลำเจ็ท นอกจากนี้ในปัจจุบันเริ่มมีการประยุกต์ใช้ลำเจ็ทในงานทางการแพทย์ เช่น ประยุกต์ใช้ในการส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็ม การทำลายก้อนเลือด การเจาะกระดูก และการผ่าตัด ซึ่งรายละเอียดดังกล่าวจะได้กล่าวต่อไป

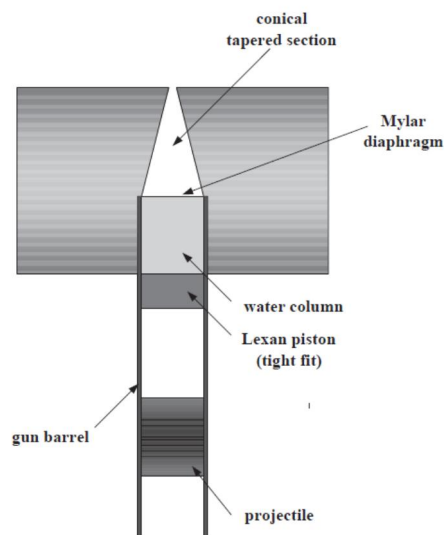


รูปที่ 2.21 Impact driven method (IDM) [2, 3]

ที่มาของการผลิตลำเจ็ทความเร็วสูง เริ่มจากในปี 1955, Jenkins [54] ได้ศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นบนผิววัสดุ ซึ่งได้แนวคิดมาจากการเคลื่อนที่ของเครื่องบินที่บินผ่านพายุฝนด้วยความเร็วสูง ทำให้พื้นผิวของเครื่องบิน และใบพัดเกิดความเสียหายขึ้นจากการกระแทกของเม็ดฝน โดยในการศึกษาได้ทำการยิงลูกกระสุนที่มีความเร็ว 240 m/s โดยมีต้นกำลังจากการอัดตัวของแก๊ส ยิงผ่านเม็ดฝนหรือหยดน้ำที่อยู่ในอากาศ แล้วทำการศึกษาความเสียหายที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของลูกกระสุน ในการศึกษาเช่นนี้ได้ทำการศึกษาอย่างต่อเนื่องเรื่อยมาจนถึงปี 1958 โดย Bowden และ Brunton [2, 3] ได้คิดค้นเทคนิคใหม่ในการผลิตลำเจ็ท ที่มีลักษณะของลำเจ็ทเป็นแบบ Pulse หรือผลิตลำเจ็ทได้ที่

ละครั้ง โดยใช้หลักการการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมในการผลิตลำเจ็ท ที่มีต้นกำเนิดจากการระเบิดของดินปืนในการขับเคลื่อนลูกกระสุนให้มีความเร็วสูง เพื่อเข้ากระแทกกับของเหลว 0.1 ml ที่อยู่ภายในหัวฉีดที่ทำจากสแตนเลส และที่ปิดท้ายหัวฉีดด้วยแผ่น Neoprene disk เพื่อไม่ให้ของเหลวไหลออก ดังแสดงในรูปที่ 2.21 เมื่อลูกกระสุนเข้ากระแทกกับแผ่น Neoprene disk และของเหลวที่อยู่ภายในหัวฉีดของเหลวภายในหัวฉีดจะเกิดการอัดตัว และเคลื่อนที่ผ่านรูหัวฉีดขนาด 1 mm อย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดเป็นลำเจ็ทที่มีความเร็วสูง โดยมีค่าเท่ากับ 1200 m/s และเรียกเทคนิคที่ใช้ในการผลิตลำเจ็ทนี้ว่า Impact driven method (IDM)

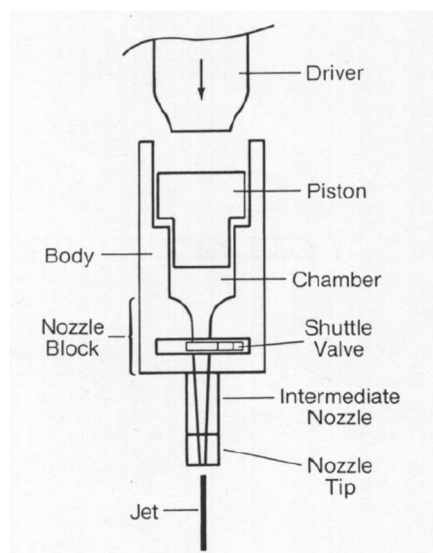
จากที่เทคนิค IDM มีศักยภาพมากในการผลิตลำเจ็ทที่มีความเร็วสูง ต่อมาในปี 1967 O, Keefe และคณะ [55] จึงได้ใช้เทคนิคนี้ในการผลิตลำเจ็ทของน้ำในระดับความเร็ว Hypersonic โดยชุดผลิตลำเจ็ทจะถูกติดตั้งในแนวตั้งภายในของหัวฉีดที่ทำจากเหล็ก มีลักษณะเป็นกรวยทำมุม 30° ของเหลวจะอยู่ในท่อที่ปิดกันด้วยลูกสูบ Lexan piston และแผ่น Mylar (diaphragm 1 mm) ก่อนเข้าหัวฉีด ดังแสดงในรูปที่ 2.22 เมื่อลูกกระสุนเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.714 ถึง 1.90 km/s ที่มีต้นกำเนิดจากการระเบิดของดินปืน เข้ากระแทกกับลูกสูบ Lexan piston และของเหลวที่อยู่ในท่อของลำกล้องปืนจนทำให้แผ่น Mylar เกิดการฉีกขาด แล้วของเหลวก็เคลื่อนที่เข้าไปภายในหัวฉีด และเคลื่อนที่ผ่านรูหัวฉีดอย่างรวดเร็วเกิดเป็นลำเจ็ทขึ้น โดยมีความเร็วเท่ากับ 4.58 km/s จากเทคนิคในการผลิตลำเจ็ทที่ Bowden และ Brunton ได้คิดค้นขึ้น ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีศักยภาพสูงในการผลิตลำเจ็ท และได้มีการนำเทคนิคการผลิตลำเจ็ทนี้ไปใช้ในการผลิตลำเจ็ทเพื่อศึกษาในด้านต่างๆ ที่เกิดขึ้น [56]



รูปที่ 2.22 การติดตั้งอุปกรณ์ในการผลิตลำเจ็ทที่มีความเร็วระดับ Hypersonic ของ O,Keefe และคณะ [55]

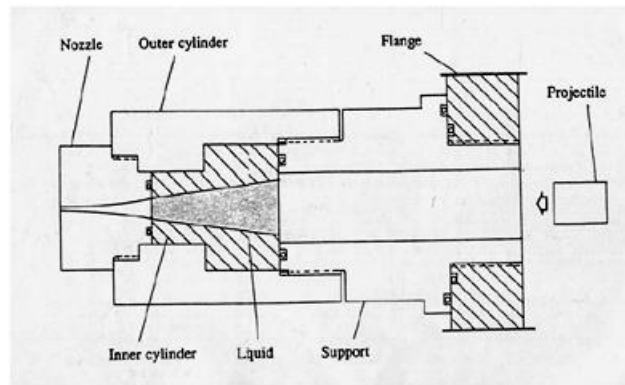
นอกจากเทคนิคในการผลิตลำเจ็ทที่ Bowden และ Brunton ได้คิดค้นขึ้นก็มีเทคนิคในการผลิตลำเจ็ทอื่นที่มีศักยภาพด้วยเช่นกัน โดยในปี 1976 Edney [57] ได้ผลิตลำเจ็ทที่ใช้เทคนิค

คล้ายคลึงกับเทคนิคของ Bowden และ Brunton โดยเทคนิคของ Edney จะทำการยิงลูกกระสุนที่มีความเร็ว 500 m/s ที่มีต้นกำเนิดจากการอัดตัวของแก๊สความดัน 300 bar ในการติดตั้งชุดทดลองจะคล้ายคลึงกับงานวิจัยของ O, Keefe และใช้หัวฉีดที่มีลักษณะภายในเป็นแบบ Exponential และแบบ Hyperbolic ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ความเร็วของลำเจ็ทที่ผลิตได้มีค่าเท่ากับ 3.5 km/s และมีความดันกระแทกเท่ากับ 1.8 GPa และยังพบว่าลักษณะโครงสร้างภายในหัวฉีดมีผลกับความเร็วของลำเจ็ท ต่อมาในปี 1984 Peter [58] ได้ศึกษาคุณลักษณะของลำเจ็ทในลักษณะการประยุกต์ใช้งาน ในการเจาะหินของการทำเหมืองแร่ โดยเทคนิคที่ใช้ในการผลิตลำเจ็ทจะคล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Edney แต่ต้นกำเนิดของ Peter จะที่ใช้การตกลอยอิสระของชุดขับที่ปล่อยจากหอบล่อยให้ตก กระแทกกับลูกสูบดังแสดงในรูปที่ 2.23 เมื่อปล่อยชุดขับจากหอบล่อยให้ตกอย่างอิสระแล้วกระแทก กับของเหลวที่อยู่ภายในหัวฉีดผ่านทางลูกสูบก็จะเกิดเป็นลำเจ็ทขึ้น ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ความเร็วของลำเจ็ทจะมีความสัมพันธ์กับพลังงานจลน์ของชุดขับที่ใช้ในการกระแทกลูกสูบเพื่อผลิตลำเจ็ท โดยความเร็วของลำเจ็ทมีค่าสูงสุดเท่ากับ 2.19 km/s

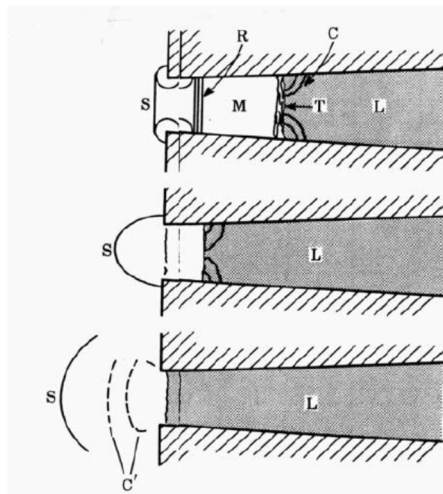


รูปที่ 2.23 ลักษณะของหัวฉีดที่ใช้ในการเจาะหิน [58]

ต่อมาในปี 1994 H. H. Shi ได้ศึกษาลำเจ็ทในหลายๆ ด้าน ทั้งทางด้านการผลิตลำเจ็ท [59, 60] ด้านผลกระทบที่เกิดขึ้นกับหัวฉีด Shock wave และการสันดาปของน้ำมันดีเซล จากงานวิจัยของ H.H.Shi ที่ได้ศึกษาจะใช้ลักษณะของหัวฉีดมีโครงสร้างภายในแบบ Hyperbolic และทำทำจาก Titanium เชื่อมต่อกับท่อทรงกระบอกที่ทำจากสแตนเลสดังแสดงในรูปที่ 2.24 จากการศึกษาพบว่า ความเร็วของลำเจ็ทที่ผลิตได้มีค่าเท่ากับ 4.5 km/s และยังพบว่าหัวฉีดที่ทำจาก Titanium ก็ไม่สามารถต้านทานความดันภายในหัวฉีดได้ทำให้เกิดการชำรุดในการผลิตลำเจ็ทเพียงไม่กี่ครั้ง และเมื่อลูกกระสุนเคลื่อนที่เข้ากระแทกกับของเหลว และลดความเร็วลงจะทำให้ความเร็วของลำเจ็ทลดลงเช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.24 การติดตั้งหัวฉีดในการศึกษาของ H. H. Shi และคณะ [59]

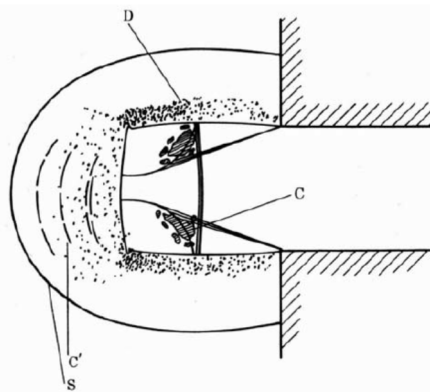


รูปที่ 2.25 การเกิดลำเจ็ทหลังจากที่ลูกกระสุนกระแทกกับของเหลวที่อยู่ภายในหัวฉีด C, T คือตำแหน่งที่เกิดการอัดส่วนหน้า, L คือของเหลว, M คือ บริเวณที่อากาศอัดตัว, R คือ คลื่นของอากาศ, S คือ Shock wave และ C' คือ การอัดตัวของคลื่น

นอกจากการผลิตลำเจ็ทที่กล่าวมาข้างต้นที่เป็นการผลิตลำเจ็ทที่มีลักษณะเป็นแบบ Pulse หรือผลิตลำเจ็ทได้ทีละครั้ง ยังมีวิธีอื่นที่สามารถผลิตลำเจ็ทได้ในลักษณะที่เป็นแบบ Continues หรือแบบต่อเนื่อง โดยใช้ Pump ความดันสูงขับเคลื่อนของเหลวที่อยู่ภายในหัวฉีดผ่านทางลูกสูบ ซึ่งในส่วนนี้จะมีลักษณะการผลิตลำเจ็ทที่เป็นแบบ Pulse แต่ในการผลิตลำเจ็ทแบบ Continues จะใช้ลักษณะการผลิตลำเจ็ทที่เป็นแบบ Pulse หลายๆ Pulse มาเรียงต่อกัน หรือมีหลายลูกสูบนั่นเอง และเมื่อของเหลวถูกลูกสูบขับเคลื่อนเข้าสู่ภายในหัวฉีดซึ่งจะทำให้เกิดความดันภายในหัวฉีดสูงถึง 70 MPa หลังจากนั้นของเหลวก็จะเคลื่อนที่ออกจากหัวฉีดผ่านทางรูหัวฉีดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 ถึง 0.3 mm จนทำให้เกิดเป็นลำเจ็ทที่มีความเร็วสูงถึง 1500 m/s ซึ่งการผลิตลำเจ็ทในลักษณะนี้ได้มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในงานทางด้านการทำเหมือง การตัด และการเจาะอุโมงค์ เป็นต้น [30] นอกจากนี้ K. Ohtani และคณะ [44] ได้ใช้ Laser เน้นยวนำของเหลวเพื่อผลิตลำเจ็ท โดยใช้ Ho:YAG

Laser ปล่อยแสงผ่านของเหลวที่อยู่ภายในท่อ เมื่อแสงเกิดการเหินวนำกับของเหลวจะกลายเป็นลำเจ็ทขึ้น โดยในการผลิตลำเจ็ทแต่ละครั้งจะใช้พลังงานเท่ากับ 550 mJ/Pulse

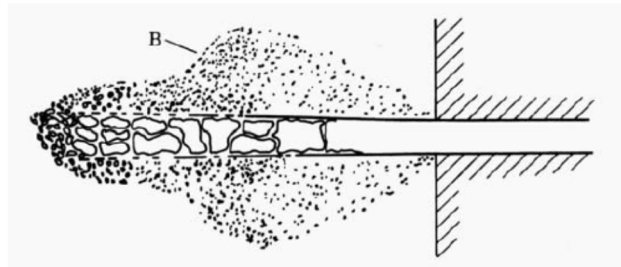
ในการศึกษาทางด้านลำเจ็ทนอกจากวิธีการผลิตลำเจ็ทให้มีความเร็วสูงแล้ว สิ่งที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือ พฤติกรรม และคุณลักษณะของลำเจ็ท ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการศึกษาทางด้านนี้จะเป็นพื้นฐานในการประยุกต์ใช้งานทางด้านลำเจ็ทต่อไปในอนาคต จากวิธีการผลิตลำเจ็ท เมื่อลูกกระสุนเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงเข้ากระแทกกับของเหลวที่อยู่ภายในหัวฉีดผ่านทางลูกสูบ ของเหลวที่อยู่ภายในหัวฉีดจะมีความดัน และความหนาแน่นภายในหัวฉีดเพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกันของเหลวก็จะเริ่มเคลื่อนที่ออกจาก รูหัวฉีดอย่างรวดเร็วเกิดเป็นลำเจ็ทขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.25 เมื่อลำเจ็ทเริ่มเคลื่อนที่ออกจากรูหัวฉีดด้วยความเร่ง ซึ่งจะทำให้ความเร็วของลำเจ็ทเริ่มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และในขณะเดียวกันบริเวณอากาศรอบข้างของลำเจ็ทจะเกิด Shock wave ขึ้น ซึ่งจะเกิดความดันสูงมากที่ตำแหน่งระหว่าง Shock wave กับส่วนปลายของลำเจ็ท ความเร่งของลำเจ็ทจะเริ่มลดลงเมื่อความดันที่อยู่ภายในหัวฉีดเริ่มลดลงจนถึงระดับความดันปกติ



รูปที่ 2.26 ลักษณะพฤติกรรมของคลื่นที่ทางออกของหัวฉีด S คือ Shock wave, C คือ โพรงอากาศ, C' คือ การอัดตัวของคลื่น และ D คือ กลุ่มของหยดน้ำ

รูปที่ 2.26 แสดงลักษณะพฤติกรรมของคลื่นที่ทางออกของหัวฉีดขณะเริ่มเกิดขึ้น ซึ่งจะเห็นแกนของลำเจ็ทจะมีหยดน้ำล้อมรอบ ตรงตำแหน่งด้านหน้าของลำเจ็ทจะเกิด Bow shock และ Compression wave เมื่อลำเจ็ทเริ่มลดความเร็วลง Shock wave จะมีมุมที่เพิ่มขึ้นแล้วสลายตัวไปในที่สุด ลักษณะของลำเจ็ทที่เริ่มลดความเร็วลงดังแสดงในรูปที่ 2.27 ซึ่งจะเห็นได้ว่าลักษณะของลำเจ็ทเริ่มมีหยดน้ำที่อยู่รอบข้างเพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงต้านจากอากาศรอบข้าง ซึ่งจากการใช้ทฤษฎีของ Stokes และ Taylor instability พิจารณาขนาดของหยดน้ำพบว่า หยดย้ำมีขนาดประมาณ 2-10 μm และในการผลิตลำเจ็ทแต่ละครั้ง ลักษณะของลำเจ็ทที่เกิดขึ้นจะมีความแตกต่างกัน เนื่องจากความดันที่เกิดขึ้นภายในหัวฉีดมีค่าแตกต่างกัน จากการศึกษาการของ Lin และ Lian [61] ที่ฉีดลำเจ็ทเข้าไปในอากาศ พบว่าค่าความหนืดของลำเจ็ทจะมีค่าที่ไม่แน่นอน ซึ่งขึ้นอยู่กับสามตัวแปร คือ 1) Reynolds number, Weber number และ Gas to liquid density ratio จากการศึกษาการพฤติกรรมของลำเจ็ท เมื่อฉีดลำเจ็ทเข้าไปในอากาศที่มีการผันผวนของความดันในอากาศจะเกิดเป็น

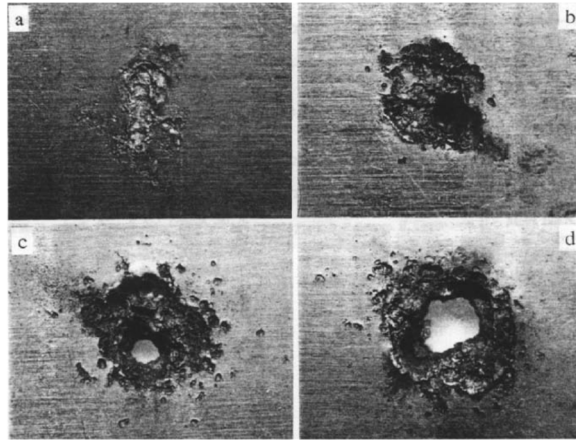
หยดน้ำขนาดเล็กล้อมรอบลำเจ็ทขึ้น ซึ่งจากการศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับความหนาแน่นของแก๊ส โดย Tseng และคณะ [62] พบว่า เมื่อเพิ่มความหนาแน่นของแก๊สขึ้นมากกว่าความหนาแน่นของลำเจ็ท จะทำให้ลักษณะของลำเจ็ทสั้น และกว้าง หรือมุมของลำเจ็ทเพิ่มมากขึ้น ซึ่งลำเจ็ทในลักษณะนี้จะมีความเร็วลดลง ต่อมา Wu และคณะ [63] ได้ศึกษาขนาดของหยดน้ำที่อยู่ล้อมรอบลำเจ็ท ในการวัดขนาดของหยดน้ำจะใช้วิธีการถ่ายภาพตรงบริเวณใกล้ๆ กับรูของหัวฉีด ซึ่งจากการตรวจวัดหยดน้ำพบว่า มีขนาดในหน่วยของ n-hexane และ n-tetradecane และยังพบว่า เมื่อความเร็วของลำเจ็ทเพิ่มขึ้นหยดน้ำจะมีขนาดลดลง



รูปที่ 2.27 พฤติกรรมของลำเจ็ทเมื่อเคลื่อนที่ออกจากหัวฉีด B คือ กลุ่มของหยดน้ำ [56]

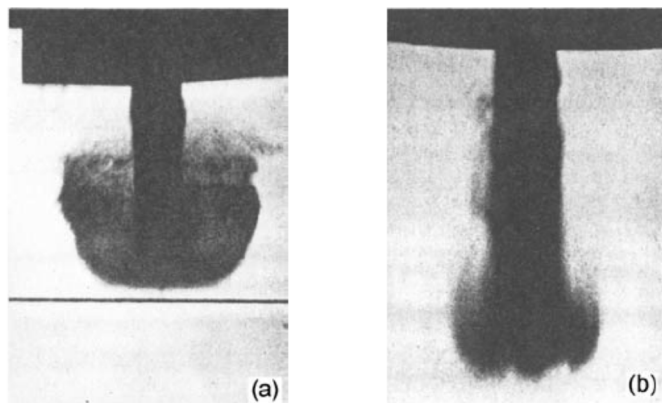
สิ่งที่สำคัญอีกอย่างในการศึกษาทางด้านลำเจ็ทคือ ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับวัตถุที่ลำเจ็ทเคลื่อนที่เข้ากระแทก ซึ่งได้แนวคิดมาจากการเคลื่อนที่ของเครื่องบินที่บินผ่านพายุฝนด้วยความเร็วสูงทำให้เกิดความเสียหายขึ้นที่ใบพัด และพื้นผิวของเครื่องบิน ความเสียหายที่เกิดเมื่อลำเจ็ทเคลื่อนที่เข้ากระแทกกับวัตถุซึ่งแบ่งออกได้ 5 รูปแบบ คือ 1) การเสียหายบนพื้นผิวที่มีลักษณะเป็นวงกลม 2) การแตกหักภายในพื้นผิว 3) การเสียรูป (Plastic deformation) 4) การเสียหายในลักษณะของแรงเฉือน และ 5) การแตกหัก รูปแบบของการเสียหายจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัตถุ และความเร็วของลำเจ็ทที่กระแทก ในการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับความเสียหายที่เกิดขึ้นกับพื้นผิวของวัตถุในครั้งแรก Hirano [64] จะใช้การเคลื่อนที่ของวัตถุเข้ากระแทกกับหยดน้ำแทนการผลิตลำเจ็ทแล้วไปกระแทกกับวัตถุ หลังจากนั้นเป็นต้นมาก็ได้มีการศึกษาอย่างจริงจังที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของวัตถุเข้ากระแทกกับหยดน้ำ จนมาถึง M. Lesser และ J. Field [65] ได้ทำการศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากลำเจ็ท โดยใช้ลำเจ็ทเข้ากระแทกแทนการเคลื่อนที่ของวัตถุผ่านหยดน้ำ ซึ่งจากการผลิตลำเจ็ทในขณะนั้นจะเกิดปรากฏการณ์ Shock wave ขึ้นด้วย ต่อมา H. H. Shi และคณะ [59] ได้ทำการศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของวัตถุเมื่อลำเจ็ทกระแทกด้วยความเร็ว 1500 m/s พบว่าของเหลวที่อยู่ภายในหัวฉีดสามารถอัดตัวได้ และเมื่อลำเจ็ทกระแทกกับวัตถุจะทำให้วัตถุเกิดความเสียหาย เนื่องจากความดันกระแทก และ Shock wave ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการประยุกต์ใช้องค์ความรู้ในงานทางด้านการตัด และได้มีการศึกษาอย่างต่อเนื่องทั้งทางด้านการผลิตลำเจ็ท ความเร็ว ความดันกระแทก ลักษณะโครงสร้างภายในของหัวฉีด และความเสียหายที่เกิดขึ้นกับลำเจ็ทเรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน จากการศึกษาความเสียหายที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของวัตถุ เนื่องจากการกระแทกของลำเจ็ทด้วยความเร็วระดับ Hypersonic ที่ H. H. Shi [60] ได้ทำการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 2.28 จะเห็นได้ว่า

ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของวัตถุมีความแตกต่างกัน เนื่องจากความแตกต่างของความเร็ว ระยะกระแทก และขนาดของรูหัวฉีดที่ใช้ในการผลิตลำเจ็ท



รูปที่ 2.28 ความเสียหายที่เกิดขึ้นบนแผ่นอลูมิเนียมที่ความเร็วของลำเจ็ทต่างๆ (a) 2727 m/s, (b) 3529 m/s, (c) 4111 m/s, (d) 4545 m/s ที่ stand-off distance 45 mm [60]

ในการศึกษาลักษณะ และพฤติกรรมของลำเจ็ท สิ่งที่สำคัญที่สุดคือ เทคนิคในการถ่ายภาพของลำเจ็ทที่เกิดขึ้น ซึ่งจะต้องเลือกใช้เทคนิคในการถ่ายภาพให้เหมาะสมกับสิ่งที่ต้องทำการศึกษา ดังที่จะกล่าวต่อไปนี้



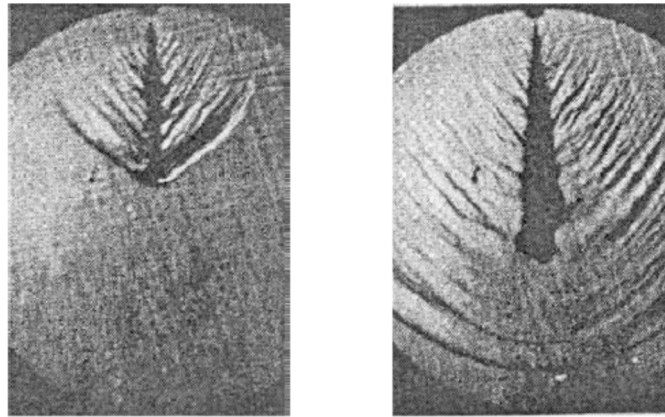
รูปที่ 2.29 ลักษณะของลำเจ็ทที่ได้จากการถ่ายภาพของ Bowden และ Brunton (a) ที่ความเร็วของลำเจ็ท 620 m/s และ (b) ที่ความเร็วของลำเจ็ท 770 m/s [2, 3]

จากการศึกษาลำเจ็ทของ Bowden และ Brunton [2, 3] ได้ใช้กล้อง High speed video camera บันทึกภาพของลำเจ็ทในระยะเวลาต่างๆ ที่กำลังเคลื่อนที่ออกจากหัวฉีด เพื่อนำไปคำนวณหาความเร็วของลำเจ็ท โดยกล้องที่ Bowden และ Brunton ใช้มีอัตราการถ่ายภาพ

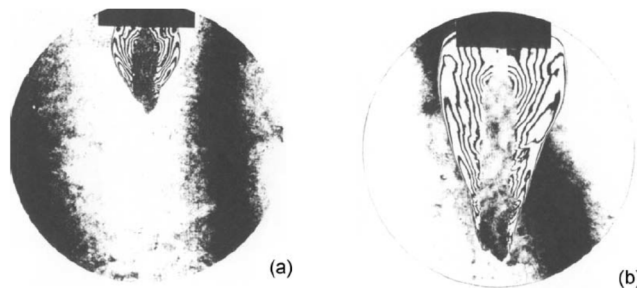
1,000,000 fps และจะต้องใช้แสงสว่างเพิ่มเติมเข้าช่วย โดยอุปกรณ์ที่สร้างแสงช่วยจะใช้หลอด Xenon flash tube ในการปล่อยแสง จากการถ่ายภาพลำเจ็ทของ Bowden และ Brunton ที่ลำเจ็ทที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วในระดับ Supersonic ดังแสดงในรูปที่ 2.29

การถ่ายภาพด้วยเทคนิค Shadowgraph เป็นการถ่ายภาพที่มีประสิทธิภาพสูงในการศึกษาการไหลของของไหลที่สามารถอัดตัวได้ จึงทำให้หลายๆ งานวิจัยได้ใช้เทคนิคนี้ในศึกษาปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับของไหล

การถ่ายภาพด้วยเทคนิค Schlieren จากงานวิจัยของ Nishida และคณะ [66] เพื่อทำการศึกษาพฤติกรรมของลำเจ็ทดีเซล จากการใช้เทคนิคนี้ในการถ่ายภาพลำเจ็ทดีเซลที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ทำให้เกิด Shock wave ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.30 ซึ่ง Shock wave ที่เกิดขึ้นจากการใช้เทคนิคนี้ในการถ่ายภาพจะมีความคมชัดมากกว่าการใช้เทคนิค Shadowgraph



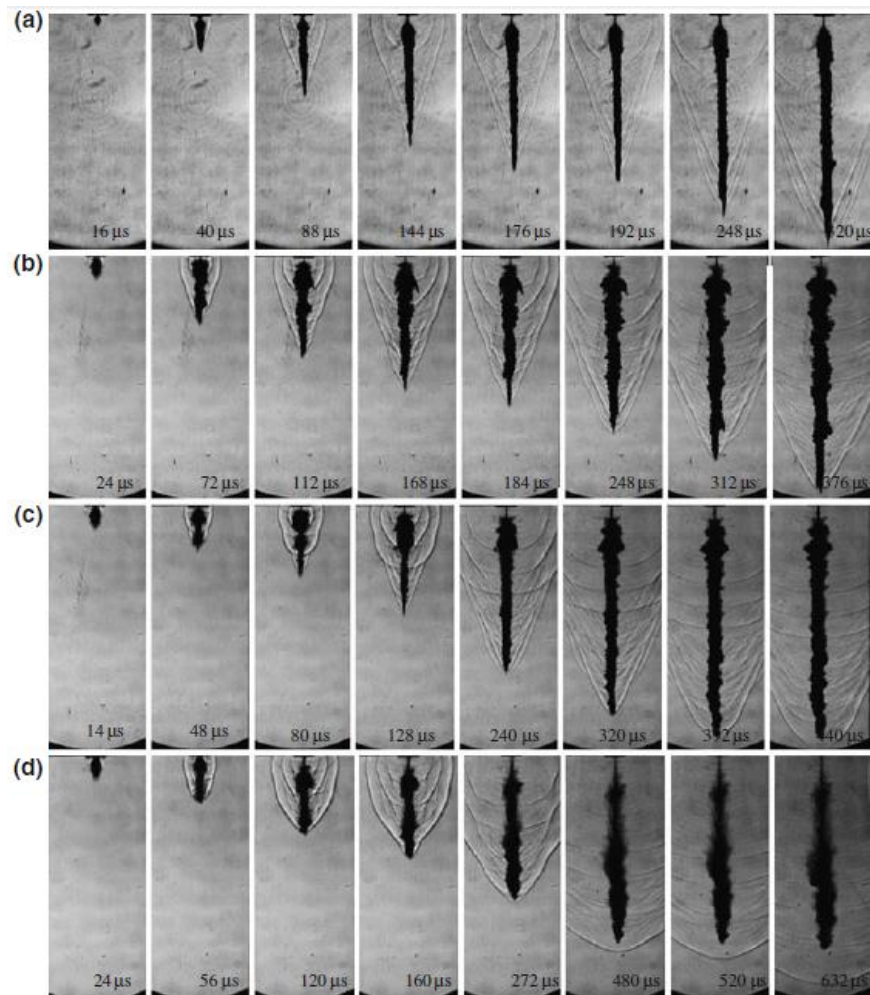
รูปที่ 2.30 ลำเจ็ทของน้ำมันดีเซลที่ความเร็วระดับ Supersonic โดยใช้เทคนิค Schlieren ในการถ่ายภาพ [66]



รูปที่ 2.31 ลักษณะของลำเจ็ทน้ำที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 2000 m/s (a) ลำเจ็ทที่กำลังเคลื่อนที่ออกจากหัวฉีด (b) ลำเจ็ทที่เคลื่อนที่ออกจากหัวฉีดในเวลาต่อมา [60]

การถ่ายภาพด้วยเทคนิค Holographic interferometry จะถูกใช้มากในงานวิจัยของ H. H. Shi [6] จากการศึกษาลำเจ็ทน้ำของ H. H. Shi ที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วระดับ Supersonic โดยการใช้

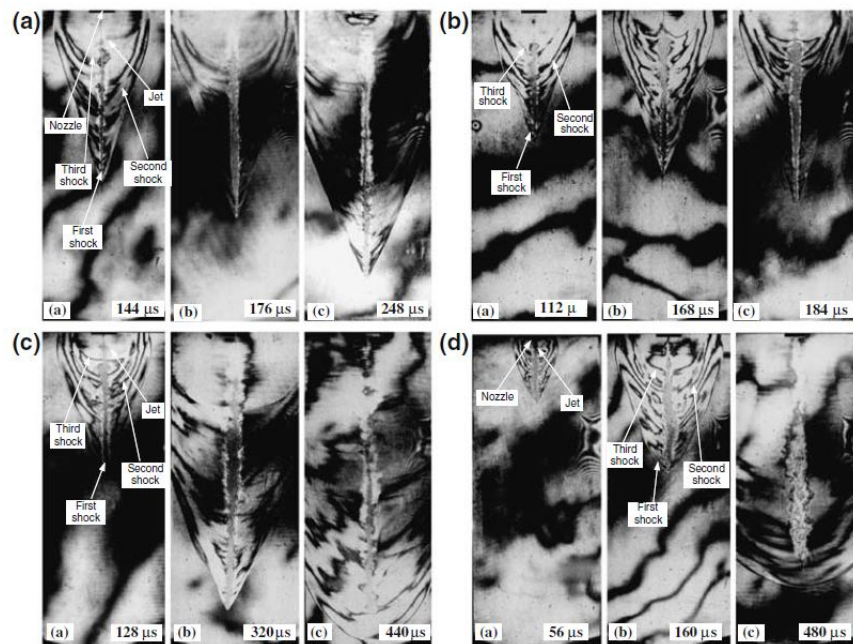
เทคนิค Holographic interferometry ในการถ่ายภาพลำเจ็ทขณะเคลื่อนที่ออกจากหัวฉีดดังแสดงในรูปที่ 2.31 ซึ่งจากรูปจะสามารถมองเห็นพฤติกรรมของความหนาแน่นภายในลำเจ็ทได้



รูปที่ 2.32 พฤติกรรมของลำเจ็ทที่ได้จากการใช้เทคนิค Shadowgraph ในการถ่ายภาพ (a) น้ำ, (b) ดีเซล, (c) น้ำมันก๊าดและ (d) แก๊สโซลีน [67]

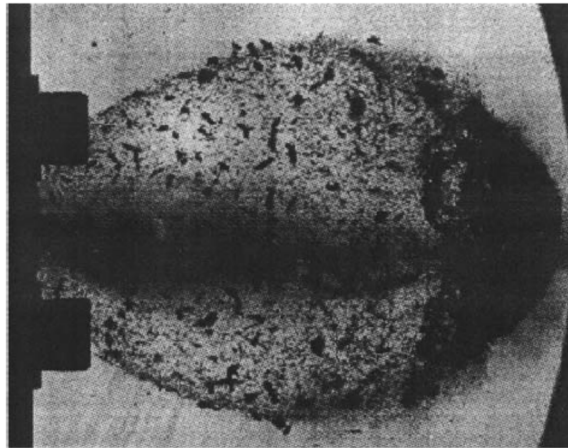
ในปี 2007 A. Matthujak และคณะ [67] ได้ศึกษาพฤติกรรมของลำเจ็ทน้ำ ดีเซล น้ำมันก๊าด และแก๊สโซลีน โดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph และ Holographic interferometry ร่วมกับกล้อง High speed video camera ที่ใช้อัตราการถ่ายภาพ 1,000,000 fps ในการบันทึกพฤติกรรมของลำเจ็ทที่เกิดขึ้นในระยะเวลาต่างๆ ที่ผลิตได้จากชุดผลิตลำเจ็ทแบบ Two-stage light gas gun ที่มีต้นกำลังจากการอัดตัวของแก๊ส และใช้หลักการ Impact driven method แบบกระแทกในการผลิตลำเจ็ท จากการศึกษาพบว่า ลำเจ็ทของของเหลวชนิดต่างๆ จากการใช้เทคนิค Shadowgraph ในการถ่ายภาพดังแสดงในรูปที่ 2.32 ซึ่งจะเห็นว่ารูปร่างของลำเจ็ท และมุมของ Shock wave ที่เกิดขึ้น จะมีลักษณะที่แตกต่างกันตามชนิดของของเหลวที่ใช้ในการผลิตลำเจ็ท โดยความเร็วของลำเจ็ทของน้ำ ดีเซล กลีเซอริน และแก๊สโซลีน มีค่าสูงสุดเท่ากับ 317 m/s, 295 m/s,

305 m/s และ 290 m/s ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการก่อตัวของลำเจ็ท และ Shock wave โดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบ Holographic interferometry ดังแสดงในรูปที่ 2.33 ซึ่งจะสามารถทราบถึงพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงของสภาวะอากาศรอบข้างของลำเจ็ท และ Shock wave ได้อย่างชัดเจน

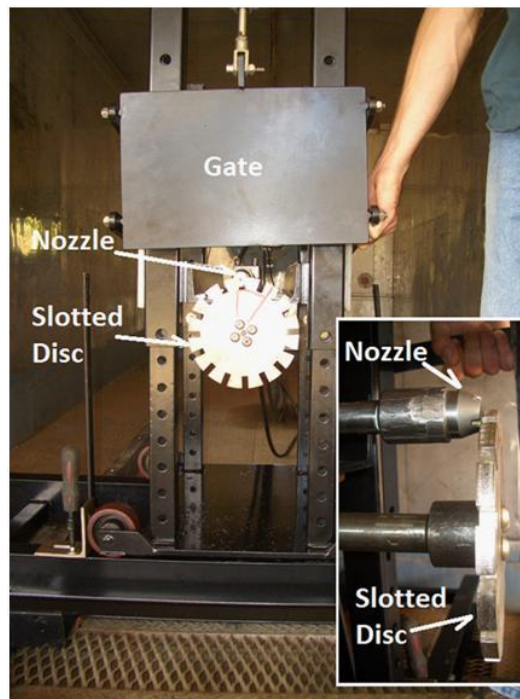


รูปที่ 2.33 พฤติกรรมของลำเจ็ทที่ได้จากการใช้เทคนิค Holographic interferometry ในการถ่ายภาพ (a) น้ำ, (b) ดีเซล, (c) น้ำมันก๊าดและ (d) แก๊สโซลีน [67]

วิธีที่ในการทำให้ลูกกระสุนมีความเร็วสูงเพื่อใช้ในการผลิตลำเจ็ทจากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ส่วนใหญ่จะการใช้การสะสมพลังงานในรูปแบบของการระเบิดจากสารประกอบทางเคมี หรือดินปืน ซึ่งการสะสมพลังงานในรูปแบบนี้มีศักยภาพมากในการทำให้ลูกกระสุนเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง โดยชุดทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือแบบ Single stage และแบบ Two stage ซึ่งรูปแบบ Two stage ที่ Nonaka และคณะ [68] ได้ทำการศึกษา พบว่ารูปแบบ Two stage สามารถทำให้ลูกกระสุนเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงถึง 3 km/s หรืออยู่ในระดับ Hypersonic ด้วยเหตุนี้จึงมีงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาที่เกี่ยวกับผลกระทบที่เกิดจากการชนกันของวัตถุที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง โดย Pianthong และคณะ [69] ได้ศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการชนกันของวัตถุ เพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นกับดาวเทียม เนื่องจากถูกอุกกาบาตรพุ่งชน โดยในการศึกษาได้ทำการสร้างโล่ (Whipple bumper shield) ขึ้น เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ป้องกันอุกกาบาตรของดาวเทียม วิธีในการทำให้วัตถุมีความเร็วสูงเพื่อในการพุ่งชนโล่ป้องกัน จะใช้ชุดทดลองที่เป็นแบบ Micro two-stage ซึ่งสามารถทำให้ลูกกระสุนที่ทำจาก Polyethylene เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสุดได้เท่ากับ 10 km/s และใช้ชุดทดลองนี้ในการศึกษาการกระแทกของลูกกระสุนกับแผ่นอลูมิเนียม [70] ซึ่งตัวอย่างของการกระแทกดังแสดงในรูปที่ 2.34



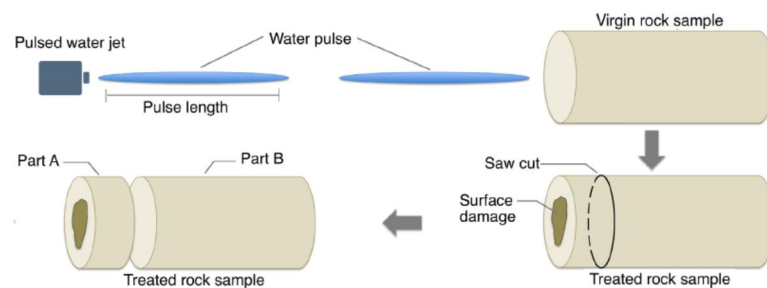
รูปที่ 2.34 การกระแทกของลูกกระสุนที่มีความเร็ว 3.9 km/s กับแผ่นอลูมิเนียมหนา 2 mm [70]



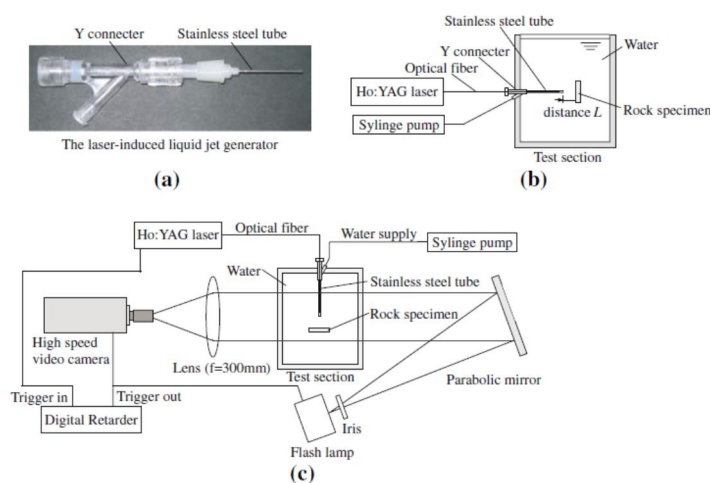
รูปที่ 2.35 เครื่องปล่อยลำเจ็ทในลักษณะที่เป็นแบบ Pulse จากการหมุนของ Slot disc [71]

ในการศึกษาผลกระทบที่เกิดจากลำเจ็ทกระแทกกับวัตถุได้มีการศึกษาอย่างต่อเนื่อง โดยในปี 2014 Sevda และ Michael [71] ได้ศึกษาการใช้ลำเจ็ทในการเจาะหินอ่อน และหินแกรนิต โดยชุดทดลองในการผลิตลำเจ็ทจะใช้ Slot disc ดังแสดงรูปที่ 2.35 ในการปล่อยลำเจ็ทเข้ากระแทกกับหินอ่อน และหินแกรนิตในลักษณะของความถี่ต่างๆ ทำให้ลำเจ็ทที่ผลิตได้จากการหมุนของ Slot disc ออกมาเป็น Pulse หลายๆ Pulse ดังแสดงในรูปที่ 2.36 ซึ่งในการศึกษาจะศึกษาอิทธิพลของความถี่ในการปล่อยลำเจ็ท ความยาวของลำเจ็ท และพลังงานที่ใช้ต่อความเสียหายที่เกิดขึ้นกับหินทั้ง 2 จาก

การศึกษาพบว่า ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับหินทั้งสองจะขึ้นอยู่กับพลังงานที่ใช้ในการเจาะ ซึ่งได้มาจากการวัดค่าต่างๆ ที่เกี่ยวข้องโดยใช้เครื่องมือในการประเมินผลกระทบที่เกิดจากแผ่นดินไหวแล้วนำไปคำนวณ ถ้าใช้พลังงานในการกระแทกมาก จะทำให้เกิดความเสียหายที่พื้นผิวของหินทั้งสองมากด้วยเช่นกัน เมื่อพิจารณาความยาวของลำเจ็ท และความถี่ พบว่า ความถี่ของลำเจ็ทมีผลทำให้เกิดความเสียหายกับพื้นผิวของหินทั้งสอง ซึ่งถ้ามีความถี่สูง โครงสร้างของหินก็จะเกิดความเสียหายเร็วขึ้น และจะทำให้ความยาวของลำเจ็ทสั้นลงด้วย



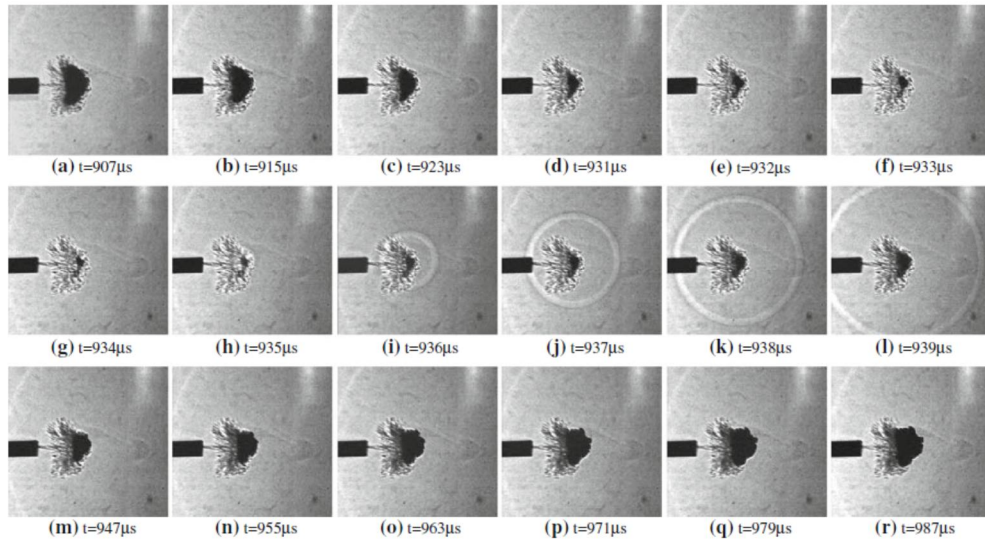
รูปที่ 2.36 ลักษณะของลำเจ็ทที่ผลิตได้จากการหมุนของ Slot disc [71]



รูปที่ 2.37 การติดตั้งชุดทดลอง (a) Ho:YAG Laser (b) Test chamber และ (c) การถ่ายภาพ [44]

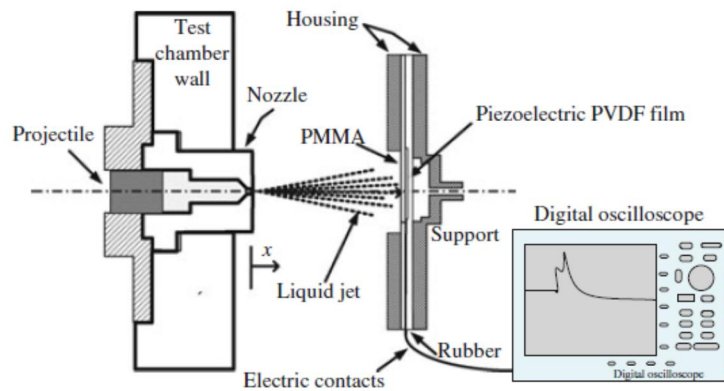
K. Ohtani และคณะ [44] ได้ศึกษาการเจาะหินทรายได้น้ำโดยใช้ลำเจ็ทกระแทก ในการผลิตลำเจ็ทจะใช้ Ho:YAG Laser ปลอกลำแสงผ่านน้ำที่อยู่ในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.4 mm เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดเป็นลำเจ็ท โดยการผลิตลำเจ็ทหนึ่งครั้งจะใช้พลังงานเท่ากับ 550 mJ/Pulse การติดตั้งชุดทดลองดังแสดงในรูปที่ 2.37 และใช้กล้อง High speed video camera ในการบันทึกพฤติกรรมของลำเจ็ท จากการศึกษาพบว่า เมื่อลำเจ็ทเคลื่อนที่ออกจากปลายท่อจนถึงตำแหน่งหนึ่ง ลำเจ็ทจะเกิดการยุบตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งการยุบของลำเจ็ทนี้จะทำให้เกิด Shock wave ขึ้นดังแสดงใน

รูปที่ 2.38 โดยที่ Shock wave จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 1532.6 m/s ($M=1.02$) ออกจากจุดกำเนิดเมื่อลำเจ็ท เมื่อลำเจ็ท และ Shock wave เคลื่อนที่เข้ากระแทกกับหินทรายที่อยู่ใต้น้ำ จะทำให้หินทรายหนา 2 mm เกิดความเสียหายขึ้นจากการใช้ลำเจ็ททั้งหมด 1800 Pulse

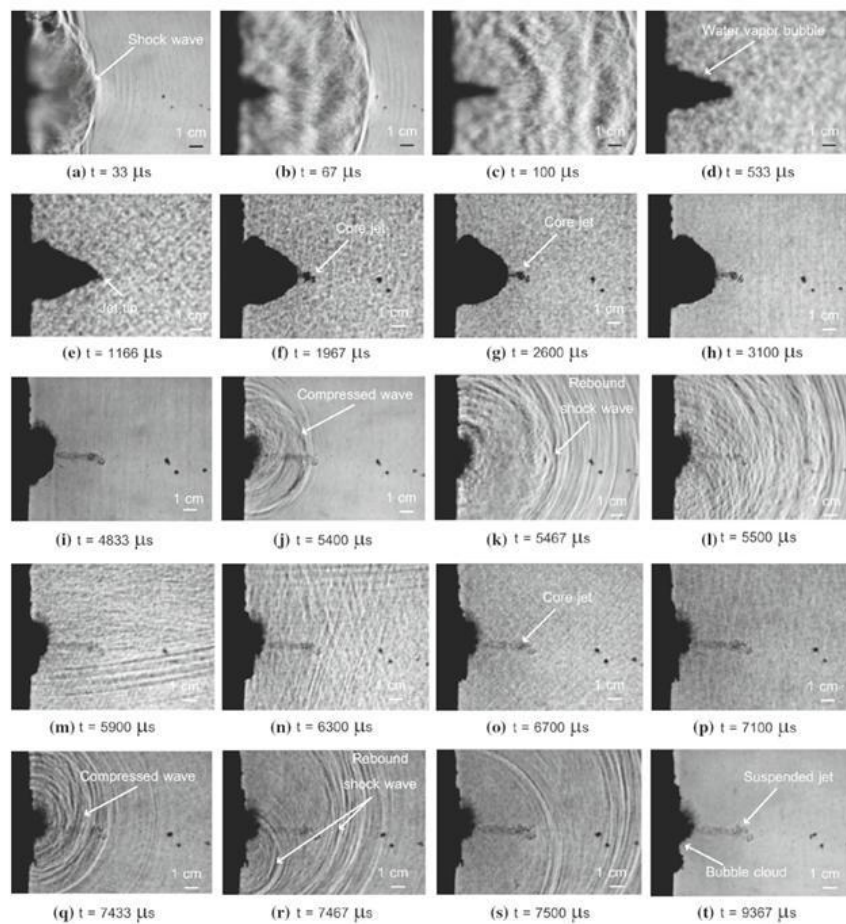


รูปที่ 2.38 พฤติกรรมของลำเจ็ทที่ระยะเวลาต่างๆ [44]

ในปี 2013 A. Matthujak และคณะ [72] ได้ศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากลำเจ็ท เมื่อฉีดเข้าไปในน้ำ โดยในการผลิตลำเจ็ทจะใช้ต้นกำเนิดจากดินปืน เพื่อขับเคลื่อนลูกกระสุนที่ทำจาก Polymethyl methacrylate (PMMA) ไปกระแทกกับของเหลวที่อยู่ภายในหัวฉีดตามวิธี Impact driven method เมื่อลำเจ็ทถูกฉีดเข้าไปในห้องทดสอบที่ภายในบรรจุน้ำ พฤติกรรมของลำเจ็ทที่เกิดขึ้นภายในห้องทดสอบในแต่ละเวลาจะถูกบันทึกด้วยกล้อง High speed video camera ที่มีอัตราการถ่ายภาพ $30,000 \text{ fps}$ ร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph ในการวัดความดันกระแทกของลำเจ็ทที่ระยะต่างๆ ห่างจากปลายหัวฉีดจะใช้ Polyvinylidene difluoride (PVDF) ที่ถูกห่อหุ้มด้วยแผ่น PMMA และเชื่อมต่อกับเครื่อง Digital oscilloscope ดังแสดงในรูปที่ 2.39 จากการศึกษาพบว่า ความเร็วของลำเจ็ทที่ผลิตได้จะขึ้นอยู่กับปริมาณของดินปืนที่ใช้ในการผลิตลำเจ็ท โดยความเร็วของ ลำเจ็ทที่ผลิตได้มีค่าเท่ากับ $550\text{-}2,290 \text{ m/s}$ เมื่อลูกกระสุนความเร็วสูงเคลื่อนที่เข้ากระแทกกับของเหลวที่อยู่ภายในหัวฉีด จะเกิดลำเจ็ท และ Shock wave ขึ้นภายในห้องทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.40 เมื่อลำเจ็ทเคลื่อนที่ต่อไปจนถึงระยะหนึ่ง กลุ่มของฟองน้ำ (Water vapor bubble) ที่ล้อมรอบลำเจ็ทจะเกิดการยุบตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งทำให้เกิด Compression shock และ Rebound shock ขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.40(j, k, q, r) จากการวัดความดันกระแทกของลำเจ็ทในน้ำ โดยใช้ PVDF ที่ระยะต่างๆ พบว่า เมื่อระยะห่างจากหัวฉีดมากขึ้นความดันกระแทกจะมีแนวโน้มลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.41 โดยความดันกระแทกที่ได้จากการกระแทกของฟองน้ำมีค่าสูงสุดเท่ากับ 35 GPa และจากการกระแทกของลำเจ็ทมีค่าสูงสุดเท่ากับ 24 GPa ที่ระยะ 15 mm ห่างจากปลายหัวฉีด



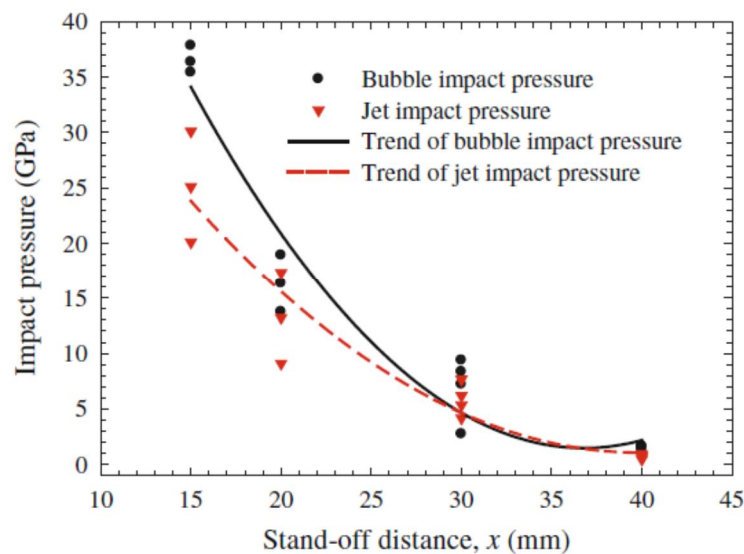
รูปที่ 2.39 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ในการวัดความดันกระแทกของลำเจ็ท [72]



รูปที่ 2.40 พฤติกรรมของลำเจ็ทที่ได้จากการใช้เทคนิค Shadowgraph ในการถ่ายภาพ [72]

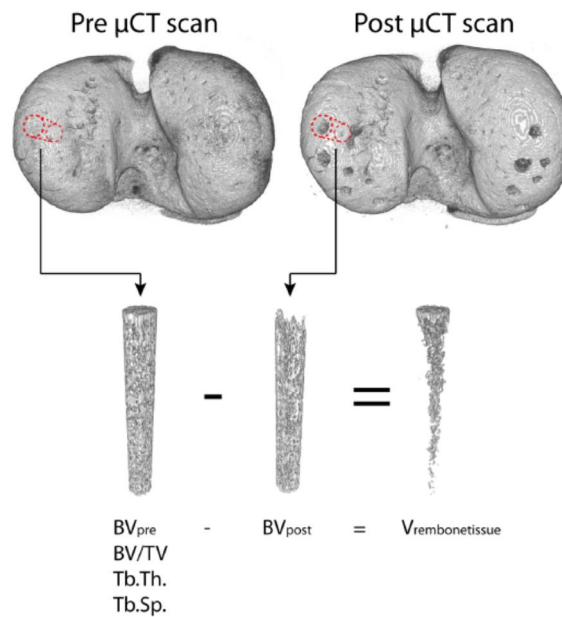
ในการประยุกต์ใช้ลำเจ็ทในงานทางด้านการแพทย์อาทิเช่น ประยุกต์ใช้งานทางด้านการผ่าตัด โดย Horst G และคณะ [73] ได้ใช้ลำเจ็ทในการผ่าตัดตับของกระต่าย เพื่อแยกเส้นเลือดออกจากตับ

โดยในการทดลองจะทำการเปรียบเทียบระหว่างอุปกรณ์ผ่าตัดด้วยลำเจ็ท (Jet cutter 4 ของบริษัท Biomedizin Technik-German) ที่มีขนาดรูหัวฉีด 0.1 mm และใช้ NaCl 10% เป็นลำเจ็ท กับ อุปกรณ์ผ่าตัดด้วย CUSA ของบริษัท Cavitron USA ที่ใช้ในโรงพยาบาลทั่วไป ที่ใช้หลักการการเคลื่อนที่ในแนวแกนด้วยความถี่ 23 KHz ของใบมีดขนาด 100 μm จากการศึกษาพบว่า หลังจากการผ่าตัดด้วยลำเจ็ท ตับจะเกิดการอักเสบของตับมากกว่าการใช้เครื่อง CUSA แต่หลังจากการผ่าตัด 3 วัน การอักเสบของตับก็เริ่มเท่ากัน แต่สิ่งที่ต่างกันอย่างเห็นได้ชัดคือ ระยะเวลาในการผ่าตัดซึ่งจะส่งผลถึงการเสียเลือด และการใช้เลือดระหว่างการผ่าตัดของอุปกรณ์ผ่าตัดด้วยลำเจ็ทจะน้อยกว่าเครื่อง CUSA และยังพบว่า การผ่าตัดด้วยลำเจ็ทจะทำให้เลือดแข็งตัว ซึ่งจะทำให้แผลหลังการผ่าตัดหายเร็วขึ้น



รูปที่ 2.41 ความดันกระแทกที่ระยะต่างๆ ห่างจากปลายหัวฉีด [72]

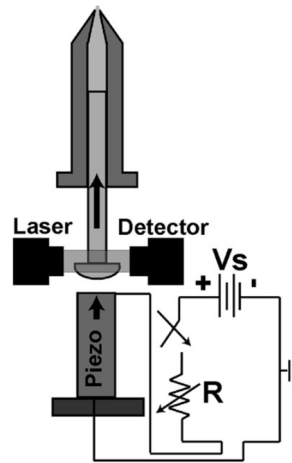
นอกจากจะใช้ลำเจ็ทในการผ่าตัดแล้วยังสามารถใช้ลำเจ็ทในการเจาะได้อีกด้วย โดย S. den Dunnen และ G. J. M. Tuijthof [74] ได้ใช้ลำเจ็ทในการเจาะกระดูก โดยในการผลิตลำเจ็ทจะใช้เครื่อง Tensile กดอัดน้ำที่อยู่ภายในท่อทรงกระบอกด้วยแรง 295 kN ซึ่งจะทำให้ภายในท่อทรงกระบอกมีความดัน 70 MPa ก่อนที่จะปล่อยเข้าสู่หัวฉีดที่มีขนาดรูหัวฉีด 0.3-0.6 mm โดยในการทดลองจะนำกระดูกหมูเข้าเครื่อง MicroCT80 Scanner เพื่อตรวจสอบโครงสร้างของกระดูกก่อนการทดลองดังแสดงในรูปที่ 2.42 หลังจากนั้นใช้ลำเจ็ทในการเจาะกระดูกเป็นเวลา 5 s และเมื่อเจาะเสร็จนำกระดูกเข้าเครื่อง MicroCT80 Scanner เพื่อตรวจสอบโครงสร้างของกระดูกหลังการทดลองดังแสดงในรูปที่ 2.42 แล้วนำค่าที่ได้ลบกัน ซึ่งจะได้กระดูกส่วนที่หายไป จากการศึกษาพบว่า ลำเจ็ทที่ฉีดด้วยขนาดรูหัวฉีด 0.3-0.6 mm มีอิทธิพลกับความหนาของเนื้อเยื่อกระดูก และความหนาแน่นของเนื้อกระดูก แต่ไม่มีอิทธิพลกับช่องว่างในกระดูก เนื่องจากอัตราส่วนของปริมาตรกระดูกต่อปริมาณน้ำที่ฉีดเข้าไปมีค่าน้อย



รูปที่ 2.42 โครงสร้างของกระดูกก่อน และหลังการทดลองจากเครื่อง MicroCT80 Scanner [74]

ในอีกด้านหนึ่งที่นิยมมากสำหรับการประยุกต์ใช้ลำเจ็ทในทางการแพทย์คือ การประยุกต์ใช้ในการส่งถ่ายยาแบบไม่เข็ม ซึ่งอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มได้มีการผลิต และจำหน่ายแล้วในหลายๆ บริษัท [75] ซึ่งสิ่งที่แตกต่างกันของแต่ละอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มที่วางขายคือ ต้นกำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อนยาที่บรรจุอยู่ภายในหัวฉีดให้เกิดเป็นลำเจ็ทยา ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ต้นกำลังจากการกดอัดของสปริง และความดันของแก๊ส ซึ่งข้อดีของต้นกำลังจากการกดอัดของสปริงคือ อุปกรณ์มีขนาดเล็ก กลไกไม่ซับซ้อน สะดวกในการใช้งาน และมีขนาดเล็ก แต่มีข้อเสียคือ ความเร็วของลำเจ็ทยาค่ำ ทำให้ระยะของยาที่ผ่านเข้าไปในชั้นผิวหนังได้ไม่ลึกมากนัก จึงทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งานในบริเวณใด บริเวณหนึ่งของร่างกายเท่านั้น แต่ถ้าต้องการให้ระยะของยาที่ผ่านเข้าไปในชั้นผิวหนังมากๆ จะต้องทำการปรับแต่งอุปกรณ์ใหม่เพื่อเพิ่มค่า K ของสปริงให้สูงขึ้น หรือเปลี่ยนสปริงใหม่ และเมื่อใช้เป็นระยะเวลานานๆ จะทำให้สปริงเกิดการล้าทำให้ความเร็วของลำเจ็ทยาลดลงจากเดิม ส่งผลให้การส่งถ่ายยามีประสิทธิภาพลดลง ส่วนต้นกำลังจากความดันของแก๊ส ซึ่งข้อดีคือ มีความสะดวกในการใช้งาน เช่นเดียวกับต้นกำลังจากการกดอัดของสปริง แต่สิ่งที่ดีกว่าคือ สามารถควบคุมระยะของยาที่ผ่านเข้าไปในชั้นผิวหนังได้ โดยไม่ต้องทำการปรับแต่งอุปกรณ์ โดยทำการเพิ่ม หรือลดความดันในการฉีดเท่านั้น แต่ข้อเสียคือ จะต้องมียระบบสร้างความดันที่มีค่าสูง เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนยาที่อยู่ภายในหัวฉีด จึงทำให้ต้นกำลังมีขนาดใหญ่ และมีราคาแพง ด้วยเหตุนี้จึงมีนักวิจัยได้คิดค้นต้นกำลังใหม่เพื่อปรับปรุงต้นกำลังเดิมที่กล่าวมาข้างต้นให้ดียิ่งขึ้น จากการใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า เพื่อจ่ายให้ชุดขับเคลื่อนการผลิตลำเจ็ท โดยในปี 2007 Stachowiak และคณะ [49] ได้ใช้หลักการทำงานทางกายภาพของชุดขับเคลื่อนจาก Piezoelectric คือ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน Piezoelectric จะทำให้เกิดการยืดหดตัว จึงใช้หลักการนี้เป็นชุดขับเคลื่อนที่ใช้ต้นกำลังจากการไฟฟ้าในการผลิตลำเจ็ท ดังแสดงในรูปที่ 2.43 โดยข้อดีคือ

สามารถควบคุมความเร็วของลำเจ็ทได้ แต่มีข้อเสียคือ ปริมาณของเหลวที่อยู่ในหัวฉีดมีปริมาณน้อยมาก อยู่ในระดับนาโนลิตร (nL) ถึงไมโครลิตร (μL) เท่านั้น ทำให้การประยุกต์ใช้งานมีขอบเขตที่จำกัด

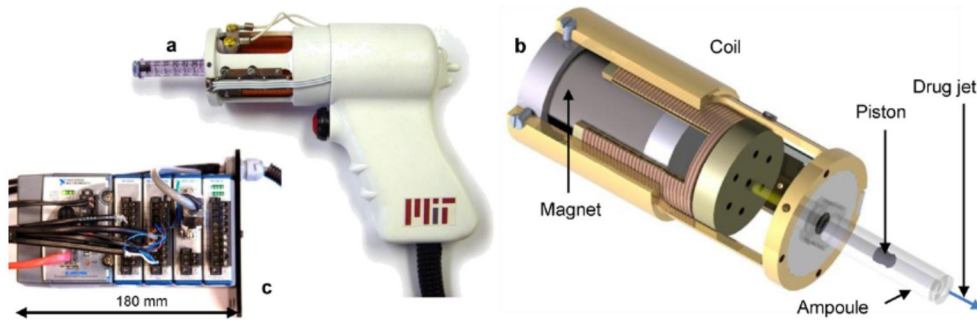


รูปที่ 2.43 needle free injection using Piezoelectric [49]

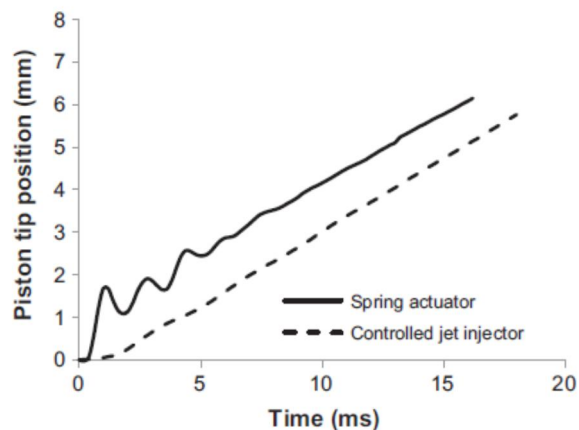
ต่อมาในปี 2011 Taberner และคณะ [76] ได้ศึกษาการส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็ม ที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า และใช้ชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้แรง Lorentz ในการขับเคลื่อนของเหลวที่อยู่ในหัวฉีดขนาด 0.22 mm เกิดเป็นลำเจ็ทขึ้น ในการศึกษาได้ทำการสร้างอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็ม ซึ่งอุปกรณ์นี้ได้ติดตั้งระบบเซ็นเซอร์ เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของขดลวดทองแดงในการขับเคลื่อนของเหลวที่อยู่ในหัวฉีด โดยชุดขับประกอบด้วย ขดลวดทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.32 mm พันรอบแกนขดลวด 582 รอบ ภายในมีแม่เหล็กแรงสูง NdFeB ดังแสดงในรูปที่ 2.44 จากการศึกษาพบว่า ความเร็วของลำเจ็ทมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ขดลวดทองแดงเพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 200 m/s ที่ปริมาตร 0.2 mL และแรงดันไฟฟ้า 200 V เมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มที่ใช้ต้นกำลังจากสปริงพบว่า ต้นกำลังจากไฟฟ้าจะเกิดการสั่นระหว่างการขับเคลื่อนน้อยกว่าต้นกำลังจากสปริงดังแสดงในรูปที่ 2.45 เนื่องจากอุปกรณ์ส่งถ่ายยาที่สร้างขึ้นได้ติดตั้งระบบเซ็นเซอร์ควบคุมการเคลื่อนที่ของขดลวดทองแดง ทำให้การสั่นระหว่างการขับเคลื่อนลดลง ซึ่งจะทำให้ลดความเจ็บปวดได้ และเมื่อฉีดเข้าไปใน Poly acrylamide 10% พบว่า ความลึกสูงสุดประมาณ 18 mm

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่า วิธีในการผลิตลำเจ็ทมีหลายวิธีด้วยกัน ซึ่งตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่ได้มีการศึกษาวิจัย และพัฒนาวิธีการผลิตลำเจ็ทขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนได้มีการใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า ในการผลิตลำเจ็ท ซึ่งการศึกษาต้นกำลังจากไฟฟ้าในปัจจุบันยังมีการศึกษาในด้านต่างๆ ที่ค่อนข้างน้อย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์ผลิตลำเจ็ท ที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า และใช้ชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้าในการผลิตลำเจ็ท โดยในการศึกษาจะทำการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ผลิตลำเจ็ท ที่ใช้ชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้า และใช้วิธี Impact driven method แบบกระแทกในการผลิตลำเจ็ท ซึ่งจะแตกต่างจากวิธีผลิตลำเจ็ทจากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น เนื่องจาก การผลิตลำเจ็ทโดยใช้วิธี Impact driven method แบบกระแทก จะทำให้ความเร็วของลำเจ็ทที่ผลิต

ได้มีค่าสูงกว่าความเร็วของลำเจ็ทที่ผลิตได้จากวิธีแบบขับเคลื่อน จากนั้นจะทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลกับพฤติกรรมต่างๆ ของลำเจ็ท โดยใช้ชุดขับเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าในการผลิตลำเจ็ท นอกจากนี้จะทำการศึกษาในการประยุกต์ใช้ลำเจ็ทในงานทางด้านการแพทย์ ซึ่งได้แก่ การส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็ม และการเจาะกระดูก เป็นต้น



รูปที่ 2.44 อุปกรณ์ผลิตลำเจ็ทที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า (a) อุปกรณ์ผลิตลำเจ็ท (b) ชุดขับเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าและแม่เหล็ก NdFeB และ (c) เซ็นเซอร์ และชุดควบคุมการเคลื่อนที่ของลูกสูบ [76]



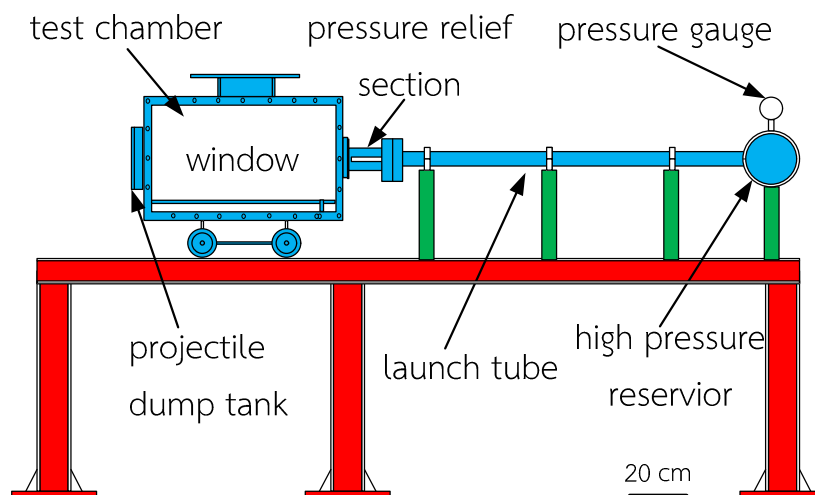
รูปที่ 2.45 สัญญาณที่ได้จากการเคลื่อนที่ของลูกสูบในการผลิตลำเจ็ท [76]

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 การผลิตลำเจ็ทด้วยชุดทดลองแบบ Horizontal Single State Gas Gun

3.1.1 ชุดทดลองแบบ Horizontal Single State Gas Gun (HSSGG)



รูปที่ 3.1 แผนภาพ Horizontal single stage gas gun

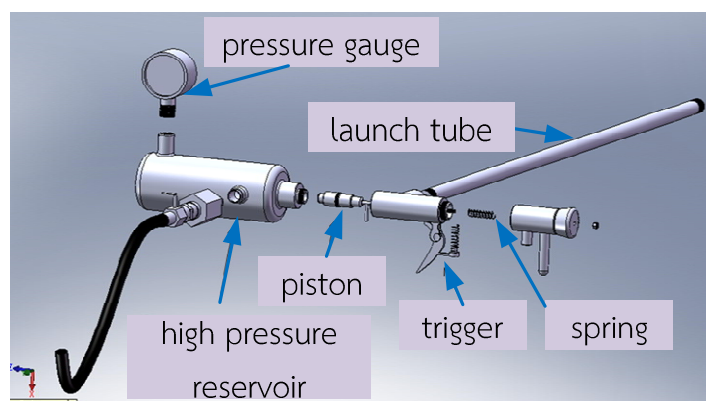
รูปที่ 3.1 แสดงแผนภาพชุดยิงกระสุน Horizontal single stage gas gun (HSSGG) โดยมี ส่วนประกอบหลักคือ ถังเก็บความดัน (High pressure reservoir) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 7.62 cm และยาว 21 cm มีปริมาตรภายใน $9.58 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ ทำมาจากเหล็ก ซึ่งทำหน้าที่ในการ บรรจุแก๊สที่ใช้เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนกระสุนปืน โดยถูกต่อเข้ากับเลาปิ่น (Launch tube) ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 10 mm และยาว 1.1 m ทำมาจากท่อไร้ตะเข็บ (Seamless pipe) โดยอีก ด้านต่อเข้ากับท่อระบายความดัน (Pressure relief section) ซึ่งถูกออกแบบให้ช่วยลดแรงอัดอากาศ หรือ blast wave ที่อยู่ส่วนหน้าของกระสุนที่ถูกอัดในเลาปิ่น เพื่อลดแรงต้านและแรงอัดภายใน มี ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 10 mm ความยาว 15 cm เจาะรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 mm จำนวน 4 รูตามแนวยาว และเจาะจำนวน 3 แถวตามเส้นรอบวงของท่อ โดยต่อเข้ากับห้องทดสอบ (test chamber) ซึ่งเป็นห้องปิด (ไม่เป็นระบบปิดอย่างสมบูรณ์) รูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด 40 cm x 50 cm x 60 cm ทำมาจากเหล็ก และใช้ High Density Polythylene (HDPE) ทำเป็นหน้าต่างทั้งสอง ด้านเพื่อใช้ในการสังเกตและตรวจสอบพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในการทดลอง ด้านปลายของห้องทดสอบมี projectile dump tank ซึ่งใช้หยุดการเคลื่อนที่ของกระสุน โดยกระสุนปืน (projectile) ที่ใช้ในการ ศึกษาครั้งนี้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกทำมาจาก Polymethyl methacrylate (PMMA) ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 9.9 mm สูง 15 mm โดยมีน้ำหนัก 1.4 g ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างกระสุน (projectile) ที่ใช้ในการทดลอง

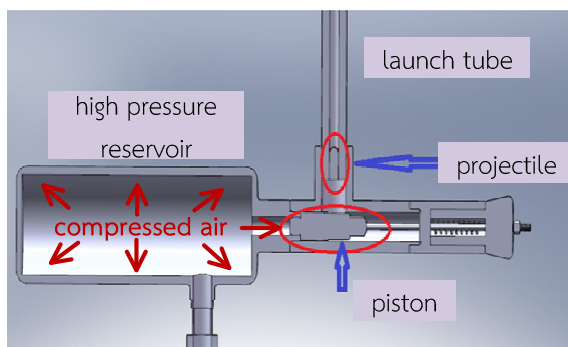
ในการทดลองนี้ใช้อากาศอัด (compressed air) จากปั๊มลม (air compressor) เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนกระสุน โดยจะถูกบรรจุเข้าไปภายในถังเก็บความดัน (high pressure reservoir) ก่อนการทดลองหรือการยิงในแต่ละครั้ง โดยส่วนประกอบของกลไกการยิงกระสุนที่ต่อเข้ากับถังเก็บความดันแสดงดังรูปที่ 3.2

3.1.2 หลักการทำงานของชุดทดลอง

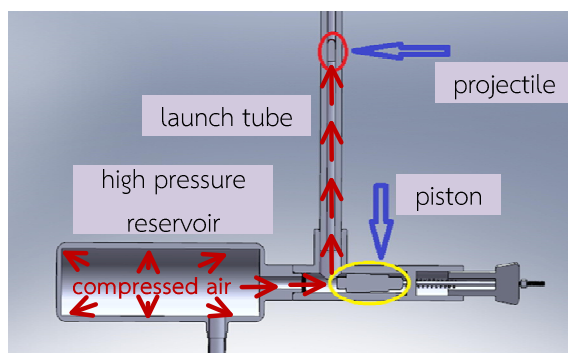


รูปที่ 3.3 ส่วนประกอบของกลไกการยิงกระสุน

ก่อนการทดลองหรือการยิงกระสุน ในรูปที่ 3.3a ลูกสูบ (piston) จะถูกติดตั้งให้ปิดช่องผ่านของอากาศอัดจากถังเก็บความดัน (high pressure reservoir) โดยมีกลไกล็อกตำแหน่งของลูกสูบให้หยุดนิ่งไม่ให้เกิดเคลื่อนที่ก่อนการยิงกระสุน จากนั้นทำการติดตั้งกระสุนปืนที่ปลายเลาปืนด้านที่ต่อกับชุดกลไกการยิง จากนั้นจึงจ่ายอากาศอัดเข้าไปยังถังเก็บความดัน ตามความดันที่ต้องการทดสอบ การยิงกระสุนจะเริ่มจากการกดไกปืน (trigger) ดังรูปที่ 3.3b ซึ่งจะเป็นการปลดล็อกกลไกล็อกการเคลื่อนที่ของลูกสูบ ความดันของอากาศอัด (หรือเรียกว่า driving pressure) จะขับเคลื่อนลูกสูบให้เปิดช่องทางออกของถังเก็บความดัน เพื่อเพิ่มความเร็วในการเปิดช่องทางออกของอากาศอัดที่ถังเก็บความดัน จึงได้ออกแบบและติดตั้งคอยล์สปริง (spring) (ดังรูปที่ 3.3) เพื่อช่วยให้ลูกสูบเปิดช่องทางออกของอากาศอัดให้รวดเร็วยิ่งขึ้น จากนั้นอากาศอัดดังกล่าวจะขับเคลื่อนกระสุนให้เคลื่อนที่ออกจากเลาปืนเข้าไปยังห้องทดสอบเพื่อตรวจวัดความเร็วของกระสุนหรือศึกษาพฤติกรรมต่างๆ ต่อไป



(a) ก่อนการยิง

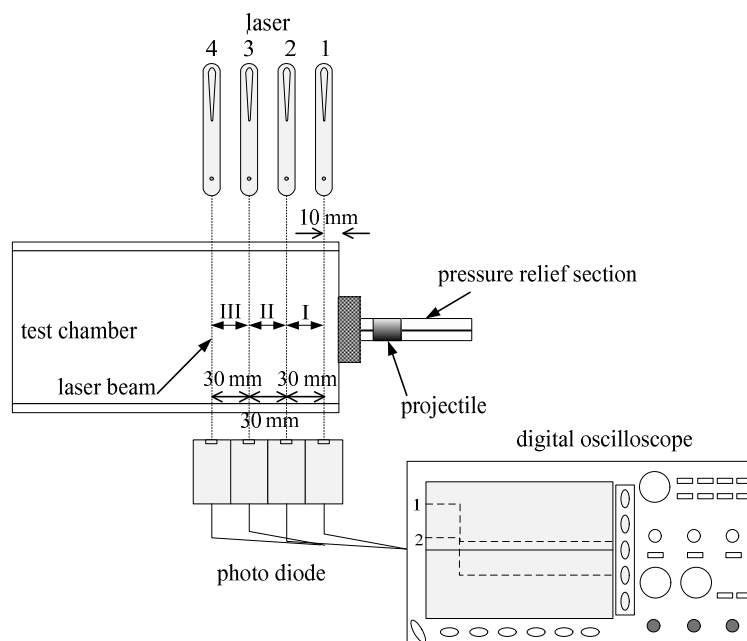


(b) หลังการยิง

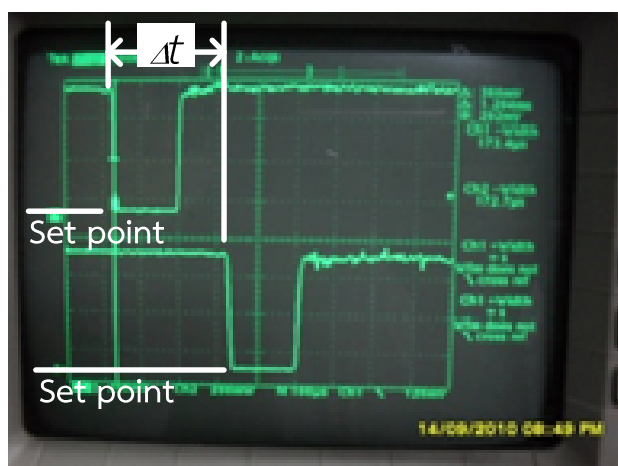
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการยิงกระสุน

3.1.3 การวัดความเร็วของกระสุนปืน

การวัดความเร็วของกระสุนปืนจะใช้หลักการที่เรียกว่า การตัดเลเซอร์ของวัตถุ (laser beam interruption) หรือ time of flight method ซึ่งเป็นวิธีการหาระยะเวลาแตกต่างที่กระสุนปืนรบกวนลำแสงเลเซอร์ (laser beam) ชุดที่ 1 และชุดที่ 2 โดยในการศึกษานี้ลำแสงของเลเซอร์มีระยะห่างกัน 30 mm ดังรูปที่ 3.5 ซึ่งใช้ photo diode จะทำหน้าที่เป็นตัวรับลำแสงเลเซอร์ โดยการทดลองนี้จะใช้เลเซอร์และ photo diode จำนวน 2 ชุดในแต่ละระยะ (range) โดยทำการวัด 3 ระยะ (range) คือ ระยะ I จะใช้เลเซอร์ชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ระยะ II จะใช้เลเซอร์ชุดที่ 2 และชุดที่ 3 และระยะ III จะใช้เลเซอร์ชุดที่ 3 และชุดที่ 4 ดังรูป ซึ่งมีหลักการวัดความเร็วคือ หากลำแสงเลเซอร์ไม่ถูกรบกวน photo diode จะรับแสงและจะส่งสัญญาณการรับลำแสงเลเซอร์มายัง digital oscilloscope แต่หากถูกรบกวนหรือมีการบังลำแสงเลเซอร์ไม่ให้ photo diode รับลำแสง สัญญาณที่แสดงผลบน digital oscilloscope จะตกลงมาที่จุดอ้างอิง (set point) โดยการบังแสงเลเซอร์ในการทดลองนี้จะเกิดขึ้นเมื่อกระสุนเคลื่อนที่ผ่าน ดังตัวอย่างการแสดงผลของ digital oscilloscope ในการวัดความเร็วของกระสุนปืนในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 ไดอะแกรมการวัดความเร็วของกระสุนปืน



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างการแสดงผลของ digital oscilloscope ในการวัดความเร็วของกระสุนปืน

3.1.4 ความเร็วของกระสุน

จากกระบวนการการขยายตัวของแก๊สออกจากถังเก็บความดัน (high pressure reservoir) ซึ่งเป็นการแปลงพลังงานที่สะสมภายในถังเก็บความดัน เพื่อขับเคลื่อนหรือเร่งความเร็วของกระสุน โดยความดันของแก๊สจะลดลงจากความดันเริ่มต้น (P_0) ที่บรรจุภายในถังเก็บความดันเป็นความดันบรรยากาศ โดยอาศัยหลักการดังกล่าวจึงสามารถคำนวณความเร็วของกระสุนได้จาก [46]

$$\frac{P_o SL}{M} = \frac{2a_0^2}{\gamma + 1} \left[1 + \frac{\frac{(\gamma + 1)V}{2a_0} - 1}{\left[1 - \frac{(\gamma - 1)V}{2a_0} \right]^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}}} \right] \quad (3.1)$$

เมื่อ

P_o คือ ความดันที่ถังเก็บความดันสูง (high pressure reservoir), N/m²

S คือ พื้นที่หน้าตัดของเลาป็น (launch tube), m²

a_0 คือ ความเร็วเสียงในอากาศ, m/s

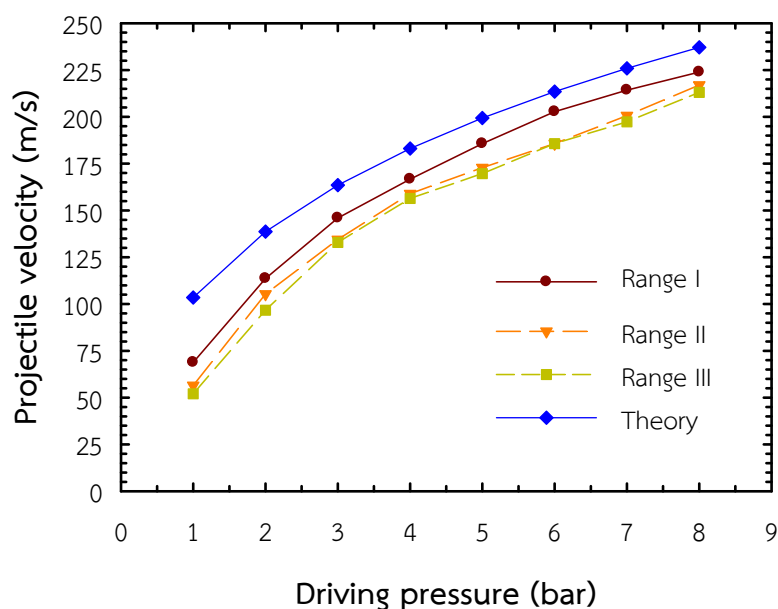
L คือ ความยาวของเลาป็น (launch tube) รวมกับความยาวของท่อระบายความดัน (pressure relief section), m

V คือ ความเร็วของกระสุน, m/s

M คือ มวลของกระสุน, kg

γ คือ specific heat ratio

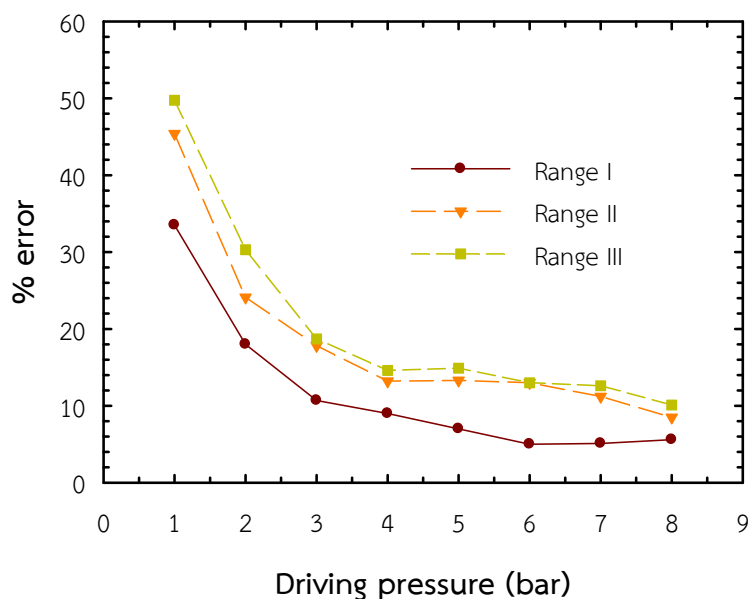
การตรวจวัดความเร็วของกระสุนจากการทดสอบยิงกระสุนจากชุดยิง HSSGG ที่ความดันต่างๆ ของอากาศอัด (Compressed air) จะทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำการทดลองซ้ำไม่เกินร้อยละ 6 ซึ่งบทความนี้จะใช้ค่าเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำทั้ง 5 ครั้ง ในการแสดงผลประกอบการวิเคราะห์



รูปที่ 3.7 อิทธิพลของความดันขับเคลื่อนของอากาศอัดต่อความเร็วของกระสุนที่ระยะต่างๆ (range)

จากรูปที่ 3.8 แสดงอิทธิพลของความดันขับ (Driving pressure) ของอากาศอัด (Compressed air) ต่อความเร็วของกระสุนที่ระยะต่างๆ (เมื่อ range I, II และ III แสดงดังรูปที่ 6) นอกจากนี้ยังทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับการวิเคราะห์ทางทฤษฎีโดยใช้สมการที่ 2 ซึ่งจะสังเกตว่า การคำนวณหาความเร็วของกระสุน (V) จากสมการดังกล่าวมีความยุ่งยากพอสมควร ดังนั้นในการคำนวณความเร็วที่ความดันขับของอากาศอัดค่าต่างๆ จึงใช้โปรแกรม Engineering equation solver (EES) ช่วยในการคำนวณเพื่อความสะดวกและความถูกต้องแม่นยำ

จากรูป เมื่อพิจารณาที่ระยะ I พบว่า กระสุนก็จะมีความเร็วสูงขึ้นเมื่อความดันขับ (driving pressure) มีค่าสูงขึ้น โดยมีความเร็วสูงสุดของกระสุนที่ค่าเท่ากับ 223.92 m/s ที่ความดันขับของอากาศอัด 8 bar ในระยะที่ I และก็มีแนวโน้มเดียวกันทั้งระยะ II และ III ซึ่งเป็นพฤติกรรมปกติที่มีแนวโน้มสอดคล้องกับการวิเคราะห์ทางทฤษฎี และจากการคำนวณในสมการที่ 2 พบว่า ที่ความดันขับของอากาศอัด 8 bar ความเร็วของกระสุนจะมีค่าเท่ากับ 237.1 m/s และเมื่อพิจารณาที่ความดันเดียวกันในการทดลอง พบว่า ความเร็วของกระสุนที่ระยะที่ I มีความเร็วสูงที่สุด และเมื่อระยะทางในการเคลื่อนที่ของกระสุนห่างจากปลายทางออกของเลาปิ่น (launch tube) ไกลออกไป ความเร็วของกระสุนจะลดต่ำลง จากระยะที่ I, II และ III ตามลำดับ โดยมีความเร็วสูงสุดที่ความดันขับของอากาศอัด 8 bar มีค่าเท่ากับ 223.92, 216.91 และ 213.09 m/s ตามลำดับ ความดันที่ลดลงเมื่อระยะห่างไกลออกไปนั้นเนื่องมาจากแรงต้านการเคลื่อนที่ของอากาศ (Aerodynamic drag) นอกจากนี้ยังพบว่า ความเร็วของกระสุนที่ได้จากการทดลองมีค่าต่ำกว่าการวิเคราะห์ทางทฤษฎีที่ทุกระยะห่างเนื่องมาจากความเสียดทานของกระสุนกับผนังด้านในของเลาปิ่น (launch tube) และแรงต้านการเคลื่อนที่ของอากาศ (Aerodynamic drag) ซึ่งหากสังเกตสมการที่ 2 จะพบว่า ไม่มีเทอมใดในสมการแสดงถึงการพิจารณาผลจากแรงเสียดทานและแรงต้านของอากาศเลย



รูปที่ 3.8 ร้อยละความคลาดเคลื่อนเทียบกับทฤษฎี (% error) ของความเร็วกระสุนที่วัดได้ในทั้ง 3 ระยะ (range)

นอกจากนี้ยังพิจารณาความคลาดเคลื่อนในการทดลองเทียบกับการวิเคราะห์ทางทฤษฎีดังแสดงในรูปที่ 3.8 หากพิจารณาที่ระยะที่ I พบว่า เมื่อความดันขับของอากาศอัดสูงขึ้นร้อยละความคลาดเคลื่อนจะมีค่าลดลง โดยมีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสูงสุดร้อยละ 33.5 ที่ความดันขับของอากาศอัด 1 bar และจะลดต่ำลงเป็นร้อยละ 5.6 ที่ความดันขับของอากาศอัด 8 bar โดยร้อยละความคลาดเคลื่อนของระยะที่ II และ III มีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับระยะที่ I ดังรูป ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของความเสียดทานระหว่างผนังด้านในของเลาปืนและกระสุนจะมีผลลดลงเมื่อความดันขับสูงขึ้น และเมื่อความดันขับของอากาศอัดคงที่พบว่า ร้อยละความคลาดเคลื่อนจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อระยะห่างจากทางออกของปลายเลาปืนไกลออกไป โดยที่ระยะ I, II และ III มีความคลาดเคลื่อนสูงสุดเท่ากับร้อยละ 33.5, 45.4 และ 49.75 ตามลำดับ ที่ความดันขับของอากาศอัด 1 bar และต่ำสุดเท่ากับร้อยละ 5.6, 8.5 และ 10.1 ตามลำดับ ที่ความดันขับของอากาศอัด 1 bar ซึ่งเป็นเพราะ Aerodynamic drag นั่นเอง

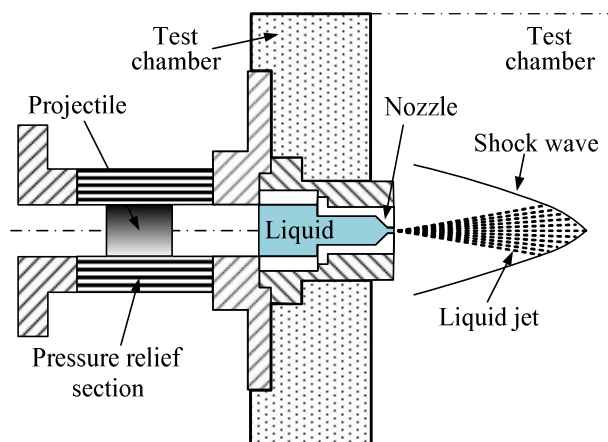
ตารางที่ 3.1 สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของกระสุนที่ได้จากการทดลองกับความดันขับของอากาศอัดทั้ง 3 ระยะ

Range	สมการ	R ²
I	$V = -2.5629P_0^2 + 44.23P_0 + 31.546$	0.9961
II	$V = -2.5551P_0^2 + 43.517P_0 + 22.348$	0.9885
III	$V = -2.4202P_0^2 + 43.756P_0 + 16.18$	0.9905

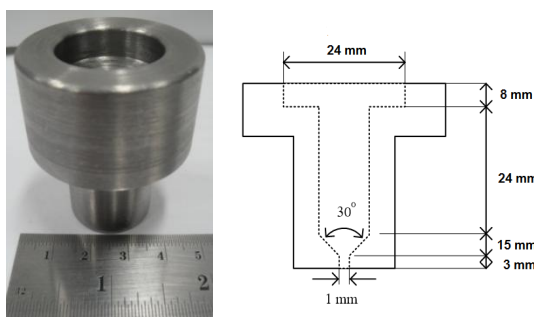
จากตารางที่ 3.1 แสดงสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของกระสุนที่ได้จากการทดลองกับความดันขับของอากาศอัดทั้ง 3 ระยะ พบว่า ความเร็วของกระสุนที่ผลิตได้จากชุด HSSGG มีความสัมพันธ์ในลักษณะสมการโพลิโนเมียลกับความดันขับของอากาศอัด ซึ่งสามารถนำสมการดังกล่าวไปประยุกต์ใช้เพื่อประมาณการณ์ความเร็วของกระสุนที่เกิดขึ้นจากการยิงกระสุนของชุดยิงนี้โดยการใช้อากาศอัดเป็นต้นกำลัง ซึ่งอาจถือได้ว่าสมการในตารางที่ 1 เป็นสมการสมรรถนะของชุดยิง HSGG นั่นเอง

3.1.5 การผลิตลำเจ็ทความเร็วสูง (High-speed jet generation)

ในการศึกษานี้การผลิตลำเจ็ทความเร็วสูงจะใช้เทคนิค Impact driven method [2, 3] ดังรูปที่ 3.9 โดยที่เทคนิคนี้จะยิงกระสุนปืนความเร็วสูง (High-speed projectile) ในชุดทดลอง Horizontal Single Stage Gas Gun (HSSGG) ซึ่งรายละเอียดรวมถึงสมรรถนะของชุดยิงได้กล่าวไว้แล้วในตอนต้น โดยในการศึกษานี้ใช้กระสุนปืนที่ทำมาจาก Polymethyl methacrylate (PMMA) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 9.9 mm สูง 15 mm โดยมีน้ำหนัก 1.4 g ดังรูปที่ 3.3 และหัวฉีดที่ใช้ในการผลิตลำเจ็ทความเร็วสูง ทำมาจากเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่บรรจุของเหลว ขนาด $D = 10$ mm มุม 30° ขนาดของรูหัวฉีด $d = 0.1$ mm และความยาวของรูหัวฉีด $l = 3$ mm ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.9 การผลิตลำเจ็ทความเร็วสูง (High-speed liquid jet generation)



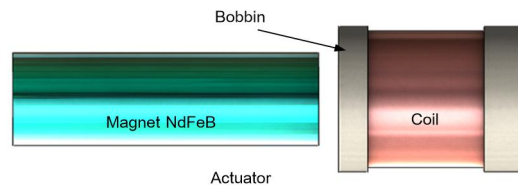
รูปที่ 3.10 รูปทรงของหัวฉีด (Nozzle geometry)

3.2 การผลิตลำเจ็ทด้วยชุดทดลองแบบต้นกำเนิดจากแม่เหล็กไฟฟ้า

3.2.1 อุปกรณ์ผลิตลำเจ็ทด้วยต้นกำเนิดจากแม่เหล็กไฟฟ้า

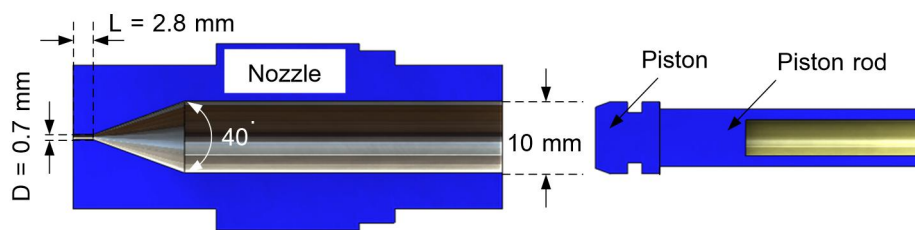
ในการออกแบบอุปกรณ์ผลิตลำเจ็ท ที่ใช้ต้นกำเนิดจากไฟฟ้า และใช้ชุดขับเคลื่อนจากแม่เหล็กไฟฟ้าในการผลิตลำเจ็ท ซึ่งความเร็วของลำเจ็ทที่ผลิตได้จะขึ้นอยู่กับพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้ขดลวดทองแดงเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กถาวร โดยส่วนประกอบของอุปกรณ์ผลิตลำเจ็ทสามารถอธิบายได้ ดังนี้

1. ส่วนของชุดขับเคลื่อน (Actuator) การออกแบบในส่วนนี้ จะใช้หลักการ การตัดกันของสนามแม่เหล็ก ระหว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็กถาวร ซึ่งการตัดกันของสนามแม่เหล็กทั้งสอง จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ขึ้น จึงใช้การเคลื่อนที่นี้ไปกระทำกับของเหลวที่บรรจุในหัวฉีด (Nozzle) แล้วเกิดเป็นลำเจ็ทขึ้น โดยส่วนนี้ประกอบด้วย ขดลวดทองแดง (Coil) ที่พันรอบแกนขดลวดทองแดง (Bobbin) จำนวน 1,600 รอบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นลวดทองแดงเท่ากับ 0.32 mm และแม่เหล็กถาวรชนิด NdFeB หรือเรียกว่าแม่เหล็กแรงสูง ดังแสดงในรูปที่ 3.11

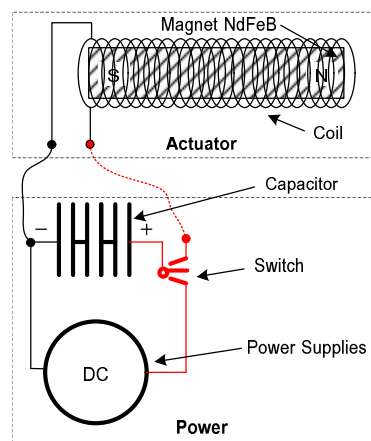


รูปที่ 3.11 ส่วนประกอบของชุดขับ (Actuator)

2. หัวฉีด (Nozzle) หรือส่วนผลิตลำเจ็ท ในส่วนนี้จะใช้วิธี Impact driven method ในการผลิตลำเจ็ท โดยจะใช้การเคลื่อนที่ของขดลวดทองแดง (Coil) ไปกระทบกับของเหลวที่บรรจุในหัวฉีด แทนการเคลื่อนที่ของลูกกระสุน (Metal slug) ซึ่งในส่วนนี้ประกอบด้วย หัวฉีด (Nozzle) ลูกสูบ (Piston) และก้านสูบ (Piston rod) ดังแสดงในรูปที่ 3.12 โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูหัวฉีด (D) เท่ากับ 0.2-0.7 mm ค่า L/D เท่ากับ 4.0 และมุมกรวยเท่ากับ 40° เนื่องจากการศึกษาที่ผ่านมา [77] พบว่า ขนาด และลักษณะของหัวฉีดดังกล่าวสามารถผลิตลำเจ็ทได้ความเร็วสูงที่สุด ดังนั้นจึงได้ใช้องค์ความรู้นี้ เป็นพื้นฐานในการออกแบบขนาดของหัวฉีด



รูปที่ 3.12 ลักษณะโครงสร้างของหัวฉีด



รูปที่ 3.13 วงจรไฟฟ้าของอุปกรณ์ส่งถ่ายยาด้วยลำเจ็ท ที่ใช้ชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้า

3. ส่วนของต้นกำลัง (Power) ทำหน้าที่ในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับขดลวดทองแดง เพื่อใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในส่วนนี้ประกอบด้วย ตัวเก็บประจุ (Capacitor) ขนาด 5,400 μF , 600 VDC และเครื่องพาวเวอร์ซัพพลาย (Power supply) การต่อวงจรไฟฟ้าของส่วนต้นกำลัง และส่วนของชุดขับ ดังแสดงในรูปที่ 3.13

3.2.2 ส่วนประกอบของชุดทดลอง

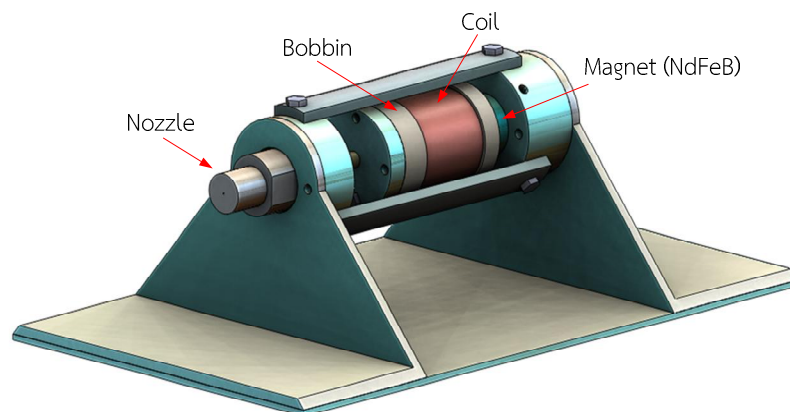
อุปกรณ์ผลิตลำเจ็ทดังแสดงในรูปที่ 3.14 ที่ได้จากการออกแบบ และสร้างขึ้นจากที่ได้กล่าวไว้ของต้น ซึ่งจะทำหน้าที่ในการผลิตลำเจ็ท โดยมีอุปกรณ์ ดังนี้

1. ชุดโครงสร้างของอุปกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ซึ่งส่วนใหญ่ทำมาจากอลูมิเนียม ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักในการจับยึดส่วนต่างๆ ของอุปกรณ์

2. แกนขดลวดทองแดง (Bobbin) ซึ่งทำมาจากอลูมิเนียม หรือพลาสติกวิศวกรรม (Superline) ทำหน้าที่เป็นแกนของขดลวดทองแดง และเป็นตัวที่เคลื่อนที่ในการกระแทกกับของเหลวในการผลิตลำเจ็ท

3. ขดลวดทองแดง (Coil) ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากตัวเก็บประจุ ให้เป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

4. แม่เหล็กถาวร Magnet NdFeB ทำหน้าที่เป็นสนามแม่เหล็กถาวร เพื่อให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากขดลวดทองแดง ตัดกับสนามแม่เหล็กถาวร ซึ่งจะทำให้ขดลวดทองแดงเกิดการเคลื่อนที่

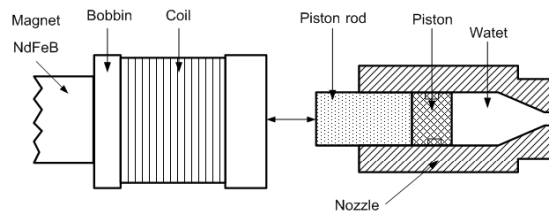


รูปที่ 3.14 อุปกรณ์ส่งถ่ายด้วยลำเจ็ทความเร็วสูง ที่ใช้ระบบแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นต้นกำลัง

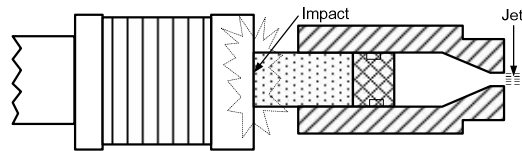
3.2.3 หลักการทำงานของชุดทดลอง

ในการทำงานของชุดทดลอง หรืออุปกรณ์ผลิตลำเจ็ทที่ใช้ชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้า เริ่มจากใช้เครื่องพาวเวอร์ซัพพลาย (Power supply) ทำการประจุไฟฟ้าให้กับตัวเก็บประจุ (Capacitor) จนถึงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการ จากนั้นทำการปล่อยพลังงานไฟฟ้าจากตัวเก็บประจุ ให้กับขดลวดทองแดง เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้น ตัดกับสนามแม่เหล็กถาวรของแม่เหล็กแรงสูง จะทำให้ขดลวดทองแดงเกิดการเคลื่อนที่ไปกระทบ (Impact) กับของเหลวที่บรรจุ

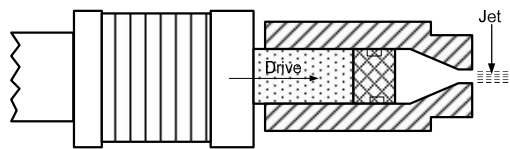
ภายในหัวฉีด (Nozzle) ทำให้ของเหลวที่อยู่ภายในหัวฉีดเกิดความดันสูงขึ้น และของเหลวก็เคลื่อนที่ออกจากหัวฉีดอย่างรวดเร็วแล้วเกิดเป็นลำเจ็ท (Jet) ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.15



(a) ก่อนการกระทบ



(b) ขณะเกิดการกระทบ



(c) ระหว่างการขับเคลื่อน

รูปที่ 3.15 วิธีการผลิตลำเจ็ทแบบกระทบ (Impact method)

รูปที่ 3.15 แสดงวิธีการผลิตลำเจ็ทแบบกระทบ (Impact method) โดยมีหลักการ คือ จะใช้การเคลื่อนที่ของขดลวดทองแดง เคลื่อนที่เข้ากระทบกับก้านของลูกสูบ (Piston rod) โดยมีระยะการกระทบเท่ากับ 0 mm - 30mm ดังแสดงในรูปที่ 3.15(a) หลังจากเกิดการกระทบ ดังแสดงในรูปที่ 3.15(b) ขดลวดทองแดงก็เคลื่อนที่เข้าขับเคลื่อนของเหลวที่อยู่ภายในหัวฉีด แล้วเกิดเป็นลำเจ็ทขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.15(c)

3.3 การวัดความเร็วของลำเจ็ท

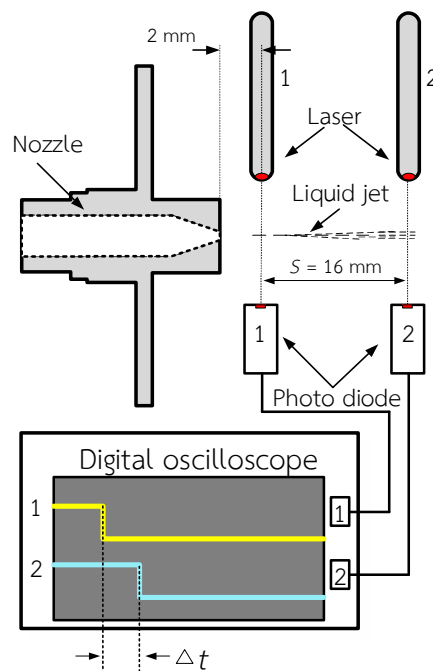
การวัดความเร็วของลำเจ็ทจะใช้วิธี Laser beam interruption ดังแสดงในรูปที่ 3.16 โดยใช้หลักการการเคลื่อนที่ของวัตถุตัดกับแสงเลเซอร์ ซึ่งมีเลเซอร์จำนวน 2 ตัว วางห่างกัน 16 mm และใช้ Photodiode จำนวน 2 ตัว เป็นอุปกรณ์รับแสงจากแสงเลเซอร์ และถูกเชื่อมต่อกับเครื่อง Digital

oscilloscope ในช่องสัญญาณที่ 1 และ 2 เมื่อวัตถุเคลื่อนที่ตัดกับแสงเลเซอร์ตัวที่ 1 และ 2 จะทำให้เกิดสัญญาณแสดงขึ้นบนหน้าจอของเครื่อง Digital oscilloscope ดังแสดงในรูปที่ 3.16 ซึ่งจากสัญญาณสามารถทราบผลต่างของเวลา (Δt) ได้ ดังนั้นจึงสามารถหาความเร็วของวัตถุที่เคลื่อนที่ได้จากสมการที่ 3.1

$$V_j = \frac{S}{\Delta t} \quad (3.2)$$

เมื่อ

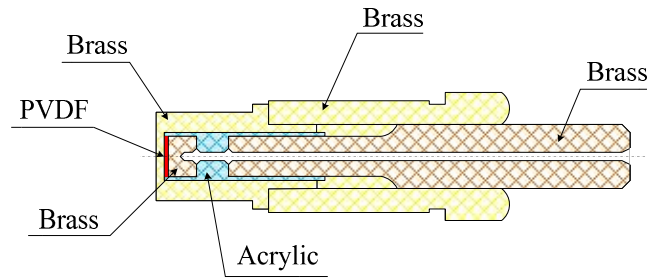
V_j คือ ความเร็วของวัตถุ, m/s
 S คือ ระยะห่างของเลเซอร์, m
 Δt คือ ผลต่างของเวลา, s



รูปที่ 3.16 Laser beam interruption method

3.4 การวัดความดันกระแทก

การวัดความดันกระแทกจะประยุกต์ใช้ Piezoelectric polyvinylidene fluoride film (PVDF) ดังแสดงในรูปที่ 3.17 PVDF จะทำหน้าที่วัดความดันกระแทกที่เกิดขึ้นจากลำเจ็ท โดยในการวัดค่าความดันกระแทก จะเชื่อมต่อ PVDF กับเครื่อง Digital oscilloscope ซึ่งค่าที่อ่านได้จากเครื่อง Digital oscilloscope จะเป็นค่าของแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นก่อนที่จะนำ PVDF ไปใช้งาน จะต้องทำการสอบเทียบก่อน ซึ่งหลักการสอบเทียบจะดำเนินการ ดังนี้



รูปที่ 3.17 Piezoelectric polyvinylidene fluoride film, PVDF

การสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดันกระแทกของลำเจ็ท ในการสอบเทียบจะใช้ลูกตุ้มมวล 1.7 g, 4.7 g และ 8.0 g ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกตุ้มเท่ากับ 2 mm ปล่อยให้ตกอย่างอิสระที่ระดับความสูง h_1 ที่มีระยะ 10 – 50 mm เมื่อลูกตุ้มตกกระทบกับแผ่น PVDF แผ่น PVDF จะตอบสนองต่อการกระแทก และจะแสดงสัญญาณของการกระแทกขึ้นบนหน้าจอของเครื่อง Digital oscilloscope ซึ่งจะแสดงในรูปของสัญญาณแรงดันไฟฟ้า หลังจากนั้นลูกตุ้มจะเคลื่อนที่ย้อนกลับไปยังทิศทางเดิมเป็นระยะ h_2 โดยพฤติกรรมเคลื่อนที่ของลูกตุ้มจะถูกบันทึกด้วยกล้อง High speed video camera ในการคำนวณความดันกระแทกจะใช้หลักการการเปลี่ยนแปลงพลังงาน และโมเมนตัม ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

แรงที่เกิดขึ้นจากการตกอย่างอิสระของลูกตุ้มกระแทกกับแผ่น PVDF สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.2 และสมการที่ 3.3

$$F = m \frac{(v_1 + v_2)}{T} \quad \text{หรือ} \quad = m \frac{(1 + v_2/v_1)v_1}{T} \quad (3.3)$$

เมื่อ

F คือ แรงจากการกระแทกของลูกตุ้ม, N

m คือ มวลของลูกตุ้ม, kg

v_1 คือ ความเร็วของลูกตุ้มก่อนกระแทก, m/s

v_2 คือ ความเร็วของลูกตุ้มที่กระดอนขึ้น, m/s

T คือ ระยะเวลาที่ลูกตุ้มสร้างแรงกระแทก, s

จากการหลักการการเปลี่ยนแปลงพลังงานจะได้

$$\frac{1}{2}mv^2 = mgh$$

ก่อนการกระแทก

$$v_1 = \sqrt{2gh_1}$$

หลังการกระแทก

$$v_2 = \sqrt{2gh_2}$$

หรือ

$$\frac{v_2}{v_1} = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}}$$

จัดรูปสมการจะได้

$$F = m \frac{\left(1 + \sqrt{h_2/h_1}\right) \sqrt{2gh_1}}{T} \quad (3.4)$$

เมื่อ

g คือ ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก, 9.81 m/s^2

h_1 คือ ความสูงของลูกตุ้มก่อนกระทบ, m

h_2 คือ ความสูงของลูกตุ้มที่กระดอนขึ้น, m

จากแรง (F) ของลูกตุ้มที่เกิดการกระทบสามารถคำนวณหาความดันกระทบ (P) ได้จากสมการที่ 3.5

$$P = \frac{4F}{\pi d_r^2} \quad (3.5)$$

เมื่อ

P คือ ความดันกระทบ, Pa

F คือ แรงกระทบของลูกตุ้ม, N

d_r คือ เส้นผ่านศูนย์กลางหน้าตัดของลูกตุ้มที่กระทบ, m

ผลที่ได้จากการสอบเทียบจะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับความดันกระทบ ดังแสดงในรูปที่ 3.18 และจาก Curve fitting จึงได้สมการที่ 3.6 ซึ่งถูกใช้ในการคำนวณหาความดันกระทบในการศึกษานี้ โดยสมการดังกล่าวมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9877

$$P = 35.268V_e + 7.8274 \quad (3.6)$$

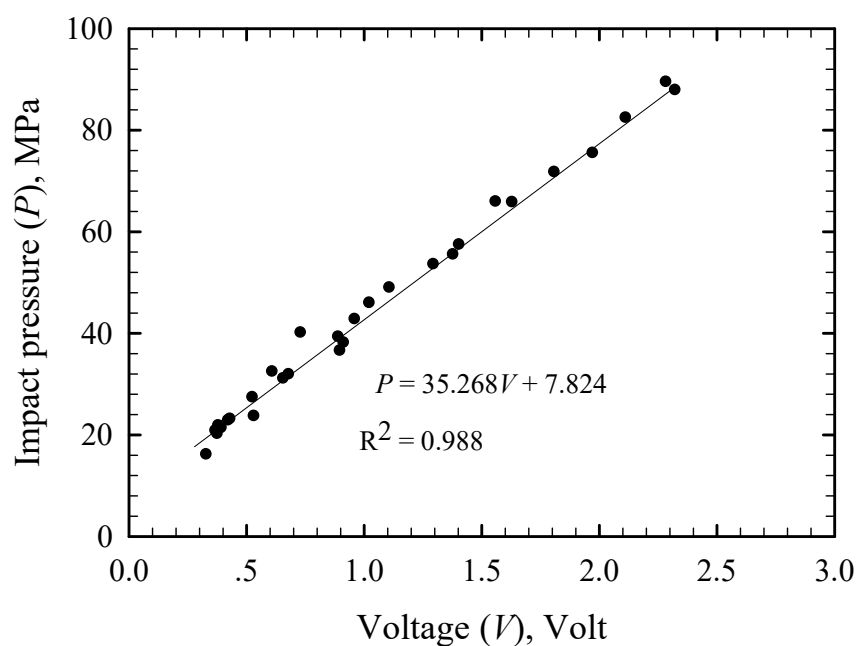
เมื่อ

P คือ ความดันกระทบ, MPa

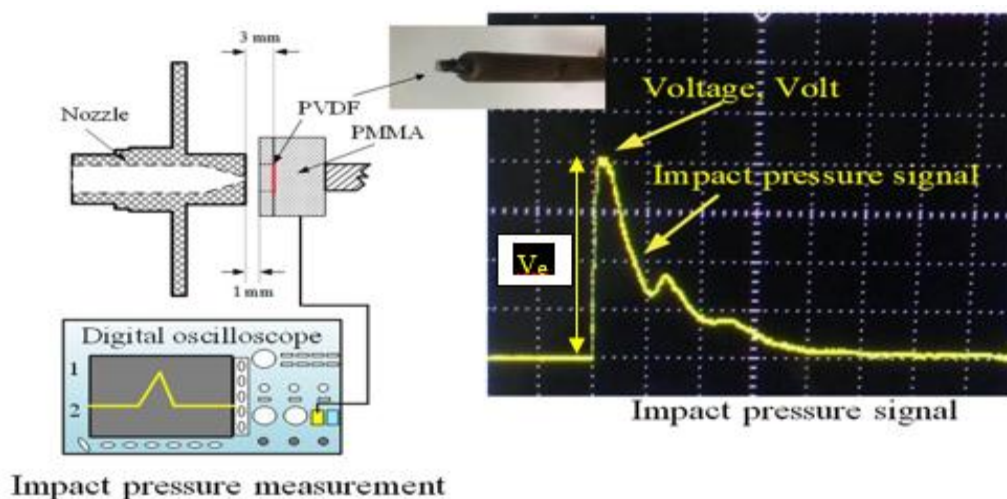
V_e คือ แรงดันไฟฟ้าที่ได้จาก PVDF, Volt

ในการวัดความดันกระทบ จะทำการติดตั้ง PVDF ดังรูปที่ 3.19 ซึ่งได้ทำการสอบเทียบแล้ว เพื่อใช้ในการวัดความดันกระทบของลำเจ็ท เมื่อลำเจ็ทเคลื่อนที่เข้าไปกระทบกับแผ่น PVDF แผ่น

PVDF จะตอบสนองต่อการกระทบของลำเจ็ท และจะแสดงสัญญาณจากการกระทบของลำเจ็ทขึ้นบนหน้าจอของเครื่อง Digital oscilloscope ในรูปแบบของสัญญาณแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจากเครื่อง Digital oscilloscope เราจะทราบค่าแรงดันไฟฟ้า และจะใช้แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V_e) ในการคำนวณค่าความดันกระทบของลำเจ็ทจากสมการที่ 3.6



รูปที่ 3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า และความดันกระทบ

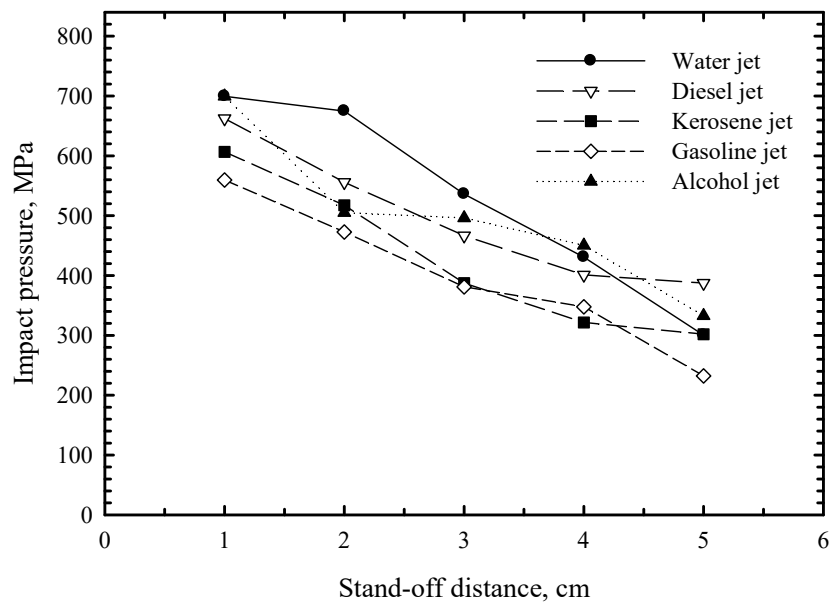


รูปที่ 3.19 วิธีวัดความดันกระทบ

บทที่ 4

ความดันกระแทกของลำเจ็ท

4.1 ความดันกระแทกของลำเจ็ท Newtonian ในอากาศ



รูปที่ 4.1 อิทธิพลของชนิดของเหลวของลำพุ่งต่อความดันกระแทก กรณีฉีดในอากาศ

รูปที่ 4.1 แสดงอิทธิพลของชนิดของเหลวของลำพุ่งต่อความดันกระแทกที่ความเร็วของกระสุนเท่ากับ 223 m/s (จากอากาศอัดความดัน 8 bar) กรณีฉีดในอากาศ จากชุดทดลอง Horizontal Single State Gas Gun โดยการทดลองแต่ละระยะห่างจากหัวฉีดจะทดลองซ้ำกันไม่น้อยกว่าสามครั้งและหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้งหมด ซึ่งพบว่า เมื่อระยะห่างจากหัวฉีดเพิ่มขึ้นความดันกระแทกจะมีค่าลดลงโดยจะเกิดขึ้นในลักษณะเดียวกันทุกลำพุ่ง เพราะเมื่อระยะห่างจากหัวฉีดเพิ่มขึ้นความเร็วของลำพุ่งจะมีค่าลดลงเนื่องจากผลของแรงต้านทางพลศาสตร์ (Aerodynamic drag) และเมื่อพิจารณาจากทุกระยะห่างจากหัวฉีดจะพบว่าลำพุ่งน้ำจะมีค่าสูงที่สุดที่ทุกระยะห่างจากหัวฉีด (ยกเว้นที่ 4 และ 5 cm) เนื่องจากผลของความหนาแน่นของน้ำมีค่าสูงที่สุดดังแสดงในตารางที่ 4.1 และลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซลีนจะมีค่าต่ำที่สุดที่ทุกระยะห่างจากหัวฉีด (ยกเว้นที่ 4 cm) เนื่องจากผลของน้ำหนักโมเลกุลของน้ำมันแก๊สโซลีนมีค่าต่ำที่สุด โดยลำพุ่งน้ำจะมีค่าความดันกระแทกสูงที่สุดเท่ากับ 699.55 MPa ที่ระยะห่างจากหัวฉีด 1 cm และลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซลีนจะมีค่า

ต่ำที่สุดเท่ากับ 232.32 MPa ที่ระยะห่างจากหัวฉีด 5 cm ส่วนความดันกระแทกของลำพุน้ำมันดีเซล ลำพุน้ำมันก๊าด และลำพุงแอลกอฮอล์ จะมีค่าอยู่ระหว่างความดันกระแทกของลำพุน้ำและลำพุงแก๊สโซลีนอย่างไม่มีนัยสำคัญกัน อาจเนื่องมาจากคุณสมบัติทางกายภาพของลำพุงทั้ง 3 ชนิดมีค่าใกล้เคียงกันในทุกๆ คุณสมบัติทั้งน้ำหนักโมเลกุล ความหนาแน่น ความหนืดจลน์ และความตึงผิว ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวนี้จะมีผลต่อคุณลักษณะของลำพุงความเร็วสูงเมื่อฉีดในอากาศทั้งสิ้น

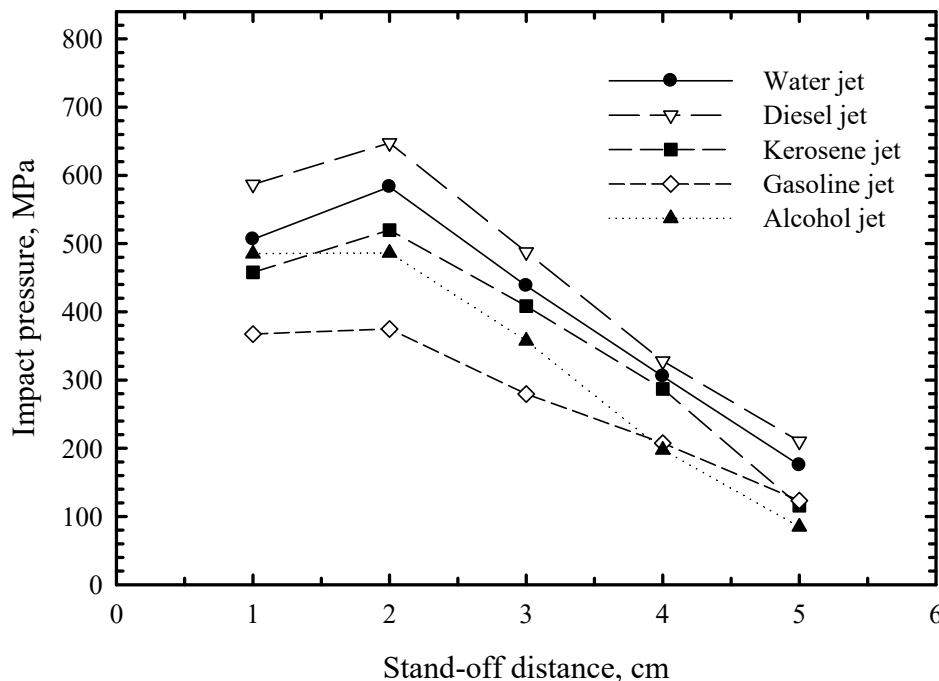
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของของเหลวที่ใช้ในการทดลอง

ชนิดของ ของเหลว	น้ำหนักโมเลกุล (g/mol)	ความหนาแน่น ที่ 20° (Kg/m ³)	ความหนืดจลน์ ที่ 20° (cSt)	ความตึงผิว ที่ 20° (N/m)	ความร้อนแฝง (KJ/Kg)
น้ำ	18	998	1.003	0.0728	2,257 (at 100°C)
น้ำมันดีเซล	198	840	1.8 – 4.0	0.0244	267.49 (at 170°C)
น้ำมันก๊าด	170	810	1.5 – 2.5	0.0235	314.01 (at 117.8°C)
น้ำมันแก๊สโซลีน	32	785.1	1.6	0.0220	896 (at 90°C)
แอลกอฮอล์	114	750	0.5	0.0200	318.66 (at 90°C)

4.2 ความดันกระแทกของลำเจ็ท Newtonian ในน้ำ

รูปที่ 4.2 แสดงอิทธิพลของชนิดของเหลวของลำพุงต่อความดันกระแทกที่ความเร็วของกระสุนปืนเท่ากับ 223 m/s กรณีฉีดในน้ำ จากชุดทดลอง Horizontal Single State Gas Gun พบว่า เมื่อระยะห่างจากหัวฉีดเพิ่มขึ้นความดันกระแทกจะมีค่าลดลงโดยจะเกิดขึ้นในลักษณะเดียวกันทุกลำพุง ยกเว้นที่ระยะห่างจากหัวฉีดจาก 1 ไป 2 cm ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ผ่านมา เพราะเมื่อระยะห่างจากหัวฉีดเพิ่มขึ้นความเร็วของลำพุงจะมีค่าลดลงเนื่องจากผลของแรงต้านของน้ำ (Hydrodynamic drag) และเมื่อพิจารณาจากทุกระยะห่างจากหัวฉีดจะพบว่าลำพุงดีเซลจะมีค่าสูงที่สุดที่ทุกระยะห่างจากหัวฉีด เนื่องจากผลของน้ำหนักโมเลกุลของน้ำมันดีเซลมีค่าสูงที่สุดดังแสดงในตารางที่ 4.1 และลำพุน้ำมันแก๊สโซลีนจะมีค่าต่ำที่สุดที่ทุกระยะห่างจากหัวฉีด เนื่องจากผลของน้ำหนักโมเลกุลของน้ำมันแก๊สโซลีนมีค่าต่ำที่สุด โดยลำพุน้ำมันดีเซลจะมีค่าความดันกระแทกสูงที่สุดเท่ากับ 647.50 MPa ที่ระยะห่างจากหัวฉีด 2 cm และลำพุน้ำมันแก๊สโซลีนจะมีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 123.26 MPa ที่ระยะห่างจากหัวฉีด 5 cm ส่วนความดันกระแทกของลำพุน้ำ ลำพุน้ำมันก๊าด และ

ลำพุ่งแอลกอฮอล์ จะมีค่าอยู่ระหว่างความดันกระแทกของลำพุ่งน้ำมันดีเซลและลำพุ่งแก๊สโซลีนอย่างไม่มีนัยสำคัญกัน อาจเนื่องมาจากคุณสมบัติทางกายภาพของลำพุ่งทั้ง 3 ชนิดมีค่าใกล้เคียงกันในทุกๆ คุณสมบัติทั้งน้ำหนักโมเลกุล ความหนาแน่น ความหนืดจลน์ และความตึงผิว โดยเฉพาะลำพุ่งแอลกอฮอล์ที่มีลักษณะความดันกระแทกที่แตกต่างจากลำพุ่งชนิดอื่น และเมื่อพิจารณาที่ระยะห่างจากหัวฉีดช่วงระยะ 1 ไป 2 cm และช่วงระยะ 2 ไป 5 cm พบว่า ความชันของความดันกระแทกในแต่ละระยะของลำพุ่งจะมีความชันน้อยลง เมื่อความดันค่าความดันกระแทกของลำพุ่งมีค่าต่ำลงคือความชันของช่วงระยะ 1 ไป 2 cm และ ช่วงระยะ 2 ไป 5 cm ของลำพุ่งน้ำมันดีเซลจะมีความชันสูงที่สุด โดยมีค่าความดันกระแทกสูงที่สุด รองลงมาคือ ความชันของลำพุ่งน้ำ ลำพุ่งน้ำมันก๊าด น้ำมันแก๊สโซลีน และแอลกอฮอล์ ตามลำดับ ด้วยเหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ผ่านมา

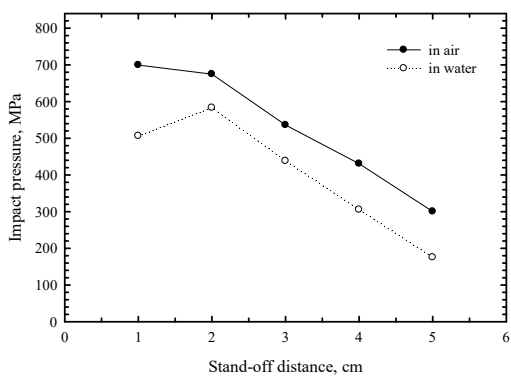


รูปที่ 4.2 อิทธิพลของชนิดของเหลวของลำพุ่งต่อความดันกระแทกในน้ำที่กรณีฉีดในน้ำ

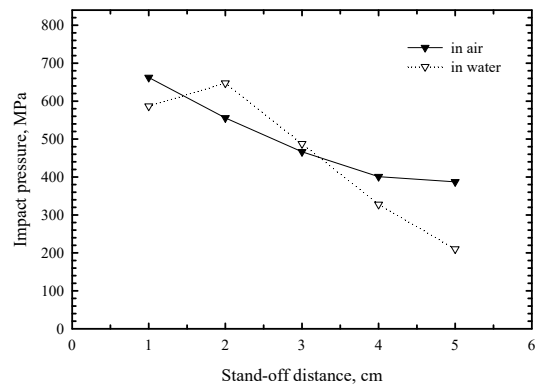
4.3 การเปรียบเทียบความดันกระแทกของลำเจ็ท Newtonian ในอากาศและน้ำ

รูปที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบความดันกระแทกของลำพุ่งเมื่อฉีดในอากาศและน้ำ ที่ความเร็วของกระสุนเท่ากับ 223 m/s จากชุดทดลอง Horizontal Single State Gas Gun พบว่า เมื่อระยะห่างจากหัวฉีดเพิ่มขึ้นความดันกระแทกทั้งเมื่อฉีดในอากาศและในน้ำ จะมีค่าลดลงโดยจะเกิดขึ้นในลักษณะเดียวกันทุกลำพุ่ง เพราะเมื่อระยะห่างจากหัวฉีดเพิ่มขึ้นความเร็วของลำพุ่งจะมีค่า

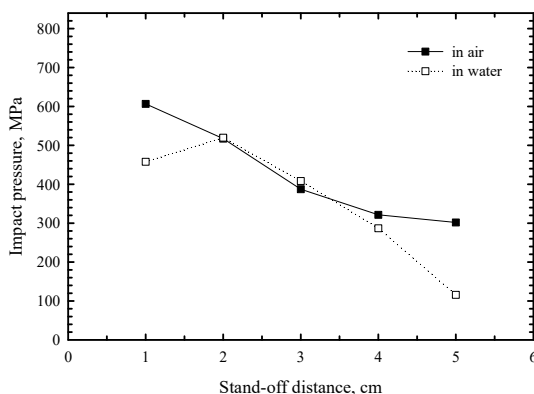
ลดลงเนื่องจากผลของแรงต้านทางพลศาสตร์ (Aerodynamic drag) และแรงต้านทานของน้ำ (Hydrodynamic drag) และเมื่อพิจารณาที่ทุกลำพุงและทุกระยะห่างจากหัวฉีดพบว่า ลำพุงที่ฉีดในอากาศจะมีความดันกระแทกสูงกว่าเมื่อฉีดในน้ำ เนื่องมาจาก แรงต้านทานของน้ำ (Hydrodynamic drag) จะมีค่าสูงกว่าแรงต้านทางพลศาสตร์ (Aerodynamic drag) (จาก $\text{Drag} = \frac{1}{2} C_D \rho V^2 A$ ซึ่ง ρ ของน้ำมีค่าเป็น 1,000 เท่าของอากาศ) จึงส่งผลทำให้ความเร็วของลำพุงเมื่อฉีดในน้ำจะมีความเร็วช้ากว่าเมื่อฉีดในอากาศ (ยกเว้นลำพุงน้ำมันดีเซลที่ระยะ 2 และ 3 cm) และเมื่อพิจารณาลำพุงเมื่อฉีดในน้ำที่ระยะห่างจากหัวฉีด 1 cm พบว่า มีความดันกระแทกต่ำกว่าที่ระยะ 2 cm อันเนื่องมาจาก ลำพุงเมื่อฉีดในน้ำจะต้องการระยะห่างจากหัวฉีดพอสมควรในการเร่งความเร็ว ซึ่งแตกต่างจากการฉีดในอากาศ จึงทำให้ความดันสูงสุดของลำพุงเมื่อฉีดในน้ำเกิดขึ้นที่ระยะห่าง 2 cm แทนที่จะเป็นระยะ 1 cm เช่นเดียวกับกรณีที่ฉีดในอากาศ



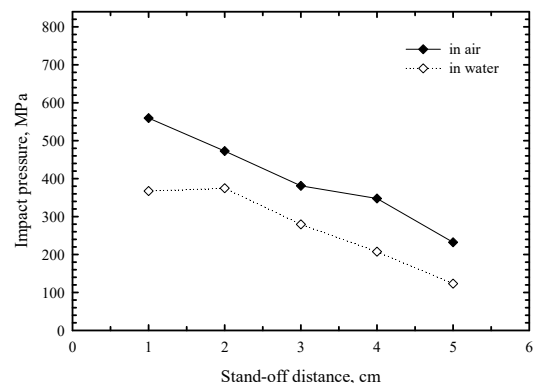
(a) ลำพุงน้ำ (water jet)



(b) ลำพุงน้ำมันดีเซล (diesel jet)

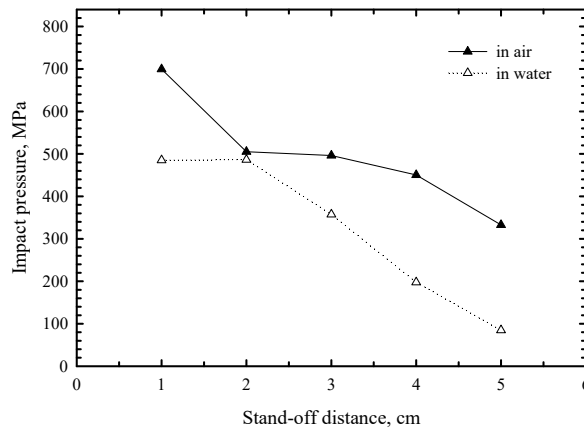


(c) ลำพุงน้ำมันก๊าด (kerosene jet)



(d) ลำพุงน้ำมันแก๊สโซลีน (gasoline jet)

รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบความดันกระแทกของลำพุงเมื่อฉีดในอากาศและน้ำ



(d) ลำพุงแอลกอฮอล์ (alcohol jet)

รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบความดันกระแทกของลำพุงเมื่อฉีดในอากาศและน้ำ (ต่อ)

จากการทดลองในการผลิตลำเจ็ทด้วยชุดทดลอง Horizontal Single State Gas Gun (HSSGG) พบว่า ถึงแม้จะสามารถผลิตลำเจ็ทได้ตามที่ต้องการ แต่มีข้อด้อยสำคัญคือ ต้องใช้เวลานานในการเตรียมชุดทดลองเพื่อผลิตลำเจ็ทในแต่ละครั้ง รวมถึงชุดทดลองมีขนาดใหญ่ จึงยากที่จะนำไปใช้งานจริงได้ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการออกแบบชุดขับ (Actuator) โดยใช้หลักการของแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อใช้ในการผลิตลำเจ็ทซึ่งข้อดีของชุดขับนี้ คือ มีขนาดเล็กกว่า จึงมีแนวโน้มในการนำไปใช้งานจริงได้

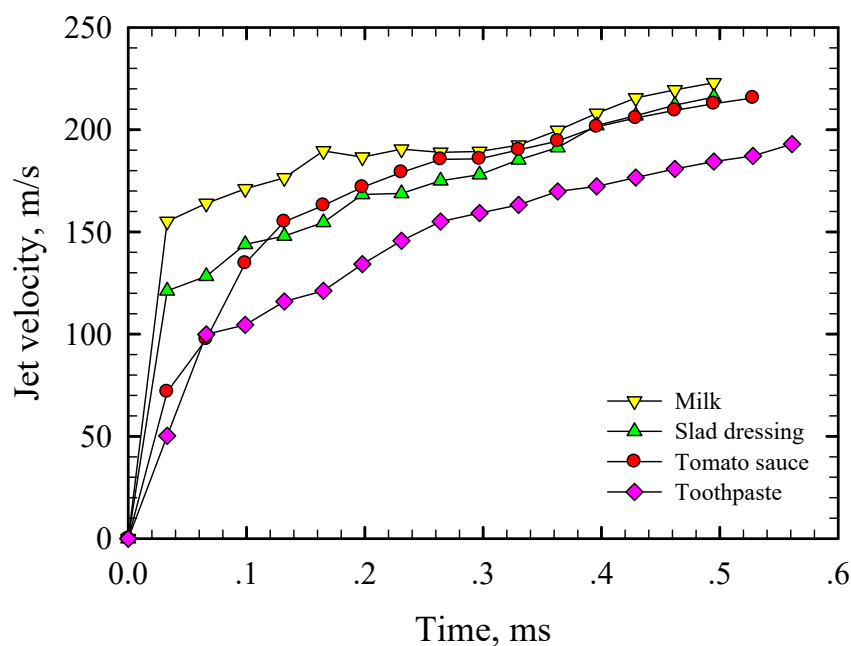
ดังนั้น หลังจากทำการศึกษาอิทธิพลของลำเจ็ท Newtonian ต่อความดันกระแทกแล้ว งานวิจัยนี้จึงได้เปลี่ยนชุดทดลองในการการผลิตลำเจ็ทจาก HSSGG มาเป็นชุดทดลองที่ใช้ต้นกำลังจากแม่เหล็กไฟฟ้าและทำการศึกษาศักยภาพของชุดทดลอง เนื่องด้วยเห็นศักยภาพในการพัฒนาต่อยอดเพื่อนำไปใช้งานจริงได้ในอนาคต นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาในการประยุกต์ใช้ลำเจ็ทในงานด้านต่างๆ เบื้องต้น ซึ่งจะได้กล่าวในบทถัดไป

4.4 ความเร็วของลำเจ็ท Non-Newtonian ในอากาศ

ในการศึกษาความเร็วของลำเจ็ท Non-Newtonian ในอากาศ จะใช้ชุดผลิตลำเจ็ทที่ใช้ชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้า โดยจะใช้เงื่อนไขการผลิตที่ขนาดรูหัวฉีด 0.5 mm แรงดันไฟฟ้า 500 V ปริมาตรของเหลว 0.1 mL และระยะ Travelling distance เท่ากับ 30 mm เนื่องจากการผลิตลำเจ็ทของน้ำที่เงื่อนไขนี้สามารถผลิตความเร็ว และความดันกระแทกของลำเจ็ทได้สูงสุด] ในการทดลองจะทำการวัดความเร็วโดยใช้กล้อง High speed video camera ที่อัตราส่วนของภาพ 30,000 fps

รูปที่ 4.5 แสดงความเร็วของลำเจ็ท Non-Newtonian ทั้ง 4 ชนิด พบว่า เมื่อระยะเวลาการเคลื่อนที่ของลำเจ็ทเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความเร็วของลำเจ็ททั้ง 4 ชนิดเพิ่มขึ้น เนื่องจากลำเจ็ทมี

ความสามารถในการเพิ่มความเร็วให้สูงขึ้นมากกว่าแรงต้านของอากาศที่มากกระทำ ซึ่งในการทดลองนี้สามารถวัดความเร็วได้ในระยะ 120 mm ห่างจากปลายหัวฉีด เนื่องจากข้อจำกัดของขนาดภาพที่ถูกบันทึกในกล้อง High speed video camera จากการวัดความเร็วของลำเจ็ท Non-Newtonian ทั้ง 4 ชนิดพบว่า ความเร็วของลำเจ็ทนั้นมีความเร็วสูงสุดในทุกๆ ระยะเวลาที่ลำเจ็ทเคลื่อนที่ ในส่วนของซอสมะเขือเทศ และน้ำสลัดในช่วงระยะเวลาดังกล่าวตั้งแต่ 0.1 ms เป็นต้นไปความเร็วของลำเจ็ทไม่แตกต่างกันมาก แต่เมื่อพิจารณาที่ระยะเวลา 0 – 0.1 ms จะมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งความเร็วของน้ำสลัดจะมีความเร็วที่สูงกว่าซอสมะเขือเทศ และเมื่อพิจารณาความเร็วลำเจ็ทของยาสีฟันพบว่า ลำเจ็ทยาสีฟันจะมีความเร็วที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับ นม น้ำสลัด และซอสมะเขือเทศ โดยความเร็วเฉลี่ยตลอดการเคลื่อนที่ของลำเจ็ท นม น้ำสลัด ซอสมะเขือเทศ และยาสีฟัน มีค่าเท่ากับ 191.30 m/s, 173.30 m/s, 173.34 m/s และ 147.84 m/s ตามลำดับ โดยนม น้ำสลัด ซอสมะเขือเทศ และยาสีฟัน เป็นตัวแทนของ Pseudoplastic, Dilatant, Bingham Pseudoplastic และ Bingham plastic ตามลำดับ

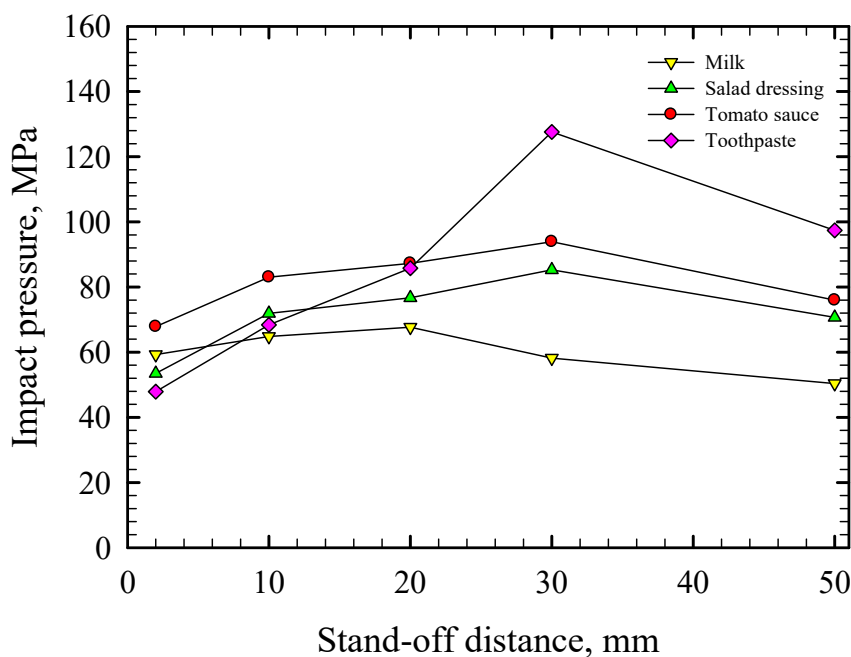


รูปที่ 4.4 ความเร็วของลำเจ็ท Non-Newtonian ทั้ง 4 ชนิดในอากาศ

4.5 ความดันกระแทกของลำเจ็ท Non-Newtonian ในอากาศ

ในการศึกษาลำเจ็ทของสาร Non-Newtonian ในอากาศซึ่งลำเจ็ทจะถูกผลิตขึ้นโดยใช้เงื่อนไขเดียวกับการผลิตลำเจ็ทในหัวข้อ 4.2.1 ในการทดลองจะทำการวัดความดันกระแทกโดยใช้ PVDF ซึ่งได้ถูกสอบเทียบโดยใช้การดล และโมเมนต์ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ความดันกระแทกจะถูกตรวจวัดที่ระยะ 2, 10, 20, 30 และ 50 mm ห่างจากปลายหัวฉีดในอากาศ

รูปที่ 4.5 แสดงอิทธิพลของระยะในการวัดความดันกระแทก (Stand-off distance) ต่อความดันกระแทกของลำเจ็ทในอากาศ จากการศึกษาพบว่า ความดันกระแทกของสาร Non-Newtonian ทั้ง 4 ชนิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแล้วลดลงเมื่อระยะ Stand-off distance เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อลำเจ็ทเคลื่อนที่ออกจากหัวฉีด ความเร็วของลำเจ็ทเริ่มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 แต่เมื่อพิจารณาตรงส่วนปลายของลำเจ็ท (Jet tip) ดังแสดงในรูปที่ 4.8 – 4.11 พบว่า ส่วนปลายของลำเจ็ทเริ่มมีการแตกตัวเป็นละอองมากขึ้นเมื่อระยะเวลาในการเคลื่อนที่ของลำเจ็ทเพิ่มขึ้น จึงทำให้พื้นที่ในการกระแทกของลำเจ็ทเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ความดันกระแทกของลำเจ็ท Non-Newtonian ทั้ง 4 ชนิดมีแนวโน้มลดลง เมื่อพิจารณาความดันกระแทกของสาร Non-Newtonian ทั้ง 4 ชนิดพบว่า ความดันกระแทกของลำเจ็ทยาสีฟัน ซอสมะเขือเทศ และน้ำสลัดจะมีความดันกระแทกสูงสุดที่ระยะ Stand-off distance เท่ากับ 30 mm แต่เมื่อพิจารณาความดันกระแทกของลำเจ็ทนมพบว่า ความดันกระแทกสูงสุดที่ระยะ Stand of distance เท่ากับ 20 mm เนื่องจากคุณสมบัติของสารที่แตกต่างกัน โดยค่าความดันกระแทกในอากาศของลำเจ็ทยาสีฟัน ซอสมะเขือเทศ น้ำสลัด และนมมีค่าเท่ากับ 127.61 MPa, 93.92 MPa, 85.28 MPa และ 58.18 MPa ตามลำดับ

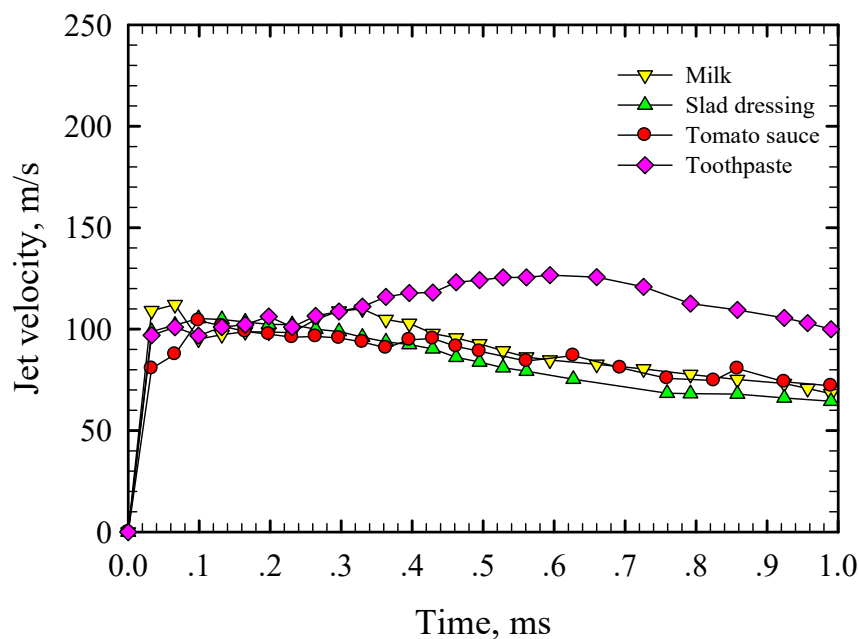


รูปที่ 4.5 อิทธิพลของระยะในการวัดความดันกระแทก ต่อความดันกระแทกของลำเจ็ทในอากาศ

4.6 ความเร็วของลำเจ็ท Non-Newtonian ในน้ำ

ในการศึกษาลำเจ็ทของสาร Non-Newtonian ในน้ำซึ่งลำเจ็ทจะถูกผลิตขึ้นโดยใช้เงื่อนไขเดียวกับการผลิตลำเจ็ทในหัวข้อ 4.4 ในการทดลองจะทำการวัดความเร็วโดยใช้กล้อง High speed video camera ที่อัตราส่วนของภาพ 30,000 fps

รูปที่ 4.6 แสดงความเร็วของลำเจ็ท Non-Newtonian ทั้ง 4 ชนิดในน้ำพบว่า เมื่อระยะเวลาการเคลื่อนที่ของลำเจ็ทเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความเร็วของลำเจ็ททั้ง 4 ชนิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแล้วลดลง โดยในช่วงระยะเวลา 0 – 0.1 ms ความเร็วของลำเจ็ทจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และหลังจากระยะเวลา 0.1 ms ความเร็วของลำเจ็ทจะเริ่มลดลงในกรณีที่ลำเจ็ทเป็น นม น้ำสลัด และซอสมะเขือเทศ ซึ่งค่าของความเร็วไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เมื่อพิจารณาความเร็วของลำเจ็ทยาสีฟันพบว่า ความเร็วของลำเจ็ทจะเริ่มเพิ่มขึ้นอีกครั้งที่ระยะเวลา 0.2 ms เป็นต้นไป แล้วจะเริ่มลดลงอีกครั้งที่ระยะเวลา 0.6 ms เป็นต้นไป การที่ความเร็วของลำเจ็ทแตกต่างกันเนื่องจาก คุณสมบัติของสารที่ใช้ในการทดสอบแตกต่างกัน



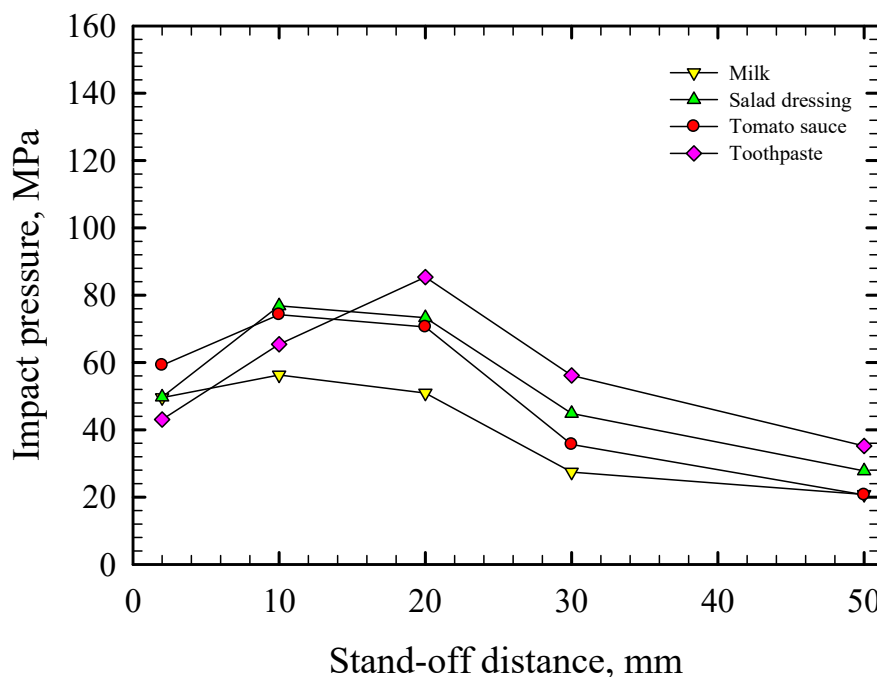
รูปที่ 4.6 ความเร็วของลำเจ็ท Non-Newtonian ทั้ง 4 ชนิดในน้ำ

4.7 ความดันกระแทกของลำเจ็ท Non-Newtonian ในน้ำ

ในการศึกษาลำเจ็ทของสาร Non-Newtonian ในน้ำซึ่งลำเจ็ทจะถูกผลิตขึ้นโดยใช้เงื่อนไขเดียวกับการผลิตลำเจ็ทในหัวข้อ 4.4 ในการทดลองจะทำการวัดความดันกระแทกโดยใช้ PVDF ซึ่งได้ถูกสอบเทียบโดยใช้การดล และโมเมนตัมดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ความดันกระแทกจะถูกตรวจวัดที่ระยะ 2, 10, 20, 30 และ 50 mm ห่างจากปลายหัวฉีดในน้ำ

รูปที่ 4.7 แสดงอิทธิพลของระยะในการวัดความดันกระแทก (Stand-off distance) ต่อความดันกระแทกของลำเจ็ทในน้ำพบว่า ความดันกระแทกของสาร Non-Newtonian ทั้ง 4 ชนิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแล้วลดลงเมื่อระยะ Stand-off distance เพิ่มขึ้น เนื่องจาก เมื่อลำเจ็ทเคลื่อนที่ออกจากหัวฉีดความเร็วของลำเจ็ทจะเริ่มเพิ่มขึ้นแล้วลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และเมื่อพิจารณาตรงส่วนปลายของลำเจ็ท (Jet tip) ดังแสดงในรูปที่ 4.12 - 4.15 พบว่า ส่วนปลายของลำเจ็ทมีการแตกตัวเป็นละออง

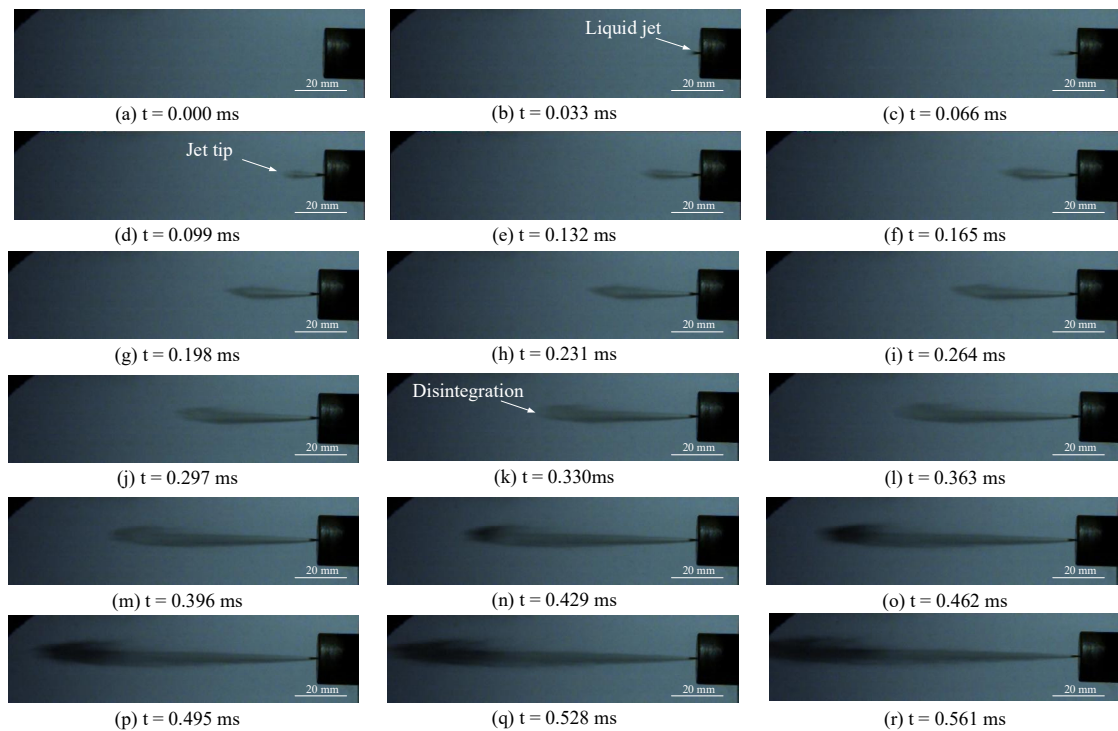
มากขึ้นเช่นเดียวกันกับการศึกษาความดันกระแทกของลำเจ็ทในอากาศ จึงทำให้พื้นที่ในการกระแทกของลำเจ็ทเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ความดันกระแทกของสาร Non-Newtonian ทั้ง 4 ชนิดมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะในการวัดความดันกระแทกห่างออกไปจากส่วนปลายของหัวฉีด เมื่อพิจารณาความดันกระแทกของสาร Non-Newtonian ทั้ง 4 ชนิดพบว่า ความดันกระแทกของลำเจ็ทยาสีฟัน จะมีความดันกระแทกสูงสุดที่ระยะ Stand-off distance เท่ากับ 20 mm เนื่องจากความเร็วของลำเจ็ทยาสีฟันเริ่มมีความเร็วเพิ่มขึ้นในช่วงระยะดังกล่าวดังแสดงในรูปที่ 4.5 แต่เมื่อพิจารณาความดันกระแทกของลำเจ็ทน้ำสลัด ซอสมะเขือเทศ และนมพบว่า ความดันกระแทกมีค่าสูงสุดที่ระยะ Stand-off distance เท่ากับ 10 mm เนื่องจากคุณสมบัติของสารที่แตกต่างกัน โดยค่าความดันกระแทกในน้ำของลำเจ็ทยาสีฟัน น้ำสลัด ซอสมะเขือเทศ และนมมีค่าเท่ากับ 85.36 MPa, 76.83 MPa, 74.21 MPa และ 56.28 MPa ตามลำดับ



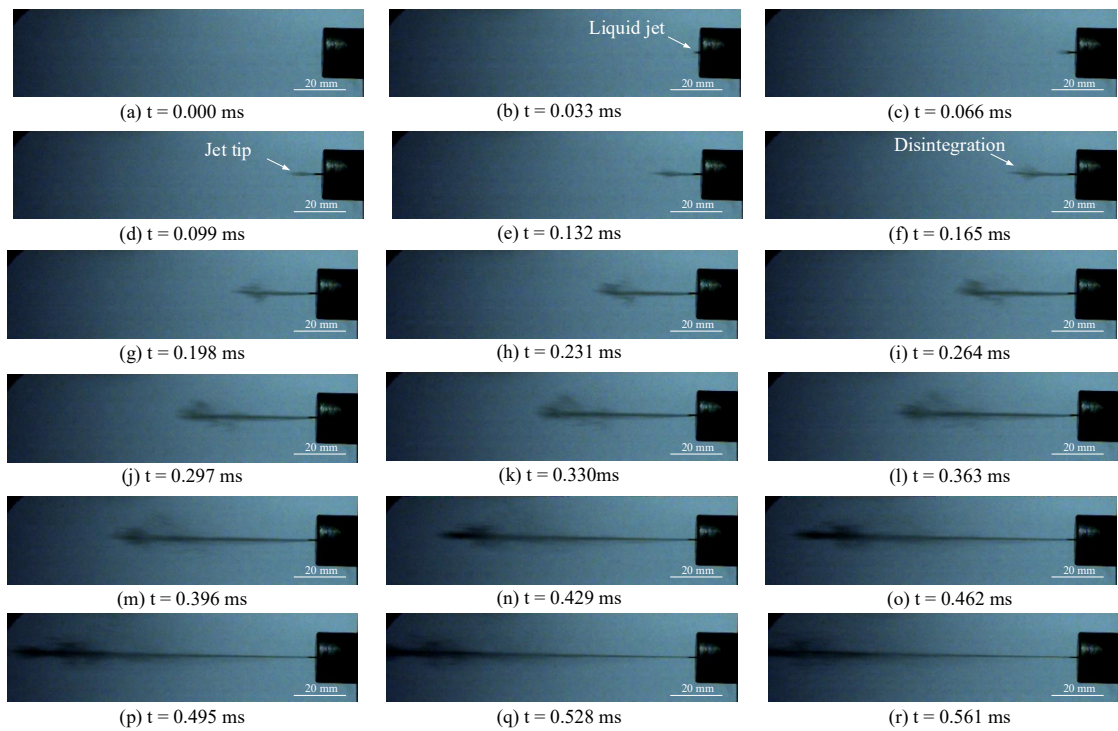
รูปที่ 4.7 อิทธิพลของระยะในการวัดความดันกระแทก ต่อความดันกระแทกของลำเจ็ทในน้ำ

4.8 พฤติกรรมของลำเจ็ท Non-Newtonian ในอากาศ

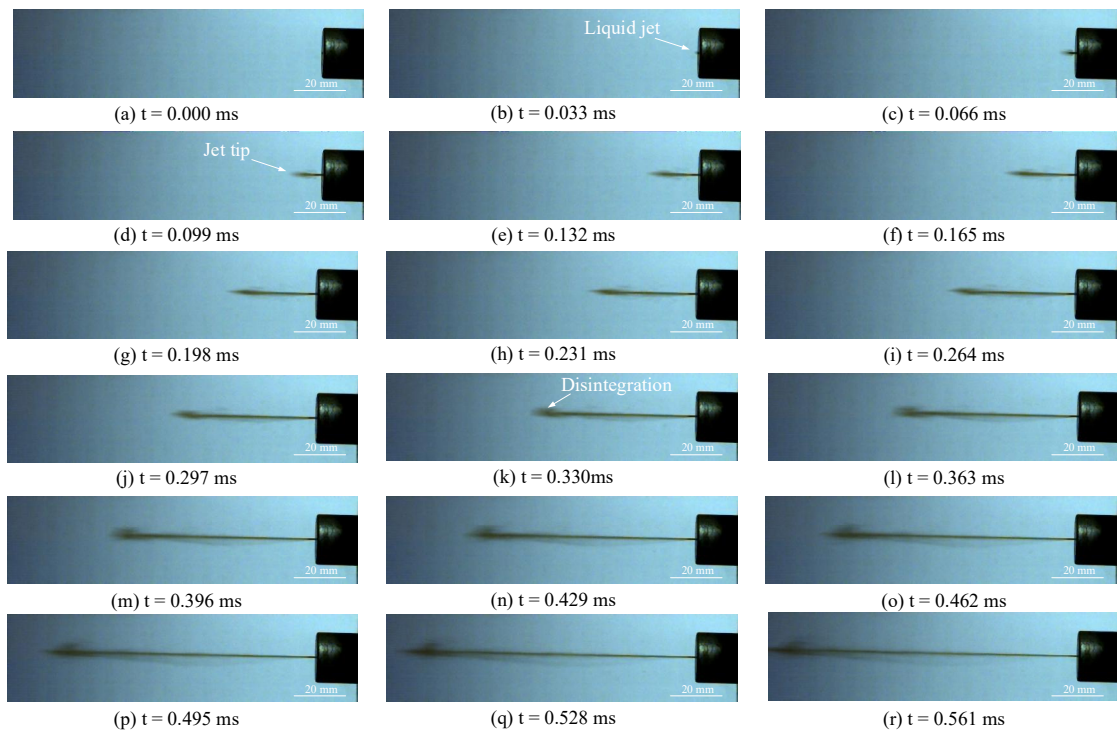
ในการศึกษาพฤติกรรมของลำเจ็ทสาร Non-newtonian ทั้ง 4 ชนิดในอากาศ โดยลำเจ็ทจะถูกผลิตขึ้นโดยใช้เงื่อนไขเดียวกันกับการผลิตลำเจ็ทในหัวข้อ 4.4 โดยพฤติกรรมของลำเจ็ท Non-newtonian จะถูกบันทึกโดยใช้กล้อง High speed video camera ที่อัตราส่วนของภาพ 30,000 fps ดังแสดงในรูปที่ 4.8-4.11



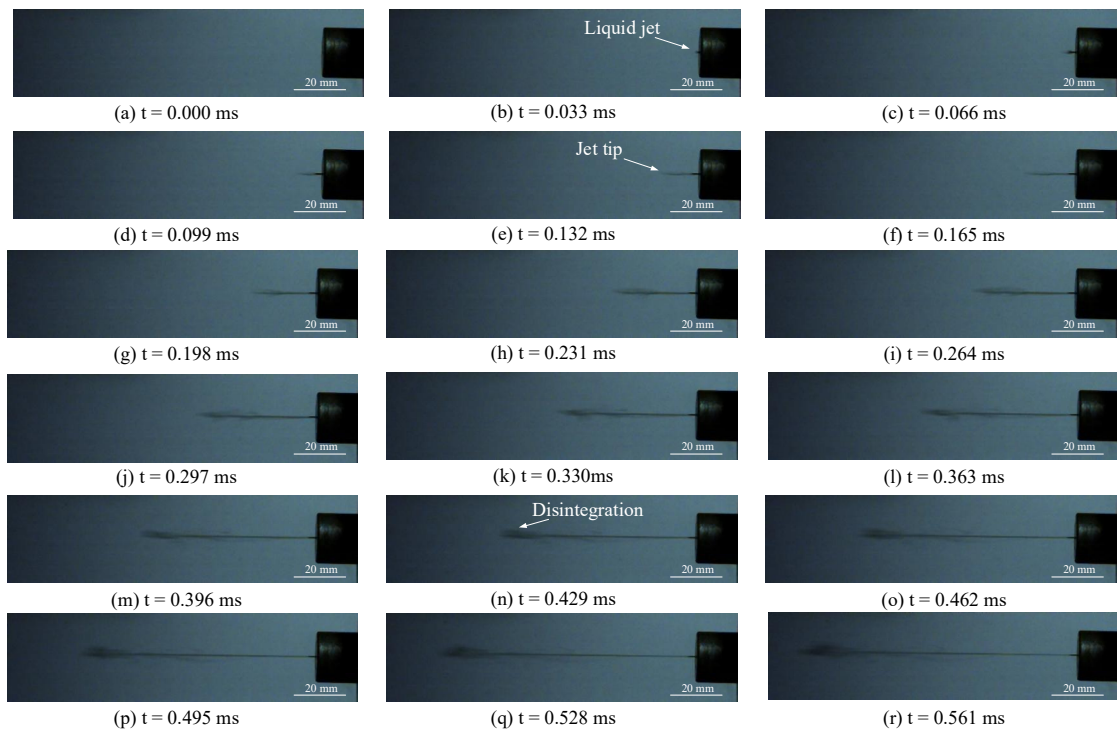
รูปที่ 4.8 พฤติกรรมของลำเจ็ทในอากาศ



รูปที่ 4.9 พฤติกรรมของลำเจ็ทน้ำสัดในอากาศ



รูปที่ 4.10 พฤติกรรมของลำเจ็ทของสมะเชื้อเทศในอากาศ

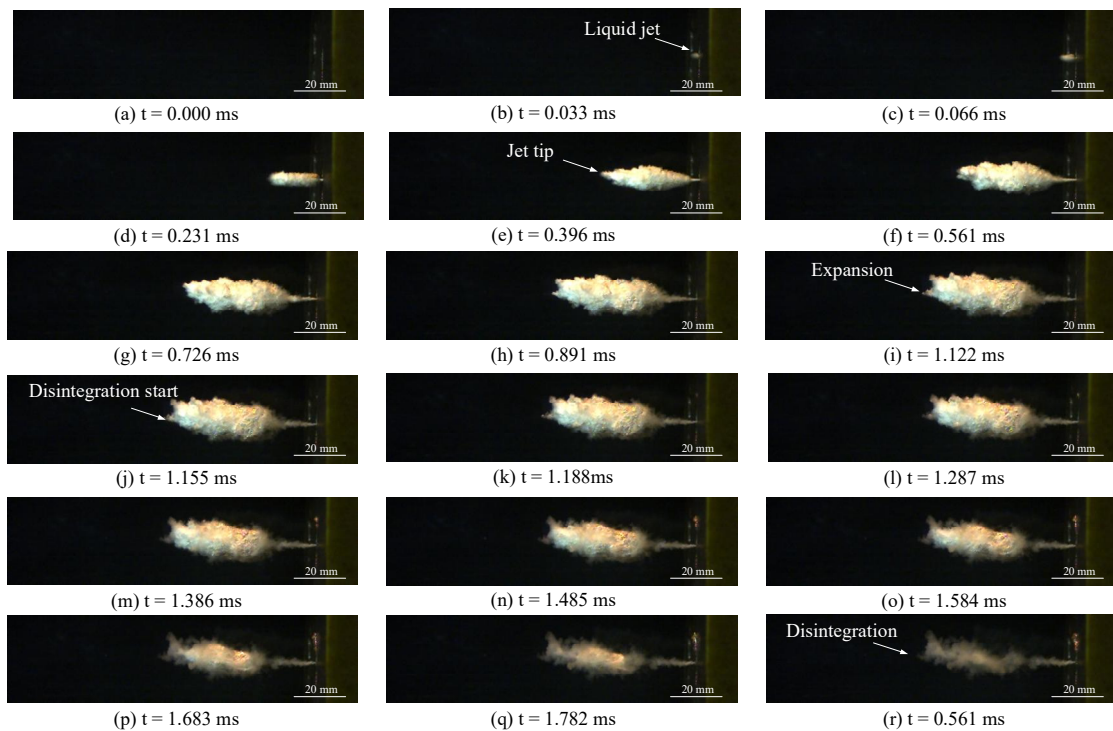


รูปที่ 4.11 พฤติกรรมของลำเจ็ทยาสีฟันในอากาศ

รูปที่ 4.8 – 4.11 แสดงพฤติกรรมของลำเจ็ทนม น้ำสลัด ซอสมะเขือเทศ และยาสีฟันในอากาศพบว่า เมื่อลำเจ็ทเคลื่อนที่ออกจากรูหัวฉีดดังแสดงในรูปที่ 4.8(b) – 4.11(b) ในส่วนปลายของลำเจ็ท (Jet tip) จะเริ่มเกิดการแตกตัว (Disintegration) มากขึ้น หลังจากทีลำเจ็ทเคลื่อนที่ออกจากรูหัวฉีด เมื่อพิจารณาการแตกตัวของลำเจ็ททั้ง 4 ชนิดพบว่า นมมีการแตกตัวของลำเจ็ทที่ส่วนปลายมากที่สุด รองลงมาคือ น้ำสลัด ในส่วนของลำเจ็ทซอสมะเขือเทศ และยาสีฟันการแตกตัวของลำเจ็ทที่ส่วนปลายไม่แตกต่างกันมากนัก

4.9 พฤติกรรมของลำเจ็ท Non-newtonian ในน้ำ

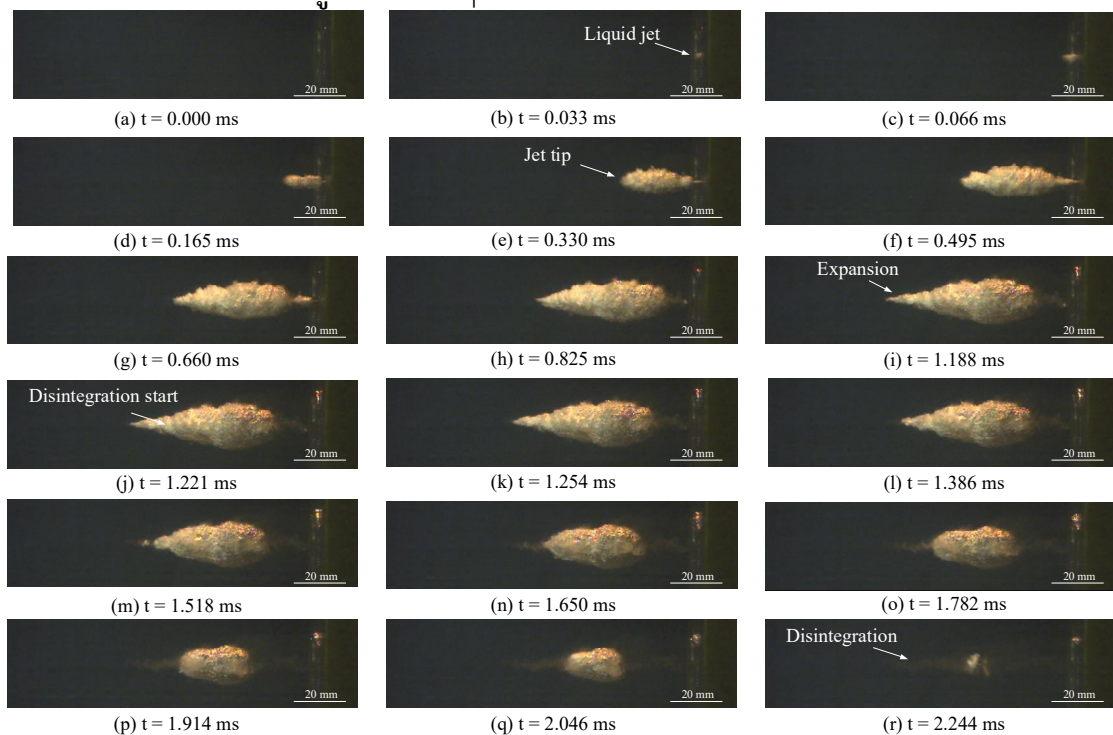
ในการศึกษาพฤติกรรมของลำเจ็ทสาร Non-newtonian ทั้ง 4 ชนิดในน้ำ โดยลำเจ็ทจะถูกผลิตขึ้นโดยใช้เงื่อนไขเดียวกันกับการผลิตลำเจ็ทในหัวข้อ 4.4 โดยพฤติกรรมของลำเจ็ท Non-newtonian จะถูกบันทึกโดยใช้กล้อง High speed video camera ที่อัตราส่วนของภาพ 30,000 fps ดังแสดงในรูปที่ 4.12-4.15



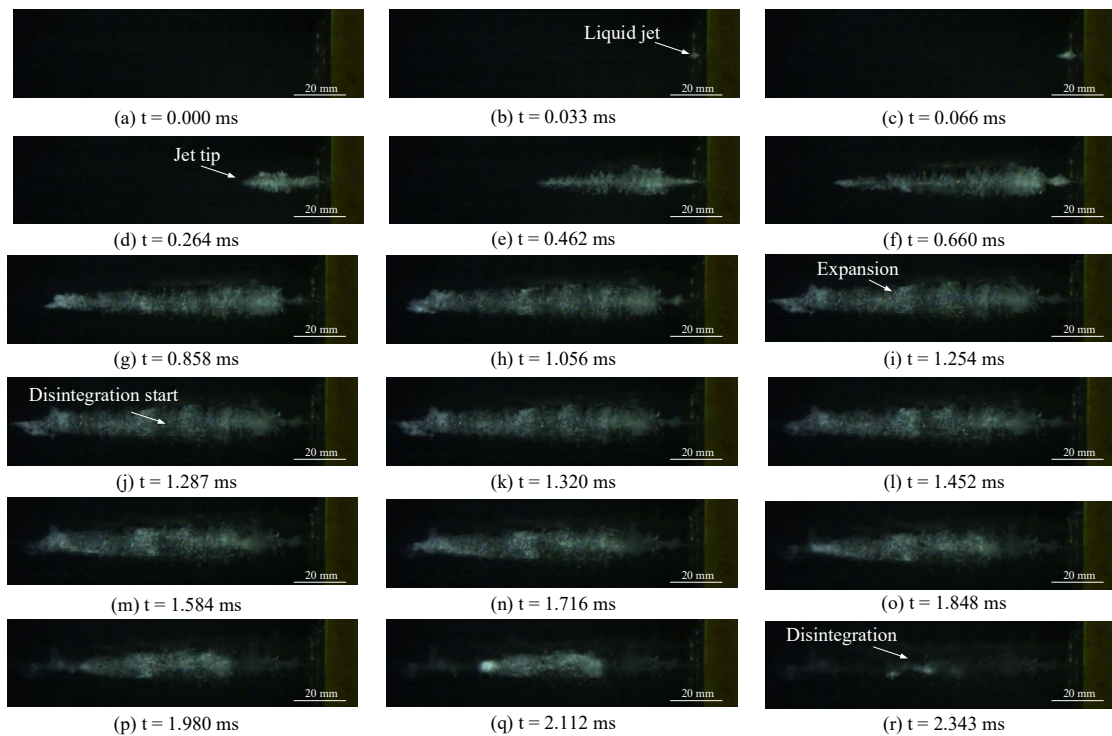
รูปที่ 4.12 พฤติกรรมของลำเจ็ทนมในน้ำ



รูปที่ 4.13 พฤติกรรมของลำเจ็ทน้ำสลัดในน้ำ



รูปที่ 4.14 พฤติกรรมของลำเจ็ทมะเขือเทศในน้ำ



รูปที่ 4.15 พฤติกรรมของลำเจ็ทยาสีฟันในน้ำ

รูปที่ 4.12 – 4.15 แสดงพฤติกรรมของลำเจ็ทนม น้ำสลด ซอสมะเขือเทศ และยาสีฟันในอากาศพบว่า เมื่อลำเจ็ทเคลื่อนที่ออกจากรูหัวฉีดดังแสดงในรูปที่ 4.12(b) – 4.15(b) ลำเจ็ทของสาร Non-Newtonian ทั้ง 4 ชนิดจะเริ่มเกิดการขยายตัว (Expansion) ขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากเกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน (Cavitation) ขึ้น ซึ่งจะเกิดการขยายตัวสูงสุดดังแสดงในรูปที่ 4.12(i) – 4.15(i) หลังจากนั้นลำเจ็ทของสาร Non-Newtonian ทั้ง 4 ชนิดจะเริ่มเกิดการยุบตัวลง ดังแสดงในรูปที่ 4.12(j) – 4.15(j) และจะยุบตัวต่ำสุดดังแสดงในรูปที่ 4.12(r) – 4.15(r) เมื่อพิจารณาที่ส่วนปลายของลำเจ็ท (Jet tip) พบว่า ส่วนปลายของลำเจ็ทนมจะมีการแตกตัว (Disintegration) มากที่สุด และเมื่อพิจารณาความยาวของลำเจ็ท ซึ่งวัดจากส่วนปลายของลำเจ็ทออกไปพบว่า ลำเจ็ทนมมีความยาวของลำเจ็ทต่ำสุด ส่วนลำเจ็ทยาสีฟันจะมีความยาวของลำเจ็ทสูงสุด โดยที่ลำเจ็ท นม น้ำสลด ซอสมะเขือเทศ และยาสีฟันมีความยาวของลำเจ็ทสูงสุดเท่ากับ 64.69 mm, 67.17 mm, 73.18 mm และ 125.52 mm ตามลำดับ

บทที่ 5

การประยุกต์ใช้ลำเจ็ท

5.1 การประยุกต์ใช้ลำเจ็ทเพื่อการฉีดยา

5.1.1 บทนำ

ปัจจุบันอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มส่วนใหญ่จะใช้ต้นกำลังจากการสะสมพลังงานซึ่งมีอยู่ 2 รูปแบบด้วยกันคือ สปริง และ แก๊ส โดยข้อดีของต้นกำลังจากสปริงคือ อุปกรณ์จะมีขนาดเล็ก สะดวกในการใช้งาน แต่ข้อเสียคือ ถ้าต้องการเพิ่มความเร็วของลำเจ็ท จะต้องทำการปรับแต่งอุปกรณ์ใหม่ หรือเปลี่ยนสปริงที่มีค่านิจของสปริง (K) ให้สูงขึ้น และที่สำคัญเมื่อใช้งานเป็นเวลานานจะทำให้ค่า K ของสปริงลดลง ส่งผลต่อความเร็วของลำเจ็ท และการส่งถ่ายยา ส่วนข้อดีของต้นกำลังที่ใช้แก๊สคือ สามารถควบคุมความเร็วของลำเจ็ทได้ แก๊สที่นิยมใช้คือ แก๊ส CO_2 และแก๊สฮีเลียม [78] แต่อย่างไรก็ตามมีข้อเสียของต้นกำลังจากแก๊สคือ ต้องมีระบบผลิตแก๊ส และระบบอัดแก๊ส จึงทำให้ต้นกำลังนี้มีขนาดใหญ่ และมีราคาแพง ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการคิดค้นต้นกำลังใหม่เพื่อใช้ผลิตลำเจ็ทสำหรับการส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็ม นั่นก็คือต้นกำลังจากไฟฟ้า

ในปี 2007 Stachowiak J.C. และคณะ [49] ได้ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้าที่มีชุดขับ (Actuator) ทำจาก Piezoelectric ในการผลิตลำเจ็ท โดยหลักการทำงานของชุดขับ Piezoelectric คือ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน Piezoelectric จะทำให้เกิดการยืดหดตัว จึงใช้หลักการนี้ผลิตลำเจ็ท ซึ่งข้อดีของชุดขับ Piezoelectric คือ สามารถควบคุมความเร็วของลำเจ็ทได้ แต่ข้อเสียคือ ปริมาตรของเหลวที่อยู่ภายในหัวฉีดน้อยมาก อยู่ในระดับนาโนลิตรถึงไมโครลิตรเท่านั้น ต่อมาในปี 2012 Taberner และคณะ [76] ได้คิดค้นชุดขับใหม่ที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็ม นั่นก็คือชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic) โดยหลักการทำงานของชุดขับแม่เหล็กไฟฟ้าคือ ใช้การตัดกันของสนามแม่เหล็ก ระหว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็กถาวร ซึ่งการตัดกันของสนามแม่เหล็กทั้งสอง จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ขึ้น จึงใช้การเคลื่อนที่นี้ในการผลิตลำเจ็ทเพื่อการส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็ม อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยดังกล่าวยังไม่ได้ศึกษาการพฤติกรรมของการแพร่กระจายของยา และรูปร่างของการแพร่กระจาย

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของลำเจ็ทเมื่อฉีดเข้าไปในเนื้อเยื่อจำลอง โดยใช้อุปกรณ์ผลิตลำเจ็ทที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้าที่มีชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้าในการผลิตลำเจ็ทสำหรับการส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็ม นอกจากนี้ยังได้ทำการเปรียบเทียบพฤติกรรม และรูปร่างของการแพร่กระจายในเนื้อเยื่อจำลองกับอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มที่มีขายทั่วไปอีกด้วย

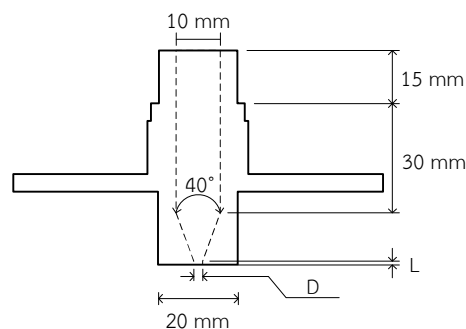
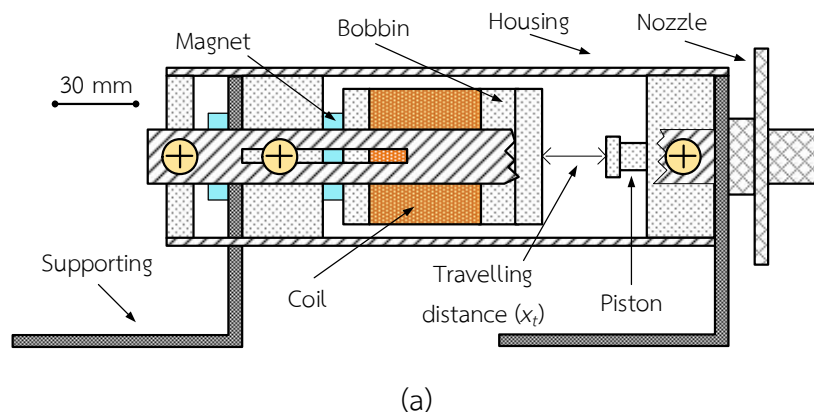
5.1.2 วิธีการทดลอง และอุปกรณ์

1) อุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า

ในการทดลองจะใช้อุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า โดยมีแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นชุดขับในการผลิตลำเจ็ท จะถูกสร้างขึ้นโดยใช้หลักการพื้นฐานของการผลิตลำเจ็ท

แบบ Impact driven method [2, 3] ดังแสดงในรูปที่ 5.1(a) โดยมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญของอุปกรณ์ ได้แก่ ชุดขับ (Actuator) หัวฉีด (Nozzle) และแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power source) โดยชุดขับจะถูกสร้างขึ้นจากแม่เหล็ก Neodymium magnet (NdFeB) และขดลวดทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดทองแดงเท่ากับ 0.32 mm พันรอบแกน (Bobbin) 1,600 รอบ ในส่วนของลักษณะของหัวฉีดที่ทำจากเหล็กกล้าจะใช้ค่า L/D เท่ากับ 4 และมุมกรวยเท่ากับ 40° ดังแสดงในรูปที่ 5.1(b) เนื่องจากลักษณะของหัวฉีดดังกล่าว สามารถผลิตลำเจ็ทได้ความเร็วสูงที่สุด [77] และใช้ตัวเก็บประจุขนาด 600 โวลต์ 5,400 μF เป็นตัวเก็บพลังงานไฟฟ้าจากการประจุไฟฟ้าโดยใช้เครื่องประจุไฟฟ้า (Power supply)

การทำงานของอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า โดยมีแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นชุดขับ เริ่มจากใช้เครื่อง Power supply ทำการประจุไฟฟ้าให้กับตัวเก็บประจุ จนถึงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการ จากนั้นทำการปล่อยแรงดันไฟฟ้าจากตัวเก็บประจุ ให้กับขดลวดทองแดง เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้น ตัดกับสนามแม่เหล็กถาวรของแม่เหล็ก NdFeB จะทำให้ขดลวดทองแดงเกิดการเคลื่อนที่เข้ากระแทกกับก้านสูบ (Piston rod) ทำให้ของเหลวที่อยู่ภายในหัวฉีดเคลื่อนที่ผ่านรูหัวฉีดอย่างรวดเร็วเกิดเป็นลำเจ็ทขึ้น โดยในการศึกษานี้ จะใช้น้ำเป็นของเหลวที่ใช้ในการผลิตลำเจ็ท



รูปที่ 5.1 (a) อุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า โดยมีแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นชุดขับ และ (b) ลักษณะของหัวฉีด

2) อุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มที่ใช้ต้นกำลังจากสปริง

อุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มที่ใช้ต้นกำลังจากสปริงที่ใช้ในการศึกษา จะเป็นอุปกรณ์ส่งถ่ายยาที่มีขายในท้องตลาด โดยในการศึกษาได้เลือกใช้อุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มยี่ห้อ Comfort in ของบริษัท MK Global และบริษัท Mika Medical ประเทศเกาหลีใต้ [79] ดังแสดงในรูปที่ 5.2 ซึ่งอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มสำหรับฉีด Insulin ของผู้ป่วยโรคเบาหวาน โดยขนาดรูหัวฉีดของอุปกรณ์ฯ เท่ากับ 0.15 mm และสามารถบรรจุของเหลว หรือยาได้สูงสุดเท่ากับ 0.5 mL



รูปที่ 5.2 อุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มยี่ห้อ Comfort in [79]

3) เนื้อเยื่อจำลอง Polyacrylamide gel

ในการทำนายพฤติกรรมการแพร่กระจายของลำเจ็ทหรือยา เมื่อฉีดเข้าไปในเนื้อเยื่อของมนุษย์ จะใช้ Polyacrylamide gel ในการทำนาย เนื่องจาก Polyacrylamide gel มีความโปร่งใส (Taberner, 2012) [76] และมีค่า Young modulus ใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อของมนุษย์ โดยมีค่าเท่า 0.22 - 0.38 MPa ที่ความเข้มข้นของ Polyacrylamide gel เท่ากับ 20% - 30% [80] ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ Polyacrylamide gel ที่ความเข้มข้น 20% ในการศึกษาพฤติกรรมการแพร่กระจายดังกล่าว โดยการเตรียม Polyacrylamide gel ที่ความเข้มข้น 20% จะใช้ Acrylamide stock ที่ความเข้มข้น 40% (37.5 acrylamide/1 bis-acrylamide; BioRad Laboratories) ผสมกับน้ำกลั่น และใช้ Ammonium persulfate (APS) กับ N,N,N',N'-tetramethylethylenediamine (TEMED) เป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยา Polymerization

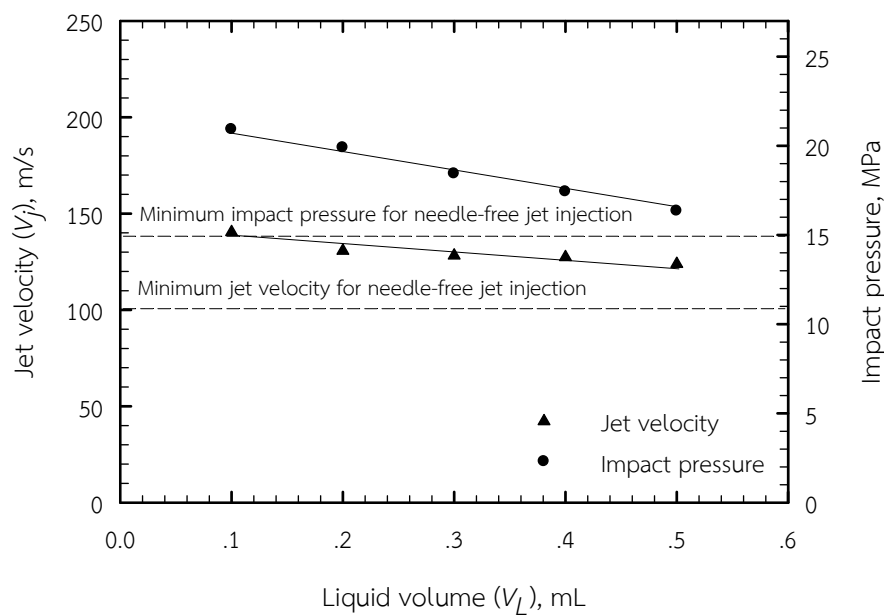
5.1.3 ผลการทดลอง

1. ความเร็ว และความดันกระแทกของลำเจ็ท

ผลการศึกษาความเร็ว และความดันกระแทกของลำเจ็ทของอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มที่ใช้ชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้า และชุดขับจากสปริงดังแสดงในรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.4 ตามลำดับ โดยอุปกรณ์ฯ ที่ใช้ชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้าจะใช้เงื่อนไขในการผลิตลำเจ็ทคือ Travelling distance (X_t) เท่ากับ 5 mm ดังแสดงในรูปที่ 5.1 แรงดันไฟฟ้า 500 Volt และขนาดรูหัวฉีดเท่ากับ 0.2 mm เนื่องจากการศึกษาของ Sripanagul G. และ Matthujak A. [81] พบว่า กรณีนี้ อุปกรณ์ฯ ที่ใช้ชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้าจะสามารถผลิตลำเจ็ทที่มีความเร็ว และความดันกระแทกผ่านเงื่อนไขสำหรับการส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มคือ ความเร็ว และความดันกระแทกของลำเจ็ทต้องมีความมากกว่า 100 m/s [76]

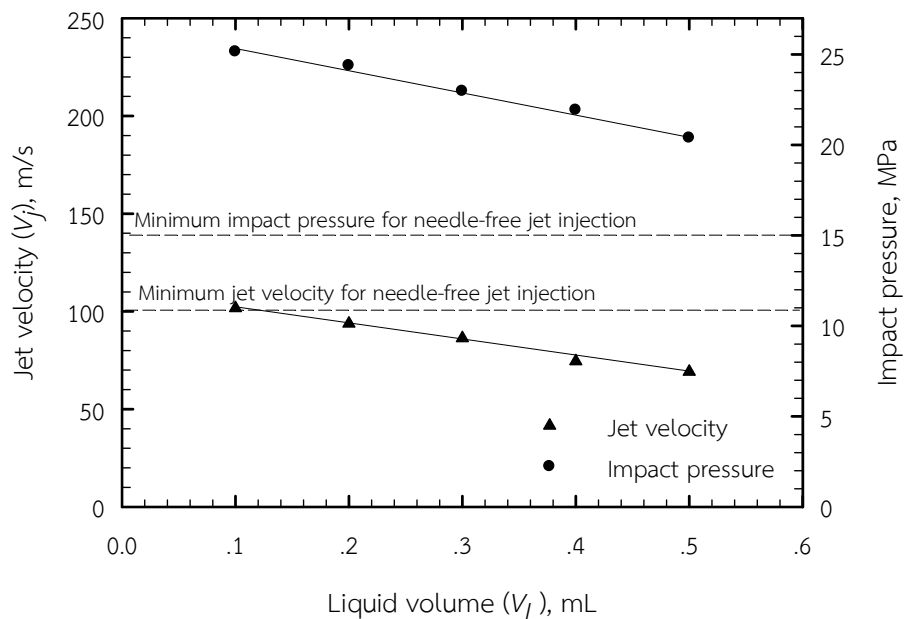
และ 15 MPa [78] ตามลำดับ โดยในการศึกษาจะใช้ปริมาตรของเหลว (Liquid volume) ในการผลิตลำเจ็ททั้งสองอุปกรณ์เท่ากับ 0.1 – 0.5 mL

รูปที่ 5.3 แสดงอิทธิพลของปริมาตรต่อความเร็ว และความดันกระแทกของลำเจ็ทของอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช่เข็มที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า โดยมีแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นชุดขับ ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ความเร็ว และความดันกระแทกของลำเจ็ทมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาตรของเหลวเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความดันกระแทกที่อยู่ภายในหัวฉีด จากหลักการพลศาสตร์ของไหลอัดตัวได้ (Compressible fluid dynamic) โดยความเร็ว และความดันกระแทกของลำเจ็ทที่ผลิตได้มีค่าเท่ากับ 140.36 - 123.88 m/s และ 20.91 - 16.34 MPa ที่ปริมาตร 0.1 - 0.5 mL ตามลำดับ



รูปที่ 5.3 อิทธิพลของปริมาตรต่อความเร็ว และความดันกระแทกของลำเจ็ทของอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช่เข็มที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า โดยมีแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นชุดขับ

รูปที่ 5.4 แสดงอิทธิพลของปริมาตรต่อความเร็ว และความดันกระแทกของลำเจ็ทของอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช่เข็มที่ใช้ต้นกำลังจากสปริง ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ความเร็ว และความดันกระแทกของลำเจ็ทมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาตรของเหลวเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับชุดต้นกำลังจากไฟฟ้า โดยความเร็ว และความดันกระแทกของลำเจ็ทที่ผลิตได้มีค่าเท่ากับ 101.69 - 69.16 m/s และ 25.14 - 20.37 MPa ที่ปริมาตร 0.1 - 0.5 mL ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าความเร็วของลำเจ็ทที่ปริมาตร 0.2 - 0.5 mL มีค่าน้อยกว่าความเร็วตามเงื่อนไขที่ใช้สำหรับการส่งถ่ายยาแบบไม่ใช่เข็ม แต่อย่างไรก็ตามความดันกระแทกของชุดต้นกำลังจากสปริงมีค่าสูงกว่าความดันกระแทกตามเงื่อนไขคือ มากกว่า 15 MPa ดังนั้นจึงทำให้อุปกรณ์ฯ ที่ใช้ต้นกำลังจากสปริงนี้สามารถเจาะชั้นผิวหนังของมนุษย์เพื่อทำการส่งถ่ายยาได้



รูปที่ 5.4 อิทธิพลของปริมาตรต่อความเร็ว และความดันกระแทกของลำเจ็ทของอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มที่ใช้ต้นกำลังจากสปริง

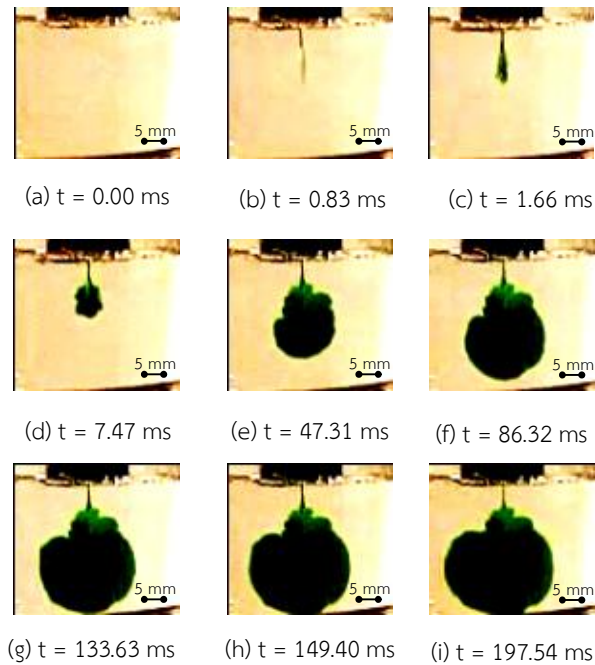
2. พฤติกรรมการแพร่กระจาย

ผลการศึกษาพฤติกรรมการแพร่กระจายของลำเจ็ทเมื่อฉีดเข้าไปใน Polyacrylamide gel ที่ความเข้มข้น 20% ของอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า โดยมีแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นชุดขับ และชุดต้นกำลังจากสปริง ดังแสดงในรูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.6 ตามลำดับ

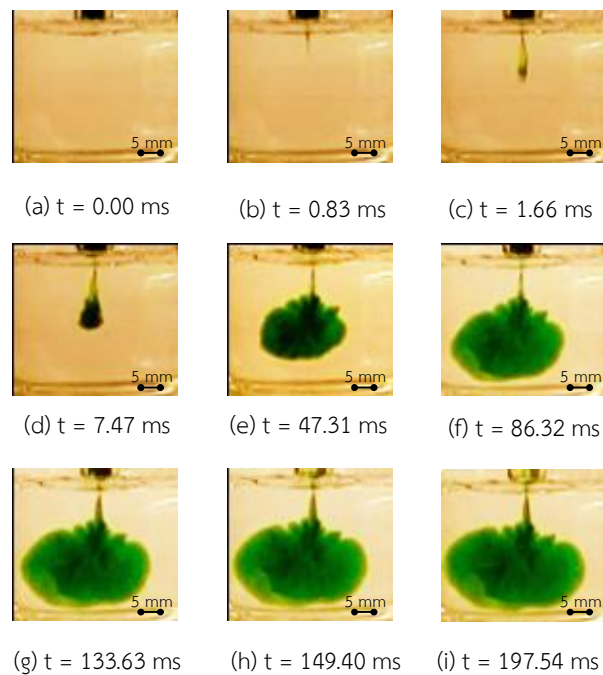
จากรูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.6 แสดงพฤติกรรมการแพร่กระจายของลำเจ็ทของอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า โดยมีแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นชุดขับ และชุดต้นกำลังจากสปริง ตามลำดับ พบว่า พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของลำเจ็ทเมื่อฉีดเข้าไปใน Polyacrylamide gel สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระยะดังนี้ 1) ระยะแรกคือ ระยะเตรียมการฉีดดังแสดงในรูปที่ 5.5(a) และ 5.6(a) 2) ระยะการเจาะคือ ระยะที่ลำเจ็ทเจาะเข้าไปใน Polyacrylamide gel ดังแสดงในรูปที่ 5.5(b) และ 5.6(b) ซึ่งในระยะนี้ลำเจ็ทจะมีความเร็ว และความดันกระแทกสูง โดยที่ความลึกของการเจาะ (Hole) จะขึ้นอยู่กับความเร็ว และความดันกระแทกของลำเจ็ท และเวลาที่ใช้ในระยะนี้น้อยมากเมื่อเทียบกับระยะถัดไป 3) ระยะการแพร่กระจายคือ ระยะที่ของเหลวเริ่มเกิดการแพร่กระจายออกจากจุดกึ่งกลางของ Hole ดังแสดงในรูปที่ 5.5(c) – 5.5(i) และ 5.6(c) – 5.6(i) ซึ่งระยะเวลาในการแพร่กระจายขึ้นอยู่กับปริมาตรของเหลว และความเร็วของลำเจ็ท

จากรูปที่ 5.5(c) และรูปที่ 5.5(c) จะเห็นได้ว่าระยะของการเจาะ (Hole) ของอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า โดยมีแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นชุดขับจะมีความลึกมากกว่าชุดจากสปริง นั้นหมายความว่าชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้าใช้ระยะเวลาในการเจาะสั้นกว่าอุปกรณ์ฯ ที่ใช้ต้นกำลังจากสปริง เนื่องจากความเร็วของลำเจ็ทของอุปกรณ์ฯ ที่ใช้ชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้ามีความเร็ว

ของลำเจ็ทที่สูงกว่า ซึ่งคาดว่าจะลดความรู้สึกเจ็บปวดของผู้ที่ถูกฉีดได้ดีกว่าชุดขับจากสปริง เนื่องจากใช้ระยะเวลาเจาะที่สั้นกว่า



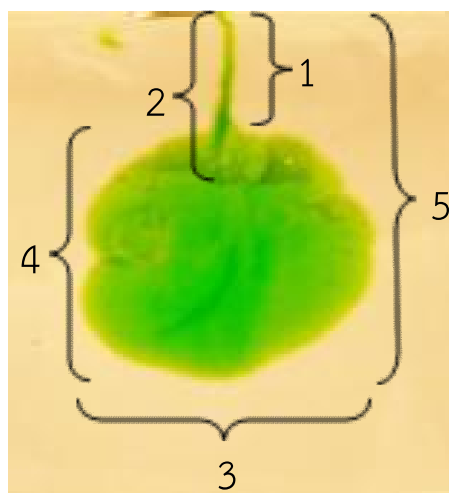
รูปที่ 5.5 พฤติกรรมการแพร่กระจายของลำเจ็ทของอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช่เข็มที่ใช้ต้นกำเนิดจากไฟฟ้า โดยมีแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นชุดขับ



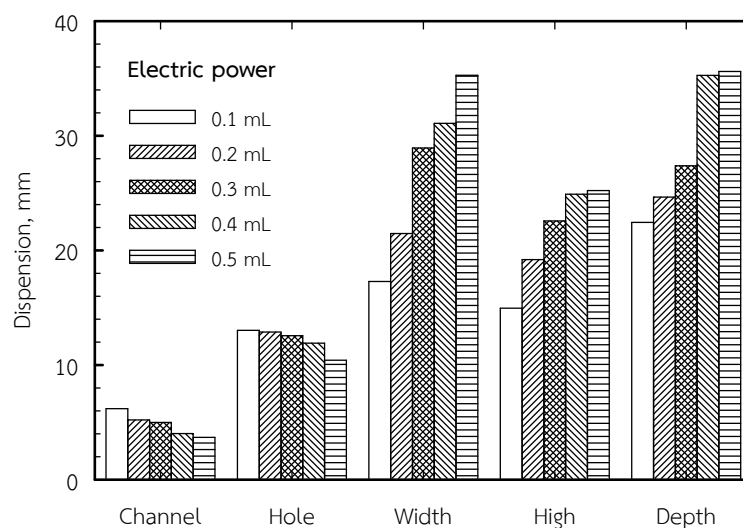
รูปที่ 5.6 พฤติกรรมการแพร่กระจายของลำเจ็ทของอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช่เข็มที่ใช้ต้นกำเนิดจากสปริง

3. รูปร่างการแพร่กระจาย

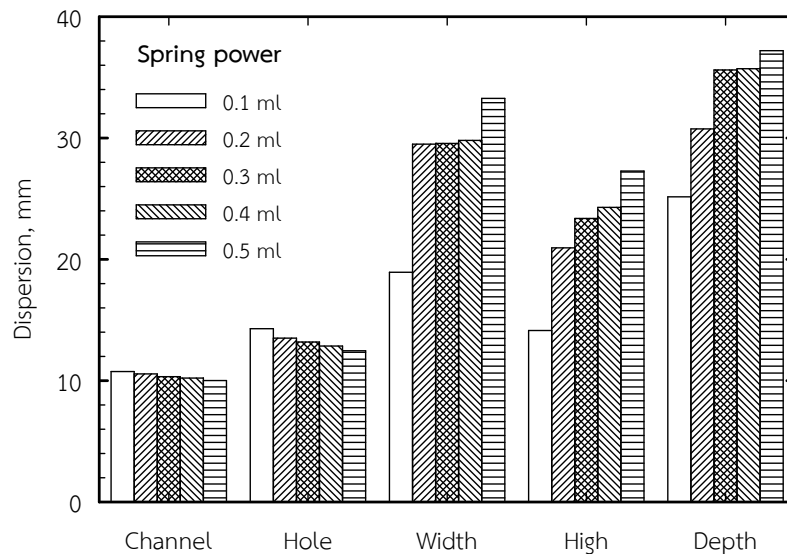
ลักษณะรูปร่างการแพร่กระจายของลำเจ็ทเมื่อฉีดเข้าไปใน Polyacrylamide gel จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 รูปแบบดังนี้ 1) ความลึกขอบบนของการแพร่กระจาย (Channel) 2) ความลึกของการเจาะ (Hole) 3) ความกว้างของการแพร่กระจาย (Width) 4) ความสูงของการแพร่กระจาย (Height) และ 5) ความลึกสูงสุดของการแพร่กระจาย (Depth) ดังแสดงในรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 ลักษณะรูปร่างการแพร่กระจายของลำเจ็ท



รูปที่ 5.8 การแพร่กระจายของอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า โดยมีแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นชุดขับ



รูปที่ 5.9 การแพร่กระจายของอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มที่ใช้ต้นกำลังจากสปริง

รูปที่ 5.8 และรูปที่ 5.9 แสดงการแพร่กระจายของลำเจ็ทที่ปริมาตร 0.1 - 0.5 mL ของอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า โดยมีแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นชุดขับ และชุดต้นกำลังจากสปริงตามลำดับพบว่า รูปแบบการแพร่กระจายของอุปกรณ์ฯ ทั้ง 2 มีความคล้ายคลึงกัน โดยที่ระยะของ Channel และ Hole จะมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากความเร็ว และความดันกระแทกของลำเจ็ทลดลงเมื่อปริมาตรเพิ่มขึ้น ส่วนระยะของ Height, Width และ Depth จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาตรของลำเจ็ทเพิ่มขึ้น ดังนั้นอาจเป็นไปได้ว่าในอนาคตชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถประยุกต์ใช้เป็นชุดขับของอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มได้ และเมื่อพิจารณาระยะ Hole ของทั้ง 2 อุปกรณ์พบว่า ระยะ Hole ของอุปกรณ์ฯ ที่ใช้ต้นกำลังจากสปริงจะมีความลึกมากกว่าอุปกรณ์ฯ ที่ใช้ชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้าในทุกๆ ปริมาตร เนื่องจากความดันกระแทกของอุปกรณ์ฯ ที่ใช้ต้นกำลังจากสปริงมีความดันกระแทกสูงกว่า

5.1.4 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาพฤติกรรมของลำเจ็ทเมื่อฉีดเข้าไปใน Polyacrylamide gel ของอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า โดยมีแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นชุดขับ และชุดต้นกำลังจากสปริงสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) ความเร็ว และความดันกระแทกของอุปกรณ์ฯ ทั้ง สอง อุปกรณ์ฯ จะมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาตรของลำเจ็ทเพิ่มขึ้น
- 2) พฤติกรรมการแพร่กระจายของลำเจ็ททั้ง 2 อุปกรณ์สามารถแบ่งได้ 3 ระยะ คือ ระยะแรก , ระยะเจาะ และระยะการแพร่กระจาย

- 3) ระยะของ Channel และ Hole จะขึ้นอยู่กับความเร็ว และความดันกระแทกของลำเจ็ท ส่วนระยะของ Height, Width และ Depth จะขึ้นอยู่กับปริมาตรของลำเจ็ท
- 4) ลักษณะรูปร่างของการแพร่กระจายของลำเจ็ททั้ง 2 อุปกรณ์ฯ มีลักษณะคล้ายคลึงกัน
- 5) ชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถประยุกต์ใช้เป็นชุดขับของอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มได้ในอนาคต

5.2 การประยุกต์ใช้ลำเจ็ทเพื่อการเจาะกระดูก

5.2.1 บทนำ

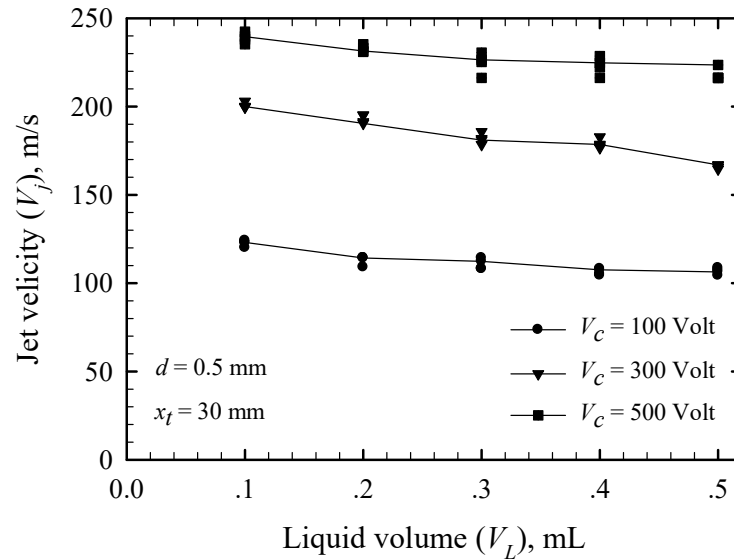
ปัจจุบันการศัลยกรรมกระดูกที่เกิดการแตกหัก จะใช้สว่านเจาะกระดูกเพื่อใส่สลักเกลียวยึดกระดูกที่แตกหักนั้นเข้าไว้ด้วยกัน แพทย์ที่ทำการเจาะกระดูกจะต้องมีความชำนาญ และใช้ความเร็วรอบของสว่านให้เหมาะสม ถ้าไม่เช่นนั้นเซลล์กระดูกตรงบริเวณที่เจาะอาจได้รับความเสียหายได้ เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเสียดสีโดยตรงระหว่างดอกสว่านกับเซลล์กระดูก ซึ่งจะเป็นปัญหาในการเกิดใหม่ของเซลล์กระดูกได้ในอนาคต [82-84] ด้วยเหตุนี้ Tujithof และคณะ [82-84] จึงได้ศึกษาการประยุกต์ใช้ลำเจ็ทในการเจาะกระดูก เพื่อลดความเสียหายของเซลล์กระดูกลง เนื่องจากการใช้ลำเจ็ทเจาะกระดูกจะไม่มีการสัมผัสโดยตรงระหว่างหัวฉีดกับกระดูก อีกทั้งยังไม่มีความร้อนเกิดขึ้นอีกด้วย โดยในการศึกษาของ Tujithof ได้ใช้เครื่องทดสอบแรงดึง Tensile test กดอัดของเหลวในกระบอกสูบจนมีความดัน 70 MPa แล้วปล่อยของเหลวนั้นเข้าหัวฉีดที่มีขนาดรูหัวฉีดเท่ากับ 0.6 mm และใช้ระยะเวลาในการเจาะเท่ากับ 5 s จากการศึกษาพบว่า ความลึกของกระดูกมีค่าเท่ากับ 24 mm โดยที่อัตราส่วนของความลึกของกระดูกต่อปริมาตรของลำเจ็ทมีค่าเท่ากับ 0.045 mm/mL [11] ซึ่งจะเห็นได้ว่าจะเกิดของเสียที่เป็นส่วนผสมระหว่างน้ำกับเศษกระดูกที่เกิดขึ้นระหว่างการเจาะ ซึ่งต้องใช้เครื่องดูดของเสียเหล่านั้นออกระหว่างการผ่าตัดด้วย นอกจากนี้เครื่องที่ใช้ในการผลิตลำเจ็ทซึ่งเป็นเครื่องที่ใช้ในการทดสอบค่า Tensile และค่า Compressive strength ของวัสดุ ซึ่งไม่ได้เป็นเครื่องที่ใช้ในการผลิตลำเจ็ทโดยตรง จึงยากต่อการนำมาประยุกต์ใช้งานจริงได้ และที่สำคัญการควบคุมความลึกของกระดูกเป็นไปได้ยาก เนื่องจากลักษณะของลำเจ็ทที่เป็นลำน้ำต่อเนื่องที่มีระยะเวลาฉีด 5 s ซึ่งอาจทำให้รู้ที่เจาะมีความลึกมากเกินไปจนความจำเป็น หรืออาจเป็นผลเสียได้ถ้านำไปเจาะกระดูกที่มีความบางมากๆ เช่นกะโหลกศีรษะได้

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการศึกษาเบื้องต้นในการประยุกต์ใช้อุปกรณ์ผลิตลำเจ็ทที่ได้สร้างขึ้นจากการใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า และใช้ชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้าในการผลิตลำเจ็ท ซึ่งลำเจ็ทที่ผลิตได้จะมีลักษณะเป็นแบบ Pulse และใช้กระดูกหมูในส่วนของโคนขา (Femoral condyles) เป็นกระดูกที่ใช้ในการทดลอง

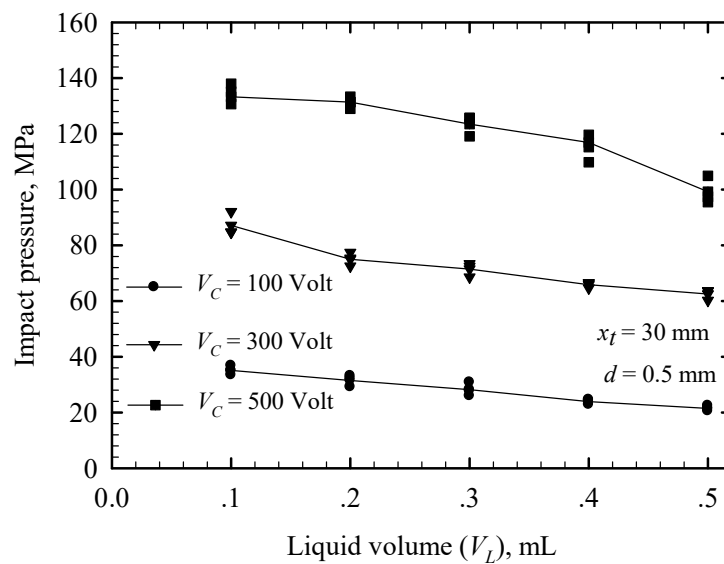
5.2.2 กระดูก และการวิเคราะห์กระดูก

ในการศึกษาการเจาะกระดูกด้วยลำเจ็ทจะใช้กระดูกหมูในส่วนของโคนขา (Femoral condyles) เนื่องจากกระดูกหมูมีกระบวนการ metabolism และมี Volume fraction ใกล้เคียงกับกระดูกของมนุษย์ [82] และใช้เครื่อง CT Scan รุ่น Optima CT600 ที่มี resolution เท่ากับ 0.625 mm พิจารณาลักษณะของรู และวิเคราะห์ความลึกของกระดูก

5.2.3 ผลการทดลอง



รูปที่ 5.10 อิทธิพลของปริมาณต่อความเร็วของลำเจ็ทที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 100 Volt, 300 Volt และ 500 Volt



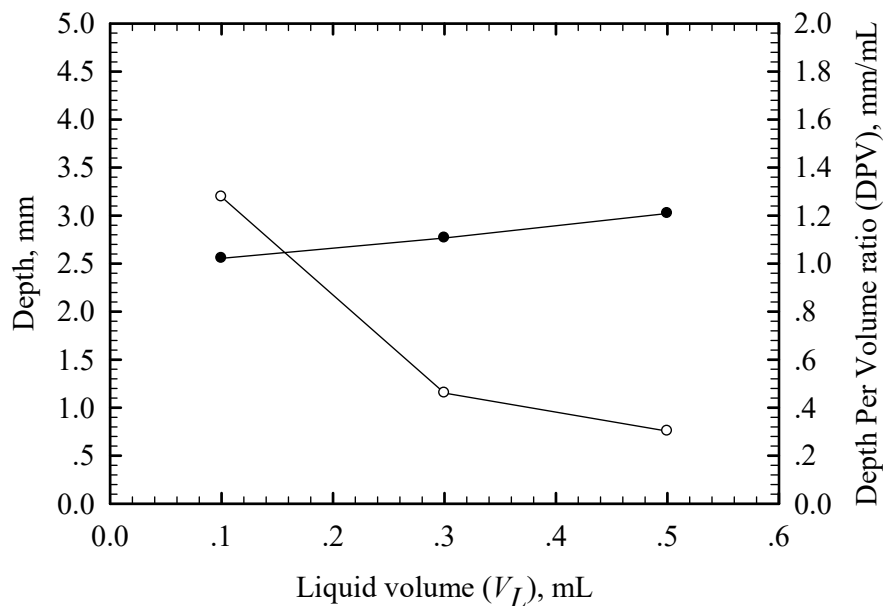
รูปที่ 5.11 อิทธิพลของปริมาณต่อความดันกระแทกของลำเจ็ทที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 100 Volt, 300 Volt และ 500 Volt

รูปที่ 5.10 แสดงอิทธิพลของปริมาตรต่อความเร็วของลำเจ็ทที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 100 Volt, 300 Volt และ 500 Volt โดยใช้เงื่อนไขการทดลองที่ขนาดรูหัวฉีด 0.5 mm Travelling distance เท่ากับ 30 mm [81] พบว่า เมื่อปริมาตรของของเหลวเพิ่มขึ้นจะทำให้ความเร็วของลำเจ็ทมีแนวโน้มลดลง โดยทุกแรงดันไฟฟ้ามีแนวโน้มในลักษณะเดียวกัน เนื่องจากเกิดความดันย้อนกลับ (Back pressure) ขึ้นภายในหัวฉีด เมื่อพิจารณาให้ของไหลสามารถอัดตัวได้ตามหลักการพลศาสตร์ของไหลอัดตัวได้ (Compressible fluid dynamic) [46] และเมื่อพิจารณาที่ปริมาตรใดๆ ของของเหลวพบว่า เมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นความเร็วของลำเจ็ทมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจาก เป็นการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ถ้ามีแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ขดลวดทองแดงมาก ขดลวดทองแดงก็จะสร้างความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามาก ทำให้ขดลวดทองแดงเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงขึ้น โดยที่แรงดันไฟฟ้า 500 Volt ปริมาตร 0.1 mL และ Travelling distance เท่ากับ 30 mm สามารถผลิตลำเจ็ทได้ความเร็วสูงสุด เท่ากับ 239.57 m/s ที่ขนาดรูหัวฉีด 0.5 mm

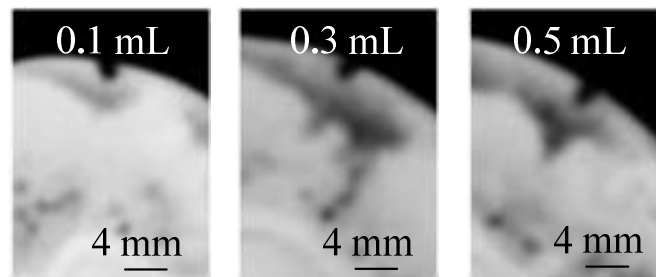
รูปที่ 5.11 แสดงอิทธิพลของปริมาตรต่อความดันกระแทกของลำเจ็ทที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 100 Volt, 300 Volt และ 500 Volt โดยใช้เงื่อนไขการทดลองที่ขนาดรูหัวฉีด 0.5 mm Travelling distance เท่ากับ 30 mm จากการใช้แผ่น PVDF วัดความดันกระแทกของลำเจ็ทที่ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่น PVDF (Stand-off distance) เท่ากับ 3 mm พบว่า เมื่อปริมาตรของของเหลวเพิ่มขึ้นจะทำให้ความดันกระแทกของลำเจ็ทมีแนวโน้มลดลง โดยทุกแรงดันไฟฟ้ามีแนวโน้มในลักษณะเดียวกัน เนื่องจากความเร็วของลำเจ็ทมีแนวโน้มลดลงดังที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น และเมื่อพิจารณาที่ปริมาตรใดๆ ของของเหลว พบว่า เมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นความเร็วของลำเจ็ทมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจาก เป็นการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าดังที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ โดยที่แรงดันไฟฟ้า 500 Volt ปริมาตร 0.1 mL และ Travelling distance เท่ากับ 30 mm สามารถผลิตลำเจ็ทได้ความดันกระแทกสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 133.27 MPa ที่ขนาดรูหัวฉีด 0.5 mm อย่างไรก็ตามในการศึกษาการเจาะกระดูกด้วยลำเจ็ทจะศึกษาอิทธิพลของปริมาตรของของเหลวด้วย เนื่องจากในงานวิจัยที่ผ่านมา [82-84] พบว่า ปริมาตรของเหลวมีอิทธิพลต่อความลึกของกระดูก ดังนั้นในการศึกษาการเจาะกระดูกโดยใช้อุปกรณ์ผลิตลำเจ็ทที่ได้สร้างขึ้น ที่มีลักษณะลำเจ็ทเป็นแบบ Pulse จะศึกษาอิทธิพลของปริมาตรของเหลว และจำนวนครั้งในการเจาะกระดูกต่อความลึกของกระดูก

รูปที่ 5.12 อิทธิพลของปริมาตรต่อความลึกของกระดูก โดยในการศึกษาจะใช้กรณีผลิตลำเจ็ทที่ขนาดรูหัวฉีดเท่ากับ 0.5 mm, Travelling distance เท่ากับ 30 mm และแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 500 Volt เนื่องจากเป็นกรณีที่สามารถผลิตความเร็ว และความดันกระแทกของลำเจ็ทได้สูงสุดในทุกๆ ปริมาตรดังแสดงในรูปที่ 5.10 และรูปที่ 5.11 ส่วนปริมาตรที่ใช้ในการศึกษามีค่าเท่ากับ 0.1 mL, 0.3 mL และ 0.5 mL ซึ่งปริมาตร 0.5 mL เป็นปริมาตรสูงสุดของหัวฉีดที่บรรจุได้ ในการทดลองจะทำการเจาะอย่างต่อเนื่องทั้งหมด 20 Pulses ในแต่ละปริมาตร โดยมีระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับกระดูก

เท่ากับ 1 mm และใช้เครื่อง CTScan รุ่น Optima CT600 ที่มีขนาด resolution เท่ากับ 0.625 mm ตรวจสอบโครงสร้างของกระดุก และความลึกของกระดุกหลังจากการเจาะกระดุกด้วยลำเจ็ทดังแสดงในรูปที่ 5.13 จากการศึกษาพบว่า ความลึกของกระดุกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาตรของลำเจ็ทเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมา [82-84] โดยที่ปริมาตรของลำเจ็ทเท่ากับ 0.5 mL สามารถเจาะกระดุกได้ความลึกสูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.02 mm เนื่องจากลำเจ็ทที่มีปริมาตรมากจะมีระยะเวลาในการเจาะกระดุกที่มากกว่าลำเจ็ทที่มีปริมาตรน้อย จึงทำให้กระดุกเกิดการฉีกขาด แล้วหลุดออกได้มากกว่า และยังพบว่า อัตราส่วนความลึกต่อปริมาตร (The depth per volume ratio, DPV) ซึ่งมีค่าเท่ากับ ความลึกของกระดุกที่เจาะได้หารด้วยผลคูณของปริมาตรของลำเจ็ทกับจำนวน Pulse ของลำเจ็ท ซึ่งจากการทดลองพบว่าค่า DPV มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาตรของลำเจ็ทเพิ่มขึ้น เนื่องจากกระดุกในส่วนที่ลึกลงไปมีความแข็งแรงมากขึ้น โดยค่า DPV ที่ปริมาตร 0.1, 0.3 และ 0.5 mL มีค่าเท่ากับ 1.27, 0.4612 และ 0.3022 mm/mL ตามลำดับ อย่างไรก็ตามในระหว่างการผ่าตัดจะมีเครื่องดูดของเสียที่เกิดขึ้นจากการผ่าตัดออก ดังนั้นในการศึกษาจึงใช้กรณีผลลิตลำเจ็ทที่ปริมาตร 0.5 mL ในการศึกษาอิทธิพลของจำนวน Pulse ของลำเจ็ทต่อความลึกของกระดุกต่อไป

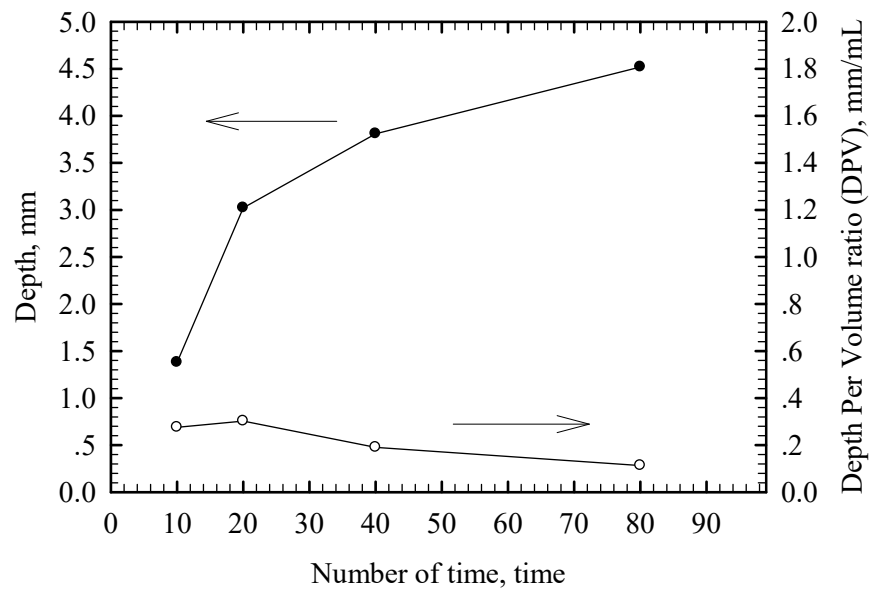


รูปที่ 5.12 อิทธิพลของปริมาตรต่อความลึกของกระดุก

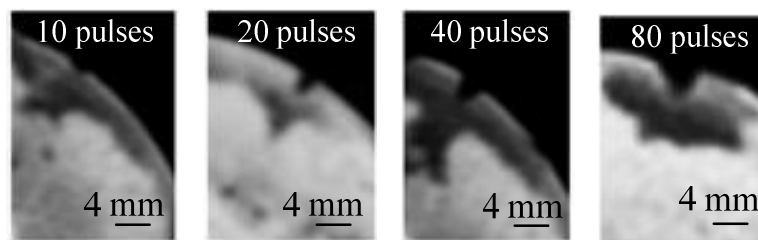


รูปที่ 5.13 โครงสร้างของกระดูกจากการใช้เครื่อง CT Scan

รูปที่ 5.14 แสดงอิทธิพลของจำนวน Pulse ของลำเจ็ทต่อความลึกของกระดูก โดยในการศึกษาจะใช้กรณีผลิตลำเจ็ทที่ Travelling distance เท่ากับ 30 mm แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 500 Volt และปริมาตรของเหลวเท่ากับ 0.5 mL ทำการเจาะอย่างต่อเนื่องที่จำนวน Pulse เท่ากับ 10, 20, 40 และ 80 pulses ดังแสดงในรูปที่ 5.15 จากการศึกษพบว่า ความลึกของกระดูกเพิ่มขึ้นตามจำนวน Pulse ที่เพิ่มขึ้น โดยความลึกสูงสุดมีค่าเท่ากับ 5.52 mm ที่จำนวน pulse เท่ากับ 80 pulses และมีอัตราส่วนความลึกต่อปริมาตรเท่ากับ 0.113 mm/mL ที่ 80 pulses ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า DPV มีค่าสูงกว่าการศึกษาที่ผ่านมา [82] ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.045 mm/mL ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ลำเจ็ทที่ใช้ในการเจาะกระดูกของอุปกรณ์ผลิตลำเจ็ทที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า และใช้ชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้ามีความสามารถในการเจาะกระดูกได้ดีกว่า รวมไปถึงมีของเสียที่เกิดขึ้นระหว่างการเจาะกระดูกโดยใช้อุปกรณ์นี้มีปริมาณที่น้อยกว่าอีกด้วย อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาความชันของกราฟดังแสดงในรูปที่ 5.15 พบว่าความชันของกราฟในแต่ละช่วงของจำนวนครั้งในการเจาะมีแนวโน้มลดลง หรืออาจกล่าวได้ว่าเมื่อเพิ่มจำนวน Pulse ของลำเจ็ทในการเจาะเพิ่มขึ้นจะทำให้ความลึกของกระดูกเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากลำเจ็ทที่ใช้ในการศึกษานี้สามารถเจาะกระดูกในชั้น Articular cartilage ได้เท่านั้น แต่ในชั้น Compact bone ซึ่งเป็นชั้นถัดไปของกระดูก ลำเจ็ทสามารถเจาะได้เพียงเล็กน้อย เนื่องจากชั้น Compact bone ของกระดูกจะมีความแข็งมากกว่า ดังนั้นอุปกรณ์ผลิตลำเจ็ทนี้จึงมีความเหมาะสมกับบริเวณกระดูกบางส่วน of ร่างกายเท่านั้น เช่น การผ่าตัดกะโหลกศีรษะของมนุษย์ที่ไม่จำเป็นต้องเจาะด้วยความลึกที่ลึกมาก หรือบริเวณที่มีความหนาของกระดูกไม่มาก แต่ถ้าหากต้องการนำไปประยุกต์ใช้ในการเจาะกระดูกส่วนอื่นของร่างกายที่มีความหนามาก จำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมทั้งในด้านการเพิ่มจำนวน Pulse ของลำเจ็ท รวมไปถึงการเพิ่มความเร็ว และความดันกระแทกของลำเจ็ทต่อไปในอนาคต



รูปที่ 5.14 อิทธิพลของจำนวน pulse ของลำเจ็ทต่อความลึกของกระดุก



รูปที่ 5.15 โครงสร้างของกระดุกที่จำนวน 10-80 pulses

5.2.4 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการเจาะกระดุกโดยใช้ลำเจ็ท จากอุปกรณ์ผลิตลำเจ็ทที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า โดยมีแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นชุดขับ สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) ความเร็ว และความดันกระแทกของลำเจ็ท มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาตรของลำเจ็ทเพิ่มขึ้น
- 2) ความลึกของกระดุกจะลึกมากขึ้นเมื่อปริมาตรของลำเจ็ท และจำนวน Pulse ของลำเจ็ทเพิ่มขึ้น
- 3) ในการศึกษาอุปกรณ์ผลิตลำเจ็ทที่ใช้ชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถจะกระดุกได้ความลึกสูงสุดเท่ากับ 5.52 mm ที่จำนวน pulse เท่ากับ 80 pulses

4) อัตราส่วนความลึกต่อปริมาตร (DPV) มีค่าเท่ากับ 0.113 mm/mL ซึ่งสูงกว่าการศึกษาที่ผ่านมา [11]

5) ชูตขับจากแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถประยุกต์ใช้เป็นชูตขับของอุปกรณ์ผลิตลำเจ็ทเพื่อการเจาะกระดูกได้ในอนาคต อย่างไรก็ตามควรศึกษา และปรับปรุงอุปกรณ์ผลิตลำเจ็ทที่ใช้ชูตขับนี้เพิ่มเติมเพื่อให้สามารถผลิตลำเจ็ทที่มีความเร็ว และความดันกระแทกสูงมากขึ้น และศึกษาการเจาะกระดูกในบริเวณอื่นๆ ต่อไป

5.3 การประยุกต์ใช้ลำเจ็ทเพื่อการเจาะหิน

5.3.1 บทนำ

ในปัจจุบันการเจาะอุโมงค์ และการขุดเจาะน้ำมันส่วนใหญ่จะใช้ส่วนขนาดใหญ่ โดยการหมุนของหัวเจาะ ซึ่งที่ส่วนปลายของหัวเจาะทำจากวัสดุที่มีความแข็งพิเศษ [44] ในระหว่างการเจาะ หัวเจาะจะสัมผัสโดยตรงกับชั้นหินแต่ละชั้น ซึ่งจะทำให้หัวเจาะเกิดความร้อนสะสมจากการเสียดสี ซึ่งความร้อนนี้จะทำให้ค่าความแข็งของหัวเจาะลดลง และเกิดการสึกหรอขึ้น ซึ่งหัวเจาะจะต้องได้รับการเปลี่ยน หรือการซ่อมแซมตรงส่วนที่สึกหรอนั้น ซึ่งจะใช้เวลาพอสมควรในการซ่อมแซม หรือการเปลี่ยนหัวเจาะที่ชำรุดนั้น รวมไปถึงมีค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนหัวเจาะนี้ด้วย จะเห็นได้ว่าการเจาะโดยใช้หัวเจาะแบบหมุนยังมีข้อเสียต่างๆ ที่เกิดขึ้น ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นเทคโนโลยีใหม่ที่ใช้ลำเจ็ทในการเจาะหินขึ้น โดยในปี 2009 Ohtani และคณะ [44] ได้ใช้เลเซอร์ HO:YAG เน้นยวณน้ำเพื่อให้เกิดเป็นลำเจ็ท แล้วลำเจ็ทที่สร้างขึ้นนี้ศึกษาการเจาะหินปูน จากการศึกษพบว่าลำเจ็ทสามารถเจาะหินปูนหนา 2 mm ได้ ต่อมาในปี 2014 Sevda และคณะ [71] ศึกษาการเสียหายของหินจากการใช้ลำเจ็ทเจาะ โดยในการศึกษา ลำเจ็ทจะถูกผลิตโดยใช้เครื่อง High pressure pume ทำการอัดน้ำที่ 80 MPa ก่อนที่จะปล่อยน้ำที่มีความดัน 80 MPa นั้นเข้าไปภายในหัวฉีดเกิดเป็นลำเจ็ทขึ้น ลำเจ็ทจะถูกตัดให้เป็น Pulse โดยใช้การหมุนของ Slot disk ที่อยู่ด้านหน้าของหัวฉีด ทำให้ลำเจ็ทเกิดเป็น Pulse ที่มีความถี่ และความยาวของลำเจ็ทต่างๆ ตามการหมุนของ Slot disk จากการศึกษพบว่า ความเสียหายของหินจะขึ้นอยู่กับความถี่ และความยาวของลำเจ็ท แต่ถ้าพิจารณาเมื่อ Slot disk ถูกใช้เป็นระยะเวลานานๆ ซึ่งจะเกิดความเสียหายขึ้นที่ Slot disk ได้ ต่อมาในปี 2016 Zhenguo และคณะ [85] ศึกษาการเสียหายของหินโดยใช้ลำเจ็ทที่ผลิตจาก Supercritical CO₂ โดยในการผลิตลำเจ็ท Supercritical CO₂ จะทำการเพิ่มความดัน และอุณหภูมิให้กับ CO₂ จนกระทั่ง CO₂ อยู่ในสถานะ Supercritical CO₂ หลังจากนั้น Supercritical CO₂ จะถูกปล่อยเข้าสู่หัวฉีดกลายเป็นลำเจ็ท Supercritical CO₂ จะเห็นได้ว่ากระบวนการในการผลิตลำเจ็ท Supercritical CO₂ มีความซับซ้อน ระบบมีขนาดใหญ่ และอุปกรณ์มีราคาค่อนข้างสูง จากที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นในการศึกษาจากเจาะหินโดยใช้ลำเจ็ทได้ทำการศึกษาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในส่วนของต้นกำลังที่ใช้ในการผลิตลำเจ็ทซึ่งมีความแตกต่างกัน ซึ่งในแต่ละต้นกำลังยังมีข้อเสียอยู่ ดังนั้นในการศึกษานี้จึงได้ศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับการเจาะหินโดยใช้ลำเจ็ทที่ถูกผลิตโดยใช้ชูตขับจากแม่เหล็กไฟฟ้า และใช้หลักการ Momentum exchange method (MEM) ในการผลิตลำเจ็ท

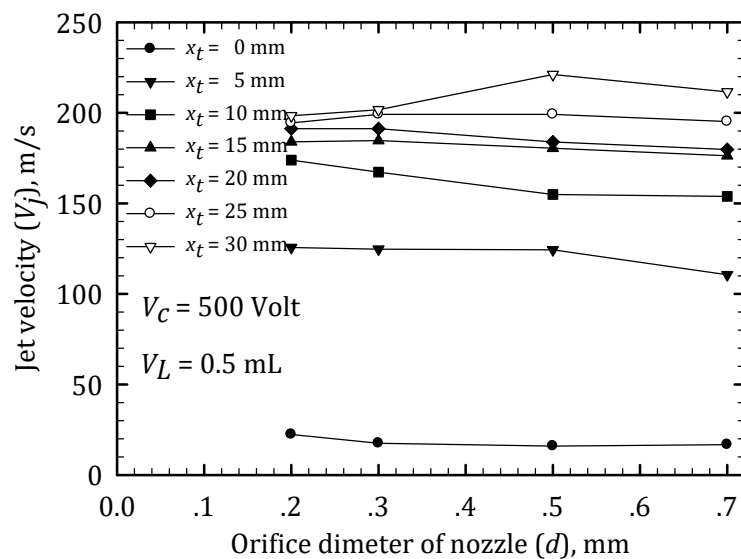
5.3.2 Sandstone properties

ในการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ลำเจ็ทในการเจาะหิน โดยในการทดลองได้เลือกใช้หินทรายที่มีค่า Compression strength เท่ากับ 48.43 Mpa จากการทดสอบโดยใช้เครื่อง 50 ton micro computer universal testers CY-6040A1 ค่าต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติของหินทราย

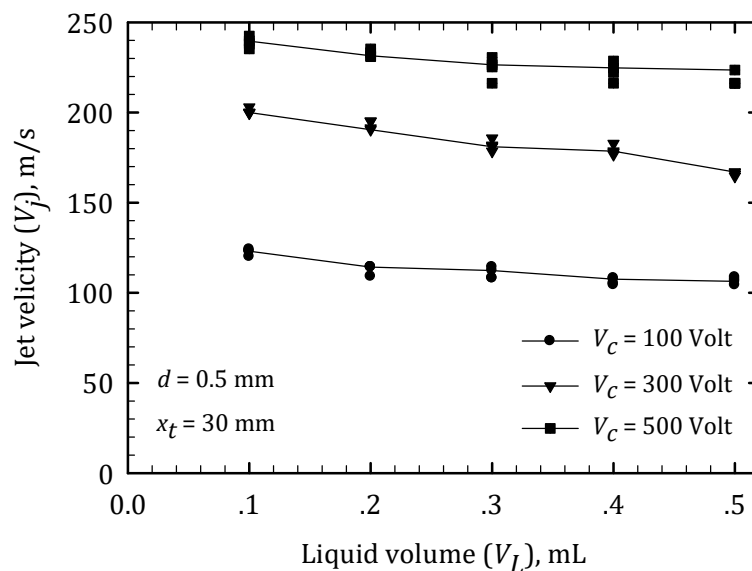
Detail	Sandstone property	
	Value	Unit
Diameter	51.38	mm
Length	84.14	mm
Cross section area	20.74×10^{-4}	m ²
Mass	415.00	kg
Volume	17.45×10^{-5}	m ³
Density	2.38×10^3	kg/m ³
Compression force	10.24×10^3	kgf
Elastic modulus	1.31×10^3	MPa
Compression strength	48.43	MPa

5.3.3 Results and discussions



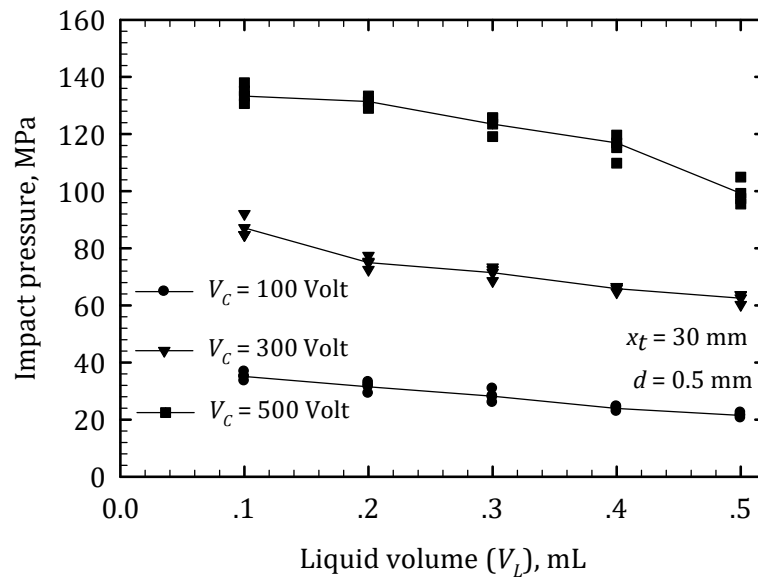
รูปที่ 5.16 อิทธิพลของขนาดรูหัวฉีด และระยะ travelling distance ต่อความเร็วของลำเจ็ทที่ ปริมาตร 0.5 mL และแรงดันไฟฟ้า 500 V

รูปที่ 5.16 แสดงอิทธิพลของขนาดรูหัวฉีด และระยะ Travelling distance ต่อ ความเร็วของลำเจ็ท โดยในการทดลองลำเจ็ทจะถูกผลิตโดยใช้เงื่อนไขคือระยะ travelling distance มีค่าเท่ากับ 0 – 30 mm ขนาดรูหัวฉีดเท่ากับ 0.2, 0.3, 0.5, และ 0.7 mm ปริมาตรของลำเจ็ทเท่ากับ 0.5 mL และแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุเท่ากับ 500 V จากการศึกษาพบว่า ความเร็วของลำเจ็ทเพิ่มขึ้นเมื่อระยะ Travelling distance เพิ่มขึ้นในทุกขนาดของรูหัวฉีด เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของ Momentum จากการเคลื่อนที่ของขดลวดทองแดง อย่างไรก็ตามขนาดของรูหัวฉีดไม่มีนัยสำคัญกับการเปลี่ยนแปลงความเร็วของลำเจ็ท ความเร็วของลำเจ็ทมีค่าสูงสุดเท่ากับ 221.20 m/s ที่ขนาดรูหัวฉีด 0.5 mm ระยะ Travelling distance เท่ากับ 30 mm ดังนั้นจึงเลือกใช้ขนาดรูหัวฉีด และระยะ Travelling distance ดังกล่าวในการผลิตลำเจ็ทเพื่อศึกษาการเจาะหินต่อไป



รูปที่ 5.17 อิทธิพลของปริมาตรต่อความเร็วของลำเจ็ท ที่แรงดันไฟฟ้า 100 V, 300 V และ 500 V

รูปที่ 5.17 แสดงอิทธิพลของปริมาตรต่อความเร็วของลำเจ็ท ที่แรงดันไฟฟ้า 100 V, 300 V และ 500 V จากการศึกษาพบว่า ความเร็วของลำเจ็ทมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาตรของลำเจ็ทเพิ่มขึ้นในทุกๆ แรงดันไฟฟ้า เนื่องจากเกิดความดันย้อนกลับขึ้นที่ภายในหัวฉีด เมื่อพิจารณาให้ของเหลวนั้นสามารถอัดตัวดังที่กล่าวไว้ข้างต้น เมื่อพิจารณาที่ปริมาตรเดียวกันพบว่า ความเร็วของลำเจ็ทมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของแหล่งพลังงานที่ใช้ในการผลิตลำเจ็ท ถ้ามีพลังงานไฟฟ้ามาก ขดลวดทองแดงจะสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามากตามไปด้วย ซึ่งทำให้ขดลวดทองแดงเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่สูงขึ้นจากการศึกษานี้พบว่าความเร็วของลำเจ็ทมีค่าสูงสุดเท่ากับ 239.57 m/s ที่แรงดันไฟฟ้า 500 V ปริมาตร 0.1 mL และระยะ Travelling distance เท่ากับ 30 mm

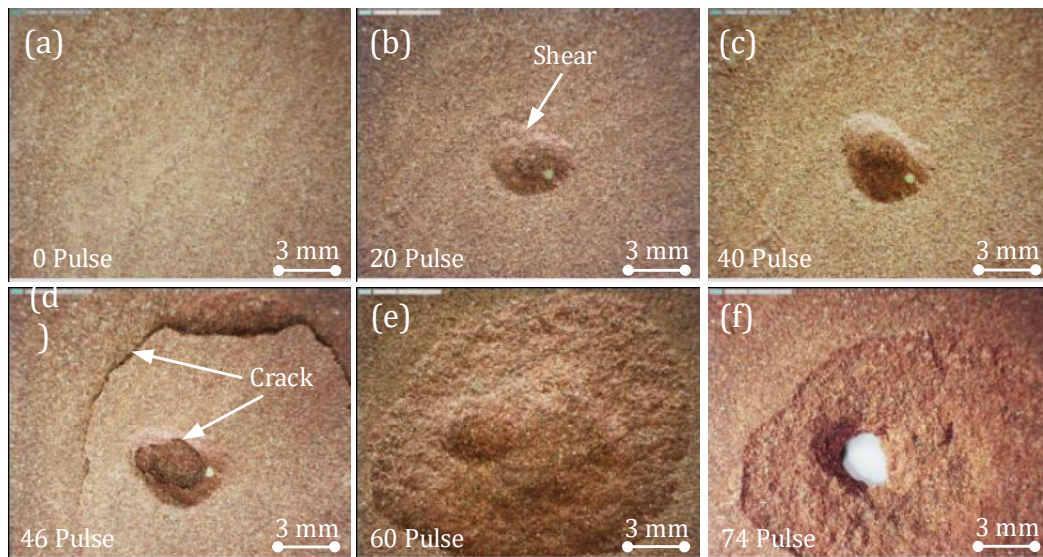


รูปที่ 5.18 อิทธิพลของปริมาตรต่อความดันกระแทกของลำเจ็ท ที่แรงดันไฟฟ้า 100 V, 300 V และ 500 V

รูปที่ 5.18 อิทธิพลของปริมาตรต่อความดันกระแทกของลำเจ็ท ที่แรงดันไฟฟ้า 100, 300 และ 500 V จากการศึกษพบว่า ความดันกระแทกมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาตรเพิ่มขึ้นในทุกๆ แรงดันไฟฟ้า เนื่องจากความเร็วของลำเจ็ทลดลงดังแสดงในรูปที่ 5.17 เมื่อพิจารณาที่ปริมาตรเดียวกันพบว่า ความดันกระแทกเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้น โดยความดันกระแทกมีค่าสูงสุดเท่ากับ 133.27 Mpa ที่แรงดันไฟฟ้า 500 V ปริมาตร 0.1 mL และระยะ Travelling distance เท่ากับ 30 mm

ในการศึกษาการเจาะหินจะใช้เงื่อนไขในการผลิตลำเจ็ทคือ ขนาดรูหัวฉีด 0.5 mm ระยะ Travelling distance เท่ากับ 30 mm แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุเท่ากับ 500 V และปริมาตรของลำเจ็ทเท่ากับ 0.1 mL เนื่องจากเงื่อนไขในการผลิตลำเจ็ทนี้สามารถผลิตลำเจ็ทที่มีความเร็ว และความดันกระแทกสูงที่สุดดังแสดงในรูปที่ 5.17 และรูปที่ 5.18 ตามลำดับ

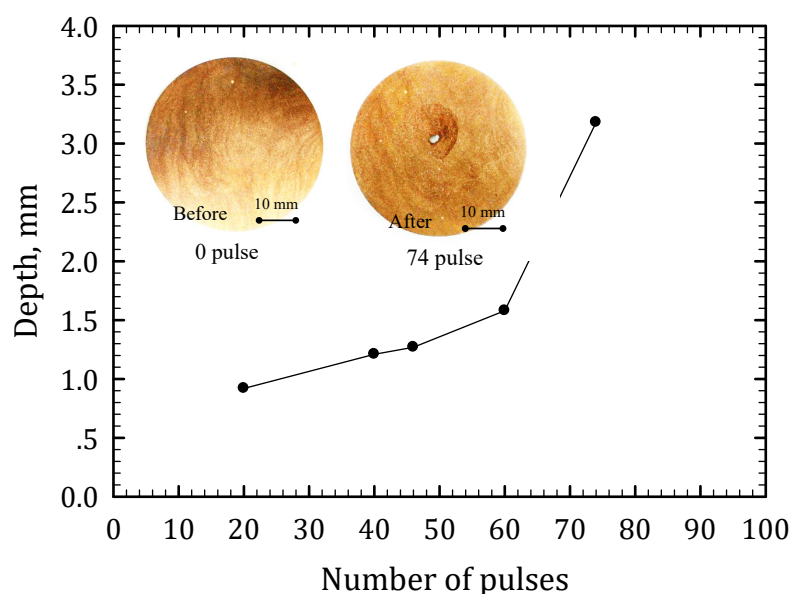
ในการศึกษาหินทรายที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 51.38 mm และมีความหนาเท่ากับ 3.18 mm ซึ่งจะถูกติดตั้งห่างจากส่วนปลายของหัวฉีดเท่ากับ 1 mm ในการพิจารณาความเสียหายที่เกิดขึ้นกับพื้นผิวของหินทรายจะถูกนำมาตรวจสอบหลังการเจาะทุกๆ 20 Pulses โดยใช้กล้อง microscope กำลังขยาย 30 เท่า



รูปที่ 5.19 การเสียหายของหินทราย

รูปที่ 5.19 แสดงการเสียหายของหินทรายที่เกิดจากการใช้ลำเจ็ทเจาะ โดยใช้กล้อง microscope พิจารณาที่กำลังขยาย 30 เท่า จากการศึกษพบว่า ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับหินทราย มี 2 รูปแบบคือ 1) การเสียหายแบบแตกหัก (Tensile) และ 2) การเสียหายแบบเฉือน (Shear) โดย การเสียหายแบบเฉือน (Shear) คือ การหลุดออกของแร่หิน (mineral) ซึ่งเกิดขึ้นรอบๆ บริเวณที่เจาะ ดังแสดงในรูปที่ 5.19(b) และรูปที่ 5.19(c) การเสียหายแบบแตกหัก (Tensile) จะเกิดขึ้นหลังจากที่ เจาะไปแล้วทั้งหมด 46 Pulses ดังแสดงในรูปที่ 5.19(d) โดยที่ลำเจ็ทจะเคลื่อนที่เข้าไปภายในรูเจาะ แล้วไหลแทรกตัวไปตามแร่หินที่อยู่ภายในรูเจาะนั้น ทำให้หินทรายเกิดการแตกหักขึ้นที่จำนวน Pulse เท่ากับ 46 Pulses เมื่อพิจารณาที่จำนวน Pulse เท่ากับ 47 – 60 Pulses พบว่า หินทรายเกิดการเสียหายแบบเฉือนขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5.19(e)

รูปที่ 5.20 แสดงอิทธิพลของจำนวน Pulse ต่อความลึกของหินทรายซึ่งจะสัมพันธ์กับรูปที่ 5.19 จากการศึกษพบว่า ความลึกของหินทรายเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวน Pulse ของลำเจ็ทเพิ่มขึ้น เนื่องจากแร่หินเกิดการหลุดออกในทุกๆ ครั้งที่ลำเจ็ทเจาะ เมื่อพิจารณาที่จำนวน Pulse เท่ากับ 0 – 60 Pulses ดังแสดงในรูปที่ 5.26 พบว่า ความลึกของหินทรายมีแนวโน้มค่อยๆ เพิ่มขึ้น แต่เมื่อ พิจารณาที่จำนวน Pulse เท่ากับ 60 – 74 Pulses พบว่า ความลึกของหินทรายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อย่างรวดเร็ว เนื่องจากในการกระแทกของลำเจ็ทในแต่ละครั้งบนพื้นผิวของหินทราย จะเกิดการสะสม ของความเค้น และความเครียดเกิดขึ้น ซึ่งส่งผลให้เกิดการเสียหายแบบแตกหัก และแบบเฉือนขึ้น โดย ที่จำนวน Pulse ของลำเจ็ทเท่ากับ 74 Pulses สามารถทำให้หินทรายหนา 3.18 mm เกิดการทะลุได้ ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะนำอุปกรณ์ผลิตลำเจ็ทที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า ที่มีชุดขับเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้ามา ประยุกต์ใช้ในการเจาะหินได้ในอนาคต แต่อย่างไรก็ตามควรศึกษาเพิ่มเติมในด้ายต่างๆ ต่อไป ในอนาคต



รูปที่ 5.20 อิทธิพลของจำนวน Pulse ของลำเจ็ทต่อความลึกของหินทราย

5.3.4 สรุปผลการศึกษา

ในการศึกษานี้ลำเจ็ทได้ถูกผลิตขึ้นโดยใช้อุปกรณ์ผลิตลำเจ็ทที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า ที่มีแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นตัวขับ จากการศึกษาพบว่า ความเร็ว และความดันกระแทกของลำเจ็ท ซึ่งถูกวัดโดยใช้วิธี by Laser beam interruption method และ PVDF pressure sensor ตามลำดับพบว่า ความเร็ว และความดันกระแทกของลำเจ็ทเพิ่มขึ้นเมื่อระยะ Travelling distance และแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาตรลดลง ความเร็ว และความดันกระแทกของลำเจ็ทมีค่าสูงสุดเท่ากับ 239.57 m/s และ 133.26 MPa ตามลำดับ ที่เงื่อนไขในการผลิตลำเจ็ทคือ ขนาดรูหัวฉีด 0.5 mm Travelling distance เท่ากับ 30 mm แรงดันไฟฟ้า 500 V และปริมาตร 0.1 mL ซึ่งเงื่อนไขนี้ถูกใช้เป็นเงื่อนไขในการผลิตลำเจ็ทเพื่อการเจาะหิน จากการศึกษาการใช้ลำเจ็ทในการเจาะหินทรายพบว่า ความลึกของหินทรายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวน Pulse ของลำเจ็ทเพิ่มขึ้น หินทรายเกิดความเสียหายแบบแตกหัก และแบบเฉือนขึ้นที่บริเวณรูที่ถูกลำเจ็ทเจาะ ที่จำนวน Pulse เท่ากับ 74 Pulses สามารถทำให้หินทรายหนา 3.18 mm เกิดการทะลุได้ ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะนำอุปกรณ์ผลิตลำเจ็ทที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า ที่มีชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้ในการเจาะหินได้ในอนาคต แต่อย่างไรก็ตามควรศึกษาเพิ่มเติมในด้ายต่างๆ ต่อไปในอนาคต

บทที่ 6

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาความเร็ว ความดันกระแทก และพฤติกรรมของลำเจ็ท Newtonian และ Non-Newtonian ในอากาศและในน้ำ รวมถึงการประยุกต์ใช้ลำเจ็ทในการส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็ม การเจาะกระดูกและการเจาะหิน สามารถสรุปได้ ดังนี้

6.1.1 เมื่อพิจารณาที่ทุกลำเจ็ท Newtonian และทุกระยะห่างจากหัวฉีด (Stand-off distance) พบว่า ลำเจ็ทที่ฉีดในอากาศจะมีความดันกระแทกสูงกว่าเมื่อฉีดในน้ำ เนื่องจาก แรงต้านทานของน้ำ (Hydrodynamic drag) จะมีค่าสูงกว่าแรงต้านทางพลศาสตร์ (Aerodynamic drag)

6.1.2 ในกรณีฉีดลำเจ็ท Newtonian ในอากาศ พบว่า เมื่อระยะห่างจากหัวฉีด (Stand-off distance) มากขึ้น ความดันกระแทกของลำเจ็ทจะมีค่าลดลง โดยความดันกระแทกที่ระยะ 10 mm จะมีความดันกระแทกสูงสุดทุกลำเจ็ท และเมื่อฉีดลำเจ็ทในน้ำ พบว่า ความดันกระแทกจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างจากหัวฉีดเพิ่มขึ้นในช่วงระยะ 10 ถึง 20 mm และความดันกระแทกจะมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างจากหัวฉีด (Stand-off distance) เพิ่มขึ้นในช่วงระยะ 20 ถึง 50 mm โดยความดันกระแทกของลำเจ็ทจะมีค่าสูงสุดที่ระยะ 20 mm ทุกลำเจ็ท

6.1.3 ลำเจ็ทน้ำจะมีความดันกระแทกสูงสุดเมื่อฉีดในอากาศโดยมีค่าเท่ากับ 699.55 MPa ที่ระยะห่างจากหัวฉีด (Stand-off distance) 10 mm แต่เมื่อฉีดในน้ำลำเจ็ทน้ำมันดีเซลมีความดันกระแทกสูงที่สุดโดยมีค่าเท่ากับ 674.50 MPa ที่ระยะห่างจากหัวฉีด 20 mm และลำเจ็ทน้ำมันแก๊สโซลีนจะมีความดันกระแทกต่ำที่สุดทั้งกรณีฉีดในอากาศและในน้ำโดยมีค่าเท่ากับ 232.32 MPa และ 123.26 MPa ตามลำดับ ที่ระยะห่างจากหัวฉีด 50 mm โดยคุณสมบัติทางกายภาพที่มีผลต่อความดันกระแทกคือ ความหนาแน่นและน้ำหนักโมเลกุลของของเหลว

6.1.4 ความเร็วของลำเจ็ทในอากาศและในน้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการเคลื่อนที่ของลำเจ็ท Non-Newtonian เพิ่มขึ้น และความดันกระแทกในอากาศจะมีค่าเพิ่มขึ้นแล้วลดลงเมื่อระยะห่างจากหัวฉีดเพิ่มขึ้น

6.1.5 ความดันกระแทกของลำเจ็ท Non-Newtonian จะมีค่าเพิ่มขึ้นแล้วลดลงเมื่อระยะห่างจากหัวฉีด (Stand-off distance) มีค่าเพิ่มขึ้น โดยความดันกระแทกของลำเจ็ทยาสีฟันมีสูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 127.61 MPa และ 85.36 MPa ที่ระยะห่างจากหัวฉีดเท่ากับ 20 mm เมื่อฉีดในอากาศและในน้ำ ตามลำดับ

6.1.6 พฤติกรรมของลำเจ็ท Non-Newtonian ทั้ง 4 ชนิดในอากาศจะเกิดการแตกตัวเป็นละอองมากขึ้นเมื่อระยะเวลาในการเคลื่อนที่ของลำเจ็ท Non-Newtonian เพิ่มขึ้น

6.1.7 พฤติกรรมของลำเจ็ท Non-Newtonian ทั้ง 4 ชนิดในน้ำจะเกิดการขยายตัวเพิ่มขึ้นหลังจากที่ลำเจ็ทเคลื่อนที่ออกจากหัวฉีด จากนั้นจะเริ่มเกิดการยุบตัว และสลายตัวหายไป

6.1.8 การประยุกต์ใช้ลำเจ็ทในการส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็ม พบว่า ปริมาตรของเหลวมีผลกับการแพร่กระจายของลำเจ็ทในเนื้อเยื่อจำลอง Polyacrylamide gel โดยมีลักษณะการแพร่กระจายคล้ายคลึงกันกับอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มที่วางขายทั่วไปพบว่า ดังนั้น ชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้ามีศักยภาพในการประยุกต์ใช้ในการส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มได้

6.1.9 การประยุกต์ใช้ลำเจ็ทในการเจาะกระดูก พบว่า สามารถเจาะกระดูกได้ความลึกสูงสุดเท่ากับ 5.52 mm ที่จำนวน pulse เท่ากับ 80 pulses อัตราส่วนความลึกต่อปริมาตร (DPV) มีค่าเท่ากับ 0.113 mm/mL ดังนั้น ชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้ามีศักยภาพในการประยุกต์ใช้ในการเจาะกระดูกได้

6.1.10 การประยุกต์ใช้ลำเจ็ทในการเจาะหิน พบว่า เมื่อจำนวน Pulse ของลำเจ็ทเพิ่มขึ้นจะทำให้ความลึกของหินทรายเพิ่มขึ้น โดยหินได้เกิดความเสียหายแบบ Shear และ Tensile ขึ้นที่รูเจาะ และเมื่อทำการเจาะทั้งหมด 74 Pulses อุปกรณ์ผลิตลำเจ็ทที่ใช้ชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถทำให้หินทรายหนา 3.18 mm เกิดการทะลุได้ ชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้ามีศักยภาพในการประยุกต์ใช้ในการเจาะหินได้

6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 ควรศึกษาคุณสมบัติของสาร Non-Newtonian อย่างละเอียดเพิ่มเติม

6.2.2 ควรศึกษาการฉีดยาในเนื้อสัตว์ และสัตว์ทดลองที่มีชีวิต ตามลำดับ

6.2.3 ควรทำการศึกษาการเจาะหินชนิดอื่นเพิ่มเติม

เอกสารอ้างอิง

- [1] Lesser, M., Field, J. "Studies in shock waves, liquid impact, jets and cavitation". Proc 1st ISSW In: Takayama, K., (ed.), 61–72 (1991)
- [2] Bourne, N.K., Field; J.E. "A high-speed photographic study of cavitation damage". J App Physics 78, 4423-4427 (1995)
- [3] Bowden, F.P., Field, J.E. "The brittle fracture of solids by liquid-impact, by solid impact, and by shock". Proc Royal Soc London 282, 331–352 (1964)
- [4] Reichman, J.M., Cheung, J.B. "An oscillating water jet deep-kerfing technique". Int J Rock mech. Min. Sci. & Geomech. 15, 135-144 (1978)
- [5] Vijay, M.M., Brierley, W.H. "Cutting cleaning and fragmentation of materials with high pressure liquid jets". Proc 1st U.S. water jet conference, 272-288 (1981)
- [6] Kobayashi, R., Arai, T., Yamada, H. "Structure of a high-speed water jet and the damage process of metals in jet cutting technology". JSME Int J Series B 31, 53–57 (1988)
- [7] Shi, H.H., Dear, J.P. "Oblique High-speed liquid-solid impact". JSME Int J Series I 35, (1992)
- [8] Shi, H.H., Field, J.E., Pickles, C.S.J. "High speed liquid impact onto wetted solid surfaces". J Fluids Eng 116, 345-348 (1994)
- [9] Yamauchi, Y., Soyama, H., Adachi, Y., Sato, K., Shindo, T., Oba, R., Oshima, R., Yamabe, M. "Suitable region of high-speed submerged water jets for cutting and peening". JSME Int J Series B 38, 31–38 (1995)
- [10] Lesser, M. "Thirty years of liquid impact research: a tutorial review". Wear 186-187, 28–34 (1995)
- [11] Obara, T., Bourne, N.K., Field, J.E. "Liquid-jet impact on liquid and solid surfaces". Wear 186-187 (2), 388-394 (1995)
- [12] Shi, H.H., Takayama, K., Nagayasu, N. "The Measurement of impact pressure and solid surface response in liquid-solid impact up to hypersonic range". Wear 186-187, 352-359 (1995)
- [13] Nakahira, T., Komori, M., Nishida, N., Tsujimura, K. "A study of shock wave generation around high pressure fuel spray in a diesel engine". Proc 2nd ISSW In: Takayama, K., (ed.), 1271–1276 (1991)
- [14] Shi, H.H., Takayama, K., Onodera, O. "Supersonic diesel fuel injection through a single-hole nozzle in a compact gas gun (part 2)". JSME Int J Series B 37 (3), 509-516 (1994)
- [15] Akiyama, H., Nishimura, H., Ibaraki, Y., Iida, N. "Study of diesel spray combustion and ignition using high-pressure fuel injection and a micro-hole nozzle with a rapid compression machine: improvement of combustion using low cetane number fuel". JSAE Review 19, 319–327 (1998)
- [16] Lee, S., Tanaka, D., Kusaka, J., Daisho, Y. "Effects of diesel fuel characteristics on spray and combustion in a diesel engine". JSAE Review 23 (4), 407-414 (2002)
- [17] Shimotani, K., Oikawa, K., Horada, O. Kagawa, Y. "Characteristics of gasoline in-cylinder direct injection engine". JSAE Review 17 (3), 267-272 (1996)
- [18] Kamura, H., Takada, K. "Development of in-cylinder gasoline direct injection engine". JSAE Review 19 (2), 175-180 (1998)

- [19] Alle, J., Hargrave, G. "Fundamental study of in-nozzle fluid flow and its effect on liquid jet break-up in Gasoline Direct injectors". ILASS Europ 2000, I4.2-I4.5 (2000)
- [20] Lee, K.H., Lee, C.H., Lee, C.S. "An experimental study on the spray behavior and fuel distribution of GDI injectors using the entropy analysis and PIV method". Fuel 83 (7-8), 971-980 (2004)
- [21] Billig, F. S. "Research on supersonic combustion". J Propulsion and Power 9 (4), 499-514 (1993)
- [22] Ferri, A. "Review of problems in application of supersonic combustion". J Royal Aero Soc 68, 575-597 (1964)
- [23] Rubins, P.M. "Review of shock-induced supersonic combustion research and hypersonic applications". J Propulsion and Power 10 (5), 593-601 (1994)
- [24] Adelberg, M. "Breakup rate and penetration of a liquid jet in a gas stream". AIAA J 5 (8), 1408-1415 (1967)
- [25] Catton, I., Hill, D.E., McRae, R.P. "Study of liquid jets penetration in a hypersonic stream". AIAA J 6 (11), 2084-2089 (1968)
- [26] Kolpin, M.A., Horn, K.P., Reichenbach, R.E. "Study of penetration of a liquid injection into a supersonic flow". AIAA J 6 (5), 853-858 (1968)
- [27] Horn, K.P., Reichenbach, R.E. "Further experiments on spreading References 205 of liquids injected into a supersonic flow". AIAA J 7 (2), 358-359 (1969)
- [28] Edelman, R.B., Schmotolocha, S., Slutsky, S. "Combustion of liquid hydrocarbons in a high-speed air stream". AIAA J 9 (7), 1357-1364 (1971)
- [29] Methven, T.J., Fairhead, B. "A correlation between rain erosion of perspex specimens in flight and on a ground rig". Wear 2 (6), 498 (1959)
- [30] Methven, T.J., Fairhead, B. "A correlation between rain erosion of perspex specimens in flight and on ground rig". Wear 3 (6), 485 (1960)
- [31] King, R.B. "Rain erosion IV An assessment of various materials". Wear 4 (4), 328 (1961)
- [32] Springer, G.S. "Erosion by liquid impact". Wiley, New York (1976)
- [33] Adler, W.F., Hooker S.V. "Rain erosion mechanisms in brittle materials". Wear 50 (1), 11-38 (1978)
- [34] Zwaag, V.D., Field, J.E. "Rain erosion damage in brittle materials". Eng Fracture Mech 17 (4), 367-379 (1983)
- [35] Adler, W.F. "Waterdrop impact modeling". Wear 186-187, 341-351 (1995)
- [36] Westmark, C., Lawless, G.W. "A discussion of rain erosion testing at the United States Air Force rain erosion test facility". Wear 186-187 (2), 384-387 (1995)
- [37] Ohki, T., Nakagawa, A., Tominaga, T., Takayama, K. "Experimental application of Pulsed Ho: YAG laser-induced liquid jet as a novel device for rigid neuroendoscope". Laser Surg Med 34, 227 (2004)
- [38] Nakagawa, A., Hirano, T., Komatsu, M., Sato, M., Uenohara, H., Ohgawa, H., Kusada, Y., Shirane, R., Takayama, K., Yoshimoto, T. "Holmium: YAG laser-induced liquid jet knife: possible novel method for dissection". Lasers Surg Med 31, 125 (2002)

- [39] Hirono, T., Uenohara, H., Komatsu, M., Nakagawa, A., Satoh, M., Ohshima, H., Takayama, K., Yoshimoto, T. "Holmium YAG laser-induced liquid jet dissector: A novel prototype device for dissection organs without impairing vessels". *Minim Invas Neurosurg* 46, 121 (2003)
- [40] Giudice, E.L., Campbell, J.D. "Needle-free vaccine delivery". *Advanced Drug Delivery Reviews* 58, 68–89 (2006)
- [41] O'Hagan, D.T., Rappuoli, R. "Novel approaches to pediatric vaccine delivery". *Advanced Drug Delivery Reviews* 58, 29–51 (2006)
- [42] Iwasaki, M. "Application of Water Jet for Drilling Rocks Undersea". *Turbomachinery* 17 (12), 761–767 (1989)
- [43] Soyama, H., Yanauchi, Y., Sato, K., Ikohagi, T., Oba, R., Oshima, R. "High-Speed Observation of Ultrahigh-Speed Submerged Water Jets". *Experimental Thermal and Fluid Science* 12, 411–416 (1996)
- [44] Ohtani, K., Numata, D., Takayama, K., Kobayashi, T., Okatsu, K. "Experimental study of underwater rock drilling using a pulsed Ho: YAG laser-induced jets". *Shock wave* 19, 403–412 (2009)
- [45] คณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. "ฟิสิกส์ 1". กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, (2538)
- [46] Oosthuizen, H.P., Carscallen, E.W. "Compressible fluid flow". USA: McGRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS, (1997)
- [47] Bioject Needle-free Injection Systems. <http://www.bioject.com/> (accessed September 2014)
- [48] Medical International Technologies (MIT Canada), Inc.
<http://www.mitcanada.ca/products/human/jetmbx.html/> (accessed September 2014)
- [49] Stachowiak, J.C., Von Muhlen, M.G., Li, T.H., Jalilian, L., Parekh, S.H., Fletcher, D.A. "Piezoelectric control of needle-free transdermal drug delivery". *J Control Release* 124, 88–97 (2007)
- [50] Matthujak, A., Kasamnimitporn, C., Sittiwong, W., Pianthong, K. "Effects of different liquid properties on the characteristics of impact-generated high-speed liquid jets". *The 2nd International Conference on Mechanical, Industrial, and Manufacturing Technologies 2011 (MIMT 2011)*, Singapore, 26–28 February, paper no. T0301 (2011)
- [51] Rau, G.H., Buttler, R.E., Baretton, G., Schardey, M.H., Schildberg, W.F. "Jet-cutting Supported by High Frequency Current: New Technique for Hepatic Surgery". *WORLD Journal of SURGERY*, (1997)
- [52] Hirono, T., Uenohara, H., Komatsu, M., Nakagawa, A., Satoh, M., Ohshima, H., Takayama, K., Yoshimoto, T. "Holmium YAG laser-induced liquid jet dissector: A novel prototype device for dissection organs without impairing vessels". *Minim Invas Neurosurg* 46, 121 (2003)
- [53] http://www.acp-micron.com/5699_CO2-Schneestrahl-Reinigung.html?lang=1
- [54] Jenkins, C.D. "Erosion of surfaces by liquid drops". *Nature* 176 (4476), 303–304 (1955)
- [55] O'Keefe, J.D., Wrinkle, W.W., Scully, C.N. "Supersonic liquid jets". *Nature* 213, 23–25 (1967)
- [56] Rochester, M.C., Brunton, J.H. "High speed impact of liquid jets on solids". in *The 1st International Symposium on Jet Cutting Technology*, (Coventry, England), A1.1–A1.24 (1972)
- [57] Edney, B.E. "Experimental studies of pulsed water jets". in *The 3rd International Symposium on Jet Cutting Technology*, (Chicago, U.S.A.), B2.11–B2.26 (1976)

- [58] Pater, L.L. "Experiments with a cumulation pulsed jet device". The 7th International Symposium on Jet Cutting Technology, (Ottawa, Canada), 83–90 (1984)
- [59] Shi, H.H. "Study of Hypersonic Liquid Jets". Ph.d. thesis, Tohoku University, (1994)
- [60] Shi, H.H. Itoh, M. "Generation of high-speed liquid jet from a rectangular nozzle". Transaction of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences 41 (134), 195–202 (1998)
- [61] Lin, S.P., Lian, Z.W. "Mechanism of the breakup of liquid jets". AIAA Journal 28 (1), 120–126 (1990)
- [63] Tseng, L.K., Ruff, G.A., Faeth, G.M. "Effects of gas density on the structure of liquid jets in still gases". AIAA Journal 30 (6), 1537–1544 (1992)
- [63] Wu, K.J., Reitz, R.D., Bracco, F.V. "Measurements of drop size at the spray edge near the nozzle in atomizing liquid jets". Physic of Fluids 29 (4), 941–951 (1986)
- [64] Hirano, N., Takayama, K. "Hydrodynamics of droplet impingement on surface". in The 21st International Symposium on Shock Waves (Great Keppel Island, Australia), 5839 (1997)
- [65] Lesser, M. Field, J. "Studies in shock waves, liquid impact, jets and cavitation". in Shock Waves (Proceedings) (K. Takayama, ed.) Springer Verlag 1, (Sendai, Japan), 61–72 (1991)
- [66] Nishida, K., Ochiai, H., Arai, M., Hiroyasu, H. "Characterization of diesel fuel spray by ultrahigh-pressure injection". Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Part B 63 (605) (in Japanese), 344–349 (1997)
- [67] Matthujak, A., Hosseini, S.H.R., Takayama, K., Sun, M., Voinovich, P. "High speed jet formation by impact acceleration method". Shock Waves. 16 (6), 405–419 (2007)
- [68] Nonaka, S., Mizuno, H., Takayama, K. "Measurement of shock stand-off distance for sphere and shock shape over sharp cone". in The 21st International Symposium on Space Technology and Science ISTS 98-d-15 (Omiya, Japan), (1998)
- [69] Pianthong, K., Takayama, K., Milton, B.E., Behnia, M. "Micro two-stage light gas gun performance test and its penetration on a Whipple bumble shield". in The 22nd International Symposium on Shock Waves (Imperial College, London, UK), 1650 (1999)
- [70] Nonaka, S., Takayama, K. "Overview of ballistic range program at Tohoku University". in The 20th AIAA Advance Measurement and Ground Testing Technology Conference (Albuquerque, U.S.A.), AIAA 98–2604 (1998)
- [71] Dehkhoda, S., Hood, M. "The internal failure of rock samples subjected to pulsed water jet impacts". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 66, 91–96 (2014)
- [72] Matthujak, A., Kasamnimitporn, C., Sittiwong, W., Pianthong, K., Takayama, K., Milton, B.E. "Characteristics of impact-driven high-speed liquid jets in water". Shock Waves. 23 (2), 105–114 (2013)
- [73] Rau, H.G., Buttler, E.R., Baretton, G., Schardey, H.M., and Schildberg, F.W. "Jet-cutting Supported by High Frequency Current: New Technique for Hepatic Surgery". WORLD Journal of SURGERY, (1997)
- [74] Den, D.S., Tuijthof, G.J.M. "The influence of water jet diameter and bone structural properties on the efficiency of pure water jet drilling in porcine bone". Mechanical sciences. 5 (2), (2014)
- [75] Baxter, J.R. "Fundamental mechanisms of drug delivery by jet injection: basis for the development of a painless microjet injector". USA: University of California Santa Barbara, (2004)

- [76] Taberner, A., Hogan, N.C. Hunter, I.W. "Needle-free jet injection using real-time controlled linear Lorentz-force actuators". *Medical Engineering & Physics* 34 (9), 1228-1235 (2012)
- [77] Matthujak, A., Hosseini, S.H.R., Takayama, K., Voinovich, P. "High-speed liquid jet formation by impact acceleration method". *Shock wave* 16 (6), 405-419 (2007)
- [78] Shergold, O.A., Fleck, N.A., King, T.S. "The penetration of a soft solid by a liquid jet, with application to the administration of a needle-free injection". *Journal of Biomechanics*. 39 (2), 593–602 (2006)
- [79] MK Global Co., and Mika Medical Co., needle-free jet injection technology. South Korea. <http://www.comfort-in.com> (accessed April 2017)
- [80] Baxter, S.J., Katrencik, J., Mitragotri, S. "Jet injection into polyacrylamide gels: investigation of jet injection mechanics". *Journal of Biomechanics* 37 (8), 1181-1188 (2004)
- [81] Sripanagul, G., Matthujak, A. "Fundamental Study of Electromagnetic Actuated Needle-Free Jet Injection". *Trend in Science and Engineering Research International Conference (TiSERIC) Penang Malaysia*, (2017)
- [82] Dunnen, S.D., Mulder, L., Kerkhoffs, G.M.M.J., Dankelman, J., Tuijthof, G.J.M. "Waterjet drilling in porcine bone: The effect of the nozzle diameter and bone architecture on the hole dimensions". *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 27, 84-93 (2013)
- [83] Dunnen S.D., Tuijthof, G.J.M. "The influence of water jet diameter and bone structural properties on the efficiency of pure water jet drilling". in porcine bone *Mechanical Sciences* 5, 53-58 (2014)
- [84] Dunnen, S.D., Dankelman, J., Kerkhoffs, G.M.M.J., Tuijthof, G.J.M. "How do jet time, pressure and bone volume fraction influence the drilling depth when water jet drilling". in porcine bone *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 62, 495-503 (2016)
- [85] Zhenguo, H., Gensheng, L., Shouceng, T., Haizhu, W., Jingbin, L. "SEM analysis on rock failure mechanism by supercritical CO₂ jet impingement". *Journal of Petroleum Science and Engineering* 146, 111–120 (2016)

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก รูปการทดลอง



รูปที่ ก.1 Horizontal single stage gas gun



รูปที่ ก.2 กระสุนปืน



รูปที่ ก.3 เลเซอร์



รูปที่ ก.4 ตัวรับสัญญาณเลเซอร์



รูปที่ ก.5 ออสซิลโลสโคป รุ่น GWINSTER GDS 2102



รูปที่ ก.6 ปั๊มลมโรตารี PUMA รุ่น XM-2525 Puma 3Hp ขนาดถังลม 260x700 แรงอัด 8 bar แรงลม 260 L/min



รูปที่ ก.7 เครื่องชั่งดิจิตอล รุ่น GPS-3001 พิกัดกำลัง 3000 g ความละเอียด 0.1 g



รูปที่ ก.8 หัวฉีด



รูปที่ ก.9 ภาพ PVDF Pressure sensor



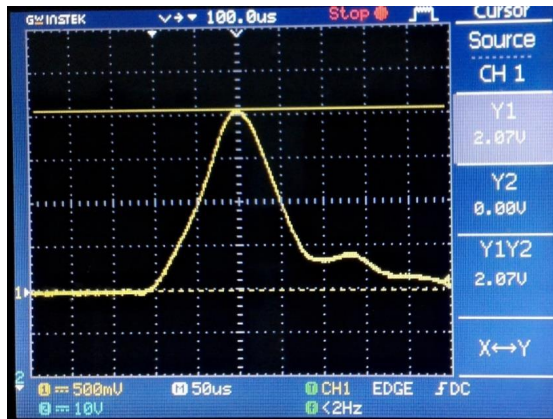
รูปที่ ก.10 ภาพลูกตุ้ม



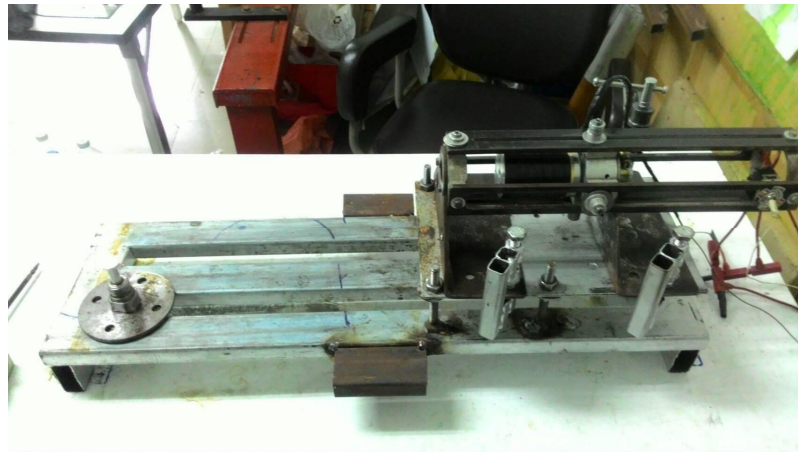
รูปที่ ก.11 การปล่อยลูกตุ้มแบบอิสระ



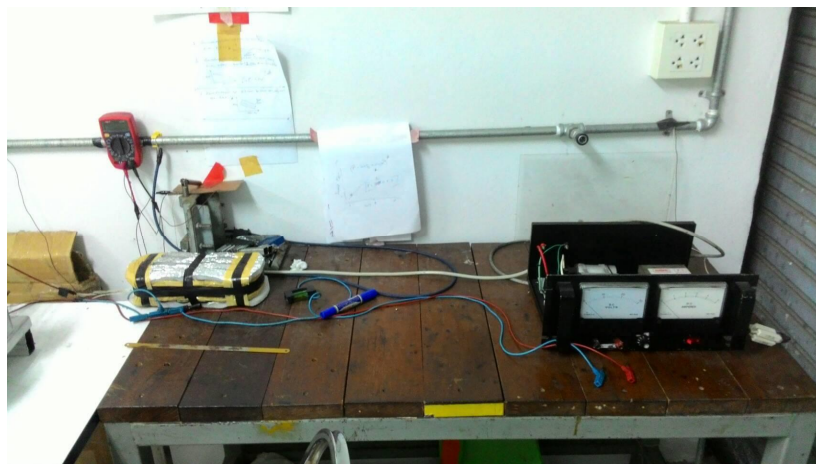
รูปที่ ก.12 สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จาก Digital Oscilloscope ในการวัดความเร็วของลำพุ่ง



รูปที่ ก.13 สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จาก Digital Oscilloscope ในการวัดความดันกระแทกของลำพุ่ง



รูปที่ ก.14 ชุดผลิตลำเจ็ทที่ใช้ต้นกำลังจากแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ ก.15 ชุดจ่ายไฟฟ้า



รูปที่ ก.16 การเตรียมเนื้อหมูก่อนทำการทดลอง



รูปที่ ก.17 การส่งถ่ายยาโดยใช้อุปกรณ์ยี่ห้อ Comfort in



รูปที่ ก.18 ทำการถ่ายภาพเพื่อทำการวัดอิทธิพลต่างๆ

ภาคผนวก ข
ผลสำเร็จจากการดำเนินโครงการ

ผลสำเร็จจากการดำเนินโครงการ

1. รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์

1.1 กิตติพงษ์ ศรีพนากุล และ อนิรุตต์ มัทธูจักษ์, “สมรรถนะของชุดขับโดยใช้แม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อการส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็ม” ,การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 29, นครราชสีมา, 1 – 3 กรกฎาคม, 2558; Paper no AME-06

1.2 อนิรุตต์ มัทธูจักษ์, กิตติพงษ์ ศรีพนากุล, ธมลพรรณ ไพเราะ และ นิภาพร ประหยัดทรัพย์, “การแพร่กระจายของยาใน Polyacrylamide gel โดยการฉีดยาแบบไม่ใช้เข็มที่ใช้ชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้า” , การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 31, นครนายก, 4 – 7 กรกฎาคม, 2560, TSF12

1.3 อนิรุตต์ มัทธูจักษ์, กิตติพงษ์ ศรีพนากุล, อุดมการณ์ วิเศษสัตย์, สหราช คาดหมาย และ สุริยง แผลงงาม, “การประยุกต์ใช้ลำเจ็ทน้ำที่ผลิตจากชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อการเจาะกระดูก,” การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 32, มุกดาหาร, 3 – 6 กรกฎาคม, 2561, BME-008

1.4 G. Sripanagul and A. Matthujak, “Fundamental Study of Electromagnetic Actuated Needle-Free Jet Injection,” International Journal of Engineering & Technology, Volume 7, Pages 145-148, 2018.

2.รางวัล

2.1 The best paper award in Thermal System and Fluid Mechanics session, Proceedings of the 31st Annual conference of Mechanical Engineering Network, Nakhon Nayok, Thailand, July 4-7, 2017.

2.2 The best paper award in Thermal System and Fluid Mechanics session, Proceedings of the 32nd Annual conference of Mechanical Engineering Network, Mukdahan, Thailand, July 3-6, 2018.

3. บทความที่กำลังดำเนินการ

3.1 G. Sripanagul and A. Matthujak, “Experimental Study of Stone Drilling using Water Jet Generated by Electromagnetic Actuator,” Fluid dynamic research

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

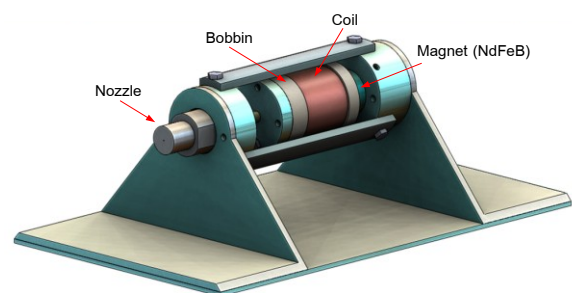
การผลิตลำเจ็ท ซึ่งข้อดีของชุดขับนี้ คือ ความเร็วของลำเจ็ทจะคงที่ตลอดอายุการใช้งาน และยังสามารถควบคุมความเร็วของลำเจ็ท ได้อีกด้วย โดยในการออกแบบ ชุดขับ จะใช้หลักการ การตัดกันของสนามแม่เหล็ก ระหว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็กถาวร ซึ่งการตัดกันของสนามแม่เหล็กทั้งสอง จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ขึ้น จึงใช้การเคลื่อนที่นี้ไปขับเคลื่อน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

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

2. การทดลอง

2.1 ชุดทดลอง

ในการศึกษานี้ได้ทำการออกแบบ และสร้าง ชุดขับ (Actuator) ที่ใช้ในการผลิตลำเจ็ท ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นสามส่วนสำคัญ ดังนี้

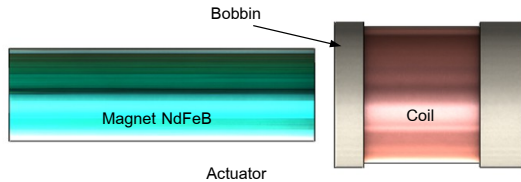


รูปที่ 1 อุปกรณ์ส่งถ่ายยาด้วยลำเจ็ท ที่ใช้ชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้า

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

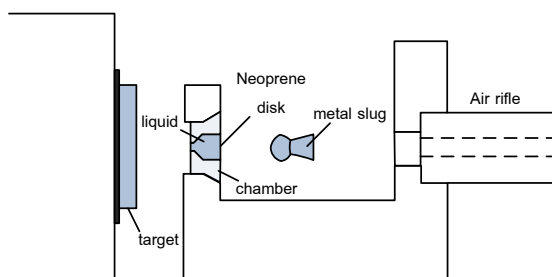
AME-06

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

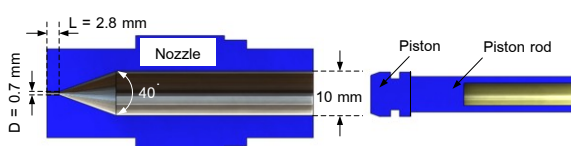


รูปที่ 2 ชุดขับ (Actuator)

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 ดังนั้นจึงได้ใช้ข้อค้นพบนี้ เป็นพื้นฐานในการออกแบบขนาดของหัวฉีด เพื่อใช้ในการศึกษาทางด้านลำเจ็ทความเร็วสูง เรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน [18-21]



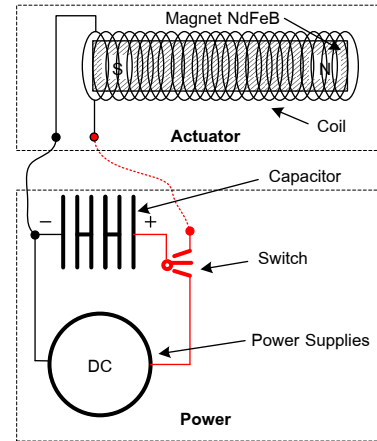
รูปที่ 3 Impact driven method [15, 16]



รูปที่ 4 หัวฉีด หรือส่วนผลิตลำเจ็ท

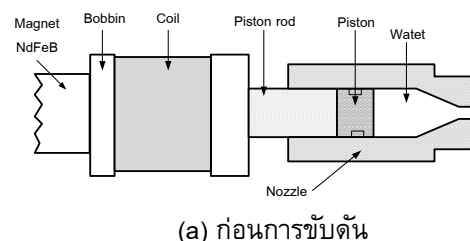
3. ส่วนของต้นกำลัง (Power) ทำหน้าที่ในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับขดลวดทองแดง เพื่อใช้ในการสร้าง

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

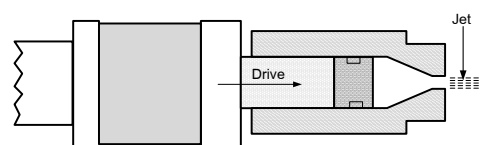


รูปที่ 5 วงจรไฟฟ้าของอุปกรณ์ส่งถ่ายด้วยลำเจ็ทที่ใช้ชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้า

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



(a) ก่อนการขับเคลื่อน

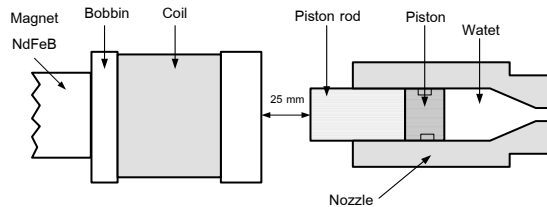


(b) ระหว่างการขับเคลื่อน

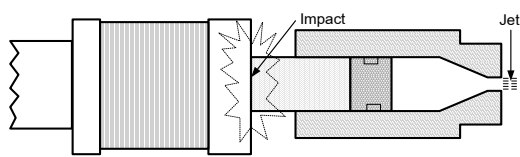
รูปที่ 6 วิธีการผลิตลำเจ็ทแบบขับเคลื่อน (Driving method)

AME-06

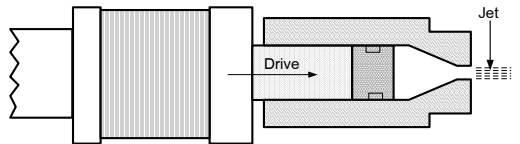
รูปที่ 6 แสดงวิธีการผลิตลำเจ็ทแบบขับเคลื่อน (Driving method) โดยมีหลักการ คือ จะใช้การเคลื่อนที่ของขดลวดทองแดง (Coil) ที่เชื่อมต่อกับก้านของลูกสูบ (Piston rod) ดังแสดงในรูปที่ 5(a) เคลื่อนที่เข้า ขั้วดันของเหลวที่อยู่ภายในหัวฉีด แล้วเกิดเป็นลำเจ็ทขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5(b)



(a) ก่อนการกระแทก



(b) ขณะเกิดการกระแทก



(c) ระหว่างการขับเคลื่อน

รูปที่ 7 วิธีการผลิตลำเจ็ทแบบกระแทก (Impact method)

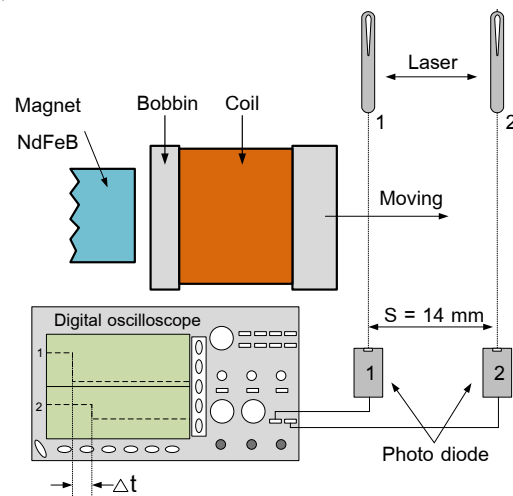
รูปที่ 7 แสดงวิธีการผลิตลำเจ็ทแบบกระแทก (Impact method) โดยมีหลักการ คือ จะใช้การเคลื่อนที่ของขดลวดทองแดง เคลื่อนที่เข้ากระแทกกับก้านของลูกสูบ (Piston rod) โดยมีระยะการกระแทกเท่ากับ 25 mm ดังแสดงในรูปที่ 7(a) หลังจากเกิดการกระแทก ดังแสดงในรูปที่ 7(b) ขดลวดทองแดงก็เคลื่อนที่เข้าขั้วดันของเหลวที่อยู่ภายในหัวฉีด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

2.2 การวัดความเร็ว

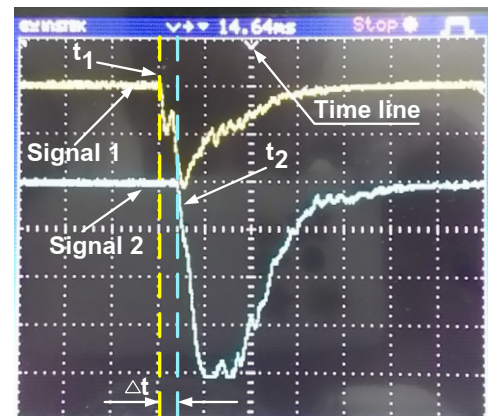
ในการตรวจวัดความเร็วของขดลวดที่เคลื่อนที่ และความเร็วของลำเจ็ทจะใช้วิธี Laser beam interruption ดังแสดงในรูปที่ 8(a) โดยจะใช้การเคลื่อนที่ของวัตถุตัดกับแสงเลเซอร์ ซึ่งมีเลเซอร์จำนวน 2 ตัว ห่างกัน 14 mm และใช้ Photodiode จำนวน 2 ตัว เป็นอุปกรณ์รับแสงจากแสงเลเซอร์ โดย Photodiode จะเชื่อมต่อกับเครื่อง Digital 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

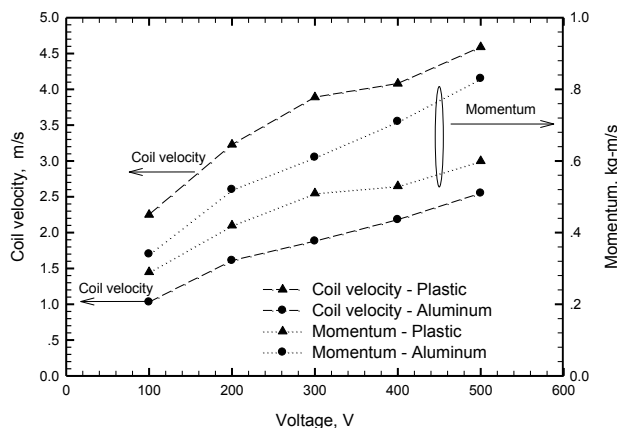
3. ผลการศึกษา

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

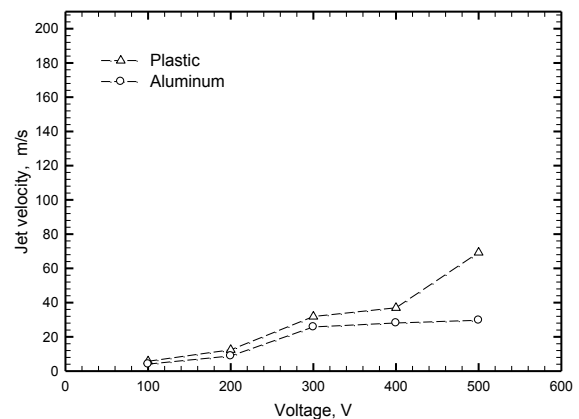
ก็ตาม โดยโมเมนตัมสูงสุดของขดลวดทองแดงที่ใช้แกนอลูมิเนียมและพลาสติกมีค่าเท่ากับ 0.83 kg-m/s และ 0.60 kg-m/s ที่แรงดันไฟฟ้า 500 โวลต์ตามลำดับ

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



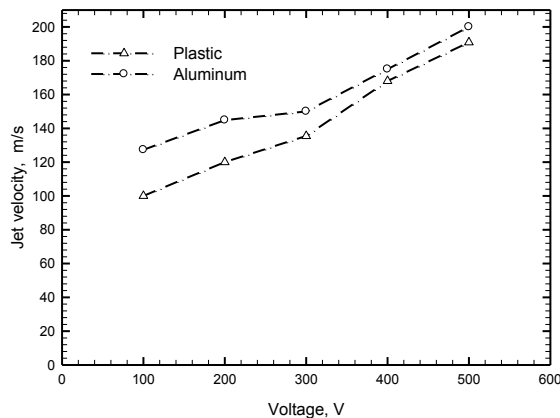
รูปที่ 10 อิทธิพลของแรงดันไฟฟ้าต่อความเร็วของลำเจ็ทของแกนขดลวดที่ทำจากอลูมิเนียมและพลาสติก โดยใช้วิธีแบบขับเคลื่อน

3.2.2 การผลิตลำเจ็ทโดยใช้วิธีแบบกระทบ

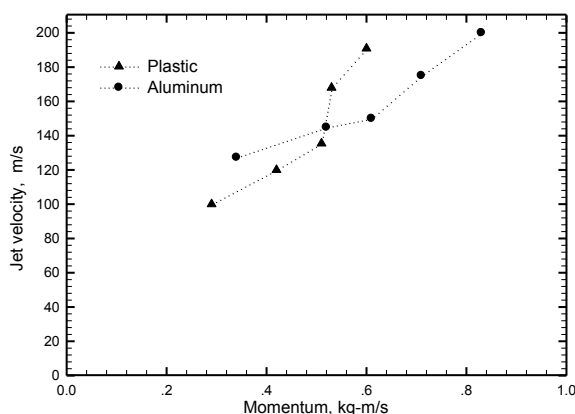
รูปที่ 11 แสดงอิทธิพลของแรงดันไฟฟ้าต่อความเร็วของลำเจ็ท ของแกนขดลวดที่ทำจากอลูมิเนียม และพลาสติก โดยใช้วิธีแบบกระทบ พบว่า เมื่อแรงดันไฟฟ้า (Voltage) เพิ่มขึ้น ทำให้ความเร็วของลำเจ็ท (Jet

AME-06

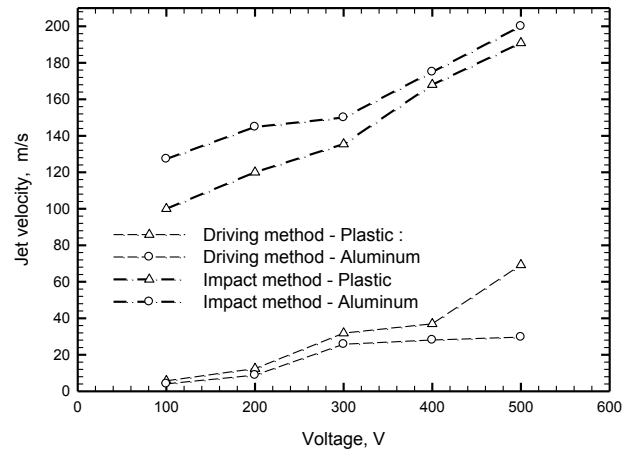
velocity) ของแกนขดลวดที่ทำจากอลูมิเนียมและพลาสติก มีค่าสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาที่แรงดันไฟฟ้าเดียวกัน พบว่า ความเร็วของลำเจ็ทที่ใช้ แกนขดลวดอลูมิเนียมมีความเร็ว สูงกว่าความเร็วของลำเจ็ทที่ใช้ แกนขดลวด พลาสติก เนื่องจากโมเมนตัม (Momentum) ของขดลวดทองแดงที่ ใช้แกนอลูมิเนียมมีค่าสูงกว่าโมเมนตัมของขด ลวดทองแดงที่ใช้แกนพลาสติก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



รูปที่ 11 อิทธิพลของแรงดันไฟฟ้าต่อความเร็วของลำเจ็ท ของแกนขดลวดที่ทำจากอลูมิเนียมและพลาสติก โดยใช้ วิธีแบบกระแทก



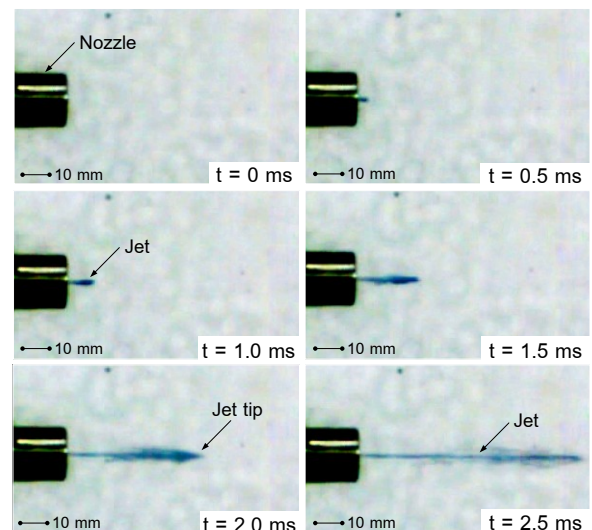
รูปที่ 12 อิทธิพลของโมเมนตัมต่อความเร็วของลำเจ็ท ของแกนขดลวดที่ทำจากอลูมิเนียมและพลาสติก โดยใช้ วิธีแบบกระแทก



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

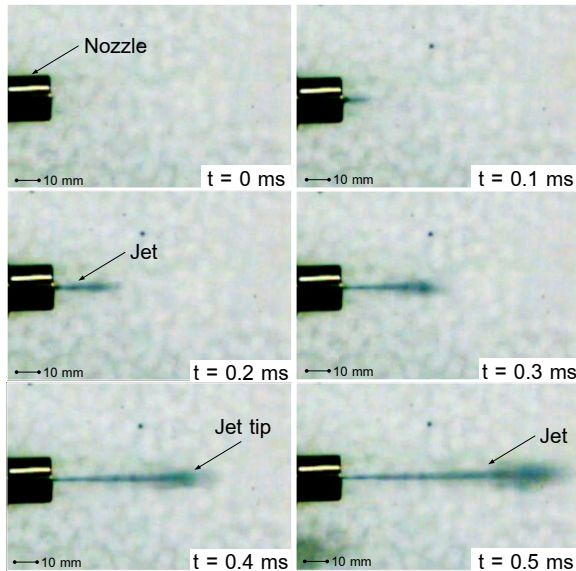


รูปที่ 14 ลักษณะของลำเจ็ทที่ผลิตได้ โดยใช้วิธีแบบขับดัน

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.



การประยุกต์ใช้ลำเจ็ทน้ำที่ผลิตจากชุดขับเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อการเจาะกระดูก Application of water jet generated by electromagnetic actuator for bone drilling

อนิรุต มัทธจักร^{1*}, กิตติพงษ์ ศรีพนากุล¹, อุดมการณ์ วิเศษสัตย์¹, สหราช คาคหมาย¹ และ สุริยง แผลงงาม²

¹ห้องปฏิบัติการการประยุกต์ใช้ลำเจ็ทและการเผาไหม้ (Combustion and Jet Application Research Laboratory, CJARL)

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ตำบลเมืองศรีโค อำเภวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190

E-mail: Anirut.m@ubu.ac.th, Tel: 0-4535-3309

²วิทยาลัยแพทยศาสตร์และการสาธารณสุข มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ตำบลเมืองศรีโค อำเภวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190

E-mail: mdsuripa@mail2.ubu.ac.th, Tel: 0-4535-3900

บทคัดย่อ

ปัจจุบันการศัลยกรรมกระดูกจะใช้สว่านเจาะกระดูกเพื่อใส่สกรูเกลียวยึดกระดูกที่แตกหักนั้นเข้าไว้ด้วยกัน ซึ่งส่วนที่ใช้จะต้องมีความเร็วรอบที่เหมาะสม ถ้าไม่เช่นนั้นเซลล์กระดูกตรงบริเวณนั้นจะเกิดความเสียหายขึ้นได้ ซึ่งจะเป็นปัญหาในการเกิดใหม่ของเซลล์กระดูก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเจาะกระดูกโดยใช้ลำเจ็ท เนื่องจากข้อดีของลำเจ็ทคือ ไม่มีการสร้างความร้อนขึ้นที่กระดูกระหว่างการเจาะ จึงทำให้กระดูกตรงบริเวณนั้นไม่เกิดความเสียหาย ในการศึกษาจะใช้อุปกรณ์ผลิตลำเจ็ทที่ใช้ชุดขับเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้าที่ถูกออกแบบ และสร้างขึ้น โดยอาศัยหลักการ Impact driven method เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาตรของเหลว และจำนวนครั้งที่ใช้ในการเจาะกระดูก ต่อความลึกของกระดูกที่เกิดขึ้นโดยใช้เครื่อง CT Scan (Optima CT600, 0.625 mm of resolution) ในการสังเกต จากการศึกษพบว่า ปริมาตรของลำเจ็ท และจำนวนครั้งที่ใช้ในการเจาะกระดูกมีผลต่อความลึกของกระดูก โดยที่ปริมาตร และจำนวนครั้งที่ใช้ในการเจาะกระดูกเท่ากับ 0.5 mL และจำนวน Pulse เท่ากับ 80 ครั้งสามารถเจาะกระดูกได้ลึกเท่ากับ 4.52 mm และมีอัตราส่วนของความลึกต่อปริมาตรเท่ากับ 0.113 mm/mL ซึ่งมีค่าที่สูงกว่างานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการเจาะกระดูกด้วยลำเจ็ทก่อนหน้านี้ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.045 mm/mL ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าชุดขับเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถประยุกต์ใช้เป็นชุดขับเคลื่อนในการผลิตลำเจ็ทเพื่อการเจาะกระดูกต่อไปได้ในอนาคต

คำหลัก: การเจาะกระดูกด้วยลำเจ็ท, ชุดขับเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า, Impact driven method, อัตราส่วนของความลึกต่อปริมาตร

Abstract

Recently, the orthopedic surgery uses a driller for holes drilling, and then use bolts for connecting the bone. If the drill speed is unsuitable, the bone cells will be damaged. This is a problem for the regeneration of bone cells. Therefore, this research aims to study the bone drilling by water jet. Since the water jet does not generate heat at the bone during bone drilling, the bone cell will not be damaged. This is the advantage of water jet in the orthopedic surgery. In the study, the water jet was generated by electromagnetic actuator, being designed based on impact driven method and manufactured. The effect of liquid volume and number of water jet pulses was investigated by CT Scanner (Optima CT600, 0.625 mm of resolution). From CT Scanner, it was found that the liquid volume and the number of water jet pulses affected on the bone depth. The maximum depth is 4.52 mm at liquid volume of 0.5 mL and 80 pulses. The depth per volume ratio is 0.113 mm/mL which is higher than that of previous research of drilling bone, being 0.045 mm/mL. Therefore, it is possible to apply the electromagnetic actuator of bone drilling in the future.



Keywords: Drilling bone by water jet, Electromagnetic actuator, Impact driven method, Depth per liquid volume ratio.

1. บทนำ

เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่า ในปัจจุบันได้นำองค์ความรู้ทางด้านลำเจ็ทความเร็วสูงมาประยุกต์ใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมไม่ว่าจะเป็น การตัดโลหะด้วยลำเจ็ท (Jet cutting technology) [1] การทำความสะอาดด้วยลำเจ็ท (Material cleaning by jets) การเจาะอุโมงค์ด้วยลำเจ็ท (Mining and tunneling by means of high-speed jet impingements) [2, 3] การฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง (Fuel direct injection) [4, 5] นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้ลำเจ็ทกับงานทางด้านการแพทย์ได้อีกด้วย อาทิเช่น ใช้ลำเจ็ทในการผ่าตัด (Micro jet cutting) [6] ใช้ลำเจ็ทในการทำลายก้อนเลือดที่อุดตันในเส้นเลือด (Blood clot dissolution) [7-9] และการฉีดยาแบบไม่ใช้เข็ม (Needle free jet injection) [10]

ปัจจุบันการศัลยกรรมกระดูกที่เกิดการแตกหัก จะใช้ส่วนเจาะกระดูกเพื่อใส่สลักเกลียวยึดกระดูกที่แตกหักนั้นเข้าไว้ด้วยกัน แพทย์ที่ทำการเจาะกระดูกจะต้องมีความชำนาญ และใช้ความเร็วรอบของสว่านให้เหมาะสม ถ้าไม่เช่นนั้นเซลล์กระดูกตรงบริเวณที่เจาะอาจได้รับความเสียหายได้ เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเสียดสีโดยตรงระหว่างดอกสว่านกับเซลล์กระดูก ซึ่งจะเป็ปัญหาในการเกิดใหม่ของเซลล์กระดูกได้ในอนาคต [11-13] ด้วยเหตุนี้ Tuijthof และคณะ [11-13] จึงได้ศึกษาการประยุกต์ใช้ลำเจ็ทในการเจาะกระดูก เพื่อลดความเสียหายของเซลล์กระดูกลง เนื่องจากการใช้ลำเจ็ทเจาะกระดูกจะไม่มีการสัมผัสโดยตรงระหว่างหัวฉีดกับกระดูก อีกทั้งยังไม่มีความร้อนเกิดขึ้นอีกด้วย โดยในการศึกษาของ Tuijthof ได้ใช้เครื่องทดสอบแรงดึง Tensile test กดอัดของเหลวในกระบอกสูบจนมีความดัน 70 MPa แล้วปล่อยของเหลวนั้นเข้าหัวฉีดที่มีขนาดรูหัวฉีดเท่ากับ 0.6 mm และใช้ระยะเวลาในการเจาะเท่ากับ 5 s จากการศึกษาพบว่า ความลึกของกระดูกมีค่าเท่ากับ 24 mm โดยที่อัตราส่วนของความลึกของกระดูกต่อปริมาตรของลำเจ็ทมีค่าเท่ากับ 0.045 mm/mL [11] ซึ่งจะเห็นได้ว่าจะเกิดของเสียที่เป็นส่วนผสมระหว่างน้ำกับเศษกระดูกที่เกิดขึ้นระหว่างการเจาะ ซึ่งต้องใช้เครื่องดูดของเสียเหล่านั้นออกระหว่างการผ่าตัดด้วย

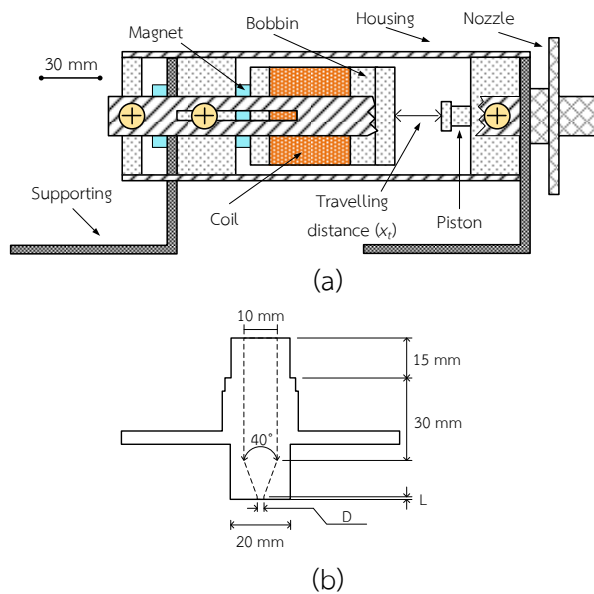
นอกจากนี้เครื่องที่ใช้ในการผลิตลำเจ็ทซึ่งเป็นเครื่องที่ใช้ในการทดสอบค่า Tensile และค่า Compressive strength ของวัสดุ ซึ่งไม่ได้เป็นเครื่องที่ใช้ในการผลิตลำเจ็ทโดยตรง จึงยากต่อการนำมาประยุกต์ใช้งานจริงได้ และที่สำคัญการควบคุมความลึกของกระดูกเป็นไปได้ยาก เนื่องจากลักษณะของลำเจ็ทที่เป็นลำน้ำต่อเนื่องที่มีระยะเวลาฉีด 5 s ซึ่งอาจทำให้รู้ที่เจาะมีความลึกมากเกินความจำเป็น หรืออาจเป็นผลเสียได้ถ้านำไปเจาะกระดูกที่มีความบางมากๆ เช่นกะโหลกศีรษะได้

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการศึกษาเบื้องต้นในการประยุกต์ใช้อุปกรณ์ผลิตลำเจ็ทที่ได้สร้างขึ้นจากการใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า และใช้ชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้าในการผลิตลำเจ็ท ซึ่งลำเจ็ทที่ผลิตได้จะมีลักษณะเป็นแบบ Pulse และใช้กระดูกหมูในส่วนขอโคนขา (Femoral condyles) เป็นกระดูกที่ใช้ในการทดลอง

2. วิธีการทดลอง

2.1 อุปกรณ์ผลิตลำเจ็ทที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า

อุปกรณ์ผลิตลำเจ็ทที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า โดยมีแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นชุดขับในการผลิตลำเจ็ท ซึ่งจะถูกสร้างขึ้นโดยใช้หลักการผลิตลำเจ็ทแบบ Impact driven method [14] ดังแสดงในรูปที่ 1(a) โดยมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญของอุปกรณ์ฯ ได้แก่ ชุดขับ (Actuator) หัวฉีด (Nozzle) และแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power source) โดยชุดขับจะถูกสร้างขึ้นจากแม่เหล็ก Neodymium magnet (NdFeB) และขดลวดทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดทองแดงเท่ากับ 0.32 mm พันรอบแกน (Bobbin) 1,600 รอบ ในส่วนของหัวฉีดที่ทำจากเหล็กกล้าจะใช้ค่า L/D เท่ากับ 4 และมุมกรวยเท่ากับ 40° ดังแสดงในรูปที่ 1(b) เนื่องจากลักษณะของหัวฉีดดังกล่าว สามารถผลิตลำเจ็ทได้ความเร็วสูงสุด [15] และใช้ตัวเก็บประจุขนาด 600 โวลต์ 5,400 μF เป็นตัวเก็บพลังงานไฟฟ้าจากการประจุไฟฟ้าโดยใช้เครื่องประจุไฟฟ้า (Power supply)



รูปที่ 1 (a) อุปกรณ์ผลิตลำเจ็ทที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า โดยมีแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นชุดขับ และ (b) ลักษณะของหัวฉีด

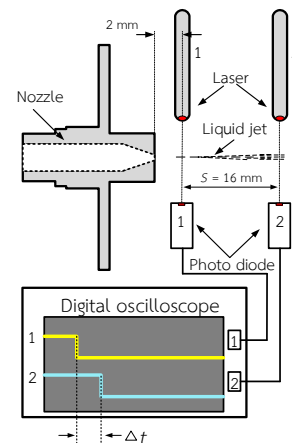
การทำงานของอุปกรณ์ผลิตลำเจ็ทที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า โดยมีแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นชุดขับ เริ่มจากใช้เครื่อง Power supply ทำการประจุไฟฟ้าให้กับตัวเก็บประจุ จนถึงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการ จากนั้นทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าจากตัวเก็บประจุ ให้กับขดลวดทองแดง เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้น ตัดกับสนามแม่เหล็กถาวรของแม่เหล็ก NdFeB จะทำให้ขดลวดทองแดงเกิดการเคลื่อนที่เข้ากระแทกกับ ก้านสูบ (Piston rod) ทำให้ของเหลวที่อยู่ภายในหัวฉีด เคลื่อนที่ผ่านรูหัวฉีดอย่างรวดเร็วเกิดเป็นลำเจ็ทขึ้น โดยในการศึกษานี้จะใช้น้ำเป็นเหลวในการผลิตลำเจ็ท

2.2. การวัดความเร็วของลำเจ็ท

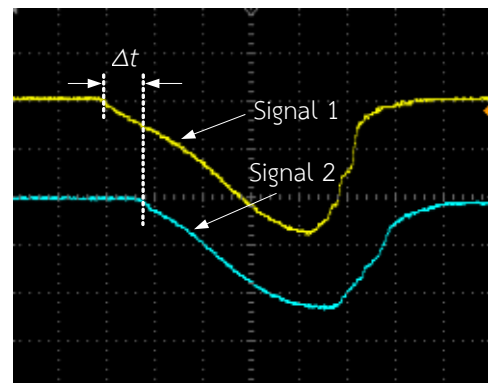
การวัดความเร็วของลำเจ็ทจะใช้วิธี Laser beam interruption ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยใช้หลักการการเคลื่อนที่ของวัตถุตัดกับแสงเลเซอร์ ซึ่งมีเลเซอร์จำนวน 2 ตัว วางห่างกัน 16 mm และใช้ Photodiode จำนวน 2 ตัว เป็นอุปกรณ์รับแสงจากแสงเลเซอร์ และถูกเชื่อมต่อกับเครื่อง Digital oscilloscope ในช่องสัญญาณที่ 1 และ 2 เมื่อวัตถุเคลื่อนที่ตัดกับแสงเลเซอร์ตัวที่ 1 และ 2 จะทำให้เกิดสัญญาณแสดงขึ้นบนหน้าจอของเครื่อง Digital oscilloscope ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งจากสัญญาณสามารถทราบผลต่างของเวลา (Δt) ได้ ดังนั้นจึงสามารถหาความเร็วของวัตถุที่เคลื่อนที่ได้จากสมการที่ 1

$$V_j = \frac{S}{\Delta t} \quad (1)$$

เมื่อ V_j คือ ความเร็วของวัตถุ, m/s
 S คือ ระยะห่างของเลเซอร์, m
 Δt คือ ผลต่างของเวลา, s



รูปที่ 2 Laser beam interruption method

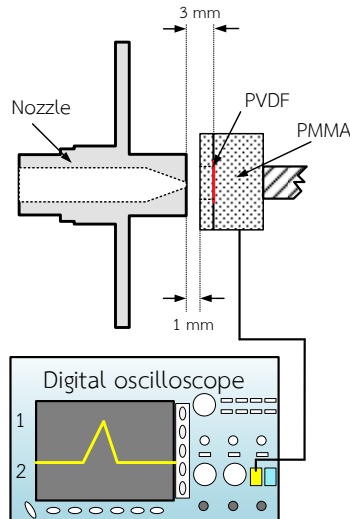


รูปที่ 3 สัญญาณการเคลื่อนที่ของวัตถุที่ตัดแสงเลเซอร์

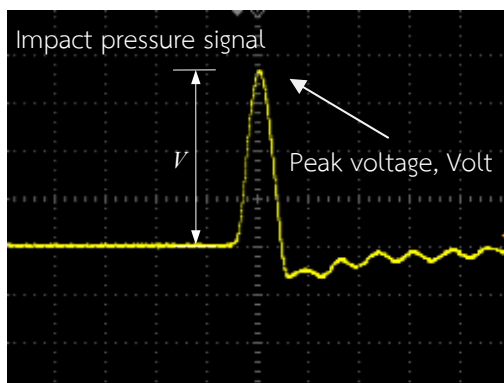
2.3 การวัดความดันกระแทก

การวัดความดันกระแทก จะใช้แผ่น Polyvinylidene Fluoride (PVDF) ขนาดกว้าง 15 mm ยาว 25 mm และหนา 28 μm ติดตั้งไว้บน PMMA ขนาด 45x45 mm^2 และหนา 25 mm ดังแสดงในรูปที่ 4 เมื่อลำเจ็ทเคลื่อนที่เข้ากระแทกกับแผ่น PVDF ที่มีระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่น PVDF (Stand off distance) เท่ากับ 3 mm แผ่น PVDF จะตอบสนองต่อการกระแทกของลำเจ็ท และแสดงสัญญาณจากการกระแทกของลำเจ็ทขึ้นบนหน้าจอของเครื่อง Digital

oscilloscope ในรูปแบบของสัญญาณแรงดันไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 4 การวัดความดันกระแทก



รูปที่ 5 สัญญาณความดันกระแทกของลำเจ็ท

รูปที่ 5 แสดงสัญญาณจากการกระแทกของลำเจ็ทในรูปแบบของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจากสัญญาณนี้สามารถคำนวณความดันกระแทกของลำเจ็ทได้โดยใช้สมการที่ 2 ซึ่งเป็นสมการจากการสอบเทียบแผ่น PVDF โดยใช้หลักการการดล และโมเมนต์ [16]

$$P = 35.268V_e + 7.8274 \quad (2)$$

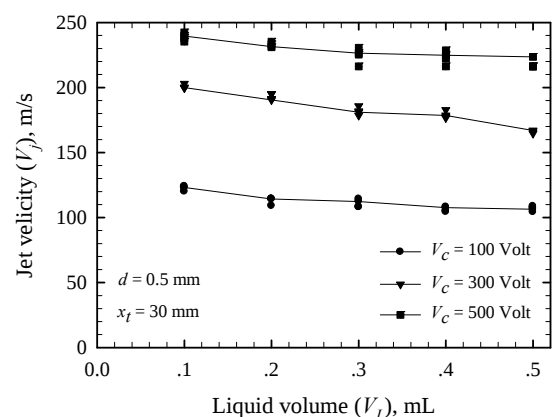
เมื่อ P คือ ความดันกระแทก, MPa

V_e คือ แรงดันไฟฟ้าที่ได้จาก PVDF, Volt

2.5 กระดุก และการวิเคราะห์กระดุก

ในการศึกษาการเจาะกระดุกด้วยลำเจ็ทจะใช้กระดุกหมูในส่วนของโคนขา (Femoral condyles) เนื่องจากกระดุกหมูมีกระบวนการ metabolism และมี Volume fraction ใกล้เคียงกับกระดุกของมนุษย์ [11] และใช้เครื่อง CT Scan รุ่น Optima CT600 ที่มี resolution เท่ากับ 0.625 mm พิจารณาลักษณะของรูและวิเคราะห์ความลึกของกระดุก

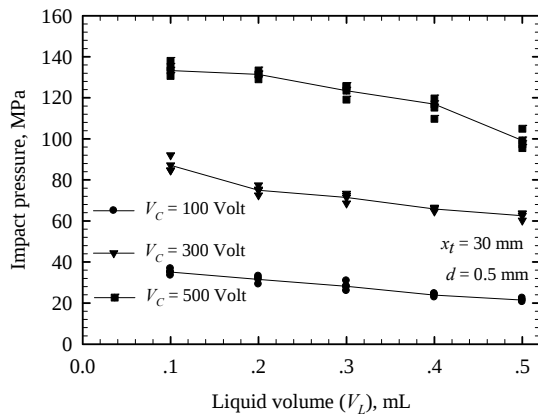
3. ผลการทดลอง



รูปที่ 6 อิทธิพลของปริมาตรต่อความเร็วของลำเจ็ทที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 100 Volt, 300 Volt และ 500 Volt

รูปที่ 6 แสดงอิทธิพลของปริมาตรต่อความเร็วของลำเจ็ทที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 100 Volt, 300 Volt และ 500 Volt โดยใช้เงื่อนไขการทดลองที่ขนาดรูหัวฉีด 0.5 mm Travelling distance เท่ากับ 30 mm [17] พบว่า เมื่อปริมาตรของของเหลวเพิ่มขึ้นจะทำให้ความเร็วของลำเจ็ทมีแนวโน้มลดลง โดยทุกแรงดันไฟฟ้ามีแนวโน้มในลักษณะเดียวกัน เนื่องจากเกิดความดันย้อนกลับ (Back pressure) ขึ้นภายในหัวฉีด เมื่อพิจารณาให้ของไหลสามารถอัดตัวได้ตามหลักการพลศาสตร์ของไหลอัดตัวได้ (Compressible fluid dynamic) [18] และเมื่อพิจารณาที่ปริมาตรใดๆ ของของเหลว พบว่า เมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นความเร็วของลำเจ็ทมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจาก เป็นการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ถ้ามีแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ขดลวดทองแดงมาก ขดลวดทองแดงก็จะสร้างความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามาก ทำให้ขดลวดทองแดง

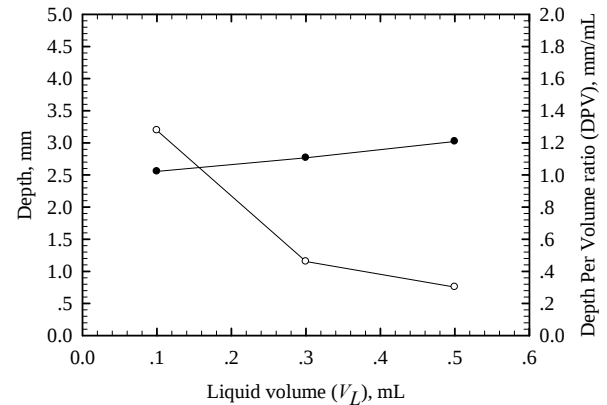
เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงขึ้น โดยที่แรงดันไฟฟ้า 500 Volt ปริมาตร 0.1 mL และ Travelling distance เท่ากับ 30 mm สามารถผลิตลำเจ็ทได้ความเร็วสูงสุด เท่ากับ 239.57 m/s ที่ขนาดรูหัวฉีด 0.5 mm



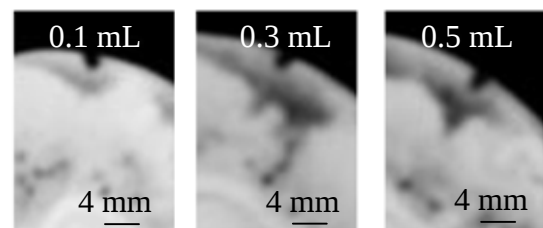
รูปที่ 7 อิทธิพลของปริมาตรต่อความดันกระแทกของลำเจ็ทที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 100 Volt, 300 Volt และ 500 Volt

รูปที่ 7 แสดงอิทธิพลของปริมาตรต่อความดันกระแทกของลำเจ็ทที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 100 Volt, 300 Volt และ 500 Volt โดยใช้เงื่อนไขการทดลองที่ขนาดรูหัวฉีด 0.5 mm Travelling distance เท่ากับ 30 mm จากการใช้แผ่น PVDF วัดความดันกระแทกของลำเจ็ทที่ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่น PVDF (Stand-off distance) เท่ากับ 3 mm พบว่า เมื่อปริมาตรของของเหลวเพิ่มขึ้นจะทำให้ความดันกระแทกของลำเจ็ทมีแนวโน้มลดลง โดยทุกแรงดันไฟฟ้ามีแนวโน้มในลักษณะเดียวกัน เนื่องจากความเร็วของลำเจ็ทมีแนวโน้มลดลงดังที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น และเมื่อพิจารณาที่ปริมาตรใดๆ ของของเหลว พบว่า เมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นความเร็วของลำเจ็ทมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจาก เป็นการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าดังที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ โดยที่แรงดันไฟฟ้า 500 Volt ปริมาตร 0.1 mL และ Travelling distance เท่ากับ 30 mm สามารถผลิตลำเจ็ทได้ความดันกระแทกสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 133.27 MPa ที่ขนาดรูหัวฉีด 0.5 mm อย่างไรก็ตามในการศึกษาการเจาะกระดูกด้วยลำเจ็ทจะศึกษาอิทธิพลของปริมาตรของของเหลวด้วย เนื่องจากในงานวิจัยที่ผ่านมา [11-13] พบว่า ปริมาตรของของเหลวมีอิทธิพลต่อความลึกของกระดูก ดังนั้นในการศึกษาการเจาะกระดูกโดยใช้

อุปกรณ์ผลิตลำเจ็ทที่ได้สร้างขึ้น ที่มีลักษณะลำเจ็ทเป็นแบบ Pulse จะศึกษาอิทธิพลของปริมาตรของเหลว และจำนวนครั้งในการเจาะกระดูกต่อความลึกของกระดูก



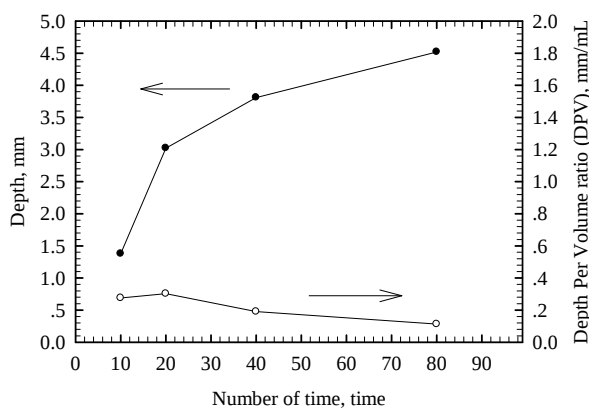
รูปที่ 8 อิทธิพลของปริมาตรต่อความลึกของกระดูก



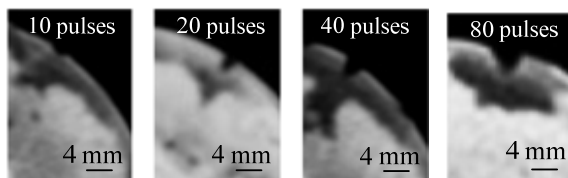
รูปที่ 9 โครงสร้างของกระดูกจากการใช้เครื่อง CT Scan

รูปที่ 8 อิทธิพลของปริมาตรต่อความลึกของกระดูก โดยในการศึกษาจะใช้กรณีผลิตลำเจ็ทที่ขนาดรูหัวฉีดเท่ากับ 0.5 mm, Travelling distance เท่ากับ 30 mm และแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 500 Volt เนื่องจากเป็นกรณีที่สามารถผลิตความเร็ว และความดันกระแทกของลำเจ็ทได้สูงสุดในทุกๆ ปริมาตรดังแสดงในรูปที่ 6 และรูปที่ 7 ส่วนปริมาตรที่ใช้ในการศึกษามีค่าเท่ากับ 0.1 mL, 0.3 mL และ 0.5 mL ซึ่งปริมาตร 0.5 mL เป็นปริมาตรสูงสุดของหัวฉีดที่บรรจุได้ ในการทดลองจะทำการเจาะอย่างต่อเนื่องทั้งหมด 20 Pulses ในแต่ละปริมาตร โดยมีระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับกระดูกเท่ากับ 1 mm และใช้เครื่อง CTScan รุ่น Optima CT600 ที่มีขนาด resolution เท่ากับ 0.625 mm ตรวจสอบโครงสร้างของกระดูก และความลึกของกระดูกหลังจากการเจาะกระดูกด้วยลำเจ็ทดังแสดงในรูปที่ 9 จากการศึกษาพบว่า ความลึกของกระดูกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาตรของลำเจ็ทเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมา [11-13] โดยที่ปริมาตรของลำเจ็ทเท่ากับ 0.5 mL สามารถเจาะ

กระดูกได้ความลึกสูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.02 mm เนื่องจากลำเจ็ทที่มีปริมาตรมากจะมีระยะเวลาในการเจาะกระดูกที่มากกว่าลำเจ็ทที่มีปริมาตรน้อย จึงทำให้กระดูกเกิดการฉีกขาด แล้วหลุดออกได้มากกว่า และยังพบว่า อัตราส่วนความลึกต่อปริมาตร (The depth per volume ratio, DPV) ซึ่งมีค่าเท่ากับ ความลึกของกระดูกที่เจาะได้หารด้วยผลคูณของปริมาตรของลำเจ็ทกับจำนวน Pulse ของลำเจ็ท ซึ่งจากการทดลองพบว่าค่า DPV มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาตรของลำเจ็ทเพิ่มขึ้น เนื่องจากกระดูกในส่วนที่ลึกลงไปมีความแข็งมากขึ้น โดยค่า DPV ที่ปริมาตร 0.1, 0.3 และ 0.5 mL มีค่าเท่ากับ 1.27, 0.4612 และ 0.3022 mm/mL ตามลำดับ อย่างไรก็ตามในระหว่างการผ่าตัดจะมีเครื่องดูดของเสียที่เกิดขึ้นจากการผ่าตัดออก ดังนั้นในการศึกษาจึงใช้กรณีผลิตลำเจ็ทที่ปริมาตร 0.5 mL ในการศึกษาอิทธิพลของจำนวน Pulse ของลำเจ็ทต่อความลึกของกระดูกต่อไป



รูปที่ 10 อิทธิพลของจำนวน pulse ของลำเจ็ทต่อความลึกของกระดูก



รูปที่ 11 โครงสร้างของกระดูกที่จำนวน 10-80 pulses

รูปที่ 10 แสดงอิทธิพลของจำนวน Pulse ของลำเจ็ทต่อความลึกของกระดูก โดยในการศึกษาจะใช้กรณีผลิตลำเจ็ทที่ Travelling distance เท่ากับ 30 mm แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 500 Volt และปริมาตรของเหลวเท่ากับ 0.5 mL ทำการเจาะอย่างต่อเนื่องที่จำนวน

Pulse เท่ากับ 10, 20, 40 และ 80 pulses ดังแสดงในรูปที่ 11 จากการศึกษาพบว่า ความลึกของกระดูกเพิ่มขึ้นตามจำนวน Pulse ที่เพิ่มขึ้น โดยความลึกสูงสุดมีค่าเท่ากับ 4.52 mm ที่จำนวน pulse เท่ากับ 80 pulses และมีอัตราส่วนความลึกต่อปริมาตรเท่ากับ 0.113 mm/mL ที่ 80 pulses ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า DPV มีค่าสูงกว่าการศึกษาที่ผ่านมา [11] ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.045 mm/mL ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ลำเจ็ทที่ใช้ในการเจาะกระดูกของอุปกรณ์ผลิตลำเจ็ทที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้าและใช้ชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้ามีความสามารถในการเจาะกระดูกได้ดีกว่า รวมไปถึงมีของเสียที่เกิดขึ้นระหว่างการเจาะกระดูกโดยใช้อุปกรณ์นี้มีปริมาณที่น้อยกว่าอีกด้วย อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาความชันของกราฟดังแสดงในรูปที่ 10 พบว่าความชันของกราฟในแต่ละช่วงของจำนวนครั้งในการเจาะมีแนวโน้มลดลง หรืออาจกล่าวได้ว่าเมื่อเพิ่มจำนวน Pulse ของลำเจ็ทในการเจาะเพิ่มขึ้นจะทำให้ความลึกของกระดูกเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากลำเจ็ทที่ใช้ในการศึกษานี้สามารถเจาะกระดูกในชั้น Articular cartilage ได้เท่านั้น แต่ในชั้น Compact bone ซึ่งเป็นชั้นถัดไปของกระดูก ลำเจ็ทสามารถเจาะได้เพียงเล็กน้อย เนื่องจากชั้น Compact bone ของกระดูกจะมีความแข็งมากกว่า ดังนั้นอุปกรณ์ผลิตลำเจ็ทนี้จึงมีความเหมาะสมกับบริเวณกระดูกบางส่วนของการร่างกายเท่านั้น เช่น การผ่าตัดกระดูกข้อต่อของมนุษย์ที่ไม่จำเป็นต้องเจาะด้วยความลึกที่ลึกมาก หรือบริเวณที่มีความหนาของกระดูกไม่มาก แต่ถ้าหากต้องการนำไปประยุกต์ใช้ในการเจาะกระดูกส่วนอื่นของร่างกายที่มีความหนาแน่นมาก จำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมทั้งในด้านการเพิ่มจำนวน Pulse ของลำเจ็ท รวมไปถึงการเพิ่มความเร็วและความดันกระแทกของลำเจ็ทต่อไปในอนาคต

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการเจาะกระดูกโดยใช้ลำเจ็ท จากอุปกรณ์ผลิตลำเจ็ทที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า โดยมีแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นชุดขับ สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) ความเร็ว และความดันกระแทกของลำเจ็ท มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาตรของลำเจ็ทเพิ่มขึ้น
- 2) ความลึกของกระดูกจะลึกมากขึ้นเมื่อปริมาตรของลำเจ็ท และจำนวน Pulse ของลำเจ็ทเพิ่มขึ้น



3) ในการศึกษาอุปกรณ์ผลิตลำเจ็ทที่ใช้ชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถจะกระตุกได้ความลึกสูงสุดเท่ากับ 4.52 mm ที่จำนวน pulse เท่ากับ 80 pulses

4) อัตราส่วนความลึกต่อปริมาตร (DPV) มีค่าเท่ากับ 0.113 mm/mL ซึ่งสูงกว่าการศึกษาที่ผ่านมา [11]

5) ชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถประยุกต์ใช้เป็นชุดขับของอุปกรณ์ผลิตลำเจ็ทเพื่อการเจาะกระตุกได้ในอนาคต อย่างไรก็ตามควรศึกษา และปรับปรุงอุปกรณ์ผลิตลำเจ็ทที่ใช้ชุดขับนี้เพิ่มเติม เพื่อให้สามารถผลิตลำเจ็ทที่มีความเร็ว และความดันกระแทกสูงมากขึ้น และศึกษาการเจาะกระตุกในบริเวณอื่นๆ ต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สัญญาเลขที่ RSA5780001 ที่ให้ทุนสนับสนุน และขอขอบคุณวิทยาลัยแพทยศาสตร์และการสาธารณสุข มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่อง CT Scanner

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Jiang, H., Du, C. and Dong, J. (2017). Investigation of rock cutting dust formation and suppression using water jets during mining, *Powder Technology*, February 2017, pp. 99-108.

[2] Obara, T., Bourne, N.K., Field, J.E. (1995). Liquid-jet impact on liquid and solid surfaces, *Wear*, vol. 186-187(2), August 1995, pp. 388-394.

[3] Shi, H.H., Takayama, K. and 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.

[4] Lee, S., Tanaka, D., Kusaka, J. and Daisho, Y. (2002). Effects of diesel fuel characteristics on spray and combustion in a diesel engine, *JSAE Review*, vol. 23(4), October 2002, pp. 407-414.

[5] Lee, K.H., Lee, C.H. and 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), May 2004, pp. 971-980.

[6] Rau, H.G., Buttler, E.R., Baretton, G., Schardey, H.M. and Schildberg, F.W. (1997). Jet-cutting Supported by High Frequency Current: New Technique for Hepatic Surgery, *WORLD Journal of SURGERY*, Vol. 21(3), March 1997, pp. 259-260.

[7] 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, *Laser Surg Med*, vol. 34(3), March 2004, pp. 237-234.

[8] Nakagawa, A., Hirano Takayuki, K. Makoto Sato, M., Uenohara, H., Ohyama, H., Kusaka, Y., Shirane, R., Takayama, K. and 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.

[9] 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 impairing vessels, *Minim InvasNeurosurg*, vol. 46(2), 2003, pp. 121-125.

[10] อนิรุตต์ มัทธจักร์, กิตติพงษ์ ศรีพนากุล, ชมลพรรณ ไพเราะ และ นิภาพร ประหยัดทรัพย์ (2560). การแพร่กระจายของยาใน Polyacrylamide gel โดยการฉีดยาแบบไม่ใช้เข็มที่ใช้ชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้า, *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 31*, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ นครนายก

[11] Steven den Dunnen, Lars Mulder, Gino M.M.J. Kerkhoffs, Jenny Dankelman, Gabrielle J.M. Tuijthof, (2013). Waterjet drilling in porcine bone: The effect of the nozzle diameter and bone architecture on the hole dimensions, *Journal of the Mechanical Behavior of*



Biomedical Materials, vol. 27, November 2013, pp 84-93.

[12] S. den Dunnen and G. J. M. Tuijthof, (2014). The influence of water jet diameter and bone structural properties on the efficiency of pure water jet drilling in porcine bone, *Mechanical Sciences*, vol. 5, September 2014, pp. 53-58.

[13] Steven den Dunnen, Jenny Dankelman, Gino M.M.J.Kerkhoffs, Gabrielle J.M.Tuijthof. (2016). How do jet time, pressure and bone volume fraction influence the drilling depth when water jet drilling in porcine bone?, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 62, September 2016, pp 495-503.

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

[15] Matthujak, A., Hosseini, S.H.R., Takayama, K. and Voinovich, P. (2007). High-speed liquid jet formation by impact acceleration method, *Shock Waves*, July 2007, vol16(6), pp 405–419.

[16] A. Sahaya Grinspan, R. Gnanamoorthy. (2010). Impact force of low velocity liquid droplets measured using piezoelectric PVDF film, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 356(1–3), March 2010, pp 162-168.

[17] Sripanagul, G. and Matthujak, A. (2017). Fundamental Study of Electromagnetic Actuated Needle-Free Jet Injection, *Trend in Science and Engineering Research International Conference (TiSERIC)*, Penang, Malaysia, 2017.

[18] Patrick H. Oosthuizen and William E. Carscallen. (1997). *Compressible fluid flow*, McGraw-Hill, New York.

Experimental Study of Stone Drilling using Water Jet Generated by Electromagnetic Actuator

Gittiphong Sripanagul and Anirut Matthujak*

*Combustion and Jet Application Research Laboratory (CJARL), Department of Mechanical Engineering,
Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani, 34190, THAILAND*

*gittiphong.sr.57@ubu.ac.th, *Corresponding Author: Anirut.m@ubu.ac.th*

Abstract—The objective of this paper is to preliminarily study the stone drilling using impulsive water jet. The jets were generated by electromagnetic actuator, which was a new jet generation technique based on impact driven method. In this research, effects of orifice diameter of nozzle, travelling distance, voltage of capacitor and liquid volume on jet velocity and impact pressure were investigated by laser beam interruption method and PVDF pressure sensor, respectively. The depth of stone drilling was measured and visualized by digital microscope camera. From experimental results, it was found that the electromagnetic actuator at 0.5 mm orifice diameter of nozzle, travelling distance of 30 mm, capacitor voltage of 500 V and liquid volumes of 0.1 mL were suitable condition to generate the maximum jet velocity and impact pressure, being 239.57 m/s and 133.26 MPa, respectively. The depth of stone drilling depended on a number of jet pulses. The 76 jet pulses could drill through the 3.18 mm thickness of the sandstone. The damage deformation of the sandstone in this study was crack and shear. Therefore, the electromagnetic actuator is possible to apply the stone drilling in the future.

Keyword—Stone drilling, Impulsive water jet, Electromagnetic actuator, Impact driven method, Sandstone

1. INTRODUCTION

It is known well that the high speed liquid jet can apply for many engineering and medical applications such as fuel injection [1], drilling bone [2], jet cutting [3], drug delivery without needle or needle-free jet injection [4] and tunneling or stone drilling [5].

Currently, the tunneling or stone drilling generally uses rotation of driller tip. The driller tip is made by material as high hardness [6]. It penetrates to the other layers of rock which the driller tip contacted with the rock every time. Thus, the driller tip is accumulation of heat and deterioration, which need to repair the driller tip. The time of repairing is long time and the high cost of a driller tip. In addition, there are many disadvantages of dust during drilling. Therefore, it has been invented the new method for rock drilling using the knowledge of high speed liquid jet.

In 2009, Ohtani et al. [6] generated water jet by a Ho:YAG laser for study the rock drilling. The jet was generated by laser inducing the water at the Y connector. The water moves to the tube exit become the jet. The limestone of 20 mm × 22 mm × 2 mm, density of about 2.36 g/cm³, compression strength of 73.4 MPa was installed under the water, which it live in the acrylic test chamber. The dimension of an acrylic test chamber was 130 mm × 140 mm × 230 mm. The behaviour of jet was recorded by high speed video camera at 1,000,000 fps. The PVDF needle hydrophone of was used for measuring the impact pressure, which the range was -10 to 200 MPa and a rise time of 50 ns. From this study, it was found that the bubble of the jet increased when the jet move out the exis tube. At the one of time, the bubble of the jet decreased, which it generated the rebound shock wave at the minimum diameter of bubble. The rebound shock velocity was about 1,530 m/s. The impact pressure of the jet in horizontal and vertical axis was about 20 MPa and 40 MPa, respectively. The limestone was pierced through the 2 mm thickness at 1,800 pulses.

In 2014 Sevda et al. [7] studied the damage of rocks using high speed water jet. The jet in this study was generated by high pressure pump at 80 MPa, which it was compressed by pistons of high pressure pump. The water compressed was drove to the nozzle become the continuous jet. The pulse length and pulsation frequency of the continuous jet was generated by the high-speed rotation of a slotted disc, which it was installed at the front of nozzle tip. The influence of pulse length and pulsation frequency on the rock damage was investigated. From this study, it was found that the amount of damage increased as the energy of jet increased. The damage of stone depended on frequency and length of jet pulses, which it was generated by rotation of a slotted disc. At the frequency of 106 Hz was identified as the critical point for internal damage of rock samples, which the pulses lengths were 888 mm. However, if the slot disk was used a long time, it could cause damage on surface of the slot disk.

Moreover, in 2016, Zhenguo He et al. [8] studied the stone damage by supercritical CO₂ jet. After the stones injected by supercritical CO₂ jet, they were investigated by scanning electron microscope (SEM). It was found that tensile failure and shear failure mechanisms were occurred near the center of the jet impact. At position of the tensile failure, the minerals were cracked by the expansion of supercritical CO₂ jet. It was an advantage of supercritical CO₂ jet when it was compared with the water jet. However, the supercritical CO₂ jet was generated by increasing the pressure and temperature at critical state of CO₂. The supercritical CO₂ moved to the nozzle, and then it became supercritical CO₂ jet, which the processes of supercritical CO₂ were complex, large system, a problem of CO₂ leak and expensive.

From the previous literature reviews, the study of stone drilling by jet has been continuously studied. The different power sources and actuators for jet generation have been proposed. However, jet generation using electromagnetic actuator for stone drilling has not been reported.

Therefore, this research aims to present the preliminary study of stone drilling using water jet generated by electromagnetic actuator. In this study, the jet was generated by momentum exchange method (MEM). Effects of orifice diameter of nozzle, travelling distance, capacitor voltage and liquid volume on jet velocity and impact pressure were investigated. Moreover, effect of number of jet pulses on the damage of stone was presented in this paper.

2. EXPERIMENTAL SETUP

2.1 Water Jet Generation by Impact Driven Method (IDM)

The impact driven method (IDM) [9] was applied for jet generation, which this method need high speed projectile for impacting or driving the water package inside the nozzle. The impact driven method (IDM) was divided into three methods as follows: 1) the direct impact method (DIM) is the direct impact of a high speed projectile into water package inside the nozzle as shown in Fig. 1(a). 2) The momentum exchange method (MEM) is the impact of a high speed projectile on a piston, which the piston is contacted with water package inside the nozzle as shown in Fig. 1(b). 3) The driving object method (DOM) is the method for driving the water package inside the nozzle by a projectile movement without impact as shown in Fig. 1(c).

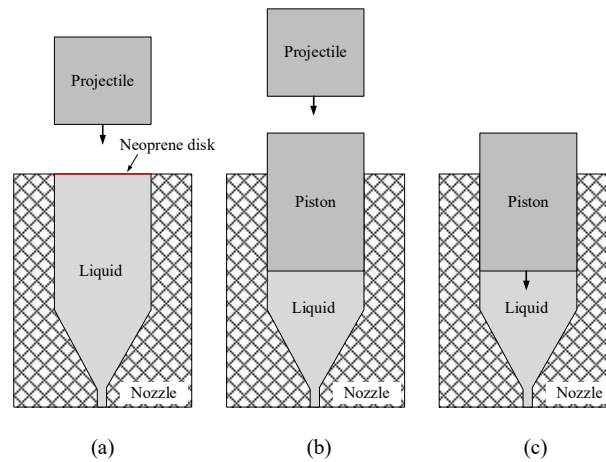


Fig. 1. Impact driven method (IDM): (a) direct impact method (DIM), (b) momentum exchange method (MEM) and (c) driving object method (DOM)

2.2 Electromagnetic Actuator

The electromagnetic actuator for water jet generation was created based on impact driven method [9] as shown in Fig. 2(a). It consists of actuator, nozzle and power source. The actuator was made from high density magnetic (Neodymium magnet, NdFeB) inserted inside the bobbin. The bobbin was entwined by 1,600 rounds of 0.32 mm in diameter of copper wire as copper coil. Nozzle was made from mid-steel. It has L/d of 4 and 40° of cone angle as shown in Fig. 2(b) [10]. The capacitor unit of 600 V and 5,400 μ F was used as power source, which was charged by power supply.

In order to generate the water jet, the capacitor unit was charged by power supply until the required voltage. The electric power from the capacitor unit was discharged to the copper coil for generating electromagnetic field and then the bobbin moved. When the bobbin impacted the piston inserted inside the nozzle, the piston drove

water contained inside the nozzle out of the nozzle orifice as the jet. This is the momentum exchange method (MEM).

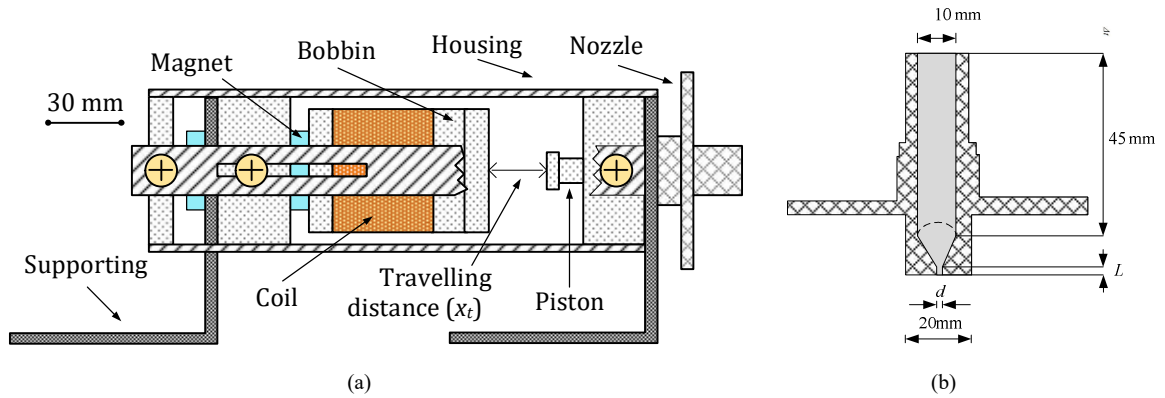


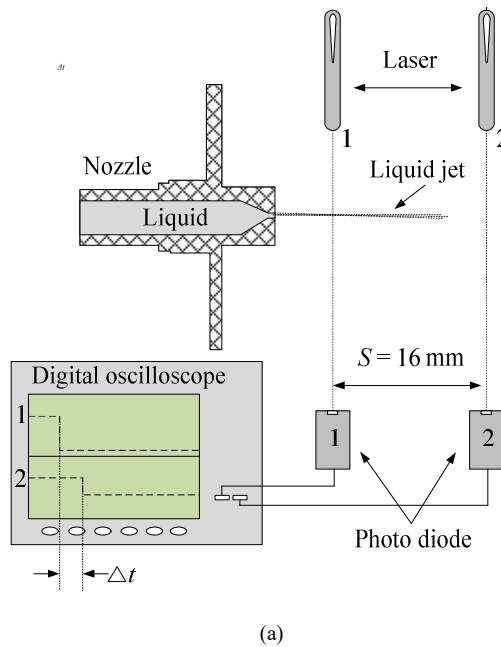
Fig. 2. (a) Electromagnetic actuator and (b) nozzle

2.3 Jet Velocity Measurement

Jet velocities were measured by laser beam interruption method as show in Fig. 3(a). Two diode laser beams cross perpendicularly to the test area and were detected by individual photodiodes. The first laser and photodiode were placed at 2 mm from the nozzle exit. The distance between two lasers was 16 mm. When the water jet interrupted laser beams, the corresponding output signals were recorded and displayed on a digital oscilloscope as shown in Fig. 3(b). From the signal, the jet velocities could be calculated by the equation (1).

$$V_j = \frac{S}{\Delta t} \quad (1)$$

Where V_j is the jet velocity (m/s), S is distance between two lasers (16 mm) Δt and is the time of flight over 16 mm (s).



(a)

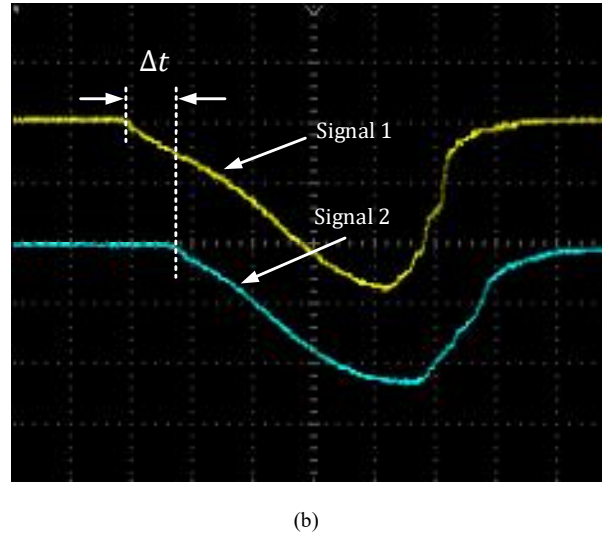


Fig. 3. (a) Experimental setup for impact pressure and jet velocity measurement and (b) load-time trace of signal interrupted by water jet

2.4 Calibration and Measurement of Impact Pressure

1) Calibration of PVDF pressure sensor: The impact pressure of liquid jet impact was measured by PVDF pressure sensor. Before measurement, the Polyvinylidene Fluoride (PVDF) was calibrated based on the laws of conversion of energy and momentum [11].

The pressure sensor was designed, manufactured and calibrated. The pressure sensor was constructed with Polyvinylidene Fluoride (PVDF) piezoelectric film. It was assembled on 25 mm thick of PMMA support. The PMMA housing dimension is 45x45 mm². This PVDF film is a flexible component which comprises a 28 μm thickness, 15 mm width and 25 mm length of PVDF polymer piezoelectric film with screen printed Ag-ink electrodes. The calibration of PVDF pressure sensor is follows:

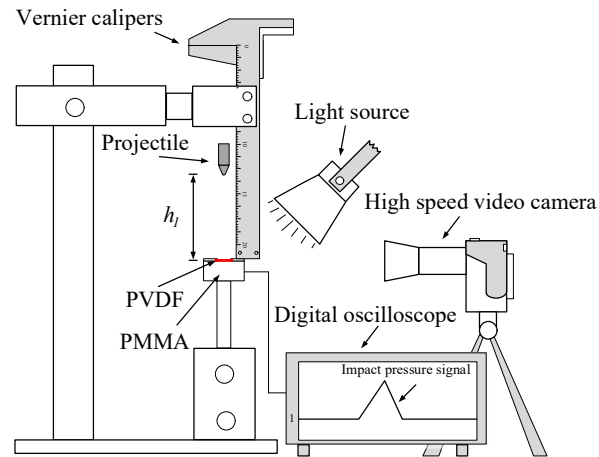


Fig. 4. Calibration setup

The PVDF calibration setup is showed in Fig. 4. When the projectile impacted on the PVDF pressure sensor, it generated the impact pressure on the PVDF, and then PVDF created voltage. The voltage signal was detected and shown on the digital oscilloscope. So, the impact pressure and the voltage were related. The impact pressure depends on mass of projectile and height of the projectile movement. The mass (m) of projectiles were 1.8 g, 5.0 g, 8.2 g, 21.3 g and 36 g. The impact area diameter of projectile was 2 mm (d_r). The impact force (F) was varied by changing the projectile mass and the height (h_1) between the projectile tip and the PVDF pressure sensor as shown in Fig. 4. The heights (h_1) of impaction were 10 - 50 mm. When the projectile impacted on the PVDF surface, the PVDF pressure sensor responded on impact force and the signal showed on digital oscilloscope in term of voltage. The final distance height (h_2) of projectile after rebound was observed by high speed video camera. The impact force can be calculated by the laws of conversion of energy and momentum as show in the equation (2) and equation (3).

$$F = m \frac{(v_I + v_2)}{T} \text{ or } F = m \frac{(1 + v_2/v_I)v_I}{T} \quad (2)$$

Where m is the mass of the projectile (kg), T is the impact duration time (s) shown on digital oscilloscope and v is velocity of projectile (m/s).

$$\frac{1}{2}mv^2 = mgh \quad (3)$$

Before impact

$$v_I = \sqrt{2gh_I} \quad (4)$$

After impact

$$v_2 = \sqrt{2gh_2} \quad (5)$$

or

$$\frac{v_2}{v_I} = \sqrt{\frac{h_2}{h_I}} \quad (6)$$

Where g is the gravity of 9.81 (m/s²), V_I is velocity before impact (m/s), V_2 is velocity after impact (m/s), h_I is the initial height between the projectile tip and the PVDF pressure sensor (m) and h_2 is the maximum rebound height of projectile (m).

The impact force (F) of projectile can be calculated impact pressure (P) by equation (7).

$$P = \frac{4F}{\pi d_r^2} \quad (7)$$

Where P is impact pressure (MPa), F is the impact force (N) and d_r is the diameter tip area of the projectile (m) or diameter of jet tip.

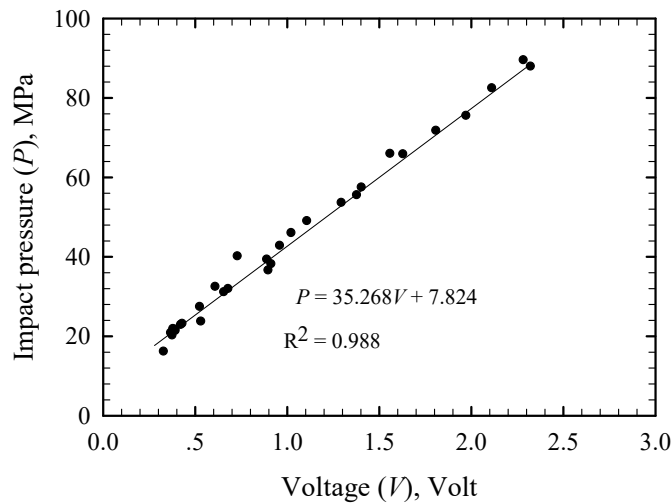


Fig. 5. Calibration curve

Figure 5 shows the relation between voltage signal from digital oscilloscope with impact pressure from equation (8), which is the result of the calibration test. The calibration equation can be obtained by curve fitting. So the voltage signal can be calculated to be pressure signal by equation (8).

$$P = 35.268V_e + 7.8274 \quad (8)$$

Where P is the impact pressure and V_e is the voltage of digital oscilloscope.

2) Impact pressure measurement: The measurement set up of the jet-impact pressures by a PVDF pressure sensor is shown in Fig. 6(a).

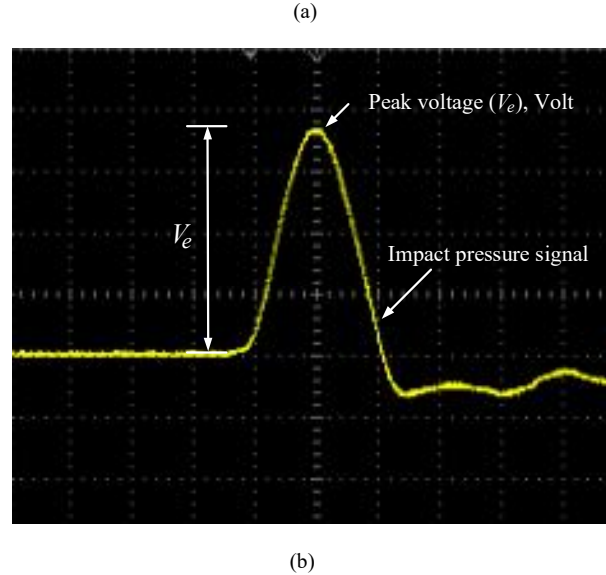


Fig. 6. (a) Impact pressure measurement and (b) load-time trace of water jet-impact

Once the jet impacts on the PVDF pressure sensor, the PVDF pressure sensor will respond to impact pressure giving a pressure signal that is recorded by digital oscilloscope as shown in Fig. 6(b). In this experiment, the stand-off distance from nozzle exit to the PVDF pressure sensor is 3 mm.

Fig. 6(b) shows a load-time trace of a water jet-impact. This is the pressure signal from digital oscilloscope in voltage signal. The voltage signal can be calculated to be pressure signal by the equation (5).

2.5 Sandstone Properties

In this preliminary study for application of water jet drilling, the sandstone was selected. Its compression strength was 48.43 MPa, which was tested by 50 ton micro computer universal testers CY-6040A1 model. The property of sandstone used in this study are shown in the Table 1.

Table 1. Property of sandstone used in this study

Detail	Sandstone property	
	Value	Unit
Diameter	51.38	mm
Length	84.14	mm
Cross section area	20.74×10^{-4}	m^2
Mass	415.00	kg
Volume	17.45×10^{-5}	m^3
Density	2.38×10^3	kg/m^3
Compression force	10.24×10^3	kgf
Elastic modulus	1.31×10^3	MPa
Compression strength	48.43	MPa

3. RESULTS

Figure 7 shows effect of orifice diameter of nozzle on jet velocity at travelling distance (x_t) of 0 - 30 mm, 0.2, 0.3, 0.5 and 0.7 mm orifice diameter of nozzle (d), liquid volume (V_L) of 0.5 mL and capacitor voltage (V_C) of 500 V. Experiments were repeated more than five times at each individual position. The scatter of data points is reasonably small. The jet velocity of water jet increased as the travelling distance increased at all orifice diameters of nozzle because of increasing the momentum transfer of copper coil. However, the orifice diameter has an indescribably significant effect on various jet velocities. The maximum jet velocity of 221.20 m/s was provided at $d = 0.5$ mm and $x_t = 30$ mm. Therefore, the 0.5 mm orifice diameter of nozzle was selected to study stone drilling.

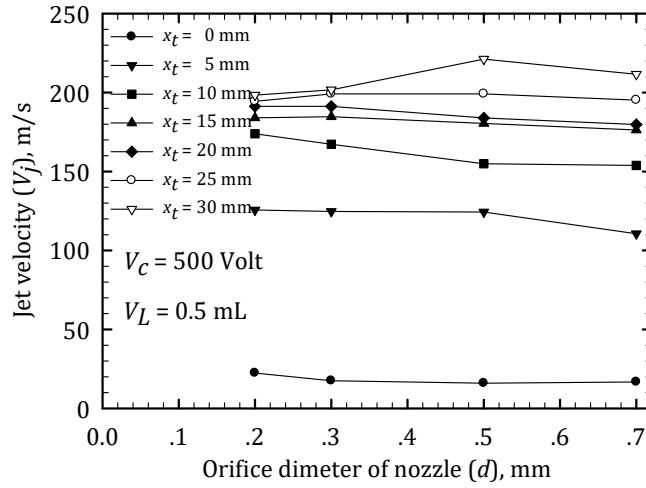


Fig. 7. Effect of orifice diameter of nozzle on jet velocity at various travelling distances, $V_L = 0.5$ mL and $V_C = 500$ V.

Figure 8 shows effect of liquid volume inside the nozzle on jet velocity at 100 V, 300 V and 500 V. The jet velocity decreased when the liquid volume increased at all voltages because of increasing the back pressure in the nozzle based on theory of compressible fluid dynamics [12]. Considering all liquid volume, it was found that the jet velocity increased when voltage of capacitor increased because of increasing the energy transfer from electric power to electromagnetic field. The higher the density of electromagnetic field is, the faster the jet velocity is. The maximum jet velocity is 239.57 m/s at capacitor voltage of 500 V, liquid volume of 0.1 mL and travelling distance of 30 mm.

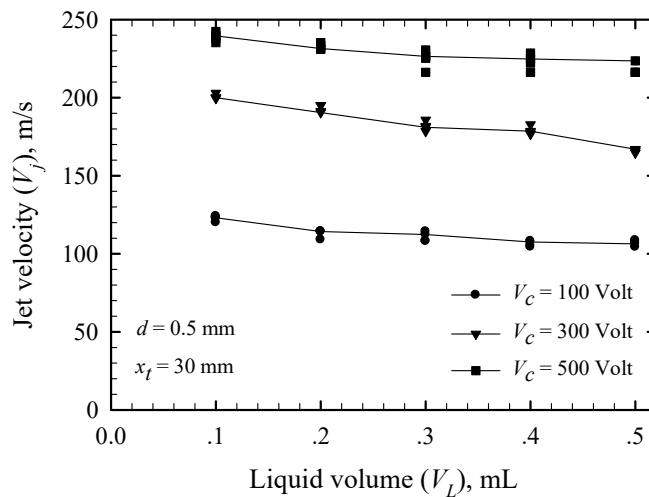


Fig. 8. Effect of liquid volume on jet velocity at 100 V, 300 V and 500 V

Figure 9 shows effect of liquid volume on impact pressure at capacitor voltage (V_C) of 100, 300 and 500 V, orifice diameter (d) of 0.5 mm and liquid volume (V_L) of 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 and 0.5 mL. The impact pressure was measured at 3 mm far from the nozzle exit as shown in Fig. 6. It was found that the impact pressure decreased

when the liquid volume increased at all voltages because jet velocity decreased as shown in Fig. 8. Considering all liquid volume, it was found that the impact pressure increased when voltage of capacitor increased. The maximum impact pressure is 133.27 MPa at capacitor voltage of 500 V, liquid volume of 0.1 mL and travelling distance of 30 mm.

In order to study of stone drilling, the condition of jet generation at 0.5 mm orifice diameter, travelling distance of 30 mm, capacitor of 500 V and liquid volume of 0.1 mL were selected for jet generation, because this condition can generate the maximum jet velocity and impact pressure as shown in Fig. 8 and 9, respectively.

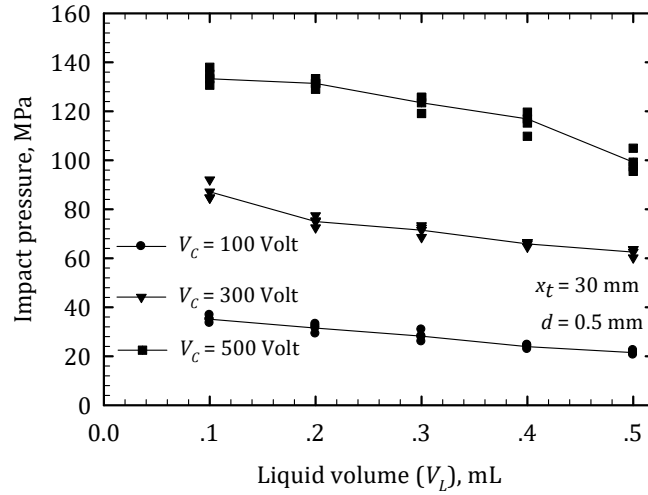


Fig. 9. Effect of liquid volume on impact pressure at 100 V, 300 V and 500 V

The sandstone of 51.38 mm diameter and 3.18 mm thickness was used in this study. The stand of distance between nozzle tip and surface of stone was 1 mm. The deformation of sandstone was investigated every 20 pulses. Figure 10 shows failure mechanism of sandstone at each pulse, which was visualized by digital microscope (Dial series). The deformation of sandstone was multiple cracks and cleavages were formed. It appeared that fragments were peeled off in shear failure mechanisms. The shear failure mechanisms created in the particular locations of the perforation hole as shown in Fig. 10(b) and 10(c). The tensile failure mechanism of sandstone was occurred after 46 pulses as shown in Fig. 10(d). The crack or tensile failure mechanism was the result of water jet moving deep into rock pores and the jet produced pressure in the inner wall of stone. The minerals of sandstone became separation until cracking. Considering the number of pulses of 47 – 60 pulses, the shear failure mechanism of sandstone was created as shown in Fig. 10(e).

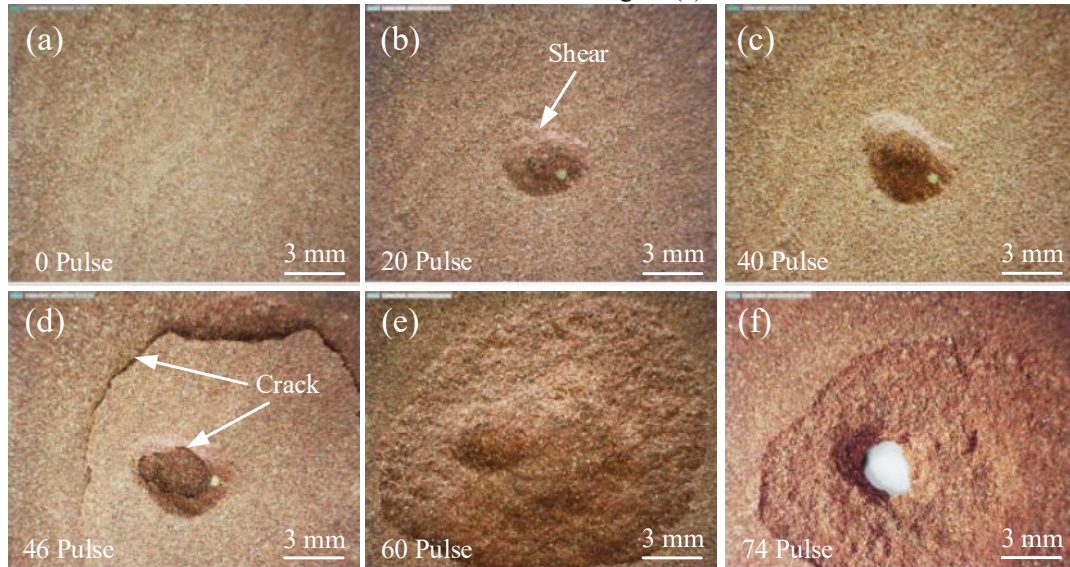


Fig. 10. Failure mechanism of sandstone (Magnified 30 times)

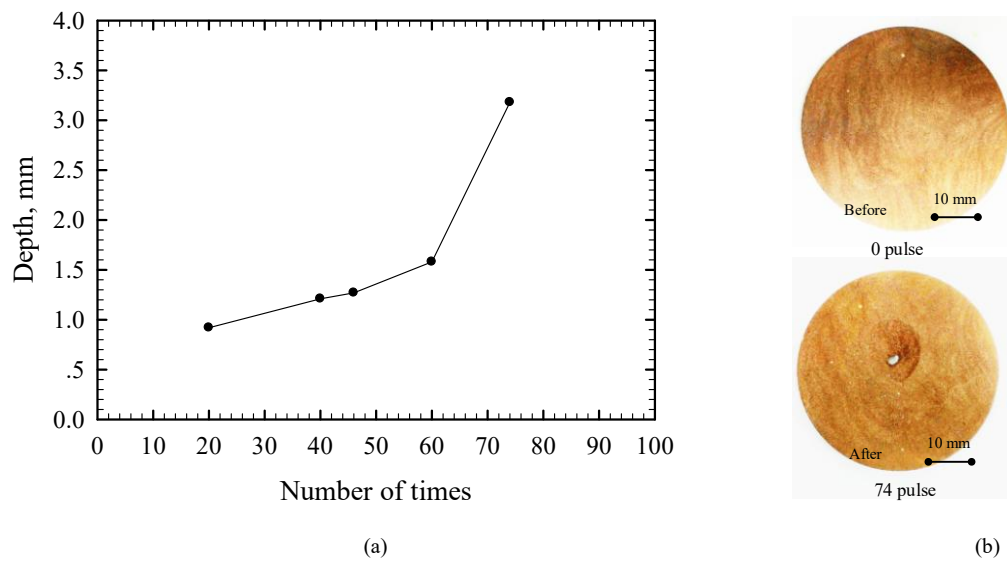


Fig. 11. (a) Effect of number of water jet pulse on depth of sandstone and (b) surface of sandstone before and after impact

Figure 11(a) shows effect of the number of water jet pulses on depth of sandstone, which is related with Fig 10. It was found that the depth of sandstone increased when the number of jet pulses increased because the minerals of sandstone were eroded by water jet pulse in the each time of drilling. Considering the number of 0 – 60 pulses as shown in Fig. 11, the trend of the depth gradually increases. Considering of 60 – 74 pulses, however, the trend of the depth increases rapidly because several pulses of water jet impacted on surface of sandstone. The stress and strain cumulatively was generated at the drilling hole, it affected to the created tensile and shear failure mechanism of sandstone. The 74 pulses of water jet can drill through the 3.18 mm thickness of sandstone as shown in Fig. 11(b). Therefore, the water jet generated by electromagnetic actuator and momentum exchange method (MEM) has the potential to be applied for stone drilling.

4. CONCLUDING REMARKS

In this study, the impulsive water jet was generated by electromagnetic actuator. Jet velocity and impact pressure were measured by laser beam interruption method and PVDF pressure sensor, respectively. From experimental result, it was found that the jet velocity and impact pressure was increased when the travelling distance and capacitor voltage increased whereas the liquid volume decreased. The maximum jet velocity and maximum impact pressure were 239.57 m/s and 133.26 MPa, respectively, obtained by 0.5 mm orifice diameter, travelling distance of 30 mm, capacitor voltage of 500 V and liquid volume of 0.1 mL. This condition was used for jet generation in this stone drilling study. For drilling study the hole depth of sandstone increased when number of jet pulses increased. The tensile and shear failure mechanism were generated at the drilling hole. The 74 pulses of water jet could penetrate through the 3.18 mm thickness of sandstone. Therefore, the electromagnetic actuator water has the potential for stone drilling application. However, jet drilling in various stone types still need to be studied for practical application in the future.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank department of Industrial Engineering and Civil Engineering, faculty of engineering, Ubon Ratchathani University for testing instrument. This research is financially supported by Thailand Research Fund (TRF) contact number RSA5780001 and Ubon Ratchathani University.

REFERENCES

- [1] Lee KH, Lee CH, & Lee CS, “An experimental study on the spray behavior and fuel distribution of GDI injectors using the entropy analysis and PIV method,” *Fuel*. **83**, 8 (2004).
- [2] Dunnen SD & Tuijthof GJM, “The influence of water jet diameter and bone structural properties on the efficiency of pure water jet drilling in porcine bone,” *Mechanical sciences*. **5**, 2 (2014).

- [3] Jiang H, Du C & Dong J, "Investigation of rock cutting dust formation and suppression using water jets during mining," *Powder Technology*. **307** (2017).
 - [4] Taberner A, Hogan NC & Hunter IW, "Needle-free jet injection using real-time controlled linear Lorentz-force actuators," *Medical Engineering & Physics*. **34**, 9 (2012).
 - [5] Shi HH, Takayama K. & Nagayasu N, "The Measurement of impact pressure and solid surface response in liquid-solid impact up to hypersonic range," *Wear*. **186**, 187 (1955).
 - [6] Ohtani K, Numata D, Takayama K, Kobayashi T & Okatsu K, "Experimental study of underwater rock drilling using a pulsed Ho:YAG laser-induced jets," *Shock Waves*. **19** (2009).
 - [7] Seveda D & Michael H, "The internal failure of rock samples subjected to pulsed water jet impacts," *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. **66** (2014).
 - [8] Zhenguo H, Gensheng L, Shouceng T, Haizhu W & Jingbin L, "SEM analysis on rock failure mechanism by supercritical CO₂ jet impingement," *Journal of Petroleum Science and Engineering*. **146** (2016).
 - [9] Bowden FP & Brunton JH, "Damage to solids by liquid impact at supersonics speeds" (1958).
 - [10] Matthujak A, Hosseini SHR, Takayama K, Sun M & Voinovich P, "High-speed liquid jet formation by impact acceleration method," *Shock wave*. **16**, 6 (2007).
 - [11] Grinspan AS & Gnanamoorthy R, "Impact force of low velocity liquid droplets measured using piezoelectric PVDF film," *Research article Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. **356**, 3 (2010).
- Patrick HO & William EC, *Compressible fluid flow* (McGraw-Hill, New York, 1997).

Fundamental Study of Electromagnetic Actuated Needle-Free Jet Injection

Gittiphong Sripanagul and Anirut Matthujak*

Combustion and Jet Application Research Laboratory (CJARL)
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani, 34190, THAILAND
*Corresponding author E-mail: Anirut.m@ubu.ac.th

Abstract

The objective of this paper is to preliminarily study the needle-free jet injection by electromagnetic actuator. The jets were generated by electromagnetic actuator, being designed and manufactured for this study. Effects of orifice diameter of the nozzle, travelling distance, voltage and liquid volume on jet velocity and impact pressure were investigated by laser beam interruption method and PVDF pressure sensor respectively. Moreover, the evolution of jet penetration during the injection into 20% Polyacrylamide gel was visualized by high-speed video camera. It was found that the electromagnetic actuator with the orifice diameter of 0.2 mm at travelling distance of 5 mm and voltage of 500 Volt at all liquid volumes can be applied for needle-free jet injection. The introductory channel as well as circular dispersion was obviously observed seen from the evolution of jet penetration into 20% Polyacrylamide gel.

Keywords: Electromagnetic actuator; Needle-free jet injection; velocity; impact pressure; Polyacrylamide gel

1. Introduction

It is known well that the high speed liquid jet can apply for many engineering applications such as jet cutting [1], fuel injection [2] and others. In addition, it also can apply for medical application such as micro jet cutting [3], drilling bone [4] and drug delivery without needle or needle-free jet injection, being popularly medical application.

In order to deliver the drug using needle-free jet injection, the jet speed is 100 - 200 m/s [5] and its impact pressure is more than 15 Mpa [6]. Nowadays, energy sources of commercial needle-free jet injector have two categories, being spring and compressed gas. The advantages of spring are compact and low cost. However, its disadvantages are the fatigue of spring when it is used for long time and the nonadjustable jet velocity. The advantage of compressed gas is the precision of jet velocity in each drug deliveries for long time. The popularity of gases are Carbon-dioxide and Helium gas [6] However, its disadvantages are large system, expensive and the noise of gas release, which makes patient scared. Recently, there have been invented the new energy source for drug delivery, being electric power.

In 2007, Stachowiak et al. [7] applied Piezoelectric as the actuator for needle-free jet injection. The actuator was able to deliver the drug at 10 μ L, being very low volume. In 2012, Taberner et al. [5] invented an electromagnetic actuator for deliver drug. The actuator has enough potential for drug delivery. However, the performance of actuator for drug delivery has not been reported.

Therefore, this research is to study the performance of electromagnetic actuator for needle-free jet injection. Effects of voltage (V_c), travelling distance (x_r), orifice diameter of nozzle (d), liquid

volume (V_L) on jet velocity (V_j) and impact pressure are investigated. Moreover, the evolution of jet penetration into 20% Polyacrylamide gel is presented.

2. Materials and Methods

2.1 Needle-Free Jet Injector

The device of needle-free jet injection was created based on impact driven method [8] as shown in Figure 1. It consists of actuator, nozzle and power source. The actuator is made from high density magnetic (Neodymium magnet, NdFeB) inserted inside the bobbin. The bobbin is entwined by 1,600 rounds of 0.32 mm in diameter of copper wire as copper coil. Nozzle is made from mid-steel and it has L/d of 4 and 40° of cone angle [9]. The capacitor unit of 600 Volt and 5,400 μ F is used as power source, being charged by power supply.

To generate the liquid jet, the capacitor unit was charged by power supply until it has the required voltage. The electric power from the capacitor unit was discharged to the copper coil for generating electromagnetic field and then the bobbin was moved. When the bobbin impacted the piston inserted inside nozzle, the piston was driven liquid contained inside the nozzle out from the nozzle orifice as the jet. The liquid used as drug in this study is water.

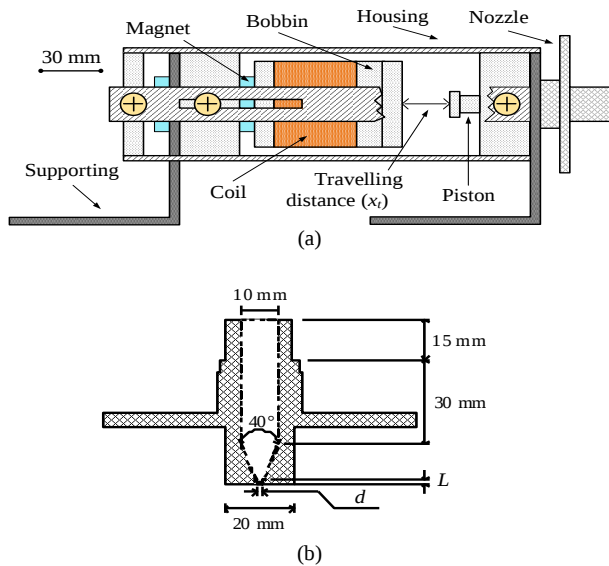


Figure 1: (a) Electromagnetic actuator for needle-free jet injection and (b) Nozzle

2.2 Velocity Measurement

Jet velocities were measured by laser beam interruption method as shown in Figure 2. Two diode laser beams cross perpendicularly to the test area and are detected by individual photodiodes. The first laser and photodiode are placed at 2 mm from the nozzle exit. The distance between two lasers is 16 mm. When the water jet interrupted laser beams, the corresponding output signals are recorded and displayed in a digital oscilloscope. From the signal, the jet velocities can be calculated by the below equation.

$$V_j = \frac{S}{\Delta t} \quad (1)$$

Where V_j is the jet velocity (m/s), S is distance between two lasers (16 mm) and Δt is the time of flight over 16 mm (s).

2.3 Impact Pressure Measurement

To measure the impact pressure, the pressure sensor was designed, manufactured and calibrated [10]. The pressure sensor was constructed with Polyvinylidene Fluoride (PVDF) piezoelectric film. It is assembled on 25 mm thick of PMMA support. The PMMA housing dimension is 45x45 mm² as shown in Fig 2. This PVDF film is a flexible component which comprises a 28 μ m thick, width 15 mm and length 25 mm of PVDF polymer piezoelectric film with screen printed Ag-ink electrodes.

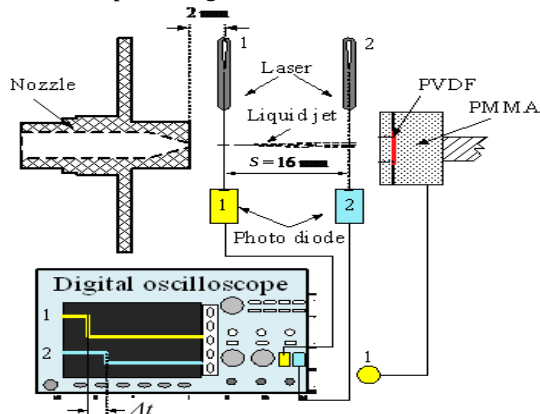


Figure 2: Experimental setup for impact pressure and jet velocity

The experimental setup for measuring the jet-impact pressures by a PVDF is shown in Figure 2. Once the jet impacts on the PVDF pressure sensor, the PVDF pressure sensor will respond to impact pressure giving a pressure signal that is recorded by oscilloscope as shown in Figure 3. In this experiment, the stand-off distance from nozzle exit to the PVDF pressure sensor is 3 mm.

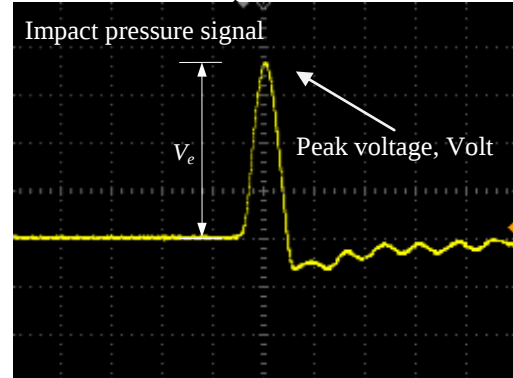


Figure 3: A load-time trace of a water jet-impact at $V_L = 0.3$ mL, $x_t = 5$ mm and $V_c = 500$ Volt.

Figure 3 shows a load-time trace of a water jet-impact. This is the pressure signal from oscilloscope in voltage signal. The voltage signal can be calculated to be pressure signal by the equation (2), being calibrated for this experiment.

$$P = 35.268V_e + 7.8274 \quad (2)$$

Where P is the impact pressure of the jet (MPa) and V_e is voltage signal from PVDF pressure sensor (Volt).

2.3 Polyacrylamide Gel

To predict the behavior of the dispersion of water jet for this study, water jet being used as drug was injected into Polyacrylamide gel. 20% - 30% Polyacrylamide gel was generally used for drug delivery study because it has clearness [5] and its young modulus is similar to human tissue, being 0.22 - 0.38 MPa [11]. In this study, 20% Polyacrylamide gel were prepared by mixing an appropriate volume of 40% acrylamide stock (i.e. 37.5 acrylamide/1 bis-acrylamide; BioRad Laboratories) with distilled water. The Polymerization was initiated by the addition of ammonium persulfate (APS) and N,N,N',N'-tetramethylethylenediamine (TEMED).

3. Results and Discussion

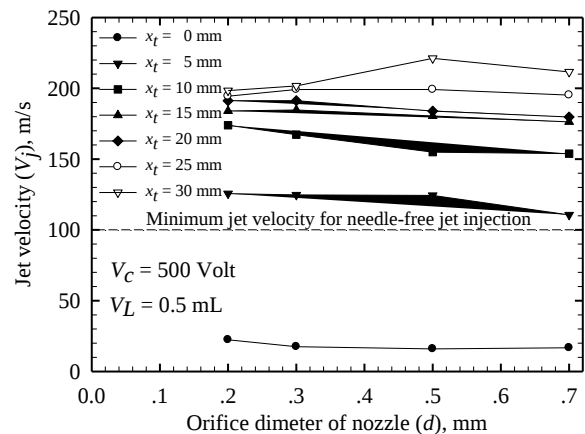


Figure 4: Effect of orifice diameter of nozzle on jet velocity at various travelling distances at $V_L = 0.5$ mL and $V_c = 500$ Volt.

Figure 4 shows effect of orifice diameter of nozzle on jet velocity at travelling distance of 0 - 30 mm. Experiments were repeated

more than five times at each individual position. The scatter of data points is reasonably small. The jet velocity of water jet increased as the travelling distance increased at all orifice diameters of nozzle because of increasing the momentum transfer of copper coil. However, the orifice diameter has an indescribably significant effect on various jet velocities. The maximum jet velocity of 221.20 m/s was provided at $d = 0.5$ mm and $x_t = 30$ mm. However, $d = 0.2$ mm at $x_t = 5$ mm were selected to apply for needle-free jet injection because $d = 0.2$ mm has the same diameter of drug delivery by needle and $x_t = 5$ mm was able to generate the jet velocity at higher than 100 m/s, being the minimum velocity for needle-free jet injection.

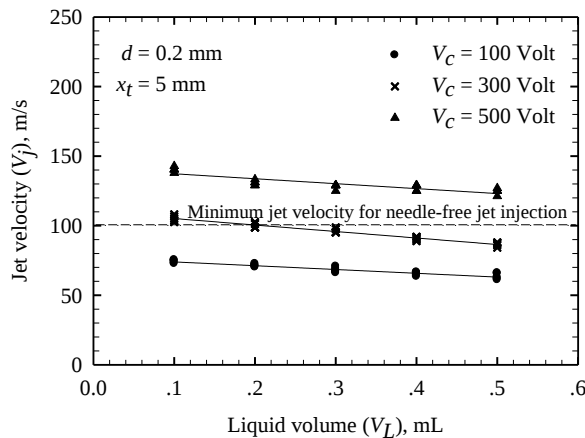


Figure 5: Effect of liquid volume on jet velocity at 100 Volt, 300 Volt and 500 Volt

Figure 5 shows effect of liquid volume inside the nozzle on jet velocity at 100 Volt, 300 Volt and 500 Volt. The jet velocity decreased when the liquid volume increased at all voltages because of increasing the back pressure in the nozzle based on theory of compressible fluid dynamics. At all liquid volumes, the jet velocity increased as the voltage increased, being the normal behavior. However, the 500 Volt can generate jet velocity of higher than 100 m/s, being the minimum jet velocity for needle-free jet injection, at all liquid volumes.

Figure 6 shows effect of liquid volume on impact pressure at 500 Volt. The impact pressure was measured at 3 mm from nozzle exit. The impact pressure decreased when liquid volume increased because jet velocity decreased as shown in Figure 4. The maximum and minimum impact pressures were 20.91 and 16.34 MPa at 0.1 mL and 0.5 mL, respectively, which were higher than the minimum impact pressure of 15 MPa for needle-free jet injection [6]. Therefore, it is concluded that this actuator is able to penetrate drug into the human skin.

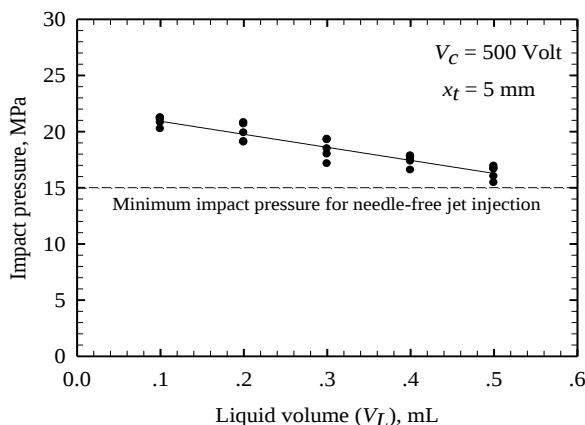


Figure 6: Effect of liquid volume on impact pressure at 500 Volt.

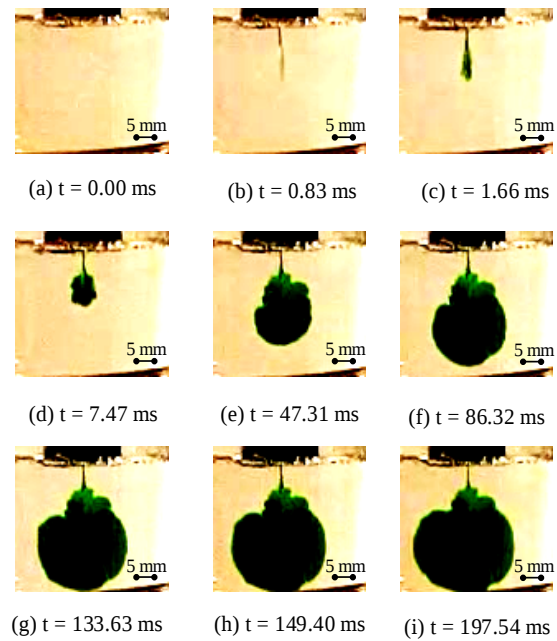


Figure 7: Evolution of jet penetration during the injection into 20% Polyacrylamide gel at 500 Volt, 0.5 mL.

Figure 7 shows the evolution of jet penetration during the injection into 20% Polyacrylamide gel at 500 Volt, 0.5 mL. The evolution of jet penetration was recorded by high-speed video camera, Casio Exilim Pro EX-F1 with frame rate of 1,200 fps. From the images, the introductory channel as well as circular dispersion was obviously observed. The evolution of jet penetration can be divided into three periods. The first period is the start of injection, as shown in Figure 7(a). The second period is called penetration period, as shown in Figure 7(b). In this period, the jet has the maximum velocity and maximum impact pressure to penetrate the gel. The depth of penetration depends on the velocity and impact pressure. This period takes shorter time than next period. The last period is called the dispersion of liquid jet in the gel, as shown in Figure 7(c-i). The time of this period depends on the liquid volume.

4. Concluding Remarks

From the experimental results, it is concluded that:

1. The jet velocity of water jet increased when the travelling and the voltages increased whereas the liquid volume decreased.
2. The orifice diameters between 0.2 – 0.7 mm have an indescribably significant effect on various jet velocities
3. The impact pressure decreased when the liquid volume increased.
4. The electromagnetic actuator at $d = 0.2$ mm, $x_t = 5$ mm, $V_c = 500$ Volt and all liquid volumes can be applied for needle-free jet injection.
5. The introductory channel as well as circular dispersion was obviously observed from the evolution of jet penetration into 20% Polyacrylamide gel.

Acknowledgement

This research is financially supported by Ubon Ratchathani University and Thailand Research Fund (TRF), contact No. RSA5780001.

References

- [1] Jiang. H., et al., Investigation of rock cutting dust formation and suppression using water jets during mining. *Powder Technology*, 2017. 307: p. 99-108.
- [2] Lee, K.H. et al., An experimental study on the spray behavior and fuel distribution of GDI injectors using the entropy analysis and PIV method. *Fuel*, 2004. 83(8): p. 971-980.
- [3] Horst G. R. et al., Jet-cutting Supported by High Frequency Current: New Technique for Hepatic Surgery. *WORLD Journal of SURGERY*, 1997. 21(3): p. 259-260.
- [4] Dunnen. S. D., & Tuijthof, G.J.M., The influence of water jet diameter and bone structural properties on the efficiency of pure water jet drilling in porcine bone. *Mechanical sciences*, 2014. 5(2): p. 53-58.
- [5] Taberner. A. et al., Needle-free jet injection using real-time controlled linear Lorentz-force actuators. *Medical Engineering & Physics*, 2012. 34(9): p. 1228-1235.
- [6] Shergold. A. O. et al., The penetration of a soft solid by a liquid jet, with application to the administration of a needle-free injection. *Journal of Biomechanics*, 2006. 39(14): p. 2593-2602.
- [7] Stachowiak. J.C. et al., Piezoelectric control of needle-free transdermal drug delivery. *Journal of Controlled Release*, 2007. 124(2): p. 88-97.
- [8] Bowden, F.P., & Brunton, J.H., Damage to solids by liquid impact at supersonics speeds. 1958. p. 873-875.
- [9] Matthujak, A. et al., High-speed liquid jet formation by impact acceleration method. *Shock wave*, 2007. 16 (6): p. 405-419.
- [10] Grinspan. A. S., & Gnanamoorthy. R., Impact force of low velocity liquid droplets measured using piezoelectric PVDF film. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2010. 356(3): p. 162-168
- [11] Baxter. S. J. et al., Jet injection into polyacrylamide gels: investigation of jet injection mechanics. *Journal of Biomechanics*, 2004. 37(8): p. 1181-1188.

การแพร่กระจายของยาใน Polyacrylamide gel โดยการฉีดยาแบบไม่ใช้เข็มที่ใช้ชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้า

Drug Dispersion into Polyacrylamide Gel of Needle Free-Jet Injection using Electromagnetic Actuator

อนิรุตต์ มัทธจักร*, กิตติพงษ์ ศรีพนากุล, ธมลพรรณ ไพเราะ และ นิภาพร ประหยัดทรัพย์

ห้องปฏิบัติการการประยุกต์ใช้ลำเจ็ทและการเผาไหม้ (Combustion and Jet Application Research Laboratory, CJARL)

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ตำบลเมืองศรีโค อำเภวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190

E-mail: Anirut.m@ubu.ac.th, Tel: 0-4535-3309

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการแพร่กระจายของยาเมื่อฉีดเข้าไป Polyacrylamide gel โดยอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มที่ใช้ชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้าที่ถูกออกแบบและสร้างขึ้น ด้วยอาศัยการผลิตลำเจ็ทด้วยหลักการ Impact driven method ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณของเหลวเมื่อฉีดเข้าไปใน Polyacrylamide gel เพื่อศึกษาการพัฒนากา และการแพร่กระจายของยาโดยใช้กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง และทำการตรวจวัดค่าลักษณะการแพร่กระจายทั้ง 5 รูปแบบคือ channel, hole, high, width และ depth ของรูปร่างการแพร่กระจายของยา นอกจากนี้ยังทำการเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ฉีดยาแบบไม่ใช้เข็มที่ใช้ต้นกำลังจากสปริงอีกด้วย จากการศึกษาพบว่า การแพร่กระจายของยาภายใน Polyacrylamide gel จากอุปกรณ์ที่ใช้ชุดขับจากสปริง และแม่เหล็กไฟฟ้ามีความคล้ายคลึงกัน ซึ่งสามารถแบ่งการออกได้ 3 ระยะ คือ ระยะเริ่ม, ระยะเจาะ และระยะการแพร่กระจาย โดยที่ channel และ hole ของการแพร่กระจายจะขึ้นอยู่กับความเร็ว และความดันกระแทกของลำเจ็ท ในขณะที่ high, width และ depth จะขึ้นอยู่กับปริมาณของยา ดังนั้นเป็นไปได้ว่าชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถประยุกต์ใช้เป็นชุดขับของอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มได้ในอนาคต

คำหลัก: การแพร่กระจายของยา, Polyacrylamide gel, การส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็ม, ชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้า

Abstract

The objective of this research is to study the drug dispersion into 20% Polyacrylamide gel of needle-free jet injections using electromagnetic actuator. The electromagnetic actuator was designed and manufactured based on impact driven method for jet generation. In this research, effect of liquid volume on the drug penetration into Polyacrylamide gel was investigated. The evolution and dispersion of the drug was observed by high speed video camera, which there were 5 dispersion patterns: channel, hole, high, width and depth. From visualization, it was found that the behavior of the evolution of the drug penetration into Polyacrylamide gel of needle-free jet injection using spring and electromagnetic was similar. The evolution of the drug can be divided into three periods. There

are start period, penetrate period and dispersion period. The channel and hole of dispersion depended on the jet velocity and impact pressure while the high, width and depth depended on liquid volume. Therefore, it is possible to apply the electromagnetic actuator of needle-free jet injection in the future.

Keywords: Drug Dispersion, Polyacrylamide gel, Needle-free jet injection, Electromagnetic actuator.

1. บทนำ

เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่า ในปัจจุบันได้ใช้องค์ความรู้ทางด้านลำเจ็ทความเร็วสูงมาประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมไม่ว่าจะเป็น การตัดโลหะด้วยลำเจ็ท (Jet cutting technology) [1] การทำสะอาดด้วยลำเจ็ท (Material cleaning by jets) การเจาะอุโมงค์ด้วยลำเจ็ท (Mining and tunneling by means of high-speed jet impingements) [2, 3] การฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง (Fuel direct injection) [4, 5] นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้ลำเจ็ทกับงานทางด้านการแพทย์ได้อีกด้วย อาทิเช่น ใช้ลำเจ็ทในการผ่าตัด (Micro jet cutting) [6] ใช้ลำเจ็ทในการทำลายก้อนเลือดที่อุดตันในเส้นเลือด (Blood clot dissolution) [7 - 9] และที่นิยมมากในปัจจุบัน คือ ใช้ในการส่งถ่ายยาด้วยลำเจ็ท [10 - 12] หรือการฉีดส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็ม (Needle free jet injection) โดยการทำให้อาไหลกลายเป็นลำเจ็ทความเร็วสูงที่มีความเร็วตั้งแต่ 100 - 200 m/s [12] และมีความดันกระแทกมากกว่า 15 MPa ขึ้นไป [13] ซึ่งจะทำให้ยาสามารถเจาะชั้นผิวหนังได้ ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องใช้เข็มฉีดยาอีกต่อไป

ปัจจุบันอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มส่วนใหญ่จะใช้ต้นกำเนิดจากการสะสมพลังงานซึ่งมีอยู่ 2 รูปแบบด้วยกันคือ สปริง และแก๊ส โดยข้อดีของต้นกำเนิดจากสปริงคือ อุปกรณ์จะมีขนาดเล็ก สะดวกในการใช้งาน แต่ข้อเสียคือ ถ้าต้องการเพิ่มความเร็วของลำเจ็ท จะต้องทำการปรับแต่งอุปกรณ์ใหม่ หรือเปลี่ยนสปริงที่มีค่าของสปริง (K) ให้สูงขึ้น และที่สำคัญเมื่อใช้งานเป็นเวลานานจะทำให้ค่า K ของสปริงลดลง ส่งผลต่อความเร็วของลำ

เจ็ท และการส่งถ่ายยา ส่วนข้อดีของต้นกำเนิดที่ใช้แก๊สคือ สามารถควบคุมความเร็วของลำเจ็ทได้ แก๊สที่นิยมใช้คือ แก๊ส CO₂ และแก๊สฮีเลียม [13] แต่อย่างไรก็ตามมีข้อเสียของต้นกำเนิดจากแก๊สคือ ต้องมีระบบผลิตแก๊ส และระบบอัดแก๊ส จึงทำให้ต้นกำเนิดนี้มีขนาดใหญ่ และมีราคาแพง ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการคิดค้นต้นกำเนิดใหม่เพื่อใช้ผลิตลำเจ็ทสำหรับการส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็ม นั่นก็คือต้นกำเนิดจากไฟฟ้า

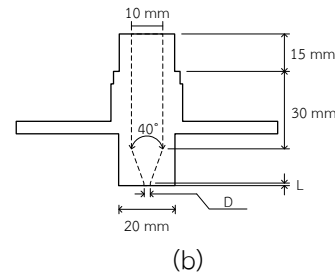
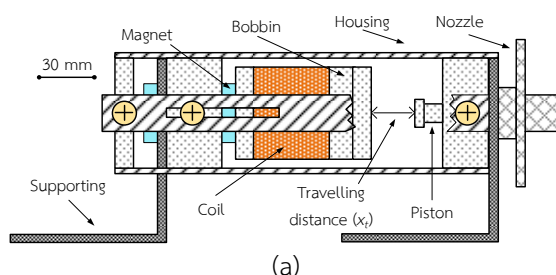
ในปี 2007 Stachowiak J.C. และคณะ [11] ได้ใช้ต้นกำเนิดไฟฟ้าที่มีชุดขับ (Actuator) ทำจาก Piezoelectric ในการผลิตลำเจ็ท โดยหลักการทำงานของชุดขับ Piezoelectric คือ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน Piezoelectric จะทำให้เกิดการยืดหดตัว จึงใช้หลักการนี้ผลิตลำเจ็ท ซึ่งข้อดีของชุดขับ Piezoelectric คือ สามารถควบคุมความเร็วของลำเจ็ทได้ แต่ข้อเสียคือ ปริมาตรของเหลวที่อยู่ภายในหัวฉีดน้อยมาก อยู่ในระดับนาโนลิตรถึงไมโครลิตรเท่านั้น ต่อมาในปี 2012 Taberner และคณะ [12] ได้คิดค้นชุดขับใหม่ที่ใช้ต้นกำเนิดจากไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็ม นั่นก็คือชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic) โดยหลักการทำงานของชุดขับแม่เหล็กไฟฟ้าคือ ใช้การตัดกันของสนามแม่เหล็ก ระหว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็กถาวร ซึ่งการตัดกันของสนามแม่เหล็กทั้งสอง จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ขึ้น จึงใช้การเคลื่อนที่นี้ในการผลิตลำเจ็ทเพื่อการส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็ม อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยดังกล่าวยังไม่ได้ศึกษาการพฤติกรรมของการแพร่กระจายของยา และรูปร่างของการแพร่กระจาย

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาการพฤติกรรมของลำเจ็ทเมื่อฉีดเข้าไปในเนื้อเยื่อจำลอง โดยใช้อุปกรณ์ผลิตลำเจ็ทที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้าที่มีชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้าในการผลิตลำเจ็ทสำหรับการส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็ม นอกจากนี้ยังได้ทำการเปรียบเทียบพฤติกรรม และรูปร่างของการแพร่กระจายในเนื้อเยื่อจำลองกับอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มที่มีขายทั่วไปอีกด้วย

2. วิธีการทดลอง

2.1 อุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า

อุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า โดยมีแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นชุดขับในการผลิตลำเจ็ทจะถูกสร้างขึ้นโดยใช้หลักการพื้นฐานของการผลิตลำเจ็ทแบบ Impact driven method [14] ดังแสดงในรูปที่ 1(a) โดยมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญของอุปกรณ์ฯ ได้แก่ ชุดขับ (Actuator) หัวฉีด (Nozzle) และแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power source) โดยชุดขับจะถูกสร้างขึ้นจากแม่เหล็ก Neodymium magnet (NdFeB) และขดลวดทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดทองแดงเท่ากับ 0.32 mm พันรอบแกน (Bobbin) 1,600 รอบ ในส่วนของลักษณะของหัวฉีดที่ทำจากเหล็กกล้าจะใช้ค่า L/D เท่ากับ 4 และมุมกรวยเท่ากับ 40° ดังแสดงในรูปที่ 1(b) เนื่องจากลักษณะของหัวฉีดดังกล่าว สามารถผลิตลำเจ็ทได้ความเร็วสูงที่สุด [15] และใช้ตัวเก็บประจุขนาด 600 โวลต์ 5,400 μF เป็นตัวเก็บพลังงานไฟฟ้าจากการประจุไฟฟ้าโดยใช้เครื่องประจุไฟฟ้า (Power supply)



รูปที่ 1 อุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า โดยมีแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นชุดขับ (a) และลักษณะของหัวฉีด (b)

การทำงานของอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า โดยมีแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นชุดขับ เริ่มจากใช้เครื่อง Power supply ทำการประจุไฟฟ้าให้กับตัวเก็บประจุ จนถึงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการ จากนั้นทำการปล่อยแรงดันไฟฟ้าจากตัวเก็บประจุ ให้กับขดลวดทองแดง เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้น ตัดกับสนามแม่เหล็กถาวรของแม่เหล็ก NdFeB จะทำให้ขดลวดทองแดงเกิดการเคลื่อนที่เข้ากระแทกกับก้านสูบ (Piston rod) ทำให้ของเหลวที่อยู่ภายในหัวฉีดเคลื่อนที่ผ่านรูหัวฉีดอย่างรวดเร็วเกิดเป็นลำเจ็ทขึ้น โดยในการศึกษานี้จะใช้น้ำเป็นเหลวที่ใช้ในการผลิตลำเจ็ท

2.2 อุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มที่ใช้ต้นกำลังจากสปริง

อุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มที่ใช้ต้นกำลังจากสปริงที่ใช้ในการศึกษา จะเป็นอุปกรณ์ส่งถ่ายยาที่มีขายในท้องตลาด โดยในการศึกษาได้เลือกใช้อุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มยี่ห้อ Comfort in ของบริษัท MK Global และบริษัท Mika Medical ประเทศเกาหลีใต้ [16] ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่เข็มสำหรับฉีด Insulin ของผู้ป่วยโรคเบาหวาน โดยขนาดรูหัวฉีดของอุปกรณ์ฯ เท่ากับ 0.15 mm และสามารถบรรจุของเหลว หรือยาได้สูงสุดเท่ากับ 0.5 mL



รูปที่ 2 อุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มยี่ห้อ
Comfort in [16]

2.3 การวัดความเร็วของลำเจ็ท

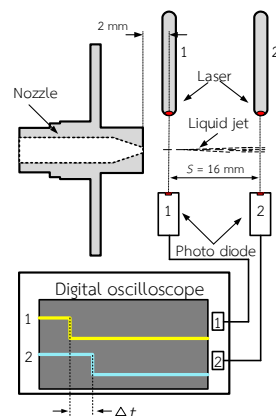
การวัดความเร็วของลำเจ็ทจะใช้วิธี Laser beam interruption ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยใช้หลักการการเคลื่อนที่ของวัตถุตัดกับแสงเลเซอร์ ซึ่งมีเลเซอร์จำนวน 2 ตัว วางห่างกัน 16 mm และใช้ Photodiode จำนวน 2 ตัว เป็นอุปกรณ์รับแสงจากแสงเลเซอร์ และถูกเชื่อมต่อกับเครื่อง Digital oscilloscope ในช่องสัญญาณที่ 1 และ 2 เมื่อวัตถุเคลื่อนที่ตัดกับแสงเลเซอร์ตัวที่ 1 และ 2 จะทำให้เกิดสัญญาณแสดงขึ้นบนหน้าจอของเครื่อง Digital oscilloscope ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งจากสัญญาณสามารถทราบผลต่างของเวลา (Δt) ได้ ดังนั้นจึงสามารถหาความเร็วของวัตถุที่เคลื่อนได้จากสมการที่ 1

$$V_j = \frac{S}{\Delta t} \quad (1)$$

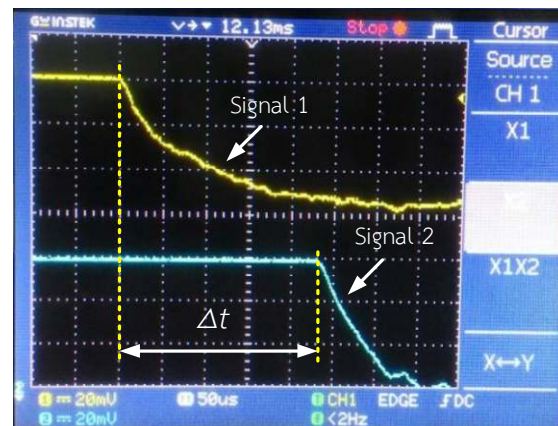
เมื่อ V_j คือ ความเร็วของวัตถุ, m/s

S คือ ระยะห่างของเลเซอร์, m

Δt คือ ผลต่างของเวลา, s



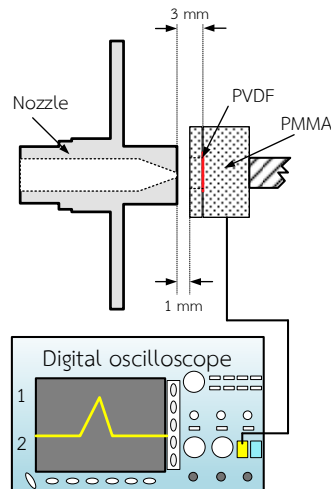
รูปที่ 3 Laser beam interruption method



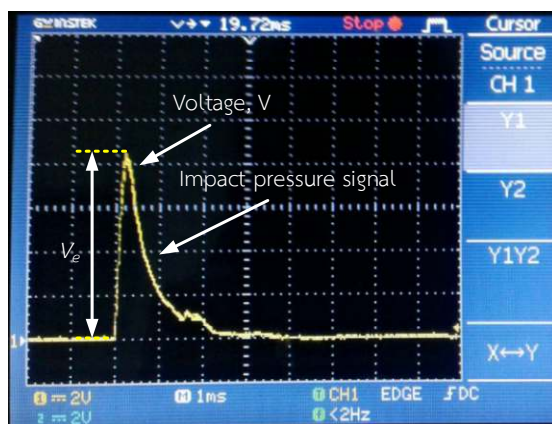
รูปที่ 4 สัญญาณการเคลื่อนที่ของวัตถุที่ตัดแสงเลเซอร์

2.4 การวัดความดันกระแทก

การวัดความดันกระแทก (Impact pressure) จะใช้แผ่น Polyvinylidene Fluoride (PVDF) ขนาดกว้าง 15 mm ยาว 25 mm และหนา 28 μm ติดตั้งไว้บน PMMA ขนาด 45x45 mm² และหนา 25 mm ดังแสดงในรูปที่ 5 เมื่อลำเจ็ทเคลื่อนที่เข้ากระแทกกับแผ่น PVDF ที่มีระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่น PVDF (Stand of distance) เท่ากับ 3 mm แผ่น PVDF จะตอบสนองต่อการกระแทกของลำเจ็ท และแสดงสัญญาณจากการกระแทกของลำเจ็ทขึ้นบนหน้าจอของเครื่อง Digital oscilloscope ในรูปแบบของสัญญาณแรงดันไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 5 การวัดความดันกระแทก



รูปที่ 6 สัญญาณจากการกระแทกของลำเจ็ท

รูปที่ 6 แสดงสัญญาณจากการกระแทกของลำเจ็ทในรูปแบบของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจากสัญญาณนี้สามารถคำนวณความดันกระแทกของลำเจ็ทได้โดยใช้สมการที่ 2 ซึ่งเป็นสมการจากการสอบเทียบแผ่น PVDF โดยใช้หลักการการดล และโมเมนตัม

$$P = 35.268V_e + 7.8274 \quad (2)$$

เมื่อ P คือ ความดันกระแทก, MPa

V_e คือ แรงดันไฟฟ้าที่ได้จาก PVDF, Volt

2.5 Polyacrylamide gel

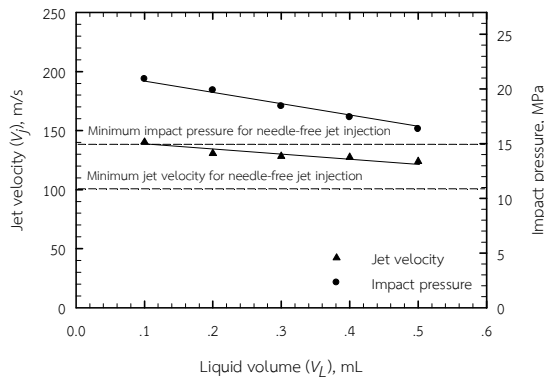
ในการทำนายพฤติกรรมการแพร่กระจายของลำเจ็ทหรือยา เมื่อฉีดเข้าไปในเนื้อเยื่อของมนุษย์ จะใช้ Polyacrylamide gel ในการทำนาย เนื่องจาก Polyacrylamide gel มีความโปร่งใส (Taberner, 2012) [12] และมีค่า young modulus ใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อของมนุษย์ โดยมีค่าเท่า 0.22 - 0.38 MPa ที่ความเข้มข้นของ Polyacrylamide gel เท่ากับ 20% - 30% [17] ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ Polyacrylamide gel ที่ความเข้มข้น 20% ในการศึกษาพฤติกรรมการแพร่กระจายดังกล่าว โดยการเตรียม Polyacrylamide gel ที่ความเข้มข้น 20% จะใช้ Acrylamide stock ที่ความเข้มข้น 40% (37.5 acrylamide/1 bis-acrylamide; BioRad Laboratories) ผสมกับน้ำกลั่น และใช้ Ammonium persulfate (APS) กับ N,N,N',N'-tetramethylethylenediamine (TEMED) เป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยา Polymerization

3. ผลการทดลอง

3.1 ความเร็ว และความดันกระแทกของลำเจ็ท

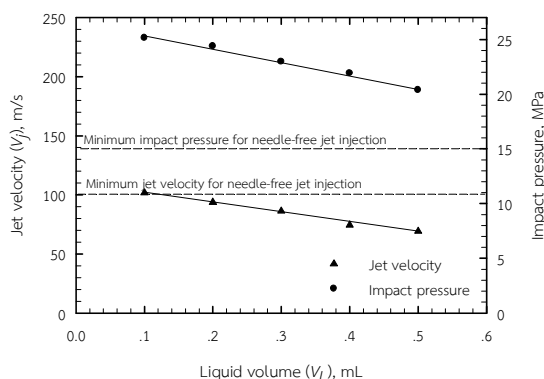
ผลการศึกษาความเร็ว และความดันกระแทกของลำเจ็ทของอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มที่ใช้ชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้า และชุดขับจากสปริงดังแสดงในรูปที่ 7 และรูปที่ 8 ตามลำดับ โดยอุปกรณ์ที่ใช้ชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้าจะใช้เงื่อนไขในการผลิตลำเจ็ทคือ Travelling distance (x_t) ดังแสดงในรูปที่ 1 เท่ากับ 5 mm แรงดันไฟฟ้า 500 Volt และขนาดรูหัวฉีดเท่ากับ 0.2 mm เนื่องจากการศึกษาของ Sripanagul G. และ Matthujak A. [18] พบว่า กรณีนี้อุปกรณ์ที่ใช้ชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้าจะสามารถผลิตลำเจ็ทที่มีความเร็วและความดันกระแทกผ่านเงื่อนไขสำหรับการส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มคือ ความเร็ว และความดันกระแทกของลำเจ็ทต้องมีค่ามากกว่า 100 m/s [12] และ 15 MPa [13] ตามลำดับ โดยในการศึกษาจะใช้ปริมาตรของเหลว

(Liquid volume) ในการผลิตลำเจ็ททั้งสองอุปกรณ์ เท่ากับ 0.1 – 0.5 mL



รูปที่ 7 อิทธิพลของปริมาตรต่อความเร็ว และความดัน กระแทกของลำเจ็ทของอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า โดยมีแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นชุดขับ

รูปที่ 7 แสดงอิทธิพลของปริมาตรต่อความเร็ว และความดันกระแทกของลำเจ็ทของอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า โดยมีแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นชุดขับ ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ความเร็ว และความดันกระแทกของลำเจ็ทมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาตรของเหลวเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความดันกระแทกที่อยู่ภายในหัวฉีด จากหลักการพลศาสตร์ของไหลอัดตัวได้ (Compressible fluid dynamic) โดยความเร็ว และความดันกระแทกของลำเจ็ทที่ผลิตได้มีค่าเท่ากับ 140.36 - 123.88 m/s และ 20.91 - 16.34 MPa ที่ปริมาตร 0.1 - 0.5 mL ตามลำดับ

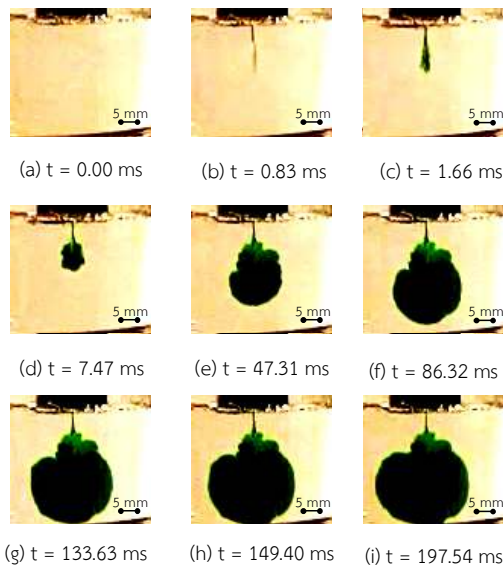


รูปที่ 8 อิทธิพลของปริมาตรต่อความเร็ว และความดัน กระแทกของลำเจ็ทของอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มที่ใช้ต้นกำลังจากสปริง

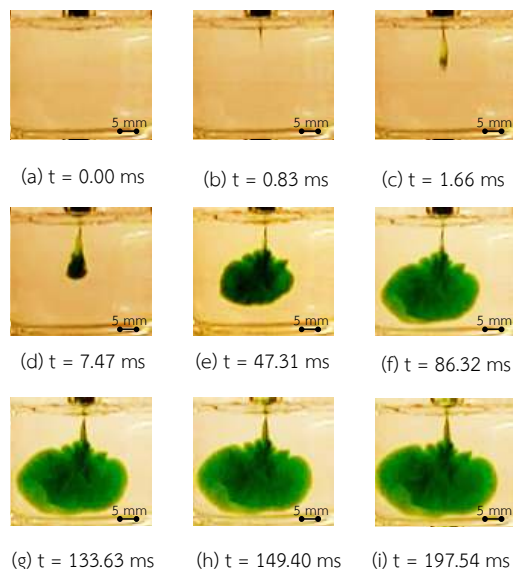
รูปที่ 8 แสดงอิทธิพลของปริมาตรต่อความเร็ว และความดันกระแทกของลำเจ็ทของอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มที่ใช้ต้นกำลังจากสปริง ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ความเร็ว และความดันกระแทกของลำเจ็ทมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาตรของเหลวเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันกับชุดต้นกำลังจากไฟฟ้า โดยความเร็ว และความดันกระแทกของลำเจ็ทที่ผลิตได้มีค่าเท่ากับ 101.69 - 69.16 m/s และ 25.14 - 20.37 MPa ที่ ปริมาตร 0.1 - 0.5 mL ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าความเร็วของลำเจ็ทที่ปริมาตร 0.2 - 0.5 mL มีค่าน้อยกว่าความเร็วตามเงื่อนไขที่ใช้สำหรับการส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็ม แต่อย่างไรก็ตามความดันกระแทกของชุดต้นกำลังจากสปริงมีค่าสูงกว่าความดันกระแทกตามเงื่อนไขคือ มากกว่า 15 MPa ดังนั้นจึงทำให้ อุปกรณ์ที่ใช้ต้นกำลังจากสปริงนี้สามารถเจาะชั้นผิวหนังของมนุษย์เพื่อทำการส่งถ่ายยาได้

3.2 พฤติกรรมการแพร่กระจาย

ผลการศึกษาพฤติกรรมการแพร่กระจายของลำเจ็ทเมื่อฉีดเข้าไปใน Polyacrylamide gel ที่ความเข้มข้น 20% ของอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า โดยมีแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นชุดขับ และชุดต้นกำลังจากสปริง ดังแสดงในรูปที่ 9 และรูปที่ 10 ตามลำดับ



รูปที่ 9 พฤติกรรมการแพร่กระจายของลำเจ็ทของอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไมใช้เข็มที่ใช้ต้นกำเนิดจากไฟฟ้า โดยมีแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นชุดขับ



รูปที่ 10 พฤติกรรมการแพร่กระจายของลำเจ็ทของอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไมใช้เข็มที่ใช้ต้นกำเนิดจากสปริง

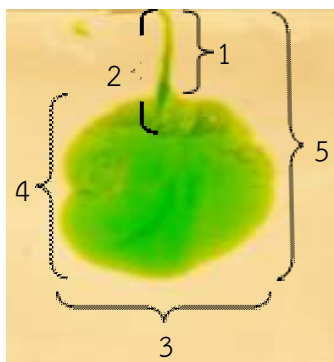
จากรูปที่ 9 และรูปที่ 10 แสดงพฤติกรรมการแพร่กระจายของลำเจ็ทของอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไมใช้เข็มที่ใช้ต้นกำเนิดจากไฟฟ้า โดยมีแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นชุดขับ

และชุดต้นกำเนิดจากสปริงตามลำดับ พบว่า พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของลำเจ็ทเมื่อฉีดเข้าไปใน Polyacrylamide gel สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระยะ ดังนี้ 1) ระยะแรกคือ ระยะเตรียมการฉีดตั้งแสดงในรูปที่ 9a และ 10a 2) ระยะการเจาะคือ ระยะที่ลำเจ็ทเจาะเข้าไปใน Polyacrylamide gel ดังแสดงในรูปที่ 9b และ 10b ซึ่งในระยะนี้ลำเจ็ทจะมีความเร็ว และความดันกระแทกสูง โดยที่ความลึกของการเจาะ (Hole) จะขึ้นอยู่กับความเร็ว และความดันกระแทกของลำเจ็ท และเวลาที่ใช้ในระยะนี้น้อยมากเมื่อเทียบกับระยะถัดไป 3) ระยะการแพร่กระจายคือ ระยะที่ของเหลวเริ่มเกิดการแพร่กระจายออกจากจุดกึ่งกลางของ Hole ดังแสดงในรูปที่ 9c – 9i และ 10c – 10i ซึ่งระยะเวลาในการแพร่กระจายขึ้นอยู่กับปริมาณของเหลว และความเร็วของลำเจ็ท

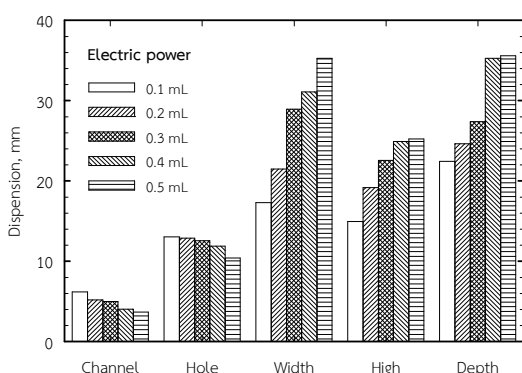
จากรูปที่ 9c และรูปที่ 10c จะเห็นได้ว่าระยะของการเจาะ (Hole) ของอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไมใช้เข็มที่ใช้ต้นกำเนิดจากไฟฟ้า โดยมีแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นชุดขับจะมีความลึกมากกว่าชุดจากสปริง นั้นหมายความว่าชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้าใช้ระยะเวลาในการเจาะสั้นกว่าอุปกรณ์ที่ใช้ต้นกำเนิดจากสปริง เนื่องจากความเร็วของลำเจ็ทของอุปกรณ์ที่ใช้ชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้ามีความเร็วของลำเจ็ทที่สูงกว่า ซึ่งคาดว่าจะลดความรู้สึกเจ็บปวดของผู้ที่ถูกฉีดได้ดีกว่าชุดขับจากสปริง เนื่องจากใช้ระยะเวลาเจาะที่สั้นกว่า

3.3 รูปร่างการแพร่กระจาย

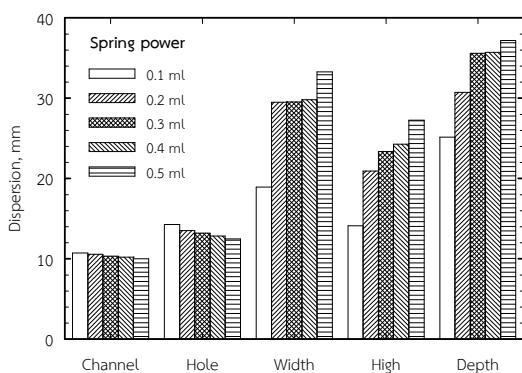
ลักษณะรูปร่างการแพร่กระจายของลำเจ็ทเมื่อฉีดเข้าไปใน Polyacrylamide gel จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 รูปแบบดังนี้ 1) ความลึกขอบบนของการแพร่กระจาย (Channel) 2) ความลึกของการเจาะ (Hole) 3) ความสูงของการแพร่กระจาย (High) 4) ความกว้างของการแพร่กระจาย (Width) และ 5 ความลึกสูงสุดของการแพร่กระจาย (Depth) ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 ลักษณะรูปร่างการแพร่กระจายของลำเจ็ท



รูปที่ 12 การแพร่กระจายของอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า โดยมีแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นชุดขับ



รูปที่ 13 การแพร่กระจายของอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มที่ใช้ต้นกำลังจากสปริง

รูปที่ 12 และรูปที่ 13 แสดงการแพร่กระจายของลำเจ็ทที่ปริมาตร 0.1 - 0.5 mL ของอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า โดยมีแม่เหล็กไฟฟ้าเป็น

ชุดขับ และชุดต้นกำลังจากสปริงตามลำดับพบว่า รูปแบบการแพร่กระจายของอุปกรณ์ฯ ทั้ง 2 มีความคล้ายคลึงกัน โดยที่ระยะของ Channel และ Hole จะมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากความเร็ว และความดันกระแทกของลำเจ็ทลดลงเมื่อปริมาตรเพิ่มขึ้น ส่วนระยะของ High, Width และ Depth จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาตรของลำเจ็ทเพิ่มขึ้น ดังนั้นอาจเป็นไปได้ว่าในอนาคตชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถประยุกต์ใช้เป็นชุดขับของอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มได้ และเมื่อพิจารณาระยะ Hole ของทั้ง 2 อุปกรณ์พบว่า ระยะ Hole ของอุปกรณ์ฯ ที่ใช้ต้นกำลังจากสปริงจะมีความลึกมากกว่าอุปกรณ์ฯ ที่ใช้ชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้าในทุกๆ ปริมาตร เนื่องจากความดันกระแทกของอุปกรณ์ฯ ที่ใช้ต้นกำลังจากสปริงมีความดันกระแทกสูงกว่า

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาพฤติกรรมของลำเจ็ทเมื่อฉีดเข้าไปใน Polyacrylamide gel ของอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มที่ใช้ต้นกำลังจากไฟฟ้า โดยมีแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นชุดขับ และชุดต้นกำลังจากสปริงสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) ความเร็ว และความดันกระแทกของอุปกรณ์ฯ ทั้งสอง อุปกรณ์ฯ จะมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาตรของลำเจ็ทเพิ่มขึ้น
- 2) พฤติกรรมการแพร่กระจายของลำเจ็ททั้ง 2 อุปกรณ์สามารถแบ่งได้ 3 ระยะ คือ ระยะแรก, ระยะเจาะ และระยะการแพร่กระจาย
- 3) ระยะของ Channel และ Hole จะขึ้นอยู่กับความเร็ว และความดันกระแทกของลำเจ็ท ส่วนระยะของ High, Width และ Depth จะขึ้นอยู่กับปริมาตรของลำเจ็ท
- 4) ลักษณะรูปร่างของการแพร่กระจายของลำเจ็ททั้ง 2 อุปกรณ์ฯ มีลักษณะคล้ายคลึงกัน
- 5) ชุดขับจากแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถประยุกต์ใช้เป็นชุดขับของอุปกรณ์ส่งถ่ายยาแบบไม่ใช้เข็มได้ในอนาคต



5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สัญญา เลขที่ RSA5780001 ที่ให้ทุนสนับสนุน

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Jiang, H., Du, C. and Dong, J. (2017). Investigation of rock cutting dust formation and suppression using water jets during mining. *Powder Technology*. 2017, pp. 99-108.
- [2] 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.
- [3] Shi, H.H., Takayama, K. and 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.
- [4] Lee, S., Tanaka, D., Kusaka, J. and 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.
- [5] Lee, K.H., Lee, C.H. and 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.
- [6] Rau, H.G., Buttler, E.R., Baretton, G., Schardey, H.M. and Schildberg, F.W. (1997). Jet-cutting Supported by High Frequency Current: New Technique for Hepatic Surgery. *WORLD Journal of SURGERY*. Vol. 21(3),1997, pp. 259-260.
- [7] 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. *Laser Surg Med*, vol. 34(3), 2004, pp. 237-234.
- [8] Nakagawa, A., Hirano Takayuki, K. Makoto Sato, M., Uenohara, H., Ohyama, H., Kusaka, Y., Shirane, R., Takayama, K. and 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.
- [9] 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 impairing vessels. *Minim InvasNeurosurg*, vol. 46(2), 2003, pp. 121-125.
- [10] Baxter, Joy. and Mitragotri, S. (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.
- [11] Stachowiak, J.C., Muhlen, M.G., Li, T.H., Jalilian, L., Parekh, S.H., Fletcher, D.A. (2007). Piezoelectric control of needle-free transdermal drug delivery. *Journal of Controlled Release*, 124(2): 88-97.
- [12] 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.



[13] Shergold, O.A., Fleck, N.A., King, T.S. (2006). The penetration of a soft solid by a liquid jet, with application to the administration of a needle-free injection. *Journal of Biomechanics*, 39(14): 2593-2602.

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

[15] Matthujak, A., Hosseini, S.H.R., Takayama, K. and Voinovich, P. (2007). High-speed liquid jet formation by impact acceleration method. *Shock wave*, 16 (6): 405-419.

[16] MK Global Co., and Mika Medical Co., needle-free jet injection technology. South Korea. URL:<http://www.comfort-in.com>. เข้าดูเมื่อ วันที่ 27/04/2560

[17] Baxter. S. J., Katrencik. J., and Mitragotri. S., (2004). Jet injection into polyacrylamide gels: investigation of jet injection mechanics. *Journal of Biomechanics*, 37(8): 1181-1188.

[18] Sripanagul, G. and Matthujak, A. (2017). Fundamental Study of Electromagnetic Actuated Needle-Free Jet Injection, *Trend in Science and Engineering Research International Conference (TiSERIC)*, Penang, Malaysia, 2017.