



การสร้างแบบจำลองและควบคุมตัวขับเคลื่อนโลหะผสมจำรูปสำหรับการเสนอผล  
แบบสัมผัสหลายระยะ

**System Modeling and Control of the Shape Memory Alloy Actuator for  
Multi-Step Displacement Tactile Display**

วิทยา เป้นไทย

**Witthaya Paenthai**

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of  
Master of Engineering in Electrical Engineering  
Prince of Songkla University**

**2558**

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ดร. วรฤทธิ์ วิชกุล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นายวิทยา เป็นไทย)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ  
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายวิทยา เป็นไทย)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การสร้างแบบจำลองและควบคุมตัวขับเคลื่อนโลหะผสมจำรูปสำหรับการเสนอผลแบบสัมผัสหลายระยะ
ผู้เขียน	นายวิทยา เป็นไทย
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา	2557

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลอง และการควบคุมตำแหน่งของตัวขับเคลื่อนชนิดโลหะผสมจำรูป (SMA actuator) เพื่อนำมาใช้เป็นตัวขับเคลื่อนแห่งแสดงผลในอุปกรณ์แสดงผลแบบสัมผัสจำพวก Haptic device โดยการทำวิจัยจะเริ่มจากการสร้างแบบจำลองการทำงานของ SMA actuator ซึ่งจะประกอบด้วย 3 แบบจำลอง คือแบบจำลองทางความร้อน แบบจำลองของการเปลี่ยนเฟส และแบบจำลองทางกล สำหรับการจำลองการทำงานจะใช้โปรแกรม MATLAB (Simulink) ต่อจากนั้นจะออกแบบระบบควบคุม เพื่อควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของ SMA actuator โดยใช้ PI controller ร่วมกับการจ่ายแรงดันแบบ Pulse Width Modulation (PWM) ที่ความถี่ 100 Hz โดยที่ระบบควบคุมจะทำบนโปรแกรม LabVIEW จากผลการทดลองของการใช้ระบบควบคุมแบบนี้ สามารถควบคุมตำแหน่งของ SMA actuator ได้หลายระยะ เช่น 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm และจากผลการทดลองการควบคุมที่ Setpoint 18 mm จะมีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดของตำแหน่งอยู่ที่ 0.7217 % ใช้เวลาในการเข้าสู่ Setpoint 1.7 วินาที และข้อดีของระบบควบคุมแบบนี้ คือสามารถคงค่าการแสดงผลของแห่งแสดงผลได้โดยไม่ต้องออกแบบทางกลและใช้ SMA สปริงเพียงแค่ชุดเดียวในการสร้างเป็น SMA actuator

**คำสำคัญ :** โลหะผสมจำรูป, การควบคุมตำแหน่งของโลหะผสมจำรูป, ตัวควบคุม PID, ตัวขับเคลื่อนชนิดโลหะผสมจำรูป

<b>Thesis Title</b>	System Modeling and Control of Shape Memory Alloy Actuator for Multi-Step Displacement Tactile Display
<b>Author</b>	Mr. Witthaya Paenthai
<b>Major Program</b>	Electrical Engineering
<b>Academic Year</b>	2014

### **Abstract**

This research studied a mathematical model and a position controlled system of a Shape Memory Alloy (SMA) actuator for using in a Haptic device pin actuation. The research started from building the model of SMA actuator. There were 3 models that were thermal model, phase transformation model and mechanical model. We used MATLAB (simulink) program to perform a model simulation. Next, we designed control system by using a PI controller with the PWM voltage control driving at frequency of 100 Hz. The control system was implemented in LabVIEW program. Experiments showed that PI controller can control the SMA actuator to many positions such as 5 mm, 10 mm, 15 mm and 20 mm. For the setpoint 18 mm, our system achieved the error mean of position 0.7217 % and total time needed reach the setpoint was 1.7 seconds. The advantage of using PI controller was an ability to latch a pin display without mechanical design. Furthermore, the system used only one spring for SMA actuator.

**Keywords** : Shape Memory Alloy, Position control of SMA actuator, PID controller, SMA actuator

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสำเร็จไม่ได้เลย หากปราศจากความช่วยเหลือและการสนับสนุนที่ดีจากท่านเหล่านี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณ

ขอขอบพระคุณ ดร. วุทธิ วิชกุล ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาอุทิศเวลาให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางในการทำวิจัยที่ดี จัดหาอุปกรณ์ เครื่องมือที่จำเป็นต่องใช้ในการทำวิจัย ติดตามความก้าวหน้าของงานวิจัย ช่วยเหลือแก้ไขปัญหาและอุปสรรคต่างๆในการทำวิจัย ตลอดจนตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. พงุทธิกร สมิตไมตรี ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา และคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัย รวมถึงการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ฉัญญา จินดาเพ็ชร ประธานหลักสูตรฯ และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาช่วยเหลือ ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์และวิจารณ์ผลงานวิจัย รวมถึงการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรัสวดี กุลบุญ ก่อเกิด ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอก ที่ได้กรุณาอุทิศเวลา และเดินทางด้วยตนเองเป็นระยะทางไกลเพื่อมาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ โดยได้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ทางด้านระบบควบคุมและวิจารณ์ผลงานวิจัย รวมถึงการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนในการทำวิจัยและให้ความช่วยเหลือด้านการประสานงานต่างๆ

ขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาและให้ความช่วยเหลือด้านการประสานงานต่างๆ

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ บุคลากร และนักศึกษาปริญญาโท-เอก ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกคน รวมถึงเพื่อน พี่ น้อง ในภาควิชา ที่ให้ความช่วยเหลือและกำลังใจในการทำ

วิจัยมาโดยตลอด และนายเกียรติศักดิ์ เส็งช่วย ที่ช่วยแก้ไขปัญหา แนะนำการใช้งานโปรแกรมต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัย ทั้งยังให้คำปรึกษาที่ดีตลอดมาจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าน้อมรำลึกถึงพระคุณของบิดามารดาและครอบครัว ที่ส่งเสริมสนับสนุน ให้กำลังใจ และทุนทรัพย์แก่ข้าพเจ้าตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา ในการศึกษาและทำงานวิจัยชิ้นนี้ ข้าพเจ้าได้รับประโยชน์ และได้เรียนรู้ประสบการณ์ต่างๆมากมาย ทำให้รู้จักการแก้ไขปัญหา สามารถพัฒนาความรู้ความสามารถของตนเอง ซึ่งข้าพเจ้าจะพยายามพัฒนาตนเองต่อไป และนำสิ่งต่างๆเหล่านี้ไปใช้ให้เกิดประโยชน์แก่ทั้งตนเองและผู้อื่นต่อไป

วิทยา เป็นไทย



## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(9)
รายการตาราง	(12)
รายการภาพประกอบ	(13)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย	1
1.2 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	8
1.4 ขอบเขตการวิจัย	8
1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย	9
1.6 แผนการดำเนินการวิจัย	11
1.7 คุณค่าของงานวิจัย	12
2. ทฤษฎีและหลักการ	13
2.1 โลหะผสมจำรูป (SMA)	13
2.2 แบบจำลองของ SMA actuator	15
2.2.1 แบบจำลองทางความร้อน	16
2.2.2 แบบจำลองของการเปลี่ยนเฟส	19
2.2.3 แบบจำลองทางกล	20
2.3 การควบคุม SMA actuator	22
2.3.1 การควบคุมแบบป้อนกลับ	22
2.3.1.1 การป้อนกลับตัวแปรภายนอก	23
2.3.1.2 การป้อนกลับตัวแปรภายใน	24
2.3.1.3 การป้อนกลับค่าความต้านทาน	24
2.3.1.4 การป้อนกลับโดยใช้ตัวแปรภายนอกและตัวแปรภายใน	26
2.3.2 การออกแบบ PWM modulator	26
2.3.3 การออกแบบ PID controller	28

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.3.1 ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional controller)	28
2.3.3.2 ควบคุมแบบปริพันธ์ (Integral controller)	29
2.3.3.3 ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative controller)	30
3. แนวทางในการออกแบบ	32
3.1 การออกแบบระบบ SMA actuator	32
3.1.1 แนวทางในการออกแบบและการทดสอบ SMA actuator	33
3.1.2 การออกแบบทางกล	36
3.1.2 การออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์	40
3.2 การสร้างแบบจำลอง	41
3.2.1 แบบจำลองทางความร้อน	43
3.2.2 แบบจำลองของการเปลี่ยนเฟส	45
3.2.3 แบบจำลองทางกล	46
3.2.4 การรวม 3 แบบจำลองและการควบคุม SMA actuator	47
3.2.4.1 การรวม 3 แบบจำลอง	47
3.2.4.2 การควบคุม SMA actuator	48
4. ผลการทดลอง	50
4.1 การระบายความร้อนของ SMA actuator	50
4.2 การทดลองเบื้องต้น	51
4.3 การควบคุม SMA actuator โดยใช้ PI-controller ร่วมกับ PWM	53
4.3.1 การควบคุม SMA actuator ระยะเวลาเดียว	53
4.3.2 การควบคุม SMA actuator หลายระยะ (Multi-step)	56
5. บทสรุปและข้อเสนอแนะ	60
5.1 ผลการสรุปของงานวิจัย	60
5.2 ปัญหา	61
5.3 ข้อเสนอแนะ	62
บรรณานุกรม	63
ภาคผนวก ก	65

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ข	67
ภาคผนวก ค	70
ภาคผนวก ง	73
ประวัติผู้เขียน	78

## รายการตาราง

ตาราง	หน้า
1-1 แผนการดำเนินการวิจัย	11
3-1 คุณสมบัติทางกายภาพ ทางความร้อน และทางกลของวัสดุ SMA ที่ใช้เป็น Actuator	43
3-2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบควบคุม SMA actuator แบบต่างๆ	49
4-1 ผลตอบสนองของตำแหน่งที่ Duty cycle ต่างๆ	52
4-2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบควบคุม SMA actuator แบบต่างๆ	56
4-3 เปรียบเทียบงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่นำเสนอ	58

## รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1-1 อัตราส่วนกำลัง / น้ำหนักเมื่อเทียบกับน้ำหนักของ Actuator ชนิดต่าง ๆ	1
1-2 การเปรียบเทียบระหว่าง Martensitic fraction กับอุณหภูมิ	2
1-3 รูปแบบในการแสดงข้อมูลของอุปกรณ์แสดงผลแบบสัมผัส ( Tactile display)	3
1-4 หลักการของ SMA tactile actuator (Taxel)	3
1-5 ผลของการแสดงรูปร่างในแบบ 2D tactile	4
1-6 โครงสร้างของ Dynamic braille display	4
1-7 บล็อกไดอะแกรมการรวมแบบจำลองของ SMA เข้ากับการควบคุมโดยใช้ PD controller	5
1-8 แบบจำลองของ Bias-type SMA actuator และระบบควบคุม	6
1-9 แผนผังของตัวควบคุมแบบ Self-tuning fuzzy PID ที่ใช้สำหรับควบคุม SMA actuator	6
1-10 ส่วนประกอบหลักของอุปกรณ์ในการทดลอง	7
1-11 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ	7
1-12 เทคนิคการควบคุมสำหรับ SMA actuator	8
1-13 ขั้นตอนการวิจัย	10
2-1 กลไกของ One-way shape memory และ Two-way shape memory	13
2-2 การจัดเรียงผลึกของวัสดุระหว่างปรากฏการณ์จำรูป	14
2-3 ความสัมพันธ์ของ Phase transformation เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป	14
2-4 บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองของ SMA actuator	15
2-5 แผนภาพแบบจำลองทางความร้อนของ SMA actuator	16
2-6 (ก) และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของ SMA	18
2-7 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเมื่อเทียบกับเวลา	19
2-8 (ก) แบบจำลองระบบทางกลของ SMA actuator และ (ข) บล็อกไดอะแกรม Transfer function ของ SMA actuator	21
2-9 บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองพื้นฐานของ SMA actuator	23
2-10 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานและอุณหภูมิของ SMA	25
2-11 ระบบควบคุมแบบ Electric resistance feedback	25
2-12 โครงสร้างของกล้อง Endoscope โดยการควบคุมแบบ Electric resistance feedback	25

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
2-13 การควบคุมโดยการรวมกันของ Electric resistance และ Position feedback	26
2-14 บล็อกไดอะแกรมการสร้างสัญญาณ PWM	26
2-15 การสร้างสัญญาณ PWM	27
2-16 บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบสัดส่วน	29
2-17 ลักษณะของการประมวลผลสัญญาณของตัวควบคุมแบบสัดส่วน	29
2-18 บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบปริพันธ์	29
2-19 ลักษณะของการประมวลผลสัญญาณของตัวควบคุมแบบปริพันธ์	29
2-20 บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมอนุพันธ์	30
2-21 ลักษณะของการประมวลผลสัญญาณของตัวควบคุมอนุพันธ์	30
2-22 แผนผังตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบปริพันธ์และแบบอนุพันธ์ (PID controller)	31
3-1 บล็อกไดอะแกรมภาพรวมทั้งหมดของระบบ SMA actuator	32
3-2 แนวคิดการออกแบบ SMA actuator	33
3-3 การทดสอบ SMA actuator เบื้องต้น	34
3-4 ผลการตอบสนองของระยะการเคลื่อนที่เมื่อเวลาเปลี่ยนไป	35
3-5 ผลตอบสนองของอุณหภูมิเมื่อเวลาเปลี่ยนไป	35
3-6 ส่วนประกอบโครงสร้างของ SMA actuator ในงานวิจัย	36
3-7 การออกแบบอุปกรณ์แสดงผลแบบสัมผัสจากมุมมองด้านข้าง	37
3-8 การออกแบบอุปกรณ์แสดงผลแบบสัมผัสจากมุมมองด้านบน	38
3-9 อุปกรณ์แสดงผลแบบสัมผัสโดยใช้ SMA Actuator เป็นตัวขับเคลื่อนแท่งแสดงผล	39
3-10 ระบบการแสดงผลแบบสัมผัสโดยใช้ SMA actuator เป็นตัวขับเคลื่อนแท่งแสดงผล	40
3-11 วงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับจ่ายไฟให้กับ SMA actuator	40
3-12 แบบจำลองต่างๆของ SMA actuator	41
3-13 ผลตอบสนองของแบบจำลองทางความร้อน	44
3-14 ผลตอบสนองของแบบจำลองของการเปลี่ยนเฟส	45
3-15 ผลตอบสนองของแบบจำลองทางกล	47
3-16 บล็อกไดอะแกรมแสดงการจำลองการทำงานของ SMA actuator	47

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

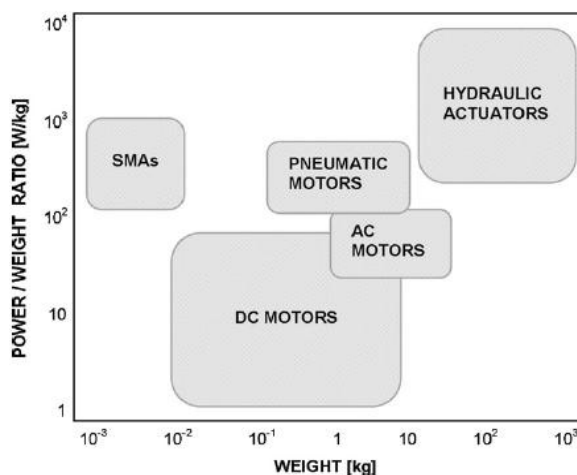
ภาพประกอบ	หน้า
3-17 ผลตอบสนองจากการรวม 3 แบบจำลองของ SMA actuator	48
3-18 การควบคุม SMA actuator โดยใช้ PI controller	48
3-19 ผลตอบสนองจากการจำลองของ SMA actuator ที่ใช้ตัวควบคุมแบบต่างๆ	49
4-1 ผลการทดลองของ SMA actuator ที่ใช้กับไม่ใช้การระบายความร้อน	50
4-2 อุปกรณ์แสดงผลแบบสัมผัสที่ติดตั้งการระบายความร้อน	51
4-3 ผลตอบสนองของ SMA actuator ทดลองแบบ Open-loop ที่ Duty cycle ต่างๆ	52
4-4 ผลตอบสนองของ SMA actuator โดยการทดลองแบบ Open-loop	53
4-5 ผลตอบสนองของ SMA actuator โดยใช้ P-control	54
4-6 ผลตอบสนองของ SMA actuator โดยใช้ PI-control	54
4-7 เปรียบเทียบผลตอบสนองของ SMA actuator ที่ใช้การควบคุมแบบต่างๆ	55
4-8 ผลตอบสนองของการควบคุมหลายระยะ (Multi-step)	57

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ๆ เกี่ยวกับ Actuator ชนิดต่างๆ ให้มีขนาดเล็กลง สำหรับนำมาใช้เป็นตัวขับเคลื่อนแท่งแสดงผลในอุปกรณ์แสดงผลแบบสัมผัส จำพวก Haptic device ซึ่งจะทำให้อุปกรณ์มีความละเอียดในการแสดงผลสูงขึ้น มีขนาดเล็กลง น้ำหนักเบา และสะดวกในการใช้งาน ชนิดของ Actuator ที่นิยมนำมาใช้ในอุปกรณ์จำพวกนี้ เช่น Piezoelectric, Polymer gels, Electrorheological fluids, DC/AC motor, Shape Memory Alloys (SMA) และ Hydraulic หนึ่งในแนวโน้มที่ถูกพัฒนามากที่สุดคือ SMA เนื่องจากมีขนาดเล็กและให้กำลังสูง โดยกำลังต่อน้ำหนักสูงสุดของ SMA อยู่ที่ 100 W/kg [1,2] ซึ่งสามารถดูจากภาพประกอบ 1-1 ที่ได้แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ Actuator ชนิดต่างๆ ไว้

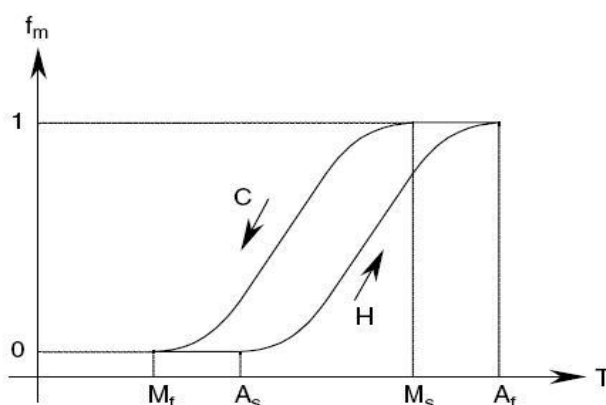


ภาพประกอบ 1-1 อัตราส่วนกำลัง / น้ำหนักเมื่อเทียบกับน้ำหนักของ Actuator ชนิดต่าง ๆ [1,2]

SMA หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า วัสดุจำรูป (Memory metal) เป็นโลหะผสมชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถจดจำรูปร่างของตัวเองได้ เมื่อ SMA ถูกบิดหรือดัดให้รูปร่างแตกต่างไปจากเดิม มันสามารถกลับมาสู่รูปร่างเดิมได้ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น SMA เป็นวัสดุที่สามารถคลายความเครียดภายในตัวเองได้ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น SMA ประกอบด้วยกัน 2 เฟส คือเฟสที่อุณหภูมิสูง จะเรียกว่า



ออสเทนไนต์เฟส (Austenite phase) และเฟสที่อุณหภูมิต่ำจะเรียกว่ามาเทนไซต์เฟส (Martensite phase) โดยสามารถดูได้จากภาพประกอบที่ 1-2 ในส่วนของมาเทนไซต์เฟสจะประกอบด้วย 2 รูปแบบ คือ Twinned และ Detwinned การเปลี่ยนเฟสในแต่ละครั้งของ SMA จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ (ร้อน-เย็น) ที่ SMA ได้รับ ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนเฟสคือ Pseudoelasticity และ Shape memory effect [3]



ภาพประกอบ 1-2 การเปรียบเทียบระหว่าง Martensitic fraction กับ อุณหภูมิ [3]

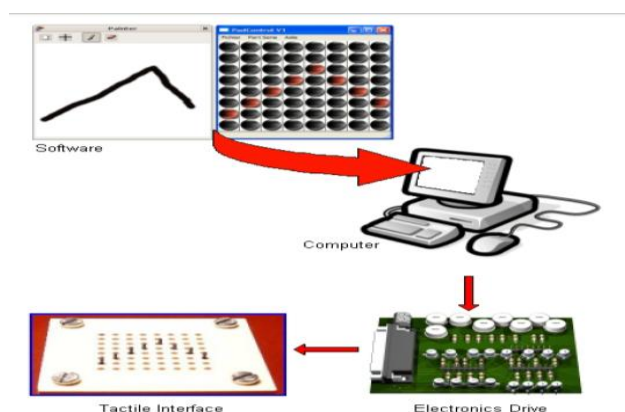
ในส่วนของการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของ SMA actuator จะพิจารณาการควบคุมแรงดัน ซึ่งคุณสมบัติของ SMA จะนำไฟฟ้าและมีค่าความต้านทานในตัว เมื่อจ่ายกระแสให้ไหลผ่านขดลวด SMA จะทำให้เกิดความร้อน โดยตัวความร้อนนี้จะทำให้ SMA มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างกลับไปอยู่ในรูปร่างเดิมก่อนที่จะถูกทำให้เปลี่ยนรูป ดังนั้นการที่จะนำ SMA actuator มาใช้เป็นตัวขับเคลื่อนแท่งแสดงผล จึงอาศัยคุณสมบัติดังที่กล่าวมา ด้วยเหตุผลข้างต้นในงานวิจัยนี้จะออกแบบและสร้าง Actuator โดยใช้ SMA ที่มีกลไกการจำรูปแบบทิศทางเดียว (One-way shape memory) [4] ทั้งนี้จะใช้ SMA สปริงแค่ขดเดียวในการสร้างเป็น Actuator และควบคุมการจ่ายแรงดันให้กับ SMA actuator แบบ Pulse Width Modulation (PWM) โดยจะใช้ร่วมกับตัว PI controller

## 1.2 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

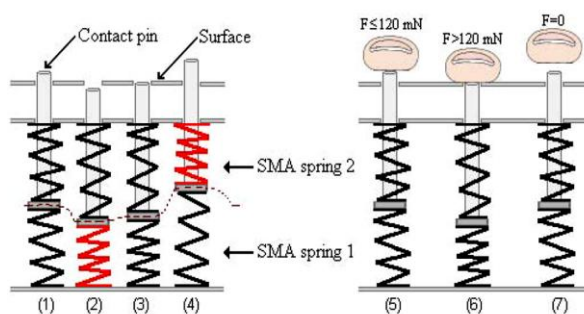
ในปัจจุบันได้มีงานวิจัยที่พัฒนาเกี่ยวกับ SMA actuator สำหรับนำไปใช้เป็นตัวขับเคลื่อนแท่งแสดงผล (Pin) ในอุปกรณ์แสดงผลแบบสัมผัส (Tactile display) การนำอุปกรณ์

แสดงผลแบบสัมผัสไปใช้งาน เช่นเป็นอุปกรณ์ช่วยเหลือสำหรับผู้พิการทางสายตา (Haptic device) ผู้ใช้สามารถใช้มือเพื่อสัมผัสแท่งแสดงผลบนตัวอุปกรณ์ ในการรับรู้ข้อมูลที่แสดงอยู่ จากการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ โดยข้อมูลที่แสดงบนอุปกรณ์แสดงผลจะเหมือนกับข้อมูลที่แสดงบนจอคอมพิวเตอร์ ดังงานวิจัยในภาพประกอบที่ 1-3

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งในการนำ SMA มาสร้างเป็น Actuator ในอุปกรณ์แสดงผลแบบสัมผัส R. Velazquez และคณะ [5] ได้นำเสนอเกี่ยวกับอุปกรณ์ขับเคลื่อนขนาดเล็ก (Miniature SMA actuator) ซึ่งได้มีการออกแบบและพัฒนาให้มีความละเอียดในการแสดงผลสูง และน้ำหนักเบา สำหรับการแสดงข้อมูลแบบ Binary เช่นพวกอักษรเบรลล์ จุดเด่นของงานวิจัยนี้คือความไม่ซับซ้อนของกลไกในการออกแบบ ทำให้อุปกรณ์มีราคาถูก การทำงานของ Actuator จะใช้สปริง SMA ที่มีคุณสมบัติเหมือนกัน 2 ตัว ทำหน้าที่ในการทำงานเป็น Actuator ดังภาพประกอบที่ 1-4

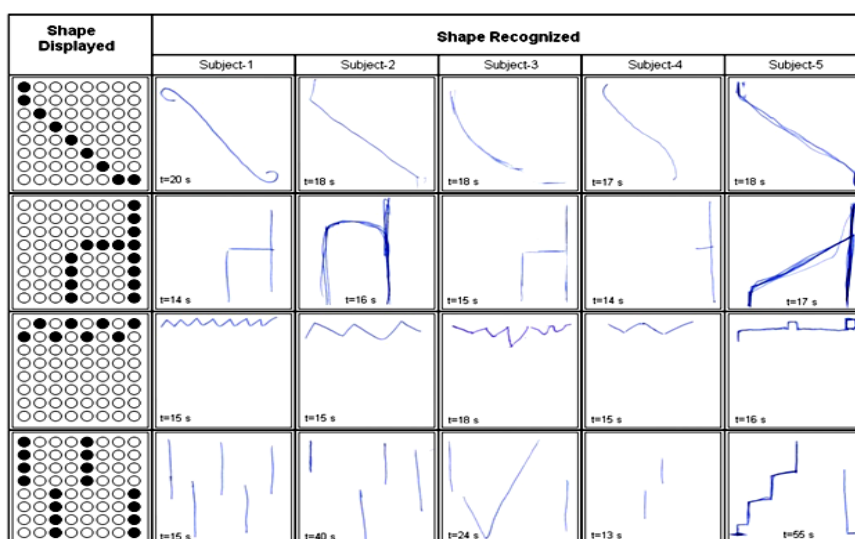


ภาพประกอบ 1-3 รูปแบบในการแสดงข้อมูลของอุปกรณ์แสดงผลแบบสัมผัส (Tactile display) [5]

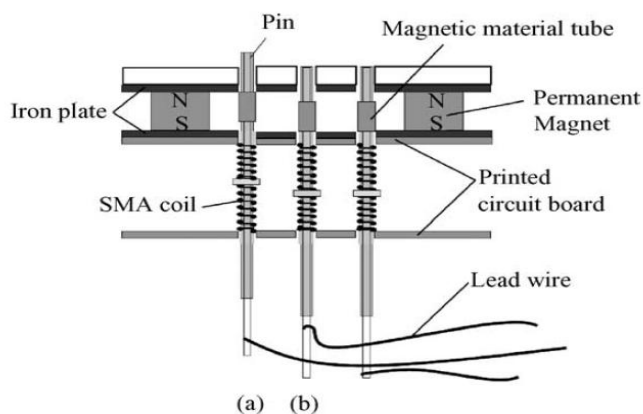


ภาพประกอบ 1-4 หลักการของ SMA tactile actuator (Taxel) [5]

ต่อมา R. Velazquez และคณะ [6] ได้พัฒนาอุปกรณ์แสดงผลแบบสัมผัส สำหรับช่วยเหลือคนตาบอด ซึ่งมี Array ในการแสดงผล 8x8 อุปกรณ์นี้จะมีน้ำหนักเบาขนาดกะทัดรัด มีความละเอียดในการแสดงผลสูง ราคาถูกและสามารถใช้งานแบบพกพาได้ โดยผลการทดลองการแสดงผลข้อมูลรูปร่างต่างๆ เพื่อประเมินประสิทธิภาพในการส่งผ่านข้อมูล สามารถดูได้จากภาพประกอบ 1-5 งานวิจัยถัดมา Y. Haga และคณะ [7] ได้สร้างอุปกรณ์แสดงผลอักษรเบรลล์ โดยมีการนำเอา Magnetic latch มาใช้เพื่อช่วยลดการฟุ้งเกินของตำแหน่งในส่วนของการควบคุม SMA actuator โดยจุดตำแหน่งของตัวอักษรเบรลล์สร้างโดยใช้ SMA coil actuator เป็นตัวขับเคลื่อนแท่งแสดงผลให้เคลื่อนที่ขึ้นและลง ซึ่งโครงสร้างของอุปกรณ์สามารถแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 1-6

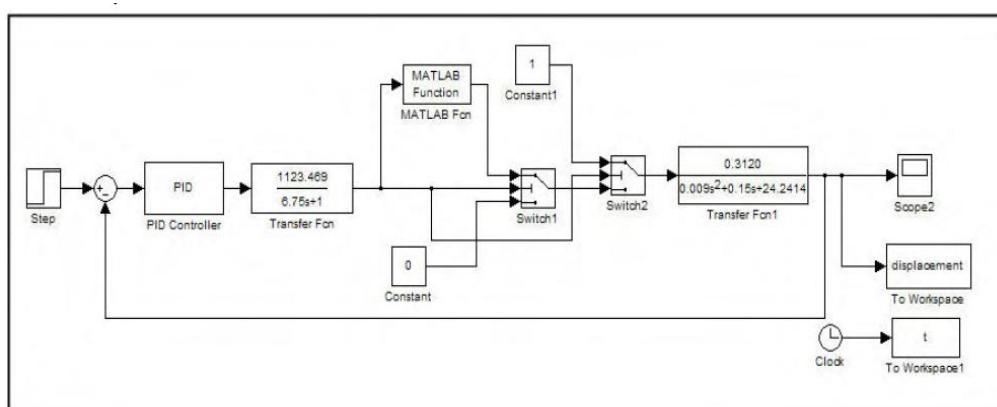


ภาพประกอบ 1-5 ผลของการแสดงรูปร่างในแบบ 2D tactile [6]



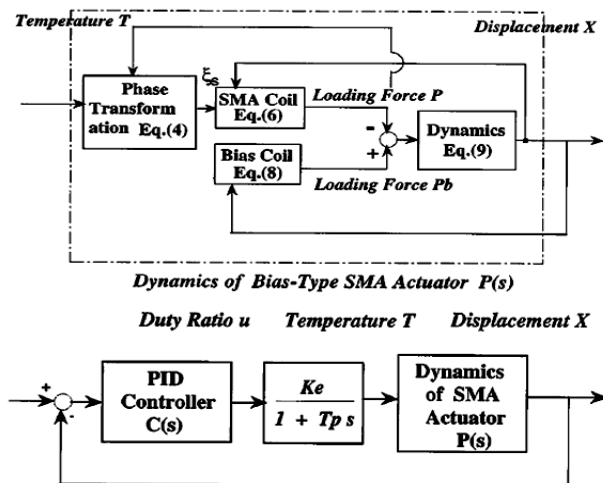
ภาพประกอบ 1-6 โครงสร้างของ Dynamic braille display [7]

ในส่วนจากรูปแบบการควบคุม ธีรบุษ จันทโสภีพันธ์ และ ถวิดา มณีวรรณ [3] ได้ออกแบบและสร้าง Micro-actuator เพื่อการแสดงผลแบบ 3 มิติ ซึ่งประกอบไปด้วยแท่งแสดงผลทั้งหมด 64 (8x8) แท่ง ควบคุมการเคลื่อนที่ของแท่งแสดงผล โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับ สปริง SMA มีกลไกแม่เหล็กสร้างแรงยึดแท่งให้อยู่กับที่เมื่อได้ตำแหน่งที่ต้องการ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้ระบบแม่เหล็ก ร่วมกับระบบควบคุมแบบ PD ทำให้ผลตอบสนองดีขึ้น ในการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ 25 มิลลิเมตร ใช้เวลาตอบสนอง 0.4 วินาที บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองของ SMA actuator ที่ใช้ร่วมกับ PID-controller แสดงดังภาพประกอบที่ 1-7

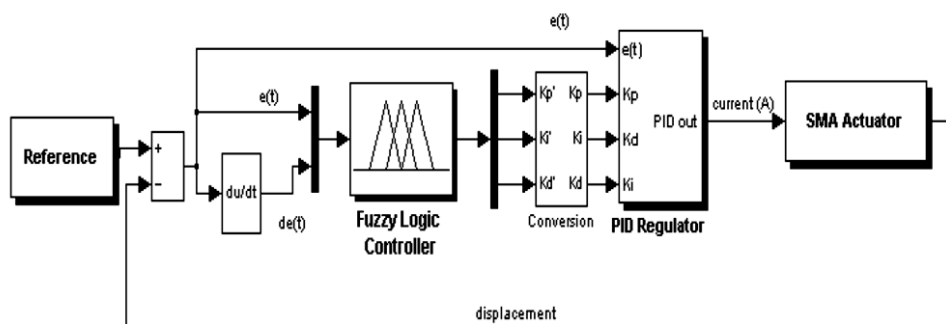


ภาพประกอบ 1-7 บล็อกไดอะแกรมการรวมแบบจำลองของ SMA เข้ากับการควบคุมโดยใช้ PD controller [3]

งานวิจัยต่อมา S. Majima และคณะ [8] ได้สร้างแบบจำลองของ SMA actuator และออกแบบระบบควบคุมแบบติดตาม (Tracking control) งานวิจัยนี้ได้กล่าวไว้ว่า เนื่องจากพฤติกรรมของกลไกทางความร้อนของ SMA มีความซับซ้อน จึงทำให้ยากที่จะทราบผลตอบสนองที่ถูกต้อง จึงเป็นข้อจำกัดของความแม่นยำของ Tracking control ในงานวิจัยนี้จึงเสนอรูปแบบการควบคุมที่มีการชดเชยค่า Hysteresis เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการควบคุม โดยการใช้ PID feedback และ Feedforward loop ตามภาพประกอบที่ 1-8 งานวิจัยถัดมา Nguyen Bao Kha และ Kyoung Kwan Ahn [9] ได้นำเสนอการควบคุมตำแหน่งของ SMA wire actuator โดยใช้ตัวควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive control) ร่วมกับ Fuzzy logic และ PID Controller บล็อกไดอะแกรมของระบบสามารถดูได้จากภาพประกอบที่ 1-9 ระบบควบคุมแบบนี้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุม ของระบบที่เป็น Nonlinear โดยจะชดเชยค่า Hysteresis ของระบบนั้นได้

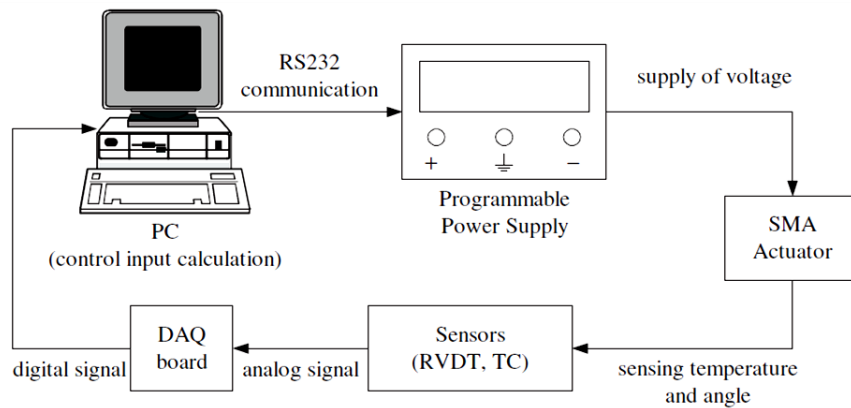


ภาพประกอบ 1-8 แบบจำลองของ Bias-type SMA actuator และระบบควบคุม [8]



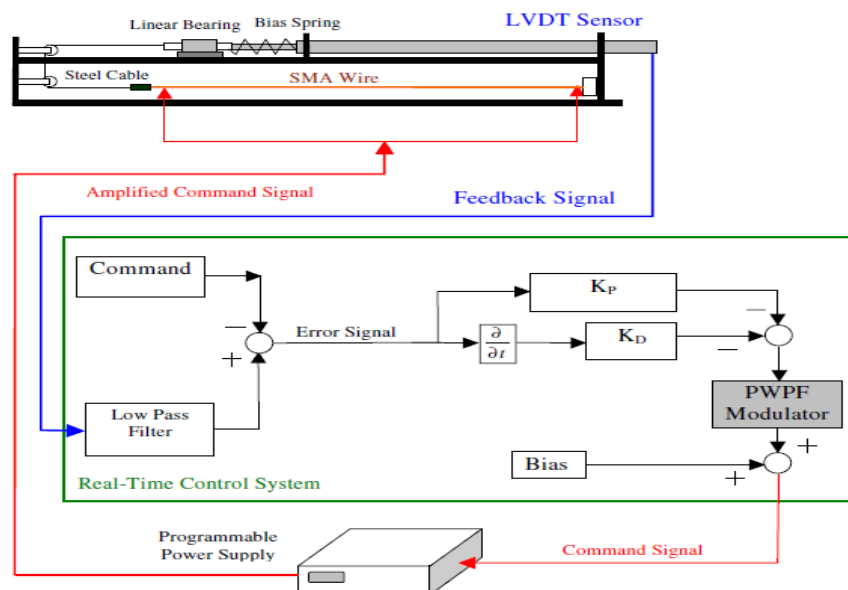
ภาพประกอบ 1-9 แผนผังของตัวควบคุมแบบ Self-tuning fuzzy PID  
ที่ใช้สำหรับควบคุม SMA actuator [9]

ต่อมา Lee และ Lee [10] ได้นำ Time delay controller (TDC) มาใช้ในการควบคุม SMA actuator ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้ TDC ทำให้ลดค่าความผิดพลาดของตำแหน่งและ ค่าพุงเกิน ได้ดีกว่า PID controller โครงสร้างและส่วนประกอบของการควบคุม สามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ ที่ 1-10 ต่อจากนั้น N. Ma และ G. Song [11] ได้เสนอการควบคุม SMA wire actuator โดยการ ออกแบบ Pulse With Modulation (PWM) ร่วมกับ PD controller บล็อกไดอะแกรมของระบบ สามารถแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 1-11 จากผลการทดลองการใช้ระบบควบคุมแบบนี้ ทำให้เพิ่ม ประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานขึ้น 30% และยังรักษาความแม่นยำของตำแหน่งการเคลื่อนที่ ได้อีกด้วย

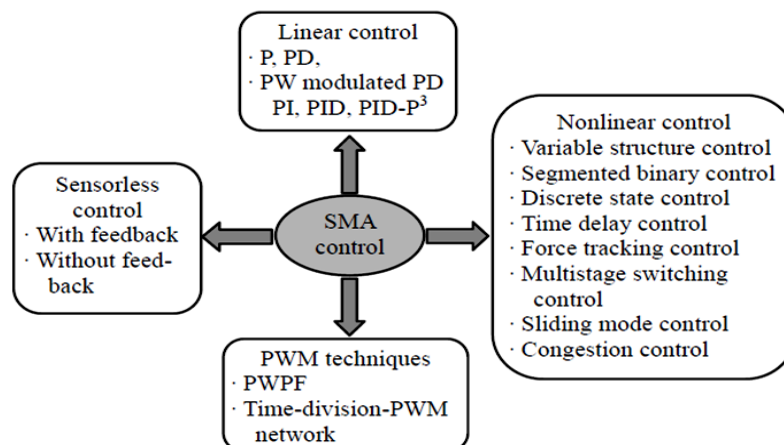


ภาพประกอบ 1-10 ส่วนประกอบหลักของอุปกรณ์ในการทดลอง [10]

ในส่วนของวิธีการควบคุม ที่นิยมใช้ในการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของ SMA actuator มีหลายวิธีด้วยกัน ดังที่กล่าวมาบ้างแล้วในข้างต้น โดยวิธีการควบคุมที่นิยม สามารถสรุปออกมาได้ 4 ประเภทหลักๆ ตามภาพประกอบที่ 1-12 การควบคุม SMA actuator นั้นมีหลากหลายรูปแบบตั้งแต่ใช้แค่ P controller ไปจนถึงการควบคุมความไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความซับซ้อนสูง (Nonlinear control) เช่น Variable structure control และ Neuro-fuzzy control และยังมี การนำแบบจำลองที่เกี่ยวข้องกับ SMA actuator มารวมกับตัวควบคุม เพื่อช่วยเสริมการควบคุมให้ดียิ่งขึ้น เช่น Preisach model, Constitutive model, Phenomenological model และ Heat transfer model



ภาพประกอบ 1-11 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ [11]



ภาพประกอบ 1-12 เทคนิคการควบคุมสำหรับ SMA actuator [12]

### 1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.3.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ และทฤษฎีของ SMA actuator ที่จะนำมาใช้เป็นตัวขับเคลื่อนแท่งแสดงผลแบบสัมผัส (Tactile display)

1.3.2 เพื่อสร้างแบบจำลองการทำงานของ SMA actuator ซึ่งประกอบไปด้วยแบบจำลองทางความร้อน แบบจำลองของการเปลี่ยนเฟส และแบบจำลองทางกล แล้วจำลองการทำงานในโปรแกรม MATLAB (Simulink)

1.3.3 เพื่อออกแบบและสร้างอุปกรณ์แสดงผลแบบสัมผัสต้นแบบ โดยใช้ SMA actuator เป็นตัวขับเคลื่อนแท่งแสดงผล

1.3.4 เพื่อออกแบบระบบการควบคุมการเคลื่อนที่ของ SMA actuator แบบหลายระยะ (Multi-step)

### 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ศึกษาคุณสมบัติของโลหะผสมจำรูป (SMA) แบบ One-way shape memory และสร้างแบบจำลองการทำงานของ SMA actuator โดยใช้โปรแกรม MATLAB (Simulink)

1.4.2 ศึกษาและออกแบบ SMA actuator และวงจรจ่ายแรงดันให้ SMA

1.4.3 ศึกษาตัวควบคุมที่จะนำมาใช้กับ SMA actuator โดยเริ่มจากจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม MATLAB (Simulink)

1.4.4 สร้าง SMA actuator 1 ตัว ออกแบบและสร้างระบบควบคุมในโปรแกรม LabVIEW

1.4.5 นำระบบควบคุมจากข้อ 1.4.3 มาใช้งานกับ SMA actuator และเปรียบเทียบผลการทดลองจากระบบควบคุมแบบต่างๆ

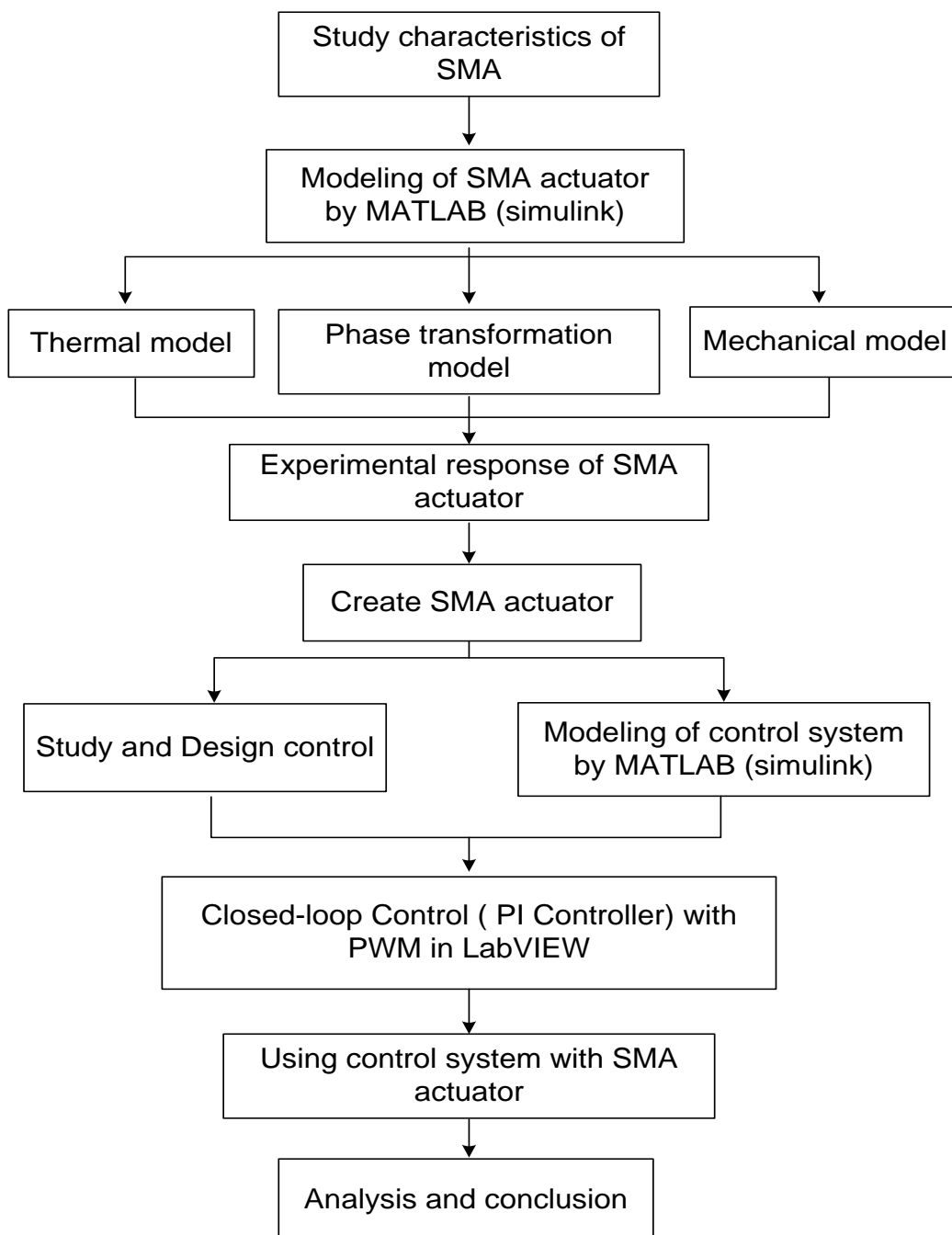
1.4.6 จากผลการเปรียบเทียบระบบควบคุมในข้อ 1.4.5 สามารถนำมาใช้จริงกับ SMA actuator ให้แสดงผลได้หลายระยะ (Multi-step display)

## 1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

เริ่มต้นในการทำงานวิจัยเรื่องนี้ คือต้องศึกษาคุณสมบัติของ SMA ที่นำมาสร้างเป็นสปริง SMA สำหรับใช้เป็นส่วนประกอบหลักของ SMA actuator เมื่อรู้พฤติกรรมของ SMA แล้ว ต่อไปก็จะศึกษาและสร้างแบบจำลองการทำงานของ SMA actuator ซึ่งมีสามแบบจำลองด้วยกัน คือ แบบจำลองทางความร้อน แบบจำลองของการเปลี่ยนเฟส และแบบจำลองทางกล โดยจะใช้โปรแกรม MATLAB (Simulink) เพื่อจำลองการทำงานของ SMA actuator จากนั้นจึงออกแบบและสร้างอุปกรณ์ SMA actuator ขึ้นจริง สำหรับการทดสอบเบื้องต้นเพื่อดูการทำงานจริงของ SMA actuator ว่าเป็นไปตามแบบจำลองหรือไม่ ซึ่งสิ่งที่ต้องคำนึงถึงเป็นลำดับแรกคือ ในการทำให้ SMA actuator เคลื่อนที่ได้ นั้น จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของ SMA โดยในงานวิจัยจะใช้วิธีควบคุมอุณหภูมิด้วยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าไปยัง SMA เมื่อทดสอบจนแน่ใจแล้วว่า SMA actuator ที่สร้างขึ้น สามารถนำมาใช้งานได้จริงตามแบบจำลองการทำงาน ต่อจากนั้นก็เริ่มทำการศึกษาระบบควบคุมที่จะนำมาใช้กับ SMA actuator ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการจ่ายแรงดันแบบ Pulse Width Modulation (PWM) ร่วมกับ PI controller โดยการป้อนกลับค่าตำแหน่งจาก Sensor วัดระยะ เพื่อใช้ในการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของ SMA actuator เมื่อได้ระบบควบคุมที่เหมาะสมกับ SMA actuator จากนั้นนำระบบควบคุมไปใช้ทดสอบจริงกับ SMA actuator ที่สร้างขึ้น โดยเริ่มจากการทดสอบแบบ Open-loop เพื่อกำหนดค่าตัวแปรต่างๆของ PWM ให้เหมาะสมกับระบบควบคุม เมื่อกำหนดค่าตัวแปรของ PWM ได้แล้ว จากนั้นก็ทดสอบ โดยใช้ PWM ร่วมกับ P controller และ PI controller เมื่อได้ผลการทดลองจากระบบควบคุมแบบต่างๆ นำมาเปรียบเทียบ



ข้อดี ข้อเสียของระบบควบคุมแต่ละแบบ จากนั้นก็สรุปผลการทดลอง ในส่วนของระบบควบคุมจะ  
ทำบนโปรแกรม LabVIEW โดยขั้นตอนการวิจัยสามารถดูตามภาพประกอบ 1-13



ภาพประกอบ 1-13 ขั้นตอนการวิจัย



## 1.7 คุณค่าของงานวิจัย

1.7.1 สามารถศึกษาถึงคุณสมบัติ และแบบจำลองการทำงานต่างๆของ SMA ที่นำมาใช้งาน

1.7.2 สามารถออกแบบ และสร้างอุปกรณ์แสดงผลแบบสัมผัสต้นแบบ (Prototype tactile display) ที่ใช้ SMA actuator เป็นตัวขับเคลื่อนแท่งแสดงผล ให้สามารถใช้งานแสดงผลแบบหลายระยะ (Multi-step display) ได้

1.7.3 สามารถศึกษาทฤษฎีของระบบควบคุม ที่ใช้ในการควบคุมตำแหน่งของ SMA actuator แบบหลายระยะ และใช้งานโดยไม่ทำให้ SMA เกิด Overheating

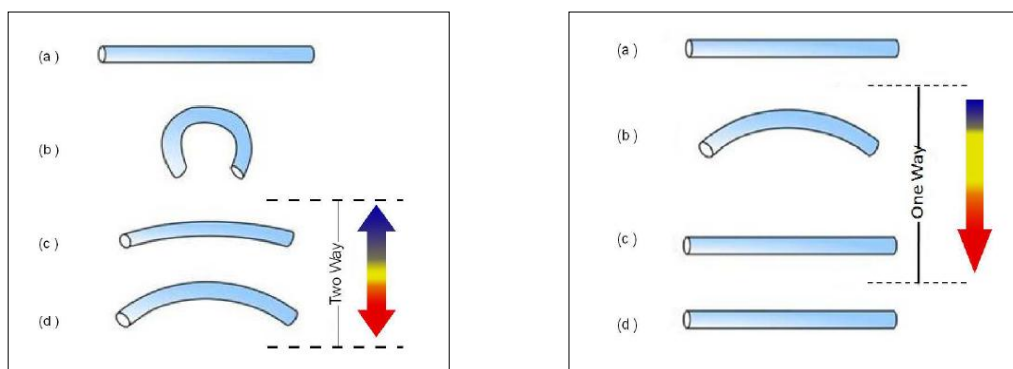
1.7.4 พัฒนาเทคโนโลยีทางด้าน Tactile display สำหรับนำไปใช้ในอุปกรณ์จำพวก Haptic device ให้สามารถแสดงผลได้ดียิ่งขึ้น

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 โลหะผสมจำรูป (SMA)

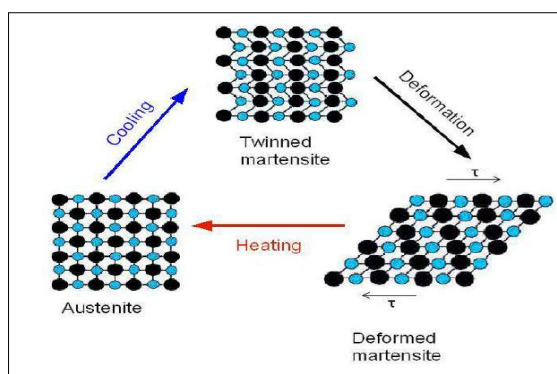
โลหะผสมจำรูป (SMA) คือวัสดุที่สามารถเปลี่ยนรูปร่างและขนาด ไปยังรูปร่างและขนาดเดิมเมื่ออุณหภูมิที่ให้แก่วัสดุเปลี่ยนไป โดยทั่วไป SMA จะเกิดการเปลี่ยนรูปที่อุณหภูมิค่อนข้างต่ำ เมื่ออุณหภูมิที่สูงขึ้น SMA จะเปลี่ยนรูปร่างตัวเองไปยังรูปร่างเดิมก่อนที่จะมีการเปลี่ยนรูป [4] ทั้งนี้ SMA จะมีรูปแบบการเปลี่ยนรูป 2 รูปแบบ คือ SMA ที่เปลี่ยนรูปทิศทางเดียว (One-way shape memory) โดยจะเปลี่ยนรูปร่างไปยังรูปร่างเดิมเมื่อถูกทำให้เปลี่ยนรูป ขณะที่อุณหภูมิสูงขึ้น และ SMA ที่เปลี่ยนรูปร่างได้ 2 ทิศทาง (Two-way shape memory) ซึ่งจะเปลี่ยนรูปร่างในช่วงที่อุณหภูมิเย็นตัวลง และเปลี่ยนรูปร่างอีกทีเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังภาพประกอบที่ 2-1 SMA ส่วนใหญ่จะเป็นวัสดุที่เป็นโลหะผสมจำพวก Ag–Cd, Au–Cd, Cu–Al–Ni, Cu–Sn, Cu–Zn–X, In–Ti, Ni–Al, Ni–Ti, Fe–Pt, Mn–Cu, และ Fe–Mn–Si โดยที่ Ti–Ni alloy (Nitinal) จะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่เด่นชัดมากกว่าโลหะผสมชนิดอื่น และเหมาะกับการนำมาประยุกต์ใช้งานจริงมากที่สุด ในงานวิจัยนี้จึงใช้ Ti–Ni alloy มาขึ้นรูปเป็น SMA สปริงเพื่อใช้เป็น SMA actuator



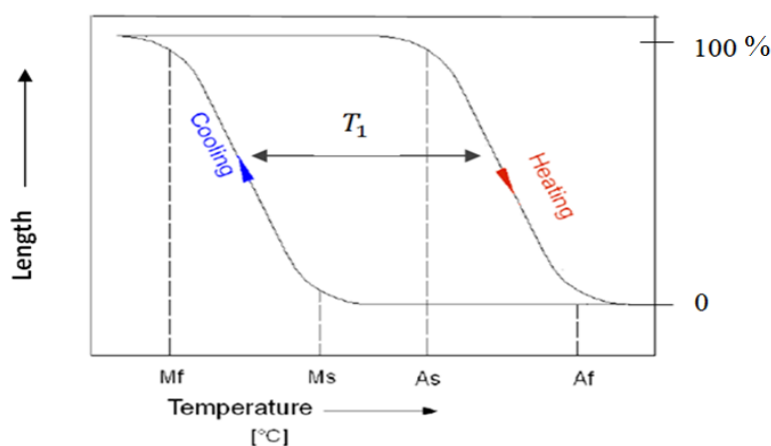
ภาพประกอบ 2-1 กลไกของ One-way shape memory และ Two-way shape memory [4]

สำหรับกลไกการจำรูปแบบ Two-way shape memory เมื่อมองไปถึงโครงสร้างภายในของ SMA ภายใต้การลดอุณหภูมิให้เย็นลง โครงสร้างจะเริ่มเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิ Martensite เริ่มต้น ( $M_s$ ) ไปเป็น Martensite phase จนถึงอุณหภูมิที่ Martensite สิ้นสุด ( $M_f$ ) ซึ่งการ

เปลี่ยนแปลงเฟสเป็น Martensite สิ้นสุดลง โดยมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างภายนอกไปจากเดิม เมื่อมีการให้อุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิที่ Austenite เริ่มต้นขึ้น ( $A_s$ ) SMA เริ่มมีการเปลี่ยนรูปกลับไปรูปเดิม จนถึงอุณหภูมิที่ Austenite สิ้นสุด ( $A_f$ ) โครงสร้างของ SMA จะเปลี่ยนกลับมาอยู่ในรูปเดิม โดยสมบูรณ์ (Parent phase) สามารถดูภาพโครงสร้างอะตอมภายในของ SMA ในประกอบ 2-2 และเฟสของการเปลี่ยนรูปของ SMA ในภาพประกอบ 2-3



ภาพประกอบ 2-2 การจัดเรียงผลึกของวัสดุระหว่างปรากฏการณ์จำรูป [4]



ภาพประกอบ 2-3 ความสัมพันธ์ของ Phase transformation เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป [3]

ภาพประกอบที่ 2-3 แสดงถึง Phase transformation กับการเปลี่ยนอุณหภูมิของ SMA โดยช่วงที่เปลี่ยนรูปจะเกิดในช่วงอุณหภูมิที่แคบ แต่จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของการเปลี่ยนรูปจะใช้เวลานานและช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่า รูปที่แสดงดังกล่าวมีลักษณะของ Hysteresis loop โดยการเปลี่ยนรูปในช่วงการให้ความร้อน กับการระบายความร้อนจะไม่ Overlap กัน ซึ่งเป็น

คุณสมบัติเฉพาะในส่วนของกลไกทางความร้อนของ SMA ระหว่างการเปลี่ยนแปลงเฟสจาก Austenite phase ไปเป็น Martensite phase ทั้งนี้เพื่ออธิบายถึงพฤติกรรมของ SMA ได้มีการสร้างแบบจำลองขึ้นมากมาย ซึ่งแบบจำลองที่ประสบผลสำเร็จมากที่สุดถูกพัฒนาโดย Brinson และคณะ [13] และถูกใช้เป็นแบบจำลองพื้นฐานของ SMA actuator ทั้งยังได้อธิบายถึงพฤติกรรมและกฎพื้นฐานของ SMA ในลักษณะ One-dimensional สัมพันธ์กับความเค้น ( $\sigma$ ) กับความเครียด ( $\varepsilon$ ) และ อุณหภูมิ ( $T$ ) สัมพันธ์กับ Detwinned martensite fraction ( $\xi_\delta$ ) ในวัสดุ

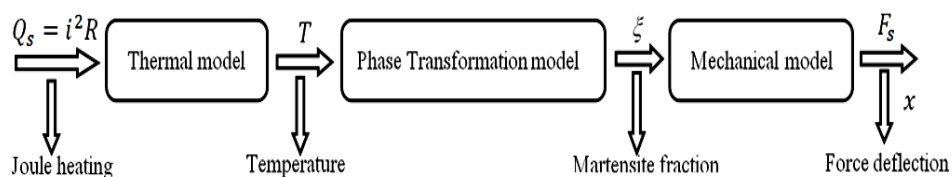
$$\sigma - \sigma_0 = E(\xi)\varepsilon + E(\xi_0)\varepsilon_0 + \Omega(\xi)\xi_0 - \Omega(\xi_0)\xi_{\delta 0} + \Theta(T - T_0) \quad (2-1)$$

โดยที่ค่า Elastic module tensor, Thermoelastic tensor coefficients และ Coefficient tensor แทนเป็น  $E$ ,  $\Theta$  และ  $\Omega$  ตามลำดับ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงปริมาตรในระหว่างการเปลี่ยนเฟส  $\Omega$  จะมีค่าเป็นลบ โดยลักษณะเด่นของแบบจำลองคือความแตกต่างทางโครงสร้าง จะแบ่งแยกกันระหว่าง Twinned martensite ( $\xi_T$ ) และ Detwinned martensite ( $\xi_\delta$ ) ดังนั้นผลรวมของ Martensite fraction ในวัสดุ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\xi = \xi_\delta + \xi_T \quad (2-2)$$

## 2.2 แบบจำลองของ SMA actuator

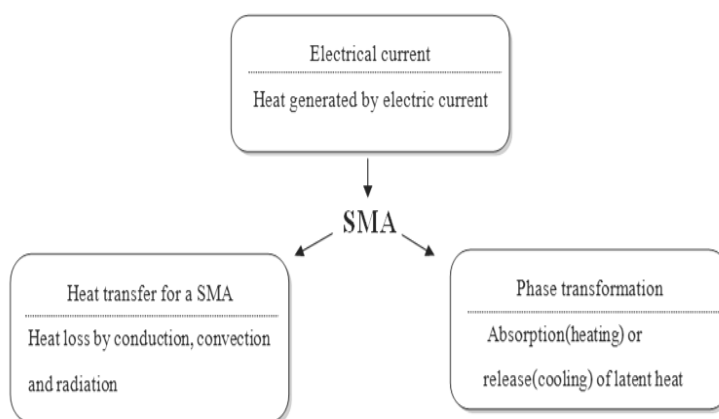
มีงานวิจัยจำนวนมากที่ได้รับการยอมรับในการสร้างแบบจำลองของ SMA actuator ซึ่งมีวิธีการที่ครอบคลุมตั้งแต่ระดับอะตอม เพื่อนำมาใช้เป็นสมการปรับค่าคุณสมบัติความเป็น Nonlinear ของ SMA โดยได้มีการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมของ SMA และมีการพิจารณาพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจาก Joule effect heating เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและคุณสมบัติทางกลของ SMA แสดงดังภาพประกอบที่ 2-4



ภาพประกอบ 2-4 บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองของ SMA actuator [14]

### 2.2.1 แบบจำลองทางความร้อน

รูปแบบในการตอบสนองต่อความร้อน (Thermal response) ของ SMA เป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญ ในการถูกวิเคราะห์เพื่อออกแบบ Actuator ทั้งนี้คุณสมบัติทางความร้อนของ SMA มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงมาก เนื่องจากมีค่าของ Thermal time constants ซึ่งเป็นเวลาของการให้ความร้อนแก่ SMA และยังมีคุณลักษณะที่เป็น Hysteresis อยู่ด้วย แบบจำลองนี้ได้มีการวิเคราะห์และถูกเสนอขึ้นโดย Ikuta [15] ต่อมาได้ถูกอธิบายเพิ่มเติมโดย Madill และ Wang [16] โดยจะใช้การตั้งสมมุติฐานอย่างง่ายเกี่ยวกับสมดุลทางความร้อนของ SMA ซึ่งเกิดจากการส่งผ่านของความร้อนที่พื้นผิวของ SMA ตามภาพประกอบ 2-5 แสดงถึงผลที่เกิดจากตัวแปรที่เกี่ยวข้อง กับแบบจำลองนี้ โดยความร้อนที่เกิดขึ้นถูกสร้างมาจากกระแสไฟฟ้า ที่จ่ายให้กับ SMA เมื่อเกิดความร้อนขึ้น SMA ก็จะมีการเปลี่ยนรูป



ภาพประกอบ 2-5 แผนภาพแบบจำลองทางความร้อนของ SMA actuator [14]

สมการเชิงอนุพันธ์ดั้งเดิมทางด้านเทอร์โมไดนามิกส์ของ SMA (Heat transfer constitutive model) [15] ที่มาจากกฎสมดุลทางความร้อนสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\rho CV \frac{dT}{dt} = Q_s - (Q_{conduction} + Q_{convection} + Q_{radiation}) \quad (2-3)$$

โดยที่  $C$  คือ ความจุความร้อนจำเพาะของ SMA

$V$  คือ ปริมาตรของ SMA

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของ SMA

$Q_s$  คือ ความร้อนที่เกิดขึ้นจากแหล่งจ่ายภายนอก ( $Q_s = i^2 R$ )

$Q_{conduction}$  คือ การนำความร้อน

$Q_{convection}$  คือ การพาความร้อน

$Q_{radiation}$  คือ การแผ่ความร้อน

เมื่อพิจารณาตัวแปรของรูปแบบการกระจายตัวทางความร้อนของ SMA โดยทั่วไปแล้วจะไม่สนใจ  $Q_{radiation}$  และ  $Q_{conduction}$  จะพิจารณาเฉพาะ  $Q_{convection}$  โดยสมการจะมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้  $A$  คือพื้นที่ผิวสัมผัสของ SMA,  $h$  คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน,  $T$  คืออุณหภูมิที่ SMA และ  $T_A$  คืออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (Ambient temperature) จะได้สมการดังนี้

$$Q_{convection} = hA(T - T_A) \quad (2-4)$$

จากสมการที่ (2-4) แทนลงในสมการที่ (2-5) โดยจะคิดเฉพาะ  $Q_{convection}$  เท่านั้นจะได้

$$\rho CV \frac{dT}{dt} = Q_s - hA(T - T_A) \quad (2-5)$$

$$\rho CV \frac{dT}{dt} + hAT = Q_s + hAT_A \quad (2-6)$$

$$\frac{\rho CV}{hA} \frac{dT}{dt} + T = \frac{Q_s}{hA} + T_A \quad (2-7)$$

กำหนดให้  $\tau = \frac{\rho CV}{hA}$  และ  $\lambda = \frac{1}{hA}$  นำไปแทนในสมการที่ (2-7) จะได้

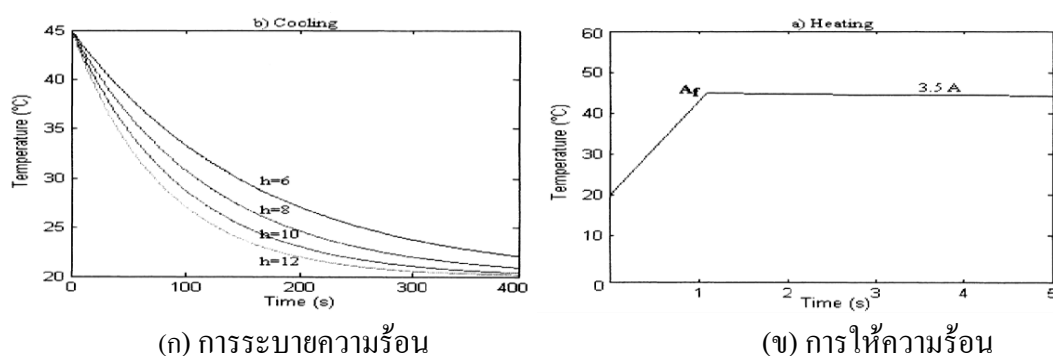
$$(\tau s + 1)T(s) = \lambda Q(s) + T_A(s) \quad (2-8)$$

$$\frac{T(s)}{Q(s)} = \frac{\lambda}{(\tau s + 1)} \quad (2-9)$$

จากสมการที่ (2-9) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุต  $Q(s)$  และเอาต์พุต  $T(s)$  ซึ่งในที่นี้จะไม่คิดรวมกับสัญญาณรบกวน  $T_A(s)$  และจากสมการที่ (2-5) อุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงตามฟังก์ชันของ



เวลา เมื่อป้อนกระแสให้กับ SMA อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่ Austenite สิ้นสุด ( $A_f$ ) โดยที่จุดนี้ SMA จะเสร็จสิ้นการเปลี่ยนรูป และเมื่อเวลาผ่านไปถึงจุดหนึ่งอุณหภูมิจะมีค่าคงที่ เวลาในการระบายความร้อนของ SMA จะมีนัยสำคัญกว่าตอนให้ความร้อน กล่าวคือการระบายความร้อน (Cooling) ของ SMA จะช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ( $h$ ) แต่แทบจะไม่มีผลตอนให้ความร้อน (Heating) แก่ SMA ซึ่งในส่วนนี้ถูกอธิบายไว้โดย R. Velazquez และคณะ [5] เมื่อพิจารณาสมการที่ (2-5) จะสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของผลตอบสนอง ซึ่งจากภาพประกอบที่ 2-6 จะเห็นได้ว่าช่วงเวลากการระบายความร้อนจะนานกว่าช่วงที่ให้ความร้อนมาก



ภาพประกอบ 2-6 (ก) และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของ SMA [5]

สำหรับการขับเคลื่อนแท่งแสดงผลโดยใช้ SMA actuator ให้เคลื่อนที่ไปในตำแหน่งต่าง ๆ นั้น ทำได้โดยใช้พื้นฐานการควบคุมความร้อน โดยความร้อนเป็นตัวที่ทำให้ SMA เกิดการเปลี่ยนรูป คือความร้อนจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความเครียด (แรง/พื้นที่) ในเนื้อวัสดุ SMA จึงทำให้เกิดแรงที่ SMA actuator และใช้เป็นตัวขับเคลื่อนแท่งแสดงผล ให้ได้ระยะทางตามที่ต้องการ ทั้งนี้ความร้อน ( $Q_s$ ) ที่เกิดขึ้นจากการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับ SMA เท่ากับกำลังงาน ( $P$ ) ที่ใช้ในการขับเคลื่อน SMA actuator ซึ่งมีสมการดังนี้

$$P = i^2 R \quad (2-10)$$

เมื่อ  $i$  คือกระแสไฟฟ้า และ  $R$  คือค่าความต้านทานของ SMA ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้น (Heating) และกระบวนการระบายความร้อน (Cooling) จะเป็นตัวกำหนดผลตอบสนองทางเวลาของ SMA actuator

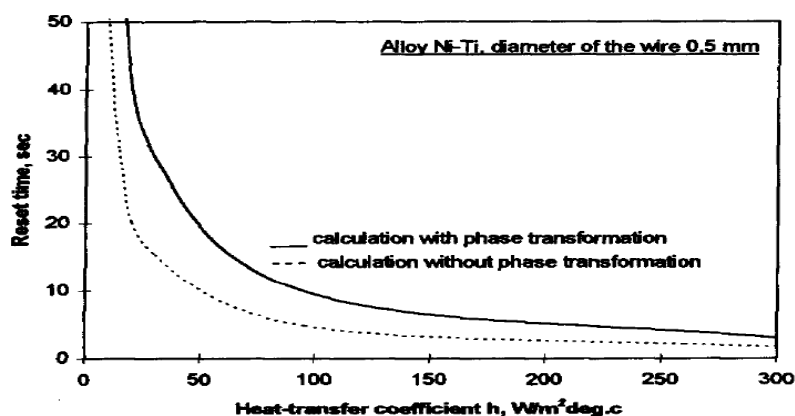
## 2.2.2 แบบจำลองของการเปลี่ยนเฟส

แบบจำลองของการเปลี่ยนเฟสหรือเปลี่ยนรูปของ SMA (Phase transformation) จะพิจารณา Hysteresis ทางความร้อนที่เกิดขึ้น เนื่องมาจากการเปลี่ยนเฟส โดยจะใช้กฎของ Liang-Roger Kinetic Law [17] ทำให้เราทราบถึงการเปลี่ยนรูปร่างของ SMA (Martensite fraction  $\xi$ ) ที่เปลี่ยนแปลงรูปร่างไปตามอุณหภูมิ ( $T$ ) และการระบายความร้อนของ SMA โดยสามารถแสดงสมการของแบบจำลองของการเปลี่ยนเฟส ได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \xi(T) &= 0 && \text{for } T > A_f \\ \xi(T) &= \frac{1}{2} \left[ \cos \left( \pi \frac{T-A_s}{A_f-A_s} \right) + 1 \right] && \text{for } A_s < T < A_f \\ \xi(T) &= 1 && \text{for } T < A_s \end{aligned} \quad (2-11)$$

เมื่อพิจารณาการระบายความร้อนของ SMA จากกฎสมดุลทางพลังงานความร้อนที่ทำให้เกิด Phase transformation การระบายความร้อนสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2-12) เมื่อ  $\Delta H$  คือ Transformation enthalpy สมการนี้จะช่วยให้ทราบค่าของความร้อนแฝงที่ถูกปล่อยออกมาในช่วงการเกิด Phase transformation

$$\rho V \left[ C \frac{dT}{dt} + \Delta H \frac{d\xi}{dt} \right] = -hA(T - T_A) \quad (2-12)$$



ภาพประกอบ 2-7 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเมื่อเทียบกับเวลา [6]

จากภาพประกอบที่ 2-7 ถ้าพิจารณาเฉพาะผลตอบสนองทางความร้อน (Thermal response) โดยไม่พิจารณาผลจากการเปลี่ยนรูป เวลาที่ใช้ในการตอบสนองจะเร็วกว่าเมื่อรวมการเปลี่ยนรูปกับผลตอบสนองต่อความร้อนเข้าด้วยกัน ดังนั้น Phase transformation จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ต่อเวลาในการตอบสนองต่ออุณหภูมิของ SMA จากผลการคำนวณของ V. Brailovski และคณะ [14] ตามภาพประกอบที่ 2-7 นั้น จะเห็นได้ว่าผลกระทบผลของ Phase transformation ทำให้ช่วงเวลาในการตอบสนองต่อการให้ความร้อน (Heating) ช้าลงไม่มากนัก แต่ช่วงเวลาในการตอบสนองต่อการระบายความร้อน (Cooling) จะนานกว่ามาก

### 2.2.3 แบบจำลองทางกล

จากการทดสอบ SMA actuator เบื้องต้นในบทที่ 3 การนำ SMA มาสร้างเป็น Actuator นั้นสามารถทำได้ โดยที่เราสามารถกำหนดรูปร่างของ SMA ซึ่งต้องพิจารณากระบวนการทางความร้อนในเฟสอุณหภูมิสูง (Austenite phase) เป็นหลัก ส่วนรูปร่างของ SMA ที่นิยมนำมาสร้างเป็น Actuator คือ ลวด สปริง หลอดและแผ่น ซึ่ง SMA helical สปริง ง่ายต่อการขึ้นรูปเป็นลักษณะขดสปริง และมีค่า Yield ที่สูง ทำให้เหมาะที่จะนำมาทำเป็น Actuator เพราะมีช่วงในการเคลื่อนที่กว้าง ในงานวิจัยนี้เราจะใช้ SMA สปริงและมวดซึ่งจะทำหน้าที่ Bias เพื่อให้ SMA สปริงมีการเปลี่ยนรูปอยู่ตลอดเวลา โดยเมื่อให้ความร้อน SMA สปริงก็จะคืนรูปตามที่เรากำหนดไว้ในส่วนของแรงที่ถูกสร้างโดย SMA สปริง มีการกำหนดรูปแบบของสมการที่เสนอขึ้นโดย Majima และคณะ [5] ซึ่งประกอบด้วยความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับ Martensite fraction โดยสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

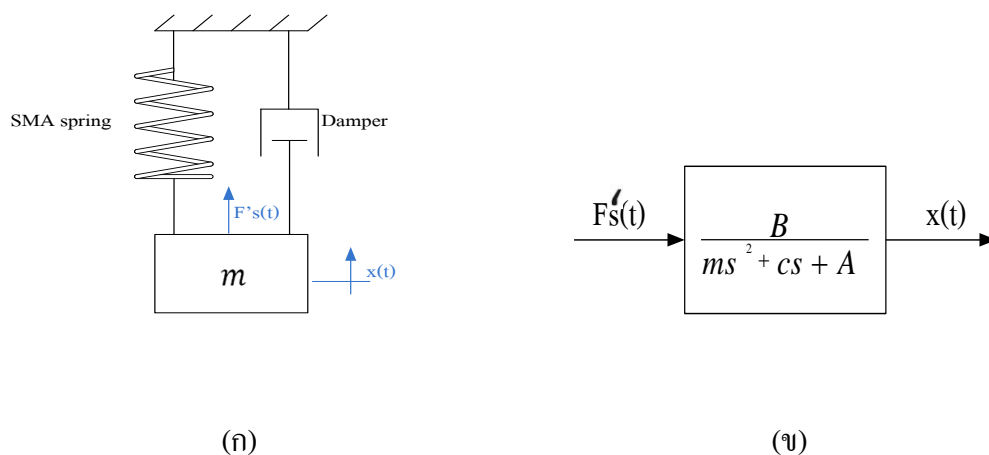
$$F'_s = Ax + B\xi \quad (2-13)$$

เมื่อ  $F'_s$ ,  $x$  และ  $\xi$  คือการเปลี่ยนแปลงของแรงในแนวแกนของ SMA สปริง, การเปลี่ยนแปลงของการกระจัด และการเปลี่ยนแปลงของ Detwinned martensite fraction ตามลำดับ  $A$  และ  $B$  คือค่าคงที่ของ SMA สปริง ซึ่งแสดงไว้ในรูปของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวด SMA จำนวนรอบของ SMA สปริง ( $n$ ) และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของ SMA สปริง ( $D$ ) ในส่วนของ  $E_1$  และ  $\Omega$  เป็นค่าคงที่ของ SMA โดย  $A$  และ  $B$  มีค่าดังนี้

$$A = \frac{d^4 E_1}{8nD^3} \quad (2-14)$$

$$B = -\frac{\pi d^3 \Omega}{8D} \quad (2-15)$$

โดยที่  $B$  มีค่าเป็นลบเพราะค่าคงที่  $\Omega$  มีค่าติดลบ เมื่อ  $m$  คือมวลของแท่งแสดงผลรวมกับมวลที่ใช้ Bias ส่วนการหาสมการ Transfer function จะคิดโดยให้ SMA actuator เปรียบเสมือนมีมวลก้อนหนึ่งติดอยู่กับสปริงและตัวหน่วง (Damper) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ 2-8



ภาพประกอบ 2-8 (ก) แบบจำลองระบบทางกลของ SMA actuator และ (ข) บล็อกไดอะแกรมสมการ Transfer function ของ SMA actuator

จากแบบจำลองทางกลของ SMA actuator ในภาพประกอบที่ 2-8 (ก) สามารถอธิบายการเคลื่อนที่ของ SMA actuator ได้โดยใช้สมการเชิงอนุพันธ์ดังนี้

$$\text{จากสมการกฎการเคลื่อนที่} \quad \sum F = m\ddot{x} \quad (2-16)$$

$$-F'_s = m\ddot{x} + c\dot{x} \quad (2-17)$$

เมื่อ  $c$  คือสัมประสิทธิ์ของความหน่วง จากสมการ (2-13) แทนค่าในสมการ (2-17) จะได้

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + Ax = B\xi \quad (2-18)$$

ใช้ Laplace transform เพื่อหาสมการ Transfer function ของแบบจำลองทางกล ได้ดังนี้

$$(ms^2 + cs + A)x(s) = B\xi(s) \quad (2-19)$$

$$\frac{x(s)}{\xi(s)} = \frac{-B}{ms^2 + cs + A} \quad (2-20)$$

ดังนั้นพฤติกรรมทางกลของ SMA actuator สามารถจำลองการทำงานได้จากสมการที่ (2-20) โดยผลของการจำลองการทำงาน จะแสดงไว้ในส่วนของการสร้างแบบจำลองในบทที่ 3

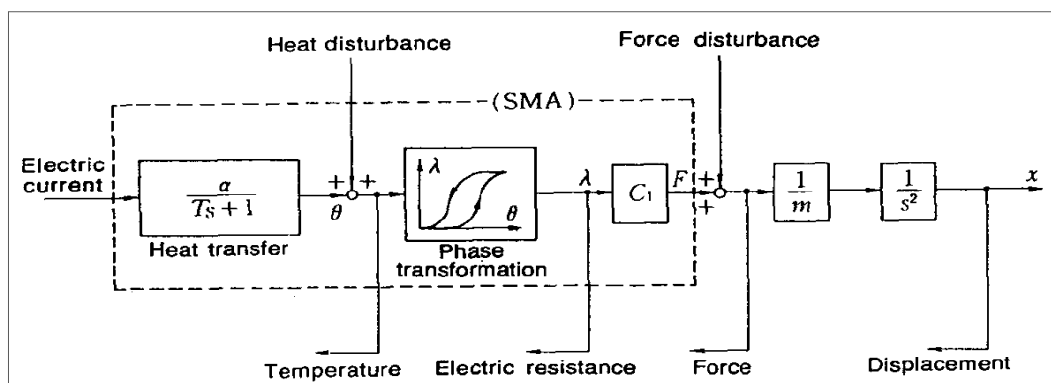
### 2.3 การควบคุม SMA actuator

ในส่วนของการควบคุม SMA actuator นั้นมีหลากหลายวิธีด้วยกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback control system) โดยจะใช้ PI controller สำหรับเปรียบเทียบสัญญาณคำสั่งซึ่งเป็นตำแหน่งที่ต้องการควบคุม กับสัญญาณเอาต์พุตซึ่งเป็นค่าตำแหน่งที่ป้อนกลับมาจาก Sensor จากนั้นนำไปสร้างสัญญาณอินพุตป้อนให้กับ PWM เพื่อควบคุมการป้อนแรงดันที่จ่ายให้กับ SMA actuator ซึ่งการป้อนกลับตำแหน่ง (Position feedback) เป็นวิธีที่ง่ายและได้รับความนิยมในการใช้งาน ในส่วนของการป้อนกลับค่าความต้านทานของ SMA (Electric resistance feedback) [18] เป็นวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสำหรับการควบคุม SMA actuator ทั้งนี้สามารถนำข้อดีของการป้อนกลับแต่ละแบบมารวมกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมให้ดียิ่งขึ้น โดยรายละเอียดวิธีการควบคุม SMA actuator แบบต่างๆมีดังนี้

#### 2.3.1 การควบคุมแบบป้อนกลับ

จากคุณสมบัติพื้นฐานของ SMA นั้น จะพิจารณาตัวแปรที่เป็นไปได้ ในการนำมาใช้ในการป้อนกลับสำหรับระบบควบคุม มีอยู่ด้วยกัน 4 ตัวแปรคือ อุณหภูมิ แรงที่ถูกสร้างโดย SMA actuator (Stress) ระยะการเคลื่อนที่ (Strain) และความต้านทานของ SMA แสดงดังภาพประกอบ 2-9 ในการควบคุม SMA ให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการนั้น เป็นเรื่องยากอยู่

พอสมควร เนื่องจากจะมีความไม่เป็นเชิงเส้นที่รวมอยู่ในสมการ Transfer function และ Hysteresis ของการเปลี่ยนรูปของ SMA (Phase transformation)



ภาพประกอบ 2-9 บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองพื้นฐานของ SMA actuator [15]

เมื่อนำ SMA มาพิจารณาให้เป็นส่วนประกอบหนึ่งของ Actuator โดยจะกำหนดให้แรงและระยะเวลาเคลื่อนที่ของ SMA actuator เป็นตัวแปรภายนอก ในขณะที่อุณหภูมิและความต้านทานของ SMA กำหนดให้เป็นตัวแปรภายใน ซึ่งค่าความต้านทานสามารถวัดค่าได้ และมีความสัมพันธ์กับช่วงของการเปลี่ยนรูปของ SMA การที่จะควบคุม SMA actuator ให้มีความแม่นยำ จำเป็นต้องวัดค่าตัวแปรต่าง ๆ และมีการป้อนกลับไปยังตัวควบคุมตามที่กล่าวมาข้างต้น การป้อนค่ากลับของตัวแปรนำมาสู่วิธีการควบคุม SMA actuator แบบต่าง ๆ ดังนี้

### 2.3.1.1 การป้อนกลับตัวแปรภายนอก

จากตัวแปรภายนอก คือแรงและระยะเวลาเคลื่อนที่ จะเลือกหนึ่งตัวแปร มาใช้ในการป้อนค่ากลับ (External variable feedback) เพื่อใช้ควบคุม SMA actuator ในการวัดค่าแรงและระยะเวลาเคลื่อนที่อาจจะใช้อุปกรณ์จำพวก Sensor ต่าง ๆ เช่นการใช้ Potentiometer วัดตำแหน่งและป้อนค่ากลับใน Servo system ส่วนการวัดแรงอาจจะใช้ Strain gauges [15] แต่ในกรณีนี้มีความเป็นไปได้ที่จะคลาดเคลื่อนจากการให้ความร้อนเกิน (Overheating) ของ SMA เมื่อมีการรบกวนทางอุณหภูมิ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงในเรื่องของการระบายความร้อนของ SMA actuator หรือมีการแปรผันของโหลด ซึ่งจะทำให้เกิดความล้ากับ SMA ผลกระทบนี้จะทำให้ประสิทธิภาพของ Actuator ต่ำลง

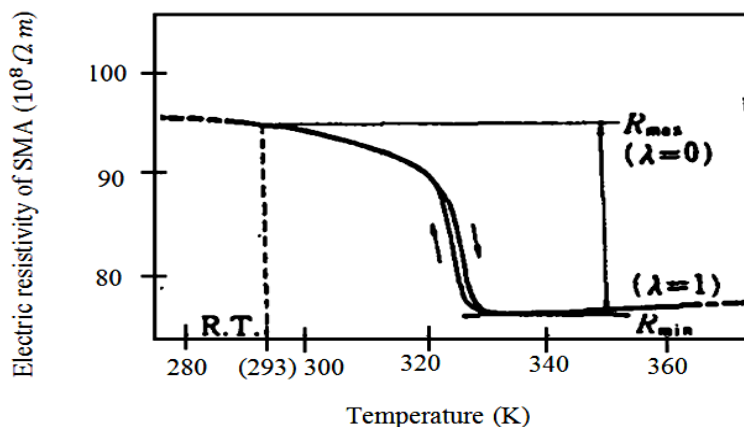
### 2.3.1.2 การป้อนกลับตัวแปรภายใน

จากตัวแปรภายใน คืออุณหภูมิและความต้านทาน จะเลือกหนึ่งตัวแปรนำมาใช้ในการป้อนค่ากลับ (Internal state variable feedback) โดยใช้อุปกรณ์พวก Sensor วัดอุณหภูมิ วิธีการป้อนกลับอุณหภูมิในทางปฏิบัตินั้นเป็นไปได้ยาก เพราะว่า SMA มีขนาดเล็ก ทำให้ยากต่อการที่จะวัดอุณหภูมิให้ได้ค่าที่ถูกต้อง จากเหตุผลที่กล่าวมาวิธีการนี้ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ป้อนกลับสำหรับการควบคุม SMA actuator โดยในส่วนของ การป้อนกลับค่าความต้านทานนั้นมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้ในการควบคุม โดยจะกล่าวไว้ในหัวข้อการป้อนกลับค่าความต้านทาน

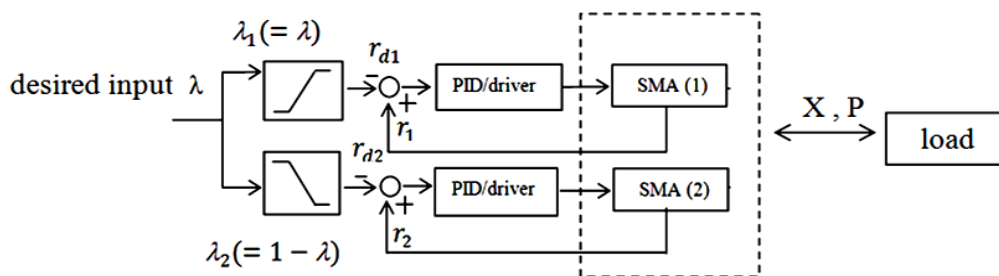
### 2.3.1.3 การป้อนกลับค่าความต้านทาน

จากตัวแปรภายใน คือความต้านทาน สามารถนำมาใช้ในการป้อนค่ากลับ โดยค่าความต้านทานจะสัมพันธ์กับค่าของอุณหภูมิ ซึ่งแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานของ SMA ได้ตามภาพประกอบที่ 2-10 เมื่อเกิดการเปลี่ยนรูป (Phase transformation) ระหว่าง R-phase (เฟสที่อุณหภูมิต่ำ) และ Parent phase (เฟสที่อุณหภูมิสูง) จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงในทิศทางตรงข้ามกับอุณหภูมิ ขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานจะลดลง ซึ่งวิธีนี้จะช่วยให้ Open-loop hysteresis ลดลง เราสามารถประมาณค่าความเป็นเชิงเส้น (Linear function) ของอัตราส่วนเฟสที่อุณหภูมิต่ำ และ Normalization ค่าความต้านทานของ SMA ( $0 \text{ at } R_{min}, 1 \text{ at } R_{max}$ ) ซึ่งเราจะใช้ตัวแปรเหล่านี้ มาป้อนค่ากลับสำหรับการควบคุม โดยที่ค่า  $\lambda$  คือ Normalized resistance [21] แสดงดังสมการที่ (2-21) ข้อดีของการป้อนกลับค่าความต้านทานคือ หลีกเลี่ยงการเกิด Overheating ของ SMA โดยการป้อนกลับแบบนี้จะไม่ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของการให้ความร้อน (Heating) หรือระบายความร้อน (Cooling) ทั้งยังช่วยลด Hysteresis ของ SMA actuator และเปรียบเสมือนเป็น Sensor ตัวหนึ่งที่ใช้วัดตำแหน่งและแรง โดยภาพประกอบที่ 2-11 จะแสดงระบบการป้อนกลับค่าความต้านทานร่วมกับตัวควบคุมแบบ PID ในระบบป้อนกลับ ซึ่งใช้ควบคุมทิศทางของกล้อง Endoscope ในการออกแบบ SMA actuator จะประกอบด้วย SMA สปริง 2 ตัววางในทิศทางตรงข้ามกัน เมื่อควบคุมให้ SMA ตัวใดตัวหนึ่งทำงานทิศทางของกล้องก็จะสอดคล้องกับ SMA ตัวนั้น โดยภาพประกอบที่ 2-12 แสดงภายในของกล้อง Endoscope ที่ใช้ SMA actuator เป็นตัวขับเคลื่อนทิศทางของกล้อง จากบล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบ Electric resistance feedback ในภาพประกอบ 2-11 ค่า  $r_{d1}, r_{d2}$  คือ ค่าความต้านทานที่ต้องการสำหรับ SMA 1, SMA 2 และ  $r_1, r_2$  คือ ค่าความต้านทานของ SMA 1, SMA 2

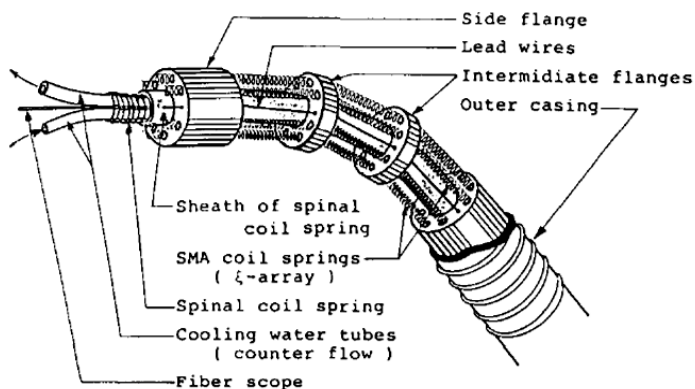
$$\lambda = \frac{R_{max} - R}{R_{max} - R_{min}} ; \lambda = (0 \text{ at } R_{min}, 1 \text{ at } R_{max}) \quad (2-21)$$



ภาพประกอบ 2-10 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานและอุณหภูมิของ SMA [15]



ภาพประกอบ 2-11 ระบบควบคุมแบบ Electric resistance feedback [15]

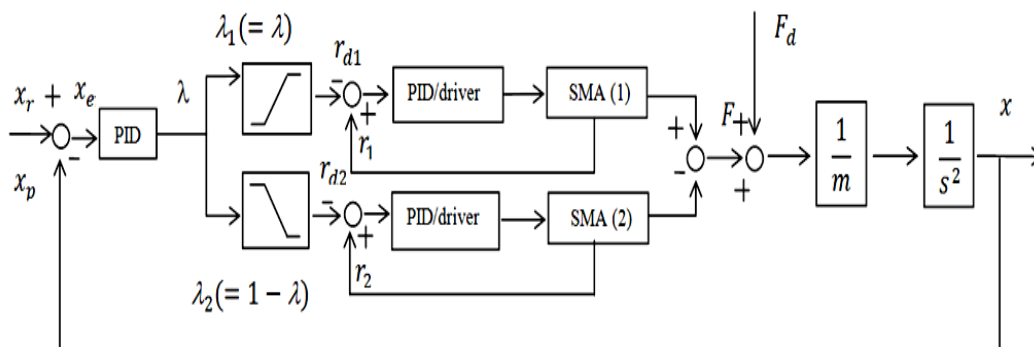


ภาพประกอบ 2-12 โครงสร้างของกล้อง Endoscope โดยใช้การควบคุมแบบ Electric resistance feedback [18]



### 2.3.1.4 การป้อนกลับโดยใช้ตัวแปรภายนอกและตัวแปรภายใน

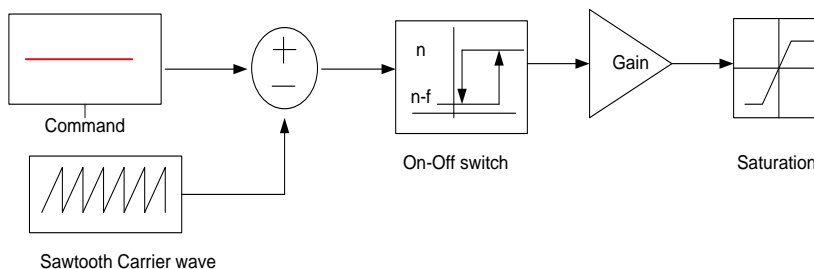
การควบคุมแบบป้อนกลับโดยการรวมตัวแปรภายนอก (Displacement feedback) และ ตัวแปรภายใน (Resistance feedback) เข้าด้วยกัน ตามภาพประกอบที่ 2-13 การใช้วิธีนี้จะทำให้ระบบควบคุมมีข้อได้เปรียบมากขึ้น เนื่องจากการป้อนกลับตัวแปรเดียว อาจจะไม่เพียงพอต่อการควบคุม เช่น การป้อนกลับระยะเคลื่อนที่ จะไม่สามารถทราบค่าอุณหภูมิที่ตัว SMA ทำให้มีโอกาสเกิด Overheating ได้ จึงนำค่าความต้านทานมาใช้ร่วมด้วย เพราะค่าอุณหภูมิมีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทาน เมื่อใช้ร่วมกันเราสามารถป้องกันการเกิด Overheating ได้



ภาพประกอบ 2-13 การควบคุมโดยการรวมกันของ Electric resistance และ Position feedback [18]

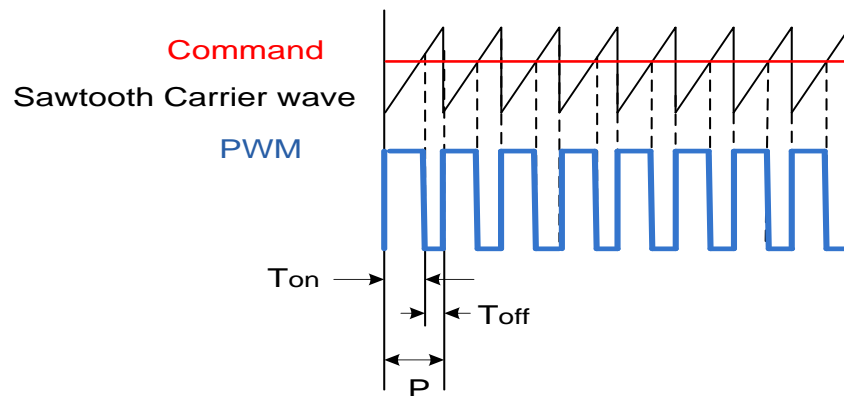
### 2.3.2 การออกแบบ PWM modulator

การสร้างสัญญาณ PWM จะใช้การสร้างสัญญาณพาหะ (Carrier) รูปคลื่นฟันเลื่อย (Sawtooth) มาเปรียบเทียบกับระดับอ้างอิงที่เป็นสัญญาณคำสั่ง (Command) ตามรูปแบบของสัญญาณ PWM ที่ต้องการ โดยสัญญาณพาหะรูปคลื่นฟันเลื่อยจะมีความถี่คงที่ และมีค่า Amplitude สูงกว่าค่าของสัญญาณคำสั่งมาก แสดงดังภาพประกอบที่ 2-14



ภาพประกอบ 2-14 บล็อกไดอะแกรมการสร้างสัญญาณ PWM [11]

จากภาพประกอบที่ 2-14 สัญญาณพาหะจะถูกเปรียบเทียบกับสัญญาณคำสั่ง เมื่อค่าผลต่างมีค่ามากกว่า Threshold ของ On-Off switch เอาต์พุตค่า  $n$  เป็นสถานะ On และถ้าค่าผลต่างมีค่าน้อยกว่า Threshold ของ On-Off switch เอาต์พุตค่า  $n-f$  เป็นสถานะ Off ถัดไปจะมีบล็อกของค่าอัตราขยาย เพื่อขยายเอาต์พุตของ On-Off switch และจำกัดค่าเอาต์พุตสูงสุดด้วยบล็อกของ Saturation



ภาพประกอบ 2-15 การสร้างสัญญาณ PWM [11]

จากภาพประกอบที่ 2-15 สัญญาณ PWM ที่ได้จากการเปรียบเทียบกันของสัญญาณพาหะ กับตัวอย่างสัญญาณคำสั่ง ผลของการเปรียบเทียบเมื่อระดับของสัญญาณคำสั่งสูงกว่าระดับของสัญญาณพาหะ จะทำให้ได้ระดับของ PWM เป็น High และเมื่อระดับของสัญญาณคำสั่งต่ำกว่าระดับของสัญญาณพาหะ จะทำให้ได้ระดับของ PWM เป็น Low เวลาที่ได้จากเอาต์พุตของ On-Off switch ที่เปลี่ยนจาก  $n$  ไปถึง  $n-f$  กำหนดให้เป็น On-time ( $T_{on}$ ) และเวลาที่เปลี่ยนจาก  $n-f$  ไปยัง  $n$  จะกำหนดให้เป็น Off-time ( $T_{off}$ ) ช่วงเวลา On-time และ Off-time ในแต่ละคาบเวลาหาได้จาก

$$T_{on} = \frac{M_{command}}{A_{carrier}} P_{carrier} \quad (2-22)$$

$$T_{off} = \frac{A_{carrier} - M_{command}}{A_{carrier}} P_{carrier} \quad (2-23)$$

เมื่อ  $M_{command}$  คือ Magnitude ของสัญญาณคำสั่ง  $A_{carrier}$  คือ Amplitude ของคลื่นพาหะ  $P_{carrier}$  คือคาบเวลาของคลื่นพาหะ จากช่วงเวลา On-time และ Off-time สามารถคำนวณค่า duty cycle ( $D$ ) ได้ดังนี้

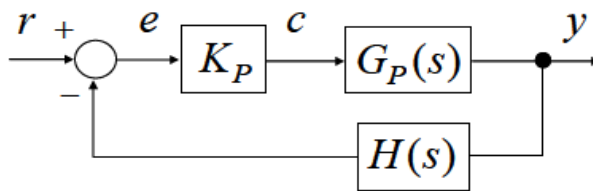
$$D = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \times 100\% \quad (2-24)$$

### 2.3.3 การออกแบบ PID controller

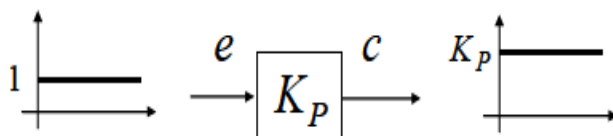
ตัวควบคุมแบบ PID เป็นหนึ่งในตัวควบคุมที่ถูกใช้มากที่สุด ทั้งในกระบวนการทางอุตสาหกรรม และในการทดลอง ด้วยโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนของตัวควบคุมแบบ PID การปรับค่าอัตราขยาย (Gain) ของตัวควบคุมก็ทำได้ง่ายและรวดเร็ว โดยยังให้ผลตอบสนองที่ยอมรับได้ ระบบควบคุมแบบ PID มี ตัวควบคุมย่อย 3 ตัว คือ ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional, P-controller) ตัวควบคุมแบบปริพันธ์ (Integral, I-controller) และ ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative, D-controller) ในการควบคุมระบบทั่วไปมักใช้งานตัวควบคุมร่วมกัน เช่น ตัวควบคุมแบบ PI ตัวควบคุมแบบ PD และตัวควบคุมแบบ PID เพื่อให้เกิดผลดีต่อระบบควบคุม ในส่วนของแผนผังโครงสร้างของตัวควบคุมแบบ PID แสดงได้ดังภาพประกอบที่ 2-21 โดยมีรายละเอียดการทำงาน ของตัวควบคุมแต่ละแบบดังนี้

#### 2.3.3.1 ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional controller)

ตัวควบคุมแบบสัดส่วนหรือตัวควบคุมแบบ P โดยที่ตัวควบคุมแบบนี้จะนำเอาสัญญาณค่าความผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุตมาเป็นอินพุตของตัวควบคุม แล้วตัวควบคุมจะทำการสร้างสัญญาณเอาต์พุต ด้วยการขยายสัญญาณความผิดพลาดดังกล่าวด้วยค่าอัตราขยายของตัวควบคุม ( $K_p$ ) บล็อกไดอะแกรมและลักษณะของการประมวลผลสัญญาณเป็นดังภาพประกอบที่ 2-16 และ 2-17 จุดเด่นของตัวควบคุมแบบนี้เมื่อนำไปใช้งานก็คือการปรับค่าเกณฑ์ให้สูงขึ้นจะมีผลทำให้ ระบบมีผลตอบสนองที่เร็วขึ้น



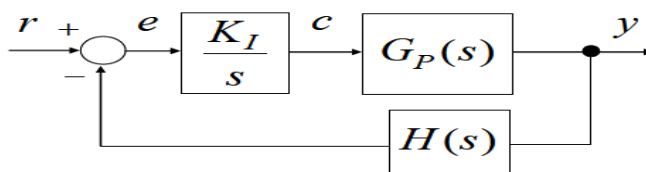
ภาพประกอบที่ 2-16 บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบสัดส่วน



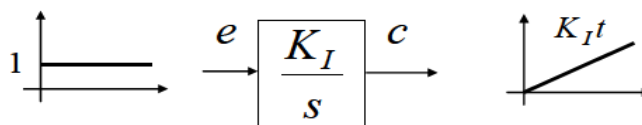
ภาพประกอบที่ 2-17 ลักษณะของการประมวลผลสัญญาณของตัวควบคุมแบบสัดส่วน

### 2.3.3.2 ตัวควบคุมแบบปริพันธ์ (Integral controller)

ตัวควบคุมแบบปริพันธ์หรือตัวควบคุมแบบ I โดยที่ตัวควบคุมแบบนี้จะนำเอาสัญญาณความผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุตมาเป็นอินพุตของตัวควบคุม แล้วตัวควบคุมจะทำการสร้างสัญญาณเอาต์พุตด้วยการอินทิเกรตสัญญาณความผิดพลาดดังกล่าว แล้วคูณด้วยค่าอัตราขยายของตัวควบคุม ( $K_I$ ) บล็อกไดอะแกรมและลักษณะของการประมวลผลสัญญาณเป็นดังภาพประกอบที่ 2-18 และ 2-19 จุดเด่นของตัวควบคุมแบบนี้เมื่อนำไปใช้งานก็คือ ถ้านำไปใช้กับระบบชนิด 0 (System type 0) ตัวควบคุมแบบนี้จะสามารถขจัดค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวได้



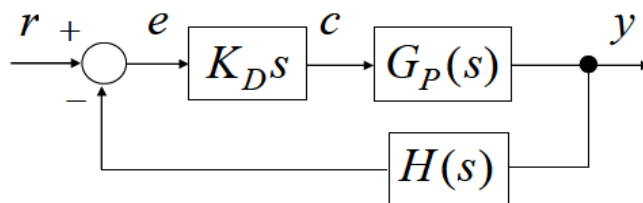
ภาพประกอบที่ 2-18 บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบปริพันธ์



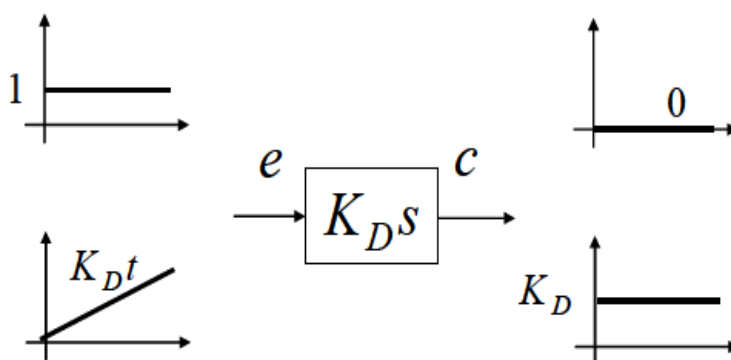
ภาพประกอบที่ 2-19 ลักษณะของการประมวลผลสัญญาณของตัวควบคุมแบบปริพันธ์

### 2.3.3.3 ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative controller)

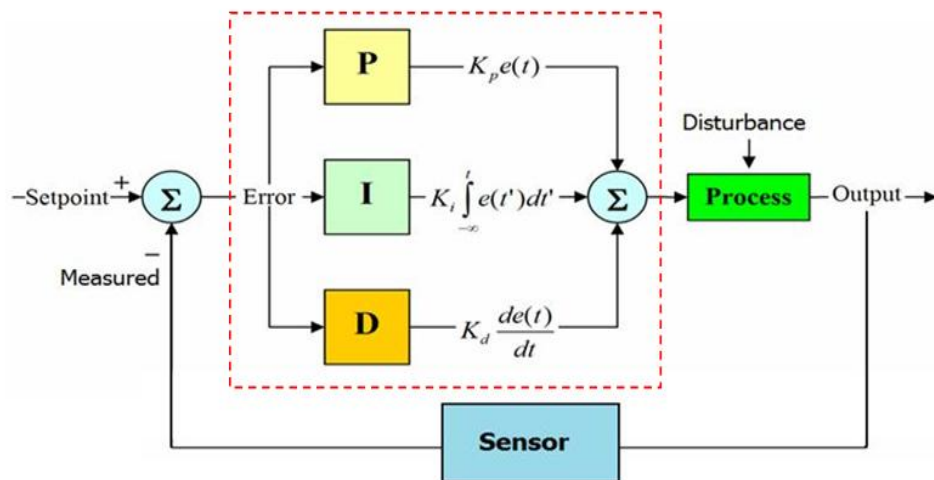
ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์หรือตัวควบคุมแบบ D โดยที่ตัวควบคุมแบบนี้จะนำเอาสัญญาณความผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุตมาเป็นอินพุตของตัวควบคุม แล้วตัวควบคุมจะทำการสร้างสัญญาณเอาต์พุตด้วยการอนุพันธ์สัญญาณความผิดพลาดดังกล่าว แล้วคูณด้วยค่าอัตราขยายของตัวควบคุม ( $K_D$ ) บล็อกไดอะแกรมและลักษณะของการประมวลผลสัญญาณเป็นดังภาพประกอบที่ 2-20 และ 2-21 จุดเด่นของตัวควบคุมแบบนี้เมื่อนำไปใช้งานก็คือ ตัวควบคุมแบบนี้ใช้สำหรับลดผลของการพุ่งเกินของผลตอบสนองได้ ลดผลตอบสนองที่มีการเปลี่ยนแปลงไปมาได้ แต่ต้องปรับค่าอัตราขยายให้เหมาะสมด้วย ไมเช่นนั้นอาจจะทำให้ได้ผลตอบสนองที่ไม่เป็นที่พึงประสงค์ ปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นในการนำเอาตัวควบคุมนี้ไปใช้งานก็คือ ตัวควบคุมแบบนี้จะไม่สามารถจัดค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวได้ และการใช้ตัวควบคุมนี้อาจจะทำให้ได้ผลตอบสนองที่ช้าลงได้



ภาพประกอบที่ 2-20 บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบอนุพันธ์



ภาพประกอบที่ 2-21 ลักษณะของการประมวลผลสัญญาณของตัวควบคุมแบบอนุพันธ์



ภาพประกอบ 2-22 แผนผัง โครงสร้างตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบปริพันธ์ และแบบอนุพันธ์ (PID controller) [3]

จากแผนผัง โครงสร้างตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบปริพันธ์และแบบอนุพันธ์สามารถเขียนรูปแบบสมการได้ดังนี้

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \dot{e}(t) \quad (2-25)$$

- เมื่อ
- $K_p$  คือ ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบสัดส่วน
  - $K_I$  คือ ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบปริพันธ์
  - $K_D$  คือ ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบอนุพันธ์
  - $e$  คือ สัญญาณค่าความผิดพลาด
  - $u$  คือ สัญญาณเอาต์พุตควบคุม
  - $t$  คือ เวลา

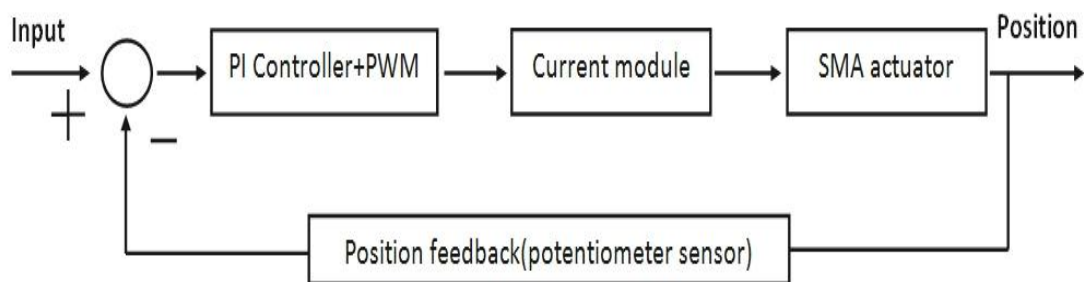
## บทที่ 3

### แนวทางในการออกแบบ

บทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบส่วนต่างๆ ของงานวิจัย เช่น อุปกรณ์ SMA actuator วงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับจ่ายแรงดันให้ SMA actuator การทดสอบ SMA actuator เบื้องต้น และการสร้างแบบจำลองของ SMA actuator โดยจำลองการทำงานของ SMA actuator ทั้งในส่วนที่ไม่ใช่และใช้ตัวควบคุมผ่านโปรแกรม MATLAB (Simulink)

#### 3.1 การออกแบบระบบ SMA actuator

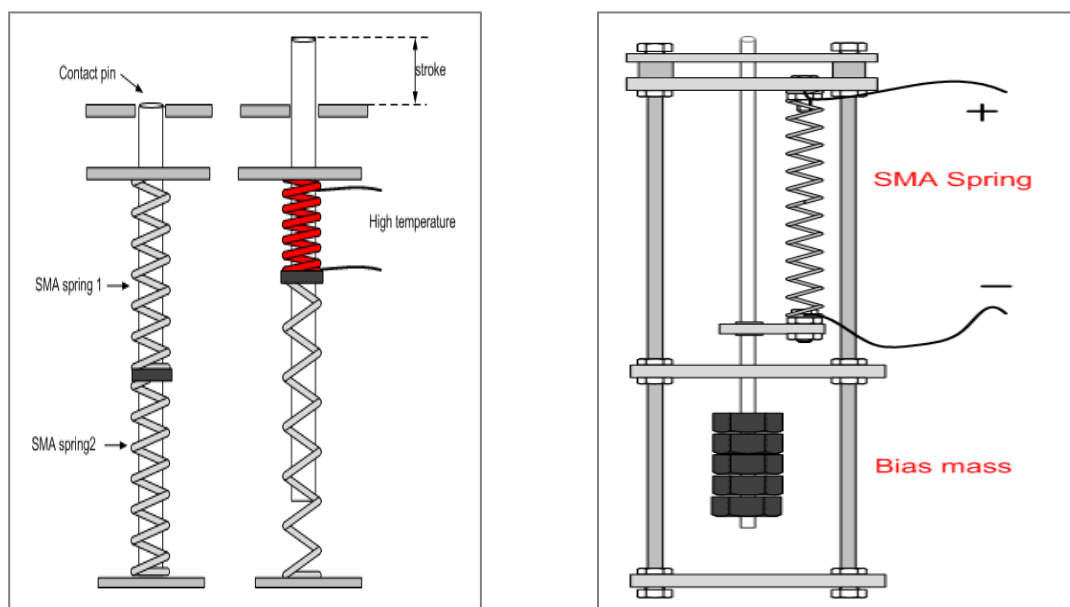
ในส่วนของระบบทั้งหมดของ SMA actuator มีส่วนประกอบหลักอยู่ด้วยกัน 4 ส่วน คือส่วนของตัว SMA actuator ระบบควบคุม วงจรจ่ายกระแส และ Sensor สำหรับตรวจจับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของ SMA actuator โดยบล็อกไดอะแกรมภาพรวมของระบบสามารถดูได้จากภาพประกอบ 3-1 หลักการทำงานของระบบ SMA actuator คือ สัญญาณคำสั่งจากระบบควบคุมจะทำการเปรียบเทียบค่าตำแหน่งที่วัดได้จาก Sensor ได้เป็นค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง จากนั้นระบบควบคุมจะปรับแต่งค่าความผิดพลาดโดยตัวควบคุม เมื่อตัวควบคุมปรับแต่งสัญญาณจนมีความเหมาะสม สัญญาณจะถูกแปลงเป็น Duty cycle ของ PWM โดยช่วงเปิด-ปิดการจ่ายแรงดันจะขึ้นอยู่กับ Duty cycle จากระบบควบคุม ต่อจากนั้นระบบควบคุมจะส่งสัญญาณเอาต์พุต ไปยังวงจรจ่ายแรงดัน เพื่อควบคุมการจ่ายแรงดันให้กับ SMA actuator ให้เคลื่อนที่ไปตามตำแหน่งที่ต้องการ



ภาพประกอบ 3-1 บล็อกไดอะแกรมภาพรวมทั้งหมดของระบบ SMA actuator

### 3.1.1 แนวทางในการออกแบบและการทดสอบ SMA actuator

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างอุปกรณ์ SMA actuator เพื่อขับเคลื่อนแท่งแสดงผล (Pin) ให้เคลื่อนที่ขึ้นลงตามที่เราร้องการนั้น ได้แนวคิดการออกแบบมา 2 แนวคิดคือ Antagonist SMA actuator และ SMA actuator with bias โดยมีหลักการทำงานคือ Antagonist SMA actuator เป็นการทำงานของ SMA สปริง 2 ตัวซึ่งทำหน้าที่เหมือนกันแต่ว่าให้อยู่ตรงกันข้ามกัน (Antagonist) สามารถดูได้จากภาพประกอบ 3-2 (ก) โดยจะมี SMA สปริงตัวที่ 1 อยู่ด้านบน การให้ความร้อนแก่ SMA สปริงตัวที่ 1 จะทำให้ Pin เคลื่อนที่ขึ้นข้างบน ส่วนด้านล่างจะเป็น SMA สปริงตัวที่ 2 ซึ่งเมื่อให้ความร้อนแก่ SMA สปริงตัวที่ 2 จะทำให้ Pin เคลื่อนที่ลงข้างล่าง ซึ่งการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของ Pin ต้องควบคุม SMA สปริงทั้งสองตัว ในส่วนของ SMA actuator with bias มีหลักการทำงานคือติด Pin เอาไว้กับ SMA สปริง 1 ตัวและ Bias mass ซึ่ง Bias mass จะมีหน้าที่ทำให้ SMA สปริงเปลี่ยนรูป เมื่อให้ความร้อนแก่ SMA สปริง จะทำให้ Pin เคลื่อนที่ขึ้นตามที่ได้ออกแบบไว้และเมื่อหยุดให้ความร้อนแก่ SMA สปริง ก็จะทำให้ Pin เคลื่อนที่ลงตามแรงของ Bias mass สามารถดูได้จากภาพประกอบ 3-2 (ข)

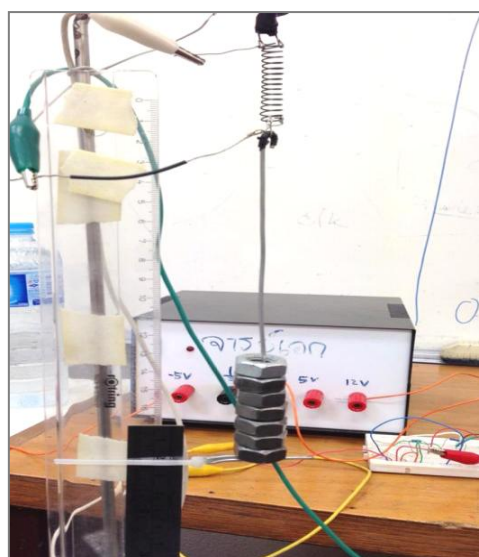
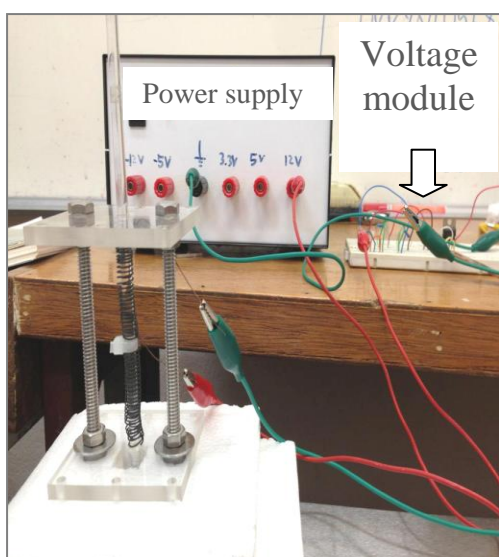


ภาพประกอบ 3-2 (ก) Antagonist SMA actuator      ภาพประกอบ 3-2 (ข) SMA actuator with bias

ภาพประกอบ 3-2 แนวคิดการออกแบบ SMA actuator



เมื่อได้แนวคิดในการออกแบบ SMA actuator แล้ว จึงทำการทดสอบเบื้องต้นเพื่อหาความเป็นไปได้ในการสร้างอุปกรณ์ SMA actuator ให้ทำงานตามที่เรารต้องการ และยังช่วยให้เราไม่ต้องออกแบบอุปกรณ์ที่ซับซ้อนจนเกินไป รวมไปถึงการออกแบบระบบควบคุมที่ง่ายขึ้นอีกด้วย โดยจากภาพประกอบ 3-3 (ก) จะเป็นการทดสอบรูปแบบ Antagonist SMA actuator และภาพประกอบ 3-3 (ข) เป็นการทดสอบในรูปแบบ SMA actuator with bias

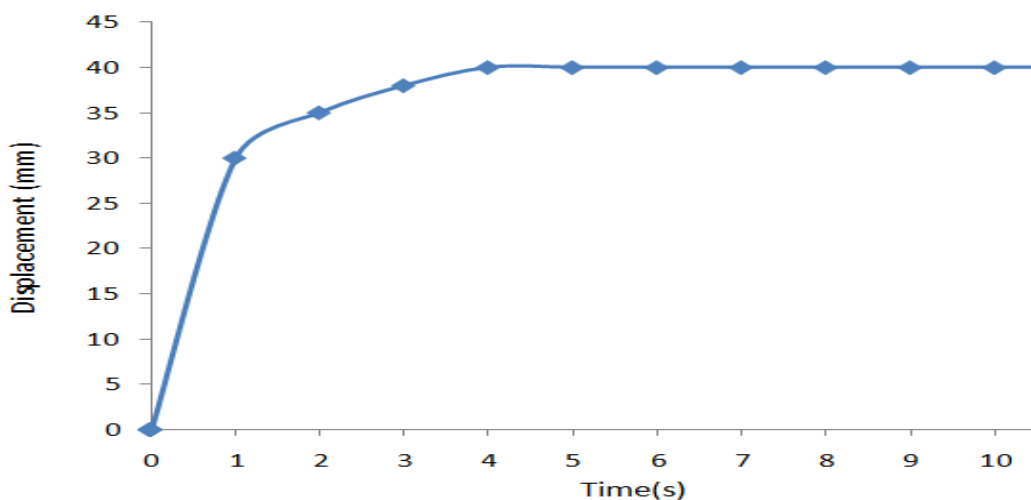


ภาพประกอบ 3-3 (ก) Antagonist SMA actuator      ภาพประกอบ 3-3 (ข) SMA actuator with bias

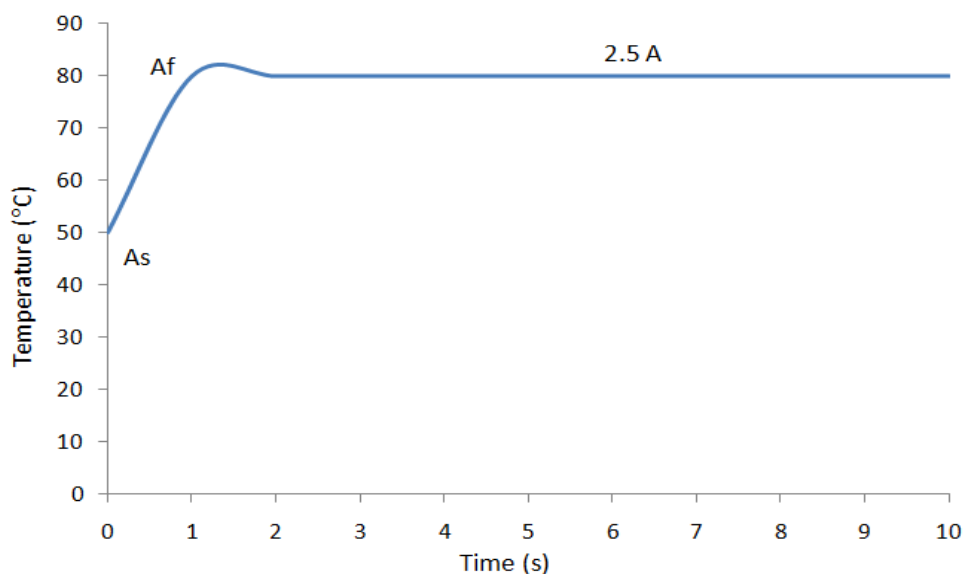
### ภาพประกอบ 3-3 การทดสอบ SMA actuator เบื้องต้น

ซึ่งจากการทดลองพบว่าแบบ Antagonist SMA actuator นั้น SMA สปริงไม่สามารถทำงานได้ตามที่คิดเอาไว้คือ SMA สปริงตัวที่ 1 ไม่สามารถยกให้ Pin เคลื่อนที่ขึ้นด้านบนได้ตามที่ออกแบบไว้ เมื่อกลับไปดูทฤษฎีจากบทที่ผ่านมา จึงพบว่า SMA ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบ One-way SMA ซึ่งการทำงานคือต้องมีแรงมากระทำ SMA ให้เปลี่ยนรูปเท่านั้น เมื่อได้รับความร้อน SMA จึงจะเปลี่ยนรูปกลับมาเป็นรูปเดิม ซึ่งในงานวิจัยที่มีการออกแบบให้ SMA actuator ทำงานแบบ Antagonist นั้น SMA ที่ใช้จะเป็นแบบ Two-way SMA คือไม่จำเป็นต้องมีแรงมากระทำทำให้ SMA เปลี่ยนรูป SMA ชนิดนี้จะสามารถเปลี่ยนรูปได้ตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป และในส่วนของ การทดสอบในรูปแบบ SMA actuator with bias นั้นพบว่า SMA สามารถเปลี่ยนรูปได้ดี นั่นทำให้การเคลื่อนที่ของ SMA actuator เคลื่อนที่ได้ตามที่เรารต้องการเช่นกัน โดยคุณสมบัติของ

SMA สปริงที่ใช้ทดสอบเบื้องต้นนี้คือ เส้นผ่านศูนย์กลางลวด SMA 0.5 mm เส้นผ่านศูนย์กลางสปริง SMA 7 mm ระยะห่างระหว่างขด 1 mm จำนวน 15 รอบ โดยแรงดันที่จ่ายเท่ากับ 10 V ผลการทดลองสามารถดูได้จากภาพประกอบที่ 3-4 และ 3-5 จากผลการทดลองการเปลี่ยนรูปของ SMA ใช้เวลาประมาณ 4 วินาที ได้ระยะการเคลื่อนที่ 40 mm ในส่วนของอุณหภูมิจากการทดลอง SMA จะเริ่มเปลี่ยนรูปที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และเปลี่ยนรูปเสร็จที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส



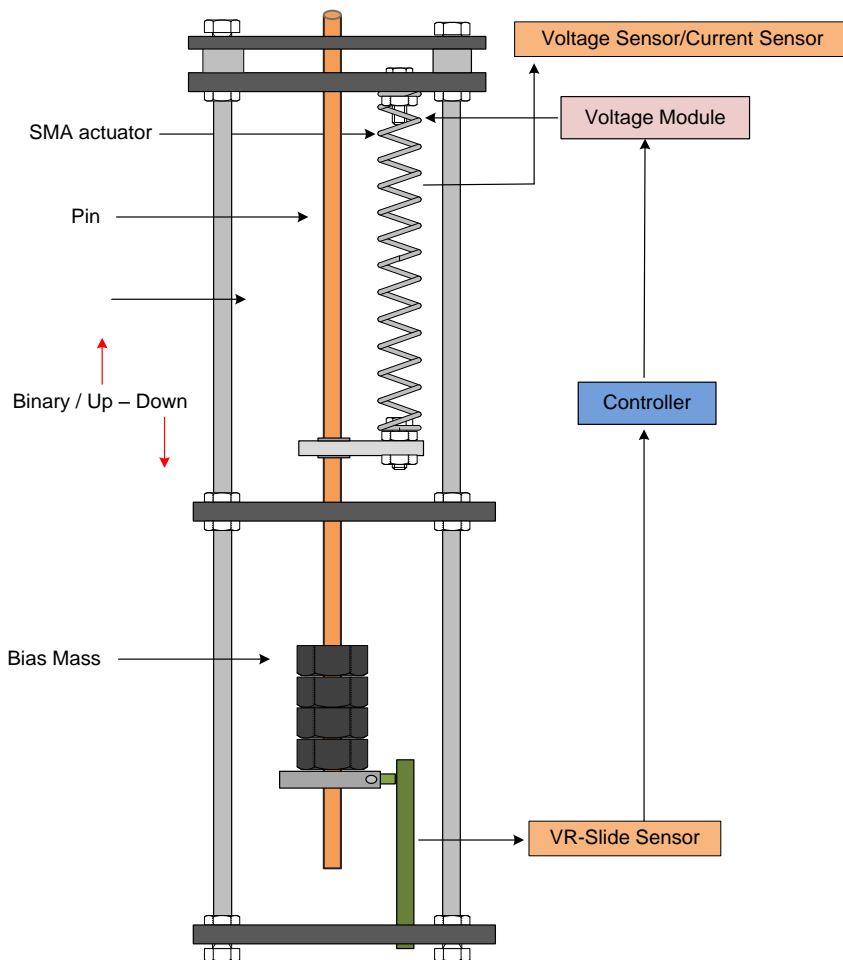
ภาพประกอบ 3-4 ผลการตอบสนองของระยะการเคลื่อนที่เมื่อเวลาเปลี่ยนไป



ภาพประกอบ 3-5 ผลตอบสนองของอุณหภูมิเมื่อเวลาเปลี่ยนไป

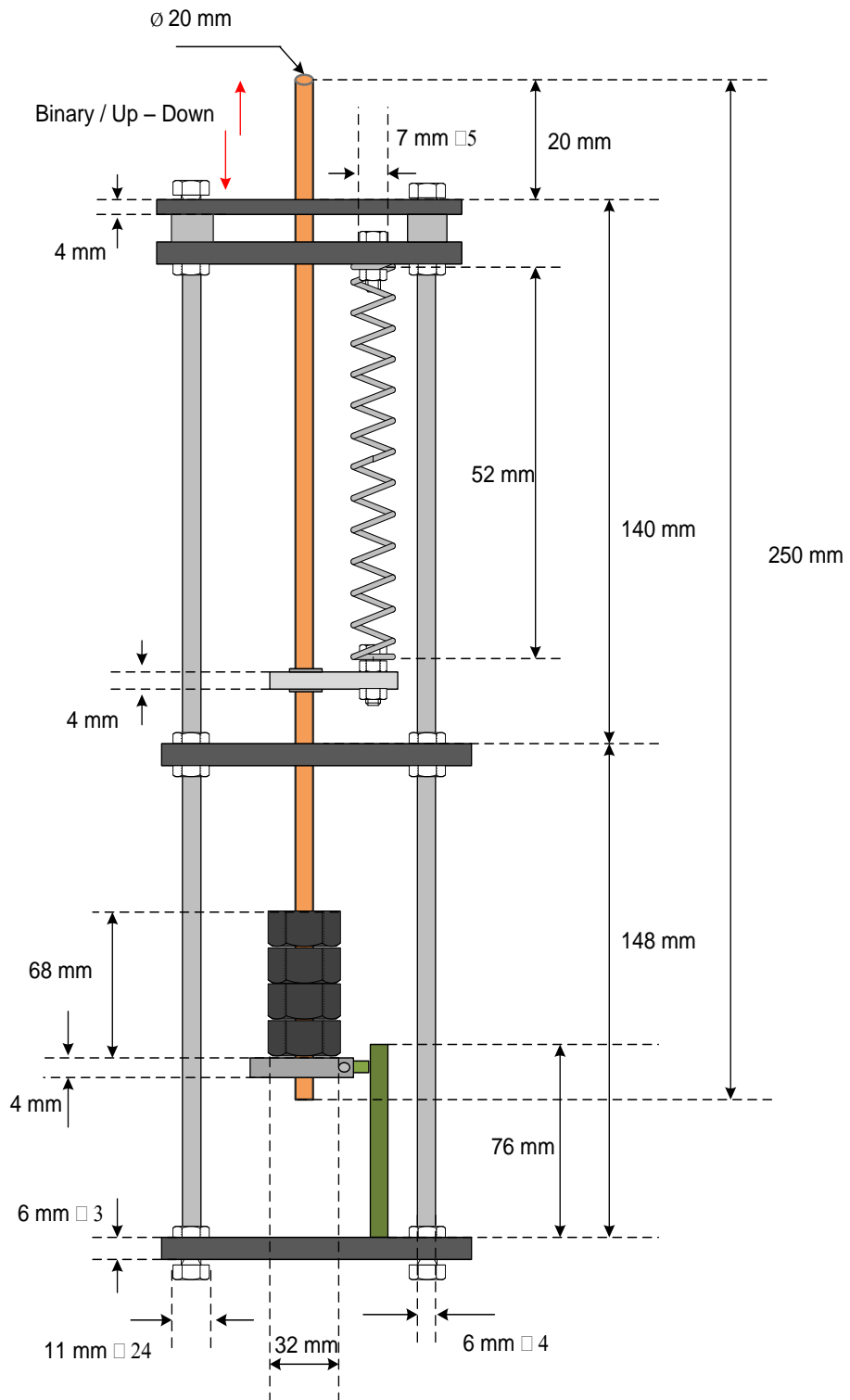
### 3.1.2 การออกแบบทางกล

จากผลการทดลองในหัวข้อ 3.1.1 ทำให้ทราบว่า การออกแบบ SMA Actuator ที่เหมาะสมกับงานวิจัยนี้คือแบบ SMA Actuator with bias ดังนั้นจึงได้ทำการออกแบบในแนวคิดนี้ โดยการออกแบบอุปกรณ์ทั้งหมดสามารถดูได้จากภาพประกอบที่ 3-6

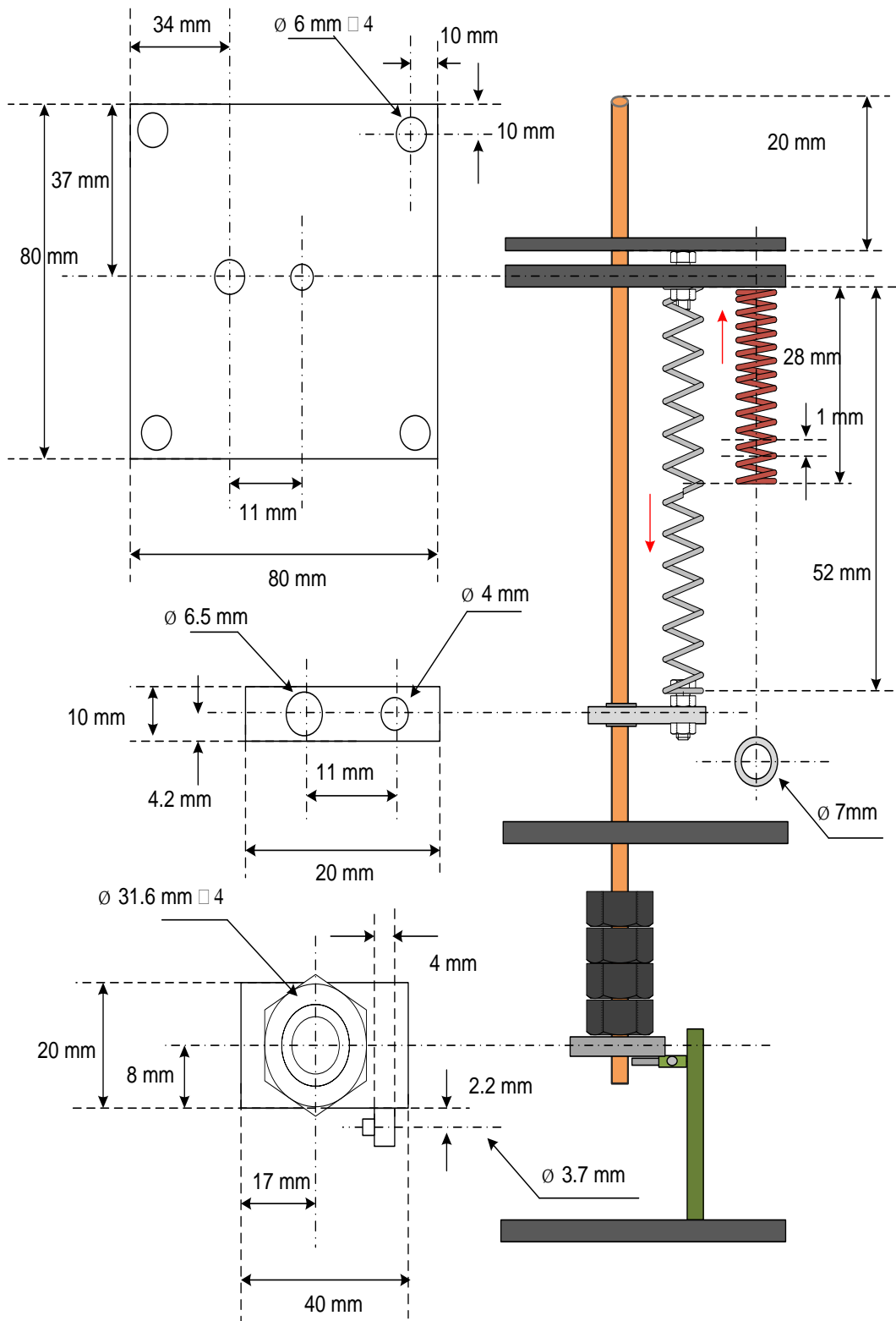


ภาพประกอบ 3-6 ส่วนประกอบโครงสร้างของ SMA actuator ในงานวิจัย

ในส่วนของภาพประกอบที่ 3-6, 3-7 และ 3-8 แสดงการออกแบบส่วนประกอบทั้งหมดของงานวิจัย โดยจะประกอบไปด้วย วงอิเล็กทรอนิกส์ทำหน้าที่ในการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับ SMA actuator ระบบควบคุมสำหรับการควบคุมตำแหน่งของแท่งแสดงผลที่ติดอยู่กับ SMA actuator มีตัว Sensor สำหรับตรวจจับค่าตำแหน่งการเคลื่อนที่ของ SMA actuator และ Bias mass ซึ่งทำหน้าที่ในการให้ SMA เกิดการเปลี่ยนรูป

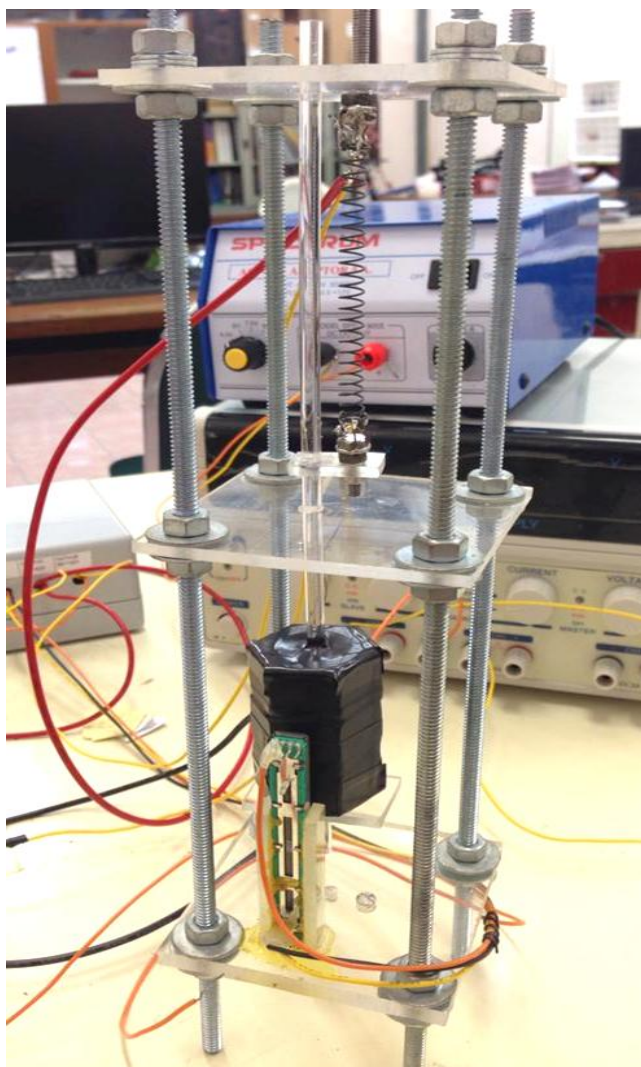


ภาพประกอบ 3-7 การออกแบบอุปกรณ์แสดงผลแบบสัมผัสจากมุมมองด้านข้าง

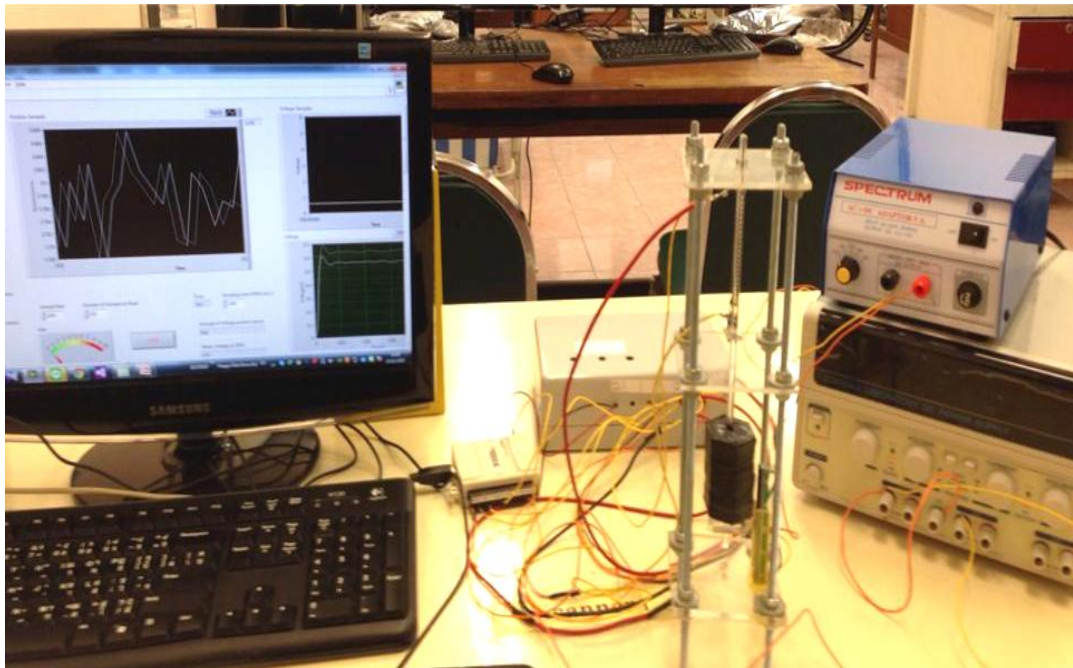


ภาพประกอบ 3-8 การออกแบบอุปกรณ์แสดงผลแบบสัมผัสจากมุมมองด้านบน

จากภาพประกอบที่ 3-9 และ 3-10 แสดงอุปกรณ์แสดงผลแบบสัมผัสโดยใช้ SMA actuator เป็นตัวขับเคลื่อนแท่งแสดงผล โดย คุณสมบัติทางกายภาพ ทางความร้อน และทางกลของ SMA actuator แสดงไว้ในตารางที่ 3-1 การออกแบบระบบการเคลื่อนที่จะขึ้นอยู่กับ Bias mass และจำนวนขดของ SMA สปริง ซึ่งในงานวิจัยได้ออกแบบระบบการเคลื่อนที่สูงสุดของ SMA actuator อยู่ที่ 20 mm ส่วนล่างของแท่งแสดงผล จะติด VR-slider sensor เพื่อตรวจจับตำแหน่งการเคลื่อนสำหรับนำไปใช้ในการควบคุม การควบคุมการทำงานทั้งหมดของ SMA actuator จะใช้โปรแกรม LabVIEW ส่วนการรับค่าจาก Sensor ต่างๆ และการส่งสัญญาณเอาต์พุตสำหรับควบคุมการสร้างสัญญาณ PWM ไปยัง Microcontroller ผ่านตัว Data Acquisition (DAQ) 6009

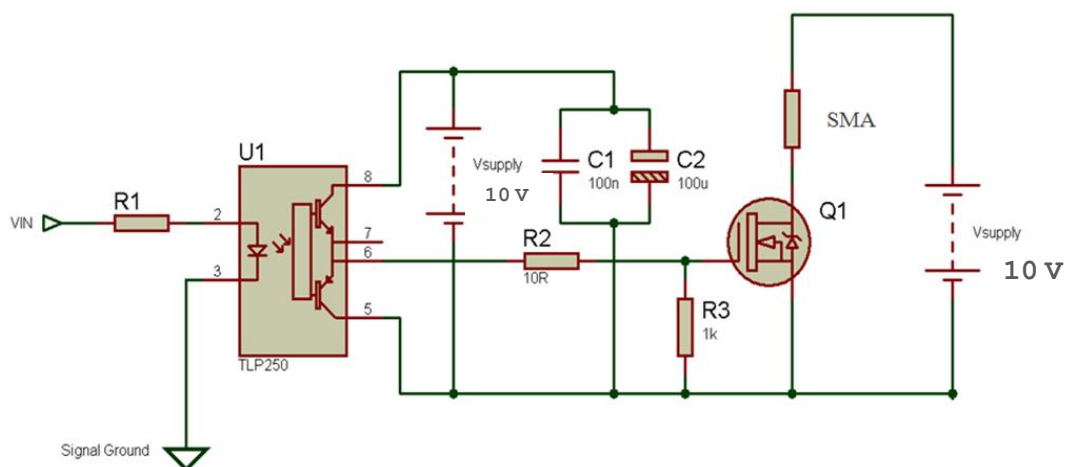


ภาพประกอบ 3-9 อุปกรณ์แสดงผลแบบสัมผัสโดยใช้ SMA Actuator เป็นตัวขับเคลื่อนแท่งแสดงผล



ภาพประกอบ 3-10 ระบบการแสดงผลแบบสัมผัสโดยใช้ SMA actuator  
เป็นตัวขับเคลื่อนแท่งแสดงผล

### 3.1.3 การออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์



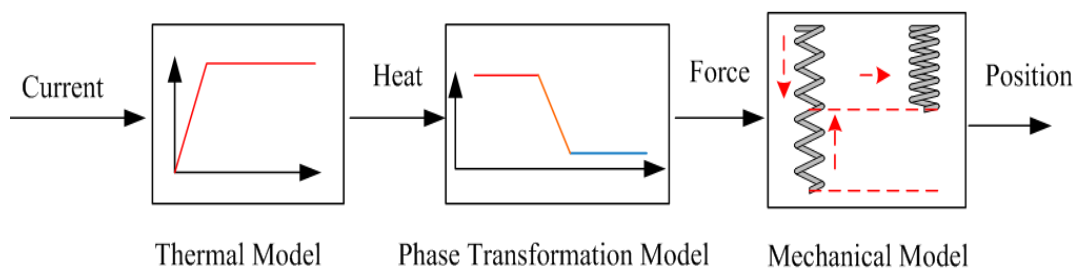
ภาพประกอบ 3-11 วงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับจ่ายไฟให้กับ SMA actuator

การทำงานของวงจรที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับ SMA actuator ดังภาพประกอบ 3-11 ซึ่งจะออกแบบให้วงจรแยกส่วน ระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตออกจากกัน เพื่อป้องกันสัญญาณ

รบกวนที่อาจจะเกิดขึ้นจากระบบควบคุม โดยการแยกส่วนนี้จะใช้ตัว Photocoupler (เบอร์ TLP250) สำหรับเป็น Gate drive ให้กับ Power MOSFET (เบอร์ P65NF06) มีการทำงานดังนี้ โดยเมื่อจ่าย Logic สูง (ON) ไปยังฝั่งอินพุตของ Photocoupler จะทำให้ขา Base ได้รับการไบอัส ทำให้ทรานซิสเตอร์นำกระแส ซึ่งแรงดันเอาต์พุตจาก Photocoupler จะไปไบอัสขา Gate ของ MOSFET ทำให้มีกระแสจากแหล่งจ่ายแรงดัน 10 V ไหลผ่านไปขับโหลดซึ่งเป็นตัว SMA และไหลต่อจากขา Drain ไปยังขา Source และเมื่อมีการจ่าย Logic ต่ำ (OFF) ไปยังฝั่งอินพุตของ Photocoupler จะทำให้ขา Base ไม่ได้รับการไบอัส ทำให้ทรานซิสเตอร์ของตัว Photocoupler ไม่นำกระแส ส่งผลให้ไม่มีแรงดันไปไบอัสขา Gate ของ MOSFET ทำให้ไม่มีกระแสไหลผ่านขา Drain ไปยังขา Source และไม่มีกระแสไหลผ่านไปขับตัว SMA ด้วย

### 3.2 การสร้างแบบจำลอง

ในส่วนของการสร้างแบบจำลองของ SMA actuator ได้มีงานวิจัยที่พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมของ SMA แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและคุณสมบัติทางกลของ SMA ตามทฤษฎีในบทที่ 2 โดยการจำลองการทำงานของแบบจำลองต่างๆ จะใช้โปรแกรม MATLAB (Simulink) แบบจำลองของ SMA actuator ประกอบไปด้วย แบบจำลองทางความร้อน ซึ่งเกิดจากกระแสไฟฟ้าถ่ายโอนพลังงานไปเป็นความร้อน ได้เป็นค่าของอุณหภูมิ ต่อมาเป็นแบบจำลองของการเปลี่ยนเฟส ซึ่งการเปลี่ยนเฟสหรือเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ SMA เป็นผลมาจากความร้อน (อุณหภูมิ) ที่เปลี่ยนแปลงไปทำให้ SMA มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และสุดท้ายเป็นแบบจำลองทางกล ซึ่งเมื่อ SMA มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทำให้เกิดแรงส่งผลให้ SMA actuator มีการเคลื่อนที่ได้เป็นระยะการเคลื่อนที่ ทั้งนี้เพื่อให้ผลตอบแทนมีประสิทธิภาพดีขึ้น จึงใช้ PI controller ร่วมกับ PWM โดยใช้การควบคุมแบบป้อนกลับของตำแหน่ง [3] ในหัวข้อการควบคุม SMA actuator



ภาพประกอบ 3-12 แบบจำลองต่างๆของ SMA actuator



จากการออกแบบ SMA actuator ตามหัวข้อ 3.1 และแบบจำลองของ SMA actuator ตามหัวข้อ 2.2 ในบทที่ 2 นำค่าตัวแปรต่างๆที่ได้ออกแบบไว้ มาคำนวณหาค่าคุณสมบัติทางกลและทางความร้อน เพื่อจำลองการทำงานของ SMA actuator ได้ดังนี้

ความยาวของลวด SMA ที่นำมาทำเป็นสปริง

$$L = n\sqrt{P^2 + (\pi D)^2} \quad (3-1)$$

$$L = 20\sqrt{0.5^2 + (\pi \times 8)^2}$$

$$L = 502.754 \text{ mm}$$

พื้นที่ผิวสัมผัสของสปริง SMA

$$A = \pi dL \quad (3-2)$$

$$A = \pi \times 0.5 \times 502.754 \text{ mm}$$

$$A = 789.72 \text{ mm}^2$$

ปริมาตรของลวดที่นำมาทำเป็นสปริง SMA

$$V = \frac{\pi d^2}{4} L \quad (3-3)$$

$$V = \frac{\pi \times 0.5^2}{4} (789.72)$$

$$V = 98.7 \text{ mm}^3$$

จากการคำนวณเราได้ค่าคุณสมบัติทางกลของ SMA actuator ที่ใช้ในงานวิจัย โดยความยาวของลวด SMA ที่นำมาทำเป็นสปริง 502.754 มิลลิเมตร พื้นที่ผิวสัมผัสของสปริง SMA 789.72 ตารางมิลลิเมตร ปริมาตรของลวดที่นำมาทำเป็นสปริง SMA 98.7 ลูกบาศก์มิลลิเมตร

ตารางที่ 3-1 คุณสมบัติทางกายภาพ ทางความร้อน และทางกลของวัสดุ SMA ที่ใช้เป็น Actuator

Properties	Value	Unit
Density ( $\rho$ )	4.5	$g/cm^3$
Volume ( $V$ )	98.7	$mm^3$
Convection surface ( $A$ )	789.72	$mm^2$
Transformation temperatures Austenite start ( $A_s$ )	50	$^{\circ}C$
Transformation temperatures Austenite finish ( $A_f$ )	80	$^{\circ}C$
Electrical resistance ( $r$ )	76	$\mu\Omega - cm$
Wire's diameter ( $d$ )	0.5	$mm$
Mean coil diameter ( $D$ )	8	$mm$
Active coils ( $n$ )	20	<i>turn</i>
Mass ( $m$ )	0.191	$kg$
Elastic module tensor ( $E$ )	31.2	$GPa$
Coefficient tensor ( $\Omega$ )	69.75	$MPa$

### 3.2.1 แบบจำลองทางความร้อน

จากการศึกษาแบบจำลองทางความร้อนในบทที่ผ่านมา สามารถนำสมการ Transfer function มาจำลองการทำงาน เพื่อหาผลตอบสนองได้ดังนี้

$$T(s) = \frac{\lambda}{(\tau s + 1)} Q(s) + \frac{1}{(\tau s + 1)} T_A(s) \quad (3-4)$$

โดยที่  $Q(s)$  คืออินพุต  $T_A(s)$  คือสัญญาณรบกวน และ  $T(s)$  คือเอาต์พุต สามารถคำนวณค่าคงที่  $\lambda$  และ  $\tau$  ได้จาก

$$\tau = \frac{\rho CV}{hA} \quad (3-5)$$

$$\tau = \frac{\left(4.5 \frac{g}{cm^3}\right) \times \left(0.2 \frac{J}{g \cdot c}\right) \times (98.7 \times 10^{-3} cm^3)}{\left(12 \frac{W}{m^2 \cdot c}\right) \times (789.72 \times 10^{-6} m^2)}$$

$$\tau = 3.282 s$$

$$\lambda = \frac{1}{hA} \quad (3-6)$$

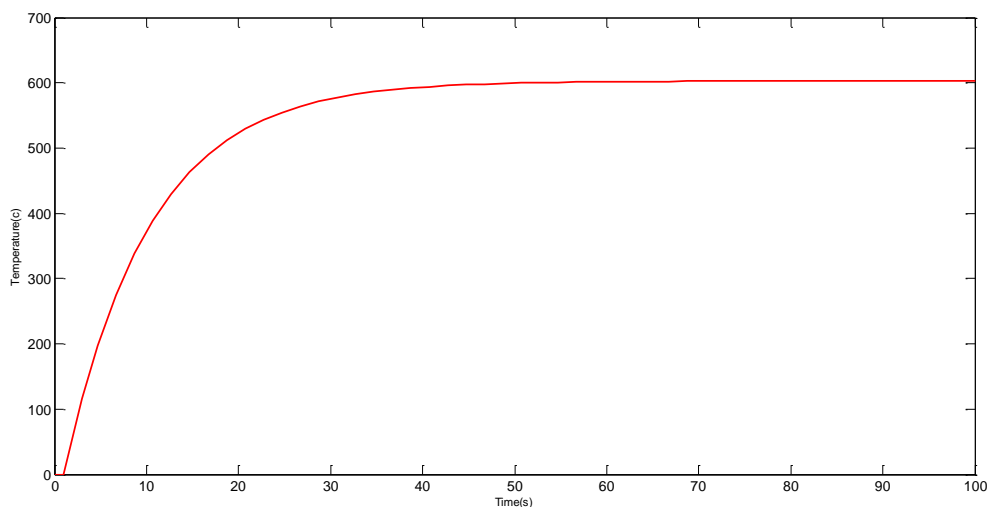
$$\lambda = \frac{1}{\left(6 \frac{W}{m^2 \cdot C}\right) \times (789.72 \times 10^{-6} m^2)}$$

$$\lambda = 211.045 \text{ } ^\circ\text{C/w}$$

เมื่อไม่คิดผลของอุณหภูมิภายนอก  $T_A(s)$  จะได้ว่า

$$\frac{T(s)}{Q(s)} = \frac{211.045}{3.282s + 1}$$

เมื่อได้สมการ Transfer function ของแบบจำลองทางความร้อน จากนั้นนำไปจำลองการทำงานเพื่อหาผลตอบสนอง โดยใช้ Step input จำลองผ่านโปรแกรม Matlab (Simulink) ได้ผลตอบสนองของอุณหภูมิตามเวลาดังภาพประกอบที่ 3-13 จากผลตอบสนองจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่ SMA จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มให้ความร้อน แต่เมื่อเวลาผ่านไปถึงช่วงหนึ่ง อุณหภูมิจะค่อยๆคงที่



ภาพประกอบ 3-13 ผลตอบสนองของแบบจำลองทางความร้อน

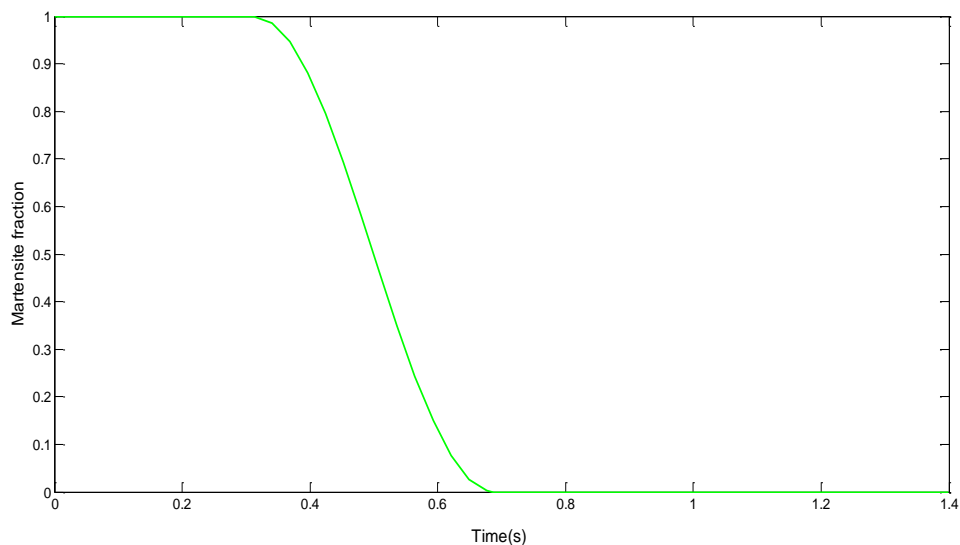
### 3.2.2 แบบจำลองของการเปลี่ยนเฟส

จากการศึกษาแบบจำลองของการเปลี่ยนเฟสในบทที่ผ่านมา สามารถนำสมการมาจำลองการทำงานโดยมีรูปแบบการเปลี่ยนเฟสตามสมการ (3-7) และสามารถดูผลของการจำลองตามภาพประกอบที่ 3-9

$$\begin{aligned} \xi(T) &= 0 && \text{for } T > A_f \\ \xi(T) &= \frac{1}{2} \left[ \cos \left( \pi \frac{T - A_s}{A_f - A_s} \right) + 1 \right] && \text{for } A_s < T < A_f \\ \xi(T) &= 1 && \text{for } T < A_s \end{aligned} \quad (3-7)$$

โดยที่  $A_f = 80^\circ\text{C}$  และ  $A_s = 50^\circ\text{C}$

จากการจำลองการทำงานของแบบจำลองของการเปลี่ยนเฟส ดังภาพประกอบที่ 3-14 สามารถอธิบายได้ว่า ขณะที่อุณหภูมิของ SMA มีค่าน้อยกว่า  $50^\circ\text{C}$  จะอยู่ในช่วงของเฟสอุณหภูมิต่ำหรือขณะที่ SMA ยังไม่มีการเปลี่ยนรูป การเปลี่ยนเฟสของ SMA (Martensite fraction) มีค่าเท่ากับ 1 และเมื่ออุณหภูมิของ SMA มีค่ามากกว่า  $80^\circ\text{C}$  จะอยู่ในช่วงของเฟสอุณหภูมิสูง โดยช่วงนี้ SMA จะเปลี่ยนรูปร่างเสร็จสมบูรณ์ Martensite fraction จะมีค่าเท่ากับ 0 โดยช่วงระหว่างที่ค่า Martensite fraction มีค่าจาก 0 ถึง 1 เป็นช่วงที่ SMA กำลังเปลี่ยนรูปอยู่นั่นเอง โดยจากผลตอบสนองของแบบจำลองการเปลี่ยนเฟสของ SMA จะใช้เวลาเปลี่ยนเฟสประมาณ 0.7 วินาที



ภาพประกอบที่ 3-14 ผลตอบสนองของแบบจำลองของการเปลี่ยนเฟส

### 3.2.3 แบบจำลองทางกล

จากแบบจำลองทางกลของ SMA actuator ในหัวข้อที่ 2.2 ของบทที่ 2 สามารถนำมาจำลองการทำงานเพื่อหาผลตอบสนอง โดยมีสมการ Transfer function ดังนี้

$$\frac{x(s)}{\xi(s)} = \frac{-B}{ms^2 + cs + A} \quad (3-8)$$

โดยที่

$$A = \frac{d^4 E}{8nD^3} \quad (3-9)$$

$$A = \frac{(0.5 \times 10^{-3})^4 m^4 \times (31.2 \times 10^9) \frac{N}{m^2}}{(8 \times 20 \times 8 \times 10^{-3}) m^3}$$

$$A = 23.80 \text{ N/m}$$

$$B = -\frac{\pi d^3 \Omega}{8D} \quad (3-10)$$

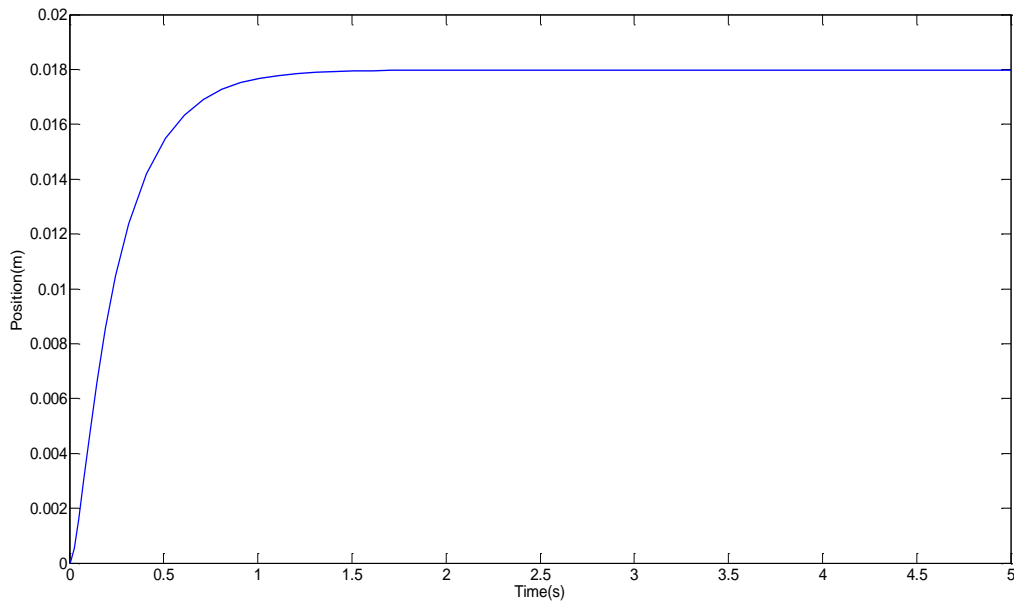
$$B = \frac{(\pi) \times (0.5 \times 10^{-3})^3 m^3 \times (-69.75 \times 10^6) \frac{N}{m^2}}{(8 \times 8 \times 10^{-3}) m}$$

$$B = -0.428 \text{ N}$$

เพราะฉะนั้น

$$\frac{x(s)}{\xi(s)} = \frac{0.428}{0.191 + 6.5s + 23.80}$$

จากสมการ Transfer function ของแบบจำลองทางกล อินพุตของแบบจำลองคือการเปลี่ยนเฟส (Martensite fraction) เอาต์พุตคือระยะการเคลื่อนที่ เมื่อทราบค่าของสมการ Transfer function สามารถนำไปจำลองการทำงานเพื่อหาผลตอบสนองโดยใช้ Step input จำลองผ่านโปรแกรม Matlab (Simulink)

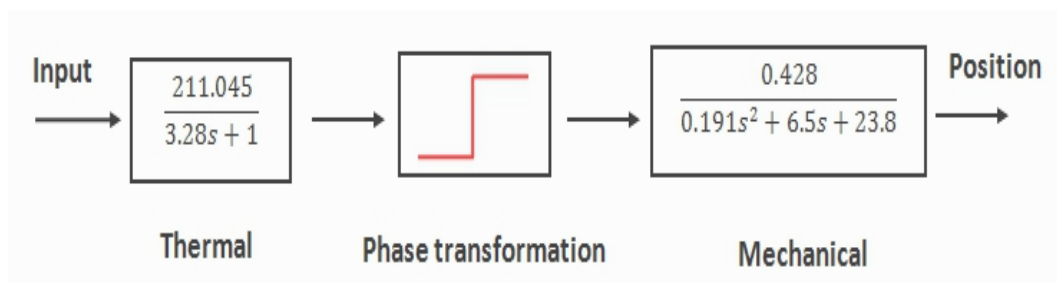


ภาพประกอบที่ 3-15 ผลตอบสนองของแบบจำลองทางกล

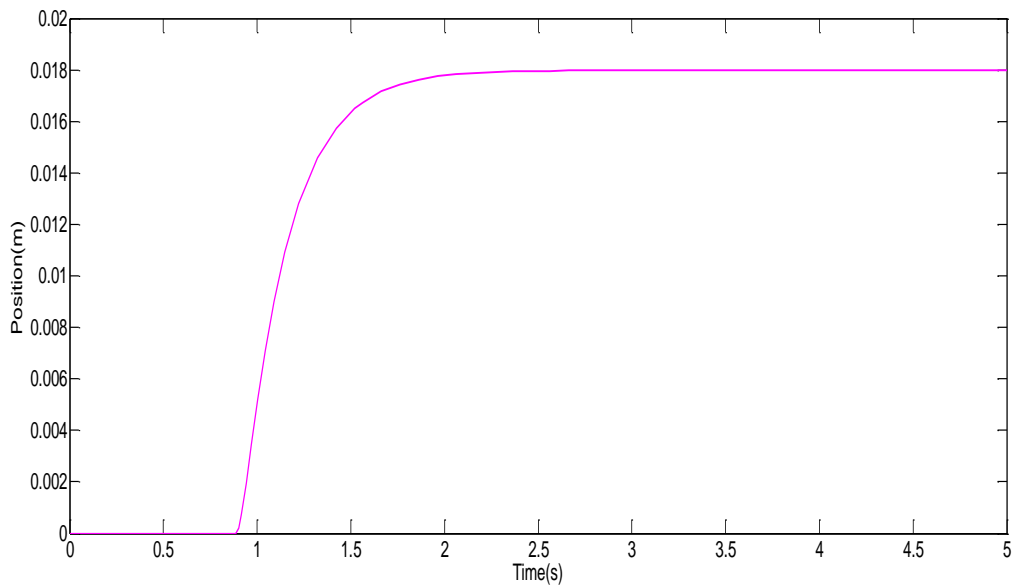
### 3.2.4 การรวม 3 แบบจำลองและการควบคุม SMA actuator

#### 3.2.4.1 การรวม 3 แบบจำลอง

หลังจากจำลองการทำงาน เพื่อหาผลตอบสนองแบบจำลองต่างๆของ SMA actuator จากนั้นนำแบบจำลองทั้ง 3 มารวมกัน เพื่อดูผลตอบสนองของ SMA actuator เราจะได้รูปแบบของแบบจำลองของ SMA actuator ตามภาพประกอบ 3-16



ภาพประกอบที่ 3-16 บล็อกไดอะแกรมแสดงการจำลองการทำงานของ SMA actuator

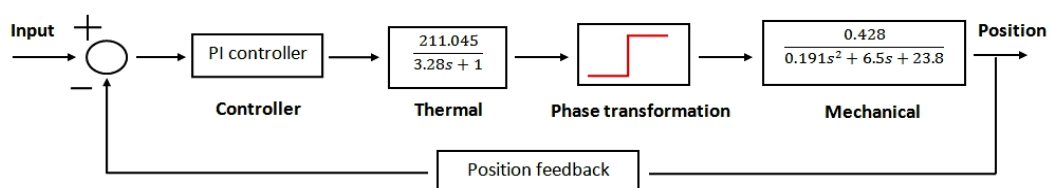


ภาพประกอบที่ 3-17 ผลตอบสนองจากการรวม 3 แบบจำลองของ SMA actuator

จากการจำลองการทำงานของ SMA actuator สามารถอธิบายพฤติกรรมของลักษณะผลตอบสนองได้ว่า เมื่อจ่ายแรงดันเพื่อให้ความร้อนแก่ SMA จะมีช่วงเวลาที่รอให้ค่าของอุณหภูมิไปถึงจุดที่ SMA เริ่มเปลี่ยนรูป (Activation time) ใช้เวลาประมาณ 0.9 วินาที และเมื่อ SMA มีการเปลี่ยนรูปทำให้เกิดระยะการเคลื่อนที่ โดยระบบจะเข้าสู่สภาวะคงที่ในเวลาประมาณ 2.5 วินาที โดยผลการตอบสนองของ SMA actuator ไม่มีการพุ่งเกิน เป็นผลตอบสนองของระบบที่มีการหน่วงสูงกว่าจุดวิกฤตหรือหน่วงเกิน (Overdamped response)

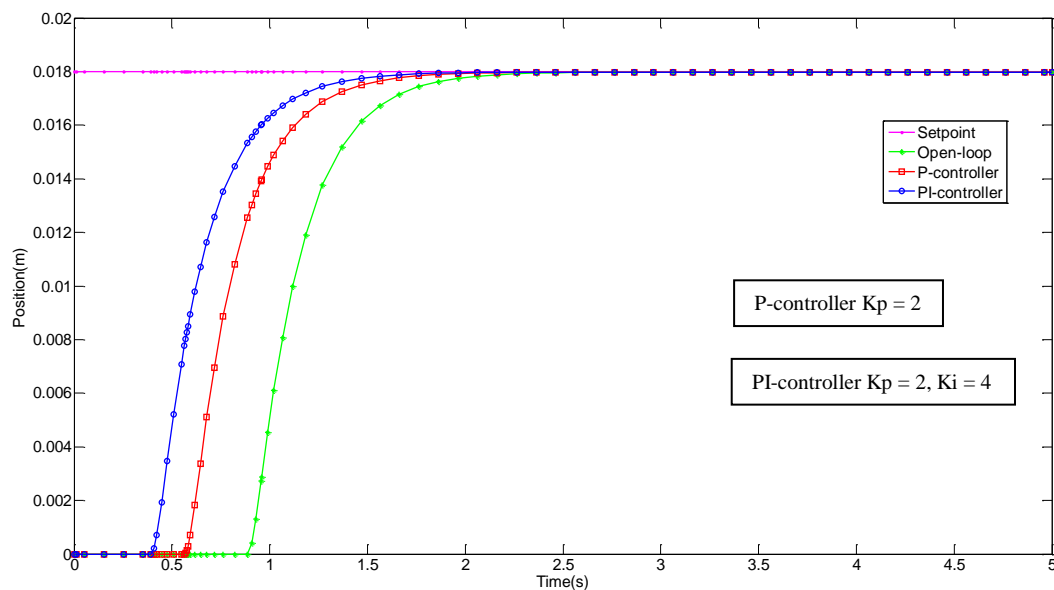
### 3.2.4.2 การควบคุม SMA actuator

เมื่อจำลองการทำงานของ SMA actuator จนทำให้เราทราบถึงรูปแบบการตอบสนอง เพื่อให้ผลตอบสนองมีประสิทธิภาพดีขึ้นตามที่เราต้องการ เราจึงต้องใช้ระบบควบคุมกับ SMA actuator ซึ่งบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมเมื่อนำมารวมกับแบบจำลองทั้ง 3 ของ SMA actuator สามารถดูได้จากภาพประกอบ 3-18



ภาพประกอบที่ 3-18 การควบคุม SMA actuator โดยใช้ PI controller

จากทฤษฎีการควบคุมในบทที่ 2 ตัวแปรที่เหมาะสมในการนำมาใช้ป้อนกลับสำหรับการควบคุมคือตำแหน่งการเคลื่อนที่ ดังนั้นการป้อนค่ากลับสำหรับการควบคุม SMA actuator จึงใช้การป้อนกลับตำแหน่ง (Position feedback) เมื่อพิจารณาผลตอบสนองของ SMA actuator ที่มีการหน่วงสูงกว่าจุดวิกฤต ในงานวิจัยจึงเลือกใช้ตัวควบคุมที่ช่วยให้ระบบมีการตอบสนองที่เร็วขึ้น ซึ่งตัวควบคุมที่จะช่วยในเรื่องนี้ได้คือ P-controller และเพื่อช่วยในการลดความผิดพลาดของตำแหน่งในสภาวะคงตัว งานวิจัยจึงเลือกใช้ PI-controller โดยผลตอบสนองจากการจำลองการทำงานของตัวควบคุมแบบต่างแสดงตามภาพประกอบที่ 3-19



ภาพประกอบที่ 3-19 ผลตอบสนองจากการจำลองของ SMA actuator ที่ใช้ตัวควบคุมแบบต่างๆ

จากผลตอบสนองการจำลองการทำงานของตัวควบคุมแบบต่างๆ จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ตัวควบคุมจะทำให้ผลตอบสนองเร็วขึ้น ส่งผลให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวได้เร็วขึ้นตามไปด้วย แต่ลักษณะของการตอบสนองที่ใช้ตัวควบคุมจะไม่มีอาการฟุ้งเกิน ในส่วนของช่วงขาของตำแหน่งจะใช้เวลานานกว่าช่วงขาขึ้นมาก เราจึงได้ออกแบบการระบายความร้อน เพื่อช่วยให้ขาลงเร็วขึ้น ซึ่งได้อธิบายไว้ในบทที่ 4 โดยประสิทธิภาพของตัวควบคุมแต่ละแบบสามารถดูได้จากตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบควบคุม SMA actuator แบบต่างๆ

	Open-loop	P control	PI control
Activation time(s)	0.8869	0.5639	0.4073
Rise time(s)	0.6548	0.6530	0.5091
Settling time(s)	1.663	1.3699	1.1829



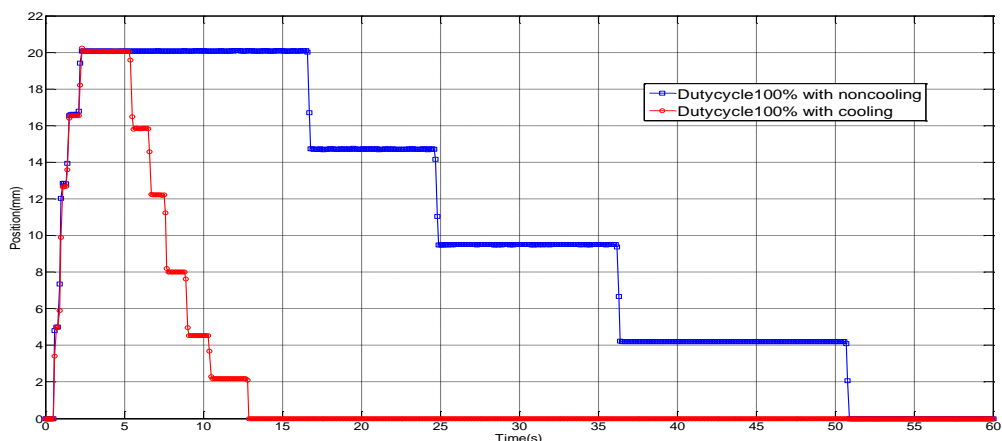
## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

ในบทนี้จะแสดงผลการทดลองของ SMA actuator ซึ่งจะเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลจากแบบจำลอง โดยจะเริ่มจากการกำหนด Setpoint ระยะเวลา แล้วใช้ตัวควบคุมแบบต่างๆ จากนั้นนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกัน ต่อจากนั้นเป็นการกำหนด Setpoint หลายระยะในรูปแบบของขั้นบันได (Multi-step) แล้วเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างแบบที่ใช้ตัวควบคุมกับแบบที่ไม่ใช้ตัวควบคุม

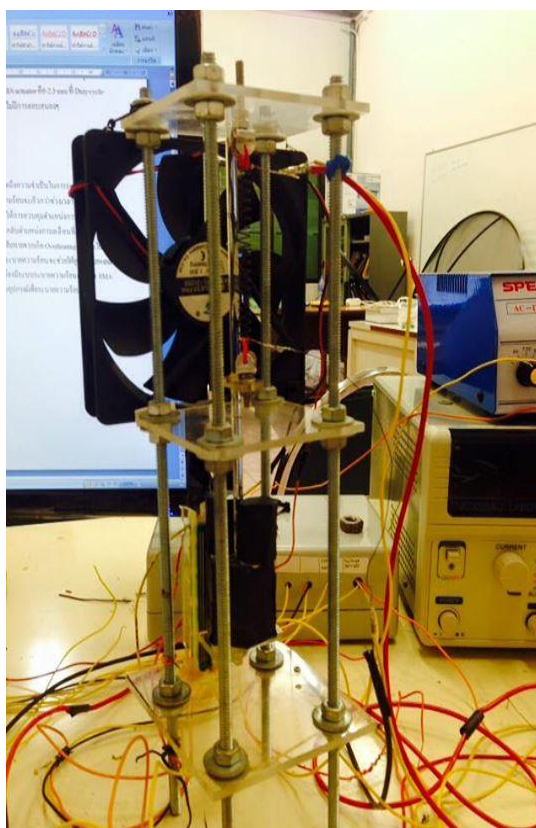
#### 4.1 การระบายความร้อนของ SMA actuator

จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งมีการพูดถึงความจำเป็นในการระบายความร้อนสำหรับ SMA actuator เนื่องจากจากช่วงเวลาในการให้ความร้อนจะเร็วกว่าช่วงเวลาในการระบายความร้อนมาก ทำให้เกิดช่วงของ Hysteresis กว้าง นั้นทำให้การควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของ SMA actuator เป็นไปได้ยากมากขึ้น รวมไปถึงการป้อนกลับตำแหน่งการเคลื่อนที่ ทำให้เราไม่สามารถทราบค่าอุณหภูมิที่ตัว SMA อันจะทำให้ SMA เสียหายจากเกิด Overheating ได้ และในการใช้งานอุปกรณ์แสดงผลแบบสัมผัส การลดเวลาในการระบายความร้อน จะช่วยให้อุปกรณ์แสดงผลได้เร็วยิ่งขึ้น จากเหตุผลที่กล่าวมานั้น ทำให้เราจำเป็นต้องมีระบบระบายความร้อนสำหรับ SMA actuator



ภาพประกอบ 4-1 ผลการทดลองของ SMA actuator ที่ใช้กับไม่ใช้การระบายความร้อน

จากผลการทดลองของ SMA actuator ที่ใช้กับไม่ใช้การระบายความร้อน ตามภาพประกอบที่ 4-1 จะเห็นได้ว่าเมื่อนำการระบายความร้อนมาใช้ในการควบคุม SMA actuator สามารถลดเวลาในการระบายความร้อนที่จากเดิมอยู่ที่ 48 วินาที ให้เหลือเพียงแค่ 10 วินาที โดยในงานวิจัยจะใช้พัลลวมขนาดเล็ก (1.8 W) มาติดตั้งกับอุปกรณ์แสดงผลเพื่อระบายความร้อนตามภาพประกอบ 4-2

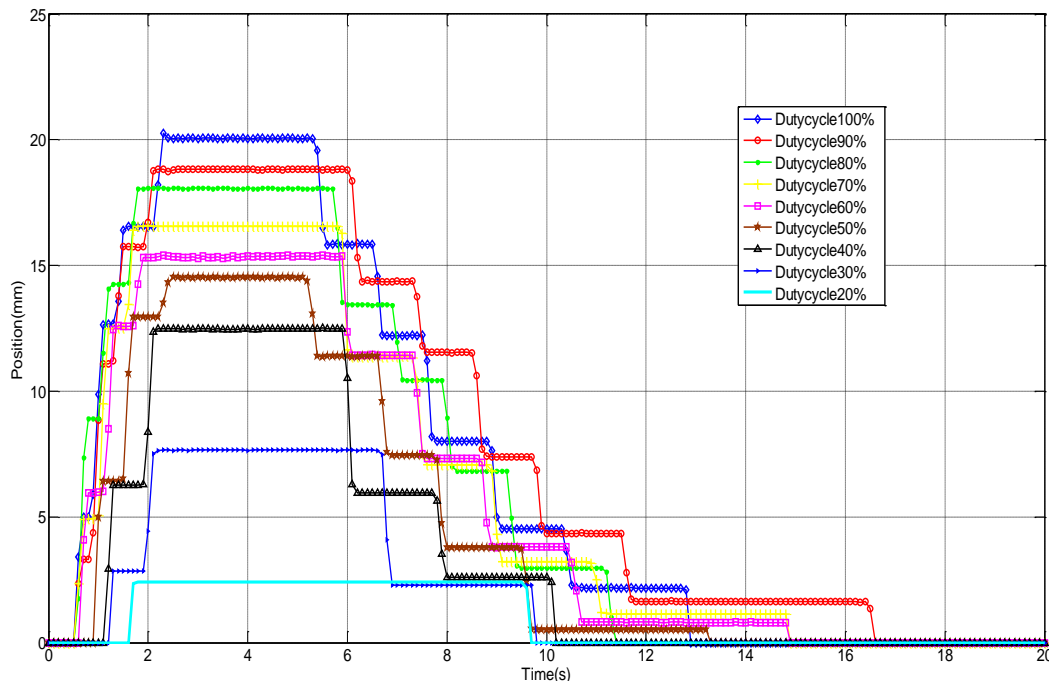


ภาพประกอบ 4-2 อุปกรณ์แสดงผลแบบสัมผัสที่ติดตั้งการระบายความร้อน

#### 4.2 การทดลองเบื้องต้น

จากทฤษฎีการควบคุม SMA actuator ในบทที่ 2 การควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของ SMA actuator โดยใช้ PI controller และการจ่ายแรงดันแบบ PWM (Pulse Width Modulation) ขั้นตอนแรกเราจะทดลอง SMA actuator แบบ open-loop เพื่อนำไปกำหนดค่าตัวแปรต่างๆของ

PWM และ PI controller ให้เหมาะสมกับการควบคุม ผลการทดลองของ SMA actuator แบบ Open-loop ที่ Duty cycle ต่างๆ สามารถดูได้ในภาพประกอบที่ 4-3



ภาพประกอบ 4-3 ผลตอบสนองของ SMA actuator ทดลองแบบ Open-loop ที่ Duty cycle ต่างๆ

จากผลการทดลอง SMA actuator แบบ Open-loop ที่ Duty cycle ต่างๆ ตามภาพประกอบ 4-3 การจ่ายกระแสแบบ PWM ใช้ความถี่ของ PWM เท่ากับ 100 Hz เวลาที่จ่าย 3 วินาที แรงดันจากแหล่งจ่าย 10 V ใช้การระบายความร้อนเมื่อเลิกจ่ายแรงดัน โดยจะเริ่มทดลองจาก Duty cycle 100 % แล้วลด Duty cycle ครั้งละ 10 % ตามลำดับ จนกระทั่ง SMA actuator ไม่ตอบสนอง จากผลการทดลอง ที่ Duty cycle 100% จะได้ตำแหน่งการเคลื่อนที่สูงสุด 20.25 mm เมื่อลด Duty cycle จะทำให้ตำแหน่งการเคลื่อนที่ลดลงตามไปด้วย ตำแหน่งการเคลื่อนที่ต่ำสุดของ SMA actuator คือ 2.42 mm ที่ Duty cycle 20% และเมื่อลด Duty cycle ต่ำกว่า 20 % SMA actuator จะไม่มีการตอบสนอง โดยสามารถดูผลตอบสนองของตำแหน่งที่ Duty cycle ต่างๆ ได้ในตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ผลตอบสนองของตำแหน่งที่ Duty cycle ต่างๆ

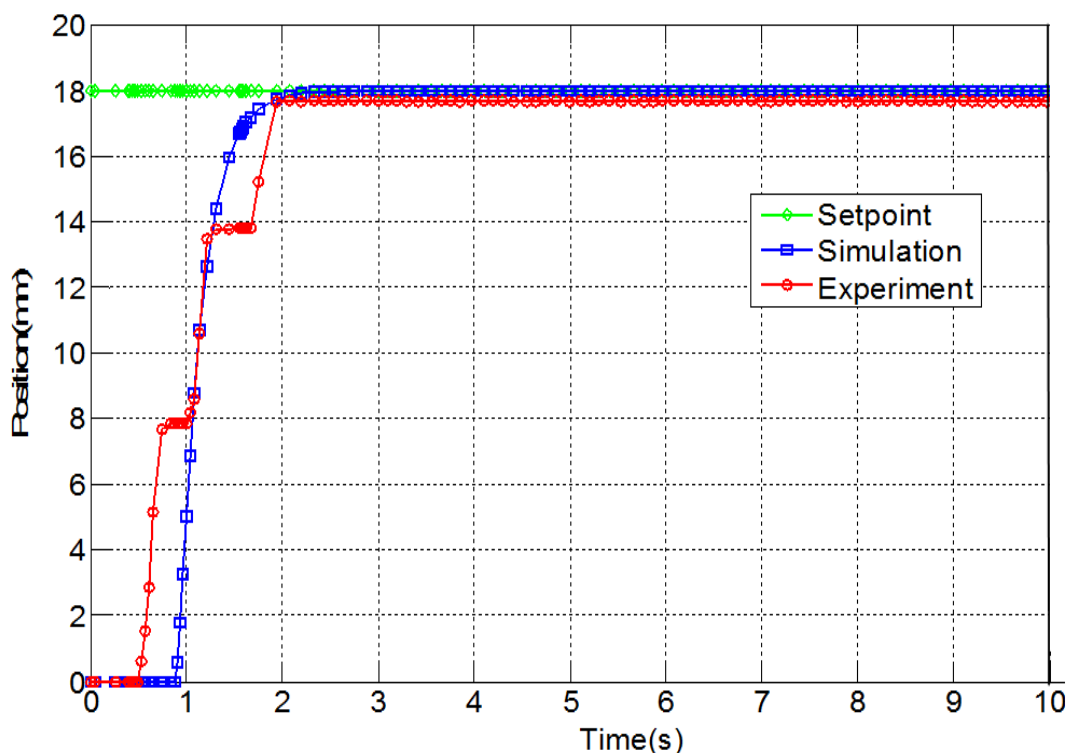
Duty cycle (%)	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
Position (mm)	20.25	18.84	18.08	16.58	15.41	14.54	12.50	7.66	2.42	0

#### 4.3 การควบคุม SMA actuator โดยใช้ PI-controller ร่วมกับ PWM

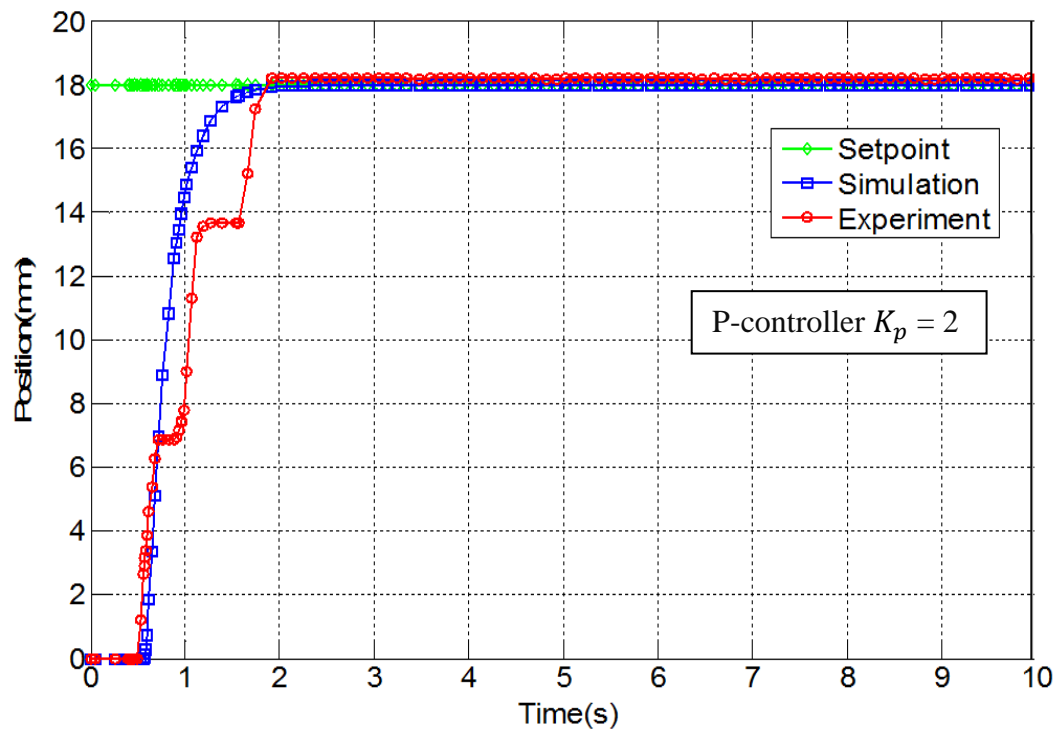
จากหัวข้อการควบคุม SMA actuator ในบทที่ 3 ทำให้ทราบถึงเหตุผลของการใช้ P และ PI-controller ในการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของ SMA actuator โดยการนำ P และ PI-controller มาใช้ร่วมกับ PWM ขั้นตอนแรกเมื่อเราทราบผลตอบสนองของตำแหน่งที่ Duty cycle ต่างๆ ทำให้เราสามารถเปรียบเทียบค่าเอาต์พุตที่ออกมาจาก Controller กับ Duty cycle ของ PWM ซึ่งการกำหนดค่า Saturation ของ Controller ตั้งไว้ให้สอดคล้องกับ Duty cycle ของ PWM

##### 4.3.1 การควบคุม SMA actuator ระยะเวลาเดียว

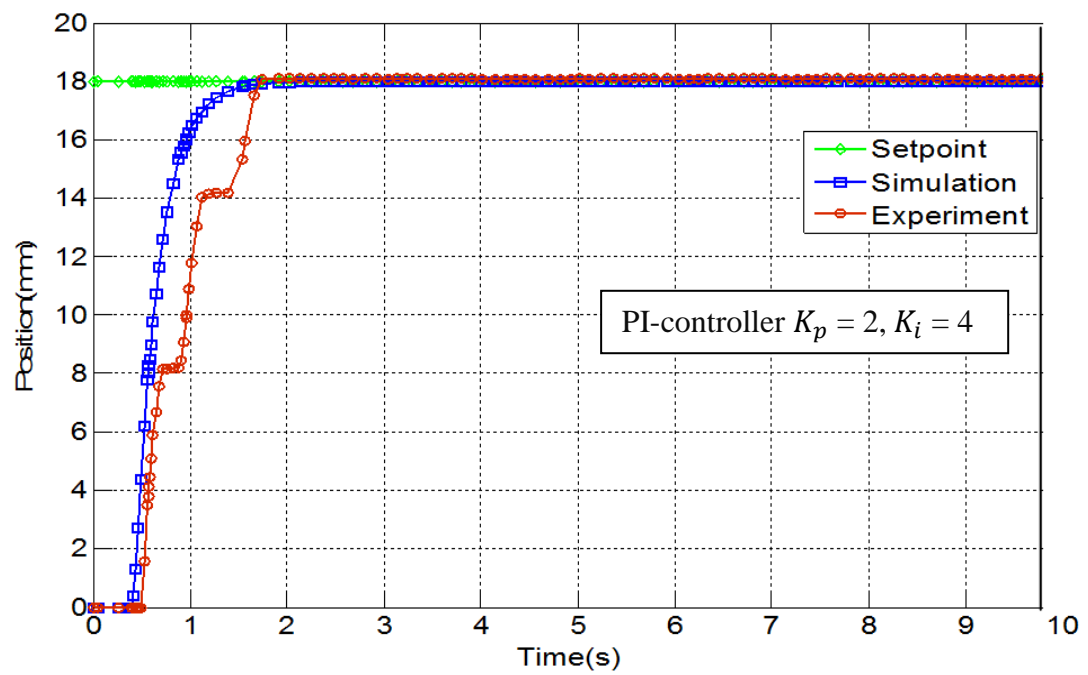
ในงานวิจัยได้ออกแบบให้ SMA actuator เคลื่อนที่ได้สูงสุดที่ 20 mm สำหรับการควบคุม SMA actuator สามารถกำหนด Setpoint ตั้งแต่ 2.5 ถึง 20 mm โดยในการควบคุมระยะเดียว จะกำหนด Setpoint ไว้ที่ 18 mm การควบคุมจะใช้ P-controller มีค่า  $K_p=2$  และ PI-controller มีค่า  $K_p=2$  และ  $K_i=4$  ผลตอบสนองแสดงตามภาพประกอบ 4-4 ถึง 4-7



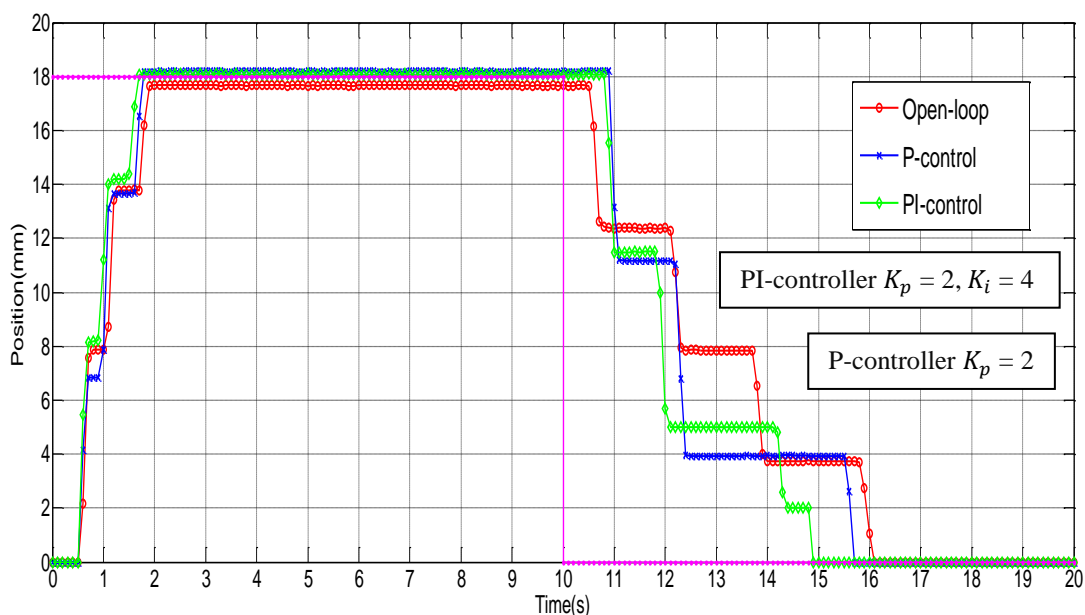
ภาพประกอบ 4-4 ผลตอบสนองของ SMA actuator โดยการทดลองแบบ Open-loop



ภาพประกอบ 4-5 ผลตอบสนองของ SMA actuator โดยใช้ P-control



ภาพประกอบ 4-6 ผลตอบสนองของ SMA actuator โดยใช้ PI-control



ภาพประกอบ 4-7 เปรียบเทียบผลตอบสนองของ SMA actuator ที่ใช้การควบคุมแบบต่างๆ

จากผลตอบสนองของ SMA actuator เมื่อเปรียบเทียบผลจากการทดลองกับผลจากแบบจำลองการทำงานพบว่า ผลจากแบบจำลองระยะการเคลื่อนที่ของ SMA actuator จะได้ขึ้นในลักษณะ Step เดียว ในการเข้าหา Setpoint แต่ผลจากการทดลองจะได้ขึ้นในลักษณะหลาย Step เนื่องจากคุณลักษณะทางกลของ SMA สปริง คือเมื่อแรงดันที่ตกคร่อม SMA มีค่ามากจะทำให้อุณหภูมิที่ SMA เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้การเปลี่ยนรูปเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว นั้นส่งผลให้ระยะการเคลื่อนที่ของ SMA ได้ขึ้นเร็วจนมองเห็นเป็น Step เดียว แต่เมื่อแรงดันตกคร่อม SMA มีค่าน้อยลงจะทำให้การเปลี่ยนรูปเกิดขึ้นช้าลง ส่งผลให้ระยะการเคลื่อนที่ได้ขึ้นช้าลงด้วย จนทำให้มองเห็นเป็นหลาย Step ซึ่งเมื่อดูผลการทดลองของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น งานวิจัยเกี่ยวกับอุปกรณ์ขับเคลื่อนขนาดเล็กของ R. Velazquez และคณะ [6] การตอบสนองของ SMA เมื่อกระแสไหลผ่านตัว SMA น้อยลง ผลตอบสนองก็จะเป็นลักษณะ Step เช่นกัน

จากภาพประกอบ 4-4 ถึง 4-6 ผลตอบสนองของ SMA actuator ที่ใช้การควบคุมแบบต่างๆ จากแบบจำลองการทำงานของการใช้ P และ PI-Controller จะทำให้ Activation time เร็วขึ้น แต่ผลจากการทดลองพบว่าการใช้ P และ PI-Controller จะไม่ทำให้ Activation time เปลี่ยนแปลง เนื่องจากการทดลองจริงจะมีการจำกัดแรงดันที่จ่ายให้กับ SMA ซึ่งเปรียบเสมือนการจำกัดอินพุต (ความร้อน) ในส่วนของแบบจำลองทางความร้อน แต่ในส่วนของแบบจำลอง จะมองว่าอินพุตสามารถเพิ่มขึ้นได้ จึงทำให้อุณหภูมิสามารถไปถึงจุดที่ SMA เริ่มเปลี่ยนรูปได้เร็วขึ้น ใน

ส่วนของ Rise time และ Settling time ผลจากการทดลองกับผลจากแบบจำลอง ให้ผลการตอบสนองที่ไปในทิศทางเดียวกัน คือการใช้ P และ PI-Controller จะทำให้ Rise time และ Settling time เร็วขึ้น ในส่วนของ Steady state error จากการทดลอง การใช้ P และ PI-Controller ช่วยลด Steady state error ลงได้ ในส่วนของพลังงานการใช้งานแบบ Open-loop จะใช้พลังงานน้อยกว่าการใช้ตัวควบคุม โดยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบควบคุม SMA actuator แบบต่างๆ สามารถดูได้จากตารางที่ 4-2

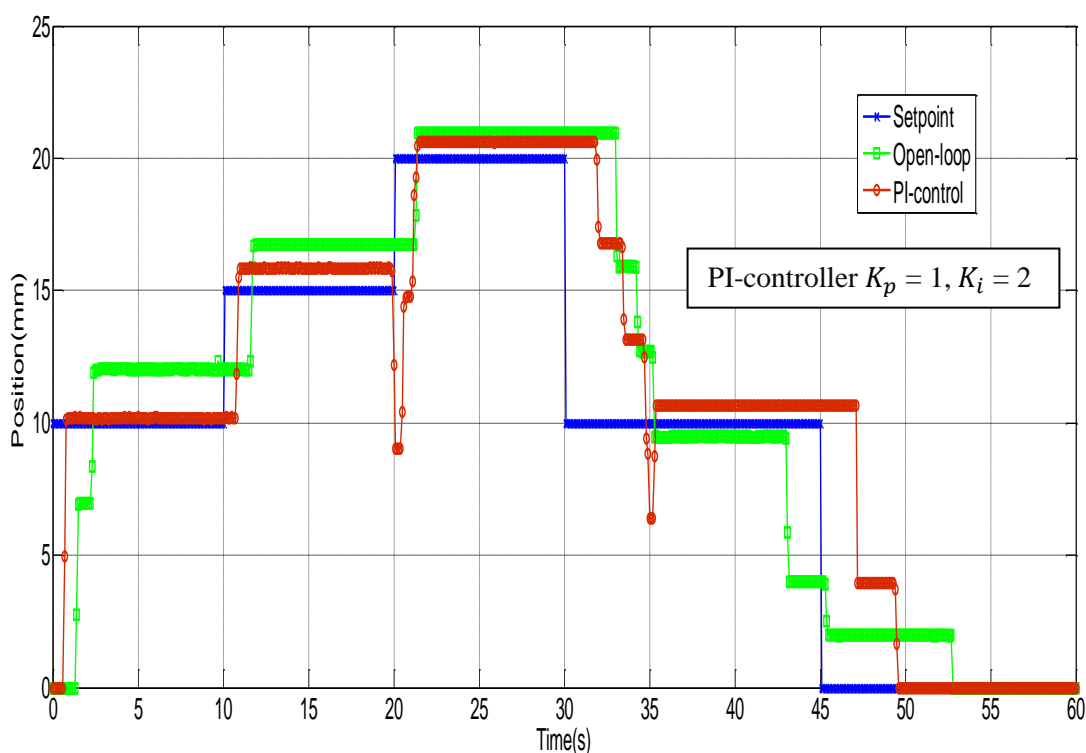
ตารางที่ 4-2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบควบคุม SMA actuator แบบต่างๆ

	Open-loop	P control	PI control
Activation time (s)	0.60	0.60	0.60
Rise time (s)	1.20	1.10	1.0
Settling time (s)	1.30	1.20	1.10
Total time (s)	1.9	1.8	1.7
Steady state error (%)	1.9170	1.1060	0.7217
Overshoot (%)	0	0	0
Energy at activation (J)	11.51	10.98	11.34
Energy at steady state (J)	1.65	3.30	3.4153
Energy total (J)	27.13	29.36	30.10

#### 4.3.2 การควบคุม SMA actuator หลายระยะ (Multi-step)

จากการทดลองเบื้องต้นในหัวข้อ 4.2 ทำให้ทราบว่าสามารถควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของ SMA actuator ได้หลายระยะ ตั้งแต่ 2.5 ถึง 20 mm ในงานวิจัยจะกำหนด Setpoint ไว้ 5 ระยะ โดยขาขึ้นคือ 10 mm, 15 mm, และ 20 mm ขาลงคือ 10 mm และ 0 mm ตามลำดับ โดยการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่แบบ Open-loop จะกำหนดค่าระยะต่างๆ จาก Duty cycle โดยตรง ในส่วนของการใช้ตัวควบคุมจะใช้ PI-controller โดยกำหนดค่า  $K_p = 1$  และ  $K_i = 2$  ทั้งนี้การควบคุม SMA actuator โดยการใช้ PI-controller ร่วมกับการจ่ายแรงดันแบบ PWM นั้น เมื่อมีการเปลี่ยน

Setpoint การใช้อัตราขยายค่าเดิมตลอด จะส่งผลให้เกิดความผิดพลาดของตำแหน่งได้ เพราะ Duty cycle สูงสุดของ PWM คือ 100 % จะได้ระยะเคลื่อนที่สูงที่สุด เมื่อเลือก Setpoint ระยะอื่นๆที่ต่ำกว่านั้น การทำงานของ Controller ยังคงมองว่าในช่วงเริ่มต้นค่าความผิดพลาดของตำแหน่งจะมากที่สุด เช่น Setpoint เท่ากับ 10 mm เมื่อเปรียบเทียบกับระยะจริงคือ 0 mm จะได้ค่าความผิดพลาด 10 mm นั้นทำให้ Controller ส่งเอาต์พุตสูงสุดไปยัง PWM ทำให้การควบคุมระยะอาจจะพุ่งเกินได้ การแก้ไขคือการเปลี่ยน Setpoint จะต้องปรับเปลี่ยนค่าอัตราขยายของ Controller ด้วย โดยสามารถกำหนดอัตราขยายจากการเปรียบเทียบเอาต์พุตจาก Controller กับ Duty cycle ของ PWM แต่ในงานวิจัยต้องการให้ SMA actuator เคลื่อนที่ไปตาม Setpoint ที่กำหนดไว้อย่างต่อเนื่อง จึงปรับค่าอัตราขยายให้เหมาะสมกับหลายๆ Setpoint ซึ่งอาจจะเกิดค่าความผิดพลาดของตำแหน่งอยู่บ้าง ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับการยอมรับค่าความผิดพลาดในการนำไปใช้งาน และช่วงขาลงจะใช้การระบายความร้อนเพื่อช่วยให้เวลาในการตอบสนองต่อ Setpoint ในช่วงขาลงเร็วขึ้น ผลตอบสนองของการควบคุมหลายระยะแสดงตามภาพประกอบ 4-8



ภาพประกอบ 4-8 ผลตอบสนองของการควบคุมหลายระยะ (Multi-step)

จากผลตอบสนองของการควบคุม SMA actuator หลายระยะ จะเห็นได้ว่าการควบคุมตำแหน่งแบบ Open-loop จะทำให้เกิดค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง มากกว่าแบบที่ใช้ตัวควบคุม ทั้งนี้การใช้ตัวควบคุมยังคงมีค่าพุ่งเกินอยู่ อันเนื่องมาจากการกำหนดค่าอัตราขยายเท่าเดิม



ตลอดการควบคุม ซึ่งการใช้ตัวควบคุมจะเข้าหา Setpoint ได้เร็วกว่าแบบ Open-loop ในช่วงขาขึ้น แต่ในช่วงขาลงจะเข้าหา Setpoint ช้าทั้งคู่ เนื่องจากระบายความร้อนจะใช้เวลานานกว่าการให้ความร้อน การใช้ตัวควบคุมจะมีช่วงที่ตำแหน่งตกลงมา เนื่องจากเมื่อค่าความผิดพลาดมีค่าน้อยมากๆ หรือเท่ากับศูนย์ เอาต์พุตที่ส่งจาก Controller ไปยัง PWM เป็นศูนย์ ทำให้ Duty cycle มีค่าเท่ากับ 0% นั่นเท่ากับว่าไม่มีการจ่ายแรงดันไปยัง SMA ทำให้เมื่อเวลาผ่านไปอุณหภูมิที่ SMA ก็จะลดลง ส่งผลให้ตำแหน่งมีการตกลงมาได้ และเมื่อเกิดค่าความผิดพลาดเยอะระบบควบคุมก็พยายามปรับให้ตำแหน่งเข้าหา Setpoint โดยอัตโนมัติ

เมื่อนำงานวิจัยของเรามาเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ใกล้เคียงกัน พบว่างานวิจัยของเรานั้นมีข้อดีในเรื่องของการ Latching ซึ่งไม่ต้องออกแบบทางกลให้ซับซ้อน โดยตัวควบคุมที่ได้ ออกแบบมาสามารถ Latching ตำแหน่งการเคลื่อนที่ได้ และยังควบคุมให้ SMA actuator เคลื่อนที่ได้หลายระยะ (Multi-step) ดังนั้นเราสามารถควบคุมให้แท่งแสดงผล (Pin) แสดงผลแบบสามมิติได้ ในส่วนของเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงที่ (Settling time) นั้นนานกว่างานวิจัยอื่น และกระแสที่จ่ายให้กับ SMA actuator ใช้มากกว่าบางงานวิจัยเนื่องจาก SMA ที่ใช้ในงานวิจัยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่ และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของ SMA สปริงที่ใช้ก็กว้างกว่างานวิจัยอื่นเช่นกัน ในส่วนของการเคลื่อนที่เข้าสู่ Setpoint ช่วงขาลงลง ในงานวิจัยของเรายังให้ผลตอบสนองได้ไม่ดีเท่าไรนัก

ตารางที่ 4-3 ตารางเปรียบเทียบงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่นำเสนอ

	Position (mm)	Settling time (s)	Latching	Current (A)	3D	Control
งานวิจัยที่นำเสนอ	20	1.1	None	3	Yes	PI
การแสดงผลแบบ 3 มิติ โดยใช้วัสดุจำรูป Shape Memory Alloys [3]	20	0.40	Magnetic	5	Yes	PID
Miniature Shape Memory Alloy Actuator for Tactile Binary Display [6]	3	0.45	None	0.5	No	PWM

	Position (mm)	Settling time (s)	Latching	Current (A)	3D	Control
A sixty-four element tactile display using shape memory alloy wires [19]	3.2	0.75	None	-	No	PI
Dynamic Braille display using SMA coil actuator and magnetic latch [7]	7	<1	Magnetic	0.3	No	-

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

บทนี้จะกล่าวถึงข้อสรุปที่ได้จากการศึกษาการสร้างแบบจำลองการทำงาน และการควบคุม SMA actuator สำหรับการนำไปใช้ในอุปกรณ์แสดงผลแบบสัมผัส รวมถึงปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการทำงานวิจัย และข้อเสนอแนะสำหรับผู้ที่จะศึกษาหรือสนใจเกี่ยวกับงานวิจัยนี้ต่อไปในอนาคต

#### 5.1 ผลการสรุปของงานวิจัย

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ว่า แบบจำลองการทำงานของ SMA actuator มี 3 แบบจำลองคือ แบบจำลองทางความร้อน แบบจำลองของการเปลี่ยนเฟส และแบบจำลองทางกล ซึ่งเป็นคุณลักษณะเฉพาะของ SMA actuator และจากผลการทดลองปรากฏว่า รูปแบบการตอบสนองของ SMA actuator สอดคล้องกับแบบจำลองการทำงานที่ได้ศึกษามา โดยได้ออกแบบระยะเวลาเคลื่อนที่สูงสุดไว้ 20 mm จากการทดลองที่ Setpoint 18 mm เมื่อใช้ตัวควบคุมเวลาในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนรูป (Total time) 1.7 วินาที เร็วขึ้น 0.2 วินาทีและช่วยลดค่าความผิดพลาดของตำแหน่งในสภาวะคงตัวได้ 1.2 % เมื่อเทียบกับแบบ Open-loop ในส่วนของเรื่องพลังงาน การใช้ตัวควบคุมจะใช้พลังงานเยอะกว่าการใช้แบบ Open-loop 3% และจากผลการทดลองพิสูจน์ให้เห็นแล้วว่า การควบคุมตำแหน่งของ SMA actuator โดยการควบคุมการจ่ายแรงดันแบบ PWM ร่วมกับ PI controller สามารถควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของ SMA actuator ได้หลายระยะ (Multi-step) โดยใช้ SMA สปริงเพียงแค่ขดเดียว ทั้งยังสามารถคงค่าของการแสดงผลได้โดยไม่ต้องออกแบบการ latching ทางกล ในส่วนของช่วงขาลงของ SMA (ระบายความร้อน) จะใช้เวลานานอันจะส่งผลต่อการใช้งานในการแสดงผลที่นานมากขึ้น จึงแก้ปัญหาโดยการติดตั้งพัดลมระบายความร้อนขึ้นมา เพื่อลดเวลาในช่วงขาลง ทำให้สามารถแสดงผลเร็วมากขึ้น

## 5.2 ปัญหา

5.2.1 ขั้นตอนการขึ้นรูปลวด SMA สปริงทำได้ยาก เพราะการจะขึ้นรูป SMA ให้ได้ลักษณะและรูปแบบการเปลี่ยนรูปตามต้องการ ต้องทราบค่าตัวแปรต่างๆอย่างละเอียด ทั้งยังขาดอุปกรณ์สำหรับขึ้นรูปสปริงโดยตรง และใน Datasheet ก็ไม่ได้บอกคุณสมบัติของ SMA ไว้ทั้งหมด จึงต้องศึกษางานที่เกี่ยวข้องกับการขึ้นรูป SMA เพิ่มเติม พร้อมทั้งศึกษาแบบจำลองการทำงานจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้วย

5.2.2 การออกแบบวงจรจ่ายแรงดันให้ SMA มีปัญหาของตัว Opto-isolator ที่แยกส่วนภาคอินพุตและออกจากเอาต์พุตกัน ในขั้นตอนการทดลองพบว่าการส่งจ่ายกระแสโดยตัว Transistor ไปยัง SMA ไม่เป็นไปตามที่ต้องการ จึงได้ออกแบบวงจรใหม่โดยเปลี่ยนมาใช้ FET ในการจ่ายแรงดันให้ SMA แทน

5.2.3 ในการควบคุม SMA actuator โดยใช้ระบบควบคุมแบบป้อนกลับตำแหน่ง อาจเกิด Overheating เพราะไม่ทราบค่าอุณหภูมิที่ SMA ทำให้ SMA เกิดความเสียหายขึ้นได้ และช่วงขาลงหรือช่วงการระบายความร้อนของ SMA จะใช้เวลานานกว่าช่วงขาขึ้นหรือช่วงการให้ความร้อน ทำให้เวลาที่ใช้ในการแสดงผลแต่ละครั้งนานมากขึ้น จึงแก้ปัญหาโดยการติดตั้งพัดลมระบายความร้อนมาช่วยแก้ปัญหาในทั้งสองส่วนนี้

5.2.4 การควบคุม SMA actuator โดยการใช้ PI-controller ร่วมกับการจ่ายแรงดันแบบ PWM นั้น เมื่อมีการเปลี่ยน Setpoint การใช้อัตราขยายของ Controller ค่าเดิมตลอดจะส่งผลให้เกิดความผิดพลาดของตำแหน่งได้ เพราะ Duty cycle สูงสุดของ PWM คือ 100 % จะได้ระยะสูงสุด เมื่อเลือกระยะอื่นที่น้อยกว่า แต่ในช่วงเริ่มต้นค่าความผิดพลาดของตำแหน่งจะมากที่สุด Controller จะส่งเอาต์พุตสูงสุดไปยัง PWM เสมอ ทำให้การควบคุมระยะอาจจะพุ่งเกินได้ การแก้ไขคือการเปลี่ยน Setpoint จะต้องปรับเปลี่ยนค่าอัตราขยายของ Controller ด้วย หรืออาจจะปรับค่าอัตราขยายให้เหมาะสมกับระยะที่ต่างกัน ซึ่งอาจเกิดค่าผิดพลาดของตำแหน่งบ้าง ขึ้นอยู่กับการยอมรับค่าความผิดพลาดในการนำไปใช้งาน

5.2.5 การตอบสนองของ SMA จะมีลักษณะเป็นช่วงๆ (Step) ที่แต่ละช่วงระยะจะเกือบเท่ากัน เพราะฉะนั้นการเลือก Setpoint ควรจะเลือกช่วงระยะห่างเท่าๆกัน เช่น ระยะที่ 1.5 mm

ระยะที่ 2 ควรจะเป็น 10 mm จะทำให้ได้ผลตอบสนองที่ดีขึ้น

5.2.6 เนื่องจากการตอบสนองต่ออุณหภูมิของ SMA ใช้เวลานาน การควบคุมจึงต้องระมัดระวังการพุ่งเกินของตำแหน่ง เพราะถ้าเกิดการพุ่งเกินขึ้นจะใช้เวลานานกว่าที่ Controller จะปรับให้ตำแหน่งเข้าสู่ Setpoint จึงต้องระมัดระวังในการเลือกใช้อัตราขยายของ Controller

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 การเลือก SMA มาใช้งานควรดูให้ละเอียดเพราะมีหลายรูปแบบ ในงานนี้ใช้แบบ One-way shape memory โดยต้องมีแรงมากจะทำให้เปลี่ยนรูปตลอดเวลา และจะเปลี่ยนรูปกลับไปรูปเดิมแค่ทางเดียวเท่านั้น แต่ก็มี Two-way shape memory ซึ่งสามารถเปลี่ยนรูปเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปได้ทั้งสองทาง โดยไม่จำเป็นต้องมีแรงมากจะทำให้เปลี่ยนรูปเหมือนกับ One-way shape memory ดังนั้นการออกแบบต่างๆย่อมต่างกัน

5.3.2 การนำลวด SMA มาขึ้นรูปเป็นสปริงเองนั้นทำได้ยาก ดังนั้นควรเลือกซื้อแบบที่ขึ้นรูปเป็นสปริงสำเร็จรูปมาใช้งานดีกว่า

5.3.3 การออกแบบระบบควบคุม SMA actuator โดยใช้การป้อนกลับตำแหน่งการเคลื่อนที่นั้นทำได้ง่าย แต่เสี่ยงต่อการเกิด Overheating ดังนั้นจึงควรมีการป้อนกลับอุณหภูมิมาด้วย จะทำให้ทราบอุณหภูมิผิวของ SMA น่าจะส่งผลดีในการป้องกันการเกิด Overheating และอาจจะมีประสิทธิภาพในการควบคุมตำแหน่งมากขึ้น

5.3.4 การควบคุมตำแหน่งของ SMA actuator ให้มีความแม่นยำทั้งขาขึ้นและขาลงนั้น เป็นไปได้ยาก เนื่องจาก SMA มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง การออกแบบระบบควบคุมอาจจะใช้ตัวแปรอื่นเพิ่มเข้ามาในการป้อนกลับเพื่อชดเชย Hysteresis loop และควรใช้การระบายความร้อนร่วมด้วย

## บรรณานุกรม

- [1] K. Ikuta, M. Tsukamoto, and S. Hirose. In Proc. 1988 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Philadelphia, vol. 1, pp. 427–430, 1988
- [2] C. Mavroidis, “Development of advanced actuators using shape memory alloys and electrorheological fluids,” *Res Nondestr Eval* 14, pp.1–32, 2002
- [3] ชีรนุช จันทโสภิพันธ์ และ ถวิดา มณีวรรณ, “การแสดงผลแบบ3มิติโดยใช้วัสดุจำรูป,” กรุงเทพฯ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.), หน้า 2-8, 2005.
- [4] F. Auricchio, “One-way and Two-way shape memory effect : Thermo–mechanical characterization of Ni–Ti wires,” *Facolt’a di Ingegneria Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Biomedica Dipartimento di Meccanica Strutturale Universit’a degli Studi di Pavia., Anno Accademico*, 2007.
- [5] R. Velázquez, E. Pissaloux, and M. Wiertelwski, “A compact tactile display for the blind with shape memory alloys,” *Proc. of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation Orlando, Florida, May*. 2006.
- [6] R. Velazquez, E. Pissaloux, and J. Szewczyk, “Miniature shape memory alloy actuator for tactile binary information display,” *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation Barcelona, Spain, April*. 2005.
- [7] Y. Haga, W. Makishi, K. Iwami, K. Totsu, K. Nakamura, and M. Esashi, “dynamic braille display using SMA coil actuator and magnetic latch,” *Sensors and Actuators A* 119, pp. 316-322, 2005.
- [8] S. Majima, K. Kodama, and T. Hasegawa, “Modeling of shape memory alloy actuator and tracking control system with the model,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 9, January. 2001.
- [9] Nguyen Bao Kha and Kyoung Kwan Ahn, “Position control of shape memory alloy actuator by using self tuning fuzzy PID controller”, *School of Mechanical and Automotive Engineering, University of Ulsan, IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2006.
- [10] Lee, H.J., Lee, J.J., “Time delay control of a shape memory alloy actuator” *Smart Mater. Struct.*, pp.227-239, 2004.

### บรรณานุกรม(ต่อ)

- [11] Ma, N., Song, G., “Control of shape memory alloy actuator using pulse width modulation,” *Smart Mater. Struct.*, pp.712-719, 2003.
- [12] M. Sreekumar and others, “Recent advances in nonlinear control technologies for shape memory alloy actuators” , *Journal of Zhejiang University SCIENCE* , pp.818-829, 2007.
- [13] L.C. Brinson, A. Bekker, and S. Hwang, “Deformation of shape memory alloys due to thermo-induced transformation,” *J. Intell. Material Syst. Struct.*, vol. 7, pp. 97–107, Jan. 1996.
- [14] V. Brailovski, F. Trochu and G. Daigneault, “Temporal characteristics of shape memory linear actuators and their application to circuit breakers”, in *Materials & Design*, pp. 151-158, 1996.
- [15] K. Ikuta, “Micro/miniature shape memory alloy actuator,” *IEEE Robotics and Automation*, pp. 2156-2161, 1990.
- [16] D. Madill and D. Wang. “Modeling and L2-stability of a shape memory alloy position control system,” in *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, pp. 473-481, 1998.
- [17] C. Liang and A. Roger, “One-dimensional thermomechanical constitutive relations for shape memory materials”, in *Journal of Intelligent Artificial Systems and Structures*, pp. 207-234, 1990.
- [18] K. Ikuta, M. Tsukamoto, S. Hirose, “Shape memory alloy servo actuator system with electric resistance feedback application to active endoscope,” *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, Philadelphia,USA, pp. 427, 1988.
- [19] P.M. Taylor, A. Moser, A. Creed , “A sixty-four element tactile display using shape memory alloy wires,” *Elsevier Science B.V. All rights reserved.*, 16 January 1998.

### ภาคผนวก ก

**คุณสมบัติทางกายภาพ ทางกล และทางความร้อนของ Shape Memory Alloy**



## Shape Memory Nitinol Alloys\*

	<u>SM495</u>	<u>SM500</u>
<b>PHYSICAL PROPERTIES</b>		
Melting Point:	1310°C	1310°C
Density:	6.5 g/cm <sup>3</sup>	6.5 g/cm <sup>3</sup>
Electrical Resistivity:	76 μohm-cm	76 μohm-cm
Modulus of Elasticity:	28 – 41 GPa	28 – 41 GPa
Coefficient of Thermal Expansion:	6.6 x 10 <sup>-6</sup> / °C	6.6 x 10 <sup>-6</sup> / °C
<b>MECHANICAL PROPERTIES</b>		
Ultimate Tensile Strength:	≥ 1070 MPa	≥ 1070 MPa
Total Elongation:	≥ 10%	≥ 10%
<b>SHAPE MEMORY PROPERTIES</b>		
Loading Plateau Stress @ 3%	≥ 100 MPa	≥ 100 MPa
Shape Memory Strain	≤ 8.0%	≤ 8.0%
<b>TRANSFORMATION TEMPERATURE</b>		
Ingot Austenite Finish (A <sub>r</sub> )	75 to 110°C	45°C to 80°C
Finished Product A <sub>r</sub>	50 to 80°C	30°C to 50°C
<b>COMPOSITION</b> (Meets ASTM F2063 requirements)		
Nickel (nominal):	54.5 wt.%	55.0 wt.%
Titanium:	Balance	Balance
Oxygen:	≤ 0.05 wt.%	≤ 0.05 wt.%
Carbon:	≤ 0.02 wt.%	≤ 0.02 wt.%
Inclusion Area Fraction:	≤ 2.8%	≤ 2.8%
<b>APPLICATIONS</b>		
	SM495 is our standard shape memory wire that is malleable at room temperature and returns to shape in boiling water or autoclave. Typical applications for the material are actuators and surgical tools.	SM500 exhibits shape memory such that it is malleable at room temperature and returns to shape just above body temperature. Typical applications for SM500 are for dental products such as archwires and springs.

\* These values should only be used as guidelines for developing material specifications. Properties of Nitinol Alloys are strongly dependent on processing history and ambient temperature. The mechanical and shape memory properties shown here are typical for standard shape memory Nitinol at room temperature tested in uniaxial tension. Bending properties differ, and depend on specific geometries and applications. Modulus is dependent on temperature and strain. Certain shapes or product configurations may require custom specifications. Materials are also available in the cold-worked or annealed conditions.

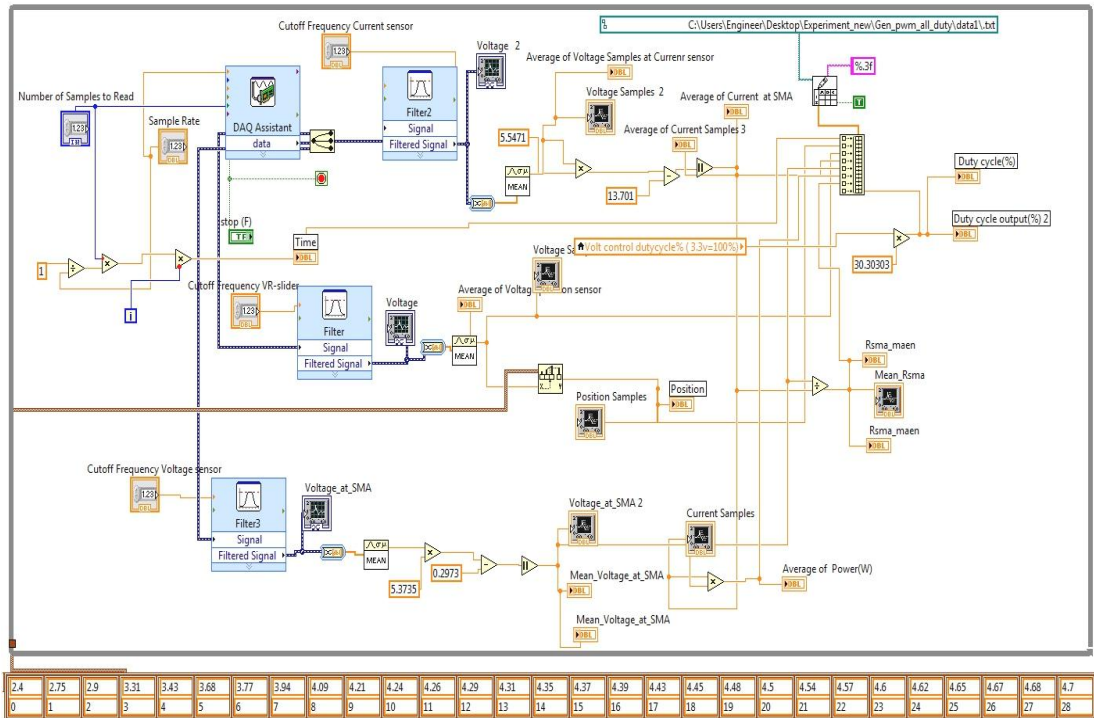


Nitinol Devices & Components • 47533 Westinghouse Drive • Fremont, California 94539  
(510)683-2000 • Fax: (510)683-2001 • sales@nitinol.com • www.nitinol.com

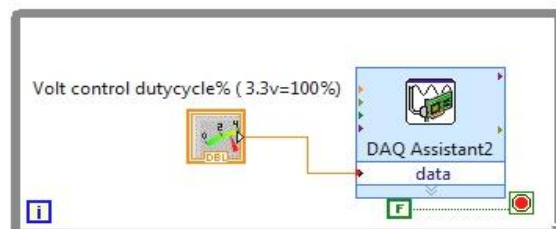
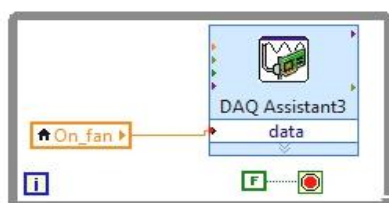
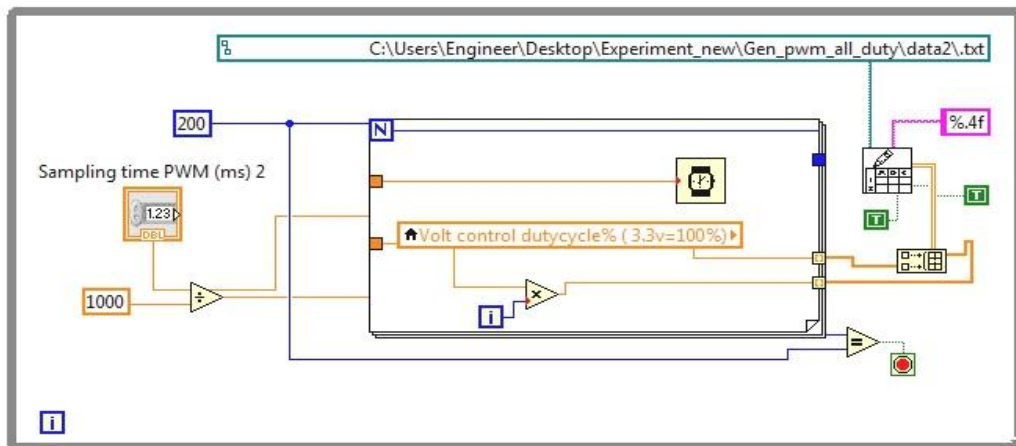
**We are Nitinol.™**

ภาคผนวก ข

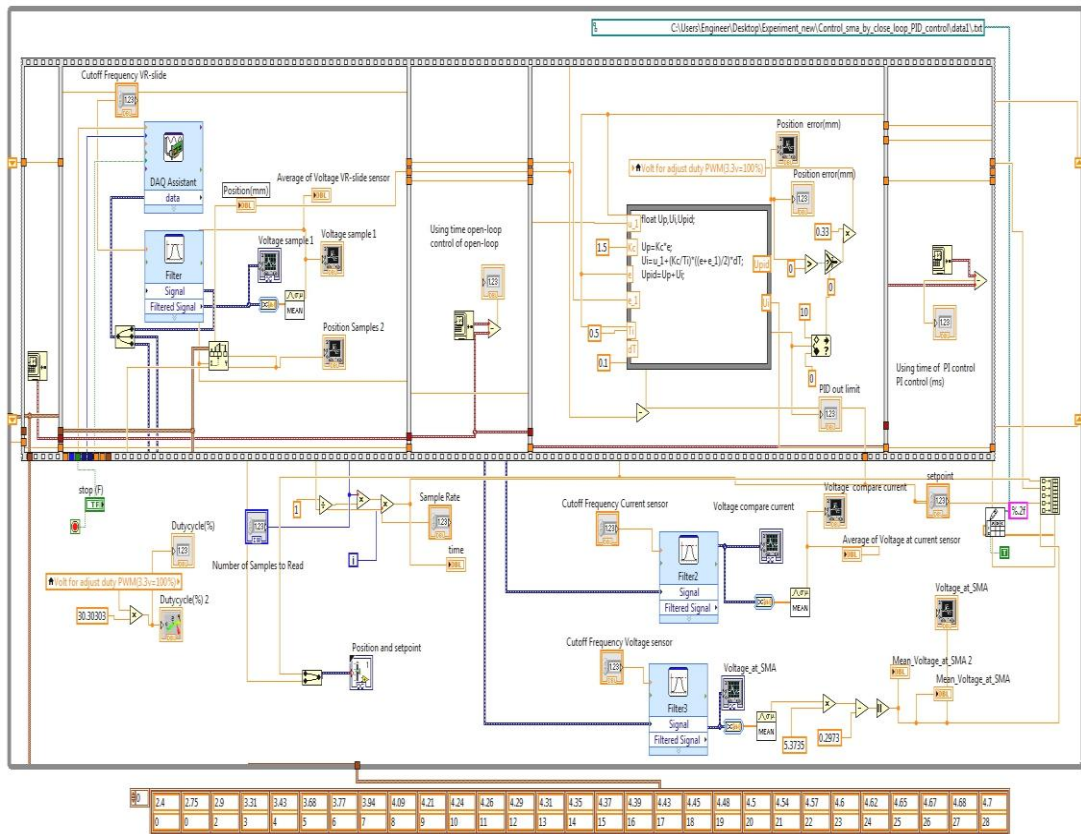
**บล็อกไดอะแกรมของระบบความคุ้มในโปรแกรม LabVIEW**



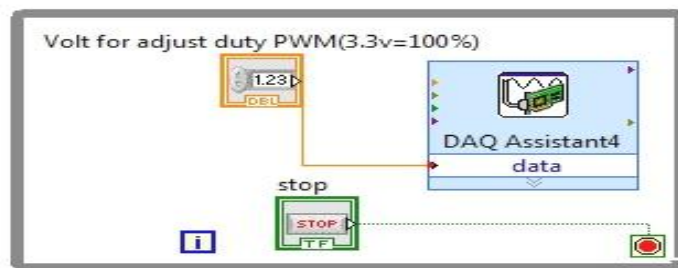
บล็อกโคดะแกรมของระบบควบคุมแบบ Open-loop



บล็อกโคดะแกรมของระบบควบคุมแบบ Open-loop



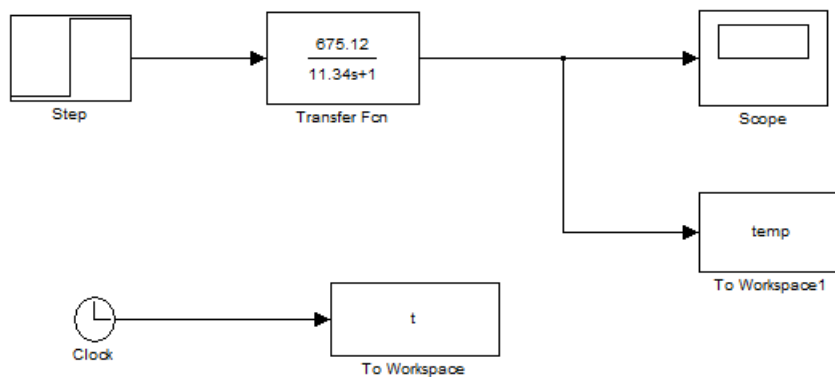
บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบ Close-loop



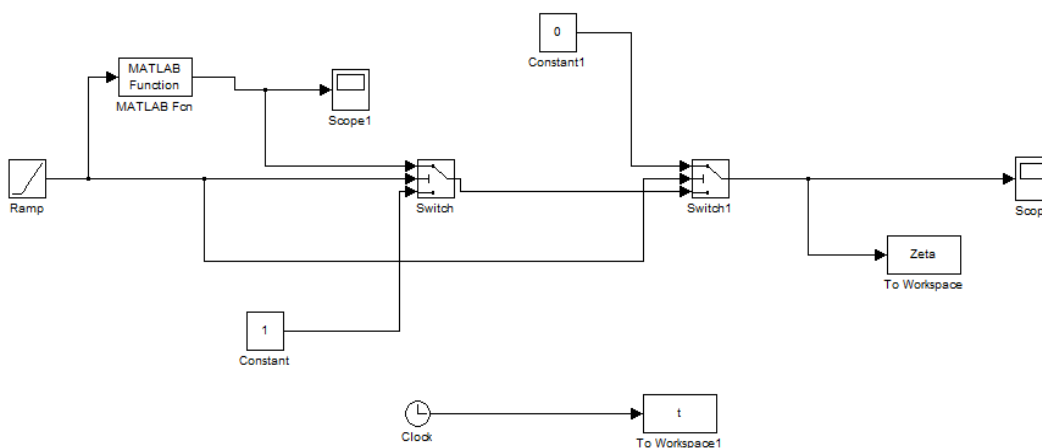
บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบ Close-loop

**ภาคผนวก ค**

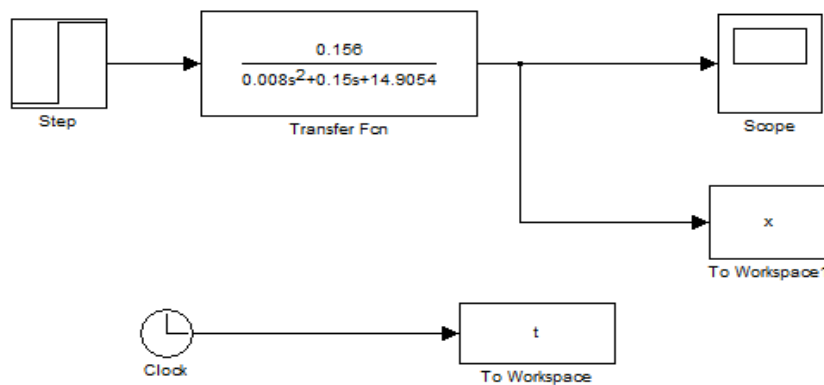
**บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมในโปรแกรม MATLAB (Simulink)**



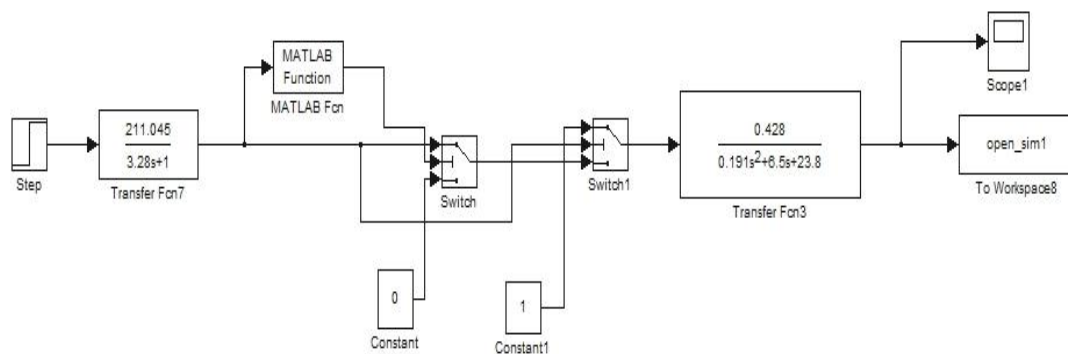
บล็อกไดอะแกรมของแบบจำลองทางความร้อน



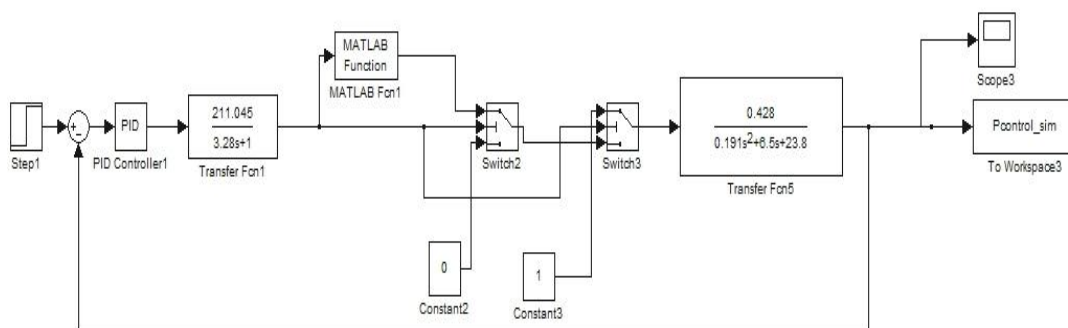
บล็อกไดอะแกรมของแบบจำลองของการเปลี่ยนเฟส



บล็อกไดอะแกรมของแบบจำลองทางกล



บล็อกไคอะแกรมของแบบจำลองของ SMA actuator



บล็อกไคอะแกรมของแบบจำลองของ SMA actuatorที่ใช้ PI controller

ภาคผนวก ง  
งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์



## การควบคุมตำแหน่งของตัวขับเคลื่อนขนาดเล็กชนิดโลหะผสมจำรูปโดยใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับ ปริพันธ์

### Position Control of Shape Memory Alloy Micro-Actuator Using PI controller

วิทยา เป็นไทย และ ฤทธิ วิชกุล

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ [Witthaya\\_Pt2@hotmail.com](mailto:Witthaya_Pt2@hotmail.com)

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการควบคุมตำแหน่งของโลหะผสมจำรูป (SMA) สำหรับนำไปใช้เป็นตัวขับเคลื่อนขนาดเล็ก โดยมีการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับนำไปทดสอบระบบควบคุม ในการควบคุมตำแหน่งโดยการควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับตัว SMA สปริง เพื่อให้ได้ตำแหน่งที่ต้องการ สำหรับการออกแบบระบบควบคุม ได้ศึกษาจากแบบจำลองที่เกี่ยวข้องและได้จำลองการเคลื่อนที่ด้วยโปรแกรม Matlab ใน Simulink และออกแบบระบบควบคุมในโปรแกรม Labview เริ่มจากการทดสอบแบบ Open-loop แล้วกำหนดค่าตัวแปรต่างๆสำหรับ PWM จากนั้นใช้ PWM ร่วมกับ P และ PI controller ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อนำ PWM มาใช้ร่วมกับ PI controller ทำให้สามารถควบคุมตำแหน่งได้แม่นยำมากขึ้นและใช้เวลาน้อยลง โดยค่าเฉลี่ยความผิดพลาดของตำแหน่งอยู่ที่ 0.522 % และ Activation time 0.9 วินาที

คำสำคัญ: โลหะผสมจำรูป, การควบคุมตำแหน่งของโลหะผสมจำรูป, การควบคุมโดยการปรับความกว้างพัลส์

#### Abstract

This propose of this study is to position control of Shape Memory Alloy (SMA) for a micro-actuator. The research is to design and fabricate prototype devices to test the position control by current control in SMA springs for position desired. In control design section, a study to model of SMA and modeling using Mat lab/Simulink, a Control system is designed by using labview. First, open-loop test of the SMA actuator is conducted to study the pulse width modulation (PWM) parameters. Based on test results and parameter analysis of the PWM, a PWM is designed to modulate a proportional plus integral (PI) controller. Experiments demonstrate that control the SMA actuator using PWM PI controller effectively control accuracy, mean of error is 0.522% and time approach to activation is 0.9 seconds.

**Keywords:** SMA actuator, Position control of SMA, PWM control

#### 1. บทนำ

ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ๆ เกี่ยวกับตัวขับเคลื่อน (Actuator) ชนิดต่างๆ ให้มีขนาดเล็กลงเพื่อนำมาใช้เป็นตัวขับเคลื่อนแห่งแสดงผลในอุปกรณ์พวก Haptic device อุปกรณ์จะได้มีขนาดเล็กลง นักวิทยาศาสตร์และสะดวกในการใช้งานมากขึ้น เช่น Piezoelectric Polymer gels Electrothological fluids DC/AC motor Shape Memory Alloys (SMA) และ Hydraulic(แต่หนึ่งในแนวโน้มที่ดูพัฒนามากที่สุดคือ SMA เนื่องจากมีขนาดเล็กและให้กำลังสูง แต่ SMA มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง การจะควบคุมให้ได้ตามที่ต้องการเป็นเรื่องที่ท้าทาย

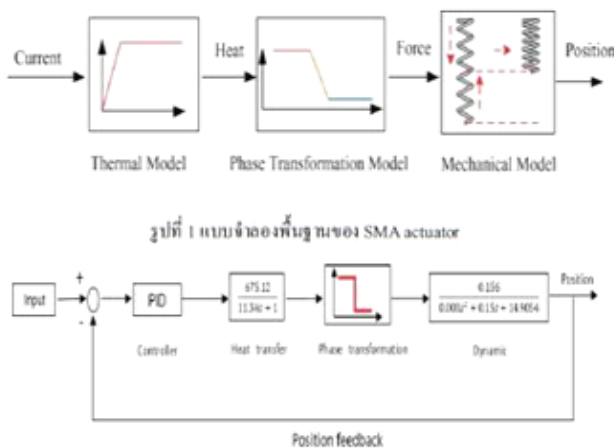
ในอดีตได้มีการศึกษาเทคนิคการควบคุมตำแหน่งของ SMA โดยใช้ตัวควบคุมแบบ PD controller โดยผลที่ได้มีความผิดพลาด 2.5 % [1] และมีการออกแบบ SMA actuator เพื่อแสดงผล 3 มิติ ซึ่งการควบคุมตำแหน่งต้องใช้ SMA สปริงหลายชุดเพื่อให้ได้ตำแหน่งที่ค้างกันและยังใช้การติดปลอกแม่เหล็กในการ latching การแสดงผล และรวมกับ PD controller เพื่อให้ได้ผลตอบสนองของตำแหน่งที่ดี วิธีนี้ต้องออกแบบทางกลที่ซับซ้อน[2] ต่อมาการศึกษาและออกแบบการควบคุม SMA wire actuator โดยใช้ PWM ซึ่งจากการทดลองพบว่าสามารถชดเชยผลพลังงานได้ 30 % แต่เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวยังค่อนข้างช้า[3]

ในงานวิจัยนี้จะเสนอการควบคุมตำแหน่งของ SMA โดยใช้ SMA สปริงแค่ 1 ชุดเท่านั้น โดยการใช้ PWM ร่วมกับ PI controller ทั้งนี้การออกแบบ PWM ที่ใช้กับ SMA actuator นั้นอยู่บนพื้นฐานของผลจากการทดลอง โดยขั้นแรกจะทดสอบแบบ open-loop เพื่อออกแบบค่า duty cycle ที่เหมาะสมกับ PWM ในการควบคุม SMA actuator จากนั้นก็ออกแบบ PWM ที่ใช้ร่วมกับ P และ PI controller ตามลำดับ โดยจะศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพตัวควบคุมแต่ละแบบ จากผลการทดลองพบว่าการใช้ PWM ร่วมกับ PI controller ให้ค่าความถูกต้องของการควบคุมตำแหน่งที่สุด และใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวเร็วที่สุดอีกด้วย

#### 2. หลักการและแบบจำลองของโลหะผสมจำรูป

โลหะผสมจำรูป คือวัสดุที่สามารถเปลี่ยนรูปร่างและขนาดไปยังรูปร่างและขนาดเดิม เมื่ออุณหภูมิที่ให้แก่วัสดุนั้นเปลี่ยนไป[4] โดยเมื่ออุณหภูมิที่สูงขึ้น โลหะผสมดังกล่าวจะเปลี่ยนรูปร่างตัวเองไปยังจุดเดิมก่อนที่จะมีการเกิดการเปลี่ยนรูป ในงานวิจัยนี้จะใช้ Ti-Ni alloy มาเป็น SMA actuator เพราะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่เด่นชัดมากกว่าโลหะ

ผสมชนิดอื่น สำหรับแบบจำลองของ SMA actuator [4] มี 3แบบจำลอง คือ Thermal Model Phase Transformation Model และ Mechanical Model ดังแสดงในรูปที่ 1 จากแบบจำลองทั้ง 3 นำไป simulate เพื่อดู ผลตอบสนองของแบบจำลองที่สร้างขึ้น โดยใช้บล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 2 โดยผลตอบสนองสามารถไปดูได้จากผลการทดลอง

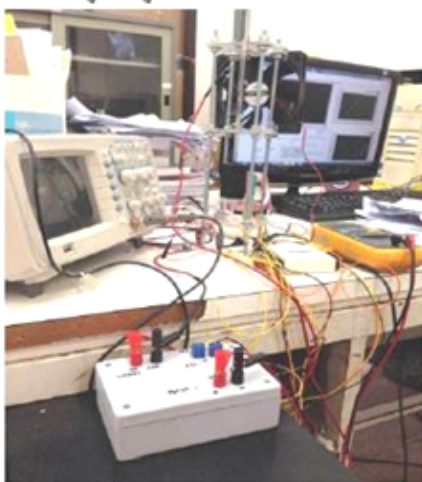


รูปที่ 1 แบบจำลองพื้นฐานของ SMA actuator

รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมสำหรับจำลองการทำงานของ SMA actuator[2]

3. การ Set-up สำหรับการทดลอง

ส่วนประกอบหลักของงานวิจัยนี้ประกอบด้วยตัว SMA actuator ซึ่งประกอบด้วย SMA สปริง 1 ชุด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางลวด SMA 0.5 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง SMA สปริง 7 mm จำนวน 27 ชุด โดยใช้ มวลในการ Bias น้ำหนัก 272 g เพื่อให้ SMA เกิดการเปลี่ยนรูป โดย ออกแบบระยะบิด-หดตัวของ SMA สปริงไว้ที่ 18 mm ซึ่งเท่ากับระยะที่ SMA actuator เคลื่อนที่ได้สูงสุด การป้องกันกลับตำแหน่งใช้ Potentiometer โดยการควบคุมจะใช้โปรแกรม labview ซึ่งการรับค่าจาก sensor และส่ง แรงดันเอาต์พุตไปควบคุม Current module ผ่าน Data Acquisition (DAQ) 6009 สำหรับการ Set-up การทดลองรวมทั้งส่วนประกอบต่างๆ ของงานวิจัยสามารถดูได้ในรูปที่ 3

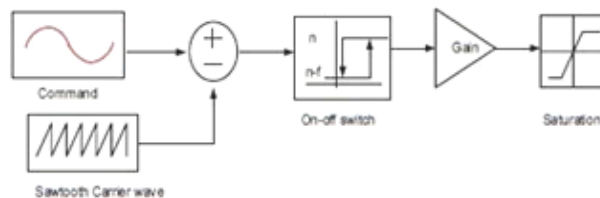


รูปที่ 3 การ Set-up สำหรับการทดลอง

4. การออกแบบ PWM modulator

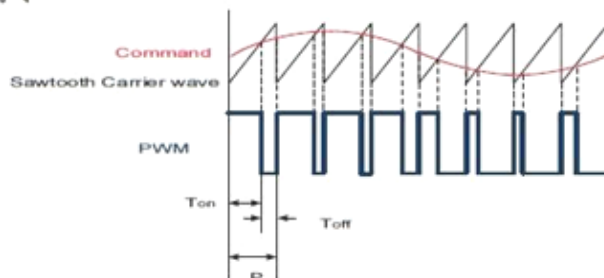
4.1 ทฤษฎี PWM

การสร้างสัญญาณ PWM จะใช้การสร้างสัญญาณ carrier รูปคลื่น sawtooth มาเปรียบเทียบกับระดับอ้างอิงที่เป็นสัญญาณ command ตาม รูปแบบของสัญญาณ PWM ที่ต้องการ โดยที่สัญญาณ carrier รูปคลื่น sawtooth จะมีความถี่คงที่ และมีค่า amplitude สูงกว่าค่าของสัญญาณ command มาก แสดงไดอะแกรมสร้างสัญญาณ PWM ตามรูปที่ 4



รูปที่ 4 ไดอะแกรมการสร้างสัญญาณ PWM [3]

จากรูปที่ 4 สัญญาณ carrier รูปคลื่น Sawtooth จะถูกเปรียบเทียบกับ สัญญาณ command เมื่อค่าผลต่างมีค่ามากกว่า threshold ของ on-off switch เอาต์พุตค่า n เป็นสถานะ on และถ้าค่าผลต่างมีค่าน้อยกว่า threshold ของ on-off switch เอาต์พุตค่า n-f เป็นสถานะ off ถัดไปจะมี บล็อก gain เพื่อขยายเอาต์พุตของ on-off switch และจำกัดค่าเอาต์พุต สูงสุดด้วยบล็อก saturation



รูปที่ 5 การสร้างสัญญาณ PWM

จากรูปที่ 5 แสดงสัญญาณ PWM ที่ได้จากการเปรียบเทียบกันของ สัญญาณ carrier รูปคลื่น Sawtooth กับตัวอย่างสัญญาณ command ผล ของการเปรียบเทียบเมื่อระดับของสัญญาณ command สูงกว่าระดับของ สัญญาณ Sawtooth จะทำให้ได้ระดับของ PWM เป็น High และเมื่อ ระดับของสัญญาณ command ต่ำกว่าระดับของสัญญาณ Sawtooth จะทำ ให้ได้ระดับของ PWM เป็น Low

เวลาที่ได้จากเอาต์พุตของ on-off switch ที่เปลี่ยนจาก n ไปยัง n-f กำหนดให้เป็น on-time ( $T_{on}$ ) และเวลาที่เปลี่ยนจาก n-f ไปยัง n จะ กำหนดให้เป็น off-time ( $T_{off}$ ) ช่วงเวลา on-time และ off-time ในแต่ละคาบเวลาหาได้จาก

$$T_{on} = \frac{M_{command} P_{carrier}}{A_{carrier}} \tag{1}$$

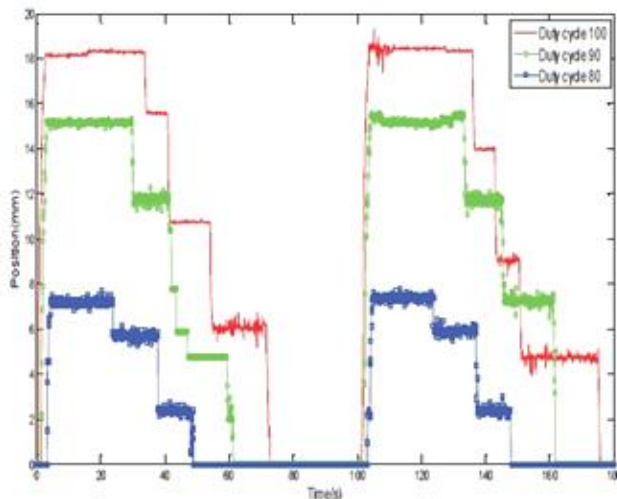
$$T_{off} = \frac{A_{carrier} - M_{command} P_{carrier}}{A_{carrier}} \tag{2}$$

เมื่อ  $M_{command}$  คือ magnitude ของสัญญาณ command  $A_{carrier}$  คือ amplitude ของคลื่น carrier  $P_{carrier}$  คือคาบเวลาของคลื่น carrier จากช่วงเวลา on-time และ off-time สามารถคำนวณค่า duty cycle ( $D$ ) ได้ดังนี้

$$D = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \times 100\% \quad (3)$$

#### 4.2 การออกแบบ PWM

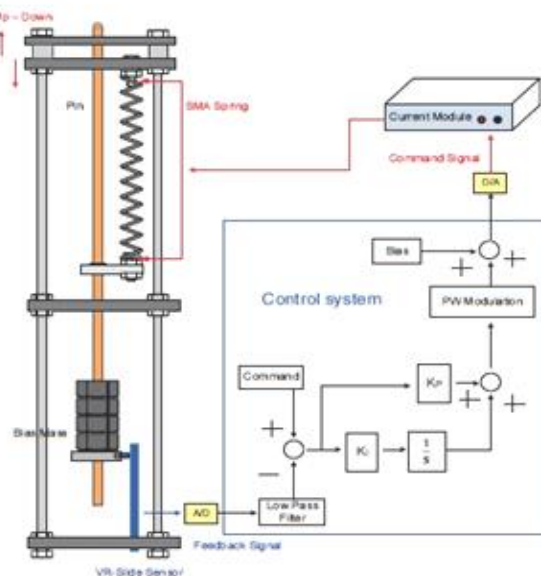
ในส่วนของการออกแบบ PWM จะกำหนดค่า threshold ของ on-off switch โดยเอาต์พุตของ on-off switch คือ amplitude และ ความถี่ของคลื่น carrier รูปแบบของการออกแบบ PWM แบบนี้ถูกเรียกว่า one-way PWM [3] สำหรับบทความนี้ one-way PWM ใช้กำหนดช่วงในการให้แรงดันกับ SMA actuator สัญญาณ command ที่ส่งไปยัง on-off switch ของ one-way PWM คือเอาต์พุตของ PI controller เมื่อ threshold ของ one-way PWM คือ 0 เอาต์พุตของ on-off switch อยู่ในสถานะ off และเมื่อ threshold ของ one-way PWM คือ 1 เอาต์พุตของ on-off switch อยู่ในสถานะ on



รูปที่ 6 ผลตอบสนองในการทดสอบแบบ open-loop ที่ duty cycle ต่างๆ

จากรูปที่ 6 เป็นผลตอบสนองของ SMA actuator ที่ใช้ one-way PWM ในการทดสอบแบบ open-loop จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ามีผลลดค่า duty cycle ลงตำแหน่งที่ได้ก็จะลดลงตามเช่นกัน นั่นก็เพราะว่าการให้ความร้อนแก่ SMA actuator จะถูกกำหนดโดยค่า duty cycle ทำให้สามารถควบคุมตำแหน่งของ SMA actuator ได้ในช่วงระยะเวลาที่ได้ออกแบบไว้จากการทดลองค่าต่ำสุดที่ SMA จะตอบสนองได้ค่า duty cycle คือ 70% และ ค่าที่ SMA จะตอบสนองได้เร็วที่สุดคือ 100% แต่อย่างไรก็ตามเมื่อกำหนดค่า duty cycle ไว้ที่ 100% ความเสี่ยงต่อการเกิด over heating อันจะทำให้ SMA เสียหาย จากการทดลอง duty cycle 100-98% จะให้ผลตอบสนองที่เหมือนกัน จึงกำหนดช่วง duty cycle ไว้ที่ 98 - 70%

#### 5. การควบคุมตำแหน่งของ SMA โดยใช้ PWM PI controller

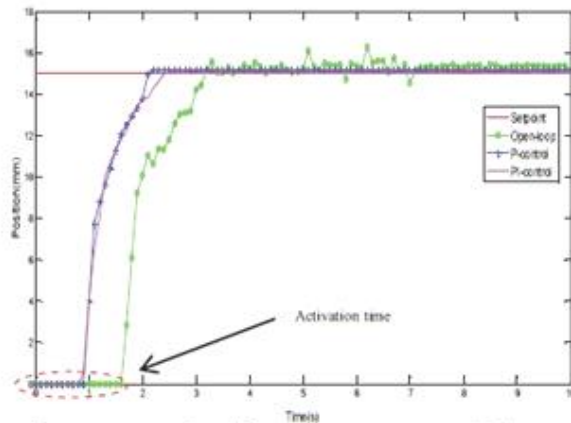


รูปที่ 7 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

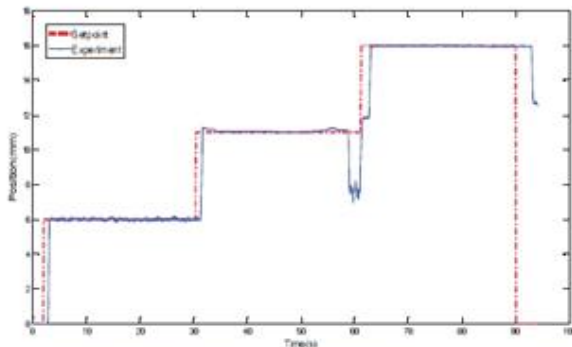
จากรูปที่ 7 คือระบบควบคุมในงานวิจัย PI controller และ PWM ถูกออกแบบเพื่อใช้ในการควบคุมตำแหน่งของ SMA actuator สำหรับ PI controller ค่า Proportional gain คือ 1 และ Integral gain คือ 25 PWM แปลงเอาต์พุตของ PI controller กลายเป็น pulse sequence PWM pulse มี magnitude คือ 5 และความถี่ 100 Hz ช่วงของ duty cycle 70-98 %

#### 6. ผลการทดลอง

ในส่วนของการทดลอง จะแสดงผลตอบสนองการควบคุมตำแหน่งของ SMA actuator ในการทดสอบแบบต่าง ๆ โดยสามารถดูได้จากรูปที่ 8 การใช้งาน PWM จะนำข้อมูลความหวัข้อที่ 4.2 ตามที่ได้ออกแบบไว้มาใช้ การทดสอบจะตั้งค่า set point ไว้ที่ 15 mm จากผลการทดสอบแบบ open-loop นั้นแสดงให้เห็นค่า steady state error และ overshoot ที่สูง และยังใช้เวลาในการเปลี่ยนรูปของ SMA(activation time) ถึง 1.7 วินาที จากนั้นมาดูผลการทดสอบโดยใช้ PWM ร่วมกับ P-controller ค่า  $K_p = 2$  เมื่อเทียบกับการทดสอบแบบ open-loop จะเห็นได้ว่าค่า steady state error ลดลงถึงครึ่งหนึ่ง และ overshoot ลดลงอย่างมาก ทั้งยังใช้เวลาในการเปลี่ยนรูปของ SMA เพียงแค่ 1 วินาที และผลการทดสอบโดยใช้ PWM ร่วมกับ PI controller ค่า  $K_p = 2$  และค่า  $K_i = 25$  แสดงให้เห็นว่าทั้ง steady state error และ overshoot ลดลงเมื่อเทียบกับผลการทดสอบที่ใช้ PWM ร่วมกับ P-controller แต่เวลาในการเปลี่ยนรูปของ SMA จะใช้ใกล้เคียงกันในส่วนของรูปที่ 9 จะแสดงผลตอบสนองจากการทดสอบโดยใช้ PWM ร่วมกับ PI controller ที่ set point ต่างกันที่ 6 , 11 และ 16 mm ตามลำดับ จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถดูผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพต่างๆได้จากตารางที่ 2



รูปที่ 8 ผลตอบสนองของตำแหน่ง โดยการทดสอบแบบ open-loop โดยใช้ PWM และ แบบ closed-loop โดยใช้ PWM ร่วมกับ P และ PI-control



รูปที่ 9 ผลตอบสนองของตำแหน่งที่ set point ต่างๆ ทดสอบแบบ closed-loop โดยใช้ PWM ร่วมกับ PI-controller

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบควบคุม SMA actuator แบบต่างๆ

	PWM	PWM-P control	PWM-PI control
Activation time(s)	1.7	1.0	0.9
Rising time(s)	1.3	1.0	0.9
Settling time(s)	3.4	2.6	2.4
Over shoot (%)	8.540	1.0	0.773
Steady state error (%)	2.219	0.980	0.522
Energy at activation(J)	24.29	21.56	23.44
Energy at steady state(J)	16.40	29.56	30.91
Energy total (J)	65.15	83.40	88.14

จากตารางการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการควบคุมแบบต่างๆนั้น ในเรื่องของความถูกต้องแม่นยำในการควบคุมตำแหน่งจากการลดค่า overshoot และ steady state error ในส่วนของ PWM PI-controller และ PWM P-controller ให้ผลดีใกล้เคียงกันเมื่อเทียบกับการใช้ PWM เพียงอย่างเดียว ในส่วนของ activation rising และ settling time เป็นไปในทิศทางเดียวกันคือ PWM PI-controller ให้ผลดีใกล้เคียงกับ PWM

P-controller เมื่อเทียบกับ PWM ขณะที่ค่าพลังงานที่ใช้ในช่วง activation time จะใกล้เคียงกันทั้ง 3 แบบ ส่วนค่าพลังงานที่ใช้ในช่วง steady state time นั้น PWM จะใช้น้อยกว่าเกือบ 50 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับ PI-controller และ PWM P-controller ซึ่งทั้ง 2 แบบนี้จะใช้พลังงานในช่วงนี้ใกล้เคียงกันมาก

## 7. สรุป

จากการทดลองในบทความนี้แสดงให้เห็นการควบคุมตำแหน่งของ SMA actuator ในแบบต่างๆ ซึ่งจะได้ว่าการใช้ PWM เพียงอย่างเดียวจะให้ข้อดีในเรื่องของพลังงาน แต่มีข้อเสียเรื่องค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง ส่วนการใช้ PWM ร่วมกับ PI-controller จะใช้พลังงานน้อยกว่า แต่ก็ให้ผลดีทั้งในเรื่องของความถูกต้องแม่นยำของตำแหน่งและเวลาที่รวดเร็วในการใช้งาน จากผลการทดลองพิสูจน์ให้เห็นแล้วว่าการควบคุมตำแหน่งของ SMA actuator โดยการควบคุมการจ่ายกระแสโดยใช้ PWM ร่วมกับ PI control สามารถควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของ SMA actuator ได้หลายตำแหน่งโดยใช้ SMA spring เพียงแค่ชุดเดียว ทั้งยังสามารถลดค่าของการแสดมผลได้โดยไม่ต้องใช้การ latching จากทางกลอีกด้วย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] จินดา แสงเกียรติฤทธิ์ และคณะ, “การศึกษาเทคนิคการควบคุมตำแหน่งโดยใช้ลวดจำรูป,” Instrumentation and Control Systems Engineering, Department of Mechanical Engineering, King Mongkut’s University of Technology Thonburi
- [2] จีรนุช จันทโสภิตพันธ์ และ อวิดา มณีวรรณ, “การแสดงผลแบบวิถี โดยใช้วีสดูจำรูป,” กรุงเทพฯ : สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.), 2005.
- [3] N.Ma and G.Song, “Control of shape memory alloy actuator using pulse width modulation,” Smart Mater. Struct, pp.712-719, 2003.
- [4] K. Ikuta, “Micro/miniature shape memory alloy actuator,” IEEE Robotics and Automation, 1990.



เกี่ยวกับผู้เขียน วิชา เป็น ไทย  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะ วิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายวิทยา เป็นไทย		
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5510120089		
วุฒิการศึกษา			
	วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)	มหาวิทยาลัยศรีปทุม	2554

### ทุนการศึกษา

ทุนอุดหนุนงานวิจัยมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ประจำปีการศึกษา 2557

### การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

วิทยา เป็นไทย และ วฤทธิ วิชกุล, “การควบคุมตำแหน่งของตัวขับเคลื่อนขนาดเล็กชนิดโลหะผสมจำรูปโดยใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับปริพันธ์,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 37 (EECON-37), มหาวิทยาลัยขอนแก่น, หน้า 409-412, 19-21 พฤศจิกายน 2557.