

## บทที่ 4

### การดำเนินการทดลอง

การศึกษาปรากฏการณ์การไหล คุณลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูง เพื่อประยุกต์ใช้สำหรับการนำส่งยาผ่านผิวหนังนั้น จำเป็นจะต้องมีเครื่องมือ อุปกรณ์ หรือวิธีที่เหมาะสม ในบทนี้เราจะได้เสนอ หลักการและรายละเอียดของอุปกรณ์ในการทดลอง ที่เป็นชุดทดลองและเครื่องมือวัดต่างๆ อุปกรณ์ที่ใช้สร้างลำพุ่งมี 2 ลักษณะ แบ่งตามลักษณะของต้นกำเนิดกำลังขับ ได้แก่ แบบที่ 1 ใช้กำลังจากสปริง และ แบบที่ 2 ใช้กำลังจากแก๊ส คุณลักษณะของลำพุ่ง คือ ความเร็ว (Jet velocity) และความดันกระแทก (Impact pressure) จะวัดด้วย Photo detector และ PVDF film ตามลำดับ นอกจากนี้ ยังมีระบบถ่ายภาพด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง (High Speed Video Camera, HSVC) เพื่อจับภาพปรากฏการณ์การกำเนิดลำพุ่งและการเจาะผ่านเนื้อเยื่อจำลอง

#### 4.1 อุปกรณ์กำเนิดลำพุ่งเพื่อนำส่งของเหลวผ่านผิวหนัง

ดังที่กล่าวไว้ในตอนต้นแล้วว่าในการศึกษานี้ เราใช้อุปกรณ์ 2 แบบ แบ่งตามลักษณะของต้นกำเนิดกำลังขับ ได้แก่ แบบที่ 1 กำลังขับจากสปริง โดยเป็นอุปกรณ์ที่มีการจัดจำหน่ายในท้องตลาดของบริษัท Merck ผลิตโดยบริษัท Bioject รุ่น Cool.Click และ แบบที่ 2 กำลังขับจากแก๊ส ซึ่งจะเป็นอุปกรณ์เพื่อการทดลองโดยต้นกำเนิดสร้างแรงดันแก๊สได้จากระบบไฮโดรลิก รายละเอียดของอุปกรณ์การทดลอง แสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

##### 4.1.1 อุปกรณ์ขับด้วยสปริง: Cool. Click

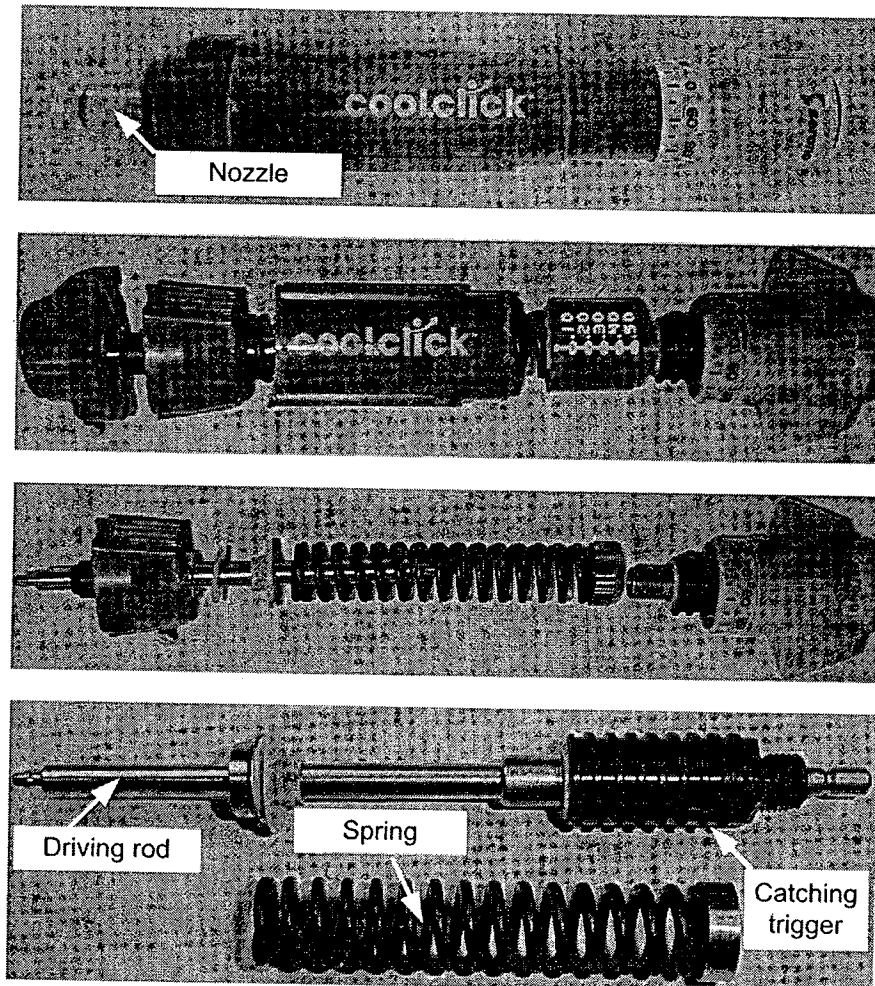
Cool.Click เป็นอุปกรณ์นำส่ง โสโมนเร่งการเจริญเติบโต Saizen ซึ่งจัดจำหน่ายโดยบริษัท Merck ประจำประเทศไทย ตัวอุปกรณ์ผลิตโดยบริษัท Bioject Medical Technologies ซึ่งข้อมูลเบื้องต้นของอุปกรณ์แสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.1ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีน้ำหนักเบาและขนาดเล็ก อีกทั้งยังสามารถบรรจุยาได้ในปริมาณระดับ 0.02 ml เป็นอุปกรณ์ที่ใช้แรงขับจากสปริงฉีดได้ความลึกระดับปานกลาง (ถึงชั้น Subcutaneous แต่ไม่ถึงชั้นการฉีด Intramuscular)

รูปร่างลักษณะภายนอกและกลไกการทำงานภายในของ Cool.Click แสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งมีองค์ประกอบหลัก 4 ส่วน คือ อันที่ 1 หัวฉีด (Nozzle) อันที่ 2 แท่งกด (Driving rod) อันที่ 3 สปริง (Spring) และอันสุดท้าย คือ ไกยัดแท่งกด (Catching trigger) ซึ่งแต่ละส่วนจะทำงานสอดคล้องกันเพื่อสร้างลำพุ่งความเร็วสูงโดยหัวฉีดซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.17 mm ทำหน้าที่บรรจุยาที่เป็นของเหลว ซึ่งจะถูกอัดให้มีความดันสูงด้วยแท่งกดที่ถูกดันจากแรงขยายตัวของสปริง ทั้งนี้ในขั้นแรกของการทำงานของไกยัดแท่งกดจะหมุนเลื่อนตำแหน่งเพื่อกดให้สปริงยุบตัวพร้อมกับเข้าจับแท่งกด ก่อนจะปล่อยไกให้แท่งกดขับของเหลวในหัวฉีด

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลเบื้องต้นของ Cool.Click<sup>1</sup>

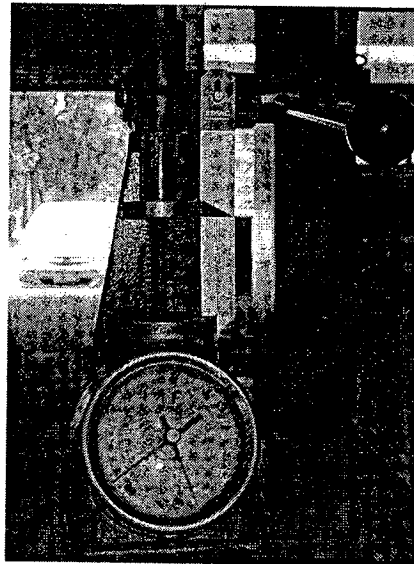
ลักษณะ	ข้อมูล
ความยาว	155 mm
น้ำหนัก	158 g
ช่วงอุณหภูมิการทำงาน	14°-38° C
ต้นกำเนิดกำลังขับ	สปริง
ขนาดบรรจุยา	0.02 – 0.5 ml
ช่วงเวลาทำงาน	300 ms
ชั้นความลึกของการฉีด	Subcutaneous

<sup>1</sup>ที่มาจาก เว็บไซต์ของ บริษัท Bioject Medical Technologies (<http://www.bioject.com>)

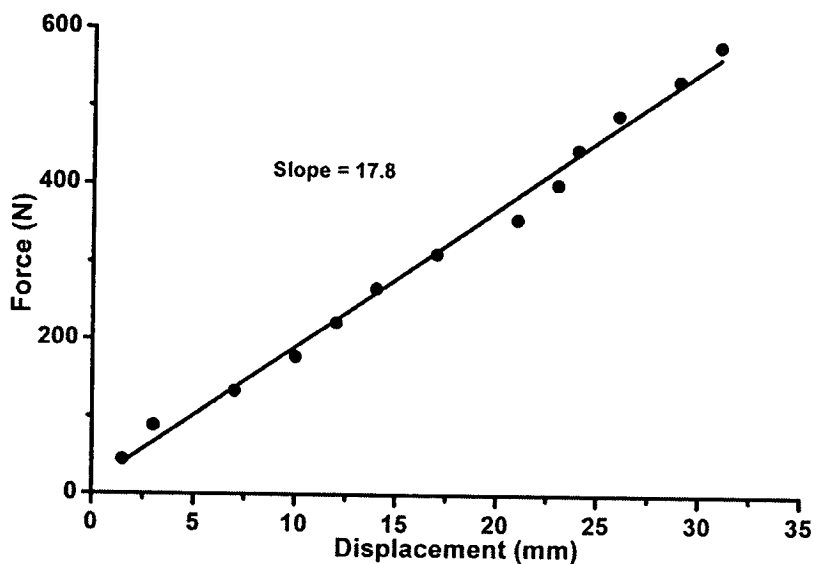


รูปที่ 4.1 ลักษณะและกลไกของอุปกรณ์นำส่งยาด้วยลำพุ่งความเร็วสูงแบบขับเคลื่อนด้วยสปริง

จากรายละเอียดข้างต้น จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติของสปริงเป็นปัจจัยที่จะกำหนด ความแรงของลำพุง ความลึกของการเจาะ และลักษณะการกระจายตัวในเนื้อเยื่อของยา ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะขยับกับแรงกดสปริงด้วยเครื่องทดสอบแรงกดของสปริง (RIMAC) แสดงการทดสอบ และผลที่ได้ ดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 การทดสอบแรงกดของสปริง

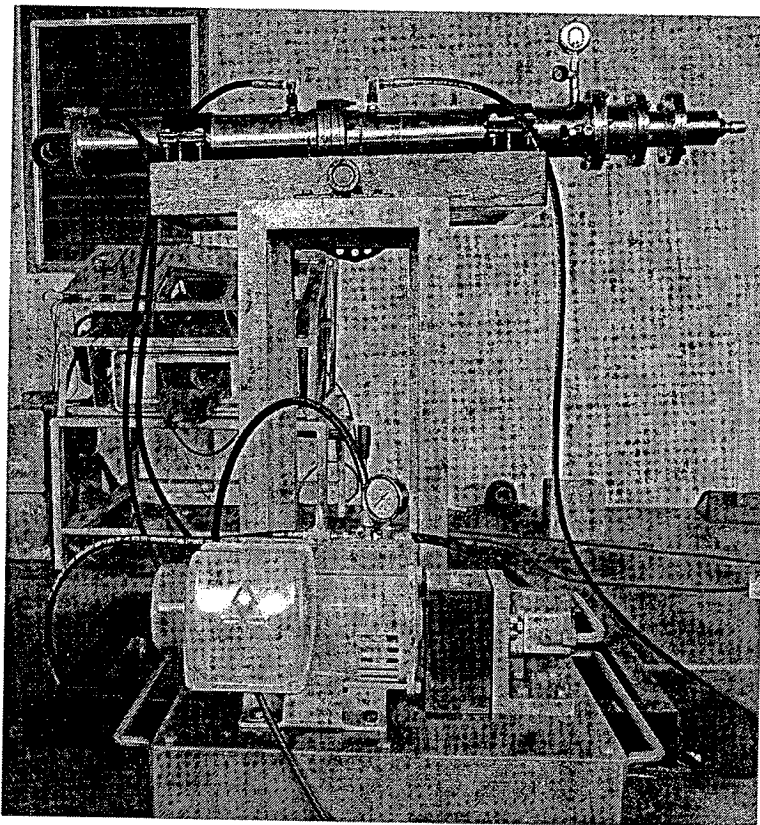


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะขยับกับแรงกดของสปริง

จากรูปที่ 4.3 จะพบว่าหากระยะขยับของสปริงเพิ่มมากขึ้นแรงกดจะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น โดยกราฟมีความชัน หรือค่าคงที่ของสปริง (Spring constant) เท่ากับ 17.8 N/mm

#### 4.1.2 อุปกรณ์ขับเคลื่อนด้วยแก๊สแรงดันสูง: Med-jet NFIS

เพื่อการศึกษาคุณลักษณะต่างๆของการฉีดลำพ่นด้วยแรงขับจากก๊าซแรงดันสูง งานวิจัยนี้ จึงได้ทำการสร้างชุดต้นแบบเพื่อการทดลองที่สามารถปรับเปลี่ยนเงื่อนไข ได้ตามที่ต้องการศึกษา ทีมผู้วิจัยเรียกชุดทดลองนี้ว่า Med-jet NFIS ซึ่งย่อมาจาก คำว่า “Medical Jet Needle Free Injection System” โดยใช้แรงขับต้นกำลังจาก ระบบไฮดรอลิก ดังแสดงในรูปที่ 4.4 แต่อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์ ก่อนข้างมีขนาดใหญ่และนำไปใช้จริงได้ยาก เนื่องจากเป็นชุดต้นแบบเพื่อการทดลอง ชุดทดลองนี้ มีส่วนประกอบ หลักการทำงานและการปรับเทียบ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

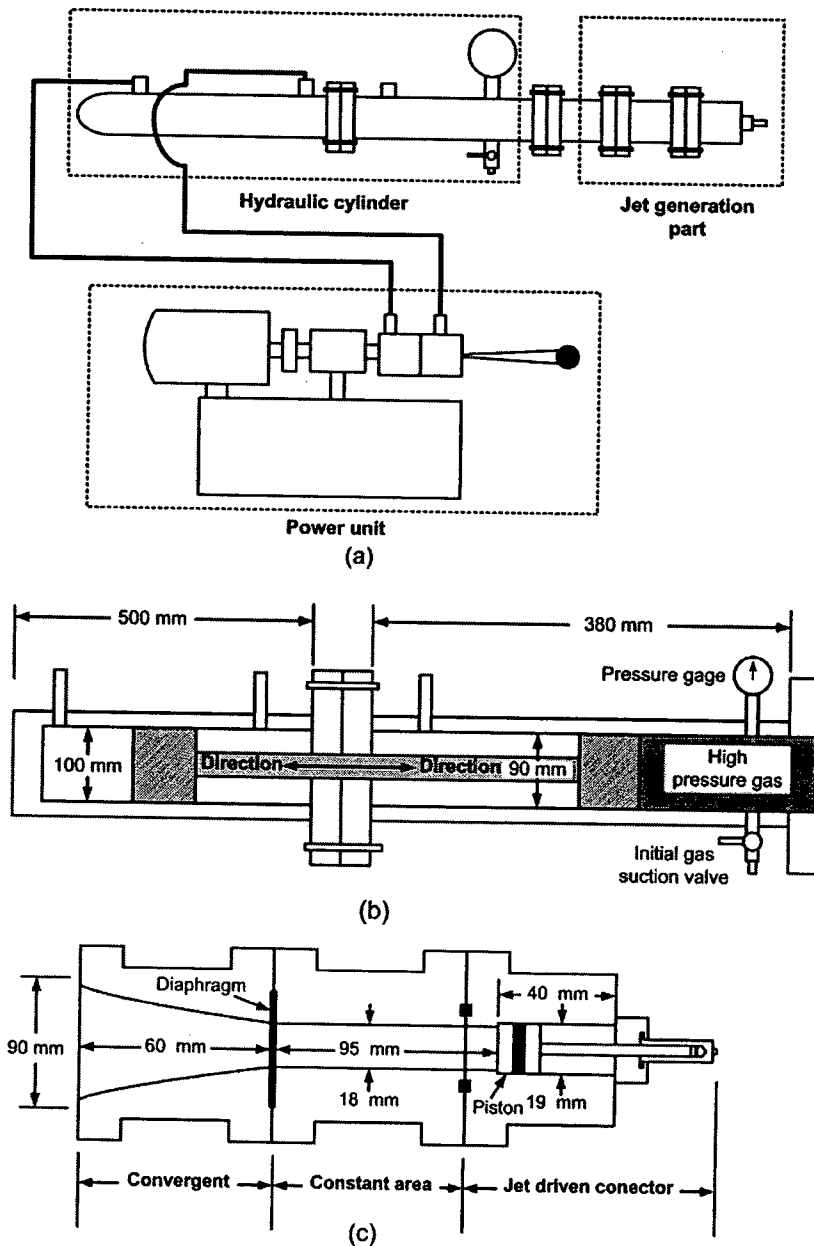


รูปที่ 4.4 Med-jet NFIS

##### 1) ส่วนประกอบและขั้นตอนการทำงาน

แผนภาพการทำงานและส่วนประกอบของ Med-jet NFIS แสดงดังรูปที่ 4.5 (a) ซึ่ง ส่วนประกอบหลักของระบบที่สำคัญ ได้แก่ ชุดต้นกำลัง (Power unit) กระบอกไฮดรอลิก (Hydraulic cylinder) และชุดขับลำพ่น ซึ่งแต่ละส่วนจะทำหน้าที่ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ชุดต้นกำลัง ของระบบไฮดรอลิก ประกอบไปด้วย ถังพักน้ำมัน ปั๊มไฮดรอลิก มอเตอร์ ไฟฟ้า 1 เฟส และ วาล์วไฮดรอลิกแบบ 3/4 โดยชุดต้นกำลังจะทำหน้าที่ควบคุม การไหลเวียนเข้า-ออกของน้ำมันในกระบอกไฮดรอลิกผ่านวาล์วเป็นควบคุมการเคลื่อนที่ ไป-กลับ ของลูกสูบใน กระบอกไฮดรอลิก



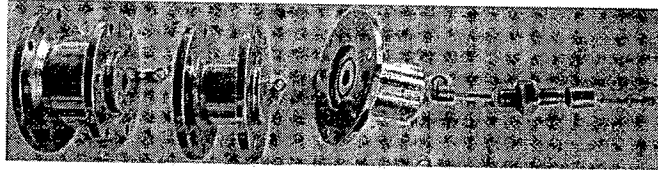
รูปที่ 4.5 ระบบสร้างลำพู่ด้วยแก๊สแรงดันสูง: (a) แผนภาพโดยรวมของ Med-jet NFIS

(b) ครอบกไฮดรอลิก และ (c) ชุดขับลำพู่

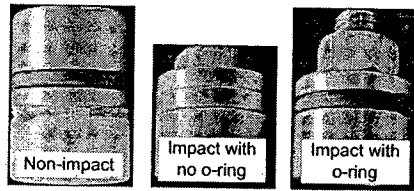
ครอบกไฮดรอลิก ทำหน้าที่อัดแก๊สที่อยู่ด้านหน้าลูกสูบให้มีแรงดันเพิ่มขึ้น รายละเอียดของครอบกไฮดรอลิก แสดงในรูปที่ 4.5 (b) จะเห็นได้ว่าเป็นครอบกไฮดรอลิกสองอันที่มีแกนลูกสูบแกนเดียว โดยครอบกตัวที่ 2 จะมีเฉพาะทางเข้าเพื่อดันไปข้างหน้าอย่างเดียว ทั้งนี้ส่วนปลายของครอบกจะถูกทำเป็นห้องรับก๊าซแรงดันสูง (High pressure gas) พร้อมกับป้องกันการรั่วไหลของก๊าซ ซึ่งที่ปลายของครอบกไฮดรอลิกจะมีที่เติมก๊าซเริ่มต้น (Initial gas suction valve) และเกจวัดแรงดัน เพื่อใช้อ่านค่าขณะทำการทดลอง

ชุดขับลำพุ่ง เป็นชุดต่อที่ทำหน้าที่นำก๊าซแรงดันสูง ไปสร้างลำพุ่ง โดยมีรายละเอียดดังรูปที่ 4.5 (c) และ แสดงหน้าแปลนประกอบดังรูป 4.6 ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

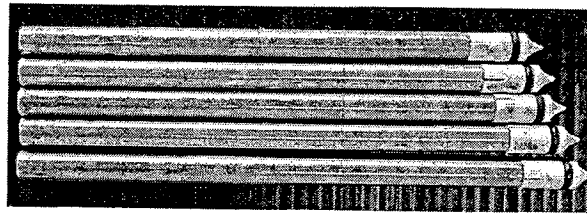
1) ท่อลู่เข้า (Convergence) ทำหน้าที่เพิ่มความเร็วและทำให้การไหลของแก๊สขณะกระบวนการสร้างลำพุ่งมีความสม่ำเสมอ โดยที่ทางออกของท่อจะมีแผ่นไดอะแฟรม ซึ่งจะแตกเมื่อแรงดันที่ห้องท่อลู่เข้าสูงถึงระดับที่ไดอะแฟรมทนต่อแรงดันไม่ได้ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า แผ่นไดอะแฟรม เปิดวาล์วแรงดันสูง ที่เปิด - ปิด ได้เร็ว เมื่อไดอะแฟรมแตก ก๊าซแรงดันสูงจะไหลเข้าสู่ส่วนของท่อพื้นที่หน้าตัดคงที่



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 4.6 อุปกรณ์ต่อพ่วงของ Med-jet NFIS (a) หน้าแปลนประกอบ (b) ลักษณะของลูกสูบขับ และ (c) แท่งกดขนาดต่างๆ

2) ท่อหน้าตัดคงที่ (Constant area) จะติดตั้งอยู่ระหว่างแผ่นไดอะแฟรมกับส่วนต่อขับลำพุ่ง ทำหน้าที่ควบคุมความสม่ำเสมอของก๊าซที่ไหลจากท่อลู่เข้า หลังการแตกของแผ่นไดอะแฟรม ซึ่งก๊าซแรงดันสูงนี้จะไหลผ่านท่อหน้าตัดคงที่ ไปดันลูกสูบในห้องส่วนต่อขับพุ่งให้เคลื่อนที่

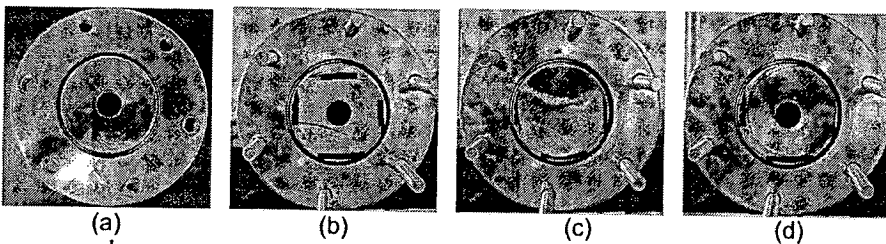
3) ส่วนต่อขับลำพุ่ง (Jet driven connector) ทำหน้าที่สร้างลำพุ่งความเร็วสูง ด้วยการเคลื่อนที่ของลูกสูบให้ดันแท่งกด เพื่ออัดของเหลวในหัวฉีดให้มีความเร็ว ในการศึกษานี้ลูกสูบนี้น้ำหนักเท่ากับ 43 กรัม และมี 3 ลักษณะ ตามเงื่อนไขการชนบนแท่งกด ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (b) คือ แบบที่ 1 ไม่กระทบแท่งกด (Non-impact) ตำแหน่งเริ่มต้นจะวางชิดกับแท่งกด แบบที่ 2 และ 3 จะเป็นแบบกระทบแท่งกด ตำแหน่งเริ่มต้นวางห่างจากแท่งกด 10 มิลลิเมตร โดยลูกปืนเป็นแบบไม่มีโอริง (Impact with no o-ring) และมีโอริง (Impact with o-ring) ตามลำดับ นอกจากนี้

เพื่อการศึกษาอิทธิพลของปริมาตรในหัวฉีดที่มีผลต่อคุณลักษณะของลำพู่ ซึ่งแท่งกดมีความยาวแตกต่างกัน(ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (c)) ตามปริมาตรที่บรรจุในหัวฉีด ทั้งนี้เพื่อรักษาระยะกระแทกของลูกสูบให้คงที่

## 2) การเปรียบเทียบชุดทดลองของ Med-jet NFIS

เนื่องจากความดันแตกของแผ่นไดอะแฟรมเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการขับลำพู่ด้วยก๊าซแรงดันสูง ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับความแข็งแรงหรือความหนาของแผ่นไดอะแฟรม ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและชนิดของวัสดุ กับความดันแตก เพื่อเป็นข้อมูลในการเลือกความดันที่จะใช้ในการทดลอง

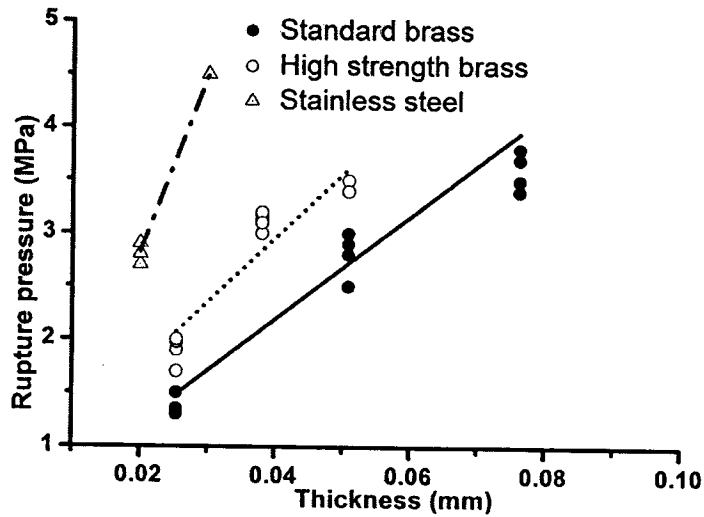
ในการศึกษานี้ แผ่นไดอะแฟรมที่ใช้ จะเป็นแผ่นโลหะบาง 3 ชนิด ได้แก่ แบบที่ 1 แผ่นทองเหลืองทั่วไป หนา 0.0254 - 0.0762 มิลลิเมตร (0.001- 0.003 นิ้ว) แบบที่ 2 แผ่นทองเหลืองคุณภาพสูง (มีความแข็งและเหนียวมากกว่าแผ่นทองเหลืองทั่วไป) หนา 0.0254 - 0.0762 มิลลิเมตร และ แบบที่ 3 แผ่นสแตนเลส หนา 0.02 - 0.03 มิลลิเมตร ซึ่งลักษณะการใส่และการแตกหลังการใช้งานของไดอะแฟรมแสดงดังรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่า ที่หน้าประกบของไดอะแฟรมจะมีโอลิงและแผ่นกันรั่วหนา 0.5 มิลลิเมตร ทับอยู่ (ดังในรูปที่ 4.7 (b)) ทั้งนี้เพื่อไม่ให้ก๊าซรั่วไหล ขณะทำงาน



รูปที่ 4.7 ลักษณะการวางแผ่นไดอะแฟรมและการแตกหลังการใช้งาน

ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนา และชนิดของวัสดุ กับความดันแตก แสดงดังกราฟในรูปที่ 4.8 พบว่าความดันแตกของแผ่นไดอะแฟรมที่ความหนา 0.02 – 0.08 มิลลิเมตร จะมีค่าอยู่ในช่วง 1.5 – 4.5 MPa เมื่อความหนาของแผ่นไดอะแฟรมเพิ่มขึ้น ความดันแตกจะมีค่าสูงขึ้น และความดันแตกสูงของสแตนเลสมีค่าสูงกว่าทองเหลือง เมื่อเทียบความหนาเดียวกัน เนื่องจากสแตนเลสมีความแข็งแรง มากกว่าทองเหลืองนั่นเอง

ตารางที่ 4.2 แสดงลักษณะการฉีกขาดของแผ่นไดอะแฟรมแต่ละชนิด ที่ความหนาต่างๆ จะเห็นได้ว่า เมื่อความหนาหรือความแข็งแรงของแผ่นไดอะแฟรมเพิ่มขึ้น รอยหลังการแตกจะมีลักษณะราบเรียบ (เป็นวงกลม) ต่างจากแผ่นที่แข็งแรงน้อย รอยแตกจะเป็นริ้ว เพราะบางส่วนขาดและหลุดออกไม่หมด ซึ่งอาจทำให้ซัดขวางการไหลของก๊าซได้ ดังนั้นหมายความว่ายิ่งแรงดันแตกสูงขึ้น ประสิทธิภาพการทำงานของแผ่นไดอะแฟรมยิ่งดีขึ้น



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนา และชนิดของวัสดุ กับความดันแตก

ตารางที่ 4.2 แสดงลักษณะการฉีกขาดของแผ่นไดอะแฟรมแต่ละชนิด

ชนิด	ความหนา (mm)	ลักษณะการแตก
แบบที่ 1 แผ่นทองเหลืองทั่วไป	0.0254	
แบบที่ 1 แผ่นทองเหลืองทั่วไป	0.0508	
แบบที่ 1 แผ่นทองเหลืองทั่วไป	0.0762	
แบบที่ 2 แผ่นทองเหลืองคุณภาพสูง	0.0254	
แบบที่ 2 แผ่นทองเหลืองคุณภาพสูง	0.0381	
แบบที่ 2 แผ่นทองเหลืองคุณภาพสูง	0.0508	
แบบที่ 3 สเตนเลส	0.01	
แบบที่ 3 สเตนเลส	0.03	

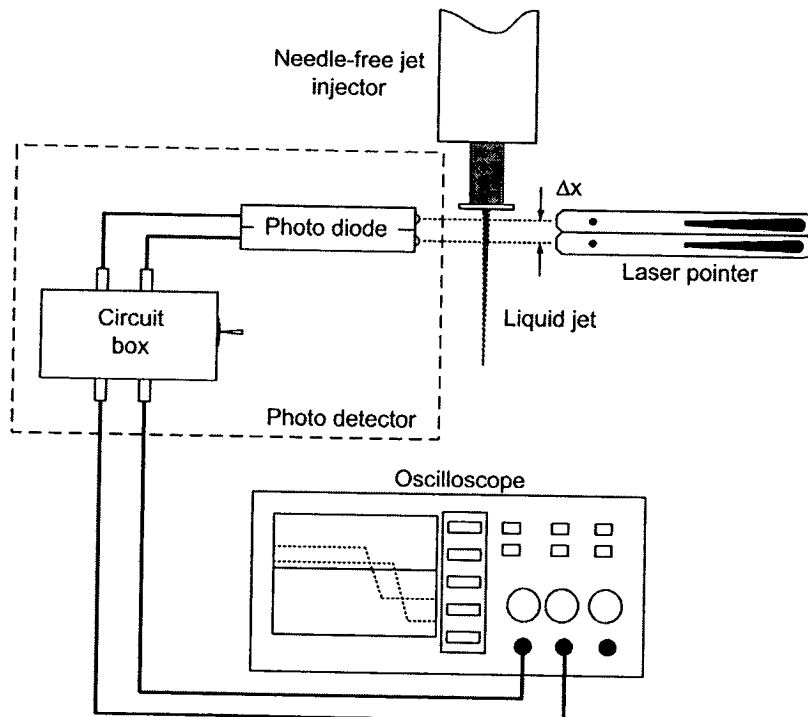
## 4.2 หลักการวัดความเร็วและความดันกระแทกของลำพุ่ง

การศึกษาการทำงานของอุปกรณ์ฉีดลำพุ่งเพื่อนำส่งยา มีพารามิเตอร์ที่สำคัญ 2 ค่าที่ชี้วัดประสิทธิภาพของลำพุ่ง คือ ความเร็วออก (Exit velocity) และความดันกระแทก (Impact velocity) ซึ่งในหัวข้อนี้จะได้กล่าวรายละเอียดหลักการและอุปกรณ์สำหรับวัดพารามิเตอร์เหล่านี้

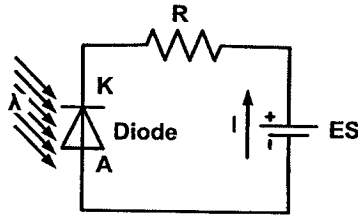
### 4.2.1 การวัดเร็วความเร็วด้วย หลักการตัดแสงของวัตถุ

ในงานวิจัยนี้เราใช้หลักการที่เรียกว่า “การตัดแสงเลเซอร์ของวัตถุ (Laser beam interrupt method)” เพื่อวัดความเร็วของลำพุ่งที่ออกจากหัวฉีด ดังแสดงดังรูปที่ 4.9 โดยอาศัยการตัดลำแสงที่ส่องไปยังโฟโตไดโอด (Photo diode) ของวัตถุ โดยโฟโตไดโอดจะต่อเข้ากับวงจรไฟฟ้า มีรายละเอียดของวงจรดังแสดงในรูปที่ 4.10 วงจรประกอบด้วยตัวต้านทานแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้า (Battery) และ โฟโตไดโอด จะเห็นได้ว่า ขนาดแรงดันไฟฟ้าของวงจรนี้ นอกจากจะขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าและขนาดตัวต้านทานแล้ว ยังขึ้นอยู่กับความเข้มแสงที่ส่องบนโฟโตไดโอดอีกด้วย ซึ่งเราเรียกอุปกรณ์ที่ต่อวงจรไฟฟ้าลักษณะนี้ว่า ชุดตรวจจับความเข้มแสง (Photo detector) ซึ่งรายละเอียดจำเพาะของชุดตรวจจับความเข้มแสงในงานวิจัยนี้แสดงไว้บนตารางที่ 4.3

สำหรับการประยุกต์เพื่อวัดความเร็วของวัตถุ นั้น จะต้องมียังวงจรตรวจจับความเข้มแสงที่ประกอบด้วยโฟโตไดโอด และตัวกำเนิดแสงเลเซอร์ (Laser source) สองคู่ โดยวางแต่ละคู่ ให้หันหน้าเข้าหากัน และทั้งคู่จะวางห่างกันคงที่ ( $\Delta x$  ที่นี้ห่างกัน 12.5 มิลลิเมตร) วงจรตรวจจับความเข้มแสงจะมีแรงดันและกระแสไฟฟ้าวิ่งเมื่อเปิดตัวกำเนิดแสงเลเซอร์ และแรงดันไฟฟ้าจะลดลง หากมีวัตถุบังลำแสง



รูปที่ 4.9 การวัดความเร็วลำพุ่งด้วยหลักการตัดเลเซอร์



รูปที่ 4.10 วงจรไฟฟ้าของชุดตรวจจับความเข้มแสง

ตารางที่ 4.3 รายละเอียดจำเพาะของชุดตรวจจับความเข้มแสง

ตัวกำเนิดแสงเลเซอร์ (Laser pointer)	รายละเอียด
กำลัง (Power)	50 mW
ความยาวคลื่น	650 nm
เส้นผ่านศูนย์กลางตัวเรือน	12.5 mm
ยี่ห้อ	Infiniter รุ่น 100 × 2
แหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้า	AAA × 2

โฟโตไดโอด (Photo diode)	
ชนิด	Silicon PIN
ช่วงความยาวคลื่นที่รับ	Visible light (380 – 740 nm)
เส้นผ่านศูนย์กลางตัวรับแสง	5 mm
มุมรับแสง	20 องศา

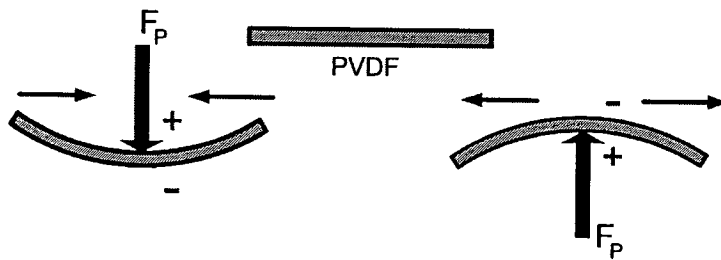
วงจรชุดตรวจจับความเข้มแสง	
แหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้า	Battery ขนาด 1 Volt
ขนาดตัวต้านทาน	2 กิโลโอห์ม

จากหลักการและการติดตั้งข้างต้น การวัดความเร็วของลำพู่แสงนั้นสามารถทำได้ด้วย การตรวจจับ (Trigger) ช่วงเวลา ( $\Delta t$ ) ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากการบังแสงเลเซอร์ของลำพู่ของเส้นแรก และเส้นที่สอง ด้วยออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) โดยวางระยะห่างของเลเซอร์ ( $\Delta x$ ) คงที่เท่ากับ 12.5 มิลลิเมตร ซึ่งจะได้ความเร็วของลำพู่ ( $v_j$ ) ตามสมการ (4.1) ดังนี้

$$v_j = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (4.1)$$

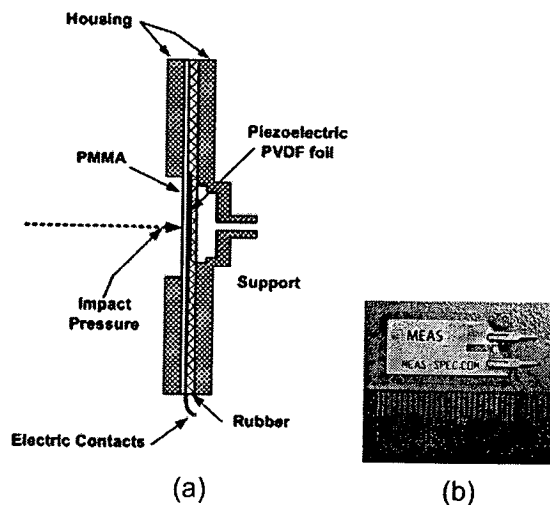
## 4.2.2 การเปรียบเทียบและหลักการวัดความดันกระแทกด้วยแผ่น PVDF

PVDF ย่อมาจาก คำว่า Polyvinylidene Fluoride เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติ Piezoelectricity โดยวัสดุจะมีแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้น เมื่อรับความเค้นหรือมีการยืดหรือหดตัว อันเนื่องมาจากแรงดันภายนอกที่มากระทำ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับแรงดันที่วัสดุได้รับ ด้วยคุณสมบัตินี้เองจึงได้มีการนำเอาแผ่น PVDF มาประยุกต์ใช้เพื่อวัดความดันกระแทก (Impact pressure) ของวัตถุ



รูปที่ 4.11 ลักษณะการเกิดแรงดันไฟฟ้าจากการขงอของแผ่น PVDF

แผ่น PVDF ที่ใช้ในการศึกษานี้จะประกอบในตัวเรือนโลหะแสดงดังรูปที่ 4.12 แผ่น PVDF เป็นของ บริษัท MEAS-SPEC หนา 28 ไมโครเมตร (ดังรูป 4.12 (b)) แผ่น PVDF ถูกติดตั้งภายในเรือนโลหะ ที่ประกอบไปด้วย ส่วนหน้าของเรือนโลหะจะเป็นแผ่นอะคริลิก หนา 6 มิลลิเมตร ทำหน้าที่รับแรงกระแทกจากลำพุ่ง ส่วนที่สองเป็น PVDF ฟิล์ม และส่วนที่สามเป็นแผ่นยางหนา 1.8 เซนติเมตร ทำหน้าที่ป้องกันความเสียหายจากกระแทกของ PVDF กับเรือนโลหะส่วนหลัง

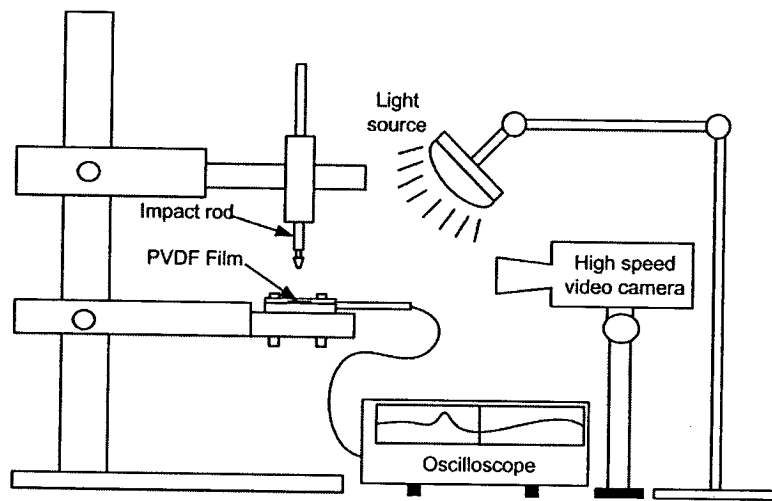


รูปที่ 4.12 ตัวเรือนรับการกระแทก (a) และแผ่น PVDF (b)

ด้วยคุณสมบัติของ PVDF ที่ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับแรงดันที่กระทำ มีลักษณะเป็นเชิงเส้น ดังนั้นการนำแผ่น PVDF ไปใช้เพื่อเป็นเครื่องมือวัดแรงดันกระทำ จำเป็นต้องหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่กระทำบนแผ่น PVDF กับแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นก่อน เพื่อไว้เป็นข้อมูลสำหรับเทียบในการทดลองจริง

การหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่กระทำบนแผ่น PVDF กับแรงดันไฟฟ้า โดยใช้หลักการพื้นฐานจากวิธีของ Grinspana และ Gnanamoorthy [68] โดยมีรายละเอียดของอุปกรณ์แสดงในรูปที่ 4.13 ชุดทดสอบประกอบด้วยส่วนสำคัญ คือ แท่งกระทบ (Impact rod) ชุดแผ่น PVDF ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) และ กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง (High speed video camera) ยี่ห้อ Casio Exilim รุ่น Pro EX-F1 ความเร็วถ่ายภาพสูงสุด 1,200 fps โดยมีขั้นตอนการทดสอบมีดังรายละเอียดต่อไปนี้

แท่งกระทบ (หนัก 0.022 กรัม) จะถูกปล่อยจากความสูงระดับต่าง ให้กระทบชุดแผ่น PVDF ที่ต่อสายสัญญาณกับออสซิลโลสโคปเพื่อวัดแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น และช่วงเวลาของการกระทบ ซึ่งเหตุการณ์ก่อนปล่อยและหลังหลังกระทบจะถูกบันทึกไว้ด้วย กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง



รูปที่ 4.13 ระบบเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ากับความดันกระทำบนแผ่น PVDF

หลังจากทำการทดสอบ โดยเปลี่ยนความสูงของการปล่อยแท่งกระทบ จะได้ความสัมพันธ์ ของแรงกระทำ ( $F$ ) จากสมการอนุรักษ์โมเมนตัม ดังนี้

$$F = m \frac{v_1 + v_2}{T} \quad (4.2)$$

เมื่อ  $v_1$  และ  $v_2$  คือ ความเร็วก่อนกระทบและหลังกระทบตามลำดับ  $m$  คือ น้ำหนักของแท่งกระทบ เท่ากับ 0.022 กรัม และ  $T$  คือ ช่วงเวลากระทบ จากสมการ 4.2 เขียนใหม่ได้เป็น

$$F = C \times \frac{(1+e)\sqrt{h_1}}{T} \quad (4.3)$$

เมื่อ  $C$  เป็นค่าคงที่มีค่าเท่ากับ

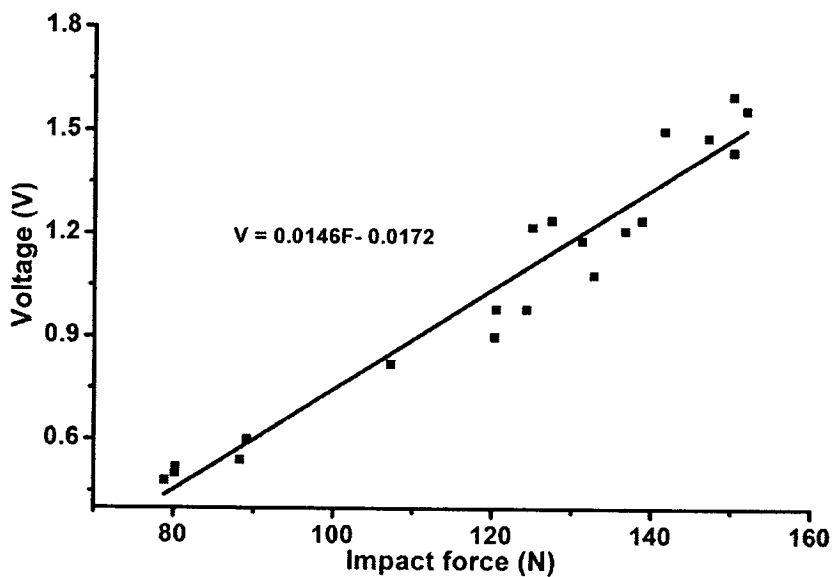
$$C = m \times \sqrt{2 \times g} \quad (4.4)$$

โดย  $g$  คือค่าคงที่ความโน้มถ่วงสากล (Constant of gravity) มีค่าเท่ากับ  $9.81 \text{ m/s}^2$  และ  $e$  คือ สัมประสิทธิ์การกระทบ (Coefficient of restriction) มีค่าเท่ากับ

$$e = \frac{v_2}{v_1} = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}} \quad (4.4)$$

ทั้ง  $h_1$  และ  $h_2$  คือ ความสูงที่ปล่อยตกและความสูงสูงสุดจากการสะท้อนหลังกระทบตามลำดับ ซึ่งหาได้จากภาพถ่ายของกล้องความเร็วสูง

ในการทดสอบค่าความสูง  $h_1$  จะเปลี่ยนแปลงในช่วง 10 - 40 มิลลิเมตร ซึ่งแต่ละความสูงสามารถคำนวณหาแรง ( $F$ ) ที่กระทบบน PVDF จากสมการ (4.3 - 4.4) ทั้งนี้ ช่วงเวลากระทบ ( $T$ ) และ แรงดันไฟฟ้า ( $V$ ) สามารถอ่านได้จากสัญญาณของออสซิลโลสโคป จากการทดสอบความสัมพันธ์ ระหว่าง แรงตกกระทบกับแรงดันไฟฟ้า แสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของแรงกระทบกับแรงดันไฟฟ้าจากแผ่น PVDF

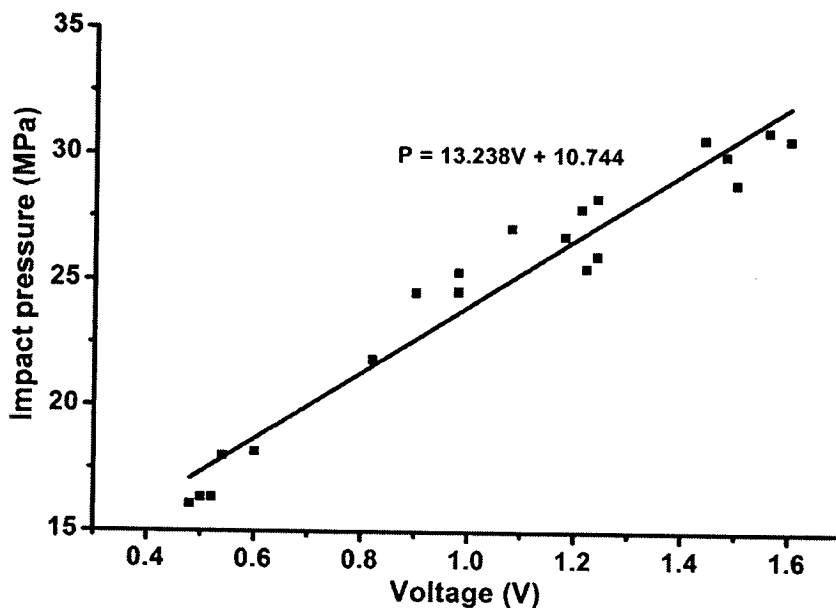
เนื่องจาก แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจาก ความเค้น (Stress) ที่เกิดขึ้นบนแผ่น PVDF ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความดันกระแทก ( $P$ ) ซึ่ง สามารถคำนวณหาได้จาก สมการ (4.5)

$$P = \frac{F}{A} \quad (4.5)$$

เมื่อ  $F$  คือ แรงกระแทก (N) และ  $A$  คือ พื้นที่ตัดตกกระทบบ ทั้งหมดนี้ปลายของแท่งกระแทก มีหน้าตัดเป็นวงกลม ดังนั้นสามารถจัดรูปสมการ 4.5 ใหม่จะได้

$$P = \frac{4F}{\pi d^2} \quad (4.6)$$

โดย  $d$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของปลายแท่งกระแทก มีค่าเท่ากับ 2.5 มิลลิเมตร จากสมการ (4.6) และผลการทดสอบจากรูปที่ 4.14 จะได้ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันกระแทก กับ แรงดันไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.15 ซึ่งจะเป็นข้อมูลเฉพาะสำหรับชุดแผ่น PVDF เพื่อปรับค่าความดันไฟฟ้าที่ได้จากทดลองให้เป็นความดันกระแทก



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ของความดันกระแทกกับแรงดันไฟฟ้าจากแผ่น PVDF