

การประยุกต์ใช้แผ่นที่ปรับค่าความแข็งด้วยลมเข้ากับมือจับแบบง่าย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A pneumatically actuated variable stiffness pad with application to a simple gripper



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2021

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้แผ่นที่ปรับค่าความแข็งด้วยลมเข้ากับมือจับ
	แบบง่าย
โดย	นายเจตนิพิฐ อรุณรัตน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.พงศ์แสน พิทักษ์วัชระ

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(อาจารย์ ดร.สุรัฐ ขวัญเมือง)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.พงศ์แสน พิทักษ์วัชระ)

..... กรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.ปาชาณ กุลวานิช)



CHULALONGKORN UNIVERSITY

เจตนิพิฐ อรุณรัตน์ : การประยุกต์ใช้แผ่นที่ปรับค่าความแข็งด้วยลมเข้ากับมือจับแบบ  
ง่าย. ( A pneumatically actuated variable stiffness pad with application to a  
simple gripper) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.พงศ์แสน พิทักษ์วัชร

จากแนวคิดการใช้งานผิวหนังเทียมหรืออุปกรณ์ห่อหุ้มเพื่อเพิ่มความปลอดภัยและ  
ประสิทธิภาพในการทำงานของหุ่นยนต์ นำมาสู่การพัฒนาผิวหนังเทียมที่ติดตั้งบริเวณมือจับของ  
หุ่นยนต์ โดยผิวหนังเทียมเหล่านี้จะมีค่าความแข็งที่แตกต่างกันตามการใช้งาน วิทยานิพนธ์เล่มนี้  
นำเสนอการออกแบบและขึ้นรูปแผ่นที่ปรับค่าความแข็งได้ (VSPs) ด้วยความดันลม ซึ่งทำหน้าที่  
เสมือนเป็นผิวหนังเทียมของมือจับ จากนั้นนำแผ่นดังกล่าวไปทดลองใช้กับมือจับเชิงเครื่องอย่างง่าย  
เพื่อหับจับวัตถุซึ่งไม่ทราบตำแหน่ง รูปทรงและความแข็งที่แน่ชัดด้วยวิธีการควบคุมอิมพีแดนซ์  
VSPs สร้างขึ้นจากวัสดุอ่อนนุ่มประเภทซิลิโคน ซึ่งขึ้นรูปโดยใช้การหล่อและเสริมความแข็งแรงด้วย  
เส้นใยไฟเบอร์ มีโครงสร้างภายในเป็นทรงกระบอกเรียงตัวขนานกัน สามารถควบคุมค่าความแข็ง  
ผ่านการควบคุมค่าความดันโดยใช้ปั๊มเข็มฉีดยาร่วมกับตัวควบคุมแผนเลื่อน จากการทดลอง  
ประยุกต์ใช้ VSPs ร่วมกับมือจับเชิงเครื่องพบว่า VSPs ช่วยเพิ่มความปลอดภัยและความยืดหยุ่นใน  
การทำงาน เนื่องจากสามารถปรับค่าความแข็งให้เหมาะสมกับการทำงานนั้น ๆ ได้ โดยการปรับค่า  
ความแข็งเพิ่มจะช่วยลดระยะเวลาในการทำงาน หากลดค่าความแข็งจะช่วยเพิ่มความปลอดภัย  
และความเสถียรในการทำงานแทน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล  
ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 6170354421 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORD: gripper, impedance control, variable stiffness, soft robot

Jetnipit Arunrat : A pneumatically actuated variable stiffness pad with application to a simple gripper. Advisor: Assoc. Prof. PHONGSAEN PITAKWATCHARA, Ph.D.

From the concept of using artificial skin or soft cover to increase the safety and efficiency of robot operation. This led to the development of an artificial skin mounted on the robot grippers. These artificial skins have different stiffness values according to task. This thesis presents the design and forming of pneumatically actuated variable stiffness pad (VSPs). which acts as an artificial skin of the gripper. Then, mounted it on simple rigid gripper to pick up unknown objects by impedance control method. VSPs is fabricated by casting silicone and reinforced with fiber. There is an internal structure of cylindrical chamber arranged parallel to each other. VSPs stiffness can be controlled through pressure control by using a syringe pump with a Sliding mode controller. From the experiments, it was found that VSPs increased the safety and flexibility of gripper use. Because the stiffness can be adjusted to suit that task. For example, increase stiffness when speed is required and decrease stiffness when safety or robust is required.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Field of Study: Mechanical Engineering

Student's Signature .....

Academic Year: 2021

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ต้องขอขอบคุณ รศ.ดร.พงศ์แสน พิทักษ์วัชระ อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัยที่ให้คำปรึกษาแนะนำ ช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องที่พบเจอ ตลอดจนจัดหาสถานที่และอุปกรณ์สำหรับงานวิจัย

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่สนับสนุนเงินทุนทั้งหมดในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณห้อง mi workspace สำหรับการให้คำปรึกษาและสนับสนุนเครื่องมือที่ต้องใช้ในงานวิจัยนี้

สุดท้ายขอขอบคุณครอบครัว อาจารย์ เพื่อน และทุกคนที่มีส่วนร่วมในงานวิจัยนี้ทั้งมากและน้อย



เจตนิพิฐ อรุณรัตน์

## สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ต
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ระเบียบและขั้นตอนของงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ปรัชญาวัฒนธรรม.....	3
2.1 การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผิวหนังเทียมของหุ่นยนต์.....	3
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับมือจับที่ปรับค่าความแข็งได้.....	6
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....	14
3.1 แนวคิดในงานวิจัย.....	14
3.2 แผนที่สามารถปรับค่าความแข็งได้.....	15
3.2.1 การออกแบบ VSPs.....	15

3.2.1.1 การวิเคราะห์ค่าความแข็งของโครงสร้าง.....	16
3.2.1.2 การออกแบบ VSPs สำหรับมือจับ.....	18
3.2.2 การขึ้นรูป VSPs .....	19
3.2.3 การสร้างแบบจำลองความแข็งของ VSPs .....	23
3.2.3.1 การทดลองหาแบบจำลองความแข็ง .....	24
3.2.3.2 แบบจำลองความแข็ง .....	27
3.2.4 การควบคุมค่าความแข็งของ VSPs .....	32
3.2.4.1 ปีมั้เข็มฉีดยา.....	32
3.2.4.2 สมการพลศาสตร์ของปีมั้เข็มฉีดยา .....	36
3.2.4.3 แผนควบคุมความดัน .....	40
3.3 มือจับอย่างง่าย .....	53
3.3.1 การออกแบบมือจับ.....	53
3.3.1.1 การออกแบบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ของมือจับ .....	54
3.3.1.2 การออกแบบอุปกรณ์ทางกลของมือจับ .....	61
3.3.1.3 คุณสมบัติและข้อมูลทั่วไปของมือจับ .....	63
3.3.2 ตัวควบคุมอิมพีแดนซ์กับมือจับ .....	64
3.3.3 การประยุกต์ใช้ตัวควบคุมอิมพีแดนซ์กับ VSPs .....	66
3.3.3.1 การวิเคราะห์ผลการตอบสนองกรณีที่ไม่มีแรงภายนอก .....	66
3.3.3.2 การวิเคราะห์ผลการตอบสนองกรณีที่มีแรงภายนอก .....	66
3.3.3.3 แนวทางการออกแบบค่าอิมพีแดนซ์ของตัวควบคุม และค่าความแข็งของ VSPs .....	68
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง .....	69
4.1 การชนกับสภาพแวดล้อมโดยไม่ได้ตั้งใจ .....	69
4.1.1 ผลการทดลองการชนกับสภาพแวดล้อมโดยไม่ได้ตั้งใจ.....	70



4.2 การหีบและเคลื่อนย้ายวัตถุที่ไม่ทราบค่า .....	72
4.2.1 ผลการทดลองหีบและเคลื่อนย้ายวัตถุ .....	74
บทที่ 5 สรุปและอภิปรายผลงานวิจัย .....	80
5.1 สรุปผลงานวิจัย .....	80
5.1.1 สรุปการออกแบบและสร้างแผ่นที่ปรับค่าความแข็งได้ .....	80
5.1.2 สรุปการประยุกต์ใช้แผ่นที่ปรับค่าความแข็งได้กับนิ้วจับ .....	80
5.1.2.1 การทดลองชนกับสภาพแวดล้อมหรือกำแพงโดยไม่ได้ตั้งใจของนิ้วจับ .....	81
5.1.2.2 การทดลองหีบและเคลื่อนย้ายวัตถุ .....	81
5.2 การอภิปรายผลงานวิจัย .....	81
5.2.1 อภิปรายการออกแบบและสร้างแผ่นที่ปรับค่าความแข็งได้ .....	81
5.2.2 อภิปรายการประยุกต์ใช้แผ่นที่ปรับค่าความแข็งได้กับนิ้วจับ .....	82
5.3 ข้อเสนอแนะ .....	82
5.3.1 ในแง่ของการพัฒนาแผ่นที่ปรับค่าความแข็งได้ .....	82
5.3.2 ในแง่ของการประยุกต์ใช้แผ่นที่ปรับค่าความแข็งได้ .....	82
บรรณานุกรม .....	83
ประวัติผู้เขียน .....	86

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 หุ่นยนต์ที่ประยุกต์ใช้วัสดุอ่อนนุ่มนุ่มมาทอหุ้มหุ่นยนต์ (a) หุ่นยนต์อุตสาหกรรมของ FANUC รุ่น CR-35iA (b) หุ่นยนต์ที่ติดตั้งโมดูลสำหรับทอหุ้มของ AIRSKIN®.....	3
รูปที่ 2.2 uSkin รุ่นแรกสำหรับที่ติดตั้งไว้บริเวณปลายนิ้ว .....	4
รูปที่ 2.3 uSkin รุ่นต่อมาในลักษณะแผ่น (a) ตำแหน่งที่ติดตั้ง uSkin (b) โครงสร้างของ uSkin.....	4
รูปที่ 2.4 ผิวหนังเทียมในงานวิจัยของ Pang, G. และคณะ (a) ผิวหนังเทียม (b) การทดสอบใช้งาน ผิวหนังเทียมร่วมกับหุ่นยนต์ YuMi robots .....	5
รูปที่ 2.5 ผิวหนังและกล้ามเนื้อในงานวิจัยของ Asahina, R. และ J. Wang .....	5
รูปที่ 2.6 CoboSkin (a) องค์ประกอบของ CoboSkin (b) การติดตั้งและทดสอบชนของ CoboSkin .....	6
รูปที่ 2.7 มือจับ 1 องศาอิสระที่ใช้ VSA ขับเคลื่อน .....	7
รูปที่ 2.8 หลักการทำงานของกลไกปรับค่าความแข็งใน VSA (a) ตำแหน่งกลไกเริ่มต้น (b) การควบคุมตำแหน่ง (c) ตำแหน่งกลไกเพื่อเพิ่มค่าความแข็ง (d) ตำแหน่งกลไกเพื่อลดค่าความแข็ง.....	8
รูปที่ 2.9 รูปจำลอง 3 มิติของมือจับที่ปรับค่าความแข็งได้ด้วยแม่เหล็ก .....	9
รูปที่ 2.10 แสดงตำแหน่งของแม่เหล็กที่มอเตอร์แต่ละตัวควบคุม .....	9
รูปที่ 2.11 การทดลองเพิ่มแรงกระแทกของมือจับผ่านการตอกตะปู .....	9
รูปที่ 2.12 (a) ลักษณะโครงสร้างที่มีค่าความแข็งสูง (b) ลักษณะโครงสร้างที่มีค่าความแข็งต่ำ .....	10
รูปที่ 2.13 รายละเอียดของโครงสร้างนิ้วจับ .....	10
รูปที่ 2.14 นิ้วจับที่ขับเคลื่อนด้วยของไหลและปรับค่าความแข็งผ่านการบีบอัดอนุภาค .....	11
รูปที่ 2.15 แสดงนิ้วจับที่ขับเคลื่อนด้วยสายเคเบิลและปรับค่าความแข็งด้วยการบีบอัดอนุภาค .....	11
รูปที่ 2.16 นิ้วจับที่ใช้การบีบอัดชั้นเพื่อปรับค่าความแข็ง.....	12
รูปที่ 2.17 (a) ลักษณะโครงสร้างที่มีค่าความแข็งต่ำ (b) ลักษณะโครงสร้างที่มีค่าความแข็งสูง .....	12
รูปที่ 2.18 แสดงโครงสร้างของเกล็ดและการปรับค่าความแข็ง.....	13
รูปที่ 2.19 (a) แบบจำลอง 3 มิติของมือจับที่ปรับค่าปรับค่าความแข็งผ่านโครงสร้างแบบเกล็ดตัวนิ่ม (b) ต้นแบบของมือจับปรับค่าปรับค่าความแข็งผ่านโครงสร้างแบบเกล็ดตัวนิ่ม .....	13

รูปที่ 3.1	หุ่นยนต์ที่ติดตั้ง VSPs ไว้ .....	14
รูปที่ 3.2	มือจับที่มี VSPs ติดตั้งไว้ .....	15
รูปที่ 3.3	แบบจำลองสามมิติของ VSPs.....	16
รูปที่ 3.4	ส่วนประกอบของ VSPs (a) ส่วนเชื่อมต่อท่อลม (b) ส่วนฐานสำหรับยึดมือจับ (c) ส่วนโครงสร้างหลัก .....	16
รูปที่ 3.5	แผนภาพวัตถุอิสระของผนังท่อด้านบนผ่านภาคตัดขวาง .....	17
รูปที่ 3.6	แสดงพื้นที่สัมผัสแรงภายนอกของรูปทรงกระบอกที่ระยะ $z_1$ และ $z_2$ .....	18
รูปที่ 3.7	ขั้นตอนการออกแบบ VSPs.....	19
รูปที่ 3.8	(a) ห้องอากาศทรงกระบอก (b) ภาพตัดขวางและขนาดของห้องอากาศ.....	20
รูปที่ 3.9	ขั้นตอนการขึ้นรูปซิลิโคนทรงกระบอก.....	21
รูปที่ 3.10	ขั้นตอนขึ้นรูปห้องอากาศทรงกระบอก .....	21
รูปที่ 3.11	ขั้นตอนยึดห้องอากาศเข้าด้วยกันเป็น VSPs.....	22
รูปที่ 3.12	VSPs (a) ภาพจำลอง (b) ของจริง .....	23
รูปที่ 3.13	แผนภาพแรงภาคตัดขวางของ VSPs .....	23
รูปที่ 3.14	ความหนาของ VSPs (a) เมื่อมีความดัน $p$ (b) เมื่อมีแรงภายนอกขนาด $F_e$ .....	24
รูปที่ 3.15	ชุดสอบค่าความแข็ง .....	24
รูปที่ 3.16	ส่วนประกอบของชุดทดสอบค่าความแข็ง.....	25
รูปที่ 3.17	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและตำแหน่งนิ้วจับของ VSPs ชุด 1 ที่ค่าความดันต่างๆ .....	26
รูปที่ 3.18	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและตำแหน่งนิ้วจับของ VSPs ชุด 2 ที่ค่าความดันต่างๆ .....	26
รูปที่ 3.19	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะกดของ VSPs ชุดที่ 1.....	27
รูปที่ 3.20	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะกดของ VSPs ชุดที่ 2.....	28
รูปที่ 3.21	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะกดของ VSPs ชุดที่ 1 โดยเส้นทึบแสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลอง และเส้นปะแสดงข้อมูลจากสมการความสัมพันธ์ที่ 3.6 .....	29
รูปที่ 3.22	ระหว่างแรงและระยะกดของ VSPs ชุดที่ 2 โดยเส้นทึบแสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลอง และเส้นปะแสดงข้อมูลจากสมการความสัมพันธ์ที่ 3.7 .....	30

รูปที่ 3.23 ระหว่างแรงและระยะกดของ VSPs ชุดที่ 1 จากสมการความสัมพันธ์ที่ 3.6.....	30
รูปที่ 3.24 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะกดของ VSPs ชุดที่ 2 จากสมการความสัมพันธ์ที่ 3.7 .....	31
รูปที่ 3.25 ปี่มเข็มฉีดยาทั้ง 2 ตัว.....	32
รูปที่ 3.26 ส่วนประกอบของปี่มเข็มฉีดยา (a) ตำแหน่งของมอเตอร์และเข็มฉีดยา (b) ตำแหน่งของตัว ยึด (c) ตำแหน่งของลิมิตสวิทช์.....	33
รูปที่ 3.27 แผนผังทางไฟฟ้าของปี่มเข็มฉีดยาตัวที่ 1 .....	34
รูปที่ 3.28 แผนผังทางไฟฟ้าของปี่มเข็มฉีดยาตัวที่ 2.....	35
รูปที่ 3.29 แผนภาพแรงของปี่มเข็มฉีดยาเมื่อไม่มีแรงดัน .....	36
รูปที่ 3.30 ตำแหน่งที่ทดสอบหาค่าแรงเสียดทาน.....	37
รูปที่ 3.31 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงลัพธ์ของเข็มฉีดยาและเวลา.....	38
รูปที่ 3.32 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของเข็มฉีดยาและเวลา .....	39
รูปที่ 3.33 แผนภาพแรงของเข็มฉีดยา.....	40
รูปที่ 3.34 แผนภาพของปี่มเข็มฉีดยาและVSPs .....	41
รูปที่ 3.35 แผนภาพกล่องของระบบควบคุมความดัน .....	44
รูปที่ 3.36 ฟังก์ชันอินพุตแบบขั้นบันได .....	45
รูปที่ 3.37 ผลการตอบสนองของปี่มเข็มฉีดยาตัวที่ 1 ต่อฟังก์ชันขั้นบันได โดยเส้นทึบสีน้ำเงินคือค่า ความดันที่ต้องการ ( $p_d$ ) และเส้นปะสีแดงคือค่าความดันที่วัดได้ ( $p_{fm}$ ).....	47
รูปที่ 3.38 ค่าความผิดพลาดความดัน ( $p_{fm} - p_d$ ) ของปี่มเข็มฉีดยาตัวที่ 1 ช่วงเวลา 0–8s .....	47
รูปที่ 3.39 ค่าความผิดพลาดความดัน ( $p_{fm} - p_d$ ) ของปี่มเข็มฉีดยาตัวที่ 1 ช่วงเวลา 1–1.5s .....	48
รูปที่ 3.40 ตำแหน่งอ้างอิง ( $y_{fr}$ ) และตำแหน่งที่วัดได้ ( $y$ ) ของกระบอกสูบตัวที่ 1 โดยเส้นทึบสี น้ำ เงินคือตำแหน่งอ้างอิงของกระบอกสูบ และเส้นปะสีแดงคือตำแหน่งของกระบอกสูบที่วัดได้.....	48
รูปที่ 3.41 ค่าความผิดพลาดตำแหน่ง ( $y - y_{fr}$ ) ของกระบอกสูบตัวที่ 1 .....	49
รูปที่ 3.42 ค่าสเกลาร์ s และขั้นขอบเขตของปี่มเข็มฉีดยาตัวที่ 1 โดยเส้นสีน้ำเงินคือขั้นขอบเขต และ เส้นสีแดงคือค่าสเกลาร์ s.....	49

รูปที่ 3.43 ผลการตอบสนองของปั๊มเข็มฉีดยาตัวที่ 2 ต่อฟังก์ชันขั้นบันได โดยเส้นทึบสีน้ำเงินคือค่าความดันที่ต้องการ ( $p_d$ ) และเส้นประสีแดงคือค่าความดันที่วัดได้ ( $p_{fm}$ ).....	50
รูปที่ 3.44 ค่าความผิดพลาดความดัน ( $p_{fm} - p_d$ ) ของปั๊มเข็มฉีดยาตัวที่ 2 ช่วงเวลา 0–8s .....	50
รูปที่ 3.45 ค่าความผิดพลาดความดัน ( $p_{fm} - p_d$ ) ของปั๊มเข็มฉีดยาตัวที่ 2 ช่วงเวลา 1–1.5s .....	51
รูปที่ 3.46 ตำแหน่งอ้างอิง ( $y_{fr}$ ) และตำแหน่งที่วัดได้ ( $y$ ) ของกระบอกสูบตัวที่ 2 โดยเส้นทึบสีน้ำเงินคือตำแหน่งอ้างอิงของกระบอกสูบ และเส้นประสีแดงคือตำแหน่งของกระบอกสูบที่วัดได้.....	51
รูปที่ 3.47 ค่าความผิดพลาดตำแหน่ง ( $y - y_{fr}$ ) ของกระบอกสูบตัวที่ 2 .....	52
รูปที่ 3.48 ค่าสเกลาร์ $s$ และชั้นขอบเขตของปั๊มเข็มฉีดยาตัวที่ 2 โดยเส้นสีน้ำเงินคือชั้นขอบเขต และเส้นสีแดงคือค่าสเกลาร์ $s$ .....	52
รูปที่ 3.49 ขนาดของมือจับ .....	53
รูปที่ 3.50 (a) ภาพถ่ายด้านหน้าของมือจับ (b) ภาพถ่ายด้านบนของมือจับ .....	54
รูปที่ 3.51 มอเตอร์ที่ใช้ .....	55
รูปที่ 3.52 โหลดเซลล์ .....	55
รูปที่ 3.53 วงจรควบคุมมอเตอร์.....	56
รูปที่ 3.54 วงจรขยายสัญญาณ.....	57
รูปที่ 3.55 แผนผังวงจรขยายสัญญาณ .....	57
รูปที่ 3.56 วงจรแปลงสัญญาณ sensoray 826 .....	58
รูปที่ 3.57 แผนผังทางไฟฟ้าของนิว้จับตัวที่ 1.....	60
รูปที่ 3.58 แผนผังทางไฟฟ้าของนิว้จับตัวที่ 2.....	61
รูปที่ 3.59 โอลแฮมคัปปลิ่ง.....	62
รูปที่ 3.60 ชุดขับเคลื่อนนิว้จับ.....	62
รูปที่ 3.61 แผนภาพแรงของชุดขับเคลื่อน .....	63
รูปที่ 3.62 แผนภาพแรงของนิว้จับที่ใช้ตัวควบคุมอิมพีแดนซ์.....	64
รูปที่ 3.63 แผนภาพแรงของนิว้จับ .....	65
รูปที่ 3.64 การติดแกนของนิว้จับ .....	65

รูปที่ 3.65 แผนภาพแรงของนิ้วจับกรณีไม่มีแรงภายนอกมากระทำ.....	66
รูปที่ 3.66 แผนภาพของนิ้วจับกรณีมีแรงภายนอกมากระทำ.....	67
รูปที่ 3.67 แผนภาพอย่างง่ายของนิ้วจับกรณีมีแรงภายนอกมากระทำ.....	67
รูปที่ 4.1 ตำแหน่งเริ่มต้นของอุปกรณ์ก่อนเริ่มการทดลอง (a) เมื่อใช้มือจับแข็งเกร็ง (b) เมื่อใช้มือจับที่ติดตั้ง VSPs .....	70
รูปที่ 4.2 ผลการตอบสนองของนิ้วจับต่อการชนด้วยความเร็ว 100 mm/s โดยเส้นทึบแสดงค่าจริงที่เกิดขึ้น เส้นปะแสดงค่าอ้างอิง สีน้ำเงินแทนนิ้วจับที่ใช้ VSPs โดยปรับค่าความแข็งเป็น 26 N/mm สีแดงนิ้วจับที่ใช้ VSPs โดยปรับค่าความแข็งเป็น 36 N/mm และสีเหลืองแทนนิ้วจับแบบแข็งเกร็ง	71
รูปที่ 4.3 การตอบสนองของนิ้วจับต่อการชนด้วยความเร็ว 60 mm/s โดยเส้นทึบแสดงค่าจริงที่เกิดขึ้น เส้นปะแสดงค่าอ้างอิง สีน้ำเงินแทนนิ้วจับที่ใช้ VSPs โดยปรับค่าความแข็งเป็น 26 N/mm สีแดงนิ้วจับที่ใช้ VSPs โดยปรับค่าความแข็งเป็น 36 N/mm และสีเหลืองแทนนิ้วจับแบบแข็งเกร็ง	71
รูปที่ 4.4 ภาพจำลองการทดลองหีบและเคลื่อนย้ายวัตถุไม่ทราบค่า.....	72
รูปที่ 4.5 ที่นำมาใช้ในการทดลอง (a) แผ่นเหล็ก (b) ยาง (c) กล่องสปริง และ (d) ไข่.....	72
รูปที่ 4.6 ผลการตอบสนองของแรงเมื่อหีบและเคลื่อนย้ายแผ่นเหล็ก โดยเส้นทึบแสดงค่าจริงที่เกิดขึ้น เส้นปะแสดงค่าอ้างอิง สีน้ำเงินแทนค่าที่วัดได้จากนิ้วจับด้านซ้าย และสีแดงแทนค่าที่วัดได้จากนิ้วจับด้านขวา.....	74
รูปที่ 4.7 ผลการตอบสนองของความเร็วเมื่อหีบและเคลื่อนย้ายแผ่นเหล็ก โดยเส้นทึบแสดงค่าจริงที่เกิดขึ้น เส้นปะแสดงค่าอ้างอิง สีน้ำเงินแทนค่าที่วัดได้จากนิ้วจับด้านซ้าย และสีแดงแทนค่าที่วัดได้จากนิ้วจับด้านขวา.....	75
รูปที่ 4.8 ทดลองหีบและเคลื่อนย้ายแผ่นเหล็ก (a) ขณะเริ่มเคลื่อนวัตถุไปทางซ้าย (b) เมื่อเคลื่อนวัตถุเสร็จ.....	75
รูปที่ 4.9 ผลการตอบสนองของแรงเมื่อหีบและเคลื่อนย้ายยาง โดยเส้นทึบแสดงค่าจริงที่เกิดขึ้น เส้นปะแสดงค่าอ้างอิง สีน้ำเงินแทนค่าที่วัดได้จากนิ้วจับด้านซ้าย และสีแดงแทนค่าที่วัดได้จากนิ้วจับด้านขวา.....	76
รูปที่ 4.10 ผลการตอบสนองของความเร็วเมื่อหีบและเคลื่อนย้ายยาง โดยเส้นทึบแสดงค่าจริงที่เกิดขึ้น เส้นปะแสดงค่าอ้างอิง สีน้ำเงินแทนค่าที่วัดได้จากนิ้วจับด้านซ้าย และสีแดงแทนค่าที่วัดได้จากนิ้วจับด้านขวา.....	76

- รูปที่ 4.11 ผลการตอบสนองของแรงเมื่อหีบและเคลื่อนย้ายกล่องสปริง โดยเส้นทึบแสดงค่าจริงที่เกิดขึ้น เส้นปะแสดงค่าอ้างอิง สีนํ้าเงินแทนค่าที่วัดได้จากนิว้จับด้านซ้าย และสีแดงแทนค่าที่วัดได้จากนิว้จับด้านขวา..... 77
- รูปที่ 4.12 ผลการตอบสนองของความเร็วเมื่อหีบและเคลื่อนย้ายกล่องสปริง โดยเส้นทึบแสดงค่าจริงที่เกิดขึ้น เส้นปะแสดงค่าอ้างอิง สีนํ้าเงินแทนค่าที่วัดได้จากนิว้จับด้านซ้าย และสีแดงแทนค่าที่วัดได้จากนิว้จับด้านขวา..... 77
- รูปที่ 4.13 การทดลองหีบและเคลื่อนย้ายไขด้วยนิว้แบบจับแข็งเกร็ง (a) ขณะเริ่มสัมผัสไข (b) เมื่อไขแตกระหว่างการหีบ..... 78
- รูปที่ 4.14 ผลการตอบสนองของแรงเมื่อหีบและเคลื่อนย้ายไข โดยเส้นทึบแสดงค่าจริงที่เกิดขึ้น เส้นปะแสดงค่าอ้างอิง สีนํ้าเงินแทนค่าที่วัดได้จากนิว้จับด้านซ้าย และสีแดงแทนค่าที่วัดได้จากนิว้จับด้านขวา..... 78
- รูปที่ 4.15 ผลการตอบสนองของความเร็วเมื่อหีบและเคลื่อนย้ายไข โดยเส้นทึบแสดงค่าจริงที่เกิดขึ้น เส้นปะแสดงค่าอ้างอิง สีนํ้าเงินแทนค่าที่วัดได้จากนิว้จับด้านซ้าย และสีแดงแทนค่าที่วัดได้จากนิว้จับด้านขวา..... 79

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1	คุณสมบัติซิลิโคน RA-40AB .....	20
ตารางที่ 3.2	ขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ทำให้เข็มฉีดยาเริ่มเคลื่อนที่.....	37
ตารางที่ 3.3	ค่าพารามิเตอร์ของปั๊มเข็มฉีดยา.....	39
ตารางที่ 3.4	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมความดัน.....	45
ตารางที่ 3.5	ค่าพารามิเตอร์ของปั๊มเข็มฉีดยา.....	46
ตารางที่ 3.6	คุณลักษณะของระบบควบคุมความดัน .....	52
ตารางที่ 3.7	ข้อมูลทางเทคนิคของมอเตอร์ .....	55
ตารางที่ 3.8	ข้อมูลทางเทคนิคของวงจรควบคุมมอเตอร์ .....	56
ตารางที่ 3.9	ข้อมูลทางเทคนิคของวงจรแปลงสัญญาณ sensoray 826.....	58
ตารางที่ 4.1	ความเร็วที่ต้องการ แรงที่ต้องการและเงื่อนไขการเปลี่ยนขั้นตอน ของการหยิบวัตถุ ...	73



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

รูปแบบการใช้งานหุ่นยนต์ในปัจจุบันได้เปลี่ยนไปจากเดิมที่หุ่นยนต์ ถูกใช้งานในสภาพแวดล้อมที่ถูกควบคุม (controlled environment) มนุษย์ไม่สามารถทำงานร่วมกับหุ่นยนต์ได้ มาสู่การทำงานในรูปแบบใหม่ที่หุ่นยนต์สามารถทำงานในสภาพแวดล้อมที่ไม่ถูกควบคุม (uncontrolled environment) และทำงานร่วมกับมนุษย์ได้ ด้วยรูปแบบการทำงานที่เปลี่ยนไป ส่งผลให้หุ่นยนต์รูปแบบเก่าซึ่งมีโครงสร้างแบบแข็งเกร็ง (rigid robot) ไม่สามารถตอบสนองต่อความต้องการได้ เนื่องจากความแข็งเกร็งของมันอาจทำให้เกิดอุบัติเหตุที่ต่อมนุษย์หรือสภาพแวดล้อม เพื่อจัดการปัญหาเหล่านี้หุ่นยนต์ต้องสามารถควบคุมหรือจำกัดแรงสัมผัส (contact force) ที่เกิดขึ้นระหว่างหุ่นยนต์กับสิ่งแวดล้อมได้อย่างเหมาะสม ที่ผ่านมามีการนำเสนอวิธีต่าง ๆ ในการแก้ปัญหาแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจคือการพัฒนาผิวหนังเทียมให้หุ่นยนต์

ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผิวหนังเทียมมีงานวิจัยหนึ่งได้นำเสนอแนวทางเพิ่มความปลอดภัยให้กับหุ่นยนต์ โดยใช้ผิวหนังเทียมที่สามารถปรับค่าความแข็งได้ในชื่อ CoboSkin [1, 2] อย่างไรก็ตามงานวิจัยชิ้นนี้ไม่ได้กล่าวถึงการปรับค่าความแข็งของผิวหนังเทียมเพื่อเพิ่มความสามารถในการทำงานของหุ่นยนต์ แต่ศึกษาเฉพาะผลของการปรับค่าความแข็งผิวหนังเทียมต่อขนาดของแรงกระแทกสูงสุดที่เกิดขึ้นระหว่างหุ่นยนต์กับสภาพแวดล้อม จากที่กล่าวมาผู้เขียนเห็นว่าผิวหนังเทียมที่สามารถปรับค่าความแข็งได้สามารถประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มในการทำงานของหุ่นยนต์ได้ หากนำไปติดตั้งไว้บริเวณที่ต้องสัมผัสกับสภาพแวดล้อมเช่น มือจับ เป็นต้น

มือจับเป็นอุปกรณ์ทำหน้าที่หยิบจับวัตถุซึ่งจะติดตั้งไว้ที่ปลายแขนของหุ่นยนต์ ปกติแล้วมือจับจะมีวัสดุประเภทต่าง ๆ ติดตั้งบริเวณพื้นผิวที่ต้องสัมผัสกับวัตถุเพื่อเพิ่มความสามารถในการหยิบจับวัตถุ คุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้จะแตกต่างกันตามการใช้งาน เช่น วัสดุที่มีค่าความแข็งต่ำเหมาะสำหรับมือจับที่หยิบจับวัตถุซึ่งแตกหักง่าย วัสดุที่มีค่าความแข็งสูงเหมาะสำหรับมือจับที่หยิบจับวัตถุซึ่งมีน้ำหนักสูง เป็นต้น ดังนั้นการปรับค่าความแข็งที่ผิวสัมผัสของผิวหนังเทียมจะมีส่วนช่วยเพิ่มความสามารถในการหยิบจับวัตถุให้มือจับ จากเหตุผลที่ได้กล่าวมานำมาสู่งานวิจัยชิ้นนี้ในชื่อการประยุกต์ใช้แผ่นที่ปรับค่าความแข็งได้ด้วยลมเข้ากับมือจับแบบง่าย

## 1.2 วัตถุประสงค์

ออกแบบและสร้างแผ่นที่ปรับค่าความแข็งโดยการควบคุมลมอย่างเหมาะสม และนำแผ่นที่ปรับค่าความแข็งได้นี้ไปติดตั้งกับมือจับแบบง่าย เพื่อหิบบั้ววัตถุซึ่งไม่ทราบตำแหน่ง รูปทรงและความแข็งที่แน่ชัดด้วยวิธีการควบคุมอิมพีแดนซ์

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. วิเคราะห์ผลและหาแบบจำลองความแข็งของแผ่นที่ปรับค่าความแข็ง (variable stiffness pad ,VSPs)
2. ทดสอบการทำงานของ VSPs โดยการนำไปติดตั้งกับมือจับแบบง่าย และควบคุมค่าความแข็งเพื่อหิบบั้ววัตถุภายในบริเวณที่กำหนดไว้ โดยวัตถุที่หิบบั้วมีรูปทรงเรขาคณิต และค่าความแข็งของวัตถุจะทราบว่ามีค่าความแข็งน้อย ปานกลาง หรือสูง
3. มือจับในงานวิจัยนี้เป็นมือจับอย่างง่าย (jaws parallel gripper) ที่มี 2 องศาอิสระ (degree of freedom) และถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมอิมพีแดนซ์ (impedance control)

## 1.4 ระเบียบและขั้นตอนของงานวิจัย

1. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. เสนอแนวคิดในการออกแบบโครงสร้าง VSPs
3. กำหนดความสามารถและขีดจำกัดของ VSPs พร้อมทั้งมือจับ
4. ออกแบบและสร้าง VSPs พร้อมทั้งมือจับ
5. ออกแบบแผนควบคุมความดัน
6. ทดสอบหาแบบจำลองความแข็งสำหรับควบคุม VSPs
7. ออกแบบตัวควบคุมอิมพีแดนซ์และวิเคราะห์ผลการตอบสนองของแรง
8. ทดสอบและเปรียบเทียบการทำงานของมือจับระหว่างติดตั้ง VSPs และไม่ติดตั้ง ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด
9. วิเคราะห์และสรุปงานวิจัย
10. จัดทำวิทยานิพนธ์

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ต้นแบบและองค์ความรู้ของ VSPs ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาต่อเป็นผิวหนังเทียมเพื่อติดตั้งบนหุ่นยนต์ที่ต้องการความปลอดภัยในการทำงานสูง หรือต้องการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของหุ่นยนต์ในรูปแบบใดรูปแบบหนึ่ง

## บทที่ 2

### ปริทัศน์วรรณกรรม

ในบทนี้จะนำเสนอการศึกษางานวิจัยหรือองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและสร้างแผ่นที่ปรับค่าความแข็งด้วยลม รวมถึงการนำแผ่นที่ปรับค่าความแข็งได้ไปประยุกต์ใช้กับมือจับ เนื้อหาในบทนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ในส่วนแรกจะศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผิวหนังเทียมของหุ่นยนต์ ส่วนต่อมาจะศึกษาเกี่ยวกับหุ่นยนต์อ่อนนุ่มที่สามารถปรับค่าความแข็งได้

#### 2.1 การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผิวหนังเทียมของหุ่นยนต์

ปัจจุบันมีการใช้งานผิวหนังเทียมร่วมกับหุ่นยนต์ในภาคอุตสาหกรรมแล้ว ตัวอย่างเช่น ผิวหนังเทียมในหุ่นยนต์ FANUC รุ่น CR-35iA ตามรูปที่ 2.1 (a) หรือโมดูลผิวหนังเทียมสำหรับติดตั้งบนหุ่นยนต์อุตสาหกรรมทั่วไปในชื่อ AIRSKIN® ตามรูปที่ 2.1 (b) เป็นต้น หลักการทำงานของผิวหนังเทียมเหล่านี้คือช่วยลดขนาดของแรงกระทำที่เกิดขึ้นจากการชนผ่านการใช้วัสดุอ่อนนุ่ม รวมถึงหยุดการทำงานของหุ่นยนต์เมื่อมีขนาดแรงกระทำต่อผิวหนังเทียมมากกว่าที่กำหนดไว้



(a)

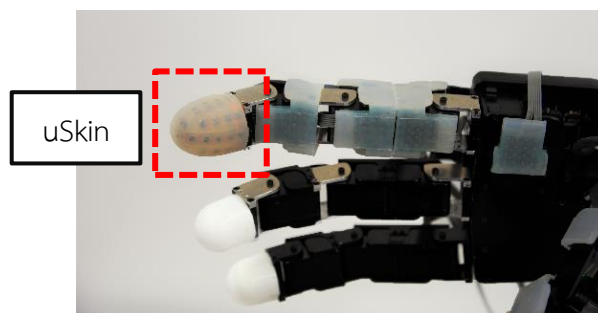


(b)

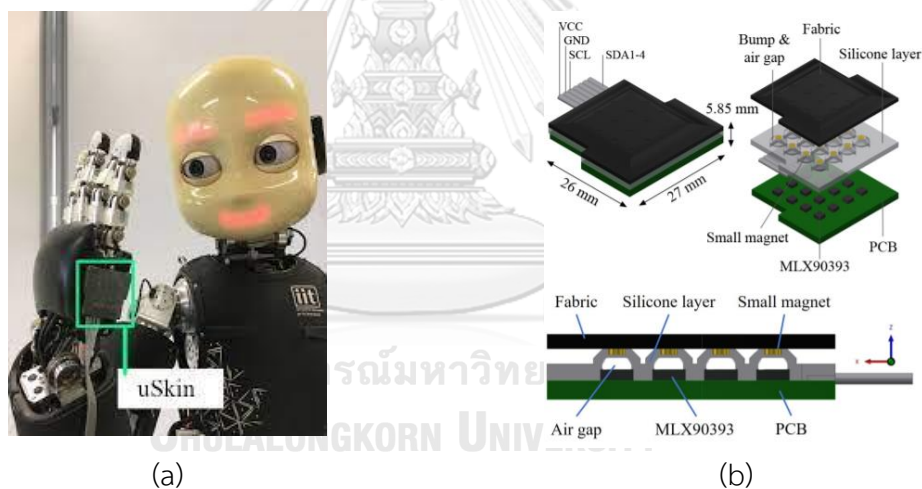
รูปที่ 2.1 หุ่นยนต์ที่ประยุกต์ใช้วัสดุอ่อนนุ่มนุ่มมาห่อหุ้มหุ่นยนต์ (a) หุ่นยนต์อุตสาหกรรมของ FANUC รุ่น CR-35iA (b) หุ่นยนต์ที่ติดตั้งโมดูลสำหรับห่อหุ้มของ AIRSKIN®

ในด้านของงานวิจัยผิวหนังเทียมถูกพัฒนาให้มีความสามารถมากกว่าผิวหนังเทียมในภาคอุตสาหกรรม ตัวอย่างเช่น การพัฒนาผิวหนังเทียมให้สามารถวัดทั้งขนาดและตำแหน่งของแรงที่มากระทำ หรือการพัฒนาให้ผิวหนังเทียมสามารถปรับค่าความแข็งได้ เป็นต้น ต่อจากนี้จะพูดถึงงานวิจัยเกี่ยวกับผิวหนังเทียมที่สามารถวัดทั้งขนาดและตำแหน่งของแรง

Tomo, T.P. และคณะได้นำเสนอผิวหนังเทียมในชื่อ uSkin [3, 4] ซึ่งฝังแม่เหล็กไว้ด้านในสำหรับวัดขนาดและตำแหน่งของแรง ใช้การเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กเพื่อวัดแรง โดย uSkin สามารถวัดแรงได้ทั้งแรงกดและแรงเฉือน ในช่วงแรก uSkin ถูกพัฒนาเป็นผิวหนังเทียมที่ปลายนิ้วของหุ่นยนต์ฮิวแมนนอยด์ตามรูปที่ 2.2 ต่อมาพัฒนาการขึ้นรูปผิวหนังเทียมให้มีลักษณะแบบแผ่นเพื่อใช้เป็นผิวหนังเทียมของหุ่นยนต์ในบริเวณอื่น ๆ ตามรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 uSkin รุ่นแรกสำหรับที่ติดตั้งไว้บริเวณปลายนิ้ว

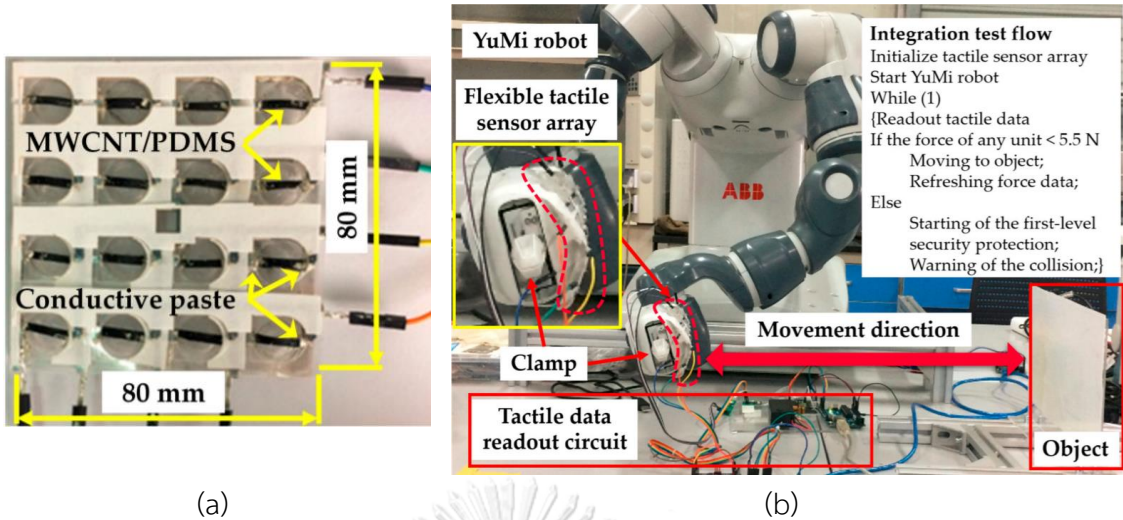


(a)

(b)

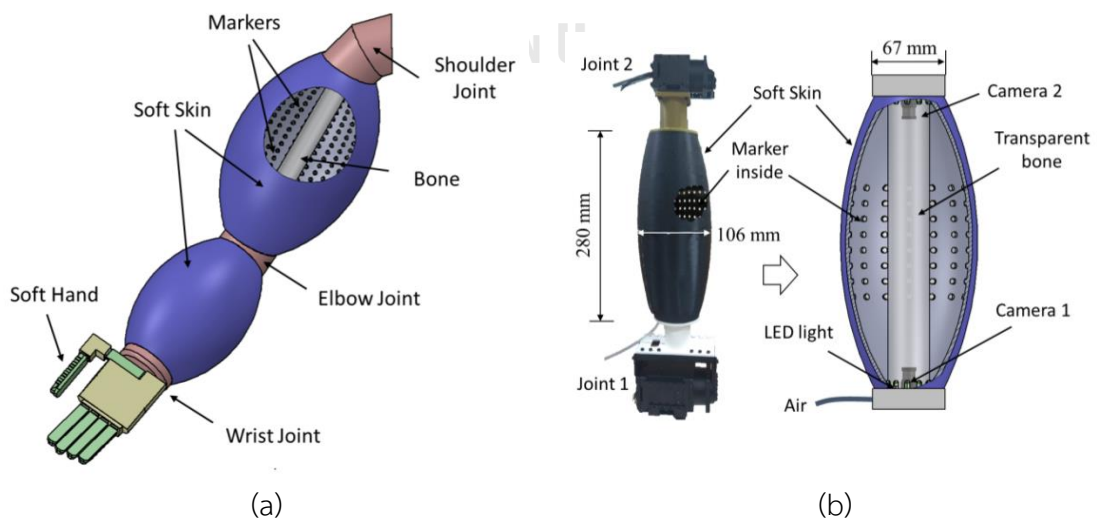
รูปที่ 2.3 uSkin รุ่นต่อมาในลักษณะแผ่น (a) ตำแหน่งที่ติดตั้ง uSkin (b) โครงสร้างของ uSkin

ในงานวิจัยของ Pang, G. และคณะ [5] ได้พัฒนาผิวหนังเทียมจากท่อคาร์บอนนาโนชนิดผนังหลายชั้น (multi-walled carbon nanotubes, MWCNTs) และซิลิโคน (polydimethylsiloxane, PDMS) โดยฝัง MWCNTs ไว้ภายในชั้นของซิลิโคนรูปทรงโดม ใช้คุณสมบัติการเปลี่ยนความต้านทานไฟฟ้าเมื่อเสียรูปของ MWCNTs เพื่อวัดตำแหน่งและขนาดของแรง ข้อดีของผิวหนังเทียมชนิดนี้คือมีความอ่อนนุ่มเป็นพิเศษและสามารถวัดแรงที่มีขนาดต่ำได้ดี รูปที่ 2.4 (a) แสดงผิวหนังเทียม (b) แสดงการใช้งานผิวหนังเทียมร่วมกับ YuMi robots



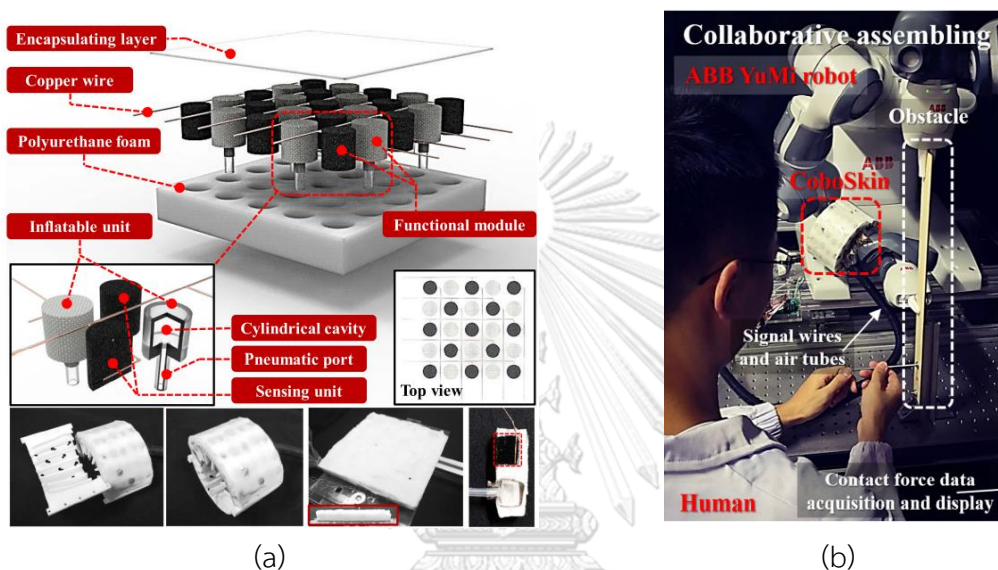
รูปที่ 2.4 ผิวหนังเทียมในงานวิจัยของ Pang, G. และคณะ (a) ผิวหนังเทียม (b) การทดสอบใช้งาน  
 ผิวหนังเทียมร่วมกับหุ่นยนต์ YuMi robots

นอกจากการฝังอุปกรณ์หรือเซ็นเซอร์ไว้ภายในผิวหนังเทียมแล้วยังมีการประยุกต์ใช้กล้องเพื่อวัดขนาดและตำแหน่งด้วย ในงานวิจัยของ Asahina, R. และ J. Wang [6] ได้พัฒนาผิวหนังบริเวณแขนหุ่นยนต์ฮิวแมนนอยด์ ตามรูปที่ 2.5 โดยติดเครื่องหมาย (marker) ไว้ด้านใต้ชั้นผิวหนัง ใช้กล้องซึ่งติดตั้งอยู่บริเวณหัวและท้ายของแขนหุ่นยนต์วัดตำแหน่งของเครื่องหมาย จากนั้นนำอัลกอริทึม (Algorithm) มาตรวจสอบตำแหน่งที่เปลี่ยนแปลงของเครื่องหมายเพื่อระบุขนาดและตำแหน่งของแรง ในงานวิจัยนี้ยังกล่าวถึงการเปลี่ยนค่าความแข็งของผิวหนังเทียมผ่านการปรับค่าความดันอีกด้วย อย่างไรก็ตามไม่ได้แสดงผลของการเปลี่ยนค่าความแข็ง



รูปที่ 2.5 ผิวหนังและกล้ามเนื้อในงานวิจัยของ Asahina, R. และ J. Wang

ต่อมามีการพัฒนาผิวหนังเทียมที่สามารถปรับค่าความแข็งได้ในชื่อ CoboSkin [1, 2] ตามรูปที่ 2.6 CoboSkin สร้างขึ้นจากชุดอุปกรณ์ 2 ชุดคือ ชุดเซ็นเซอร์ (sensing unit) สำหรับวัดขนาดและตำแหน่งของแรง กับชุดพองลม (inflatable unit) สำหรับปรับค่าความแข็ง ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลการปรับค่าความแข็งที่มีต่อการวัดแรงและการลดขนาดแรงกระแทกที่เกิดจากการชน อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ยังไม่ได้กล่าวถึงการนำ CoboSkin ไปประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มความสามารถในการทำงานของหุ่นยนต์ แต่กล่าวถึงเฉพาะเรื่องความปลอดภัย



รูปที่ 2.6 CoboSkin (a) องค์ประกอบของ CoboSkin (b) การติดตั้งและทดสอบของ CoboSkin

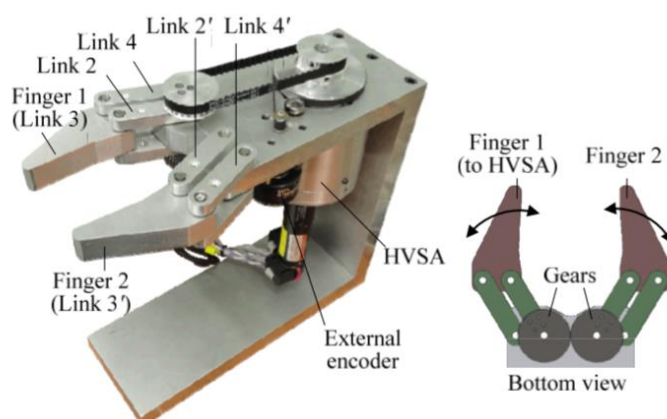
จากที่ได้ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผิวหนังเทียมของหุ่นยนต์ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น พบประเด็นที่น่าสนใจของผิวหนังเทียม CoboSkin ซึ่งสามารถนำมาพัฒนาต่อได้ กล่าวคือผิวหนังเทียมที่ปรับค่าความแข็งได้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับส่วนต่าง ๆ ของหุ่นยนต์ได้ เช่น การประยุกต์ใช้กับมือจับเพื่อเพิ่มความสามารถในการหยิบจับวัตถุ เป็นต้น

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับมือจับที่ปรับค่าความแข็งได้

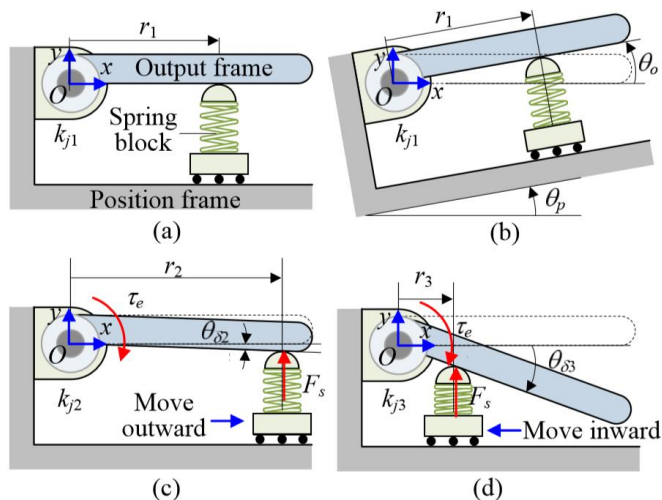
จากที่ได้กล่าวมาก่อนหน้าในเรื่องการประยุกต์ใช้ผิวหนังเทียมหรือแผ่นที่ปรับค่าความแข็งได้กับมือจับจึงเป็นที่มาของการศึกษาในหัวข้อนี้ โดยจะศึกษามือจับที่ปรับค่าความแข็งได้ใน 2 ประเด็น คือ การศึกษากลไกที่ใช้ปรับค่าความแข็งของมือจับเพื่อเป็นแนวทางสำหรับพัฒนาแผ่นที่ปรับค่าความแข็งได้ และการศึกษาข้อดี/ข้อเสียการปรับค่าความแข็งของมือจับเพื่อเป็นแนวทางสำหรับประยุกต์ใช้แผ่นที่ปรับค่าความแข็งได้กับมือจับ

มือจับที่ปรับค่าความแข็งได้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ มือจับที่สร้างขึ้นจากวัสดุแข็งเกร็งหรือมือจับแข็งเกร็ง (rigid gripper) และมือจับที่สร้างขึ้นจากวัสดุอ่อนนุ่มหรือมือจับอ่อนนุ่ม (soft gripper) ต่อจากนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับมือจับแข็งเกร็งที่ปรับค่าความแข็งได้

Kim, B.-S. และ J.-B. Song [7] ได้นำเสนอมือจับแข็งเกร็ง 1 องศาอิสระที่ปรับค่าความแข็งได้ผ่านการปรับค่าความแข็งของมอเตอร์ประเภท VSA (variable stiffness actuator, ตัวขับเคลื่อนที่ปรับค่าความแข็งได้) ตามรูปที่ 2.7 VSA ที่ถูกนำมาใช้สามารถปรับค่าความแข็งแบบพาสซีฟ (passive) โดยมีหลักการทำงานตามรูปที่ 2.8 ข้อดีของมือจับที่งานวิจัยชิ้นนี้ได้นำเสนอคือช่วยลดความซับซ้อนของการออกแบบตัวควบคุม โดยเปลี่ยนปัญหาการควบคุมมือจับจากเดิมต้องควบคุมแรงเป็นควบคุมตำแหน่งแทน อย่างไรก็ตามกลไกแบบนี้ก็มีข้อเสียอยู่ กล่าวคือ VSA สามารถเก็บพลังงานไว้ในกลไก ถ้ามีแรงภายนอกมารบกวนหรือออกแบบการเคลื่อนที่และความแข็งที่ไม่เหมาะสมอาจก่อให้เกิดอันตรายจากพลังงานที่กักเก็บไว้ได้



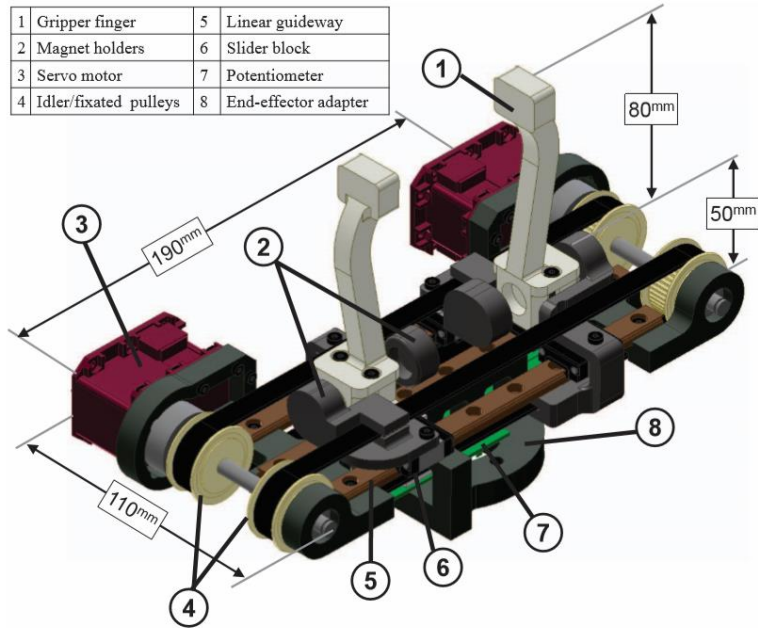
รูปที่ 2.7 มือจับ 1 องศาอิสระที่ใช้ VSA ขับเคลื่อน



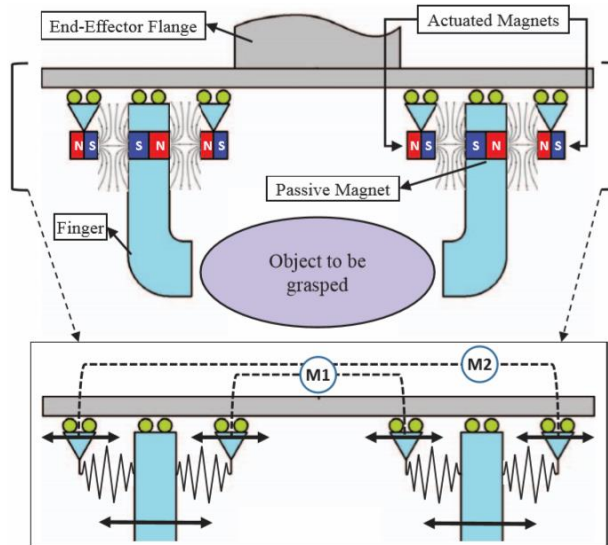
รูปที่ 2.8 หลักการทำงานของกลไกปรับค่าความแข็งใน VSA (a) ตำแหน่งกลไกเริ่มต้น (b) การควบคุมตำแหน่ง (c) ตำแหน่งกลไกเพื่อเพิ่มค่าความแข็ง (d) ตำแหน่งกลไกเพื่อลดค่าความแข็ง

เนื่องจาก VSA ไม่ได้ถูกออกแบบเพื่อใช้กับมือจับโดยเฉพาะ ดังนั้นการใช้ VSA ร่วมกับมือจับ อาจส่งผลในเรื่องของขนาดและน้ำหนักได้ Memar, A.H. และคณะ [8] ได้นำเสนอมือจับที่ปรับค่าความแข็งได้แบบใหม่ โดยนำกลไกของ VSA ประเภทต่อต้าน (antagonistic mechanism) และแม่เหล็กถาวรมาประยุกต์ใช้ตามรูปที่ 2.9 มือจับที่ถูกลำเสนอสามารถควบคุมตำแหน่งของนิ้วจับได้ผ่านการควบคุมตำแหน่งแม่เหล็กทั้ง 2 ด้านของนิ้วจับ และสามารถควบคุมความแข็งได้ผ่านการควบคุมระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับนิ้วจับ รูปที่ 2.10 แสดงหลักการควบคุมตำแหน่งและค่าความแข็ง ในงานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นถึงข้อดีของการปรับค่าความแข็งผ่านการยับยั้งวัตถุที่แตกหักได้ง่าย นอกจากนี้ยังแสดงวิธีใช้ประโยชน์จากพลังงานที่เก็บไว้ในกลไกปรับค่าความแข็งเพื่อเพิ่มขนาดแรงกระแทก โดยหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุด (Trajectory Optimization) ของการตำแหน่งและความแข็ง [9] รูปที่ 2.11 แสดงการทดลองเพิ่มแรงกระแทกของมือจับผ่านการตอกตะปู

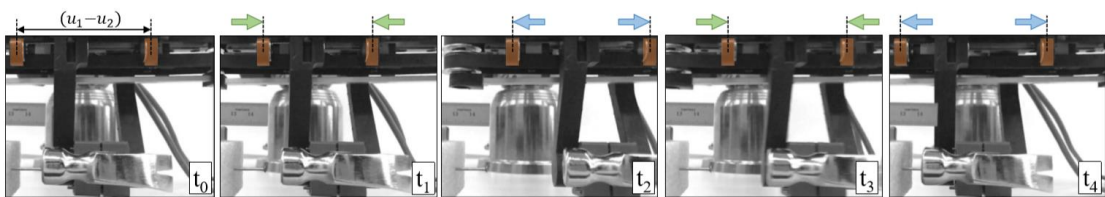




รูปที่ 2.9 รูปจำลอง 3 มิติของมือจับที่ปรับค่าความแข็งได้ด้วยแม่เหล็ก

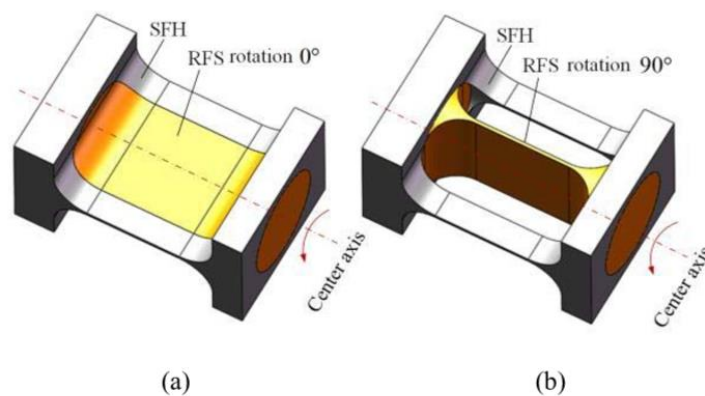


รูปที่ 2.10 แสดงตำแหน่งของแม่เหล็กที่มอเตอร์แต่ละตัวควบคุม

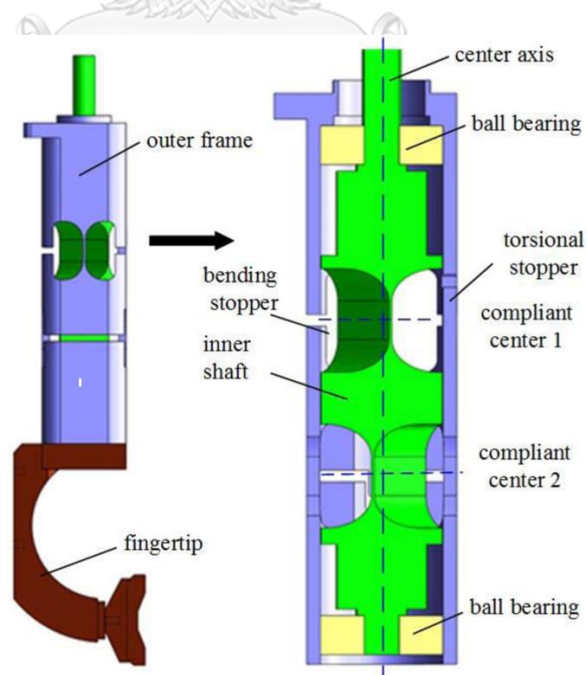


รูปที่ 2.11 การทดลองเพิ่มแรงกระแทกของมือจับผ่านการตอกตะปู

นอกจากการใช้กลไกของ VSA มาประยุกต์แล้วยังมีงานวิจัยนำเสนอมือจับที่ปรับค่าความแข็งได้ผ่านการเปลี่ยนโครงสร้างทางกลของนิ้วจับ (เปลี่ยนแปลงโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่ (second moment of area)) [10] ข้อดีของมือจับนี้คือมีช่วงการปรับค่าความแข็งที่กว้างมากเมื่อเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้า รวมถึงสามารถควบคุมตำแหน่งและค่าความแข็งของแต่ละนิ้วจับได้อย่างอิสระต่อกัน ซึ่งมือจับในงานวิจัยก่อนหน้าไม่สามารถทำได้ รูปที่ 2.12 (a) แสดงลักษณะโครงสร้างนิ้วจับที่มีค่าความแข็งสูง และ (b) แสดงลักษณะโครงสร้างนิ้วจับที่มีค่าความแข็งต่ำ รูปที่ 2.13 แสดงส่วนประกอบของนิ้วจับ โดยส่วนสีเขียวในรูปที่ 2.13 ใช้สำหรับปรับค่าความแข็ง



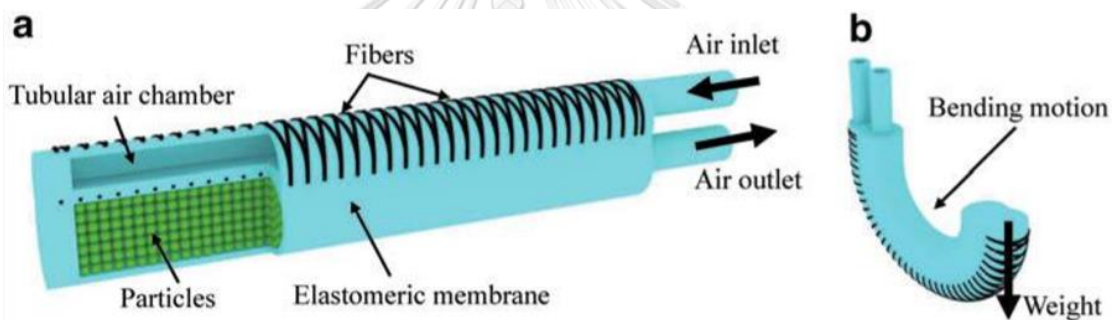
รูปที่ 2.12 (a) ลักษณะโครงสร้างที่มีค่าความแข็งสูง (b) ลักษณะโครงสร้างที่มีค่าความแข็งต่ำ



รูปที่ 2.13 รายละเอียดของโครงสร้างนิ้วจับ

โดยสรุปแล้วกลไกปรับค่าความแข็งของมือจับแบบแข็งเกร็งช่วยเพิ่มความสามารถในการหยิบจับวัตถุ ลดความซับซ้อนการออกแบบตัวควบคุม รวมถึงการเพิ่มหรือลดขนาดของแรงกระแทก แต่สำหรับมือจับอ่อนนุ่มจุดประสงค์ของกลไกปรับค่าความแข็งจะแตกต่างออกไป กล่าวคือกลไกเหล่านี้ทำหน้าที่เพิ่มความสามารถในการออกแรง ทำให้มือจับสามารถหยิบจับวัตถุที่มีน้ำหนักสูงได้ดีขึ้น ต่อจากนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวกับมือจับอ่อนนุ่มที่ปรับค่าความแข็งได้

การบีบอัดอนุภาคเป็นวิธีหนึ่งซึ่งนิยมนำมาใช้เพื่อปรับค่าความแข็งให้กับมือจับ โดยนำวัตถุขนาดเล็ก เช่น ข้าวสาร ถั่วเขียว ฯลฯ บรรจุลงในถุงหรือภาชนะบางอย่างที่มีความยืดหยุ่นสูงและดูดยุทธอากาศภายในออก กลไกรูปแบบนี้นอกจากจะช่วยเพิ่มความแข็งให้นิ้วจับแล้ว อนุภาคภายในถุงยังช่วยเพิ่มพื้นที่สัมผัสกับวัตถุอีกด้วย รูปที่ 2.14 แสดงนิ้วจับที่ขับเคลื่อนด้วยของไหลและปรับค่าความแข็งด้วยการบีบอัดอนุภาค [11] ในรูปที่ 2.15 แสดงนิ้วจับที่ขับเคลื่อนด้วยสายเคเบิลและปรับค่าความแข็งด้วยการบีบอัดอนุภาค [12]

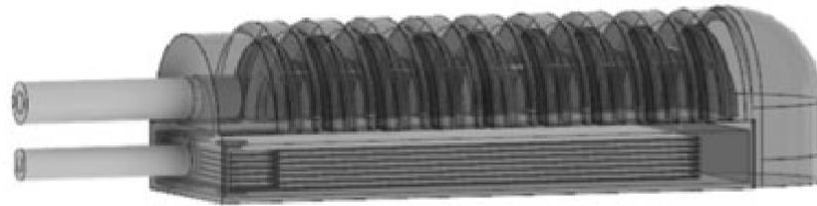


รูปที่ 2.14 นิ้วจับที่ขับเคลื่อนด้วยของไหลและปรับค่าความแข็งผ่านการบีบอัดอนุภาค

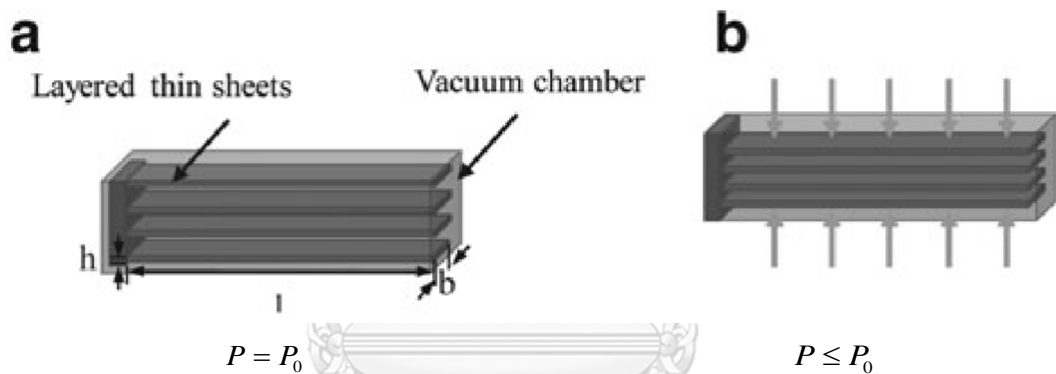


รูปที่ 2.15 แสดงนิ้วจับที่ขับเคลื่อนด้วยสายเคเบิลและปรับค่าความแข็งด้วยการบีบอัดอนุภาค

นอกจากการบีบอัดอนุภาคแล้วยังมีงานวิจัยของ Zhu, M. และคณะ ที่นำเสนอการบีบอัดชั้นแผ่น โดยใช้แผ่นพลาสติกซ้อนกันเป็นชั้น ๆ บรรจุอยู่ในห้อง (chamber) [13, 14] ตามรูปที่ 2.16 ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถปรับความแข็งของนิ้วจับได้มากกว่าการบีบอัดอนุภาค อย่างไรก็ตามการบีบอัดชั้นแผ่นจะไม่ช่วยเพิ่มพื้นที่สัมผัสกับวัตถุ รูปที่ 2.17 แสดงโครงสร้างชั้นของแผ่นพลาสติกเมื่อมีการใส่ความดันดัดลบ

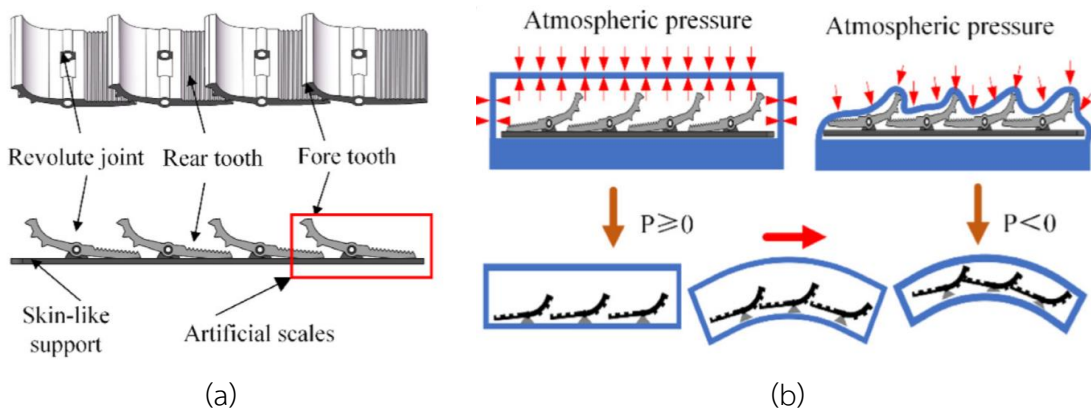


รูปที่ 2.16 นิ้วจับที่ใช้การบีบอัดชั้นเพื่อปรับค่าความแข็ง

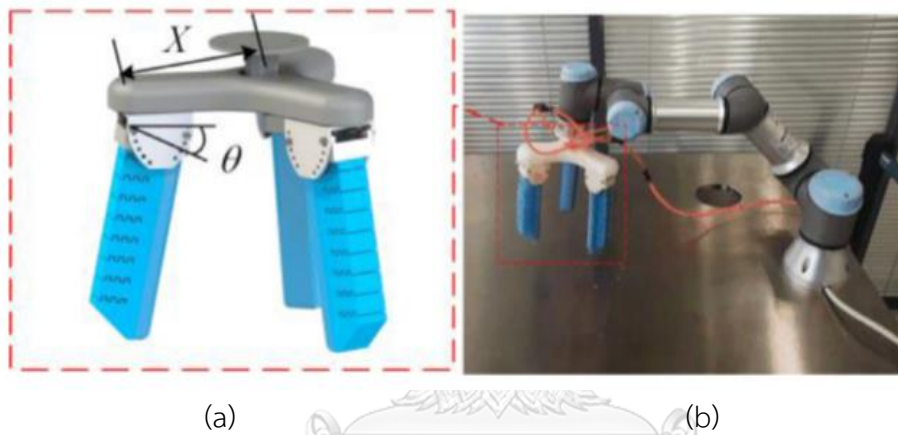


รูปที่ 2.17 (a) ลักษณะโครงสร้างที่มีค่าความแข็งต่ำ (b) ลักษณะโครงสร้างที่มีค่าความแข็งสูง

ต่อมามีงานวิจัยของ Sun, T. และคณะ ได้นำเสนอมือจับที่ปรับค่าความแข็งได้ผ่านกลไกแบบเกล็ดตัวนิ่ม โดยจัดวางเกล็ดให้เรียงตัวต่อกันในห้องอากาศตามรูปที่ 2.18 ใส่แรงดันดัดลบเพื่อให้ฟันของแต่ละเกล็ดล็อกเข้าด้วยกัน รูปที่ 2.19 แสดงแบบจำลอง 3 มิติ และต้นแบบของมือจับในงานวิจัยนี้ [15]



รูปที่ 2.18 แสดงโครงสร้างของเกล็ดและการปรับค่าความแข็ง



รูปที่ 2.19 (a) แบบจำลอง 3 มิติของมือจับที่ปรับค่าปรับค่าความแข็งผ่านโครงสร้างแบบเกล็ดตัวนี้  
(b) ต้นแบบของมือจับปรับค่าปรับค่าความแข็งผ่านโครงสร้างแบบเกล็ดตัวนี้

สรุปการศึกษางานวิจัยในข้างต้น ในแง่ของการศึกษากลไกที่ใช้ปรับค่าความแข็งพบว่ากลไกของมือจับแข็งเกร็งที่ปรับค่าความแข็งได้ไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนาแผ่นที่ปรับค่าความแข็งได้ อย่างไรก็ตามแนวคิดของหุ่นยนต์อ่อนนุ่มซึ่งถูกนำมาใช้กับมือจับอ่อนนุ่มที่ปรับค่าความแข็งได้สามารถนำมาพัฒนาแผ่นที่ปรับค่าความแข็งได้ แต่ต้องวิเคราะห์เพิ่มเติม

ในแง่ของแนวทางการประยุกต์ใช้แผ่นที่ปรับค่าความแข็งได้เพื่อเพิ่มความสามารถในการทำงานของมือจับ พบว่าแผ่นที่ปรับค่าความแข็งได้จะช่วยลดความซับซ้อนในการออกแบบตัวควบคุมเพิ่มความสามารถในการตอบสนองเมื่อมีแรงภายนอกกระทำหรือเมื่อชนกับสภาพแวดล้อม [16] นอกจากนี้ยังเพิ่มช่วงการทำงานของมือจับให้สามารถหยิบจับวัตถุได้หลากหลายมากขึ้นอีกด้วย

## บทที่ 3

### การดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยโดยมีเนื้อหาครอบคลุมตั้งแต่แนวคิดการใช้งานหุ่นยนต์อ่อนนุ่มแบบใหม่ การพัฒนาแผ่นที่สามารถปรับค่าความแข็งได้ (VSPs) รวมถึงการสร้างและออกแบบตัวควบคุมมือจับ เนื้อหาในบทนี้อาจแบ่งได้เป็น 3 หัวข้อย่อยดังนี้

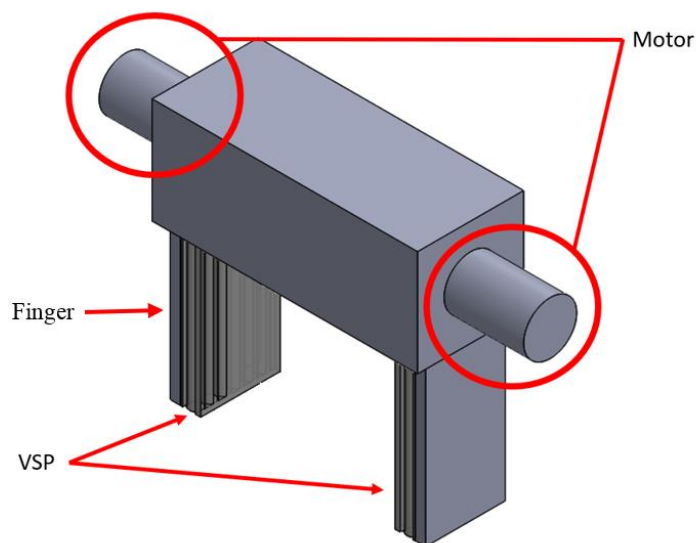
- 1 แนวคิดในงานวิจัย
- 2 แผ่นที่สามารถปรับค่าความแข็งได้
- 3 มือจับอย่างง่าย

#### 3.1 แนวคิดในงานวิจัย

แต่เดิมในงานวิจัยนี้ต้องการพัฒนาผิวหนังเทียมสำหรับหุ่นยนต์โดยใช้ VSPs ติดตั้งบนตัวตามข้อต่อหรือบริเวณที่ต้องสัมผัสกับสภาพแวดล้อมตามรูปที่ 3.1 แต่การพัฒนาแบบนั้นจะมีความซับซ้อนและมีขอบเขตของการศึกษาที่กว้างจนเกินไป จึงลดรูปปัญหาเป็นการนำ VSPs มาประยุกต์ใช้กับมือจับแข็งเกร็งแบบเคลื่อนขนาน 2 องศาอิสระ (jaw parallel gripper with 2 Dofs) และติดตั้ง VSPs ไว้ที่นิ้วจับแต่ละด้านซึ่งสามารถควบคุมค่าความแข็งได้อย่างอิสระต่อกันตามรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 หุ่นยนต์ที่ติดตั้ง VSPs ไว้



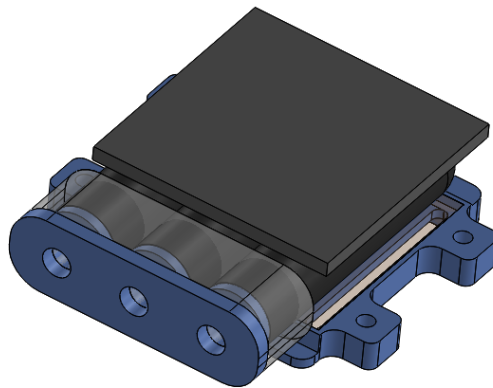
รูปที่ 3.2 มือจับที่มี VSPs ติดตั้งไว้

### 3.2 แผ่นที่สามารถปรับค่าความแข็งได้

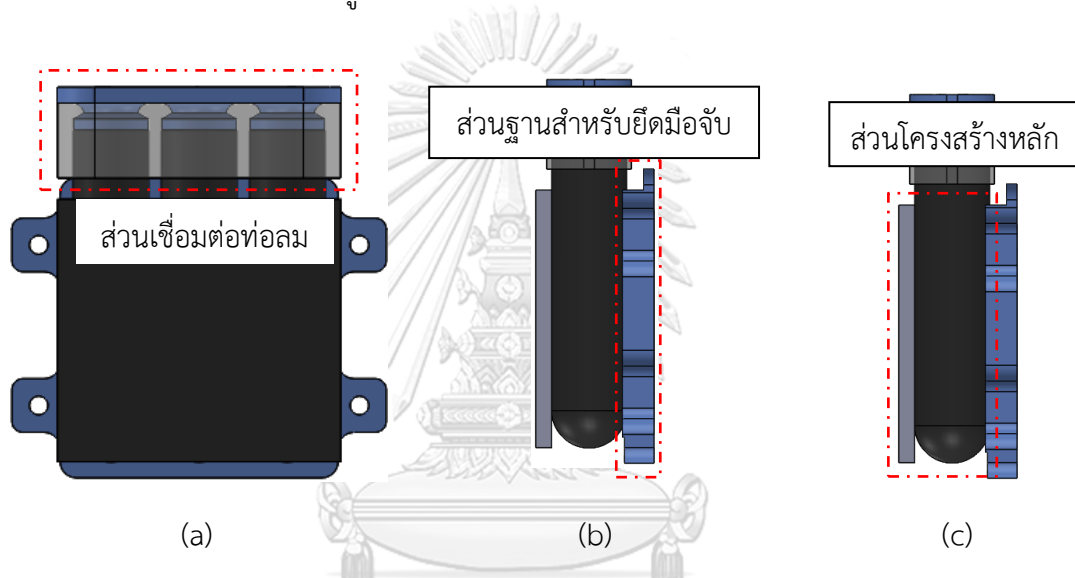
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการพัฒนาแผ่นที่สามารถปรับค่าความแข็งได้หรือ VSPs สำหรับใช้ติดตั้งบนมือจับเชิงเครื่องแบบเคลื่อนขนาน 2 องศาอิสระ โดยมีเนื้อหาครอบคลุมตั้งแต่ การออกแบบ การขึ้นรูป การหาแบบจำลองความแข็ง และสุดท้ายจะกล่าวถึงการควบคุมค่าความแข็ง

#### 3.2.1 การออกแบบ VSPs

VSPs ถูกออกแบบโดยใช้แนวคิดที่ว่ารูปทรงที่มีผิวสัมผัสเป็นส่วนโค้งสามารถปรับค่าความแข็งผ่านการปรับค่าความดันได้ โดย VSPs ที่ออกแบบมามีโครงสร้างภายในเป็นห้องอากาศทรงกระบอกเรียงตัวขนาดกัน 3 ห้องตามรูปที่ 3.3 สำหรับที่มาของแนวคิดการออกแบบจะถูกแสดงในหัวข้อที่ 3.2.1.1 การวิเคราะห์ค่าความแข็งของโครงสร้าง และในหัวข้อที่ 3.2.1.2 จะแสดงการออกแบบ VSPs สำหรับมือจับ รูปที่ 3.4 แสดงส่วนประกอบของ VSPs



รูปที่ 3.3 แบบจำลองสามมิติของ VSPs



รูปที่ 3.4 ส่วนประกอบของ VSPs (a) ส่วนเชื่อมต่อท่อลม (b) ส่วนฐานสำหรับยึดมือจับ (c) ส่วนโครงสร้างหลัก

### 3.2.1.1 การวิเคราะห์ค่าความแข็งของโครงสร้าง

พิจารณาแผนภาพแรงของโครงสร้าง VSPs อย่างง่ายตามรูปที่ 3.5 สามารถเขียนสมการสมดุลของแรงได้ตามสมการที่ 3.1

$$F_e - F_p - 2F_{in} = 0 \quad (3.1)$$

เมื่อ  $F_e$  คือแรงภายนอก

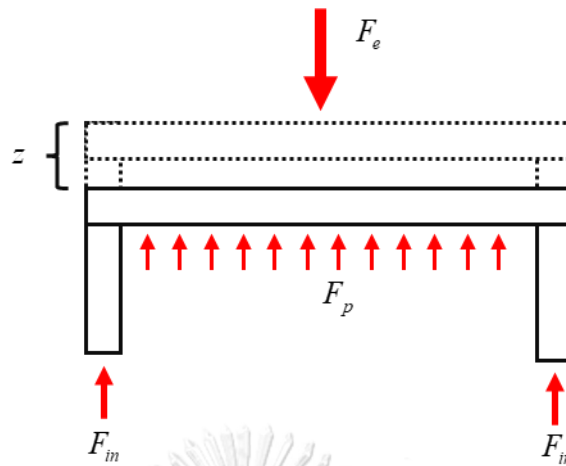
$F_{in}$  คือแรงภายใน

$F_p$  คือแรงที่เกิดจากความดันโดยที่  $F_p = PA$

$P$  คือความดันภายใน VSPs

$A$  คือพื้นที่ของพื้นผิว VSPs ซึ่งสัมผัสแรงภายนอก





รูปที่ 3.5 แผนภาพวัตถุอิสระของผนังท่อด้านบนผ่านภาคตัดขวาง

พิจารณาสมการของความแข็ง

$$k = \frac{\partial F_e}{\partial z} \quad (3.2)$$

เมื่อ  $k$  คือค่าความแข็ง

$\partial F_e$  คือการเปลี่ยนแปลงของแรงภายนอก

$\partial z$  คือการเปลี่ยนแปลงของระยะกอด

สมมติให้

1. VSPs สร้างจากวัสดุที่ไม่สามารถรับแรงกอดได้ แต่รับแรงดึงได้ดี ( $F_{in} = 0$ )
2. แรงภายนอกที่กระทำตั้งฉากกับพื้นและกระจายตัวสม่ำเสมอ
3. ความดันไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะกอด

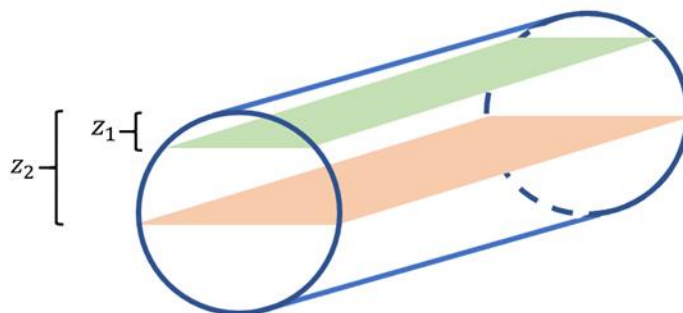
จากข้อสมมติฐานที่ 1 และ 3 จะเขียนสมการที่ 3.2 ใหม่ได้เป็น

$$k = \frac{\partial(PA)}{\partial z} = \frac{P\partial A}{\partial z} + \frac{A\partial P}{\partial z}$$

$$k = \frac{P\partial A}{\partial z} \quad (3.3)$$

จากสมการที่ 3.3 สรุปได้ว่าสามารถปรับค่าความแข็งของ VSPs ผ่านการปรับค่าความดันได้

เมื่อค่า  $\frac{\delta A}{\delta z} \neq 0$  พิจารณารูปทรงที่มีผิวสัมผัสเป็นส่วนโค้งพบว่าพื้นที่สัมผัสแรงภายนอกจะเปลี่ยนแปลงตามระยะกอด ตัวอย่างโครงสร้างแบบนี้เช่น ทรงกระบอกตามรูปที่ 3.6 ซึ่งมีขนาดของพื้นที่สัมผัสแรงภายนอกที่ระยะกอด  $z_1$  น้อยกว่าที่ระยะกอด  $z_2$

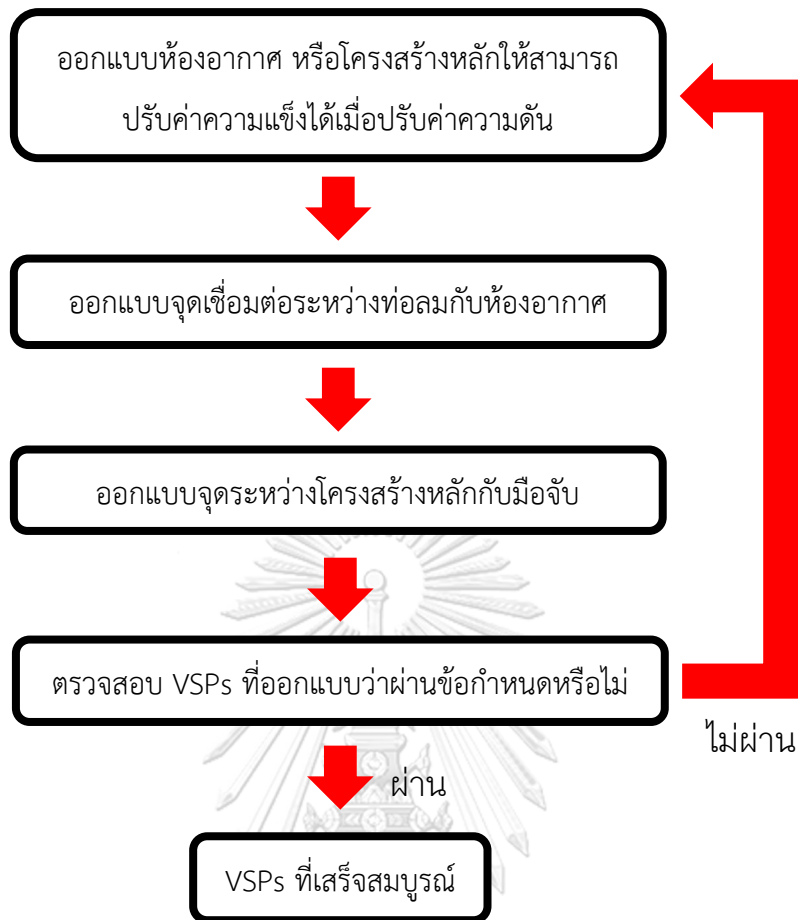


รูปที่ 3.6 แสดงพื้นที่สัมผัสแรงภายนอกของรูปทรงกระบอกที่ระยะ  $z_1$  และ  $z_2$

### 3.2.1.2 การออกแบบ VSPs สำหรับมือจับ

เพื่อประยุกต์ใช้ VSPs กับมือจับขนาดของ VSPs ไม่ควรใหญ่หรือเล็กเกินไป และสามารถปรับค่าความแข็งได้ในช่วงกว้างโดยไม่ต้องใช้ความดันที่สูงเกินไป ในงานนี้เลือกออกแบบให้ส่วนที่สัมผัสกับสภาพแวดล้อมหรือวัตถุของ VSPs มีขนาดโดยประมาณเป็น  $5 \times 5 \text{ cm}$  ความหนาของ VSPs ต้องไม่เกิน  $2 \text{ cm}$  สามารถปรับค่าความแข็งได้อย่างน้อย  $10 \text{ N/mm}$  เมื่อใช้ค่าความดันในช่วง  $0 - 70 \text{ kPa}$  ขั้นตอนการออกแบบ VSPs มีขั้นตอนตามรูปที่ 3.7

จากการออกแบบ VSPs ตามขั้นตอนในรูปที่ 3.7 สุดท้ายได้ VSPs ที่มีโครงสร้างภายในเป็นห้องอากาศทรงกระบอก ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $14 \text{ mm}$  ยาว  $62 \text{ mm}$  หนา  $2 \text{ mm}$  จำนวน 3 ห้องเรียงตัวขนานกัน สามารถขึ้นรูปโดยใช้การหล่อซิลิโคนและเสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยไฟเบอร์ รูปที่ 3.3 แสดงแบบจำลองของ VSPs

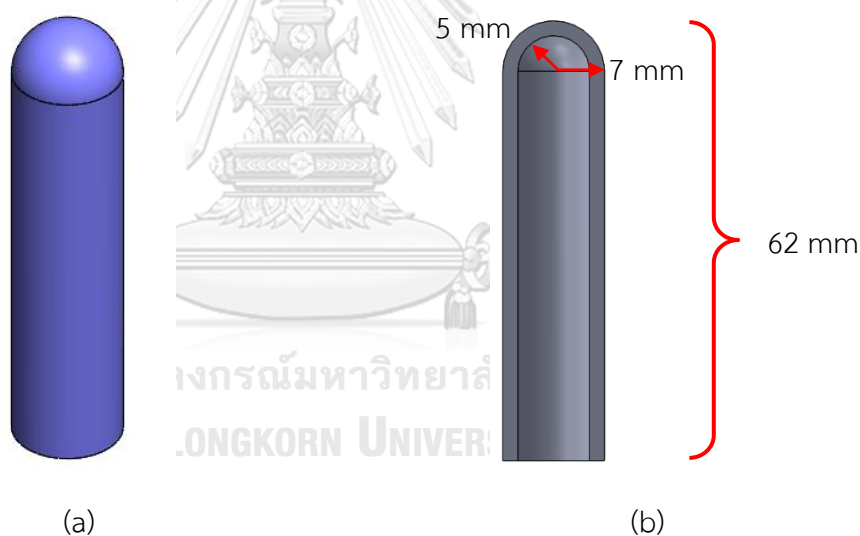


รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการออกแบบ VSPs

### 3.2.2 การขึ้นรูป VSPs

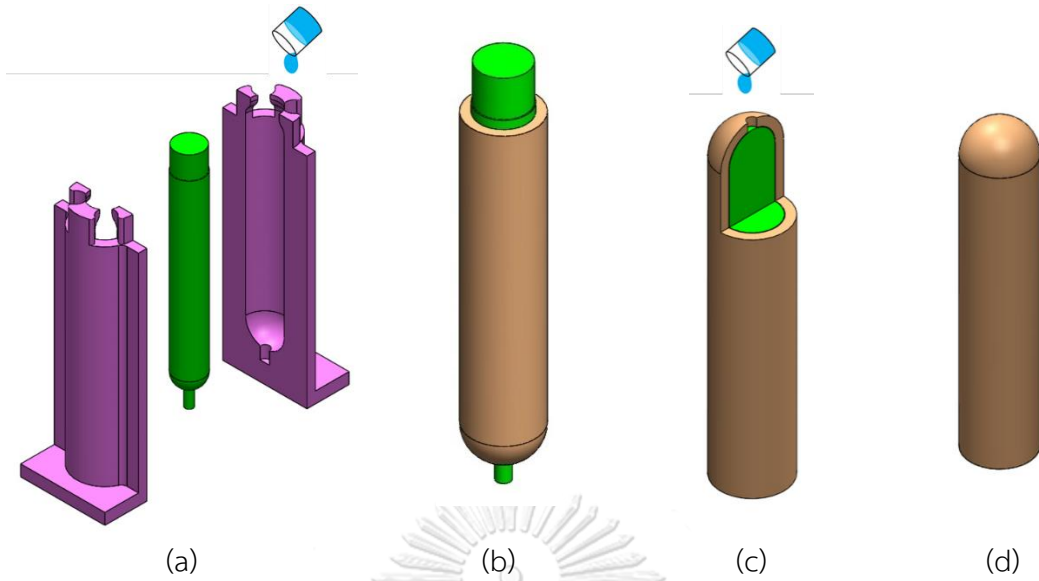
VSPs ถูกขึ้นรูปโดยใช้เทคนิคการหล่อซิลิโคนด้วยแม่พิมพ์ร่วมกับการเสริมเส้นใยไฟเบอร์ซิลิโคน RA-40AB ถูกนำมาใช้ในงานนี้ โดยมีคุณสมบัติตามตารางที่ 3.1 แม่พิมพ์ทั้งหมดสร้างขึ้นด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ (da Vinci 1.0 Pro) ใช้เส้นพลาสติกชนิด pla+ ขนาด 1.75 mm ของบริษัท esun ขั้นตอนขึ้นรูป VSPs สามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนขึ้นรูปซิลิโคนทรงกระบอก ขั้นตอนขึ้นรูปห้องอากาศทรงกระบอก และขั้นตอนยึดห้องอากาศทรงกระบอกเข้าด้วยกันเป็น VSPs

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติซิลิโคน RA-40AB		
ลำดับ	คุณสมบัติ	
1	อัตราส่วนการผสมสาร A:B	1:1
2	ความแข็ง (shore A)	40
3	ความหนืด (Viscosity)	40000 – 50000 cps
4	เวลาทำงาน (working time)	30 – 35 min
5	เวลาแห้ง (curing time)	4 hr
6	Tear Strength	27 N/mm
7	Tensile Strength	6 MPa
8	Shrinkage	≤ 0.1%
9	Elongation at break	350%



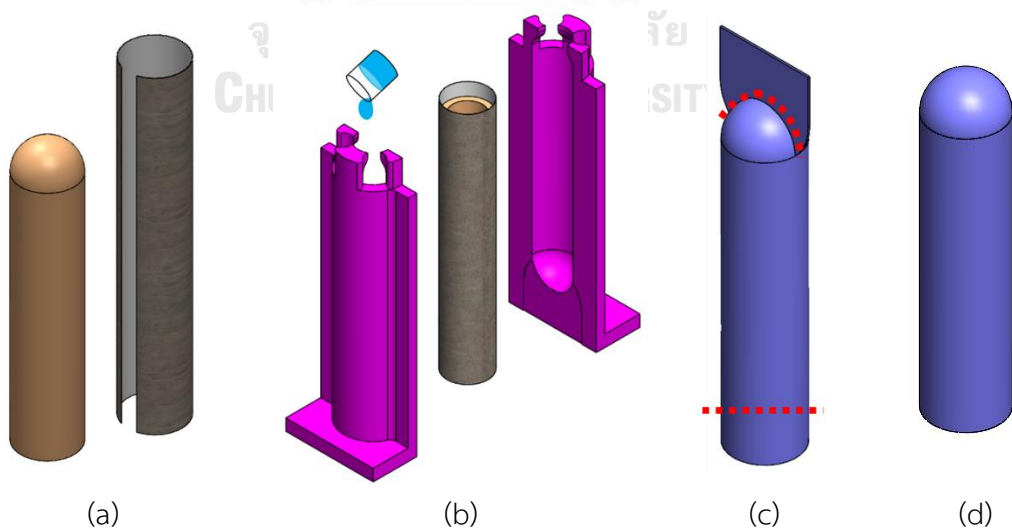
รูปที่ 3.8 (a) ห้องอากาศทรงกระบอก (b) ภาพตัดขวางและขนาดของห้องอากาศ

ซิลิโคนทรงกระบอกสามารถขึ้นรูปได้ดังนี้ ชั้นแรกนำแม่พิมพ์ทั้ง 3 ประกอบกันตามรูปที่ 3.9 (a) และเทซิลิโคนลงไป เมื่อซิลิโคนเซตตัวจะได้ซิลิโคนทรงกระบอกที่มีรูด้านบนตามรูปที่ 3.9 (b) นำแม่พิมพ์ด้านในออกและใส่แม่พิมพ์ใหม่เข้าไป จากนั้นเทซิลิโคนเพื่อปิดรูด้านบนตามรูปที่ 3.9 (c) เมื่อซิลิโคนเซตตัวจะได้ซิลิโคนทรงกระบอกตามรูปที่ 3.9 (d)



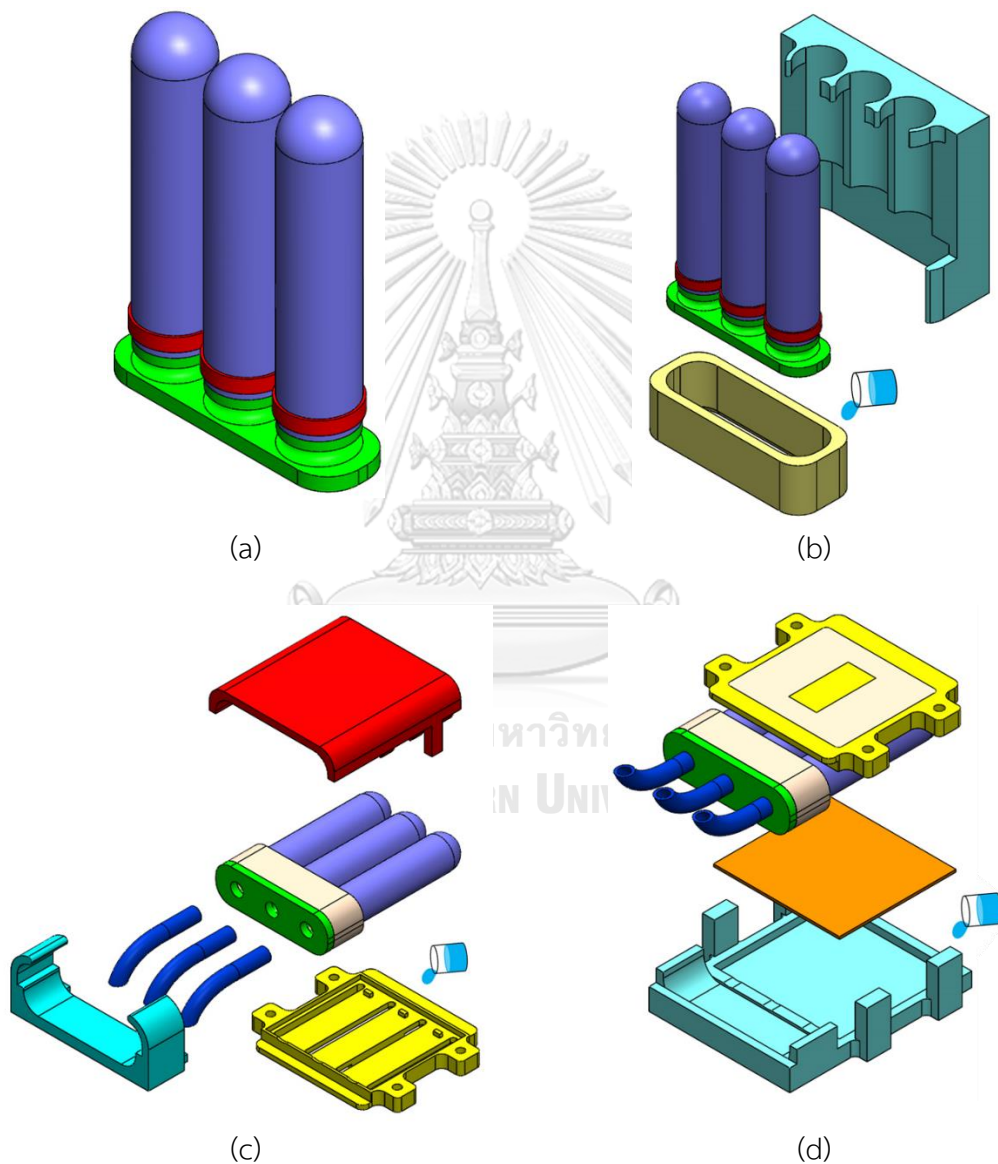
รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการขึ้นรูปซิลิโคนทรงกระบอก

สำหรับการขึ้นรูปห้องอากาศทรงกระบอกหรือห้องอากาศมีขั้นตอนดังนี้ ขั้นแรกใช้ซิลิโคนเหลวทาบซิลิโคนทรงกระบอกและผ้าขนาด  $50 \times 75 \text{ mm}$  จากนั้นใช้ผ้าพันรอบซิลิโคนทรงกระบอกตามรูปที่ 3.10 (a) นำแม่พิมพ์มาประกบซิลิโคนทรงกระบอกที่พันผ้าเสร็จแล้วตามรูปที่ 3.10 (b) เมื่อซิลิโคนเซตตัวจะได้ห้องอากาศที่ไม่เสร็จสมบูรณ์ ตัดแต่งห้องอากาศให้ได้ขนาดที่ต้องการตามรูปที่ 3.10 (c) และรูปที่ 3.10 (d) แสดงห้องอากาศที่เสร็จสมบูรณ์

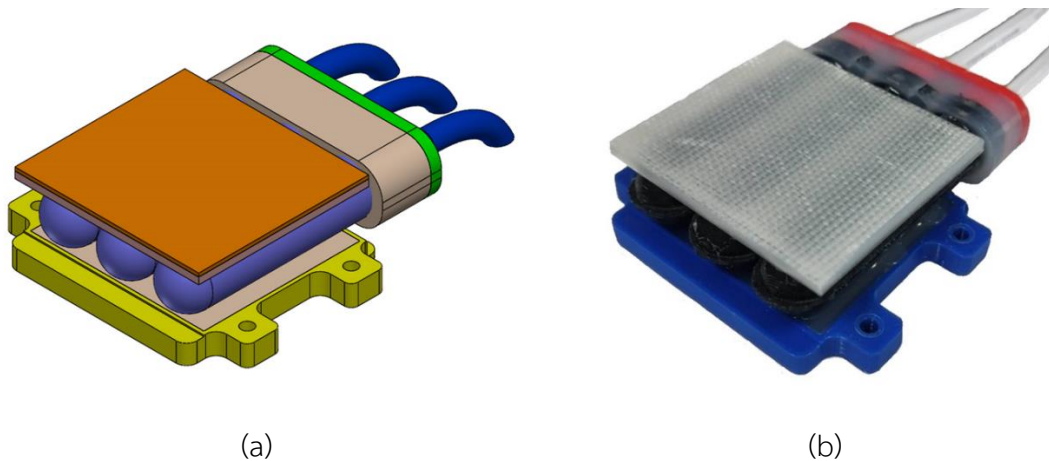


รูปที่ 3.10 ขั้นตอนขึ้นรูปห้องอากาศทรงกระบอก

สุดท้ายเป็นขั้นตอนยึดห้องอากาศเข้าด้วยกันเป็น VSPs ในขั้นตอนนี้จะยึดห้องอากาศทั้ง 3 ห้องเข้ากับจุดเชื่อมต่อท่อลมโดยใช้เคเบิลไทร์ (cable tie) ตามรูปที่ 3.11 (a) และเสริมความแข็งแรงด้วยซิลิโคนตามรูปที่ 3.11 (b) เมื่อซิลิโคนเซตตัวนำท่อลมโพลียูรีเทน (PU tube) ขนาด  $6 \times 4 \text{ mm}$  ต่อเข้ากับจุดยึดท่อลมโดยใช้แอซีโตน (Acetone) เป็นตัวประสาน จากนั้นยึดห้องอากาศทั้ง 3 ห้องกับจุดยึดนี้ไว้โดยใช้ซิลิโคนตามรูปที่ 3.11 (c) สุดท้ายให้หล่อแผ่นซิลิโคนเสริมไฟเบอร์ขนาด  $50 \times 52 \text{ mm}$  ปิดไว้ด้านบนตามรูปที่ 3.11 (d) รูปที่ 3.12 แสดง VSPs แบบจำลองและของจริง



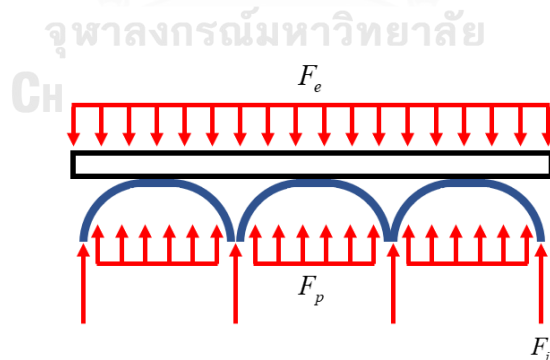
รูปที่ 3.11 ขั้นตอนยึดห้องอากาศเข้าด้วยกันเป็น VSPs



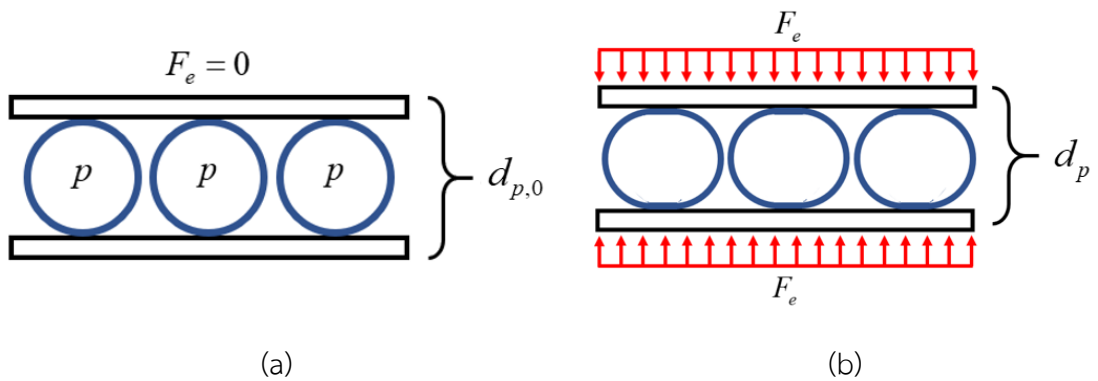
รูปที่ 3.12 VSPs (a) ภาพจำลอง (b) ของจริง

### 3.2.3 การสร้างแบบจำลองความแข็งของ VSPs

ก่อนจะกล่าวถึงการหาแบบจำลองความแข็งของ VSPs ขอนิยามตัวแปรที่ต้องใช้ดังนี้ กำหนดให้แรงภายนอก ( $F_e$ ) ที่กระทำกับ VSPs เป็นแรงกดตั้งฉากกับพื้นผิวสัมผัสตามรูปที่ 3.13 กำหนดให้  $d_{p,0}$  เป็นความหนาของ VSPs เมื่อไม่มีแรงภายนอกและมีความดัน  $p$  ตามรูปที่ 3.14 (a) กำหนดให้  $\delta$  เป็นระยะขยายตัวเนื่องจากความดันหรือระยะที่ VSPs เสียรูปเนื่องจากความดัน ( $\delta = d_{p,0} - d_{0,0}$ ) กำหนดให้  $d_p$  เป็นความหนาของ VSPs ในกรณีที่มีความดัน  $p$  และมีแรงภายนอก  $F_e$  กระทำตามรูปที่ 3.14 (b) กำหนดให้  $z$  คือระยะที่ VSPs เสียรูปเนื่องจากแรงภายนอก ( $z = d_{p,0} - d_p$ ) และกำหนดให้  $z_0$  คือระยะที่ VSPs เสียรูปเนื่องจากแรงภายนอกเมื่อไม่มีความดัน ( $z_0 = d_{0,0} - d_0$ )



รูปที่ 3.13 แผนภาพแรงภาคตัดขวางของ VSPs

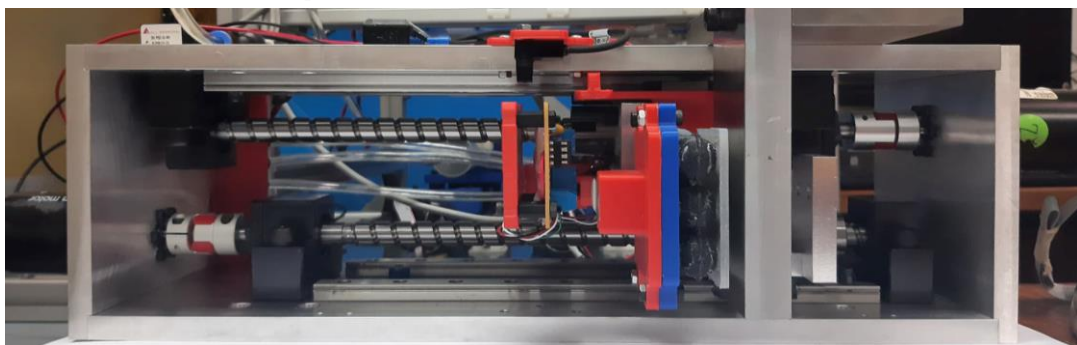


รูปที่ 3.14 ความหนาของ VSPs (a) เมื่อมีความดัน  $p$  (b) เมื่อมีแรงภายนอกขนาด  $F_e$

### 3.2.3.1 การทดลองหาแบบจำลองความแข็ง

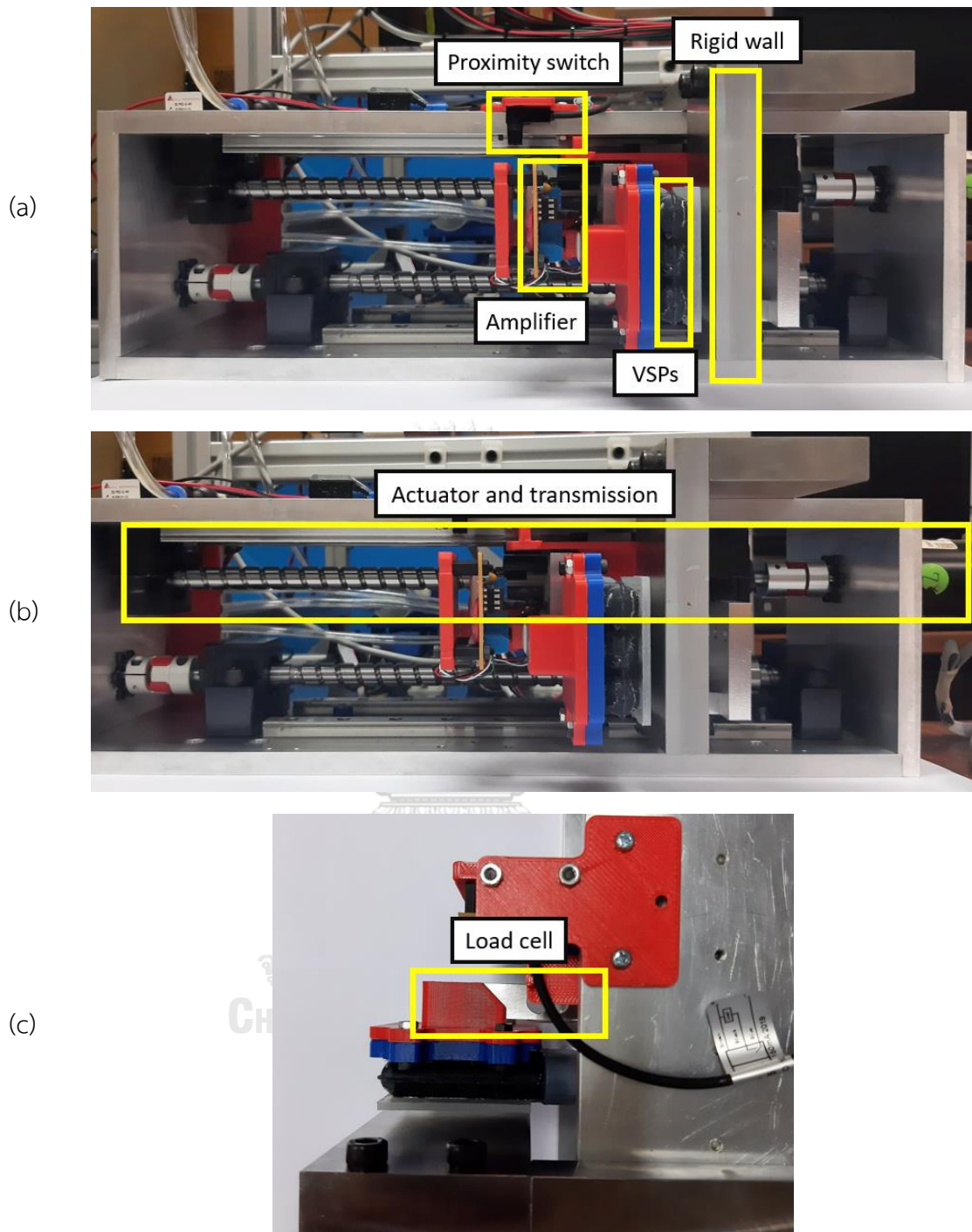
แบบจำลองความแข็งของ VSPs หาได้จากอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของระยะยก เพื่อหาอัตราการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจำเป็นต้องทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะยก ใช้การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์นี้กับ VSPs ทั้ง 2 ชุด

มือจับในงานวิจัยนี้ถูกใช้เป็นชุดทดสอบค่าความแข็ง โดยติดตั้งกำแพงและเปลี่ยนตำแหน่งของลิมิตสวิตช์ (Limit Switch) ใหม่ตามรูปที่ 3.15 และ 3.16 สำหรับรายละเอียดของอุปกรณ์ในชุดทดสอบจะกล่าวถึงอีกครั้งในหัวข้อที่ 3.3.1 การออกแบบมือจับ ทั้งนี้ค่าความแข็งที่หาได้จากชุดทดสอบนี้จะไม่ใช่ค่าความแข็งของ VSPs เพียงอย่างเดียว แต่เป็นค่าความแข็งของทั้งระบบ อย่างไรก็ตามค่าความแข็งของ VSPs มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความแข็งส่วนที่เหลือ ดังนั้นสามารถประมาณค่าความแข็งของ VSPs ให้เท่ากับค่าความแข็งที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 3.15 ชุดทดสอบค่าความแข็ง

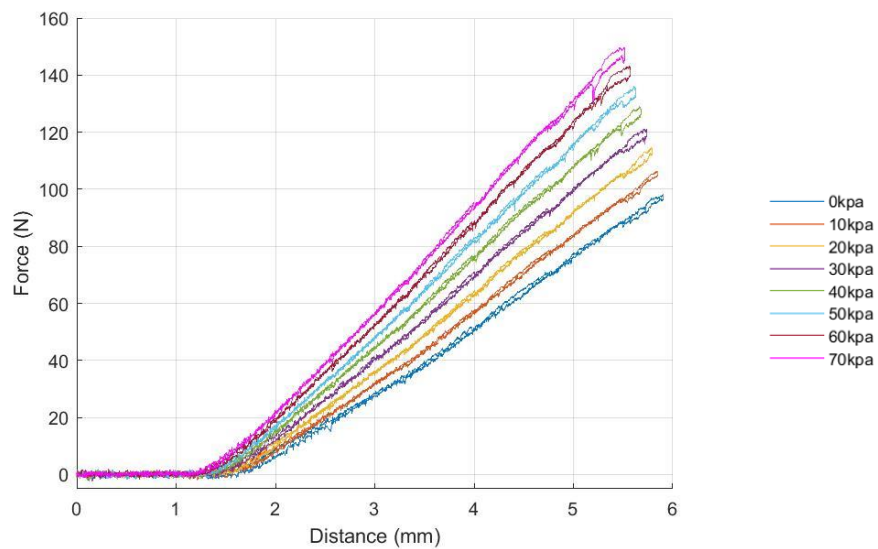




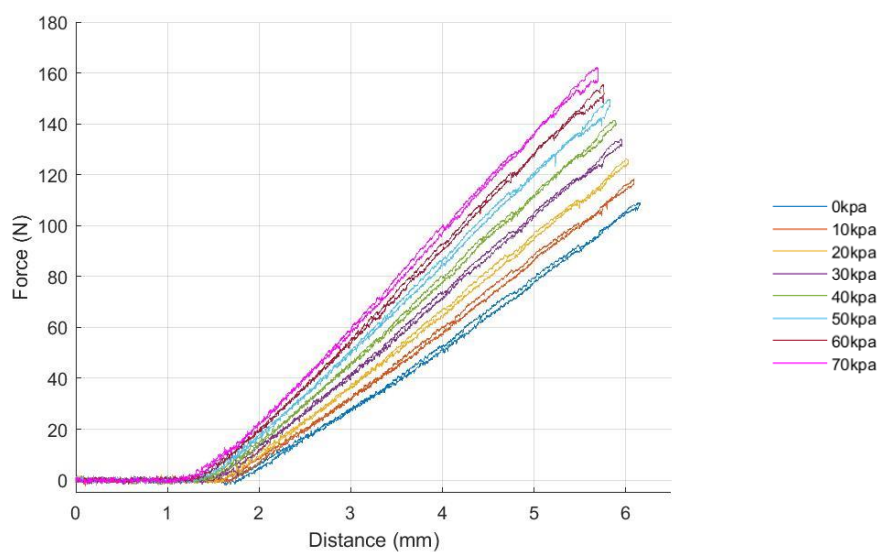
รูปที่ 3.16 ส่วนประกอบของชุดทดสอบค่าความแข็ง

ขั้นตอนการทดลองสามารถแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเป็นการตั้งค่าเริ่มต้นให้อุปกรณ์เช่น ตั้งตำแหน่งเริ่มต้นของนิ้วจับ ตั้งแรงเริ่มต้นให้เป็นศูนย์ และตั้งความดันเริ่มต้นให้ VSPs เป็นต้น ต่อมาเป็นขั้นตอนทดสอบ ในขั้นตอนนี้จะควบคุมนิ้วจับให้เคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นเข้าหากำแพงด้วยความเร็ว  $1\text{mm/s}$  เมื่อ VSPs มีระยะกดเป็น  $4.5\text{mm}$  ควบคุมให้นิ้วจับเคลื่อนที่ออก

จากกำแพงมายังจุดเริ่มต้นด้วยความเร็ว 1mm/s โดยระยะยกสามารถประมาณได้จากตำแหน่งนิ้วจับลอบอกด้วยตำแหน่งนิ้วจับที่เริ่มสัมผัสกำแพงหรือเริ่มมีแรงภายนอกมากกระทำ วัดตำแหน่งของนิ้วจับจากเอ็นโค้ดเดอร์ของมอเตอร์และวัดแรงภายนอกจากโหลดเซลล์ ข้อมูลจะถูกจัดเก็บทุก 0.5 ms รูปที่ 3.17 และ 3.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและตำแหน่งนิ้วจับของ VSPs ชุด 1 และชุด 2 ตามลำดับที่ค่าความดันต่างๆ



รูปที่ 3.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและตำแหน่งนิ้วจับของ VSPs ชุด 1 ที่ค่าความดันต่างๆ



รูปที่ 3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและตำแหน่งนิ้วจับของ VSPs ชุด 2 ที่ค่าความดันต่างๆ

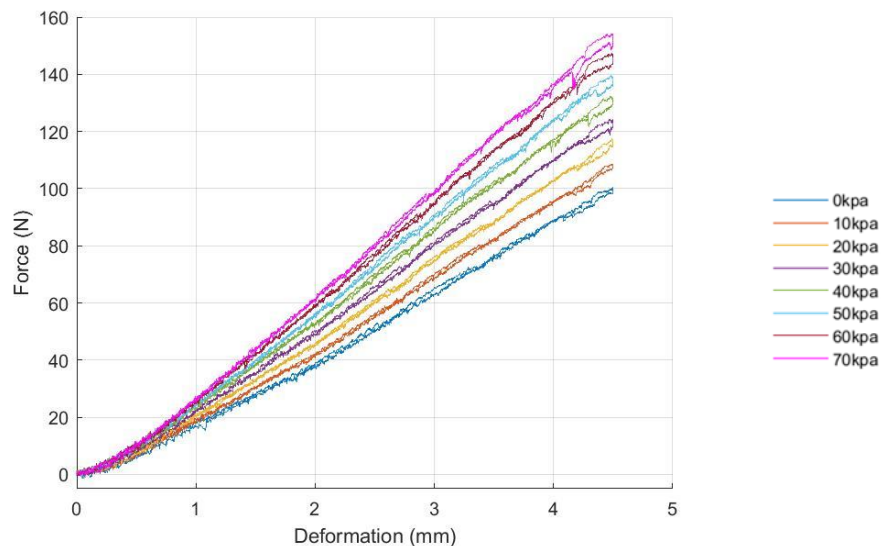
### 3.2.3.2 แบบจำลองความแข็ง

ผลที่ได้จากการทดลองก่อนหน้าไม่ใช่ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะกดของ VSPs แต่เป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงและตำแหน่งนิ้วจับของ VSPs ดังนั้นต้องจัดการกับผลการทดลองก่อนพิจารณารูปที่ 3.17 และ 3.18 ระยะกดของ VSPs สามารถประมาณได้จากตำแหน่งนิ้วจับลบออกด้วยตำแหน่งนิ้วจับที่เริ่มมีแรงภายนอกมากกระทำ ดังนั้นสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะกดของ VSPs ชุดที่ 1 และ 2 ได้ตามรูปที่ 3.19 และ 3.20 นอกจากนี้ยังพบว่า VSPs มีการพองตัวเนื่องจากความดันอีกด้วย โดยระยะพองของ VSPs ที่ความดันต่างๆ สามารถหาได้จากตำแหน่งนิ้วจับที่เริ่มมีแรงเมื่อไม่มีความดันภายในลบออกด้วยตำแหน่งนิ้วจับที่เริ่มมีแรงเมื่อมีความดันใด ๆ ระยะพองตัวของ VSPs ชุดที่ 1 และ 2 สามารถเขียนได้ตามสมการที่ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ

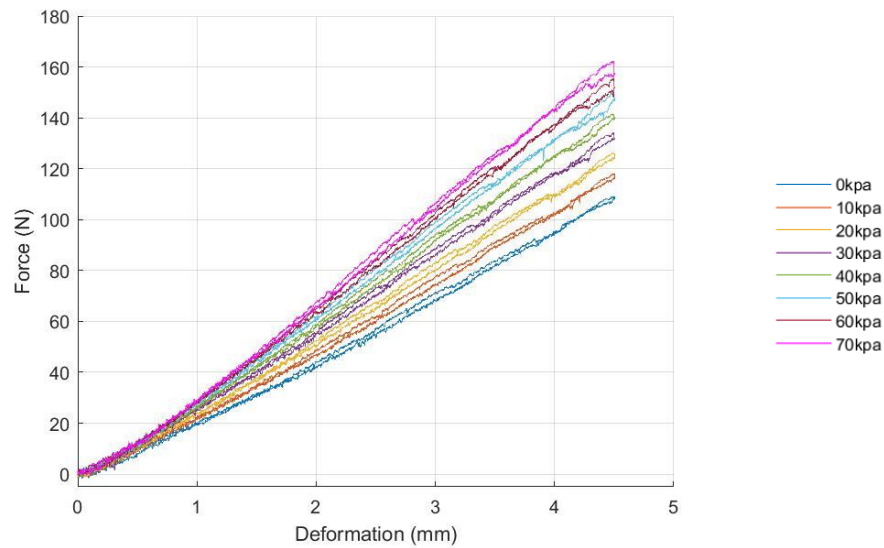
$$\delta(p) = 0.5 \left( \frac{p}{p_M} \right) \quad (3.4)$$

$$\delta(p) = 0.65 \left( \frac{p}{p_M} \right) \quad (3.5)$$

เมื่อ  $p_M = 100 \text{ kPa}$   
 $p$  คือค่าความดันภายใน VSPs



รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะกดของ VSPs ชุดที่ 1



รูปที่ 3.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะกดของ VSPs ชุดที่ 2

พิจารณารูปที่ 3.19 และ 3.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะกดสามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วงคือ ช่วงที่มีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น (ระยะกด 0–1 mm) และช่วงที่มีความสัมพันธ์แบบเป็นเชิงเส้น (ระยะกด 1–4.5 mm) จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถหาเส้นโค้งที่เหมาะสม (curve fitting) ของ VSPs ชุดที่ 1 และ 2 ได้ตามสมการที่ 3.6 และ 3.7

$$F_1(z, P) = \begin{cases} a_1 z^2 + b_1 z & ; 0 \leq z \leq 1 \\ k_1(1, P)z + (F_1(1, P) - k_1(1, P)) & ; 1 < z \leq 4.5 \end{cases} \quad (3.6)$$

เมื่อ  $F_1(1, P) = -9 \left( \frac{P}{P_M} \right)^2 + 20.7 \left( \frac{P}{P_M} \right) + 16.3$

$$k_1(1, P) = 23.6 + 18.2 \left( \frac{P}{P_M} \right)$$

$$a_1 = k_1(1, P) - F_1(1, P)$$

$$b_1 = F_1(1, P) - a_1$$

$$F_2(x, P) = \begin{cases} a_2 z^2 + b_2 z & ; 0 \leq z \leq 1 \\ k_2(1, P)z + (F_2(1, P) - k_2(1, P)) & ; 1 < z \leq 4.5 \end{cases} \quad (3.7)$$

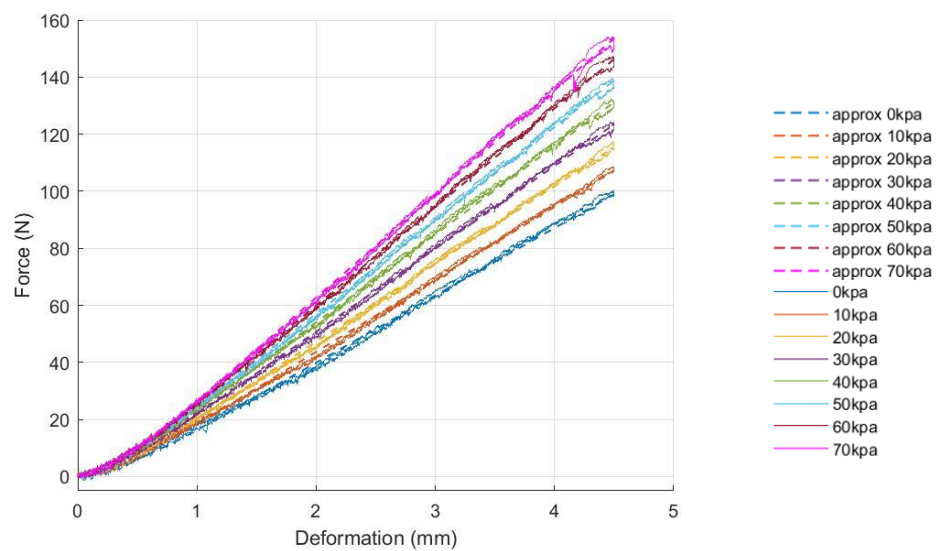
เมื่อ  $F_2(1, P) = -13.2 \left( \frac{P}{P_M} \right)^2 + 24.2 \left( \frac{P}{P_M} \right) + 19$

$$k_2(1, P) = 25.2 + 18.2 \left( \frac{P}{P_M} \right)$$

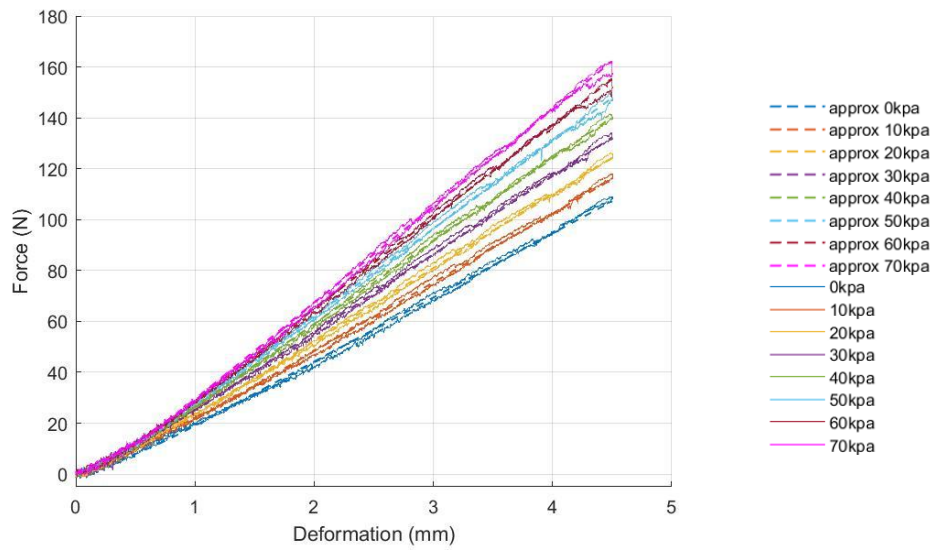
$$a_2 = k_2(1, P) - F_2(1, P)$$

$$b_2 = F_2(1, P) - a_2$$

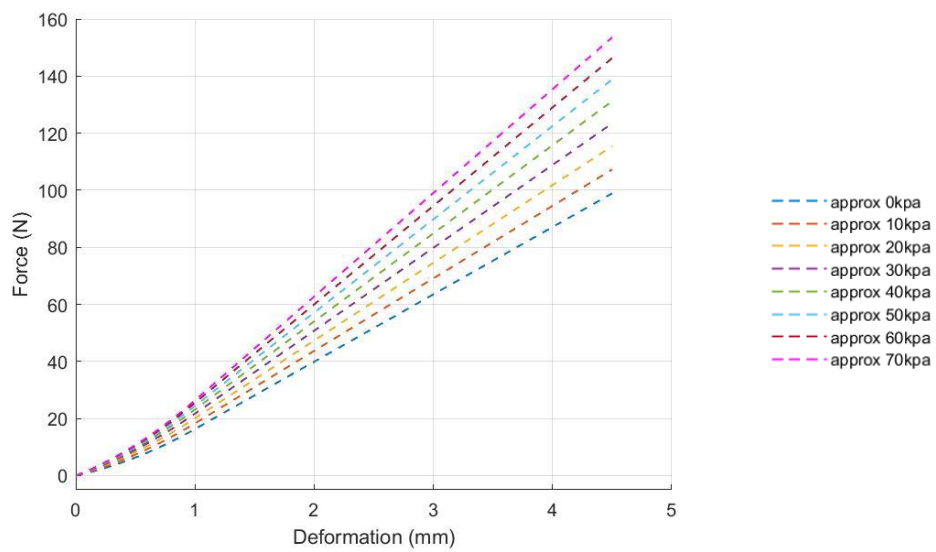
นำข้อมูลความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองและจากสมการประมาณมาเขียนบนกราฟเดียวกัน จะได้ผลตามรูปที่ 3.21 และ 3.22 และข้อมูลจากสมการประมาณสามารถเขียนกราฟได้ตามรูปที่ 3.23 และ 3.24



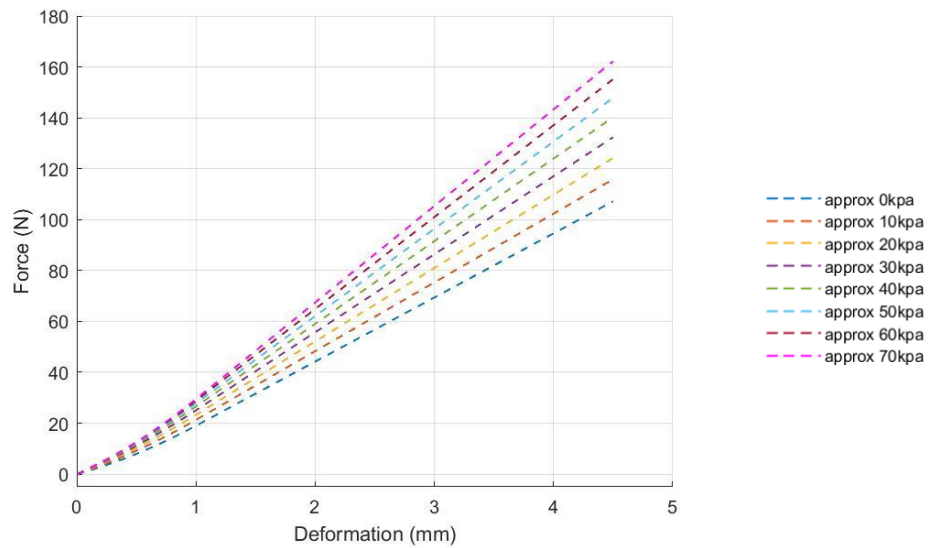
รูปที่ 3.21 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะกดของ VSPs ชุดที่ 1 โดยเส้นทึบแสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลอง และเส้นปะแสดงข้อมูลจากสมการความสัมพันธ์ที่ 3.6



รูปที่ 3.22 ระหว่างแรงและระยะกดของ VSPs ชุดที่ 2 โดยเส้นทึบแสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลอง และเส้นปะแสดงข้อมูลจากสมการความสัมพันธ์ที่ 3.7



รูปที่ 3.23 ระหว่างแรงและระยะกดของ VSPs ชุดที่ 1 จากสมการความสัมพันธ์ที่ 3.6



รูปที่ 3.24 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะยกตัวของ VSPs ชุดที่ 2 จากสมการความสัมพันธ์ที่ 3.7

ค่าความแข็งของ VSPs ชุดที่ 1 และ 2 หาได้จากการหาค่าอนุพันธ์ของสมการที่ 3.6 และ 3.7 เทียบกับระยะยก สมการค่าความแข็งของ VSPs ชุดที่ 1 และ 2 สามารถเขียนได้นี้

$$k_{s,1}(z, P) = \begin{cases} 2a_1z + b_1 & ; 0 \leq z \leq 1 \\ k_1(1, P) & ; 1 < z \leq 4.5 \end{cases}$$

$$k_{s,2}(z, P) = \begin{cases} 2a_2z + b_2 & ; 0 \leq z \leq 1 \\ k_2(1, P) & ; 1 < z \leq 4.5 \end{cases}$$

พิจารณาสมการค่าความแข็งข้างต้นพบว่าสมการมีความซับซ้อนสูง เนื่องจากค่าความแข็งไม่ได้เป็นฟังก์ชันของความดันเพียงอย่างเดียวแต่เป็นฟังก์ชันของระยะยกด้วย อย่างไรก็ตามค่าความแข็งในช่วงที่เป็นฟังก์ชันของระยะยกหรือที่ระยะยก  $0-1\text{ mm}$  มีช่วงที่ไม่กว้าง ดังนั้นสามารถประมาณสมการความแข็งใหม่โดยใช้ช่วงที่เป็นฟังก์ชันของความดันเพียงอย่างเดียวได้ สมการความแข็งของ VSPs ชุดที่ 1 และ 2 สามารถเขียนใหม่ได้ตามสมการที่ 3.8 และ 3.9

$$k_1(P) = 23.6 + 18.2 \left( \frac{P}{P_M} \right) \quad (3.8)$$

$$k_2(P) = 25.2 + 18.2 \left( \frac{P}{P_M} \right) \quad (3.9)$$

### 3.2.4 การควบคุมค่าความแข็งของ VSPs

พิจารณาสมการที่ 3.8 และ 3.9 พบว่าความแข็งเป็นฟังก์ชันของความดัน ดังนั้นสามารถควบคุมความแข็งของ VSPs ได้ผ่านการควบคุมความดันในระบบ ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการควบคุมค่าความแข็งผ่านแผนควบคุมความดัน โดยเนื้อหาจะแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อย่อยดังนี้

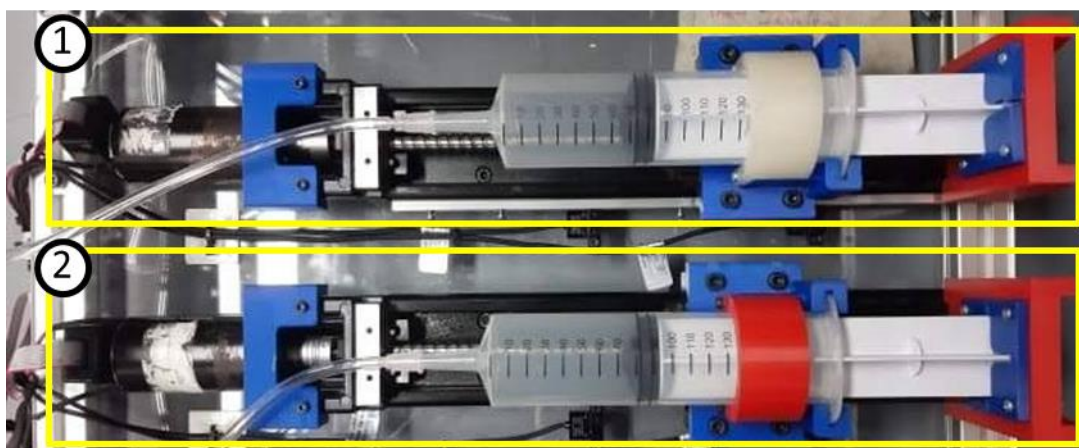
1. ปัมป์เข็มฉีดยา
2. สมการพลศาสตร์ของปัมป์เข็มฉีดยา
3. แผนควบคุมความดัน

#### 3.2.4.1 ปัมป์เข็มฉีดยา

ปัมป์เข็มฉีดยาเป็นปัมป์ลูกสูบแบบหนึ่งที่ใช้กระบอกสูบเป็นเข็มฉีดยา (syringe) สามารถควบคุมความดันผ่านการควบคุมปริมาตรในกระบอกสูบ รูปที่ 3.25 แสดงปัมป์เข็มฉีดยาที่ถูกนำมาใช้ โดยปัมป์เข็มฉีดยานี้ประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ เข็มฉีดยาและชุดขับเคลื่อนเชิงเส้น (linear slide table)

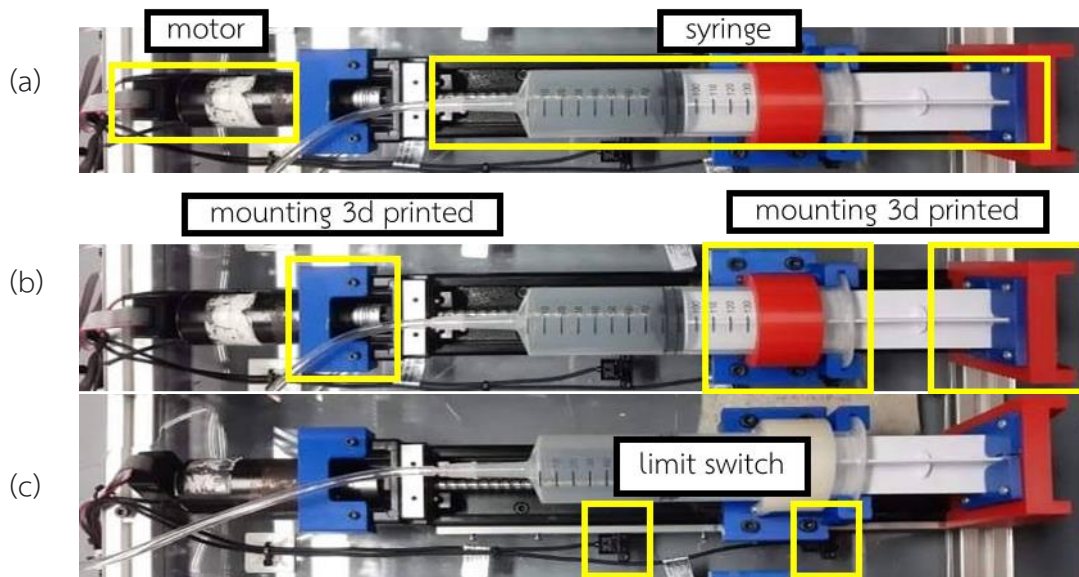
เข็มฉีดยาที่ใช้มีขนาด 150ml เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 19.8mm สำหรับชุดขับเคลื่อนเชิงเส้นใช้รางขับเคลื่อนของ THK รุ่น KR30 มีระยะเคลื่อนการทำงาน (stock) 200mm มีระยะลีด (lead) ขนาด 6mm ติดตั้งมอเตอร์ maxon รุ่น 148877 และมีเอ็นโค้ดเดอร์ขนาด 500ppr กระบอกฉีดยาและชุดขับเคลื่อนเชิงเส้นยึดเข้าด้วยกันโดยใช้ตัวยึดที่สร้างขึ้นจากเครื่องพิมพ์สามมิติ

การทำงานของปัมป์เข็มฉีดยาจะถูกควบคุมด้วยด้วยคอมพิวเตอร์ผ่านวงจรแปลงสัญญาณ (sensoray 826) และวงจรควบคุมมอเตอร์ (escon 50/10) สำหรับรายละเอียดและข้อมูลทางเทคนิคของอุปกรณ์ที่ใช้จะมีพูดถึงในหัวข้อที่ 3.3.1 รูปที่ 3.26 แสดงส่วนประกอบของปัมป์เข็มฉีดยา รูปที่ 3.27 แสดงแผนผังทางไฟฟ้าของปัมป์เข็มฉีดยาตัวที่ 1 รูปที่ 3.28 แสดงแผนผังทางไฟฟ้าของปัมป์เข็มฉีดยาตัวที่ 2

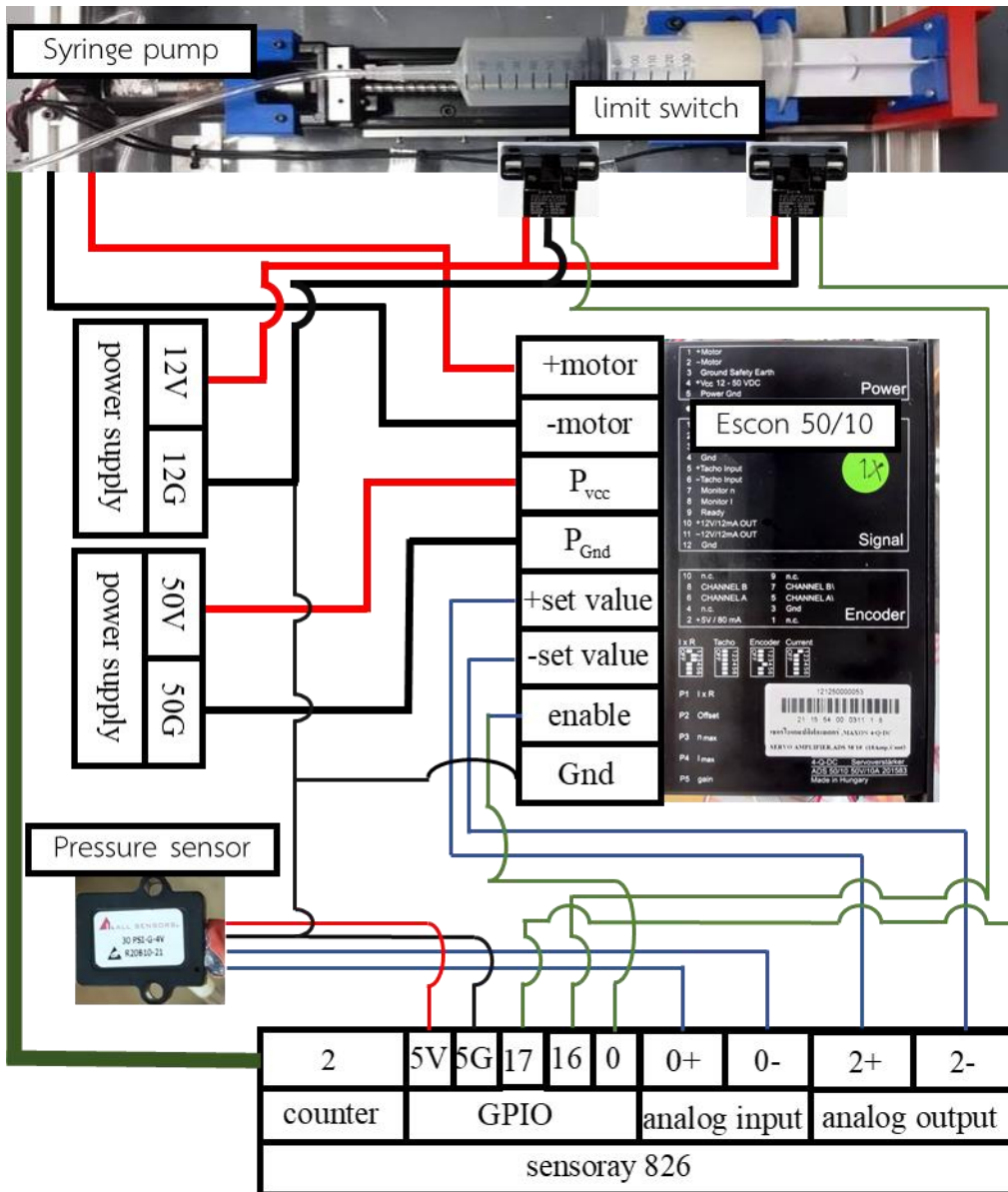


รูปที่ 3.25 ปัมป์เข็มฉีดยาทั้ง 2 ตัว

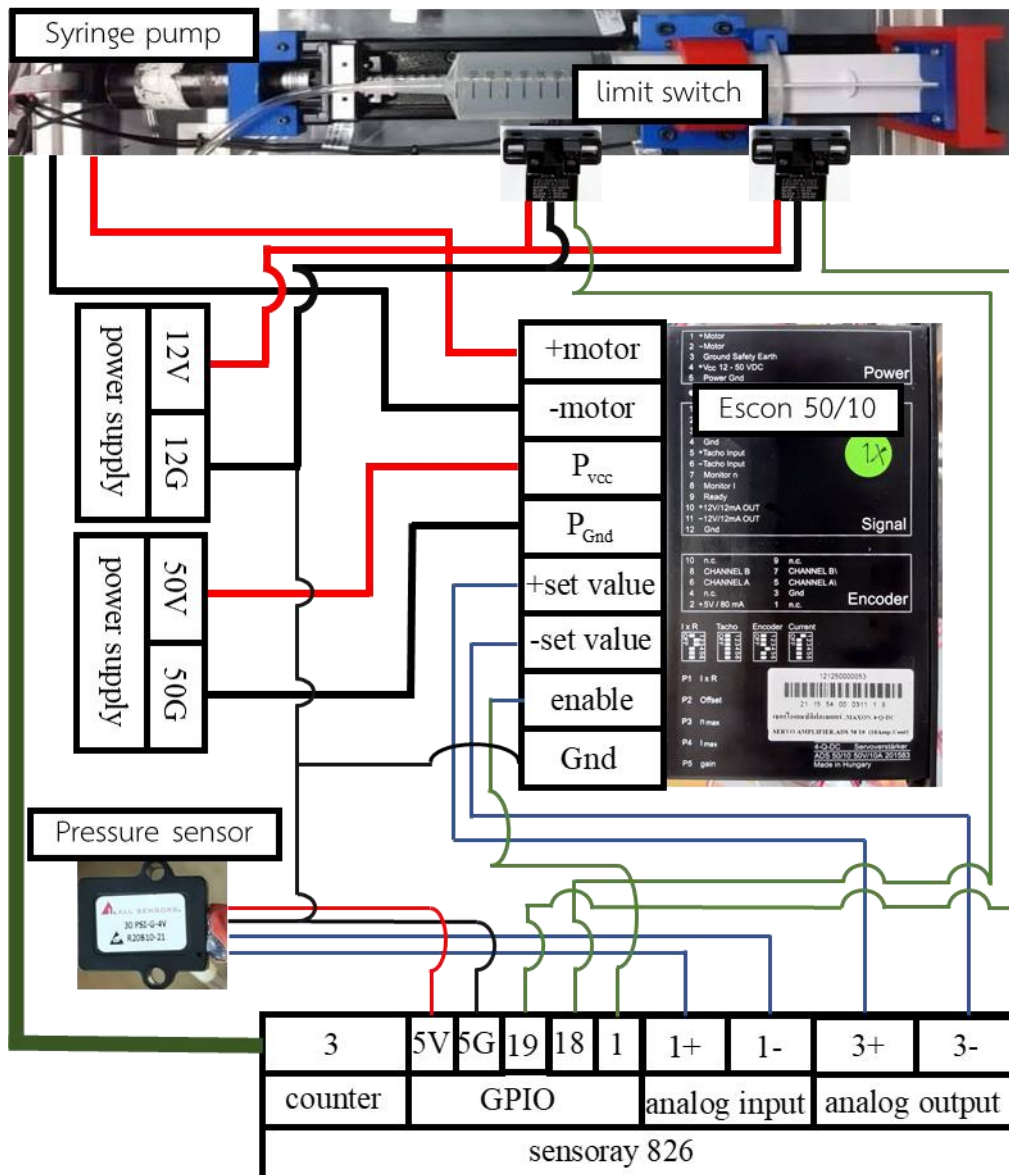




รูปที่ 3.26 ส่วนประกอบของปั๊มเข็มฉีดยา (a) ตำแหน่งของมอเตอร์และเข็มฉีดยา (b) ตำแหน่งของตัวยึด (c) ตำแหน่งของลิมิตสวิตช์



รูปที่ 3.27 แผนผังทางไฟฟ้าของปั๊มเข็มฉีดยาตัวที่ 1



รูปที่ 3.28 แผนผังทางไฟฟ้าของปั๊มเข็มฉีดยาตัวที่ 2

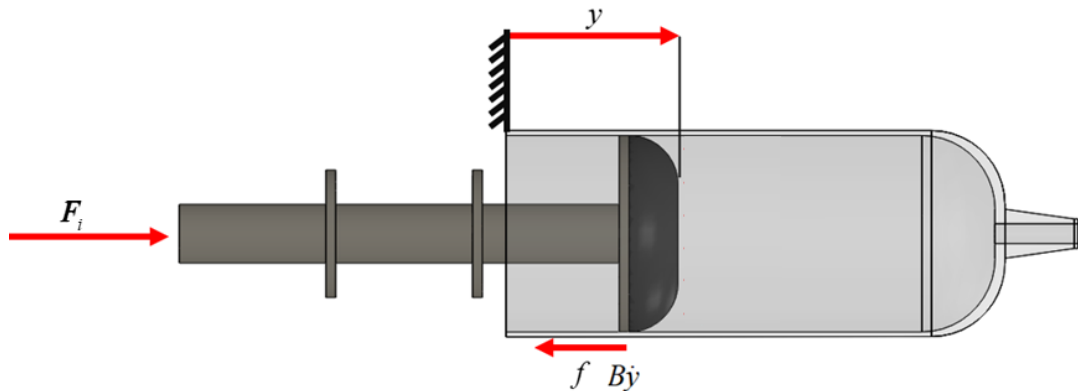
ด้วยลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้ อินพุต (input) ของปั๊มเข็มฉีดยาสามารถจัดให้อยู่ในรูปของแรงได้ เมื่อกำหนดให้ประสิทธิภาพของบอลสกรูเป็น 90% สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ตามสมการที่ 3.10 สำหรับรายละเอียดการหาความสัมพันธ์ดังกล่าวจะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 3.3.1.3 ต่อจากนี้ให้ถือว่าสามารถให้อินพุตของปั๊มเข็มฉีดยาเป็นแรงได้โดยตรง

$$F = 47990.07(I_a) \text{ mN} \quad (3.10)$$

เมื่อ  $I_a$  คือกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์

### 3.2.4.2 สมการพลศาสตร์ของปั๊มเข็มฉีดยา

ในหัวข้อนี้จะแสดงการหาค่าพารามิเตอร์ในสมการพลศาสตร์ของปั๊มเข็มฉีดยาโดยใช้เทคนิค on-line parameter estimation [17] พิจารณารูปที่ 3.29 สมการพลศาสตร์ของปั๊มเข็มฉีดยาสามารถเขียนได้ตามสมการที่ 3.11



รูปที่ 3.29 แผนภาพแรงของปั๊มเข็มฉีดยาเมื่อไม่มีแรงดัน

$$F_i = m\ddot{y} - B\dot{y} - f \quad (3.11)$$

เมื่อ  $F_i$  คืออินพุตของระบบ หรือแรงที่ใส่ให้ปั๊มเข็มฉีดยา  
 $y, \dot{y}, \ddot{y}$  คือตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่งของเข็มฉีดยา  
 $f$  คือ แรงเสียดทานของระบบ  
 $B$  คือความหน่วงของระบบ  
 $m$  คือมวลส่วนที่เคลื่อนที่ของระบบ

ประมาณค่าแรงเสียดทานโดยใช้โมเดลแรงเสียดทานแบบคูลอมบ์ (coulomb friction model) ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

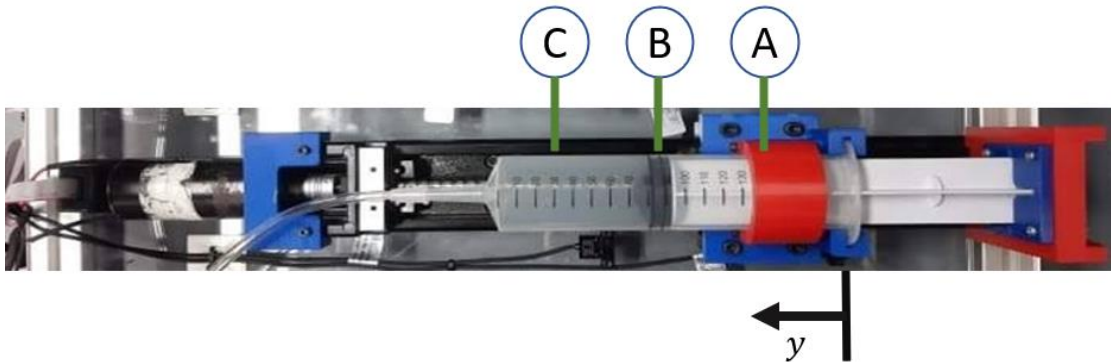
$$f = |f| \operatorname{sgn}(\dot{y})$$

เมื่อ  $|f|$  คือขนาดของแรงเสียดทานซึ่งได้จากการวัด ( $|f| = \mu N$ )  
 $\mu$  คือสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต  
 $N$  คือแรงปฏิกิริยาแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัส

สมมติให้แรงปฏิกิริยาแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัสและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตทั้งสถิตและจลน์มีค่าคงที่ จะได้ว่าขนาดของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นมีขนาดคงที่

ทดสอบหาขนาดของเสียดทานเฉลี่ยในระบบโดยใช้วิธีเพิ่มขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ใส่ให้ปั๊มเข็มฉีดยา วัดขนาดของกระแสไฟฟ้าขณะเข็มฉีดยาเริ่มเคลื่อนที่ไปทิศ  $\dot{y}$  และ  $-\dot{y}$  ที่ตำแหน่งห่าง

จากจุดตั้งต้นเป็นระยะ 6,10 และ 14cm โดยใช้ตำแหน่งแทนเป็น A, B และ C ตามลำดับ รูปที่ 3.30 แสดงตำแหน่งที่ทดสอบหาค่าแรงเสียดทาน ตารางที่ 3.2 แสดงขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ทำให้เข็มฉีดยาเริ่มเคลื่อนที่



รูปที่ 3.30 ตำแหน่งที่ทดสอบหาค่าแรงเสียดทาน

ตารางที่ 3.2 ขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ทำให้เข็มฉีดยาเริ่มเคลื่อนที่			
ตำแหน่ง	ทิศ	$I_a$ (A)	$ \vec{f} $ (mN)
A	$\hat{y}$	0.18	
	$-\hat{y}$	0.21	
B	$\hat{y}$	0.19	
	$-\hat{y}$	0.21	
C	$\hat{y}$	0.19	
	$-\hat{y}$	0.22	
เฉลี่ย		0.2	9472

ชดเชยแรงเสียดทานโดยใช้แรงเสียดทานเฉลี่ยที่ได้ตามตารางที่ 3.2 ให้แรงอินพุตมีค่า  $F_i = F_d + |f| \text{sgn}(\dot{y})$  เมื่อ  $F_d$  คือแรงอินพุตที่ต้องการ สามารถเปลี่ยนสมการที่ 3.11 ให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\vec{F} = \vec{F}_d = m\ddot{y} + b\dot{y} \quad (3.12)$$

การประมาณค่าพารามิเตอร์จะต้องจัดรูปสมการใหม่ให้อยู่ในรูปของ  $y(k) = W(k)A$  เมื่อ  $y(k)$  คือเวกเตอร์เอาต์พุตหรือตำแหน่งของเข็มฉีดยา  $W(t)$  คือเมทริกซ์ของสัญญาณและ  $A$  คือเวกเตอร์เก็บพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า เพื่อจัดรูปสมการที่ 3.12 ให้อยู่ในรูปทั่วไปของระบบอันดับ 2 ใช้ค่าความแข็งเสมือน ( $k_0$ ) เข้ามาช่วย สมการที่ 3.12 สามารถเขียนใหม่ได้ตามสมการที่ 3.13 และสามารถจัดให้อยู่ในรูปของ  $y(k) = W(k)A$  ได้ตามสมการที่ 3.14

$$\vec{F} = m\ddot{y} + b\dot{y} + k_0 y \quad (3.13)$$

เมื่อ  $k_0$  คือค่าความแข็งเสมือน

$$y(k) = \begin{bmatrix} Y_{ff} & Y_f & F_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{b}{\lambda} - \frac{c}{\lambda^2} - 1 \\ 2 - \frac{b}{\lambda} \\ \frac{a}{\lambda^2} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

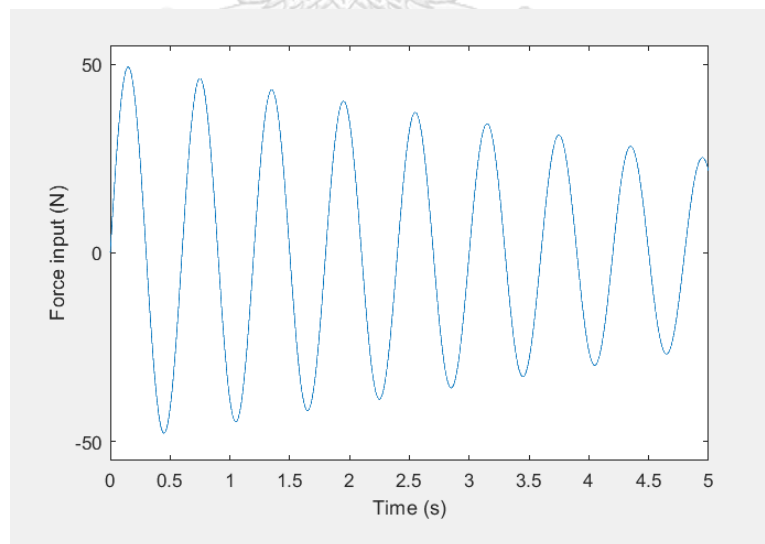
เมื่อ  $a, b, c$  คือ  $\frac{1}{m}, \frac{B}{m}, \frac{k_0}{m}$  ตามลำดับ

$$Y_{ff}(k) \text{ คือตำแหน่งเอาต์พุตที่ผ่านตัวกรองความถี่อันดับสอง } (Y_{ff}(s) = \frac{\lambda^2 Y(s)}{(s+\lambda)^2})$$

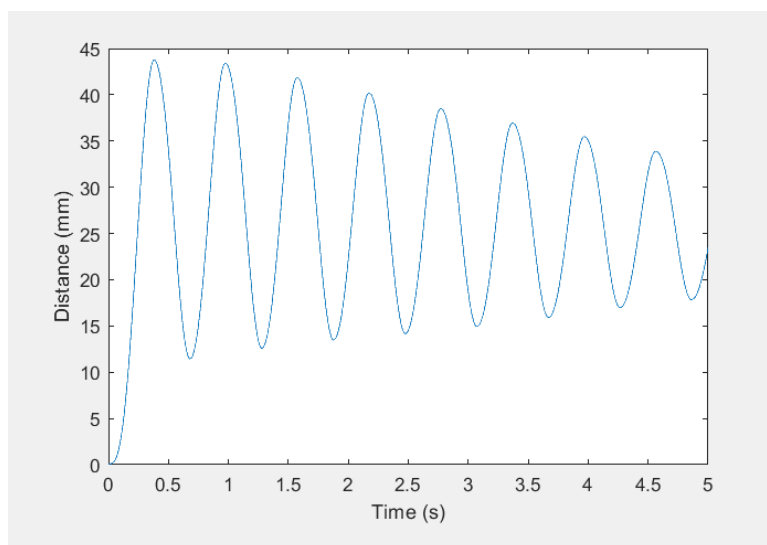
$$Y_f(k) \text{ คือตำแหน่งเอาต์พุตที่ผ่านตัวกรองความถี่อันดับหนึ่ง } (Y_f(s) = \frac{\lambda Y(s)}{(s+\lambda)})$$

$$F_{ff}(k) \text{ คือแรงอินพุตที่ผ่านตัวกรองความถี่อันดับสอง } (F_{ff}(s) = \frac{\lambda^2 F(s)}{(s+\lambda)^2})$$

ในการทดสอบให้  $F_d$  เป็นฟังก์ชันไซน์ (sine function) มีค่าตามรูปที่ 3.31 ทำการวัดตำแหน่งเข็มฉีดยาทุก 1ms รูปที่ 3.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งเข็มฉีดยาและเวลา



รูปที่ 3.31 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงลัพธ์ของเข็มฉีดยาและเวลา



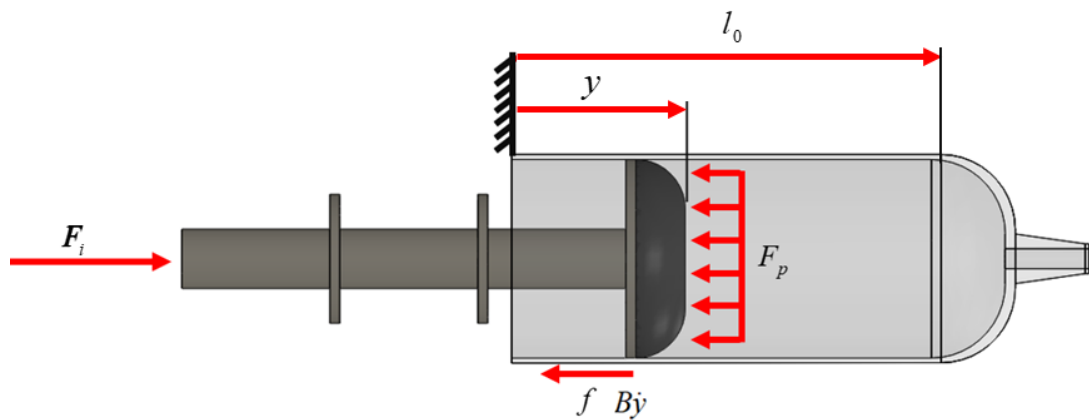
รูปที่ 3.32 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของเข็มฉีดยาและเวลา

ให้  $\lambda = 100\text{s}^{-1}$  หาค่าเมทริกซ์ของสัญญาณและแทนค่าลงในสมการที่ 3.14 แก้มสมการหาเวกเตอร์  $A$  โดยใช้ซูโดอินเวอร์ส (pseudo inverse) ผ่านฟังก์ชัน pinv() ในโปรแกรม matlab จะได้ว่าเวกเตอร์  $A = [-0.9130 \quad 1.9129 \quad 4.8174 \times 10^{-6}]'$  และสามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ในสมการพลศาสตร์ของปั๊มเข็มฉีดยาได้ตามตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ของปั๊มเข็มฉีดยา	
มวล	20.7577 kg
ความหน่วง	180.7110 Ns/m
ความแข็งเสมือน	3.0834 N/m

พิจารณาข้อมูลตามตารางที่ 3.4 พบว่าค่าความแข็งเสมือนซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ไม่มีอยู่จริงตามสมการพลศาสตร์ที่ได้วิเคราะห์มาก่อนหน้า แต่เป็นพารามิเตอร์ที่สร้างขึ้นมาเพื่อใช้ประมาณค่าพารามิเตอร์ตัวอื่นโดยเฉพาะ ค่าความแข็งเสมือนจึงควรมีค่าเป็นศูนย์ อย่างไรก็ตามค่าความแข็งเสมือนที่ได้จากการประมาณมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ซึ่งอาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนของการวัด การประมาณค่าแรงเสียดทานหรือสัญญาณรบกวนอื่น ทั้งนี้ความแข็งเสมือนมีค่าไม่สูงมากเมื่อเทียบกับพจน์อื่นสามารถประมาณเป็นศูนย์ได้

## 3.2.4.3 แผนควบคุมความดัน



รูปที่ 3.33 แผนภาพแรงของเข็มฉีดยา

พิจารณาแผนภาพแรงของเข็มฉีดยาเมื่อมีความดันตามรูปที่ 3.33 สามารถเขียนสมการพลศาสตร์ได้ดังนี้

$$F - F_p - f - B\dot{y} = m\ddot{y} \quad (3.15)$$

เมื่อ  $F$  คือแรงอินพุตของระบบ หรือแรงของมอเตอร์คูณกับอัตราทดของตัวส่งกำลัง

$F_p$  คือแรงดัน ( $F_p = pA_c$ )

$p$  คือความดันเกจ (Gauge Pressure)

$A_c$  คือพื้นที่หน้าตัดของกระบอกฉีดยา

$f$  คือแรงเสียดทาน

$B$  คือความหน่วงของระบบ

$m$  คือมวลส่วนที่เคลื่อนที่ของระบบ

$y, \dot{y}, \ddot{y}$  คือตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่งของกระบอกฉีดยาตามลำดับ

เมื่อกระบอกฉีดยาเคลื่อนที่อัดหรือคลายอากาศจะก่อให้เกิดความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรและความดัน สมมติให้อากาศประพฤติตัวแบบแก๊สอุดมคติ (Ideal gas) ไม่มีการรั่วของอากาศในระบบ และไม่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างพื้นที่ปิดกับสภาพแวดล้อมภายนอก สามารถประมาณความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นด้วยกระบวนการโพลีโทรปิกแบบเอนโทรปีคงที่ได้ ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้



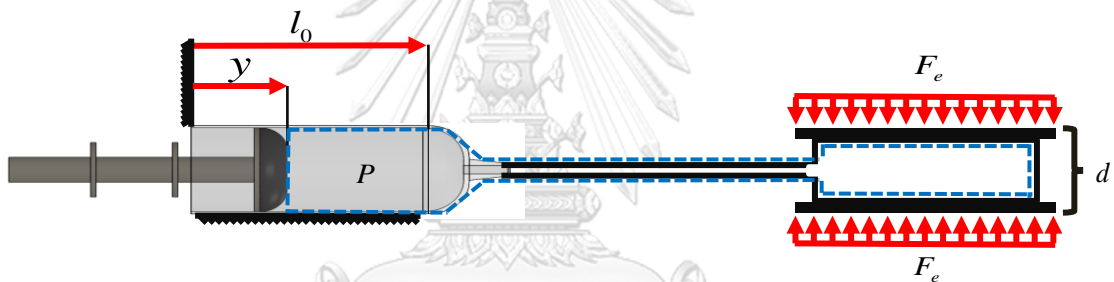
$$(p + p_a)V^{1.4} = c = \text{constant} \quad (3.16)$$

- เมื่อ  $p_a$  คือความดันของบรรยากาศที่  $25^\circ\text{C}$  ( $p_a = 101.325\text{ kPa}$ )  
 $V$  คือปริมาตรในพื้นที่ปิด (close chamber) ( $V = V_c + V_f + V_s$ )  
 $V_c$  คือปริมาตรในกระบอกฉีดยา  
 $V_f$  คือปริมาตรในท่อลมและข้อต่อ  
 $V_s$  คือปริมาตรใน VSPs

พิจารณารูปที่ 3.34 ปริมาตรในกระบอกฉีดยาสามารถประมาณได้ตามสมการที่ 3.17 ปริมาตรในท่อลมและข้อต่อเป็นปริมาตรคงที่ได้จากการวัด

$$V_c = A_c(l_0 - y) \quad (3.17)$$

- เมื่อ  $l_0$  คือความยาวของกระบอกฉีดยา



รูปที่ 3.34 แผนภาพของปั๊มเข็มฉีดยาและVSPs

เนื่องจากซิลิโคนมีคุณสมบัติที่เรียกว่าการซึมผ่าน (Permeability) ซึ่งอนุญาตให้อากาศในจุดที่มีความดันสูงซึมผ่านซิลิโคนไปยังจุดที่มีความดันต่ำ ส่งผลให้มวลของอากาศในระบบมีค่าไม่คงที่ นอกจากนี้ยังเกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างภายในและภายนอกระบบอีกด้วย ดังนั้นสมการที่ 3.16 ไม่สามารถใช้ได้โดยตรง เนื่องจากจะเกิดความผิดพลาดสูงขึ้นตามเวลาที่ผ่านไป อย่างไรก็ตาม ความสัมพันธ์ของปริมาตรและความดันในช่วงเวลาสั้นๆ ยังสามารถใช้กระบวนการโพลีโทรปิกแบบเอนโทรปีคงที่มาพิจารณาได้ ปรับปรุงสมการที่ 3.16 ใหม่ได้เป็น

$$(p_m + p_a)V_m^{1.4} = (p_d + p_a)V_d^{1.4} \quad (3.18)$$

- เมื่อ  $p_m$  คือความดันที่ได้จากการวัด  
 $V_m$  คือปริมาตรที่ได้จากการวัด ซึ่งมีค่าเท่ากับปริมาตรในพื้นที่ปิดในช่วงเวลานั้นๆ  
 $p_d$  คือความดันที่ต้องการ หรือความดันอ้างอิง  
 $V_d$  คือปริมาตรที่ต้องการ

สามารถหาดำแหน่งของกระบอกฉีดยาในช่วงเวลาหนึ่งได้ตามสมการที่ 3.19

$$y_d = l_0 - \frac{\sqrt[1.4]{\frac{(p_m + p_a)V_m^{1.4}}{(p_d + p_a)} - V_s - V_f}}{A_c} \quad (3.19)$$

ในทางปฏิบัติตำแหน่งที่ต้องการจากสมการที่ 3.19 จะมีความคลาดเคลื่อนทั้งจากการวัดการประมาณค่าบางอย่างและปัจจัยอื่น ๆ ที่ไม่ได้คำนึงถึง เพื่อชดเชยความผิดพลาดเหล่านี้ใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์เข้ามาช่วย ตำแหน่งของกระบอกฉีดยาที่ผ่านการปรับแก้สามารถเขียนได้ตามสมการที่ 3.20

$$y_r = y_d - \left( K_p (p_m - p_d) + K_i \int (p_m - p_d) dt \right) \left( 1 - \frac{p_d}{200000} \right) \quad (3.20)$$

เมื่อ  $y_r$  คือตำแหน่งของกระบอกสูบที่ผ่านการปรับแก้หรือตำแหน่งอ้างอิง

$K_p$  คือค่าเกนสัดส่วน

$K_i$  คือค่าเกนปริพันธ์

ต่อจากนี้จะกล่าวถึงการควบคุมกระบอกสูบ พิจารณาสมการพลศาสตร์ของเข็มฉีดยาตามสมการที่ 3.21 พบว่าเป็นสมการแบบไม่เป็นเชิงเส้น เลือกตัวควบคุมแบบแผนเลื่อน (sliding mode control) ซึ่งจัดการกับระบบไม่เชิงเส้น (nonlinear system) และความไม่แน่นอนของตัวแปรในสมการได้ดี [17] นิยามให้พื้นผิวการเคลื่อน (sliding surface) ของสมการอันดับ 2 สามารถเขียนได้ดังนี้

$$s = \left( \frac{d}{dt} + \lambda \right) \tilde{y} = \dot{\tilde{y}} + \lambda \tilde{y} \quad (3.21)$$

เมื่อ  $\tilde{y} = y - y_r$

$\lambda$  คือค่าเกนที่สะท้อนถึง close loop bandwidth มีค่าเป็นจำนวนบวก (strictly positive constant)

เพื่อให้  $y$  สามารถแทรก (track)  $y_r$  ได้โดยไม่เกิดการสั่นด้วยความถี่สูง (chattering) หรือเกิดขึ้นน้อย ใช้กฎการควบคุมของตัวควบคุมแผนเลื่อนได้ดังนี้

$$F = \hat{F} - \bar{k}(y) \text{sat} \left( \frac{s}{\Phi} \right)$$

เมื่อ  $\hat{F}$  คือแรงอินพุตจากการประมาณที่ทำให้  $\dot{s} = 0$

$\bar{k}$  คือค่าเกนที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพ

$\Phi$  คือความหนาของชั้นขอบเขต

เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์เข้าไปสามารถเขียนแรงอินพุตตามกฎการควบคุมได้เป็น

$$F = \hat{f} + p_m \hat{A}_c + \hat{m}(\ddot{y}_r - \lambda \dot{y}) + \hat{B} \dot{y} - (e_f + p_m e_{A_c} + e_m |\ddot{y}_r - \lambda \dot{y}| + e_B |\dot{y}| + \gamma - \dot{\Phi}) \text{sat} \left[ (\dot{y} + \lambda \tilde{y}) / \lambda \right] \quad (3.22)$$

เมื่อ  $\dot{\Phi} = -\lambda \Phi + e_f + p_m e_{A_c} + e_m |\ddot{y}_r| + e_B |\dot{y}_r| + \gamma$

$\hat{f}, \hat{A}_c, \hat{m}, \hat{B}$  คือแรงเสียดทาน พื้นที่หน้าตัดของกระบอกฉีดยา มวล และค่าความหน่วงที่ได้จากการวัด

$e_f, e_{A_c}, e_m, e_B$  คือขอบเขตความผิดพลาดจากการวัดของแรงเสียดทาน พื้นที่หน้าตัดของกระบอกฉีดยา มวลตามลำดับ และความหน่วง โดย  $|f - \hat{f}| \leq e_f, |A_c - \hat{A}_c| \leq e_{A_c}, |m - \hat{m}| \leq e_m$  และ  $|B - \hat{B}| \leq e_B$

$\tilde{y}$  คือค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง ( $\tilde{y} = y - y_{fr}$ )

$y_{fr}$  คือตำแหน่งอ้างอิงที่ผ่านตัวกรองความถี่ต่ำซึ่งจะพุดถึงในลำดับต่อไป

$\gamma$  คือค่าความผิดพลาดอื่นๆ เป็นจำนวนบวก (strictly positive constant)

ค่าความหนาของชั้นขอบเขต ( $\Phi$ ) สามารถประมาณจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของชั้นขอบเขต ( $\dot{\Phi}$ ) ได้ดังนี้  $\Phi(k) = \Phi(k-1) + \dot{\Phi}(k)$  โดยค่าเริ่มต้นของชั้นขอบเขตมีค่าเป็น  $\Phi(0) = (e_f + p_m e_{A_c} + e_m |\ddot{y}_r(0)| + e_B |\dot{y}_r(0)| + \gamma) / \lambda$  เลือกให้  $\lambda$  มีค่ามากที่สุดแต่ยังอยู่ในเงื่อนไข  $|\dot{y} + \lambda \tilde{y}| \leq |\Phi(t)| \Rightarrow \forall t$  ส่วน  $\gamma$  เป็นพารามิเตอร์ที่สะท้อนถึงค่าความผิดพลาดอื่นๆ ไม่อยู่ในสมการพลศาสตร์ ให้  $\gamma$  มีค่าเป็นจำนวนบวกโดย  $\gamma < e_f + p_m e_{A_c} + e_m |\ddot{y}| + e_B |\dot{y}|$  ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดถูกแสดงในตารางที่ 3.4

ถึงแม้ว่าการเลือกแรงอินพุตตามสมการที่ 3.22 จะสามารถพิสูจน์ได้ว่ามีเสถียรภาพเฉพาะที่เชิงเส้นกำกับ แต่ในทางปฏิบัติแล้วอาจจะไม่เป็นเช่นนั้น เนื่องจากข้อจำกัดทางกายภาพของอุปกรณ์ รวมถึงสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นทั้งจากการวัดและการประมาณค่าอนุพันธ์ เพื่อแก้ปัญหาใช้ตัวกรองความถี่ต่ำ (lowpass filter) กับการวัดค่าความดัน ( $p$ ) และแรงภายนอก ( $F_e$ ) เพิ่มความราบเรียบให้สัญญาณอ้างอิง ( $p_d$ ) รวมถึงประมาณค่าอนุพันธ์ความผิดพลาดของตำแหน่ง ( $\dot{y}$ ) ค่าอนุพันธ์ของตำแหน่ง ( $\dot{y}$ ) และค่าอนุพันธ์อันดับสองของตำแหน่งอ้างอิง ( $\ddot{y}_r$ )

ค่าความดัน แรงภายนอก ความดันที่ต้องการ อนุพันธ์ของตำแหน่งและอนุพันธ์ความผิดพลาดของตำแหน่งสามารถใช้ตัวกรองความถี่ต่ำอันดับหนึ่งประมาณค่าได้ตามลำดับดังนี้ดังนี้

$$\begin{aligned} p_{fm}(k) &= a_p p_m(k) + (1 - a_p) p_{fm}(k-1) \\ F_{fe}(k) &= (a_{F_e}) F_e(k) + (1 - a_{F_e}) F_{fe}(k-1) \\ p_{fd}(k) &= (a_{p_d}) p_d(k) + (1 - a_{p_d}) p_{fd}(k-1) \end{aligned}$$

$$\dot{y}_f(k) = \frac{y(k) - y_f(k)}{\tau_y}$$

$$\dot{\tilde{y}}_f(k) = \frac{\tilde{y}(k) - \tilde{y}_f(k)}{\tau_y}$$

เมื่อ  $y_f(k) = (a_y)y(k) + (1-a_y)y_f(k-1)$

$$\tilde{y}_f(k) = (a_y)\tilde{y}(k) + (1-a_y)\tilde{y}_f(k-1)$$

ค่าอนุพันธ์อันดับสองของตำแหน่งอ้างอิงสามารถใช้ตัวกรองความถี่ต่ำอันดับสองประมาณค่าได้ดังนี้

$$\ddot{y}_{fr}(k) = \frac{y_r(k) - y_{fr}(k) - 2\tau\dot{y}_{fr}(k)}{\tau_y^2}$$

เมื่อ  $y_{fr}(k) = a_y^2 y_r(k) + (2-2a_y)y_{fr}(k-1) - (1-a_y)^2 y_{fr}(k-2)$

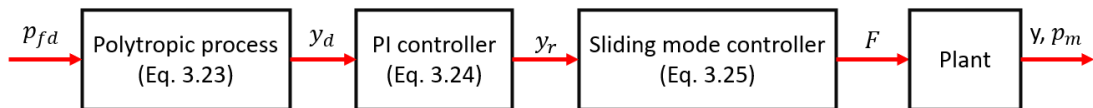
$$\dot{y}_{fr}(k) = \frac{y_{fr}(k) - y_{fr}(k-1)}{\Delta t}$$

หลังจากผ่านตัวกรองความถี่ต่ำสมการที่ 3.19 3.20 และ 3.22 สามารถเขียนใหม่ได้ตามสมการที่ 3.23 3.24 และ 3.25 ตามลำดับ และสามารถเขียนแผนภาพกล่องได้ตามรูปที่ 3.34

$$y_d = l_0 - \frac{\sqrt[1.4]{\frac{(p_m + p_a)V_m^{1.4}}{(p_{fd} + p_a)} - V_s - V_f}}{A_c} \quad (3.23)$$

$$y_r = y_d - \left( K_p (p_{fm} - p_{fd}) + K_i \int (p_{fm} - p_{fd}) dt \right) \left( 1 - \frac{p_{fd}}{200000} \right) \quad (3.24)$$

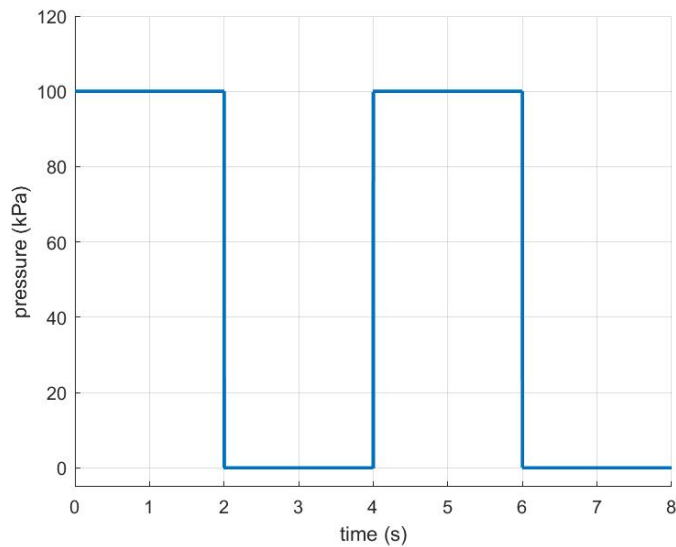
$$F = \hat{f} + p_{fm} \hat{A}_c + \hat{m} (\ddot{y}_{fr} - \lambda \dot{\tilde{y}}_f) + \hat{B} \dot{y}_f - (e_f + p_{fm} e_{A_c} + e_m |\ddot{y}_{fr} - \lambda \dot{\tilde{y}}_f| + e_B |\dot{y}_f| + \gamma - \dot{\Phi}) \text{sat} \left[ \frac{(\dot{\tilde{y}}_f + \lambda \tilde{y}_f)}{\lambda} \right] \quad (3.25)$$



รูปที่ 3.35 แผนภาพกล่องของระบบควบคุมความดัน

ทดสอบประสิทธิภาพของแผนควบคุมความดันด้วยอินพุตแบบฟังก์ชันขั้นบันได (step function) โดยไม่มีแรงภายนอกมากระทำต่อ VSPs อินพุตที่ใช้มีค่าตามรูปที่ 3.36 ทั้งนี้ช่วงความดัน

ที่ใช้ทดสอบมีค่าสูงกว่าช่วงความดันที่ใช้จริง ใช้ค่าพารามิเตอร์ของปั๊มเข็มฉีดยาตามตารางที่ 3.4 และใช้ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมและค่าเกณฑ์ในตัวกรองความถี่ต่ำตามตารางที่ 3.5



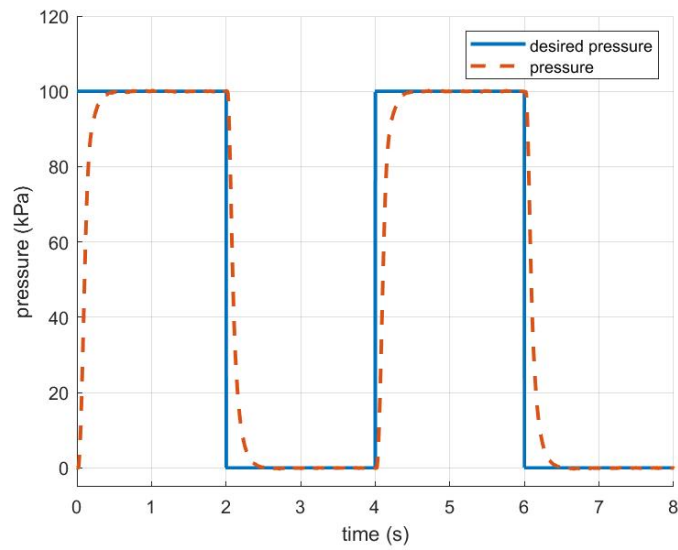
รูปที่ 3.36 ฟังก์ชันอินพุตแบบขั้นบันได

ตารางที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมความดัน		
พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
$\lambda$	180	$s^{-1}$
$\gamma$	2400	mN
$a_p$	0.1	
$a_{F_e}$	0.1	
$a_y$	0.02299	
$a_{p_d}$	0.014	
$\tau_y$	0.0425	
$\Delta t$	0.001	s
$K_p$	0.0006	
$K_i$	0.000012	

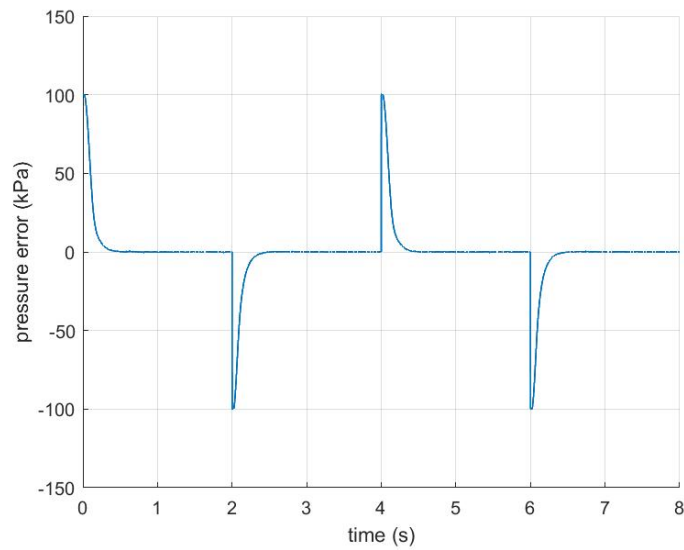
ตารางที่ 3.5 ค่าพารามิเตอร์ของปั๊มเข็มฉีดยา		
พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
$A_c l_0 (V_c \text{ เมื่อ } y = 0)$	160000	$\text{mm}^3$
$V_s$	13000	$\text{mm}^3$
$V_f$	36000	$\text{mm}^3$
$\hat{m}$	21	kg
$\hat{B}$	180	Ns/m
$\hat{f}$	9472	mN
$\hat{A}_c$	1238.5	$\text{mm}^2$
$e_m$	2.1	kg
$e_B$	1.8	Ns/m
$e_f$	2525	mN
$e_{A_c}$	40	$\text{mm}^2$

ทำการทดสอบแผนควบคุมความดันกับปั๊มเข็มฉีดยาทั้ง 2 ตัว โดยปั๊มเข็มฉีดยาตัวที่ 1 จะมีผลการตอบสนองต่อฟังก์ชันขั้นบันไดตามรูปที่ 3.37 มีค่าความผิดพลาดของความดันตามรูปที่ 3.38 และ 3.39 ประสิทธิภาพของตัวควบคุมแผนเลื่อนสามารถดูได้จากการติดตามตำแหน่งกระบอกสูบที่ต้องการตามรูปที่ 3.40 ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งตามรูปที่ 3.41 สถิติสภาพของตัวควบคุมสามารถดูได้จากค่าสเกลาร์  $s$  เทียบกับชั้นขอบเขตตามรูปที่ 3.45

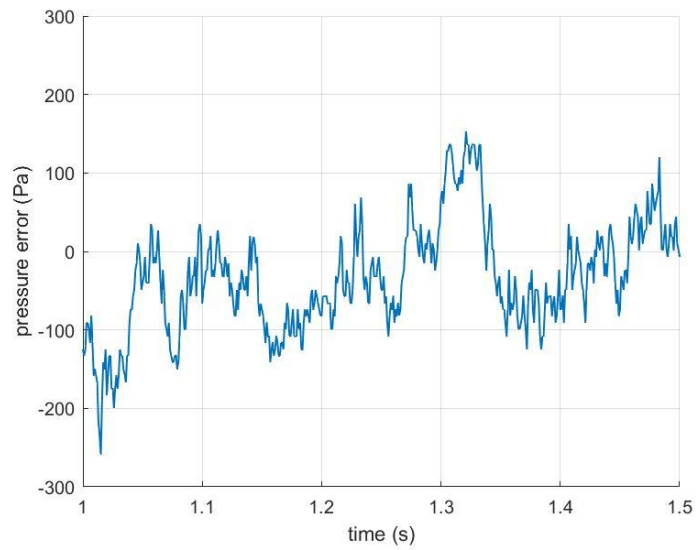
สำหรับปั๊มเข็มฉีดยาตัวที่ 2 จะมีผลการตอบสนองต่อฟังก์ชันขั้นบันไดตามรูปที่ 3.43 มีค่าความผิดพลาดของความดันตามรูปที่ 3.44 และ 3.45 ประสิทธิภาพของตัวควบคุมแผนเลื่อนสามารถดูได้จากการติดตามตำแหน่งกระบอกสูบที่ต้องการตามรูปที่ 3.46 ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งตามรูปที่ 3.47 สถิติสภาพของตัวควบคุมสามารถดูได้จากค่าสเกลาร์  $s$  เทียบกับชั้นขอบเขตตามรูปที่ 3.48 ผลการตอบสนองของปั๊มเข็มฉีดยาทั้ง 2 ตัวสามารถสรุปผลได้ตามตารางที่ 3.6



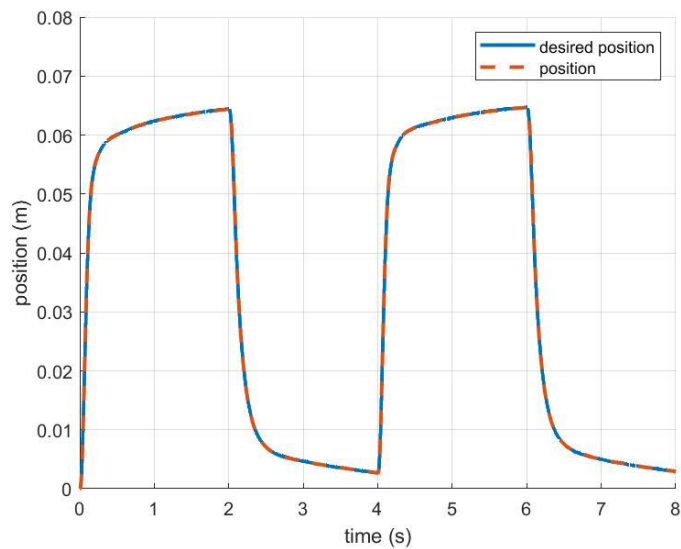
รูปที่ 3.37 ผลการตอบสนองของปั๊มเข็มฉีดยาตัวที่ 1 ต่อฟังก์ชันขั้นบันได โดยเส้นทึบสีน้ำเงินคือค่าความดันที่ต้องการ ( $p_d$ ) และเส้นปะสีแดงคือค่าความดันที่วัดได้ ( $p_{fm}$ )



รูปที่ 3.38 ค่าความผิดพลาดความดัน ( $p_{fm} - p_d$ ) ของปั๊มเข็มฉีดยาตัวที่ 1 ช่วงเวลา 0–8s

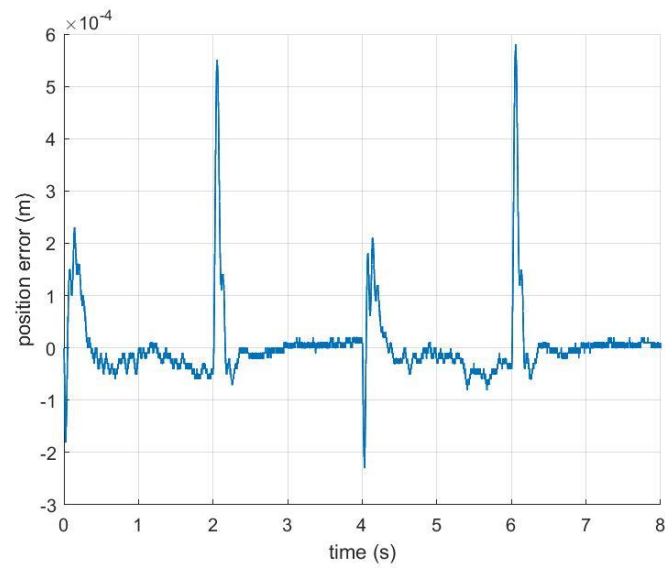


รูปที่ 3.39 ค่าความผิดพลาดความดัน ( $p_{fm} - p_d$ ) ของปั๊มเข็มฉีดยาตัวที่ 1 ช่วงเวลา 1–1.5 s

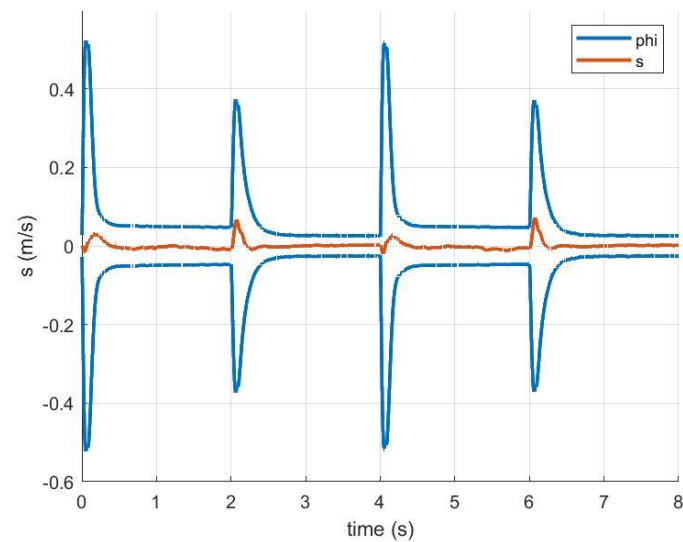


รูปที่ 3.40 ตำแหน่งอ้างอิง ( $y_{fr}$ ) และตำแหน่งที่วัดได้ ( $y$ ) ของกระบอกสูบตัวที่ 1 โดยเส้นทึบสีน้ำเงินคือตำแหน่งอ้างอิงของกระบอกสูบ และเส้นปะสีแดงคือตำแหน่งของกระบอกสูบที่วัดได้

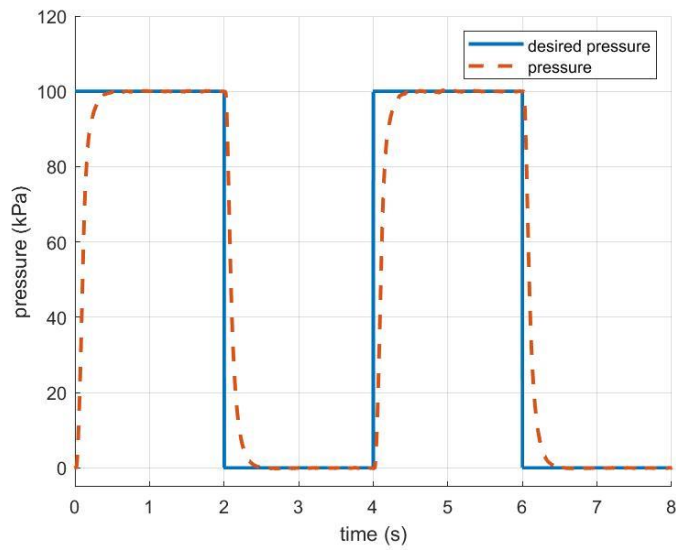




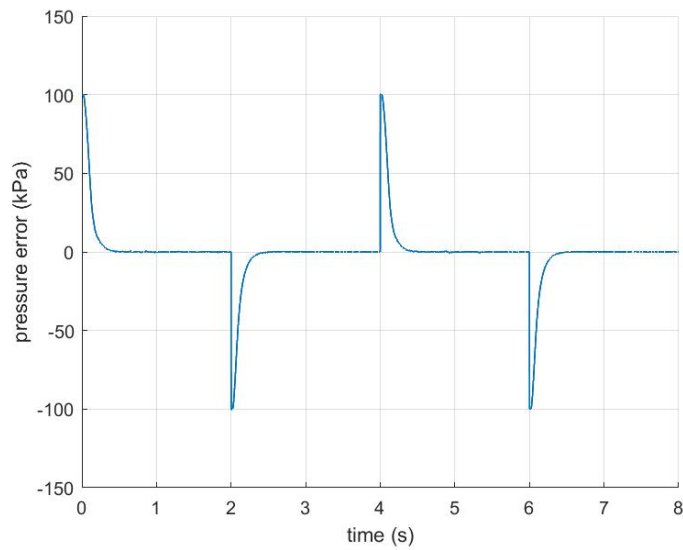
รูปที่ 3.41 ค่าความผิดพลาดตำแหน่ง ( $y - y_{fr}$ ) ของกระบอกลูกสูบตัวที่ 1



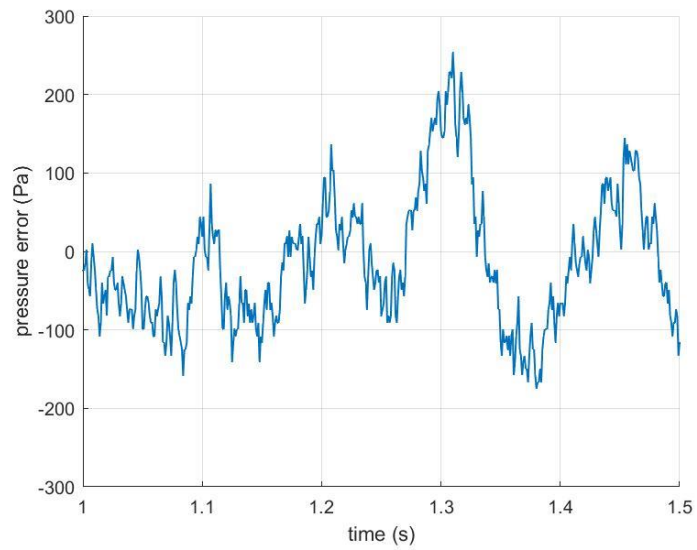
รูปที่ 3.42 ค่าสเกลาร์  $s$  และชั้นขอบเขตของปั๊มเข็มฉีดยาตัวที่ 1 โดยเส้นสีน้ำเงินคือชั้นขอบเขต และเส้นสีแดงคือค่าสเกลาร์  $s$



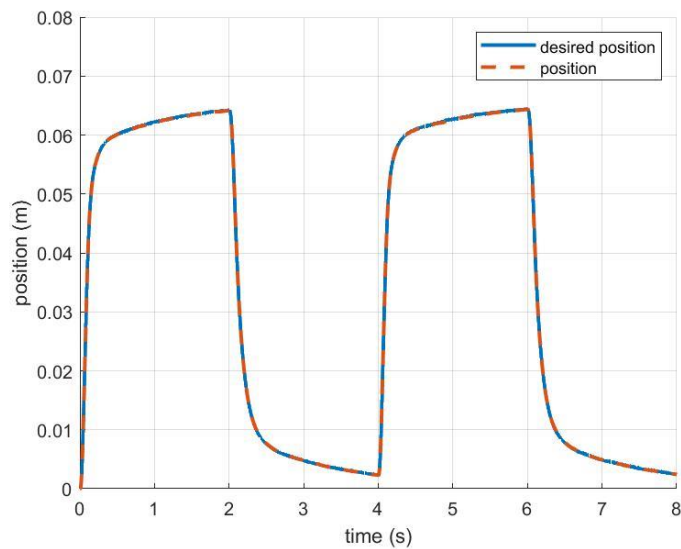
รูปที่ 3.43 ผลการตอบสนองของปั๊มเข็มฉีดยาตัวที่ 2 ต่อฟังก์ชันขั้นบันได โดยเส้นทึบสีน้ำเงินคือค่าความดันที่ต้องการ ( $p_d$ ) และเส้นปะสีแดงคือค่าความดันที่วัดได้ ( $p_{fm}$ )



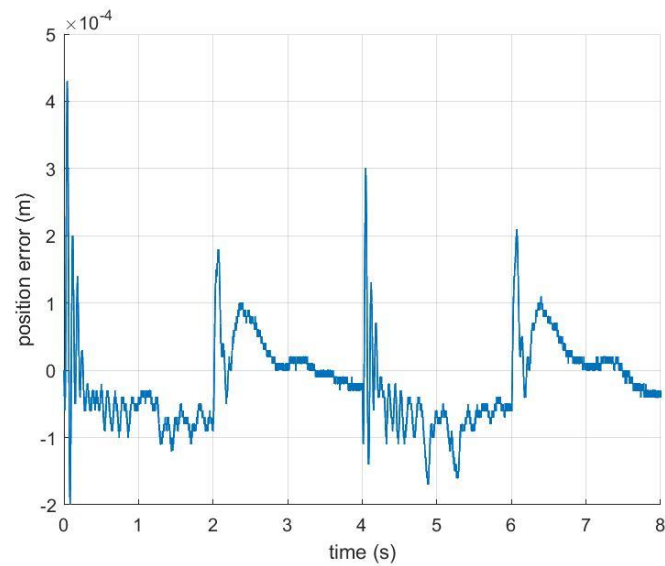
รูปที่ 3.44 ค่าความผิดพลาดความดัน ( $p_{fm} - p_d$ ) ของปั๊มเข็มฉีดยาตัวที่ 2 ช่วงเวลา 0–8 s



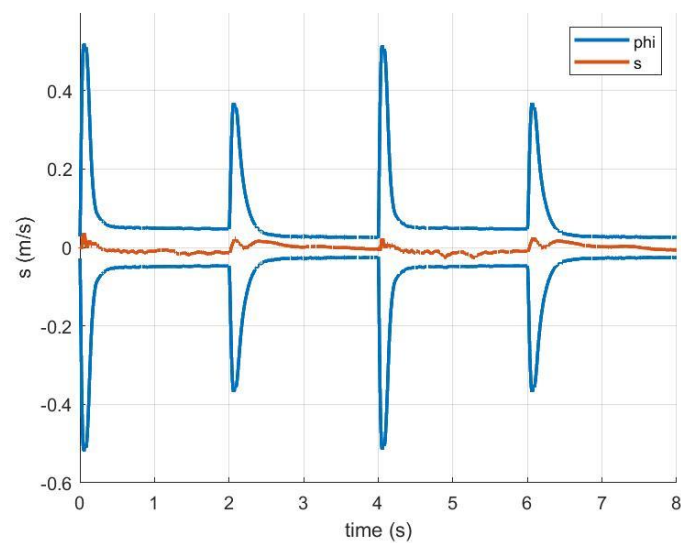
รูปที่ 3.45 ค่าความผิดพลาดความดัน ( $p_{fm} - p_d$ ) ของปั๊มเข็มฉีดยาตัวที่ 2 ช่วงเวลา 1–1.5 s



รูปที่ 3.46 ตำแหน่งอ้างอิง ( $y_{fr}$ ) และตำแหน่งที่วัดได้ ( $y$ ) ของกระบอกสูบตัวที่ 2 โดยเส้นทึบสีน้ำเงินคือตำแหน่งอ้างอิงของกระบอกสูบ และเส้นปะสีแดงคือตำแหน่งของกระบอกสูบที่วัดได้



รูปที่ 3.47 ค่าความผิดพลาดตำแหน่ง ( $y - y_{fr}$ ) ของกระบอกลูกสูบตัวที่ 2



รูปที่ 3.48 ค่าสเกลาร์  $s$  และชั้นขอบเขตของปั๊มเข็มฉีดยาตัวที่ 2 โดยเส้นสีน้ำเงินคือชั้นขอบเขต และเส้นสีแดงคือค่าสเกลาร์  $s$

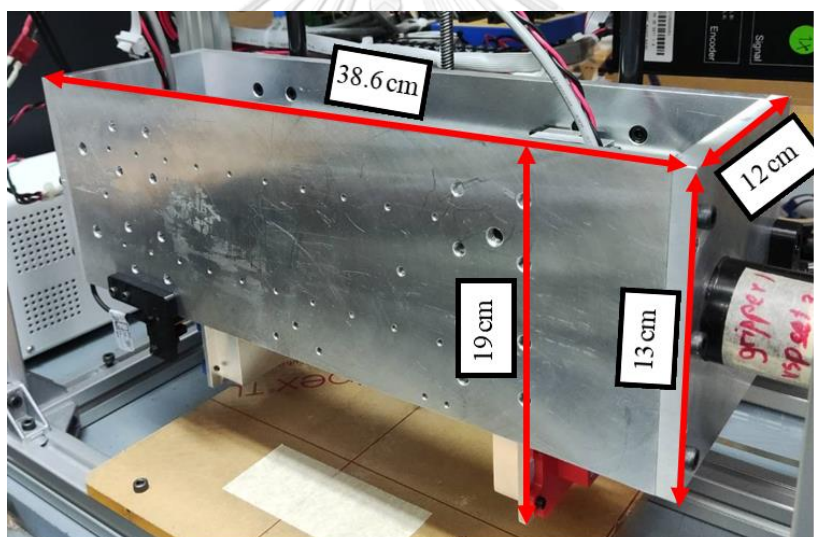
ตารางที่ 3.6 คุณลักษณะของระบบควบคุมความดัน		
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
ช่วงความดันที่ทำงาน (kPa)	0	100
ค่าความผิดพลาดช่วงสถานะคงที่ (steady state) (Pa)	-	< 300
เวลาเข้าสู่สมดุล (2% ของค่าคงที่สุดท้าย) (s)	-	< 0.3
% โอเวอร์ชูต (% overshoot)	-	< 1%

### 3.3 มือจับอย่างง่าย

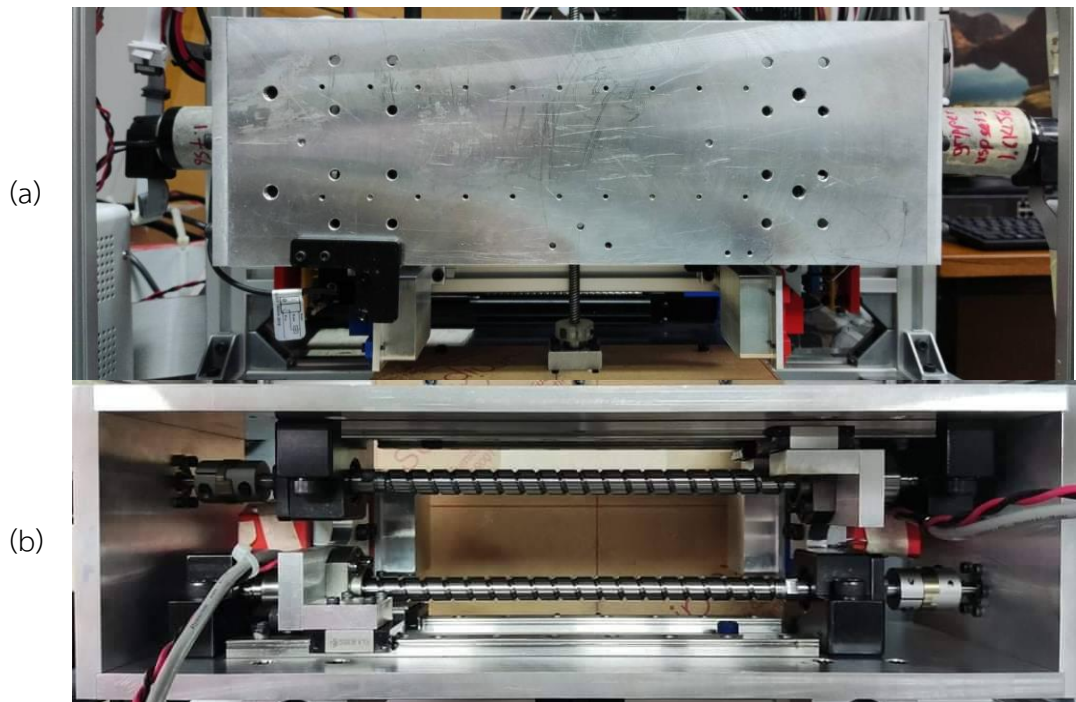
หัวข้อนี้จะแสดงรายละเอียดของมือจับที่ถูกนำมาใช้ตั้งแต่ การออกแบบมือจับ การออกแบบตัวควบคุมอิมพีแดนซ์ และการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมอิมพีแดนซ์กับ VSPs

#### 3.3.1 การออกแบบมือจับ

มือจับในงานวิจัยนี้ถูกออกแบบให้เป็นมือจับเชิงเกร็งแบบเคลื่อนขนาน 2 องศาอิสระ มีความยืดหยุ่นสูงต่อการออกแบบตัวควบคุมและการติดตั้งอุปกรณ์เสริม รูปที่ 3.49 แสดงขนาดของมือจับ รูปที่ 3.50 แสดงมือจับในมุมมองต่างๆ สำหรับรายละเอียดการออกแบบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แสดงในหัวข้อที่ 3.3.1.1 รายละเอียดการออกแบบอุปกรณ์ทางกลแสดงในหัวข้อที่ 3.3.1.2 และสุดท้ายจะสรุปคุณสมบัติและข้อมูลทั่วไปของมือจับในหัวข้อที่ 3.3.1.3



รูปที่ 3.49 ขนาดของมือจับ



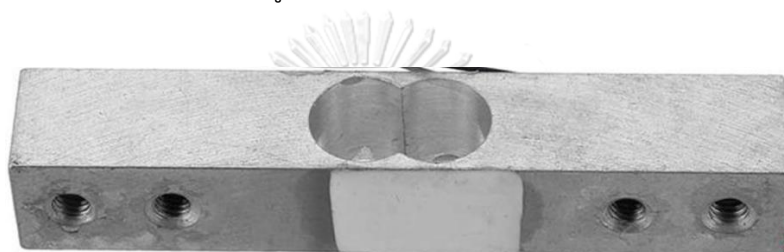
รูปที่ 3.50 (a) ภาพถ่ายด้านหน้าของมือจับ (b) ภาพถ่ายด้านบนของมือจับ

### 3.3.1.1 การออกแบบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ของมือจับ

โดยปกติแล้วการควบคุมอุปกรณ์ทางกลนิยมให้อินพุตของระบบเป็นแรง มีการป้อนกลับ (feedback) ของตำแหน่งเมื่อต้องการควบคุมการเคลื่อนไหว และมีการป้อนกลับของแรงเมื่อต้องการควบคุมแรง ในงานวิจัยนี้เลือกใช้มอเตอร์ (maxon motor รุ่น 148877 ขนาด 150 W) ตามรูปที่ 3.51 ซึ่งมีค่าคงที่ของทอร์ก (torque constant) และให้ข้อมูลที่จำเป็นต่อการออกแบบตัวควบคุมตามตารางที่ 3.8 มอเตอร์ติดตั้งเอ็นโคดเดอร์ขนาด 500 ppr ในส่วนของเซ็นเซอร์วัดแรงเลือกใช้โหลดเซลล์ (Load Cell) ขนาด 20 kg ตามรูปที่ 3.52



รูปที่ 3.51 มอเตอร์ที่ใช้



รูปที่ 3.52 โทลด์เซลล์

ตารางที่ 3.7 ข้อมูลทางเทคนิคของมอเตอร์	
แรงดันไฟฟ้าปกติ (Nominal Voltage)	48 V
กระแสต่อเนื่องสูงสุด (max continuous current)	3.17 A
กระแสสูงสุด (stall current)	42.4 A
ค่าคงที่ของทอร์ก (torque constant, $K_T$ )	60.3 mNm/A
ประสิทธิภาพสูงสุด (max efficiency)	92%
โมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ (rotor inertia)	137 g/cm <sup>2</sup>

ค่าคงที่ของทอร์กเป็นความสัมพันธ์ระหว่างทอร์กมอเตอร์และกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ ( $K_T = \tau/I_a$ ) เพื่อให้ควบคุมค่าทอร์กของมอเตอร์ได้ เลือกใช้วงจรควบคุมมอเตอร์แบบอนาล็อก (4-Q-DC Servo amplifier ADS 50/10) ซึ่งสามารถควบคุมกระแสจ่ายออก (Current Drive Modes) และสามารถตอบสนองต่อคำสั่งได้อย่างรวดเร็ว รูปที่ 3.53 แสดงวงจรควบคุมมอเตอร์ ตารางที่ 3.8 แสดงข้อมูลทางเทคนิคของวงจรควบคุมมอเตอร์

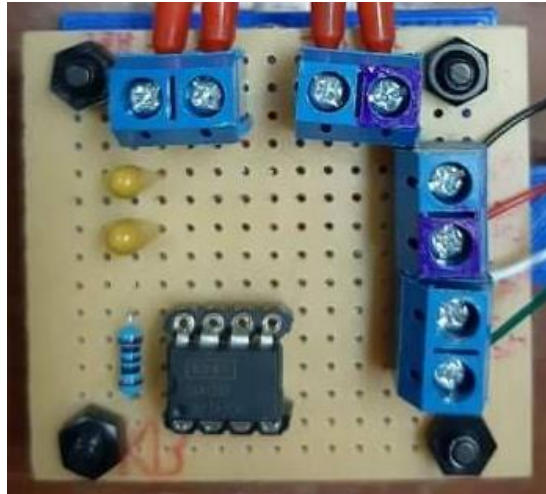


รูปที่ 3.53 วงจรควบคุมมอเตอร์

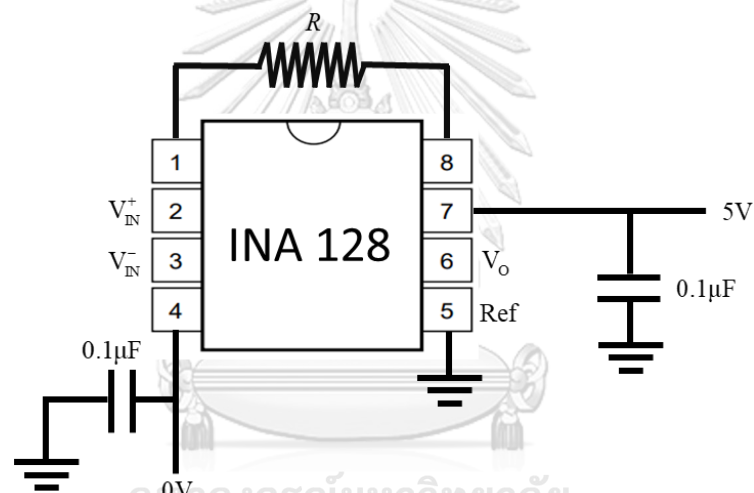
ตารางที่ 3.8 ข้อมูลทางเทคนิคของวงจรควบคุมมอเตอร์	
แรงดันไฟฟ้าปกติ (Nominal Voltage) ( $V_{cc}$ )	12 – 50 V
จ่ายกระแสต่อเนื่องสูงสุด (max continuous output current)	10 A
จ่ายแรงดันไฟสูงสุด (max output voltage)	0.9V <sub>cc</sub>
จ่ายกระแสสูงสุด (max output current)	20 A
ประสิทธิภาพสูงสุด (max efficiency)	95%
ความถี่สวิตชิง (switching frequency)	50 kHz
แบนด์วิธของตัวควบคุมกระแส (bandwidth current controller)	2.5 kHz
ช่วงสัญญาณแรงดัน (set value Input voltage range)	-10 to +10 V

โพลดเซลล์เป็นเซ็นเซอร์สำหรับวัดการเปลี่ยนแปลงของแรงไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า ทั้งนี้ สัญญาณไฟฟ้า (แรงดันไฟฟ้า) ที่ออกจากโพลดเซลล์มีค่าที่ต่ำมาก ดังนั้นใช้วงจรขยายแรงดัน (voltage amplifiers) เข้ามาช่วย เลือกใช้ชิพ ina128 มาต่อวงจรขยายสัญญาณขนาด 501 เท่า รูปที่ 3.54 แสดงวงจรขยายสัญญาณ รูปที่ 3.55 แสดงแผนผังวงจรขยายสัญญาณ



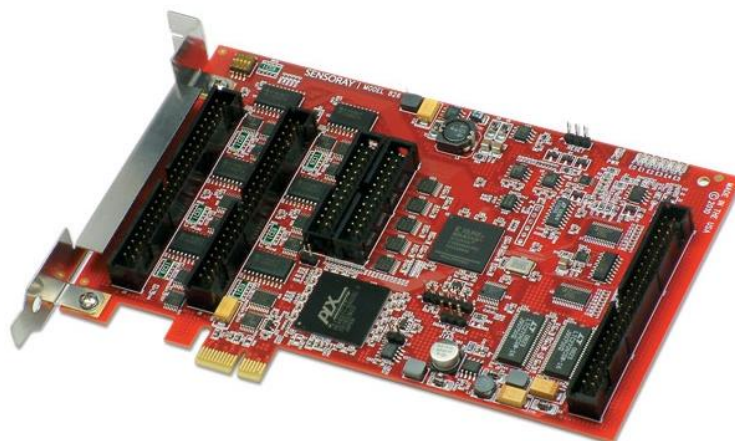


รูปที่ 3.54 วงจรขยายสัญญาณ



รูปที่ 3.55 แผนผังวงจรขยายสัญญาณ

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นจะถูกควบคุมโดยคอมพิวเตอร์ ทั้งนี้คอมพิวเตอร์ไม่สามารถรับและส่งสัญญาณกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้โดยตรง เลือกวงจร sensoray 826 มาทำหน้าที่รับและส่งสัญญาณระหว่างคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอก โดยบอร์ดที่เลือกมายังสามารถอ่านค่าจากเอ็นโค้ดเดอร์ได้โดยตรง รูปที่ 3.56 แสดงวงจร sensoray 826 ตารางที่ 3.9 แสดงข้อมูลทางเทคนิคของวงจรแปลงสัญญาณ sensoray 826

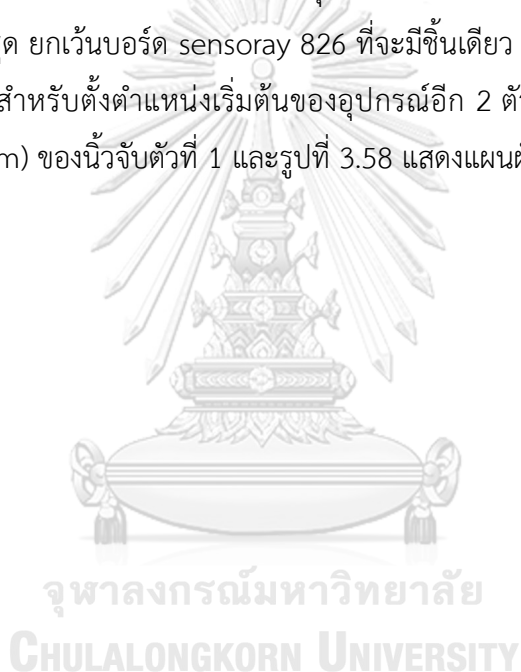


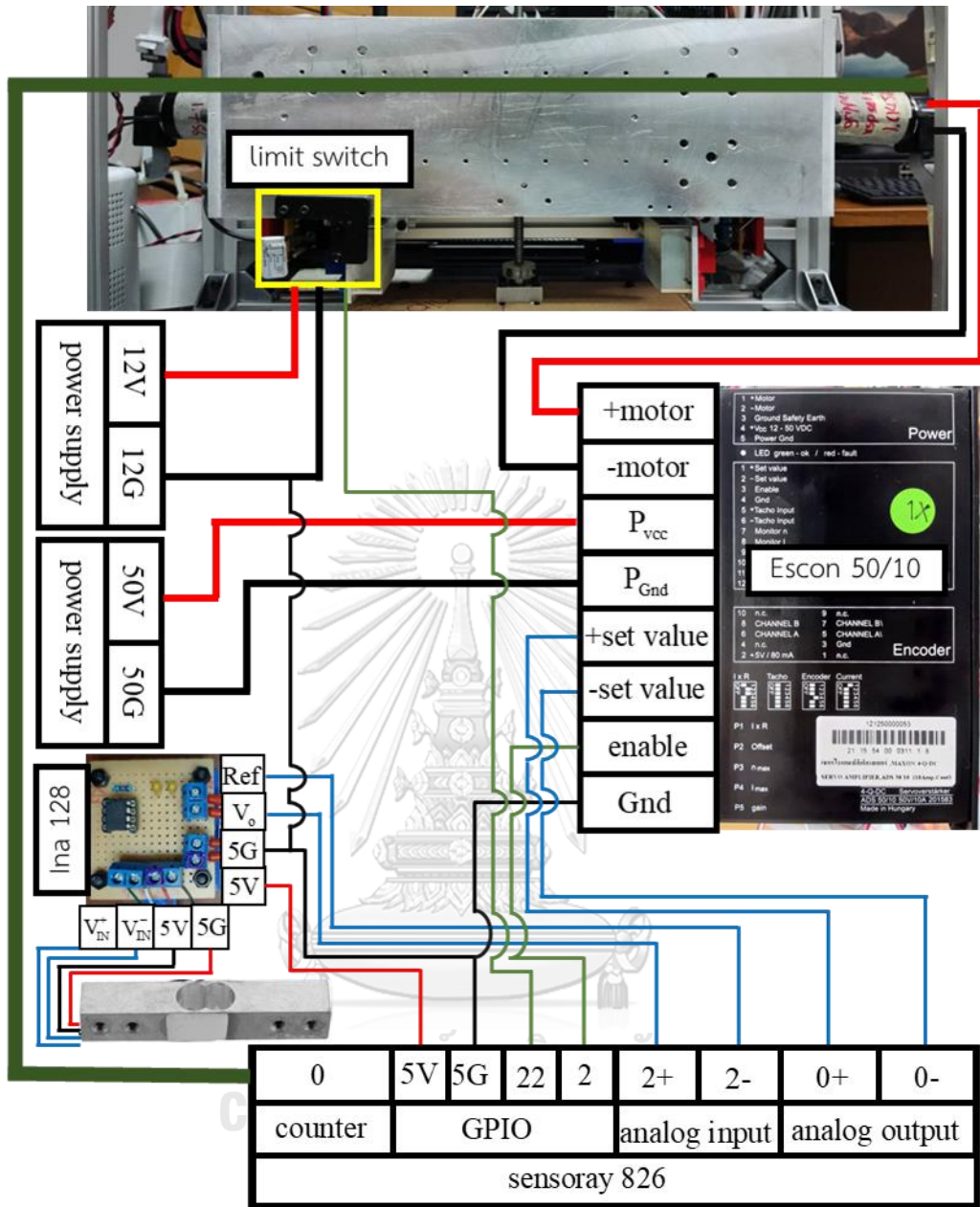
รูปที่ 3.56 วงจรแปลงสัญญาณ sensoray 826

ตารางที่ 3.9 ข้อมูลทางเทคนิคของวงจรแปลงสัญญาณ sensoray 826	
พอร์ตเอนกประสงค์ (GPIO)	
จำนวน (channel)	48
รูปแบบของสัญญาณ	bi-directional, open drain, TTL/5VCMOS compatible
แรงดันขาเข้า (input voltage range)	0 to +5.5V
พอร์ตจ่ายกระแสสูงสุด (max output current)	0.24 mA
เคาน์เตอร์ (counters)	
จำนวน (channel)	6
ความละเอียด (resolution)	32 bit
อัตราการนับ (count rate)	0 to 25 MHz
อัตราการนับเอ็นโค้ดเดอร์แบบ x4	0 to 50 Mcounts/s
สัญญาณอนาล็อกอินพุต (analog input)	
จำนวน (channel)	16
รูปแบบของสัญญาณ	differential
ความละเอียด (resolution)	16 bit
ความต่างของแรงดันอินพุต (differential input voltage)	$\pm 1V, \pm 2V, \pm 5V, \pm 10V$

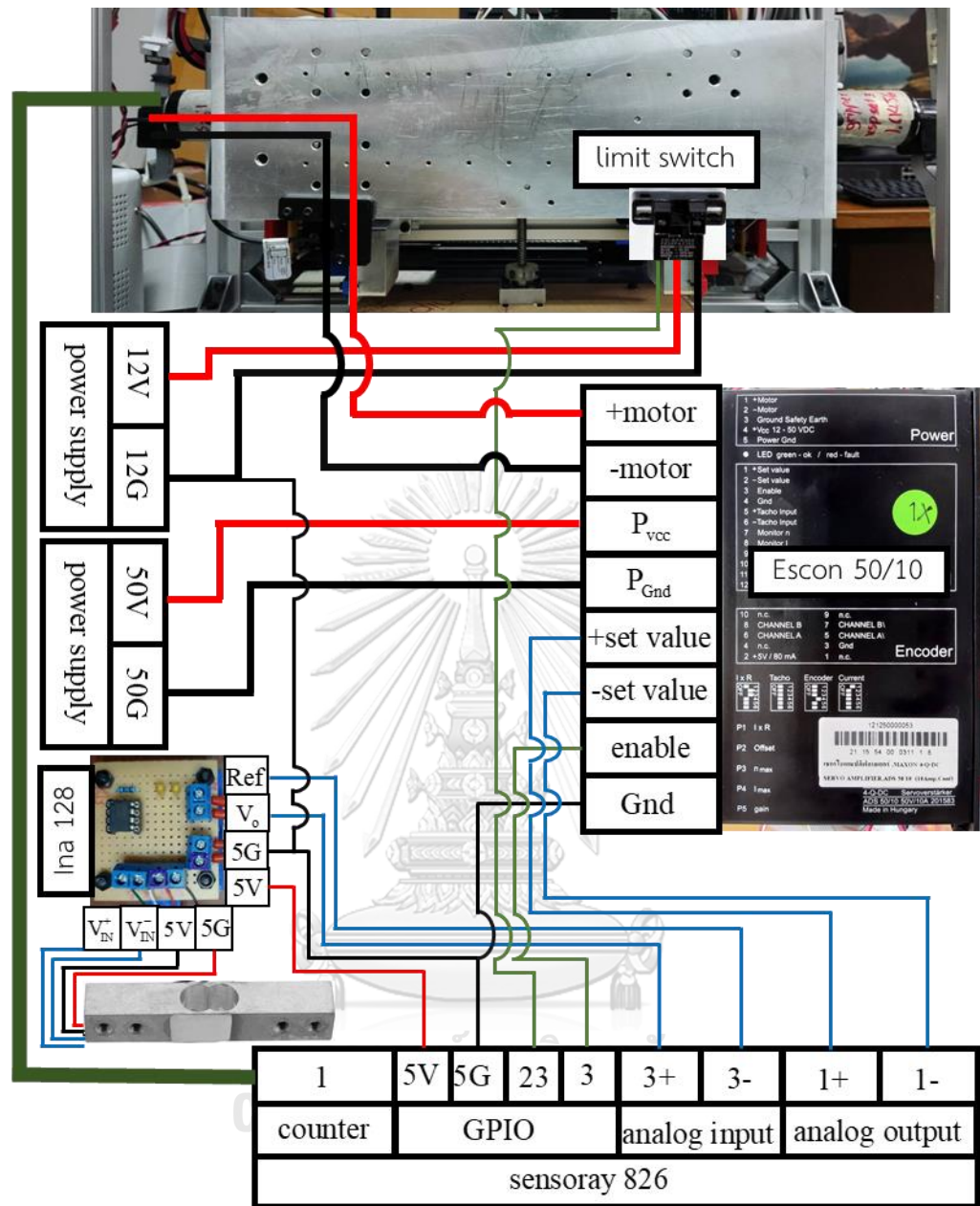
สัญญาณอนาล็อกเอาต์พุต (analog output)	
จำนวน (channel)	8
รูปแบบของสัญญาณ	single ended, with local (on-board) sensing
ความละเอียด (resolution)	16bit
ช่วงแรงดันเอาต์พุต (output ranges)	0 to +5V, 0 to +10V, $\pm 5V$ , $\pm 10V$

เนื่องจากต้องการให้มือจับสามารถควบคุมนิ้วจับได้อย่างอิสระต่อกัน ดังนั้นจะมีอุปกรณ์ทั้งหมดที่กล่าวมา 2 ชุด ยกเว้นบอร์ด sensoray 826 ที่จะมีชิ้นเดียว นอกจากนี้ยังมีพร็อกซิมีตี้สวิตช์ (Proximity Switch) สำหรับตั้งตำแหน่งเริ่มต้นของอุปกรณ์อีก 2 ตัว รูปที่ 3.57 แสดงแผนผังทางไฟฟ้า (wiring diagram) ของนิ้วจับตัวที่ 1 และรูปที่ 3.58 แสดงแผนผังทางไฟฟ้าของนิ้วจับตัวที่ 2





รูปที่ 3.57 แผนผังทางไฟฟ้าของนิวจับตัวที่ 1



รูปที่ 3.58 แผนผังทางไฟฟ้าของนิ้วจับตัวที่ 2

### 3.3.1.2 การออกแบบอุปกรณ์ทางกลของมือจับ

การออกแบบอุปกรณ์ทางกลของมือจับจะเน้นไปที่การออกแบบให้มือจับมีความแข็งแรงมากเท่าที่ทำได้แต่ยังคงไว้ซึ่งความสามารถในการขับเคลื่อนกลับ (back driving) นอกจากนี้ยังต้องสนับสนุนการออกแบบตัวควบคุมด้วย เช่น มีระยะคลอนและแรงเสียดทานน้อยเป็นต้น เพื่อให้บรรลุเป้าหมายในการออกแบบเลือกใช้อุปกรณ์ตามนี้

เลือกใช้บอลสกรู (Ball Screw, เส้นผ่านศูนย์กลาง 12 mm ระยะลีด 10 mm เกรดความแม่นยำ c5) เป็นตัวส่งกำลังของระบบ การส่งกำลังด้วยวิธีนี้ทำให้มือจับมีความแข็งแรงสูง สามารถ

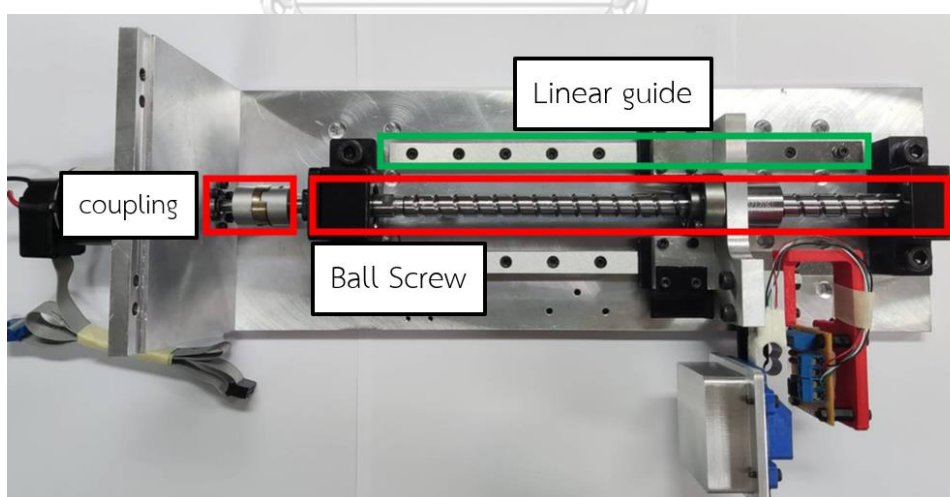
ขับเคลื่อนกลับได้ รวมถึงมีระยะคลอนที่ต่ำมาก แต่อาจมีปัญหาในเรื่องแรงเสียดทานอยู่บ้าง กล่าวคือแรงเสียดทานสูงในระดับหนึ่ง นอกจากนี้เมื่อขับเคลื่อนแบบปกติกับขับเคลื่อนกลับจะมีแรงเสียดทานไม่เท่ากัน ข้อเสียอีกอย่างของบอลสกรูคือไม่สามารถรับแรงแนวรัศมี (radial force) จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์อื่นมาช่วยรับแรง เลือกใช้รางสไลด์ (Linear guide) จำนวน 2 ชุดเข้ามาช่วยเพื่อรับแรงตามแนวรัศมีแทนบอลสกรู

เลือกใช้คัปปลิงชนิดโอล์แฮม (Oldham coupling) ตามรูปที่ 3.59 เพื่อส่งผ่านแรงบิดจากมอเตอร์ไปให้บอลสกรู นอกจากนี้ยังช่วยลดแรงเสียดทานจากการวางแนวที่ผิดพลาด (misalignment) และความเยื้องศูนย์กลาง (eccentricity) อีกด้วย



รูปที่ 3.59 โอล์แฮมคัปปลิง

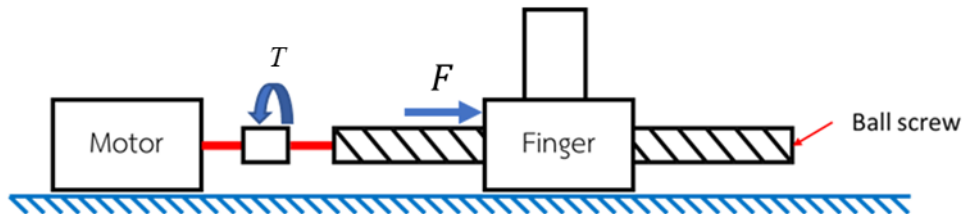
ใช้แผ่นอลูมิเนียมเป็นโครงสร้างหลักของมือจับ ยึดอุปกรณ์ทั้งหมดที่กล่าวมากับแผ่นอลูมิเนียมได้ตามรูปที่ 3.60 โดยจะเรียกชุดอุปกรณ์ตามรูปที่ 3.60 ว่าชุดขับเคลื่อนหรือชุดขับเคลื่อนนิวจับ ทั้งนี้มือจับประกอบด้วยชุดขับเคลื่อน 2 ชุดคือชุดขับเคลื่อนตัวที่ 1 สำหรับขับเคลื่อนนิวจับตัวซ้าย และชุดขับเคลื่อนตัวที่ 2 สำหรับขับเคลื่อนนิวจับตัวขวา



รูปที่ 3.60 ชุดขับเคลื่อนนิวจับ

### 3.3.1.3 คุณสมบัติและข้อมูลทั่วไปของมือจับ

ในหัวข้อนี้จะแสดงว่าสามารถควบคุมอินพุตของมือจับให้อยู่ในรูปของแรงได้โดยตรง พิจารณาแผนภาพแรงอย่างง่ายของชุดขับเคลื่อนเมื่อมอเตอร์มีแรงบิดขนาด  $T$  และเกิดแรงอินพุตขนาด  $F$  ตามรูปที่ 3.61 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและแรงอินพุตสามารถเขียนได้ตามสมการที่ 3.26



รูปที่ 3.61 แผนภาพแรงของชุดขับเคลื่อน

$$F = \frac{2\pi T \eta}{l} \quad (3.26)$$

เมื่อ  $F$  คือแรงขับเคลื่อนนิ้วจับหรือแรงอินพุต

$T$  คือแรงบิดของมอเตอร์

$\eta$  คือประสิทธิภาพของบอลสกรู

$l$  คือระยะลีดของบอลสกรู

เมื่อแทนค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดของมอเตอร์และกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ ( $T = K_T I_a$ ) สมการที่ 3.26 สามารถเขียนใหม่ได้ตามสมการที่ 3.27 และเมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์และบอลสกรูลงในสมการที่ 3.27 จะเขียนสมการใหม่ได้ตามสมการที่ 3.28

$$F = \frac{2\pi (K_T I_a) \eta}{l} \quad (3.27)$$

เมื่อ  $K_T$  คือค่าคงที่ของทอร์ก

$I_a$  คือกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์

$$F = \frac{2\pi ((60.3) I_a) (0.9)}{(0.01)} = 34081.56 (I_a) mN \quad (3.28)$$

จากสมการที่ 3.28 จะได้ว่าสามารถควบคุมแรงอินพุตที่จ่ายให้กับนิ้วจับได้โดยตรง ต่อจากนี้หากกล่าวถึงอินพุตของนิ้วจับให้ถือว่าสามารถควบคุมแรงอินพุตได้โดยตรง โดยไม่ต้องคำนึงถึงผลของที่เกิดจากสมการพลศาสตร์ของมอเตอร์

### 3.3.2 ตัวควบคุมอิมพีแดนซ์กับมือจับ

ตัวควบคุมอิมพีแดนซ์เป็นวิธีควบคุมความต้านทานของระบบ สำหรับระบบเชิงกลนิยมควบคุมความต้านทานให้อยู่ในรูปของมวล-สปริง-แดมเปอร์ (mass spring damper system) [18] เพื่อควบคุมความต้านทานของนิ้วจับให้อยู่ในรูปดังกล่าวโดยมีมวลขนาดเท่ากับระบบจริงและเปลี่ยนค่าสปริง-แดมเปอร์ใหม่ตามที่ต้องการ พิจารณาแผนภาพแรงของนิ้วจับซึ่งใช้ตัวควบคุมอิมพีแดนซ์ตามรูปที่ 3.62 สามารถเขียนสมการแรงที่กระทำกับนิ้วจับได้ตามสมการที่ 3.29 พิจารณาแผนภาพแรงของนิ้วจับตามรูปที่ 3.63 สามารถเขียนพลศาสตร์ของนิ้วจับได้ตามสมการที่ 3.30

$$F_e = -m\ddot{x} + B_d(\dot{x}_d - \dot{x}) + k_d(x_d - x) \quad (3.29)$$

เมื่อ  $F_e$  คือแรงภายนอก

$m$  คือมวลของนิ้วจับ

$B_d$  คือค่าความหน่วงที่ต้องการ

$k_d$  คือค่าความแข็งที่ต้องการ

$x, \dot{x}, \ddot{x}$  คือตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่งของนิ้วจับ

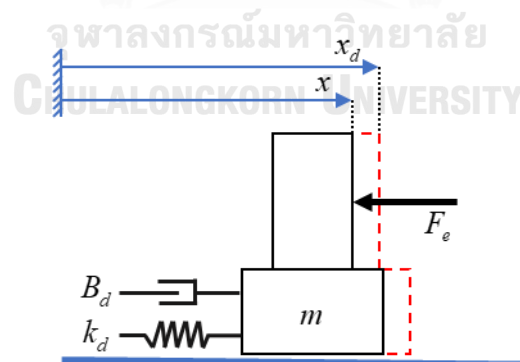
$x_d, \dot{x}_d$  คือตำแหน่ง และความเร็วของนิ้วจับที่ต้องการ

$$F_i = m\ddot{x} + b\dot{x} + f + F_e \quad (3.30)$$

เมื่อ  $F_i$  คือแรงอินพุตของระบบ หรือแรงขับเคลื่อนนิ้วจับ

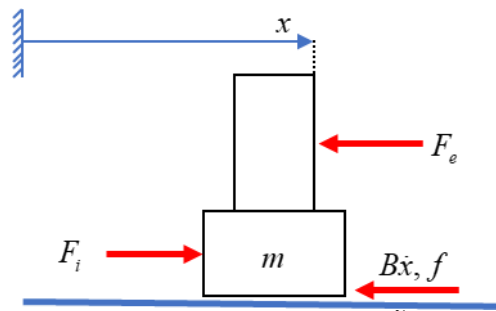
$f$  คือแรงเสียดทานของระบบ

$b$  คือความหน่วงของระบบ



รูปที่ 3.62 แผนภาพแรงของนิ้วจับที่ใช้ตัวควบคุมอิมพีแดนซ์





รูปที่ 3.63 แผนภาพแรงของนิ้วจับ

เมื่อให้แรงภายนอกที่กระทำมีค่าตามสมการที่ 3.29 สามารถเขียนสมการที่ 3.30 ใหม่ได้ดังนี้

$$F_i = b\dot{x} + B_d(\dot{x}_d - \dot{x}) + k_d(x_d - x) + f \quad (3.31)$$

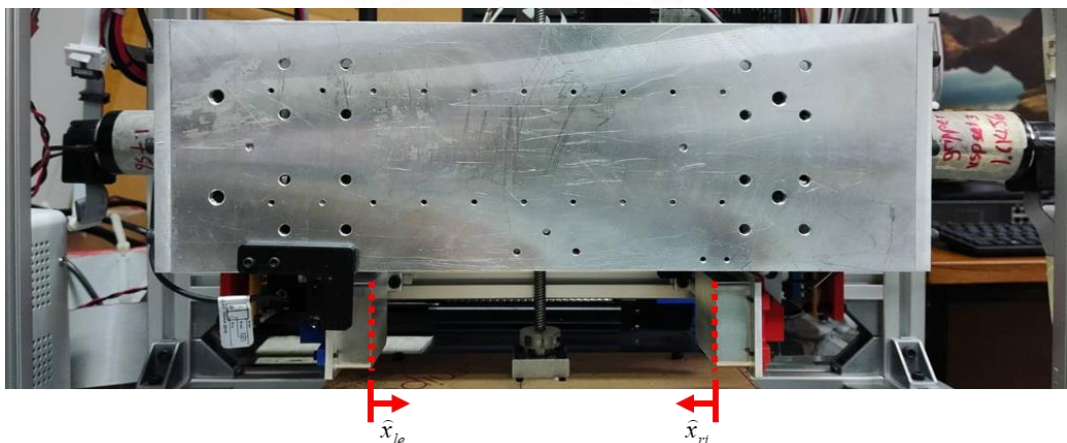
เนื่องจากการหาแบบจำลองของแรงเสียดทานและความหน่วงให้แม่นยำมีความซับซ้อนสูง นอกจากนี้การชดเชยแรงเสียดทานให้ได้สมบูรณ์แทบเป็นไปไม่ได้ ดังนั้นในกรณีที่  $b\dot{x} + f$  มีค่าน้อย สมการที่ 3.31 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ตามสมการที่ 3.32 ซึ่งอาจเรียกสมการนี้ว่ากฎการควบคุมอิมพีแดนซ์อย่างง่าย (simple impedance control law)

$$F_i = B_d(\dot{x}_d - \dot{x}) + k_d(x_d - x) \quad (3.32)$$

พิจารณาการติดแกนของมือจับตามรูปที่ 3.64 สมการควบคุมนิ้วจับตัวที่ 1 และตัวที่ 2 สามารถเขียนตามลำดับได้ดังนี้

$$F_{i,le} = B_{d,le}(\dot{x}_{d,le} - \dot{x}_{le}) + k_{d,le}(x_{d,le} - x_{le}) \quad (3.33)$$

$$F_{i,ri} = B_{d,ri}(\dot{x}_{d,ri} - \dot{x}_{ri}) + k_{d,ri}(x_{d,ri} - x_{ri}) \quad (3.34)$$

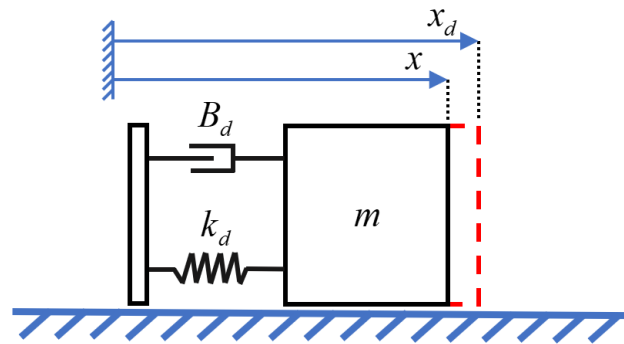


รูปที่ 3.64 การติดแกนของนิ้วจับ

### 3.3.3 การประยุกต์ใช้ตัวควบคุมอิมพีแดนซ์กับ VSPs

ในหัวข้อนี้จะวิเคราะห์ผลการตอบสนองของนิว้จบัที่ใช้กฎการควบคุมอิมพีแดนซ์อย่างง่ายซึ่งได้กล่าวไปก่อนหน้านี้ โดยจะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 กรณีคือ การวิเคราะห์ผลการตอบสนองของตำแหน่งเมื่อไม่มีแรงภายนอกกระทำนิว้จบั และการวิเคราะห์ผลการตอบสนองของแรงเมื่อมีแรงภายนอกกระทำนิว้จบั จากนั้นนำผลการวิเคราะห์มาสรุปแนวทางการออกแบบค่าอิมพีแดนซ์ของตัวควบคุมและออกแบบค่าความแข็งของ VSPs

#### 3.3.3.1 การวิเคราะห์ผลการตอบสนองกรณีที่ไม่มีแรงภายนอก



รูปที่ 3.65 แผนภาพแรงของนิว้จบักรณีไม่มีแรงภายนอกกระทำ

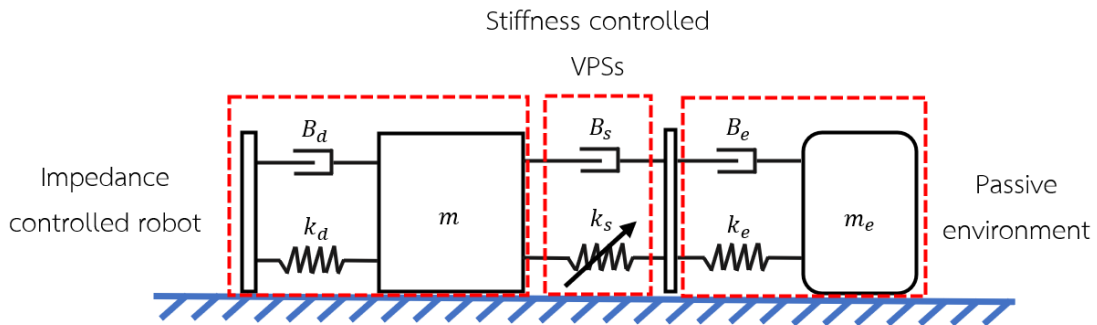
พิจารณารูปที่ 3.65 แผนภาพแรงของนิว้จบักรณีไม่มีแรงภายนอกกระทำ สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนไหวของนิว้จบัและการเคลื่อนไหวที่ต้องการได้ดังนี้

$$B_d \dot{x}_d + k_d x_d = m \ddot{x} + (b + B_d) \dot{x} + k_d x + f \quad (3.35)$$

จากสมการที่ 3.35 จะได้ว่า ถ้า  $B_d$  และ  $k_d$  มีขนาดใหญ่ตำแหน่งของนิว้จบัจะสามารถติดตาม (track) ตำแหน่งที่ต้องการได้ดีมากขึ้น ถ้า  $B_d$  มีขนาดใหญ่จะทำให้ระบบช้าลงและมีโอเวอร์ชูตน้อยลง สุดท้ายถ้า  $k_d$  มีขนาดใหญ่จะทำให้ระบบเร็วขึ้น ช่วยลดความคลาดเคลื่อนเชิงสถิต (steady state error) ที่เกิดจากผลของแรงเสียดทาน แต่จะเพิ่มโอเวอร์ชูตของระบบให้มากขึ้นด้วยเช่นกัน

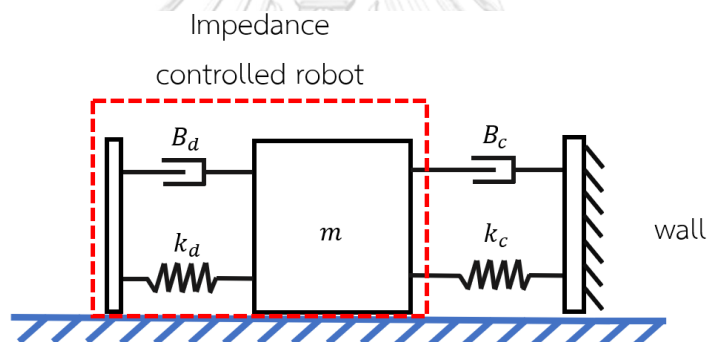
#### 3.3.3.2 การวิเคราะห์ผลการตอบสนองกรณีที่มีแรงภายนอก

นิว้จบัที่ใช้ตัวควบคุมอิมพีแดนซ์และติดตั้ง VSPs เมื่อแรงภายนอกที่มากกระทำอยู่ในรูปของสปริงและแดมเปอร์สามารถเขียนแผนภาพของระบบตามรูปที่ 3.66



รูปที่ 3.66 แผนภาพของนิว้จ้บกรณีนีมีแรงภายนอกมากระทำ

พิจารณารูปที่ 3.66 พบว่าสปริงและแดมเปอร์ของ VPSs และสภาพแวดล้อมมีการต่อกันแบบอนุกรม เพื่อลดความซับซ้อนของการวิเคราะห์ผล ค่าความแข็งและค่าความหน่วงสามารถรวมกันได้เป็นความแข็งสมมูล  $k_c$  และความหน่วงสมมูล  $B_c$  ถ้าสภาพแวดล้อมไม่เคลื่อนที่สามารถเขียนแผนภาพอย่างง่ายได้ตามรูปที่ 3.67 และสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนไหวของนิว้จ้บและการเคลื่อนไหวที่ต้องการได้ตามสมการที่ 3.36



รูปที่ 3.67 แผนภาพอย่างง่ายของนิว้จ้บกรณีนีมีแรงภายนอกมากระทำ

$$B_d \dot{x}_d + k_d x_d = m \ddot{x} + (b + B_d + B_c) \dot{x} + (k_d + k_c) x + f \quad (3.36)$$

เนื่องจากสมการที่ 3.36 อยู่ในรูปของสมการไม่เชิงเส้น ขอลดผลของแรงเสียดทานเพื่อลดความซับซ้อนในการวิเคราะห์และเปลี่ยนรูปของสมการให้เป็นสมการเชิงเส้น ใช้การแปลงลาปลาซวิเคราะห์ผลเมื่อมีเงื่อนไขเริ่มต้นเป็น  $x(0) = 0$  และ  $\dot{x}(0) = v_0$  สามารถเขียนสมการใหม่ได้ตามสมการที่ 3.37

$$X(s) = \frac{(B_d s + k_d) X_d(s) + v_0}{ms^2 + (b + B_d + B_c)s + (k_d + k_c)} \quad (3.37)$$

ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนไหวที่ว่า  $F_e = k_c x + B_c \dot{x}$  สามารถเขียนผลการตอบสนองของแรงได้ตามสมการที่ 3.38

$$F_e(s) = \frac{(B_c s + k_c)(B_d s + k_d) X_d(s) + (B_c s + k_c) v_0}{ms^2 + (b + B_d + B_c)s + (k_d + k_c)} \quad (3.38)$$

พิจารณาสมการที่ 3.38 พบว่าผลการตอบสนองของแรงนี้ขึ้นกับ 2 ปัจจัยคือตำแหน่งที่ต้องการ ( $X_d(s)$ ) และความเร็วก่อนชน ( $v_0$ ) เพื่อให้ลดความซับซ้อนของการวิเคราะห์ผลเลือกใช้คุณสมบัติการบวก (additive) ของทฤษฎีการทับซ้อน (superposition) ตามสมการที่ 3.39 เข้ามาช่วย สามารถเขียนใหม่โดยใช้คุณสมบัติดังกล่าวได้ตามสมการที่ 3.40

$$f(x_1 + x_2) = f(x_1) + f(x_2) \quad (3.39)$$

$$X(s) = X_1(s) + X_2(s) \quad (3.40)$$

เมื่อ 
$$X_1(s) = \frac{(B_d s + k_d) X_d(s)}{ms^2 + (b + B_d + B_c)s + (k_d + k_c)}$$

$$X_2(s) = \frac{v_0}{ms^2 + (b + B_d + B_c)s + (k_d + k_c)}$$

พิจารณาผลของ  $F_1$  และ  $F_2$  ตามสมการที่ 3.40 พบว่าความเร็วของระบบจะขึ้นกับขนาดของค่าความแข็ง ( $k_d + k_c$ ) และค่าความหน่วง ( $b + B_d + B_c$ ) ถ้ามีขนาดใหญ่ระบบจะเร็วและถ้ามีขนาดเล็กระบบจะช้า สำหรับค่าความแข็งถ้ามีค่ามากเกินไประบบจะมีโอเวอร์ชูตแต่ถ้ามีค่าน้อยเกินไประบบจะช้า สำหรับค่าความหน่วงถ้ามีค่ามากเกินไประบบจะช้าแต่ถ้ามีค่าน้อยเกินไประบบจะมีโอเวอร์ชูต นอกจากนี้ขนาดของความแข็งและความหน่วงส่งผลต่อขนาดของ  $F_2$  อีกด้วย ดังนั้นหาก  $B_c$  หรือ  $k_c$  มีค่าสูงแรงขนาดของ  $F_2$  จะสูงตาม

### 3.3.3.3 แนวทางการออกแบบค่าอิมพีแดนซ์ของตัวควบคุม และค่าความแข็งของ VSPs

จากการวิเคราะห์ก่อนหน้านี้สามารถสรุปได้ว่าช่วงที่นิวจับเคลื่อนที่อย่างอิสระหรือไม่มีแรงภายนอกกระทำ ผลการตอบสนองของนิวจะขึ้นกับค่าอิมพีแดนซ์ของตัวควบคุมเท่านั้น อย่างไรก็ตามหากเป็นกรณีที่มีแรงภายนอกกระทำผลการตอบสนองจะไม่ขึ้นกับค่าอิมพีแดนซ์ของตัวควบคุมเพียงอย่างเดียว แต่จะขึ้นกับค่าความแข็งและค่าความหน่วงของ VSPs อีกด้วย

ด้วยเหตุนี้ผู้เขียนขอเสนอแนวทางการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของระบบ โดยให้ออกแบบค่าอิมพีแดนซ์ของตัวควบคุมเพื่อให้ได้ผลการตอบสนองของนิวจับช่วงที่เคลื่อนที่แบบอิสระตามต้องการ และปรับค่าความแข็งของ VSPs เพื่อให้ได้ผลการตอบสนองช่วงที่หยิบวัตถุตามต้องการ เช่นหากต้องการหยิบวัตถุได้อย่างรวดเร็วให้ปรับค่าความแข็งของ VSPs ขึ้น หากต้องการลดการสั่นหรือขนาดของแรงช่วงที่หยิบจับวัตถุให้ลดค่าความแข็งของ VSPs ลง เป็นต้น

## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

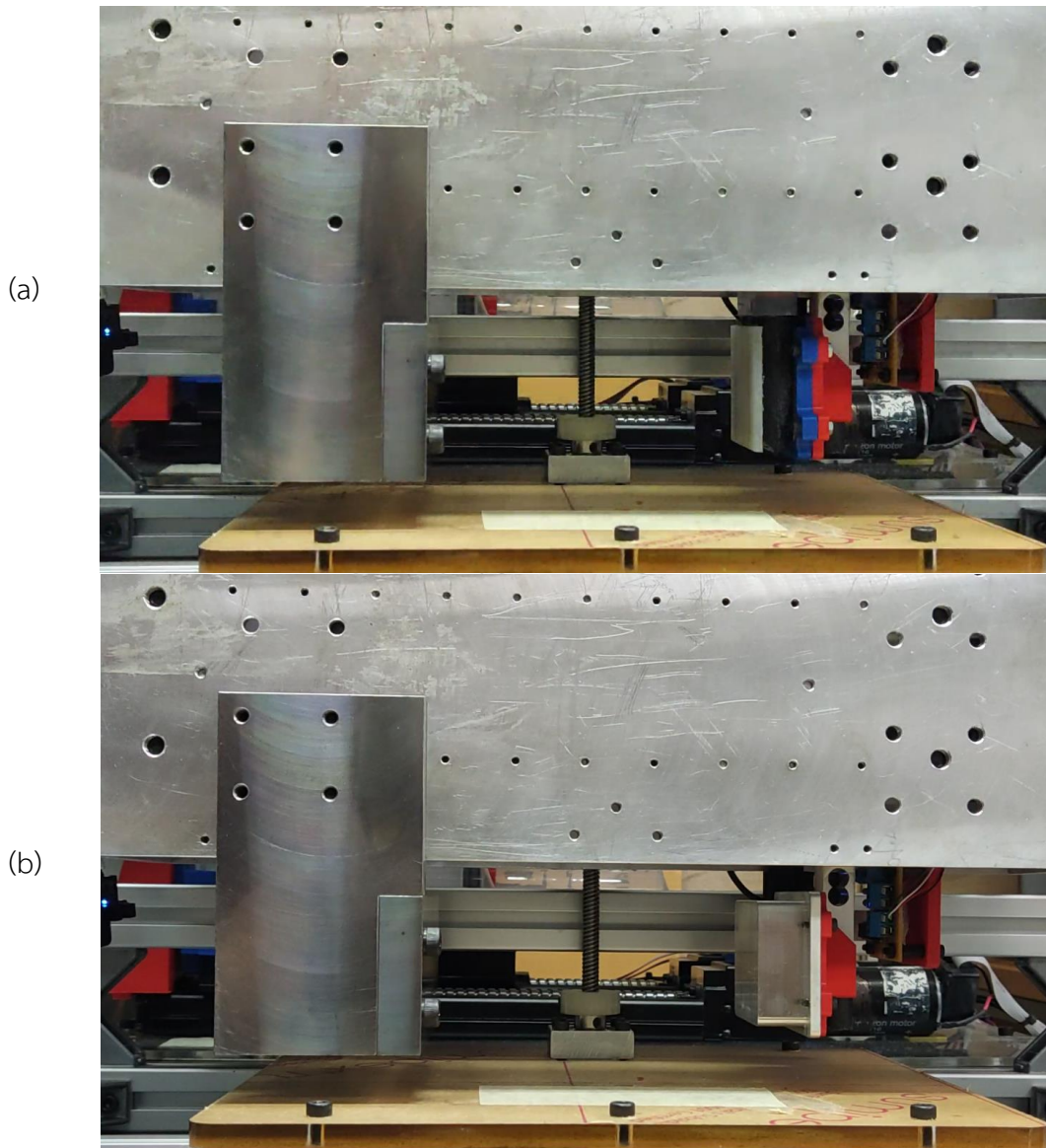
จากที่ได้กล่าวมาในวัตถุประสงค์และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ นอกจากการพัฒนา VSPs และมือจับตามที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่ 3.2 และ 3.3 ยังต้องนำ VSPs มาใช้งานร่วมกับมือจับเพื่อหิบบั้ววัตถุซึ่งไม่ทราบตำแหน่ง รูปทรง และความแข็งที่แน่ชัดอีกด้วย รวมถึงต้องแสดงประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นของมือจับหรือหุ่นยนต์เมื่อใช้ VSPs จากเหตุผลที่กล่าวมาจึงเป็นที่มาของหัวข้อนี้ โดยการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 การทดลองย่อยคือ 1. การชนกับสภาพแวดล้อมโดยไม่ได้ตั้งใจ และ 2. การหิบบั้วและเคลื่อนย้ายวัตถุที่ไม่ทราบค่า

การทดลองแรกมีเป้าหมายเพื่อทดสอบและเปรียบเทียบความปลอดภัยเมื่อเกิดการชนกับสภาพแวดล้อมระหว่างหุ่นยนต์ที่มีผิวสัมผัสแข็งเกร็งกับหุ่นยนต์ที่ใช้ VSPs โดยใช้นิ้วจับแบบแข็งเกร็ง แทนหุ่นยนต์ที่มีผิวสัมผัสแข็งเกร็ง และนิ้วจับที่ติดตั้ง VSPs แทนหุ่นยนต์ที่ใช้ VSPs การทดลองที่สองมีเป้าหมายเพื่อศึกษาและเปรียบเทียบการทำงานของมือจับระหว่างมือจับที่ใช้นิ้วจับแบบแข็งเกร็ง และมือจับที่ติดตั้ง VSPs

#### 4.1 การชนกับสภาพแวดล้อมโดยไม่ได้ตั้งใจ

การทดลองนี้เป็นการจำลองการชนที่เกิดขึ้นโดยไม่ได้ตั้งใจของหุ่นยนต์ที่ความเร็วสูง (100 mm/s) และความเร็วต่ำ (60 mm/s) โดยเปรียบเทียบผลการตอบสนองที่เกิดขึ้นเมื่อชนกับกำแพงระหว่างนิ้วจับที่ใช้ VSPs โดยปรับค่าความแข็งไว้ที่ 26 N/mm กับ 36 N/mm และนิ้วจับแบบแข็งเกร็ง ในการทดลองนี้จะใช้ตัวควบคุมอิมพีแดนซ์ควบคุมนิ้วจับโดยมีค่าพารามิเตอร์ดังนี้  $k_d = 40 \text{ N/mm}$ ,  $B_d = 1.5 \text{ Ns/mm}$  ใช้เงื่อนไขอย่างง่ายเพื่อออกแบบอินพุตให้กับตัวควบคุมอิมพีแดนซ์  $F_e \leq 40 \text{ N}; \dot{x}_d = v \text{ mm/s}$  เมื่อ  $v = 100 \text{ mm/s}$  สำหรับกรณีชนด้วยความเร็วสูงและ  $F_e > 40 \text{ N}; \dot{x}_d = 0 \text{ mm/s}$  เมื่อ  $v = 60 \text{ mm/s}$  สำหรับกรณีชนด้วยความเร็วต่ำ รูปที่ 4.1 แสดงตำแหน่งเริ่มต้นของอุปกรณ์ก่อนเริ่มการทดลอง

ควบคุมค่าความแข็งของ VSPs ชุดที่ 1 และ 2 โดยใช้ความดันซึ่งได้จากสมการที่ 3.8 และ 3.9 จะได้ว่าที่ค่าความแข็ง 26 N/mm ต้องควบคุมความดันภายในของ VSPs ชุดที่ 1 และ 2 เป็น 13.2 kPa และ 4.4 kPa ตามลำดับ สำหรับค่าความแข็ง 36 N/mm ต้องควบคุมความดันภายในของ VSPs ชุดที่ 1 และ 2 เป็น 68.1 kPa และ 59.3 kPa ตามลำดับ

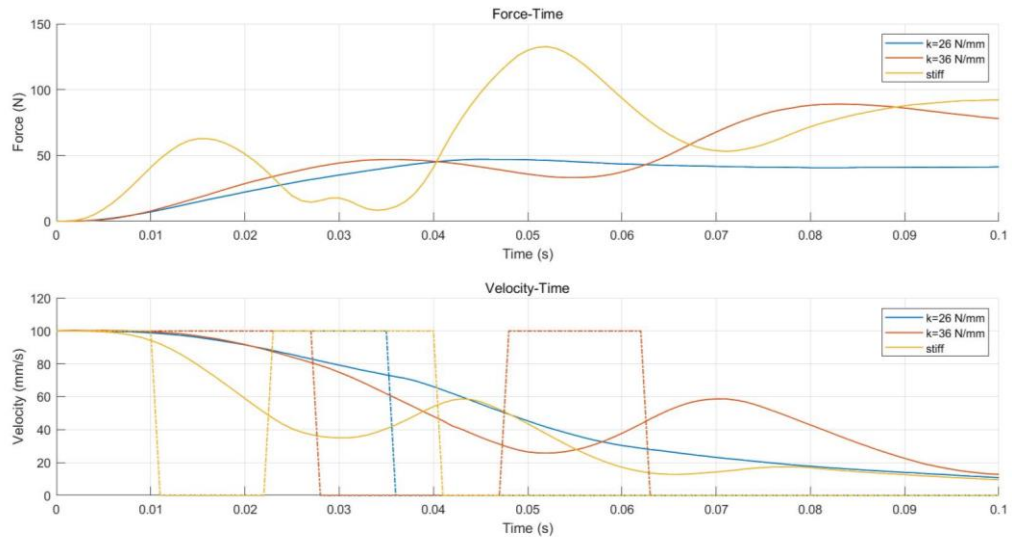


รูปที่ 4.1 ตำแหน่งเริ่มต้นของอุปกรณ์ก่อนเริ่มการทดลอง (a) เมื่อใช้มือจับเชิงเกียร์ (b) เมื่อใช้มือจับที่ติดตั้ง VSPs

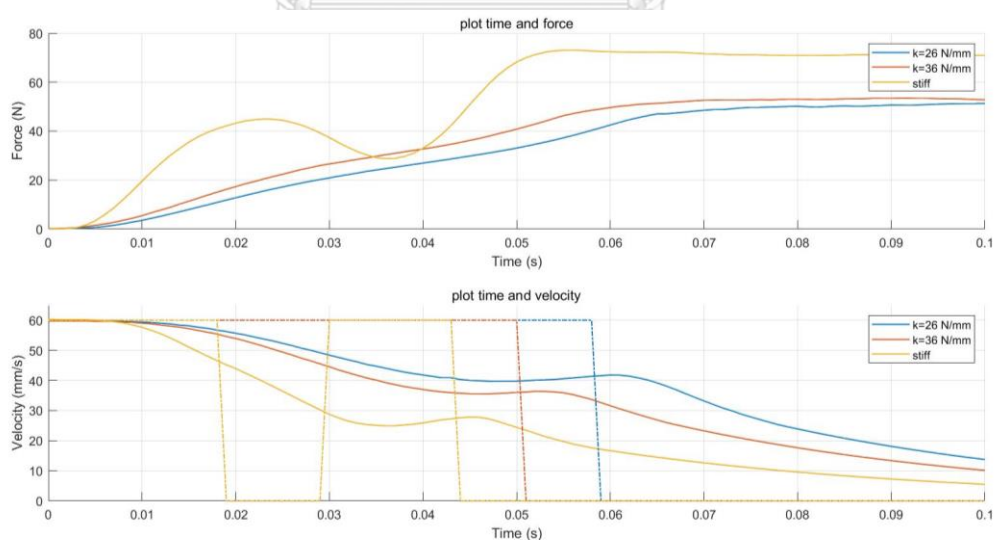
#### 4.1.1 ผลการทดลองการชนกับสภาพแวดล้อมโดยไม่ได้ตั้งใจ

พิจารณารูปที่ 4.2 ผลการตอบสนองของนิ้วจับเมื่อชนกับกำแพงด้วยความเร็ว  $100\text{mm/s}$  และรูปที่ 4.3 ผลการตอบสนองของนิ้วจับเมื่อชนกับกำแพงด้วยความเร็ว  $60\text{mm/s}$  พบว่านิ้วจับที่มีความแข็งที่ผิวสัมผัสสูงกว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงของแรงสัมผัสและความเร็วของนิ้วจับที่รุนแรงมากกว่า ส่งผลให้มีขนาดของแรงสัมผัสสูงสุด (peak force) สูงกว่า ทั้งนี้ขนาดแรงสัมผัสสูงสุดของนิ้วจับแบบเชิงเกียร์ นิ้วจับที่ใช้ VSPs เมื่อปรับค่าความแข็งเป็น  $36\text{N/mm}$  และ  $26\text{N/mm}$  เมื่อชนกำแพงด้วยความเร็ว  $100\text{mm/s}$  มีค่าเป็น  $132.664\text{N}$ ,  $88.989\text{N}$  และ  $47.039\text{N}$  ตามลำดับ

สำหรับการชนกำแพงด้วยความเร็ว 60 mm/s มีค่าเป็น 73149 mN, 53529 mN และ 51340 mN ตามลำดับ



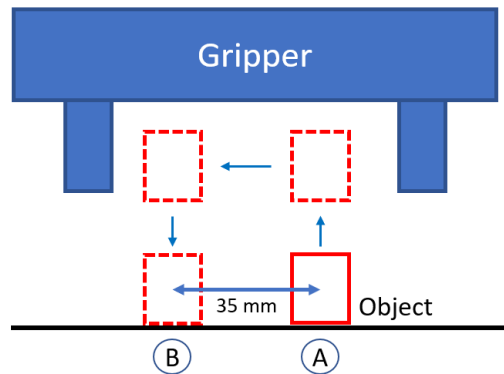
รูปที่ 4.2 ผลการตอบสนองของนิว้จับต่อการชนด้วยความเร็ว 100 mm/s โดยเส้นทึบแสดงค่าจริงที่เกิดขึ้น เส้นปะแสดงค่าอ้างอิง สีน้าเงินแทนนิว้จับที่ใช้ VSPs โดยปรับค่าความแข็งเป็น 26 N/mm สีแดงแทนนิว้จับที่ใช้ VSPs โดยปรับค่าความแข็งเป็น 36 N/mm และสีเหลืองแทนนิว้จับแบบแข็งเกร็ง



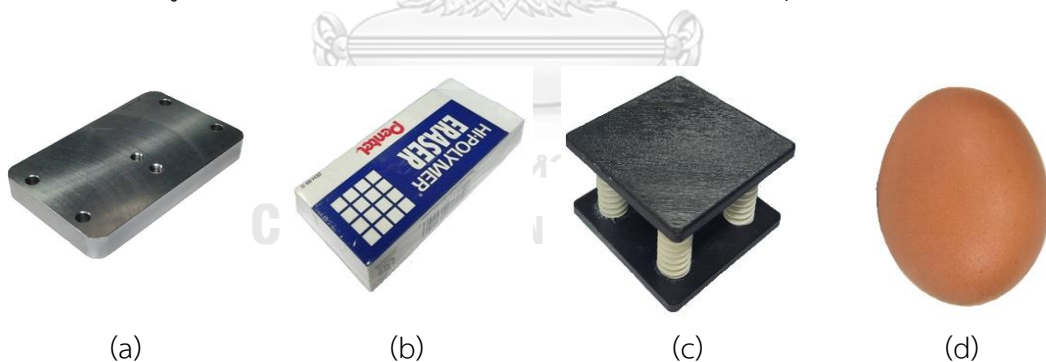
รูปที่ 4.3 การตอบสนองของนิว้จับต่อการชนด้วยความเร็ว 60 mm/s โดยเส้นทึบแสดงค่าจริงที่เกิดขึ้น เส้นปะแสดงค่าอ้างอิง สีน้าเงินแทนนิว้จับที่ใช้ VSPs โดยปรับค่าความแข็งเป็น 26 N/mm สีแดงแทนนิว้จับที่ใช้ VSPs โดยปรับค่าความแข็งเป็น 36 N/mm และสีเหลืองแทนนิว้จับแบบแข็งเกร็ง

#### 4.2 การหยิบและเคลื่อนย้ายวัตถุที่ไม่ทราบค่า

ใช้ตัวควบคุมอิมพีแดนซ์ควบคุมนิ้วจับเพื่อหยิบและเคลื่อนย้ายวัตถุ จากจุด a ไปจุด b ตามรูปที่ 4.4 โดยจุด a และ b ห่างกันเป็นระยะ 35 mm ด้วยความเร็ว 40 mm/s โดยวัตถุจะวางอยู่บริเวณกึ่งกลางของมือจับ วัตถุที่นำมาใช้ในการทดลองนี้มี เหล็ก ยาง กล่องสปริงและไข่ตามรูปที่ 4.5 ในทุกการทดลองจะใช้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมอิมพีแดนซ์ชุดเดียวกันคือ  $k_d = 40 \text{ N/mm}$ ,  $B_d = 1 \text{ Ns/mm}$  เปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้นระหว่างใช้นิ้วจับแบบแข็งเกร็ง และนิ้วจับที่ใช้ VSPs เมื่อปรับค่าความแข็งเป็น 36 N/mm และ 26 N/mm ทั้งนี้ค่าความของ VSPs สามารถควบคุมได้เช่นเดียวกับการทดลองก่อนหน้า



รูปที่ 4.4 ภาพจำลองการทดลองหยิบและเคลื่อนย้ายวัตถุไม่ทราบค่า



รูปที่ 4.5 ที่นำมาใช้ในการทดลอง (a) แผ่นเหล็ก (b) ยาง (c) กล่องสปริง และ (d) ไข่

ขั้นตอนการหยิบและเคลื่อนย้ายวัตถุจากจุด a ไปจุด b สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนหยิบวัตถุ ขั้นตอนยกวัตถุ ขั้นตอนเคลื่อนวัตถุไปทางซ้าย ขั้นตอนวางวัตถุ และสุดท้ายขั้นตอนปล่อยวัตถุ ในแต่ละขั้นตอนจะมีแนวทางการออกแบบอินพุตให้ตัวควบคุมที่เหมือนกันตามสมการที่ 4.1 และ 4.2 แต่จะใช้สัญญาณอ้างอิงและเงื่อนไขการเปลี่ยนขั้นตอนที่แตกต่างกันตามตารางที่ 4.1



$$\dot{x}_d = 40 \left( \frac{F_r - F}{F_{rm}} \right)^2 \text{sgn}(F_r - F) + \dot{x}_r \quad (4.1)$$

เมื่อ  $F_r$  คือแรงอ้างอิง

$F$  คือแรงสัมผัสที่ได้จากการวัด

$F_{rm}$  คือแรงอ้างอิงสูงสุด

$\dot{x}_r$  คือความเร็วอ้างอิง

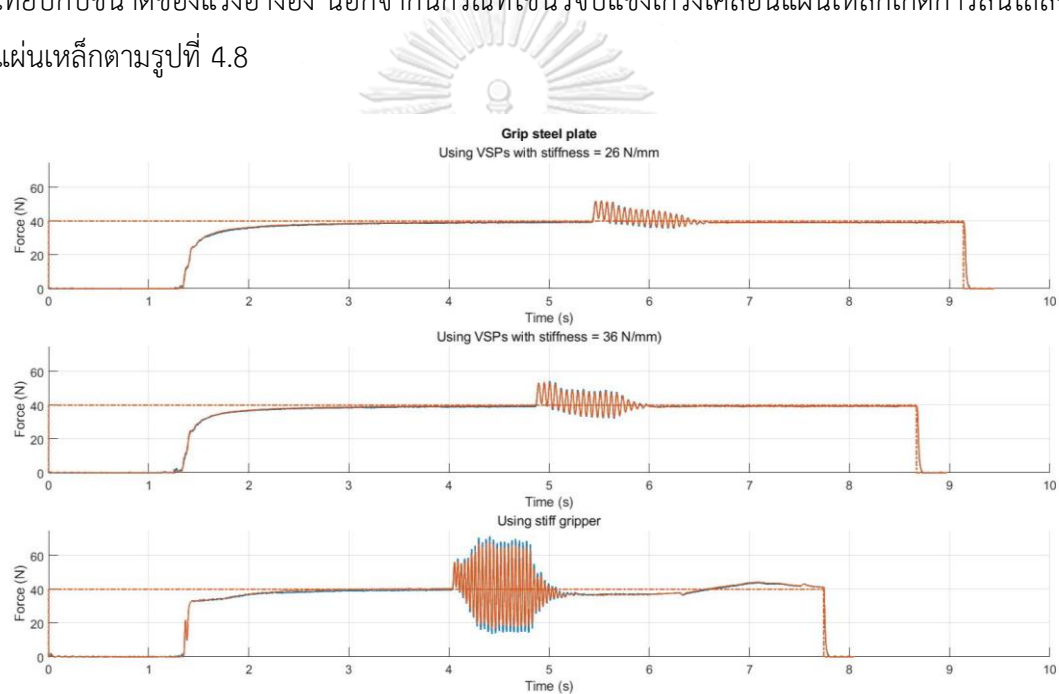
$$x_d(k) = x_d(k-1) + \dot{x}_d \Delta t \quad (4.2)$$

เมื่อ  $x_d(k-1)$  คือตำแหน่งที่ต้องการของลูปการควบคุมก่อนหน้า

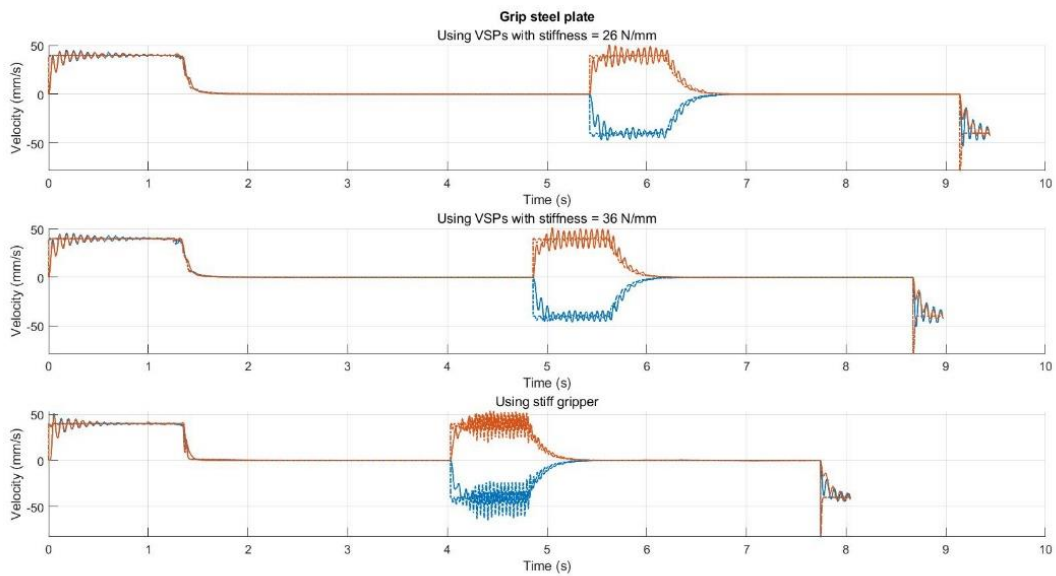
ตารางที่ 4.1 ความเร็วที่ต้องการ แรงที่ต้องการและเงื่อนไขการเปลี่ยนขั้นตอน ของการหยิบวัตถุ				
ขั้นตอน	นิ้วจับ	ความเร็วอ้างอิง ( $\dot{x}_r$ )	แรงอ้างอิง ( $F_r$ )	เงื่อนไขการเปลี่ยนขั้นตอน
หยิบวัตถุ	ซ้าย	$\dot{x}_{r,le} = 0 \text{ mm/s}$	$F_{r,le} = 40 \text{ N}$	$F > 1\text{N}$ $\dot{x} \leq 0.1 \text{ mm/s}$
	ขวา	$\dot{x}_{r,ri} = 0 \text{ mm/s}$	$F_{r,ri} = 40 \text{ N}$	
ยกวัตถุ	ซ้าย	$\dot{x}_{r,le} = 0 \text{ mm/s}$	$F_{r,le} = 40 \text{ N}$	$ w_d - w  < 0.01 \text{ mm}$ $\dot{w} < 0.1 \text{ mm/s}$
	ขวา	$\dot{x}_{r,ri} = 0 \text{ mm/s}$	$F_{r,ri} = 40 \text{ N}$	
เคลื่อนวัตถุ	ซ้าย	$\dot{x}_{r,le} = -40 \text{ mm/s}$	$F_{r,le} = 40 \text{ N}$	$ x - x_b  < 2\text{mm}$ $\dot{x} \leq 0.1 \text{ mm/s}$
	ขวา	$\dot{x}_{r,ri} = 40 \text{ mm/s}$	$F_{r,ri} = 40 \text{ N}$	
วางวัตถุ	ซ้าย	$\dot{x}_{r,le} = 0 \text{ mm/s}$	$F_{r,le} = 40 \text{ N}$	$ w_d - w  < 0.01 \text{ mm}$ $\dot{w} < 0.1 \text{ mm/s}$
	ขวา	$\dot{x}_{r,ri} = 0 \text{ mm/s}$	$F_{r,ri} = 40 \text{ N}$	
ปล่อยวัตถุ	ซ้าย	$\dot{x}_{r,le} = -40 \text{ mm/s}$	$F_{r,le} = 0 \text{ N}$	ผ่านไป 0.3s จะจบการทำงาน ของโปรแกรม
	ขวา	$\dot{x}_{r,ri} = -40 \text{ mm/s}$	$F_{r,ri} = 0 \text{ N}$	
<p><math>w, \dot{w}</math> คือตำแหน่งและความเร็วของมือจับในแกน z</p> <p><math>w_d</math> คือตำแหน่งที่ต้องการในแกน z</p> <p><math>x_b</math> คือตำแหน่งที่ต้องวางวัตถุ</p> <p><math>F_{rm} = 40 \text{ N}</math> (กรณีที่ยกแรงอ้างอิงเป็น <math>F_{rm} = 15 \text{ N}</math>)</p> <p>กรณีไขแรงอ้างอิงจะเปลี่ยนเป็น <math>F_{r,le}, F_{r,ri} = 15 \text{ N}</math></p>				

#### 4.2.1 ผลการทดลองหีบและเคลื่อนย้ายวัตถุ

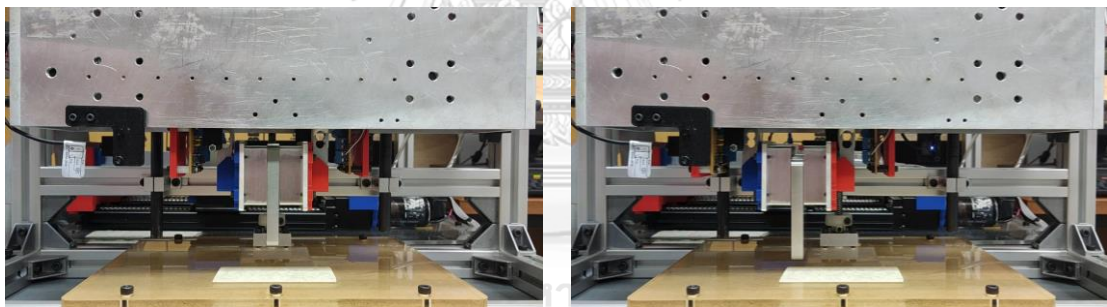
พิจารณาผลการทดลองหีบและเคลื่อนย้ายแผ่นเหล็กตามรูปที่ 4.6 และ 4.7 พบว่านิ้วจับที่มีความแข็งที่ผิวสัมผัสมากกว่าจะมีการตอบสนองที่เร็วกว่า ระบบสามารถเข้าสู่สมดุลได้ไวกว่า โดยเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายวัตถุจากจุด A ไปจุด B ของนิ้วจับทั้ง 3 แบบเรียงตามค่าความแข็งจากมากมาน้อย (นิ้วจับแข็งเกร็ง นิ้วจับที่ใช้ VSPs เมื่อปรับค่าความแข็งเป็น 36 N/mm และ 26 N/mm) มีค่าเป็น 8.046s, 8.973s และ 9.441s ตามลำดับ อย่างไรก็ตามผิวสัมผัสที่แข็งมากขึ้นจะส่งผลให้เกิดการสั่นมากขึ้นโดยเฉพาะขณะที่เคลื่อนวัตถุไปทางซ้าย ขนาดการสั่นของแรงที่เกิดกับนิ้วจับทั้ง 3 แบบเรียงตามค่าความแข็งจากมากมาน้อยมีค่าเป็น 78.40% , 35.40% และ 30.14% ตามลำดับเมื่อเทียบกับขนาดของแรงอ้างอิง นอกจากนี้กรณีที่ใช้ นิ้วจับแข็งเกร็งเคลื่อนแผ่นเหล็กเกิดการสั่นไกลของแผ่นเหล็กตามรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.6 ผลการตอบสนองของแรงเมื่อหีบและเคลื่อนย้ายแผ่นเหล็ก โดยเส้นทึบแสดงค่าจริงที่เกิดขึ้น เส้นปะแสดงค่าอ้างอิง สีน้ำเงินแทนค่าที่วัดได้จากนิ้วจับด้านซ้าย และสีแดงแทนค่าที่วัดได้จากนิ้วจับด้านขวา



รูปที่ 4.7 ผลการตอบสนองของความเร็วเมื่อหยิบและเคลื่อนย้ายแผ่นเหล็ก โดยเส้นทึบแสดงค่าจริงที่เกิดขึ้น เส้นปะแสดงค่าอ้างอิง สีน้ำเงินแทนค่าที่วัดได้จากนิ้วจับด้านซ้าย และสีแดงแทนค่าที่วัดได้จากนิ้วจับด้านขวา

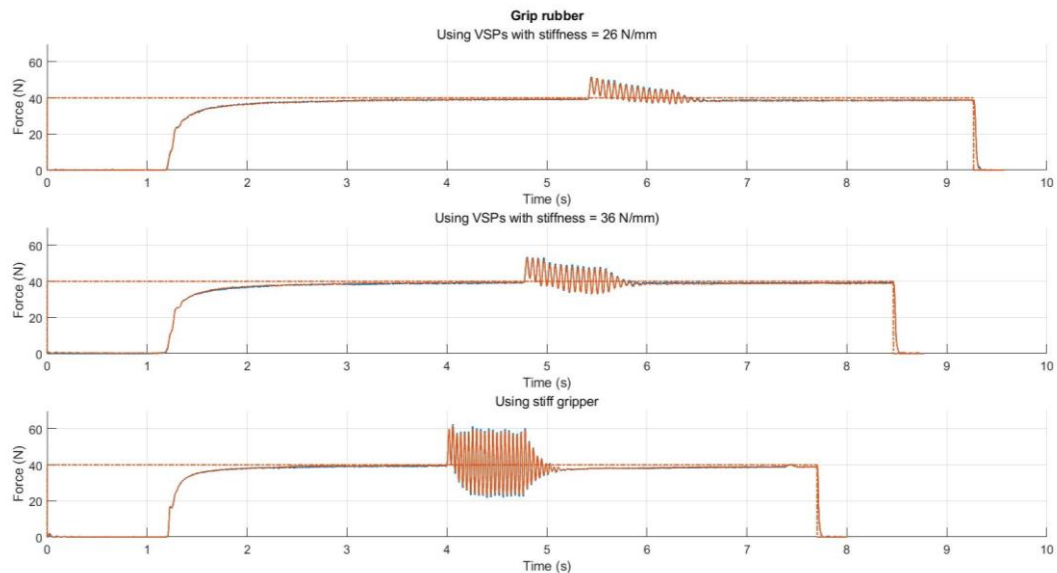


(a) (b)

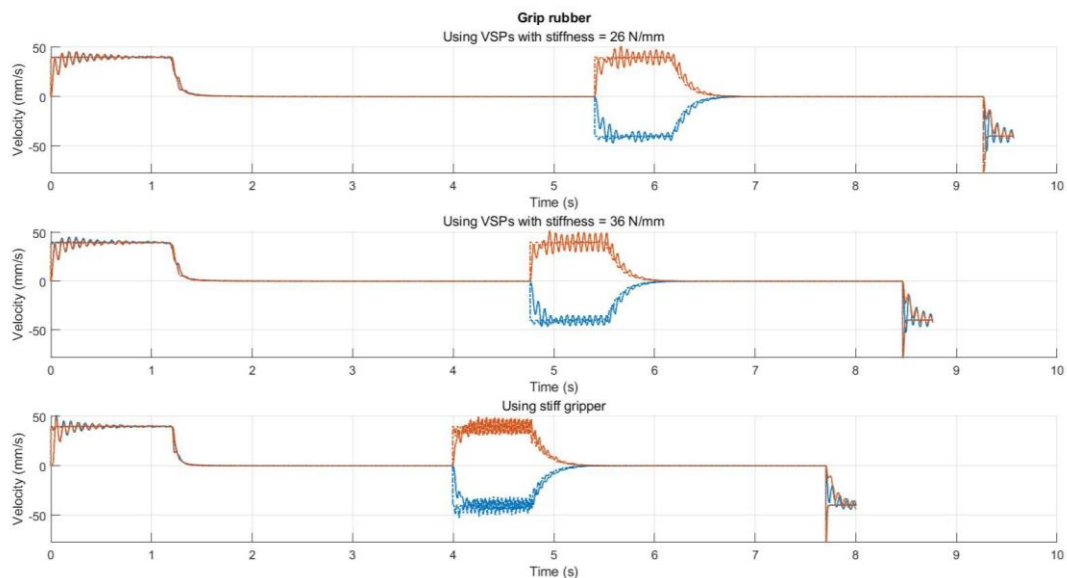
รูปที่ 4.8 ทดลองหยิบและเคลื่อนย้ายแผ่นเหล็ก (a) ขณะเริ่มเคลื่อนวัตถุไปทางซ้าย (b) เมื่อเคลื่อนวัตถุเสร็จ

ผลการตอบสนองของแรงและความเร็วเมื่อทดลองกับยางและกล่องสปริงเป็นไปในแนวทางเดียวกับแผ่นเหล็กกล่าวคือ นิ้วจับที่มีผิวสัมผัสแข็งกว่าสามารถทำงานเสร็จได้เร็วกว่า แต่มีการสั่นของแรงและความเร็วเมื่อต้องเคลื่อนวัตถุไปทางซ้ายมากกว่า เวลาที่ใช้ในการทำงานเพื่อเคลื่อนย้ายยางของนิ้วจับทั้ง 3 แบบเรียงตามค่าความแข็งจากมากมาน้อยมีค่าเป็น 8.006s, 8.768s และ 9.570s ตามลำดับและมีขนาดการสั่นของแรงเป็น 56.50%, 33.58% และ 29.16% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับขนาดของแรงอ้างอิง เวลาที่ใช้ในการทำงานสำหรับการหยิบกล่องสปริงมีค่าเป็น 8.854s, 8.929s และ 9.612s ตามลำดับ และมีขนาดการสั่นของแรงเป็น 30.75%, 20.31%

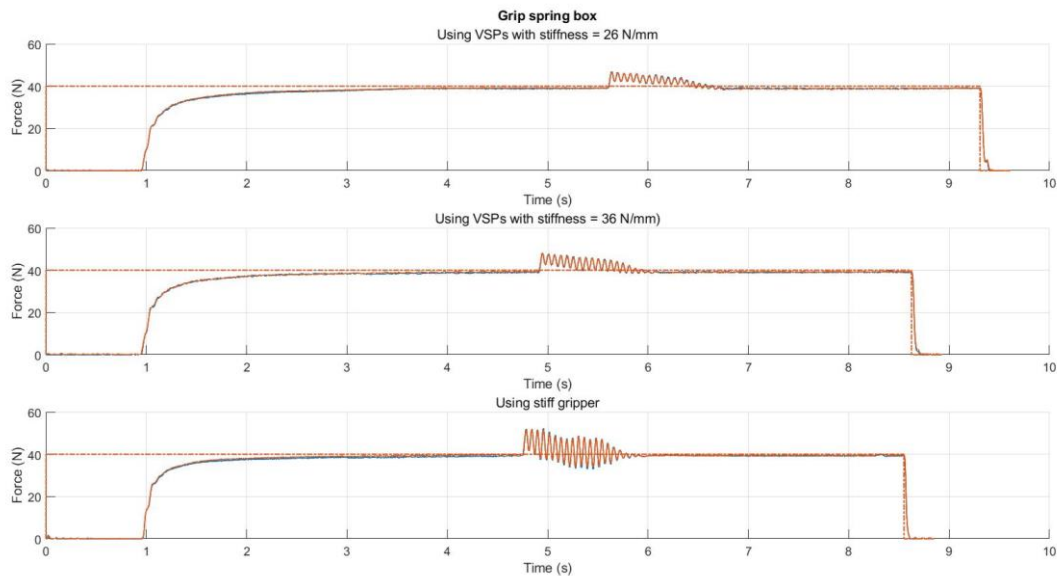
และ 17.55% ตามลำดับเมื่อเทียบกับขนาดของแรงอ้างอิง รูปที่ 4.9 และ 4.10 แสดงผลการทดลองเมื่อหีบและเคลื่อนย้ายอย่างด้วยนิ้วจับแบบต่าง ๆ รูปที่ 4.11 และ 4.12 แสดงผลการทดลองเมื่อหีบและเคลื่อนย้ายกล่องสปริงด้วยนิ้วจับแบบต่าง ๆ



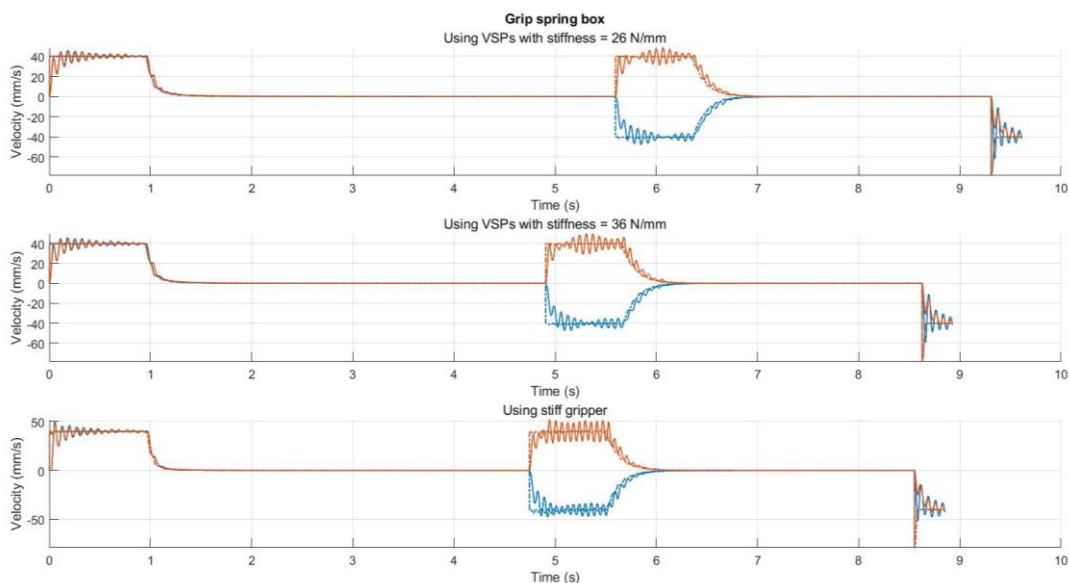
รูปที่ 4.9 ผลการตอบสนองของแรงเมื่อหีบและเคลื่อนย้ายอย่าง โดยเส้นทึบแสดงค่าจริงที่เกิดขึ้น เส้นปะแสดงค่าอ้างอิง สีน้ำเงินแทนค่าที่วัดได้จากนิ้วจับด้านซ้าย และสีแดงแทนค่าที่วัดได้จากนิ้วจับด้านขวา



รูปที่ 4.10 ผลการตอบสนองของความเร็วเมื่อหีบและเคลื่อนย้ายอย่าง โดยเส้นทึบแสดงค่าจริงที่เกิดขึ้น เส้นปะแสดงค่าอ้างอิง สีน้ำเงินแทนค่าที่วัดได้จากนิ้วจับด้านซ้าย และสีแดงแทนค่าที่วัดได้จากนิ้วจับด้านขวา



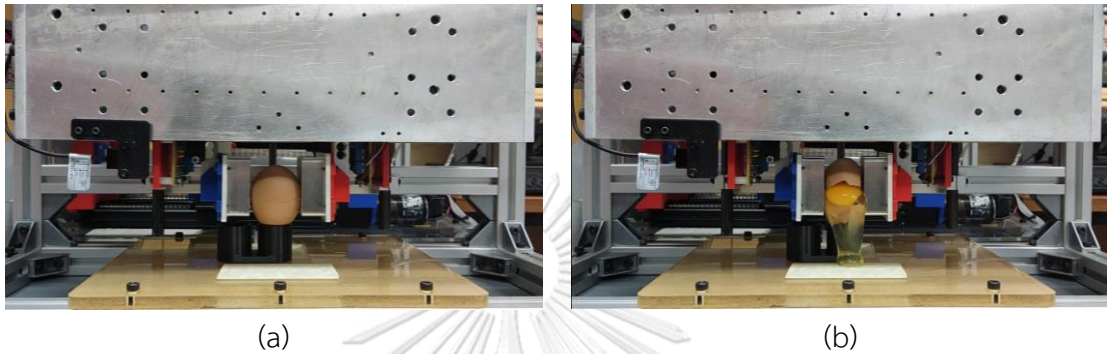
รูปที่ 4.11 ผลการตอบสนองของแรงเมื่อหยิบและเคลื่อนย้ายกล่องสปริง โดยเส้นทึบแสดงค่าจริงที่เกิดขึ้น เส้นปะแสดงค่าอ้างอิง สีน้ำเงินแทนค่าที่วัดได้จากนิ้วจับด้านซ้าย และสีแดงแทนค่าที่วัดได้จากนิ้วจับด้านขวา



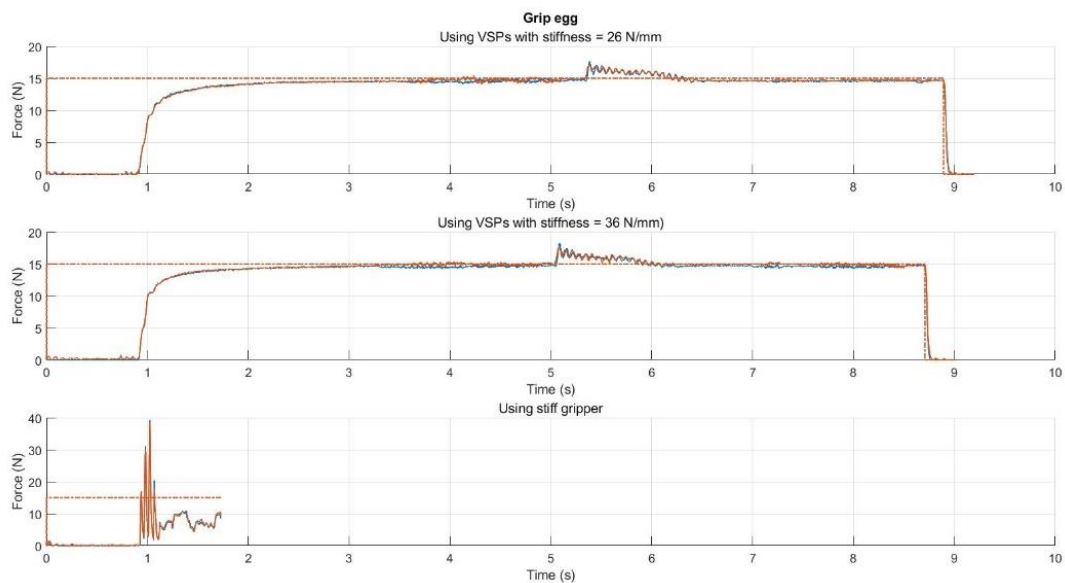
รูปที่ 4.12 ผลการตอบสนองของความเร็วเมื่อหยิบและเคลื่อนย้ายกล่องสปริง โดยเส้นทึบแสดงค่าจริงที่เกิดขึ้น เส้นปะแสดงค่าอ้างอิง สีน้ำเงินแทนค่าที่วัดได้จากนิ้วจับด้านซ้าย และสีแดงแทนค่าที่วัดได้จากนิ้วจับด้านขวา

สุดท้ายในการทดลองหยิบและเคลื่อนย้ายไปพบว่านิ้วจับแบบแข็งเกร็งไม่สามารถหยิบและเคลื่อนย้ายไปได้โดยทำให้ไขแตก ตามรูปที่ 4.13 สำหรับผลการตอบสนองที่เกิดขึ้นมีผลคล้ายกับการ

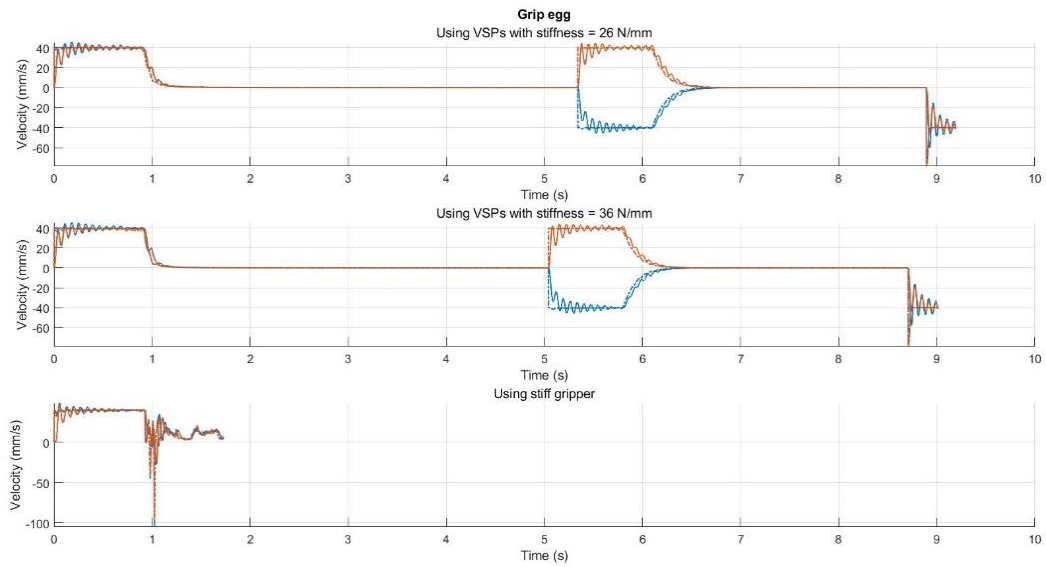
ทดลองก่อนหน้า โดยนิ้วจับที่มีค่าความแข็งสูงสามารถทำงานเสร็จได้เร็วกว่า แต่มีการสั่นของแรงและความเร็วที่มากกว่าเช่นกัน เวลาที่ใช้ในการทำงานของนิ้วจับที่ติดตั้ง VSPs แบบเรียงตามค่าความแข็งจากมากมาน้อยมีค่าเป็น 9.012s และ 9.197s ตามลำดับ และมีขนาดการสั่นของแรงเป็น 21.60% และ 17.67% ตามลำดับเมื่อเทียบกับขนาดของแรงอ้างอิง รูปที่ 4.14 และ 4.15 แสดงผลการทดลองเมื่อหยิบและเคลื่อนย้ายไข่ด้วยนิ้วจับแบบต่าง ๆ



รูปที่ 4.13 การทดลองหยิบและเคลื่อนย้ายไข่ด้วยนิ้วแบบจับแข็งเกร็ง (a) ขณะเริ่มสัมผัสไข่ (b) เมื่อไข่แตกระหว่างการหยิบ



รูปที่ 4.14 ผลการตอบสนองของแรงเมื่อหยิบและเคลื่อนย้ายไข่ โดยเส้นทึบแสดงค่าจริงที่เกิดขึ้น เส้นปะแสดงค่าอ้างอิง สีน้ำเงินแทนค่าที่วัดได้จากนิ้วจับด้านซ้าย และสีแดงแทนค่าที่วัดได้จากนิ้วจับด้านขวา



รูปที่ 4.15 ผลการตอบสนองของความเร็วเมื่อหยิบและเคลื่อนย้ายไข่ โดยเส้นทึบแสดงค่าจริงที่เกิดขึ้น เส้นปะแสดงค่าอ้างอิง สีน้าเงินแทนค่าที่วัดได้จากนิ้วจับด้านซ้าย และสีแดงแทนค่าที่วัดได้จากนิ้วจับด้านขวา

## บทที่ 5 สรุปและอภิปรายผลงานวิจัย

การสรุปและอภิปรายผลในบทนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนย่อยตามวัตถุประสงค์และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของงานวิจัย คือส่วนของการออกแบบและสร้างแผ่นที่ปรับค่าความแข็งได้ กับส่วนของการประยุกต์ใช้แผ่นที่ปรับค่าความแข็งได้กับนิ้วจับ

### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

#### 5.1.1 สรุปการออกแบบและสร้างแผ่นที่ปรับค่าความแข็งได้

ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่ว่าออกแบบและสร้างแผ่นที่ปรับค่าความแข็งโดยการควบคุมลมอย่างเหมาะสมนำมาสู่การดำเนินงานวิจัยในหัวข้อที่ 3.2 ซึ่งสรุปผลออกมาได้ดังนี้ แผ่นที่ปรับค่าความแข็งได้หรือ VSPs ถูกออกแบบให้มีโครงสร้างภายในเป็นทรงกระบอก และสร้างขึ้นโดยใช้การหล่อซิลิโคนเสริมเส้นไฟเบอร์ VSPs ทั้ง 2 ตัวปรับค่าความแข็งได้ในช่วง 16.42 – 36.34 N/mm และ 21.144 – 37.94 N/mm ตามลำดับ เมื่อใช้ค่าความดันในช่วง 0 – 70 kPa ทั้งนี้ VSPs สามารถควบคุมค่าความแข็งผ่านการควบคุมความดันโดยใช้ตัวควบคุมแบบแผนเลื่อนร่วมกับปั๊มเข็มฉีดยา มีผลการตอบสนองในช่วงของการทำงานที่ 0 – 100 kPa ดังนี้ มีความเร็วเข้าสู่สมดุล (2% settling time) น้อยกว่า 0.3s และมีความคลาดเคลื่อนเชิงสถิติ (steady state error) น้อยกว่า 300 Pa

#### 5.1.2 สรุปการประยุกต์ใช้แผ่นที่ปรับค่าความแข็งได้กับนิ้วจับ

ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่ว่านำแผ่นที่ปรับค่าความแข็งได้หรือ VSPs ไปติดตั้งกับมือจับแบบง่ายเพื่อหิบบังวัตถุซึ่งไม่ทราบตำแหน่ง รูปทรง และความแข็งที่แน่ชัดด้วยวิธีการควบคุมอิมพีแดนซ์ และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของงานวิจัยนำมาสู่การทดลองในหัวข้อที่ 4 โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้ตามหัวข้อที่ 5.1.2.1 และ 5.1.2.2

จากผลการทดลองกล่าวได้ว่ามือจับที่ติดตั้ง VSPs สามารถหิบบังแผ่นเหล็ก ยาง กล่องสปริง และไข ซึ่งไม่ทราบตำแหน่ง รูปทรง และความแข็งที่แน่ชัดโดยใช้ตัวควบคุมอิมพีแดนซ์ได้ นอกจากนี้การติดตั้ง VSPs ยังเพิ่มความยืดหยุ่นในการควบคุมมือจับอีกด้วย โดยช่วยปรับแก้ผลการตอบสนองของตำแหน่งและแรงเมื่อมีแรงภายนอกกระทำ เช่น หากต้องการลดขนาดของแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นในการชนกับสภาพแวดล้อมหรือต้องการลดการสั่นของระบบให้ลดค่าความแข็งของ VSPs แต่ถ้าต้องการความเร็วในการทำงานหรือเพิ่มขนาดแรงสูงสุดในการชนให้เพิ่มค่าความแข็งของ VSPs เป็นต้น



### 5.1.2.1 การทดลองชนกับสภาพแวดล้อมหรือกำแพงโดยไม่ได้ตั้งใจของนิว้จับ

ในการทดลองนี้ใช้ตัวควบคุมอิมพีแดนซ์ควบคุมนิว้จับ และออกตัวอินพุตให้ตัวควบคุมด้วยเงื่อนไขอย่างง่าย แรงสูงสุดที่เกิดขึ้นจากการชนของนิว้จับแข็งเกร็ง นิว้จับที่ใช้ VSPs ซึ่งมีค่าความแข็งเป็น 36 N/mm และ 26 N/mm เมื่อชนกำแพงด้วยความเร็ว 60 mm/s มีค่าเป็น 73.149 N, 53.529 N และ 51.340 N ตามลำดับ เมื่อชนกำแพงด้วยความเร็ว 100 mm/s มีค่าเป็น 132.664 N, 88.989 N และ 47.039 N ตามลำดับ การสั่นที่เกิดขึ้นระหว่างชนกำแพงของนิว้จับแบบแข็งเกร็งมีมากที่สุด และนิว้จับที่ใช้ VSPs ซึ่งมีค่าความแข็งเป็น 26 N/mm มีการสั่นน้อยสุดจากแรงสูงสุดและการสั่นที่เกิดขึ้นระหว่างการชนสามารถสรุปได้ว่านิว้จับหรือหุ่นยนต์ที่มีค่าความแข็งที่ผิวสัมผัสต่ำกว่าจะมีความปลอดภัยสูงกว่าหากเกิดการชนโดยไม่ได้ตั้งใจกับสภาพแวดล้อม

### 5.1.2.2 การทดลองหยิบและเคลื่อนย้ายวัตถุ

ในการทดลองนี้ใช้ตัวควบคุมอิมพีแดนซ์ควบคุมมือจับเพื่อหยิบและเคลื่อนย้ายวัตถุเป็นระยะ 35 mm ออกแบบอินพุตให้ตัวควบคุมโดยใช้แรงสัมผัสเข้ามาช่วย ในการทดลองมือจับที่ติดตั้ง VSPs ไว้ทั้งที่ปรับค่าความแข็งเป็น 26 N/mm และ 36 N/mm สามารถหยิบและเคลื่อนย้ายวัตถุทั้ง 4 ชนิดได้ แต่กรณีที่ใช้นิว้จับแบบแข็งเกร็งไม่สามารถหยิบไข โดยทำให้ไขแตกระหว่างขั้นตอนการหยิบ นอกจากนี้ยังทำให้แผ่นเหล็กไถลลงมาระหว่างเคลื่อนแผ่นเหล็กไปทางซ้ายอีกด้วย ผลการตอบสนองเมื่อหยิบวัตถุสามารถสรุปได้ว่านิว้จับที่มีผิวสัมผัสแข็งกว่าจะทำงานได้เร็วกว่าแต่จะเกิดการสั่นระหว่างหยิบและเคลื่อนย้ายวัตถุที่มากกว่า รวมถึงมีโอกาสก่อให้เกิดความเสียหายต่อวัตถุที่ต้องการหยิบและเคลื่อนย้ายได้มากกว่าด้วย นอกจากนี้หากวัตถุที่หยิบมีรูปร่างคล้ายกันวัตถุที่มีค่าความแข็งสูงจะส่งผลให้เกิดการสั่นระหว่างการหยิบและเคลื่อนย้ายสูงกว่าวัตถุที่มีค่าความแข็งต่ำ

## 5.2 การอภิปรายผลงานวิจัย

### 5.2.1 อภิปรายการออกแบบและสร้างแผ่นที่ปรับค่าความแข็งได้

ตามที่ได้สรุปผลไว้ก่อนหน้านี้ในหัวข้อที่ 5.1.1 ผู้วิจัยได้ออกแบบและสร้างแผ่นที่ปรับค่าความแข็งได้โดยให้มีลักษณะโครงสร้างภายในแบบทรงกระบอก ซึ่งสามารถปรับค่าความแข็งด้วยลมได้เป็นอย่างดี ตรงตามที่ได้วิเคราะห์ไว้ในบทที่ 3.2.1.1 ที่ว่าลักษณะโครงสร้างภายในแบบที่มีส่วนโค้งจะช่วยให้ปรับค่าความแข็งผ่านการควบคุมค่าความดันได้ ในส่วนของการควบคุมลมเลือกใช้ตัวควบคุมแบบแผ่นเลื่อนและปั๊มเข็มฉีดยาโดยรวมแล้วมีผลการตอบสนองที่ดี ตัวควบคุมแผ่นเลื่อนสามารถจัดการกับระบบแบบไม่เชิงเส้นได้ดี มีความคงทนสูง เป็นไปตามที่ได้วิเคราะห์ไว้ในหัวข้อที่ 3.2.4

### 5.2.2 อภิปรายการประยุกต์ใช้แผ่นที่ปรับค่าความแข็งได้กับนิ้วจับ

ตามที่ได้สรุปผลไว้ก่อนหน้านี้ในหัวข้อที่ 5.1.2 เมื่อควบคุมนิ้วจับด้วยตัวควบคุมอิมพีแดนซ์ มือจับที่ติดตั้ง VSPs สามารถหยิบวัตถุซึ่งไม่ทราบตำแหน่ง รูปทรงและความแข็งที่แน่ชัดได้ นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นในการควบคุมให้กับอุปกรณ์ที่นำไปติดตั้ง โดยมีส่วนช่วยปรับแก้ผลการตอบสนองของตำแหน่งและแรงสัมผัสเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ ซึ่งเป็นไปตามที่ได้วิเคราะห์ไว้ก่อนหน้านี้ในหัวข้อที่ 3.3.3 และเป็นไปในแนวทางเดียวกับงานวิจัย CoboSkin [2] ในเรื่องของการเพิ่มความปลอดภัยซึ่งได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ในบทที่ 2

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ยังมีอีกหลายประเด็นที่น่าสนใจและควรศึกษาเพิ่มซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเด็นใหญ่ คือในส่วนของการพัฒนาแผ่นที่ปรับค่าความแข็งได้ และส่วนของการประยุกต์ใช้แผ่นที่ปรับค่าความแข็งได้

### 5.3.1 ในแง่ของการพัฒนาแผ่นที่ปรับค่าความแข็งได้

ถึงแม้ว่าในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบและสร้างแผ่นที่ปรับค่าความแข็งได้ แต่เนื้อหาในการออกแบบและสร้างยังไม่ครอบคลุมถึงแบบจำลองระหว่างค่าความแข็งและพารามิเตอร์ของโครงสร้างแผ่นที่ปรับค่าความแข็งได้ (ความหนา ความยาว รัศมีของทรงกระบอก จำนวนของทรงกระบอก) ซึ่งช่วยให้ออกแบบแผ่นที่ปรับค่าความแข็งได้ให้มีช่วงการปรับค่าความแข็งที่ต้องการ

### 5.3.2 ในแง่ของการประยุกต์ใช้แผ่นที่ปรับค่าความแข็งได้

ประยุกต์ใช้แผ่นที่ปรับค่าความแข็งได้ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้เป็นการปรับค่าความแข็งก่อนการทำงานบางอย่างเช่น การชน หรือการหยิบและเคลื่อนย้ายวัตถุ หากสามารถปรับค่าความแข็งให้เหมาะสมในระหว่างการทำงาน จะมีส่วนช่วยให้หุ่นยนต์หรือมือจับมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากในแต่ละช่วงของการทำงานอาจต้องการค่าความแข็งที่ผิวสัมผัสแตกต่างกัน

## บรรณานุกรม

1. Heng, W., et al., *Fluid-Driven Soft CoboSkin for Safer Human-Robot Collaboration: Fabrication and Adaptation*. *Advanced Intelligent Systems*, 2021. **3**(3): p. 2000038.
2. Pang, G., et al., *CoboSkin: Soft robot skin with variable stiffness for safer human-robot collaboration*. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020. **68**(4): p. 3303-3314.
3. Tomo, T.P., et al., *A new silicone structure for uSkin—A soft, distributed, digital 3-axis skin sensor and its integration on the humanoid robot iCub*. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018. **3**(3): p. 2584-2591.
4. Tomo, T.P., et al., *Covering a robot fingertip with uSkin: A soft electronic skin with distributed 3-axis force sensitive elements for robot hands*. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2017. **3**(1): p. 124-131.
5. Pang, G., et al., *Development of flexible robot skin for safe and natural human-robot collaboration*. *Micromachines*, 2018. **9**(11): p. 576.
6. Asahina, R. and J. Wang. *Development of a vision-based soft tactile muscularis*. in *2019 2nd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)*. 2019. IEEE.
7. Kim, B.-S. and J.-B. Song. *Object grasping using a 1 DOF variable stiffness gripper actuated by a hybrid variable stiffness actuator*. in *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2011. IEEE.
8. Memar, A.H., N. Mastrorarde, and E.T. Esfahani. *Design of a novel variable stiffness gripper using permanent magnets*. in *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2017. IEEE.
9. Memar, A.H. and E.T. Esfahani. *A Variable Stiffness Gripper with Antagonistic Magnetic Springs for Enhancing Manipulation*. in *Robotics: Science and Systems*. 2018.
10. Li, X., et al., *A variable stiffness robotic gripper based on structure-controlled principle*. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2017. **15**(3):

p. 1104-1113.

11. Wei, Y., et al., *A novel, variable stiffness robotic gripper based on integrated soft actuating and particle jamming*. *Soft Robotics*, 2016. **3**(3): p. 134-143.
12. Al Abeach, L., et al., *A variable stiffness soft gripper using granular jamming and biologically inspired pneumatic muscles*. *Journal of Bionic Engineering*, 2018. **15**(2): p. 236-246.
13. Zhu, M., et al., *A fully multi-material three-dimensional printed soft gripper with variable stiffness for robust grasping*. *Soft robotics*, 2019. **6**(4): p. 507-519.
14. Zhu, M., et al. *A 3D printed two DoF soft robotic finger with variable stiffness*. in *2018 12th France-Japan and 10th Europe-Asia Congress on Mechatronics*. 2018. IEEE.
15. Sun, T., et al., *A soft gripper with variable stiffness inspired by pangolin scales, toothed pneumatic actuator and autonomous controller*. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020. **61**: p. 101848.
16. Van Damme, M., et al. *The role of compliance in robot safety*. in *Proceedings of the Seventh IARP Workshop on Technical Challenges for Dependable Robots in Human Environments*. 2010.
17. Slotine, J.-J.E. and W. Li, *Applied nonlinear control*. Vol. 199. 1991: Prentice hall Englewood Cliffs, NJ.
18. Siciliano, B., et al., *Robotics: modelling, planning and control*. 2010: Springer Science & Business Media.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายเจตนิพิฐ อรุณรัตน์
วัน เดือน ปี เกิด	21 มกราคม 2539
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตร์เครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	888/42 หมู่บ้านสิทธารมย์ ซอยลาซาล ถนนลาซาล แขวงบางนา เขตบางนา กรุงเทพมหานคร 10260



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY