

หุ่นยนต์สำรวจโดยโลหะจำรูป

Applications of Shape Memory Alloy to Survey Robot



ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูงและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีការนำใบเข้า  
เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....55657.....  
วัน,เดือน,ปี.....24 พ.ค. 2548.....

b.....  
i.....

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2546

ภาควิชา วิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง หุ่นยนต์สำรวจโดยโลหะจำรูป

Applications of Shape Memory Alloy to Survey Robot

ผู้จัดทำ

นาย ทรงวุฒิ จำเริญพร รหัสประจำตัว 44015285

นาย นพพล มีสบาย รหัสประจำตัว 44015287



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.จงกล งามวิวิทย์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## หุ่นยนต์สำรวจโดยโลหะจำรูป

### Applications of Shape Memory Alloy to survey Robot

โดย

นาย ทรงวุฒิ จำเริญพร (44015285)

นาย นพพล มีสบาย (44015287)

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.จنگล งามวิวิทย์

ปีการศึกษา 2546

#### บทคัดย่อ

โลหะจำรูปเป็นโลหะผสมที่มีความสามารถในการจำรูปแบบทางกายภาพได้ โลหะจำรูปมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น มีความยืดหยุ่นสูง มีขนาดเล็ก ไม่มีการแผ่สนามแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น ดังนั้น ปรวิญญาณิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอการออกแบบโดยใช้โลหะจำรูปเป็นตัวขับเคลื่อนของหุ่นยนต์ ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการนำโลหะจำรูปมาศึกษาหาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและระบบทางกลของโลหะจำรูปเพื่อใช้ในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จากนั้นจึงนำโลหะจำรูปมาประยุกต์ใช้เป็นตัวขับเคลื่อนในการเคลื่อนที่ต่างๆ ตลอดจนนำเสนอหลักการควบคุมการเคลื่อนที่ของขาหุ่นยนต์โดยใช้ตัวควบคุมพี ไอ และ พีไอดี

#### Abstract

Shape memory alloy (SMA) is a smart material that can memorize its physical shape. SMA has many excellent characteristics such as high flexibility, small size and no electromagnetic interference. Hence, this thesis presents the design of robot by using SMA. The electrical and mechanical characteristics of SMA are studied first in order to find the mathematical model. Then, SMA is adopted as an actuator for robot motion. Finally, the motion control of robot is proposed by using P, PI and PID controllers.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

ชื่อเรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	I
สารบัญ	II
สารบัญรูป	V
สารบัญตาราง	VIII
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการ	1
1.2 ขอบเขตของโครงการ	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎี โลหะจำรูป (SHAPE MEMORY ALLOYS)</b>	3
2.1 ประวัติความเป็นมาของโลหะจำรูป	3
2.2 คุณสมบัติของ โลหะจำรูป	3
2.3 ความสามารถในการจำรูป	4
<b>บทที่ 3 ทฤษฎีและหลักการออกแบบระบบควบคุม</b>	5
3.1 กระบวนการอุตสาหกรรม	5
3.2 ระบบควบคุม	6
3.3 การออกแบบระบบควบคุม	7
3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	9
3.5 การควบคุมแบบป้อนกลับ	12
3.6 การเลือกและการปรับเครื่องควบคุม	22
3.7 การปรับเครื่องควบคุมโดยวิธีทดลองผิดทดลองถูก	29
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองคุณสมบัติของโลหะจำรูป</b>	33
4.1 ผลการทดลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโลหะจำรูป	33
4.2 การออกแบบชุดทดสอบ	36
4.3 การออกตัวทดสอบแรงการหดรูปของโลหะจำรูป	42
4.4 การคำนวณสำหรับการทำให้ร้อนด้วยไฟฟ้ากระแสตรง	44
4.5 การออกแบบหุ่นยนต์โดยใช้โลหะจำรูป	44
4.6 การใช้งานการ์ด D/A และการ์ด A/D	45
4.7 การทำงานโปรแกรมของแขนกลทดสอบในการควบคุมตำแหน่งมุม	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

ชื่อเรื่อง	หน้า
<b>บทที่ 5 การหาสมการทางคณิตศาสตร์และการออกแบบตัวควบคุมโดยใช้คอมพิวเตอร์</b>	<b>48</b>
5.1 การหาสมการทางคณิตศาสตร์(Modeling)ขาของ หุ่นยนต์ที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์	48
5.2 สัญญาณตอบสนองแบบลูปปิด Close Loop	51
5.3 ออกแบบตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของขาหุ่นยนต์โดยใช้ตัวควบคุมชนิดพี (P – Controller) ที่ใช้การจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์	53
5.4 ออกแบบตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของขาหุ่นยนต์โดยใช้ตัวควบคุมชนิดพีไอ (PI – Controller) ที่ใช้การจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์	55
5.5 ออกแบบตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของขาหุ่นยนต์โดยใช้ตัวควบคุมชนิดพีไอดี (PID – Controller) ที่ใช้การจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์	58
5.6 สรุปผลการทดลอง	60
<b>บทที่ 6 การออกแบบตัวควบคุมหลังปรับละเอียดจากระบบจริง</b>	<b>61</b>
6.1 ออกแบบตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของขาหุ่นยนต์จากระบบจริงโดยใช้ตัว ควบคุมชนิดพี (P – Controller) ที่มีการปรับละเอียด	62
6.2 ออกแบบตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของขาหุ่นยนต์จากระบบจริงโดยใช้ตัว ควบคุมชนิดพีไอ (PI – Controller) ที่มีการปรับละเอียด	63
6.3 สรุปผลการทดลอง	65
<b>บทที่ 7 บทวิจารณ์และบทสรุป</b>	<b>66</b>
7.1 บทสรุป	66
7.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการนี้	66
7.3 ปัญหาที่พบในการทำโครงการนี้	67
7.4 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา	68
<b>ภาคผนวก</b>	<b>69</b>
ภาคผนวก ก. วงจรที่ใช้ในการทดลอง	70
ภาคผนวก ข. วงจรจริงที่ใช้ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโลหะจํารูปของขาหุ่นยนต์	71
ภาคผนวก ค. โปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง	73

## สารบัญ (ต่อ)

ชื่อเรื่อง	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	89
หนังสืออ้างอิง	90



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

ชื่อรูป	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดง Shape Memory Spring	4
รูปที่ 3.1 จำลองแสดงตัวแปรเข้าและตัวแปรออกของกระบวนการ	7
รูปที่ 3.2 ผังสัญญาณของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ	13
รูปที่ 3.3 ผังสัญญาณของระบบควบคุมป้อนกลับภายหลังการลดรูป	13
รูปที่ 3.4 ผลการตอบสนองของกระบวนการอันดับหนึ่งที่ใช้เครื่องควบคุมแบบพี	17
รูปที่ 3.5 ผลการตอบสนองของกระบวนการที่มีการควบคุมแบบโอปรับค่า $K_c$ และ $T_i$ และการตอบสนองของกระบวนการเร็วขึ้นเมื่อกระบวนการมีความหน่วงน้อยและเกิดการแกว่ง	20
รูปที่ 3.6 ผลการตอบสนองของกระบวนการที่ใช้การควบคุมแบบพีไอดี	21
รูปที่ 3.7 ผลการตอบสนองของกระบวนการที่ใช้เครื่องควบคุมแบบต่างๆ	23
รูปที่ 3.8 ผลการตอบสนองของระบบควบคุม 2 ระบบ	24
รูปที่ 3.9 ผลการตอบสนองของระบบควบคุม	35
รูปที่ 3.10 ผลการปรับค่า $K_c$ ของเครื่องควบคุมแบบพี	30
รูปที่ 3.11 ผลการปรับค่า $T_i$ ของเครื่องควบคุมแบบพีโอ	31
รูปที่ 3.12 ผลการปรับค่า $T_D$ ของเครื่องควบคุมแบบพีไอดี	32
รูปที่ 4.1 เป็นชุดทดสอบที่ออกแบบเพื่อหาแบบจำลองในการควบคุมตำแหน่งมุม โดยใช้โลหะจํารูป 2 เส้นในการยึดตัวและหดตัวของโลหะจํารูป	36
รูปที่ 4.2 ผลตอบสนองของโลหะจํารูปที่กระแสไฟฟ้า 1.0 A	37
รูปที่ 4.3 ผลตอบสนองของโลหะจํารูปที่กระแสไฟฟ้า 1.2 A	37
รูปที่ 4.4 ผลตอบสนองของโลหะจํารูปที่กระแสไฟฟ้า 1.4 A	38
รูปที่ 4.5 ผลตอบสนองของโลหะจํารูปที่กระแสไฟฟ้า 1.6 A	38
รูปที่ 4.6 ผลตอบสนองของโลหะจํารูปที่กระแสไฟฟ้า 1.8 A	39
รูปที่ 4.7 ผลตอบสนองของโลหะจํารูปที่กระแสไฟฟ้า 2.0 A	39
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าของกระแสต่างๆที่ใช้ควบคุมโลหะจํารูป	40
รูปที่ 4.9 ชุดทดสอบแรงการหดรูปของโลหะจํารูป	42
รูปที่ 4.10 การออกแบบหุ่นยนต์โดยใช้โลหะจํารูป	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

ชื่อรูป	หน้า
รูปที่ 4.11 โฟลว์ชาร์จการทำงานของโปรแกรม	47
รูปที่ 5.1 แสดงกราฟการประมาณหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ชาติ 1 ของหุ่นยนต์	48
รูปที่ 5.2 แสดงกราฟการประมาณหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ชาติ 2 ของหุ่นยนต์	49
รูปที่ 5.3 แสดงกราฟการประมาณหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ชาติ 3 ของหุ่นยนต์	49
รูปที่ 5.4 แสดงกราฟการประมาณหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ชาติ 4 ของหุ่นยนต์	50
รูปที่ 5.5 แสดงผลตอบสนองแบบลูบปิด Close Loop ของชาติ 1 ของหุ่นยนต์	51
รูปที่ 5.6 แสดงผลตอบสนองแบบ ลูบปิด Close Loop ของชาติ 2 ของหุ่นยนต์	51
รูปที่ 5.7 แสดงผลตอบสนองแบบลูบปิด Close Loop ของชาติ 3 ของหุ่นยนต์	52
รูปที่ 5.8 แสดงผลตอบสนองแบบลูบปิด Close Loop ของชาติ 4 ของหุ่นยนต์	52
รูปที่ 5.9 แสดงผลตอบสนองของชาติ 1 เมื่อใช้ตัวควบคุมชนิดพี (P- Controller)	53
รูปที่ 5.10 แสดงผลตอบสนองของชาติ 2 เมื่อใช้ตัวควบคุมชนิดพี (P- Controller)	54
รูปที่ 5.11 แสดงผลตอบสนองของชาติ 3 เมื่อใช้ตัวควบคุมชนิดพี (P- Controller)	54
รูปที่ 5.12 แสดงผลตอบสนองของชาติ 4 เมื่อใช้ตัวควบคุมชนิดพี (P- Controller)	55
รูปที่ 5.13 แสดงผลตอบสนองของชาติ 1 เมื่อใช้ตัวควบคุมชนิดพีไอ (PI- Controller)	56
รูปที่ 5.14 แสดงผลตอบสนองของชาติ 2 เมื่อใช้ตัวควบคุมชนิดพีไอ (PI- Controller)	56
รูปที่ 5.15 แสดงผลตอบสนองของชาติ 3 เมื่อใช้ตัวควบคุมชนิดพีไอ (PI- Controller)	57
รูปที่ 5.16 แสดงผลตอบสนองของชาติ 4 เมื่อใช้ตัวควบคุมชนิดพีไอ (PI- Controller)	57
รูปที่ 5.17 แสดงผลตอบสนองของชาติ 1 เมื่อใช้ตัวควบคุมชนิดพีไอดี (PID- Controller)	58
รูปที่ 5.18 แสดงผลตอบสนองของชาติ 2 เมื่อใช้ตัวควบคุมชนิดพีไอดี (PID- Controller)	59
รูปที่ 5.19 แสดงผลตอบสนองของชาติ 3 เมื่อใช้ตัวควบคุมชนิดพีไอดี (PID- Controller)	59
รูปที่ 5.20 แสดงผลตอบสนองของชาติ 4 เมื่อใช้ตัวควบคุมชนิดพีไอดี (PID- Controller)	60
รูปที่ 6.1 แสดงตัวหุ่นยนต์จริงที่ได้ทำการออกแบบ โดยมีโลหะจํารูปเป็นตัวขับเคลื่อน	61
รูปที่ 6.2 แสดงผลตอบสนองของชาติ 1 เมื่อใช้ตัวควบคุมชนิดพี (P- Controller) $K_c=0.025$	62
รูปที่ 6.3 แสดงผลตอบสนองของชาติ 1 เมื่อใช้ตัวควบคุมชนิดพี (P- Controller) $K_c=0.5$	62
รูปที่ 6.4 แสดงผลตอบสนองของชาติ 1 เมื่อใช้ตัวควบคุมชนิดพี (P- Controller) $K_c=1$	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

ชื่อรูป	หน้า
รูปที่ 6.5 แสดงผลตอบสนองของขาที่ 1 เมื่อใช้ตัวควบคุมชนิดพีไอ (PI- Controller) $K_c = 1 \quad T_i = 1 \text{ S}$	63
รูปที่ 6.6 แสดงผลตอบสนองของขาที่ 1 เมื่อใช้ตัวควบคุมชนิดพีไอ (PI- Controller) $K_c = 1 \quad T_i = 3 \text{ S}$	64
รูปที่ 6.7 แสดงผลตอบสนองของขาที่ 1 เมื่อใช้ตัวควบคุมชนิดพีไอ (PI- Controller) $K_c = 1 \quad T_i = 5 \text{ S}$	64
รูปที่ 6.8 แสดงผลตอบสนองของขาที่ 1 เมื่อใช้ตัวควบคุมชนิดพีไอ (PI- Controller) $K_c = 1.25 \quad T_i = 1 \text{ S}$	65



## สารบัญตาราง

ชื่อตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 สรุปรูปร่างของโลหะจำรูป	3
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าเวลาที่ทำให้โลหะจำรูปหดรูปตามค่ากระแสขนาดต่างๆ ที่ป้อนให้กับ โลหะผสมนิกเกิล – ไทเทเนียม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1mm.ภายใต้เงื่อนไข TA=25 องศาเซลเซียส	34
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าเวลาที่ทำให้โลหะจำรูปยืดตัว ตามค่ากระแสขนาดต่างๆ ที่ป้อนให้กับ โลหะผสม นิกเกิล – ไทเทเนียม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1mm.ภายใต้เงื่อนไข TA = 25 องศาเซลเซียส	35
ตารางที่ 4.3 ความคลาดเคลื่อนของมุม ที่เกิดจากแรงเฉื่อยของโลหะจำรูปและการยืดตัวของโลหะจำรูป	41
ตารางที่ 4.4 การวัดค่าเวลาระหว่างน้ำหนักกับกระแสที่ทำให้ โลหะจำรูปคืนรูปเดิม โดยการป้อนกระแสให้กับโลหะจำรูป แล้วมีการหดรูปได้ 3 cm.	43
ตารางที่ 5.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 ค่าของระบบคือ อัตราขยายกระบวนกร (K) ค่าเวลาหน่วงของกระบวนกร ( $t_0$ ) และค่าคงที่ของกระบวนกร ( $\tau$ ) ที่ได้มาจากการคำนวณด้วยวิธีการจำลองทางคอมพิวเตอร์	50

## บทที่ 1

### บทนำ

ปรากฏการณ์จำรูปในโลหะไม่เพียงแต่น่าทึ่ง และก่อให้เกิดความสนเท่ห์ต่อผู้พบเห็นเท่านั้น แต่ยังนำไปประยุกต์ให้เกิดประโยชน์ได้หลากหลายและกว้างขวาง แม้ว่าในต่างประเทศจะมีการค้นพบและศึกษาปรากฏการณ์จำรูปในโลหะมาเป็นระยะเวลาอันยาวนานกว่า 60 ปี แต่ในขณะนี้เรื่องนี้ก็ยังคงเป็นเรื่องค่อนข้างใหม่สำหรับคนไทย อย่างไรก็ตามก็เป็นเรื่องที่น่ายินดีว่าในปัจจุบันประเทศเราได้มีการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านนี้ขึ้นบ้างแล้ว

ซึ่งในโครงการนี้ได้มีการนำเอาโลหะจำรูปมาประยุกต์ใช้ในหุ่นยนต์เป็นการนำโลหะจำรูป ซึ่งมีคุณสมบัติความยืดหยุ่นสูง (Superelastic) และยังมีขนาดเล็กมาเป็นตัวขับเคลื่อนกลไกและข้อต่อต่างๆของตัวหุ่นยนต์นั้นด้วย

โลหะจำรูปเป็น โลหะผสมที่มีความสามารถในการจำรูปแบบทางกายภาพได้หลายวิธีด้วยกัน กล่าวคือ สามารถจำได้โดยการ Train หรือ กำหนดอุณหภูมิ ที่เหมาะสม โดยสามารถนำมาประยุกต์ใช้ด้วยการป้อนกระแสไฟฟ้าเพื่อให้เกิดความร้อน ซึ่งความร้อนนี้เป็นตัวแปรในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโลหะจำรูป ดังนั้นในการประยุกต์ใช้โลหะจำรูปในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์สามารถกำหนดได้ด้วยระดับของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโลหะจำรูป

เพราะฉะนั้นการควบคุมหุ่นยนต์จะกระทำได้โดยการควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรมในการควบคุม เพื่อที่ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ จะเป็นไปได้ด้วยความสะดวกง่ายในการใช้งาน และการแสดงผล

#### 1.1 ความเป็นมาของโครงการ

ปัจจุบันโลกเราได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านต่างๆมาช่วยในกระบวนการผลิตทางด้านอุตสาหกรรมมากมาย แต่อย่างไรก็ตามยิ่งเทคโนโลยีพัฒนาเท่าใดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์ก็ตามมาเท่านั้นอีกประการหนึ่งคือในกระบวนการอุตสาหกรรมนั้นบางครั้งอาจจะมีบางส่วนที่เป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานที่ไม่สามารถเข้าใกล้หรือเข้าถึงบริเวณนั้นได้

ซึ่งด้วยเหตุนี้เองจึงเป็นแรงจูงใจให้คิดหาวิธีที่จะลดผลกระทบและอันตรายที่จะเกิดกับ ผู้ปฏิบัติงานนั้นลงให้ได้ นั่นก็คือคือเราต้องมีหุ่นยนต์ที่สามารถปฏิบัติงานแทนผู้ปฏิบัติงานนั้น โดยมี ผู้ที่ปฏิบัติงานนั้นเป็นคนคอยควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์

ประกอบกับต้องการที่จะนำวัสดุจำพวกโลหะจำรูป มาทำการทดสอบหาคุณสมบัติต่างๆ และต้องการที่จะทำการวิจัยเพื่อที่จะศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโลหะจำรูป อีกทั้งยังต้องการที่จะ สร้างหุ่นยนต์ที่ลดผลกระทบทางด้านเสียงและต้องการให้ขนาดของหุ่นยนต์มีขนาดเล็กลงเพื่อที่จะ นำไปใช้ในเฉพาะที่

ดังนั้นจึงมีแนวคิด ที่จะนำเอาโลหะจำรูปได้มาประยุกต์ใช้เป็นส่วนหนึ่งของหุ่นยนต์ เช่น นำโลหะจำรูปได้มาเป็นตัวขับเคลื่อนหุ่นยนต์ โดยมีคอมพิวเตอร์เป็นตัวควบคุมการทำงาน ซึ่ง ก่อนที่เราจะนำโลหะจำรูปมาใช้เราก็ต้องนำโลหะจำรูปมาทดสอบหาคุณสมบัติเสียก่อนซึ่งก็เป็น ที่มาของโครงการนี้

## 1.2 ขอบเขตของโครงการ

1. ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโลหะจำรูป เช่นการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโลหะจำรูป และจับเวลาในการหดตัวของโลหะจำรูปที่กระแสไฟฟ้าขนาดต่างๆ
2. ออกแบบชุดทดสอบที่ออกแบบเพื่อหาแบบจำลองในการควบคุมตำแหน่งมุม โดยใช้ โลหะจำรูป 2 เส้นในการยึดตัวและหดตัวของ โลหะจำรูป
3. ออกแบบชุดทดสอบแรงดึงเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโลหะจำรูปที่กระแสไฟฟ้าขนาด ต่างๆ
4. ออกแบบโครงสร้างของตัวหุ่นยนต์ที่ใช้โลหะจำรูปในการเคลื่อนที่
5. ศึกษาโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมและการใช้งานการ์ด A/D และ การ์ด D/A
6. หาสมการทางคณิตศาสตร์การเคลื่อนที่ของขาหุ่นยนต์แต่ละขา
7. ออกแบบตัวควบคุมเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของขาแต่ละขาและควบคุมความเร็วของขา แต่ละขารวมทั้งออกแบบสตีปการเดินของหุ่นยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎี โลหะจำรูป (SHAPE MEMORY ALLOYS)

#### 2.1 ประวัติความเป็นมาของโลหะจำรูป

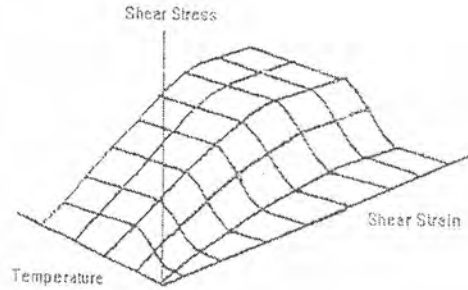
ได้มีการค้นพบ ปรากฏการณ์จำรูป ในโลหะผสมมาเป็นเวลานานกว่า 60 ปีแล้ว โดยช่วงเวลาที่สำคัญอาจสรุปได้ดังนี้

ปีที่ค้นพบ	ชนิดของโลหะผสม	ผู้ค้นพบ
พ.ศ. 2475	ทอง-แคดเมียม (Au-Cd)	Chang และ Read
พ.ศ. 2481	ทองแดง-สังกะสี (Cu-Zn) หรือทองเหลือง(brass)	-- ไม่มีข้อมูล --
พ.ศ. 2505	นิกเกิล-ไทเทเนียม(Ni-Ti)	Buehler และเพื่อนร่วมงาน

ตารางที่ 2.1 สรุปชนิดของโลหะจำรูป

#### 2.2 คุณสมบัติของ Shape Memory Alloy

Shape Memory Alloy (SMA) เป็นอุปกรณ์ที่ทำงานโดยอาศัยหลักการขยายตัวของโลหะ เมื่อได้รับความร้อน ซึ่งในสภาพธรรมชาติของโลหะ เมื่อวัตถุได้รับความร้อนโมเลกุลจะสั่นด้วยความถี่สูงและมีค่าแอมพลิจูด (Amplitude) สูง ดังนั้นโมเลกุลจึงขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน วัตถุทั้งชิ้นจะขยายตัว ซึ่งวัตถุแต่ละชนิดนั้นจะมีอัตราการขยายตัวที่ไม่เท่ากัน และเวลาในการตอบสนองต่ออุณหภูมิ (Time Response) ก็ไม่เท่ากัน ซึ่งในการใช้งานทั่วไปมักจะนำโลหะ 2 ชนิดที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Thermal Expansion Coefficient) ต่างกันมาประกบติดกัน เมื่อได้รับความร้อนการขยายตัวของเนื้อโลหะแต่ละชนิดซึ่งไม่เท่ากันจะทำให้เกิดการโค้งงอขึ้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 Shape Memory Alloy ก็เช่นกัน มันถูกทำขึ้นจากโลหะ Nickel และ Titanium โดยขึ้นรูปเป็นลักษณะของ สปริง แล้วจัดตำแหน่งของโลหะทั้งสองชนิดให้เหมาะสมเพื่อให้ผลลัพธ์ของการขยายตัวของโลหะ มีมากในทิศทางการยึดหดของสปริง



รูปที่ 2.1 แสดง Shape Memory Spring

### 2.3 ความสามารถในการจำรูป

ก่อนการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง โลหะจำรูปมีโครงสร้างจุลภาคแบบ ทวินด์ มาร์เทนไซต์ (twinned martensite) เมื่อได้รับแรงกระทำโครงสร้างนี้จะเปลี่ยนแปลงไปเป็น โครงสร้างแบบ มาร์เทนไซต์ที่เสียรูป (deformed martensite) เมื่อเราทำให้โลหะร้อนขึ้น จนกระทั่งอุณหภูมิถึงค่าหนึ่ง เรียกว่า อุณหภูมิเปลี่ยนแปลง (transformation temperature) โครงสร้างจะเปลี่ยนไปเป็น ออสเทนไทต์ (austensite) จากนั้นถ้าเราปล่อยให้โลหะจำรูปเย็นตัวลง โครงสร้างจุลภาคจะกลับไปเป็นแบบ ทวินด์ มาร์เทนไซต์ อีกครั้งหนึ่ง

โลหะจำรูปจะยังคงรักษาความจำไว้ได้อย่างดี ถ้าได้รับความเครียดไม่สูงมากเกินไป ตัวอย่างเช่น ปริมาณที่ขึ้นงานที่ทำจากโลหะผสม Ni-Ti และ Cu-Zn-Al ไม่ควรเกิน 6% และ 2% ตามลำดับในระดับความเครียดที่ต่ำกว่านี้ โลหะจำรูปอาจคืนรูปได้นับหมื่นนับแสนครั้ง แต่ถ้าระดับความเครียดสูงกว่านี้ โลหะดังกล่าวอาจคืนรูปได้เพียงไม่กี่ครั้งเท่านั้น

ปรากฏการณ์จำรูปที่กล่าวมาแล้วเรียกว่า การจำรูปแบบทิศทางเดียว (One-way Shape Memory Effect) ซึ่งหมายความว่าถ้าเรานำสปริงจำรูปเดิมหดสั้นมาดึงให้ยืดออกด้วยอุณหภูมิต่ำ จากนั้นทำให้สปริงร้อนขึ้น สปริงจะคืนรูปร่างเดิมแต่ถ้าเราปล่อยให้สปริงเย็นตัวสปริงก็จะหดอยู่อย่างนั้น โลหะแบบนี้เรียกว่าโลหะจำรูปแบบความจำทิศทางเดียว

ปรากฏการณ์จำรูปที่น่าสนใจอีกลักษณะหนึ่งเรียกว่า การจำรูปแบบสองทิศทาง (Two-way Shape Memory Effect) ซึ่งหมายความว่าถ้าเรานำสปริงจำรูปแบบความจำสองทิศทางที่เดิมหดสั้นที่อุณหภูมิต่ำมาทำให้ร้อนขึ้น สปริงก็จะยืดออกโดยอัตโนมัติ และถ้าเราทำให้สปริงเย็นตัวลงอีกครั้งสปริงก็จะหดตัวกลับที่เดิม โดยอัตโนมัติเช่นกัน

## บทที่ 3

### ทฤษฎีและหลักการออกแบบระบบควบคุม

#### 3.1 กระบวนการอุตสาหกรรม

##### ระบบควบคุม (Control System)

ระบบควบคุม หมายถึง โรงงาน เครื่องจักร กระบวนการผลิต อุปกรณ์วัด และอุปกรณ์ควบคุมที่ปฏิบัติงานร่วมกันอย่างเป็นระบบ เพื่อให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างรวมกัน คือ

1. การกำจัดผลการรบกวนจากสภาพแวดล้อมภายนอก
2. การรักษาเสถียรภาพของกระบวนการ
3. การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต

##### เครื่องวัดและเครื่องควบคุมในกระบวนการอุตสาหกรรม

กระบวนการอุตสาหกรรมประกอบด้วย กระบวนการเดิมและอุปกรณ์ที่เพิ่มเติมเข้าไปภายหลังเพื่อปรับปรุงกระบวนการให้สามารถปฏิบัติงานได้ตามเป้าหมายที่วางไว้ อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรมประกอบด้วย

1. กระบวนการ
2. เครื่องวัด (measuring instrument)
3. เครื่องส่งสัญญาณ (transmitter)
4. สายสัญญาณ (transmission line)
5. เครื่องควบคุม
6. อุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย (final control element)
7. อุปกรณ์บันทึกสัญญาณ

##### การใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ในกระบวนการอุตสาหกรรม

ความก้าวหน้าทางอิเล็กทรอนิกส์และเทคโนโลยีด้านคอมพิวเตอร์ ทำให้ในระยะสิบปีที่ผ่านมา ราคาของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเครื่องคอมพิวเตอร์ลดลงอย่างรวดเร็ว แต่กลับมีคุณภาพเพิ่มขึ้นอย่างมหาศาลทำให้มีการนำระบบคอมพิวเตอร์มาใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวางมากขึ้นเป็นลำดับ โดยเฉพาะในโรงกลั่นน้ำมัน โรงแยกก๊าซ และอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ซึ่งเป็นโรงงานอุตสาหกรรมที่มีขนาดใหญ่ และต้องการผลการควบคุมที่มีความน่าเชื่อถือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูง เนื่องจากการใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ควบคุมกระบวนการอุตสาหกรรมจะทำให้ประสิทธิภาพการควบคุมดีขึ้นและสามารถลดค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ที่ใช้ในการควบคุมการผลิตและบำรุงรักษาเครื่องจักรต่าง ๆ ให้น้อยลง

### 3.2 ระบบควบคุม

#### ตัวแปรในกระบวนการอุตสาหกรรม

ตัวแปรต่าง ๆ ในกระบวนการอุตสาหกรรม เช่น อุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหล และความเข้มข้นของสารเคมีในการพิจารณาเพื่อวิเคราะห์ระบบควบคุม สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม

##### 1. ตัวแปรเข้า (input variable)

ตัวแปรเข้า คือ ตัวแปรภายนอกที่มีผลกระทบต่อสภาพของกระบวนการ และทำให้สภาพกระบวนการเปลี่ยนแปลง ประกอบด้วย

1.1 สัญญาณควบคุมและตัวแปรปรับกระบวนการ หมายถึง สัญญาณที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ตามความต้องการของผู้ออกแบบ โดยตรง หรือเปลี่ยนแปลงค่าผ่านเครื่องควบคุม โดยการกำหนดเป้าหมายให้เครื่องควบคุมคำนวณค่าสัญญาณควบคุมเพื่อเปลี่ยนแปลงสภาพกระบวนการอีกทีหนึ่ง

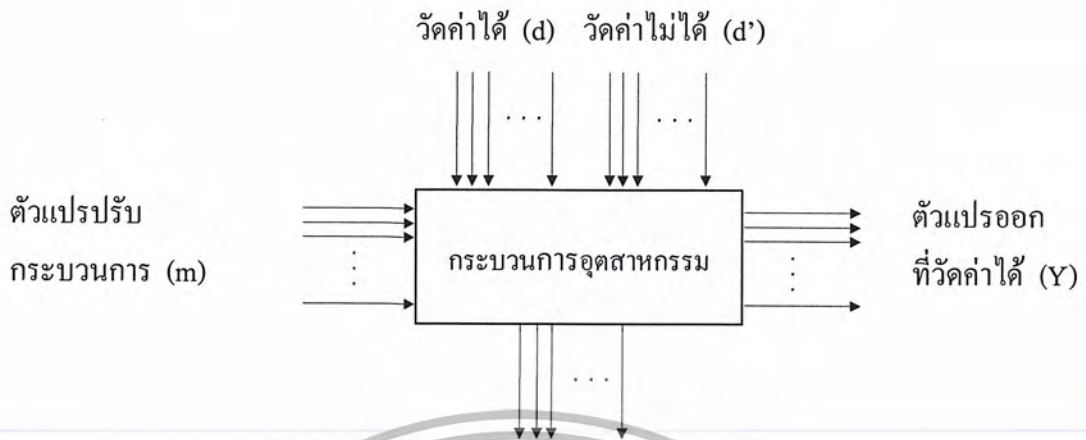
1.2 การรบกวนภายนอก คือ สภาพแวดล้อมที่ไม่สามารถควบคุมและกำหนดค่าตามความต้องการของผู้ออกแบบได้ โดยตรงหรือกำหนดค่าโดยผ่านอุปกรณ์ควบคุมอื่นแต่สภาพแวดล้อมเหล่านี้มีผลกระทบที่ทำให้สภาพของกระบวนการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

##### 2. ตัวแปรออก (output variable)

ตัวแปรออก คือ สภาพต่าง ๆ ของกระบวนการที่เปลี่ยนแปลงค่าไปเนื่องจากผลกระทบของตัวแปรเข้าประกอบด้วย

2.1 ตัวแปรที่วัดค่าได้ หมายถึง สภาพกระบวนการที่สามารถตรวจสอบค่าหรือวัดค่าได้โดยตรงโดยใช้เครื่องวัดต่าง ๆ

2.2 ตัวแปรที่วัดค่าไม่ได้ หมายถึง สภาพกระบวนการที่ไม่สามารถตรวจสอบค่าหรือวัดค่าได้ตรงโดยใช้เครื่องวัดต่าง ๆ ต้องใช้เครื่องวัด วัดค่าตัวแปรอื่นเพื่อคำนวณค่าตัวแปรที่วัดค่าไม่ได้อีกทีหนึ่งการรบกวนภายนอก



รูปที่ 3.1 จำลองแสดงตัวแปรเข้าและตัวแปรออกของกระบวนการ

### 3.3 การออกแบบระบบควบคุม

การออกแบบระบบควบคุมในกระบวนการอุตสาหกรรมประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดวัตถุประสงค์ในการควบคุม
2. เลือกสัญญาณวัดเพื่อตรวจสอบสภาพกระบวนการ
3. การเลือกสัญญาณควบคุมเพื่อปรับสภาพกระบวนการ
4. กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างค่าวัดและสัญญาณควบคุม
5. กำหนดคุณสมบัติของเครื่องควบคุม

#### 1. การกำหนดวัตถุประสงค์ในการควบคุม

วัตถุประสงค์หรือเป้าหมายการควบคุม เป็นสิ่งแรกที่ต้องพิจารณาในการออกแบบระบบควบคุม วัตถุประสงค์หลักทั่วไปในการควบคุมกระบวนการอุตสาหกรรมประกอบด้วย

- 1.1 การกำจัดผลลการรบกวนภายนอก
- 1.2 การรักษาเสถียรภาพของกระบวนการ
- 1.3 การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตของกระบวนการ

#### 2. การเลือกสัญญาณวัดเพื่อตรวจสอบสภาพกระบวนการ

เมื่อกำหนดเป้าหมายการควบคุมเรียบร้อยแล้ว ปัญหาการออกแบบระบบควบคุมที่

ติดตามมา คือ ควรตรวจสอบสภาพกระบวนการอย่างไรให้เป็นไปตามเป้าหมายที่วางไว้ การเลือก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าวัดจากระบบการเช่น อุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหล และระดับของเหลวเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถใช้ตรวจสอบสภาพของกระบวนการ บางครั้งสภาพของกระบวนการไม่สามารถตรวจสอบจากค่าวัดของกระบวนการโดยตรง ต้องใช้ค่าวัดอื่นที่มีความสัมพันธ์กับค่าวัดที่ต้องการแทน โดยใช้การคำนวณช่วยเพื่อตรวจสอบสภาพกระบวนการค่าวัดที่สามารถแสดงสภาพของกระบวนการโดยตรงเรียกว่า ค่าวัดต้น (primary measurement) และสภาพกระบวนการที่ไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรงต้องให้ค่าวัดอื่นและการคำนวณช่วย โดยค่าวัดที่ใช้ในการคำนวณเรียกว่า ค่าวัดรอง (secondary measurement) โดยแสดงสภาพของกระบวนการที่ต้องการทราบเป็นฟังก์ชันของค่าวัดรอง คือ

$$\text{สภาพกระบวนการ} = f(\text{ค่าวัดรอง})$$

ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ของสภาพกระบวนการและค่าวัดรอง อาจคำนวณได้จากกฎและทฤษฎีพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์ ประสิทธิภาพของผู้ออกแบบระบบควบคุมและผลการทดลอง

### 3. การเลือกสัญญาณควบคุมเพื่อปรับสภาพกระบวนการ

การเลือกสัญญาณควบคุมที่ใช้ปรับสภาพกระบวนการ ควรพิจารณาเลือกตัวแปรที่มีผลให้สภาพกระบวนการเปลี่ยนแปลง โดยตรงสามารถปรับค่าและสังเกตผลการเปลี่ยนแปลงได้ง่าย

### 4. การกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างค่าวัดและสัญญาณควบคุม

การออกแบบระบบควบคุม เมื่อสามารถกำหนดเป้าหมายการควบคุม เลือกสัญญาณวัดเพื่อตรวจสอบสภาพกระบวนการ และเลือกสัญญาณควบคุมเพื่อปรับสภาพกระบวนการแล้ว ขั้นตอนการออกแบบระบบควบคุมขั้นสุดท้ายคือ การกำหนดรายละเอียดการควบคุม โดยจัดโครงสร้างของระบบควบคุม (control configuration) หรือเลือกวงควบคุม (control loop) ที่เหมาะสม เพื่อให้การควบคุมได้ผลดีที่สุด

โครงสร้างของระบบควบคุมหรือวงควบคุมหมายถึง การติดตั้งอุปกรณ์วัดและควบคุมเพื่อนำสัญญาณจากเครื่องวัดมาสร้างสัญญาณควบคุมเพื่อปรับสภาพกระบวนการให้เข้าสู่เป้าหมายที่ต้องการ โครงสร้างของระบบควบคุมแบ่งออกเป็น 2 แบบดังนี้

1. สัญญาณควบคุมจุดเดียวกันได้จากค่าวัดต่างจุดกัน
2. สัญญาณควบคุมต่างจุดกันได้จากค่าวัดจุดเดียวกัน

## 5. การกำหนดคุณสมบัติของเครื่องควบคุม

กระบวนการอุตสาหกรรมทุกกระบวนการต้องใช้เครื่องควบคุมปรับสภาพกระบวนการให้เข้าสู่เป้าหมายโดยความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณควบคุมและค่าวัดของกระบวนการจะมีลักษณะอย่างไรขึ้นกับคุณสมบัติของเครื่องควบคุมแต่ละชนิด

### 3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การวิเคราะห์และออกแบบกระบวนการอุตสาหกรรมหรือระบบควบคุมที่ใช้ในกระบวนการ อุตสาหกรรมจำเป็นต้องทราบธรรมชาติและคุณสมบัติต่าง ๆ ของกระบวนการและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการทั้งหมด เพื่อใช้ศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงสภาพของกระบวนการเมื่อถูกรบกวนจะการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมภายนอกหรือได้รับการควบคุมจากเครื่องควบคุมหรืออุปกรณ์ควบคุมอื่น ๆ การศึกษาธรรมชาติและคุณสมบัติต่าง ๆ ของกระบวนการมี 2 วิธี คือ

1. การศึกษาคุณสมบัติของกระบวนการ โดยใช้ผลการทดลองการวิเคราะห์กระบวนการสามารถทำได้โดยใช้อุปกรณ์วัดและเครื่องควบคุมทดลองป้อนสัญญาณเข้าและสังเกตผลจากการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณออกของกระบวนการและอุปกรณ์ต่าง ๆ การวิเคราะห์กระบวนการโดยวิธีนี้เสียเวลาและค่าใช้จ่ายมาก

2. การศึกษาคุณสมบัติของกระบวนการ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์และการคำนวณเนื่องจากการออกแบบระบบควบคุมส่วนใหญ่ต้องทำให้สำเร็จเรียบร้อยก่อนการก่อสร้างและติดตั้งอุปกรณ์วัดและควบคุมต่าง ๆ ในกระบวนการอุตสาหกรรมจริง การศึกษาคุณสมบัติของกระบวนการโดยการวิเคราะห์ผลการทดลองป้อนสัญญาณเข้าให้อุปกรณ์ทุกตัวและสังเกตผลจากการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณออกจึงไม่สามารถจะทำได้ การวิเคราะห์กระบวนการอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จึงต้องทำโดยแสดงคุณสมบัติของอุปกรณ์และกระบวนการโดยใช้สมการคณิตศาสตร์ต่างๆเช่น สมการพีชคณิต สมการอนุพันธ์ (differential equation) และสมการแตกต่าง (difference equation) และวิเคราะห์คุณสมบัติของกระบวนการจากคำตอบของสมการเหล่านี้

### ประโยชน์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การควบคุมกระบวนการอุตสาหกรรมเพื่อรักษาสภาพของกระบวนการให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์หรือเป้าหมายการควบคุมที่กำหนดไว้ จำเป็นต้องทราบสมบัติของกระบวนการ อุปกรณ์และส่วนประกอบต่าง ๆ ภายในระบบควบคุมทั้งหมด เพื่อวิเคราะห์หาคุณสมบัติของระบบควบคุมรวมทั้งระบบและผลการควบคุมล่วงหน้าก่อนการก่อสร้างกระบวนการและติดตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้เสียค่าใช้จ่าย  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ควบคุมทั้งหมดในกระบวนการจริง ระบบควบคุมสำหรับกระบวนการอุตสาหกรรมทั่วไป จึงไม่สามารถออกแบบโดยใช้การทดลองป้อนสัญญาณเข้าให้กระบวนการเพื่อสังเกตผลที่จะเกิดขึ้นสภาพความเป็นจริง ถึงแม้ว่าในทางปฏิบัติอาจจะสามารถหาอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในกระบวนการจริงได้ทั้งหมดมาใช้ในการทดสอบก็ตาม เพราะทำให้เสียทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายมาก การหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ต่าง ๆ ของกระบวนการหรือการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการจึงมีความจำเป็นที่จะต้องนำมาใช้ในการออกแบบระบบควบคุม สำหรับกระบวนการอุตสาหกรรม

### แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ประกอบด้วย

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น ถังผสมถ่ายเทความร้อน หม้อกำเนิดไอน้ำ หอกลั่น หรือกระบวนการผลิตแบบแบตช์ ประกอบด้วย ตัวแปรและสมการ ดังนี้

1. ตัวแปรต้น (independent variable) คือตัวแปรแสดงการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมและการรบกวนภายนอก ซึ่งทำให้สภาพของกระบวนการเปลี่ยนแปลง
2. ตัวแปรตาม (dependent variable) คือตัวแปรแสดงสภาพของกระบวนการที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต้น คือ สัญญาณควบคุมและการรบกวนภายนอก
3. สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สามารถทำได้โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงปริมาณพื้นฐาน ทางฟิสิกส์ 3 ประการ คือ มวลสาร (mass) พลังงาน (energy) และโมเมนตัม (momentum) โดยแสดงปริมาณพื้นฐานทั้ง 3 ประการในรูปของตัวแปรอื่นทั้งที่สามารถวัดค่าได้โดยตรง หรือไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรงก็ตาม สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถหาได้จากกฎพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์กายภาพ (physical science) สาขาต่าง ๆ เช่น กลศาสตร์ กลศาสตร์ของไหล เทอร์โมไดนามิกส์ และแม่เหล็กไฟฟ้า ส่วนตัวแปรต่าง ๆ ของกระบวนการ เช่น อุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหล ระดับของเหลว ความหนาแน่น และความเข้มข้นของสารเคมี ถูกนำมาใช้แทน เพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงของมวลสาร พลังงาน และโมเมนตัม ในสมการคณิตศาสตร์ ตัวแปรที่ใช้แสดงสภาพของกระบวนการเรียกว่า ตัวแปรสถานะ (state variable) และสมการที่แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรสถานะต่าง ๆ เรียกว่า สมการสถานะ (state equation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ปัญหาการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ ประกอบด้วย

1. ความรู้ทางวิทยาศาสตร์ในปัจจุบัน สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการได้เพียงบางส่วนเท่านั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงไม่สามารถคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ถูกต้องทั้งหมด เช่น ปัจจุบันความรู้ทางด้านเทอร์โมไดนามิกส์ยังไม่สามารถอธิบายสภาพสมดุลของสารประกอบหรือสารผสมหลายชนิดได้อย่างถูกต้องตามความเป็นจริงทั้งหมด

2. ค่ากระบวนการที่ใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่ถูกต้องทำให้การวิเคราะห์และคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงของกระบวนการไม่ถูกต้อง นอกจากนี้ ค่ากระบวนการมักแปรตามเวลา เช่น ค่าคงที่ในการทำปฏิกิริยาเคมี  $k_0$  มักเปลี่ยนแปลงตามเวลา จึงต้องแสดงการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วย

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นทั้งหมดได้ใกล้เคียงกับความจริงมีขนาดใหญ่และซับซ้อนมากขึ้นไป เช่น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหอดัมกลั่นที่มีทฤษฎีจำนวน  $N$  ประกอบด้วย สมการอนุพันธ์ชนิดไม่เป็นเชิงเส้นจำนวนถึง  $2N+4$  และสมการพีชคณิตจำนวน  $2N+1$

## การศึกษาขอบเขตในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่น่าเชื่อถือ มีประสิทธิภาพ และสามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการได้ถูกต้องเป็นเรื่องยาก การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ควรศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ของกระบวนการและระบบควบคุม ดังนี้

1. เป้าหมายหรือวัตถุประสงค์การควบคุม
2. การรบกวนภายนอกของกระบวนการ
3. คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของกระบวนการ

เมื่อทราบคุณสมบัติของกระบวนการแล้ว การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดขอบเขตของกระบวนการที่จะสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
2. เขียนสมการแสดงการเปลี่ยนแปลงของมวลสารพลังงาน และโมเมนตัม ที่เกิดภายในกระบวนการ
3. เขียนสมการอื่นเพิ่มเติมเพื่อให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการสมบูรณ์เช่นสมการแสดงอัตราการทำปฏิกิริยาเคมี สมการแสดงสภาพสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์
4. เขียนสมการอื่นเพิ่มเติมเพื่อให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการสมบูรณ์เช่นสมการแสดงอัตราการทำปฏิกิริยาเคมี สมการแสดงสภาพสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยเป็นอย่างสูง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. พิจารณาสมการสถานะตัวแปรสถานะตัวแปรเข้าและตัวแปรออกของกระบวนการ วัตถุประสงค์การควบคุมทั่วไปคือ รักษาเสถียรภาพของกระบวนการ กำจัดผล การรบกวนจากภายนอก และเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต จากความต้องการดัง กล่าว เมื่อแสดงในรูปความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของตัวแปรสถานะ  $x$  ซึ่งอาจเป็นอุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหล ปริมาตร และ ความเข้มข้นของสาร เป็นต้น ดังนี้

1. ตัวแปร  $x =$  ค่าเป้าหมาย
2. ตัวแปร  $x <$  ค่าขอบเขต หรือ
3. ตัวแปร  $x >$  ค่าขอบเขต

การใช้เป้าหมายการควบคุมเป็นตัวแปรสถานะ จะทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรกระบวนการที่ต้องการควบคุมโดยตรงทำให้การวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมง่ายและสะดวกขึ้น

กระบวนการถูกรบกวนจากสภาพแวดล้อมภายนอกต่างๆ ที่มีเปลี่ยนแปลง โดยผลกระทบที่เกิดขึ้นจะมากหรือน้อยขึ้นกับธรรมชาติและคุณสมบัติของแต่ละกระบวนการการสร้าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จึงไม่สามารถแสดงผลกระทบจากการรบกวนทั้งหมดที่เกิดขึ้นกับกระบวนการได้ ต้องเลือกเฉพาะการรบกวนภายนอกที่มีผลกระทบคือกระบวนการเท่านั้น

การสร้าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ถ้าทราบคุณสมบัติของกระบวนการอย่างละเอียด จะช่วยให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ง่ายและลดความซับซ้อนลง

### 3.5 การควบคุมแบบป้อนกลับ

#### คุณสมบัติของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

ระบบควบคุมแบบป้อนกลับในกระบวนการอุตสาหกรรมแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ กระบวนการ เครื่องวัด เครื่องควบคุม และอุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของส่วนประกอบต่างๆ ของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ คือ

#### 1. กระบวนการ

$$y(s) = G_p(s) m(s) + G_d(s) d(s) \quad (3.1)$$

#### 2. เครื่องวัด

$$y_m(s) = G_m(s) y(s) \quad (3.2)$$

#### 3. เครื่องควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารตัวอย่างสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

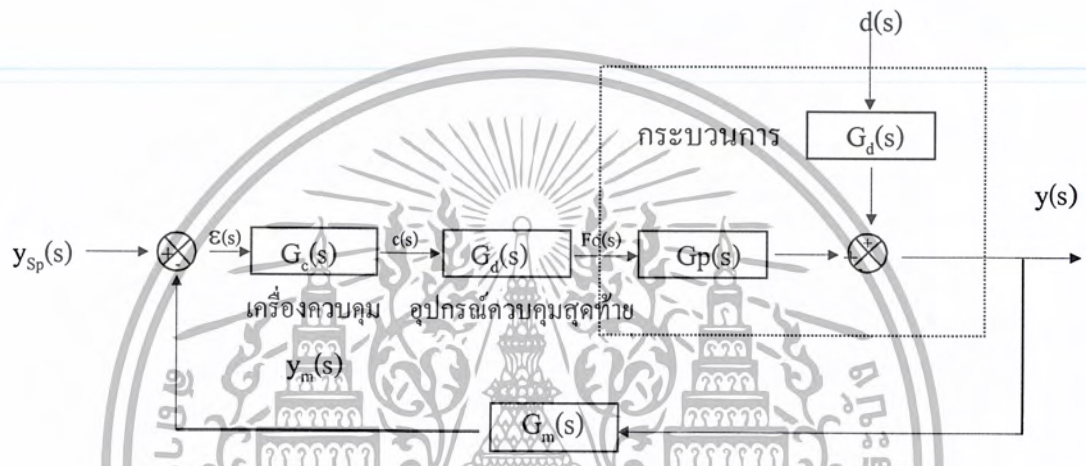
$$\mathcal{E}(s) = y_{sp}(s) - y_m(s) \tag{3.3}$$

และ

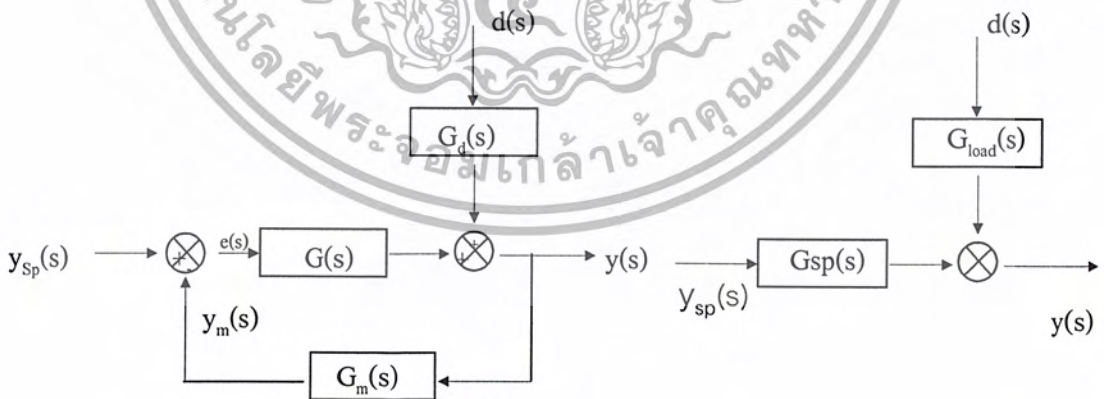
$$c(s) = G_c(s) \mathcal{E}(s) \tag{3.4}$$

4. อุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย

$$m(s) = G_f(s) c(s) \tag{3.5}$$



รูปที่ 3.2 ผังสัญญาณของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ



รูปที่ 3.3 ผังสัญญาณของระบบควบคุมป้อนกลับภายหลังการลดรูป

จากสมการ (3.4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ m(s) เพื่อการศึกษา G\_f(s) G\_c(s) E(s) อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (3.3)

$$m(s) = G_f(s) G_c(s) [y_{sp}(s) - y_m(s)]$$

จากสมการ (3.2)

$$m(s) = G_f(s) G_c(s) [y_{sp}(s) - G_m(s) y(s)]$$

แทนค่าในสมการ (3.1)

$$y(s) = G_p(s) \{ G_f(s) G_c(s) [y_{sp}(s) - G_m(s) y(s)] \} + G_d(s) d(s) \quad (3.6)$$

$$y(s) = \frac{G_p(s) G_f(s) G_c(s)}{1 + G_p(s) G_f(s) G_c(s) G_m(s)} y_{sp}(s) + \frac{G_d(s)}{1 + G_p(s) G_f(s) G_c(s) G_m(s)} d(s) \quad (3.7)$$

สมการ (3.6) คือ ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันรวมของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ พจน์แรก แสดงผลการตอบสนองของตัวแปรออกจากผลการเปลี่ยนเป้าหมายการควบคุม และพจน์ที่สอง แสดงผลการตอบสนองของตัวแปรออกจากผลการรบกวนภายนอก แทนค่า

$$\frac{G_p G_f G_c}{1 + G_p G_f G_c G_m} = \frac{G}{1 + GG_m} = G_{sp} \quad (3.8)$$

$$\frac{G_d}{1 + G_p G_f G_c G_m} = \frac{G_d}{1 + GG_m} = G_{load} \quad (3.9)$$

$G_{sp}$  คือ ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการ เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงเป้าหมาย การควบคุมผลการตอบสนองของตัวแปรออกมีค่า

$$y(s) = G_{sp}(s) y_{sp}(s) \quad (3.10)$$

การควบคุมต้องการให้ค่าตัวแปรออกของกระบวนการ  $Y(t)$  มีค่าเท่ากับเป้าหมายการควบคุม  $y_{sp}(t)$  ตลอดเวลาไม่ว่าเป้าหมายการควบคุมจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร การศึกษาวิธีแก้ปัญหานี้ในระบบควบคุมลักษณะเช่นนี้ คือ การแก้ปัญหาในการติดตามเป้าหมาย (tracking control problem หรือ servo problem)

$G_{load}$  คือทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการ เมื่อพิจารณาผลกระทบจากการรบกวนภายนอกหรือการเปลี่ยนแปลงค่าภาวะการควบคุม (load) ที่รบกวนสภาพของกระบวนการ ผลการตอบสนองของ ตัวแปรออกมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้  $y(s) = G_{load}(s) d(s)$  เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ (3.11) erson ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมต้องการให้ค่าตัวแปรออกของกระบวนการ  $Y(t)$  มีค่าเท่ากับเป้าหมายการควบคุม  $y_{sp}(t)$  ตลอดเวลาไม่ว่าการรบกวนจะมีลักษณะอย่างไร การศึกษาวิธีการแก้ปัญหาในระบบควบคุมลักษณะเช่นนี้คือ การแก้ปัญหาการรักษาสภาพกระบวนการ (regulator control problem)

### การควบคุมแบบพีในกระบวนการอุตสาหกรรม

การควบคุมแบบป้อนกลับจะทำให้ผลการตอบสนองและคุณสมบัติของกระบวนการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เครื่องควบคุมแบบแรกที่จะนำมาพิจารณา คือ เครื่องควบคุมแบบพีจากสมการ (3.7) ถ้าใช้เครื่องควบคุมแบบพี  $G_c = K_c$ ,  $G_m(s) = 1$  และ  $G_f = 1$

$$y(s) = \frac{G_p(s) K_c}{1 + G_p K_c} y_{SP}(s) + \frac{G_d(s)}{1 + G_p K_c} d(s) \quad (3.12)$$

### การควบคุมแบบพีในกระบวนการอันดับหนึ่ง

$$\tau_p \frac{d}{dt} y + y = K_p m + K_d d \quad (3.13)$$

หาทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันโดยแทนค่า  $y(0) = 0$ ,  $m(0) = 0$  และ  $d(0) = 0$

$$y(s) = \frac{K_p}{\tau_p s + 1} m(s) + \frac{K_d}{\tau_p s + 1} d(s) \quad (3.14)$$

กระบวนการอันดับหนึ่งเมื่อไม่มีการควบคุม มีค่ากระบวนการดังนี้

1. ค่าคงที่การหน่วงเวลา  $\tau_p$
2. อัตราขยายเชิงสถิติของตัวแปรปรับกระบวนการ  $K_p$  และภาวะการควบคุม  $K_p$

แทนค่า

$$G_p(s) = \frac{K_p}{\tau_p s + 1} \text{ และ } G_d(s) = \frac{K_d}{\tau_p s + 1}$$

ในสมการ 3.12

$$y(s) = \frac{K_p K_c}{\tau_p s + 1 + K_p K_c} y_{SP}(s) + \frac{K_d}{\tau_p s + 1 + K_p K_c} d(s) \quad 3.15$$

$$\text{แทนค่า } \tau_p' = \frac{\tau_p}{1 + K_p K_c} \quad K_p' = \frac{K_p K_c}{1 + K_p K_c} \text{ และ } K_d' = \frac{K_d}{1 + K_p K_c}$$

$$y(s) = \frac{K_p'}{\tau_p' s + 1} y_{SP}(s) + \frac{K_d'}{\tau_p' s + 1} d(s) \quad 3.16$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการอันดับหนึ่งภายใต้การควบคุมแบบพี มีค่ากระบวนการดังนี้

1. ค่าคงที่การหน่วงเวลา  $t_p'$  ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ  $t_p$  แสดงว่าการควบคุมทำให้กระบวนการมีการตอบสนองเร็วขึ้น
2. อัตราขยายเชิงสถิติของตัวแปรปรับกระบวนการ  $K_p'$  และภาวะการควบคุม  $K_d'$  มีค่าลดลงพิจารณาผลการตอบสนองของกระบวนการอันดับหนึ่งภายใต้การควบคุมแบบพีระหว่างเป้าหมายการควบคุม  $y_{sp}$  และตัวแปรกระบวนการ แทนค่า  $y_{sp}(s) = 1/s$  และ  $d(s) = 0$  ในสมการ (3.16)

$$y(s) = \frac{K_p'}{\tau_p' s + 1} \frac{1}{s}$$

$$y(t) = K_p' (1 - e^{-t/\tau_p'})$$

ผลการตอบสนองของกระบวนการอันดับหนึ่งภายใต้การควบคุมแบบพี เมื่อเปลี่ยนแปลงเป้าหมายการควบคุม แสดงว่าเมื่อกระบวนการเข้าสู่สภาพสมดุลใหม่ การตอบสนองของกระบวนการจะต่างจากเป้าหมายการควบคุมที่ต้องการเสมอและความคลาดเคลื่อนในการควบคุมดังกล่าวเรียกว่า ผลต่าง (offset) หรือความคลาดเคลื่อนในความควบคุม

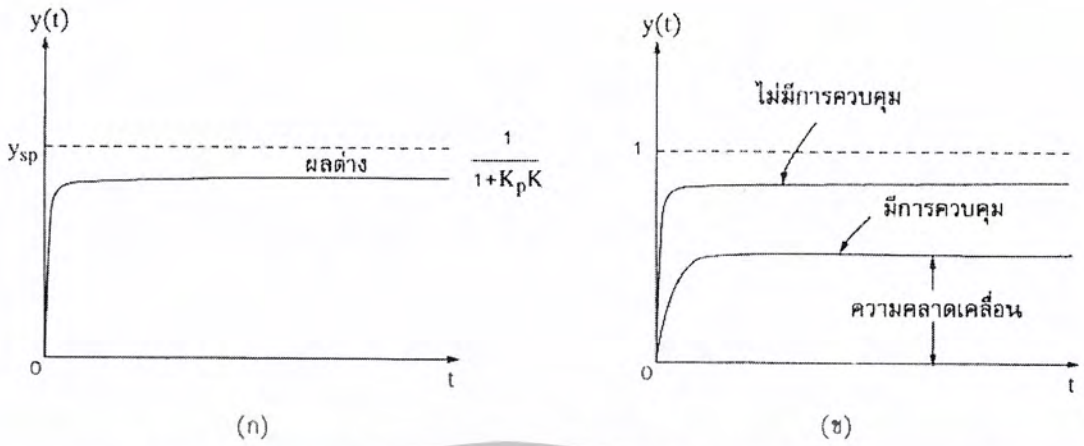
ความคลาดเคลื่อนการควบคุม = เป้าหมายการควบคุม - ผลการตอบสนองค่าสุดท้ายของกระบวนการ

$$= 1 - K_p'$$

ความคลาดเคลื่อนการควบคุม

$$= 1 - \frac{K_p K_c}{1 + K_p K_c}$$

แสดงว่าความคลาดเคลื่อนการควบคุมจะมีค่าลดลงเมื่อ  $K_p$  มีค่าเพิ่มขึ้น และไม่มีความคลาดเคลื่อนในการควบคุมเมื่อ  $K_p$  มีค่าสูงมากเท่านั้น



รูปที่ 3.4 ผลการตอบสนองของกระบวนการอันดับหนึ่งที่ใช้เครื่องควบคุมแบบพี

ผลการตอบสนองของกระบวนการระหว่างภาวะการควบคุมกับตัวแปรกระบวนการสามารถพิจารณาโดย แทนค่า  $y_{sp}(s) = 0$  และ  $d(s) = 1/s$  ในสมการ (3.16)

$$y(s) = \frac{K_d'}{\tau_p s + 1} \frac{1}{s}$$

$$y(t) = \frac{K_p}{K_c} (1 - e^{-t/\tau_p})$$

ผลการตอบสนองของกระบวนการเมื่อเปลี่ยนแปลงภาวะการควบคุมในรูปที่ 3.4 (ข) แสดงว่าเครื่องควบคุมแบบพีไม่สามารถรักษาสภาพกระบวนการให้อยู่ในสมดุลเดิมได้และมีความคลาดเคลื่อนการควบคุมเกิดขึ้นเสมอ

ความคลาดเคลื่อนในการควบคุม = เป้าหมายการควบคุม - ผลการตอบสนองค่าสุดท้ายของกระบวนการ

$$= 0 - K_d'$$

$$= 1 - \frac{K_d'}{1 + K_p K_c}$$

แสดงว่าความคลาดเคลื่อนในการควบคุมจะมีค่าลดลงเมื่อ  $K_c$  มีค่าเพิ่มขึ้นและความคลาดเคลื่อนจะหมดไปเมื่อ  $K_c$  มีค่าสูงมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการตอบสนองของระบบควบคุมในกระบวนการอันดับหนึ่งแสดงว่า การลดความคลาดเคลื่อนการควบคุมให้หมด สามารถทำได้โดยเพิ่มค่า  $K_c$  ให้มีค่าสูงมาก ๆ ซึ่งไม่สามารถทำได้ในทางปฏิบัติจริงเนื่องจากผลการเพิ่มค่า  $K_c$  เพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการควบคุม จะทำให้เกิดผลข้างเคียงขึ้นในเวลาเดียวกันคือ ทำให้เสถียรภาพของระบบลดลงด้วย ดังนั้นในกระบวนการส่วนใหญ่ การเพิ่มค่า  $K_c$  เพื่อจำกัดค่าความคลาดเคลื่อนในการควบคุม มักจะทำให้ระบบควบคุมขาดเสถียรภาพก่อน

**การควบคุมแบบโอในกระบวนการอุตสาหกรรม**

พิจารณาผลการตอบสนองของตัวแปรกระบวนการเมื่อเปลี่ยนแปลงเป้าหมายการควบคุมในระบบควบคุมแบบป้อนกลับโดยแทนค่า  $d(s) = 0$  ในสมการ (3.7)

$$y(s) = \frac{G_p(s) G(s) G_c(s)}{1 + G_p(s) G_f(s) G_c(s) G_m(s)} y_{sp}(s) \tag{3.17}$$

ถ้าใช้เครื่องควบคุมแบบโอควบคุมกระบวนการอันดับหนึ่ง แทนค่า  $G_m(s)=1, G_f=1$

$$G_p(s) = \frac{K_p}{\tau_p s + 1} \text{ และ } G_c(s) = K_c \frac{1}{\tau_c s}$$

แทนค่า

$$y(s) = \frac{\left[ \frac{K_p}{\tau_p s + 1} \right] \left[ K_c \frac{1}{\tau_c s} \right]}{1 + \left[ \frac{K_p}{\tau_p s + 1} \right] \left[ K_c \frac{1}{\tau_c s} \right]} y_{sp}(s)$$

$$\tau = \sqrt{\frac{\tau_p \tau_c}{K_p K_c}} \tag{3.18}$$

$$\zeta = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\tau_c}{\tau_p K_p K_c}} \tag{3.19}$$

$$y(s) = \frac{K_p}{\tau^2 s^2 + 2\zeta \tau s + 1} y_{sp}(s) \tag{3.20}$$

สมการ (3.20) แสดงว่า การควบคุมแบบโอทำให้กระบวนการอันดับหนึ่งเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเป็นกระบวนการอันดับสอง และทำให้การตอบสนองของกระบวนการช้าลง

ถ้าเป้าหมายการควบคุมมีการเปลี่ยนแปลง  $y_{sp}(s) = 1/S$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$y(s) = \frac{K_p}{\tau^2 s^2 + 2\zeta \tau s + 1} \frac{1}{s}$$

ผลการตอบสนองของกระบวนการจะมีลักษณะอย่างไร ขึ้นกับค่าอัตราความหน่วงของกระบวนการและค่าสุดท้ายของกระบวนการเมื่อเข้าสู่สภาวะพลสามารถหาจากทฤษฎีค่าสุดท้ายของการแปลงลาปลาซ

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} y'(t) &= \lim_{s \rightarrow 0} [s y'(s)] \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} \frac{K_p}{\tau^2 s^2 + 2\zeta \tau s + 1} \\ &= 1 \end{aligned}$$

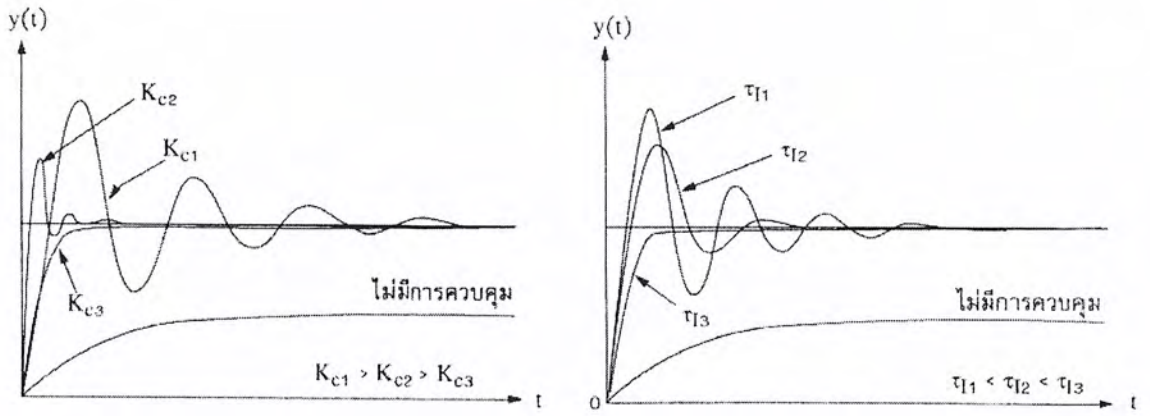
ความคลาดเคลื่อนในการควบคุม = เป้าหมายการควบคุม - ผลตอบสนองค่าสุดท้ายของกระบวนการ

$$= y_{sp} - y'(\infty) = 1$$

การควบคุมแบบโอสามารถทำให้ความคลาดเคลื่อนในการควบคุมลดลงจนหมด และสภาพของกระบวนการจะเข้าสู่เป้าหมายการควบคุมเสมอ คุณสมบัติของกระบวนการที่มีการควบคุมแบบโอ คือ

1. ผลการตอบสนองของกระบวนการภายหลังการควบคุมจะมีลักษณะอย่างไร ขึ้นกับค่าอัตราความหน่วงของกระบวนการ หรือการปรับค่า  $K_c$  และ  $\tau$ , ตามสมการ (7.19) การเพิ่มค่า  $K_c$  หรือ การลดค่า  $\tau$ , จะทำให้อัตราความหน่วงของกระบวนการ  $\zeta$  ลดลง

2. การเพิ่มความเร็วในการตอบสนองของกระบวนการให้เร็วขึ้น โดยเพิ่มค่า  $K_c$  และ  $\tau$ , จะทำให้อัตราความหน่วง  $\zeta$  ลดลง ผลการตอบสนองสูงสุดและอัตราการลดทอนเพิ่มขึ้นทำให้เสถียรภาพของระบบลดลง รูปที่ 1.5 แสดงผลการตอบสนองของกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า  $K_c$  และ  $\tau$ ,



รูปที่ 3.5 ผลการตอบสนองของกระบวนการที่มีการควบคุมแบบไอ ปรับค่า  $K_c$  และ  $\tau$ , และการตอบสนองของกระบวนการเร็วขึ้น เมื่อกระบวนการมีความหน่วงน้อยและเกิดการแกว่ง

การควบคุมแบบดีในกระบวนการอุตสาหกรรม

ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของเครื่องควบคุมแบบดี คือ

$$G_c(s) = K_c \tau_D s$$

แทนค่า  $G_m(s) = 1$  และ  $G_f = 1$  ในการควบคุมกระบวนการอันดับหนึ่ง

$$y(s) = \frac{\left[ \frac{K_c}{\tau_p s + 1} \right] \left[ K_c \tau_D s \right]}{1 + \left[ \frac{K_c}{\tau_p s + 1} \right] \left[ K_c \tau_D s \right]} y_{sp}(s)$$

$$y(s) = \frac{K_p K_c \tau_D s}{(\tau_p + K_p K_c \tau_D) s + 1} y_{sp}(s) \tag{3.21}$$

สมการ (3.21) แสดงคุณสมบัติของกระบวนการอันดับหนึ่งที่มีการควบคุมแบบดี คือ

1. กระบวนการภายหลังการควบคุมแบบดียังคงมีคุณสมบัติเป็นกระบวนการอันดับหนึ่ง แสดงว่าการควบคุมแบบดีไม่เปลี่ยนจำนวนอันดับของกระบวนการเดิมได้เช่นเดียวกับการควบคุมแบบไอ

2. ค่าคงที่การหน่วงเวลาของกระบวนการมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเป็น  $\tau_p + K_p K_c \tau_D$  แสดงว่าการควบคุมแบบดีทำให้ผลการตอบสนองของกระบวนการช้าลง

พิจารณาผลการควบคุมแบบดีในกระบวนการอันดับสอง โดยแทนค่า  $G_m(s) = 1$   $G_f = 1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$y(s) = \frac{\frac{K_p}{\tau^2 s^2 + 2\zeta \tau s + 1} K_c \tau_D s}{1 + \frac{K_p}{\tau^2 s^2 + 2\zeta \tau s + 1} K_c \tau_D s} y_{SP}(s)$$

$$y(s) = \frac{K_p K_c \tau_D s}{\tau^2 s^2 + (2\zeta \tau + K_p K_c \tau_D) s + 1} y_{SP}(s)$$

คุณสมบัติของกระบวนการอันดับสองที่มีการควบคุมแบบดี คือ

1. คาบเวลาการแกว่งของกระบวนการยังคงมีค่าเดิมไม่เปลี่ยนแปลง
2. อัตราความหน่วงของกระบวนการมีค่าเพิ่มขึ้นโดยให้  $\zeta$  เป็นอัตราความหน่วงใหม่ของกระบวนการภายหลังการควบคุมแบบดี

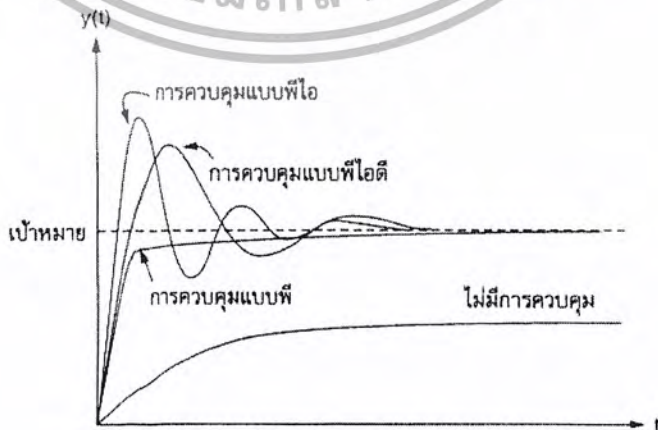
$$2\zeta\tau = 2\zeta\tau + K_p K_c \tau_D$$

แสดงว่า  $\zeta$  มีค่ามากกว่า  $\zeta$  ทำให้กระบวนการมีการตอบสนองช้าลง และในขณะเดียวกันจะทำให้เสถียรภาพของกระบวนการดีขึ้นด้วย

**การควบคุมแบบพีไอและพีไอดีในกระบวนการอุตสาหกรรม**

เครื่องควบคุมแบบป้อนกลับในกระบวนการอุตสาหกรรมประกอบด้วย เครื่องควบคุมแบบพีไอ และพีไอดี เนื่องจากข้อจำกัดในการสร้างเครื่องควบคุมแบบเดิมที่ใช้วงจรรอิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์นิวแมติกส์การควบคุมแบบพีไอ ทำให้คุณสมบัติของกระบวนการเดิมเปลี่ยนแปลงไป เช่นเดียวกับการใช้เครื่องควบคุมแบบพีและไอร่วมกัน คือ

1. กระบวนการจะมีอันดับสูงขึ้นเนื่องจากการควบคุมแบบไอ



รูปที่ 3.6 ผลการตอบสนองของกระบวนการที่ใช้การควบคุมแบบพีไอดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. กระบวนการไม่มีความคลาดเคลื่อนในการควบคุม ค่ากระบวนการจะเข้าสู่เป้าหมายการควบคุมเสมอเนื่องจากการควบคุมแบบโอ

3. การเพิ่ม  $K$  จะทำให้การตอบสนองของกระบวนการเร็วขึ้นเนื่องจากผลการควบคุมแบบพีและโอ กระบวนการจะมีการแกว่งมากขึ้น ค่าการตอบสนองสูงสุดและอัตราการลดทอนเพิ่มขึ้น อัตราการตอบสนองของกระบวนการจะมีค่ามากขึ้นและเสถียรภาพของกระบวนการจะลดลงเนื่องจากการควบคุมแบบโอ

4. การลดค่า  $T$ , จะทำให้การตอบสนองของกระบวนการเร็วขึ้น กระบวนการจะมีการแกว่งมากขึ้นค่าการตอบสนองสูงสุดและอัตราการลดทอนเพิ่มขึ้นเนื่องจากการควบคุมแบบโอ เครื่องควบคุมแบบพีโอดี จะให้ผลการควบคุมเช่นเดียวกับเครื่องควบคุมแบบพีโอในกระบวนการอุตสาหกรรม แต่การควบคุมแบบดีจะช่วยให้เสถียรภาพของกระบวนการดีขึ้น การควบคุมแบบโอจะทำให้การตอบสนองของกระบวนการช้าลง การเพิ่มความเร็วในการตอบสนองของกระบวนการสามารถทำได้โดยเพิ่มค่า  $K_c$  ให้มากขึ้น แต่ในขณะเดียวกัน ก็จะทำให้เสถียรภาพของกระบวนการลดลงด้วย การเพิ่มการควบคุมแบบดีในเครื่อง ควบคุมแบบพีโอเดิมให้เป็นเครื่องควบคุมแบบพีโอดีจะทำให้กระบวนการมีเสถียรภาพดีขึ้น ในขณะที่การตอบสนองของกระบวนการมีความเร็วคงเดิมจากผลการควบคุมแบบพี แสดงผลการตอบสนองของกระบวนการที่ใช้เครื่องควบคุมแบบพีโอดี พบว่ากรณีเพิ่มค่า  $K_c$  ไม่สามารถทำให้ค่าการตอบสนองสูงสุดและอัตราการลดทอนของกระบวนการเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับการควบคุมแบบพีโอ

### 3.6 การเลือกและการปรับเครื่องควบคุม

การออกแบบระบบควบคุมแบบป้อนกลับในกระบวนการอุตสาหกรรมคือ การเลือกเครื่องควบคุมแบบพีโอหรือพีโอดี และการปรับเครื่องควบคุมเพื่อหาค่าตัวแปรควบคุมคือ อัตราการควบคุมแบบพี  $K_c$  ช่วงเวลาการเริ่มต้นอินทิเกรต  $T_i$  และค่าคงที่ของเวลาอนุพันธ์  $T_D$  ที่เหมาะสมกับกระบวนการและทำให้ได้ผลการควบคุมที่ดีที่สุด

ผังสัญญาณของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 เมื่อภาระการควบคุมหรือเป้าหมายการควบคุมเปลี่ยนแปลงจะทำให้สภาพกระบวนการเปลี่ยนแปลงและเกิดความคลาดเคลื่อนในการควบคุมเครื่องควบคุมจะพยายามปรับสภาพกระบวนการให้เข้าสู่เป้าหมายที่ต้องการ รูปที่ 3.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงสภาพของกระบวนการและผลการควบคุมของเครื่องควบคุมแบบต่าง ๆ เมื่อภาระการควบคุมเปลี่ยนแปลงเป็นสัญญาณระดับ ซึ่งจะพบว่าการใช้เครื่องควบคุมต่างชนิดกันจะทำให้ได้ผลการควบคุมต่างกัน สิ่งแรกที่ต้องพิจารณาในการออกแบบระบบควบคุมแบบ

ป้อนกลับในกระบวนการอุตสาหกรรม คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. กระบวนการอุตสาหกรรมที่ต้องการจะควบคุมควรใช้เครื่องควบคุมแบบใด

เมื่อเลือกเครื่องควบคุมที่จะนำมาใช้ควบคุมที่จะนำมาใช้ควบคุมกระบวนการได้เรียบร้อยแล้ว เช่น ถ้าเลือกใช้เครื่องควบคุมแบบพีไอในการควบคุมกระบวนการ ตัวอย่างรูปที่ 3.5 แสดงว่ากระบวนการที่ใช้เครื่องควบคุมแบบพีไออาจจะได้ผลการควบคุมต่างกัน เมื่อใช้ตัวแปรควบคุมคือ  $K_c$  และ  $\tau$ , ค่าต่างกัน สิ่งที่ต้องพิจารณาลำดับต่อไป คือ

2. เครื่องควบคุมที่ใช้ควบคุมกระบวนการควรปรับตัวแปรควบคุมอย่างไร จึงจะเหมาะสมกับกระบวนการที่ต้องการจะควบคุมและได้ผลการควบคุมที่ดีที่สุด

3. การเลือกเครื่องควบคุมและปรับเครื่องควบคุมควรใช้หลักเกณฑ์ในการเลือกและตัดสินใจอย่างไรจึงจะทราบว่าระบบควบคุมให้ผลการควบคุมที่ดี และเหมาะสมกับกระบวนการมากที่สุด



รูปที่ 3.7 ผลการตอบสนองของกระบวนการที่ใช้เครื่องควบคุมแบบต่าง ๆ

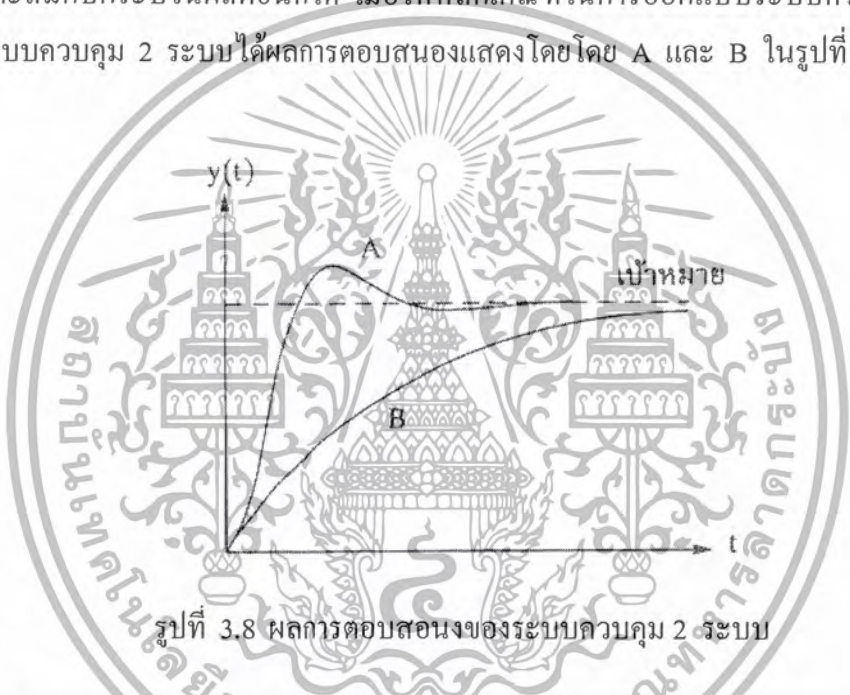
หลักเกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินใจเลือกเครื่องควบคุมและปรับตัวแปรควบคุมมีหลายวิธี ขึ้นกับวัตถุประสงค์ในการควบคุมและวัตถุประสงค์ในการออกแบบระบบควบคุม เช่น

- ต้องการลดค่าการตอบสนองสูงสุดของระบบควบคุมให้น้อยที่สุด
- ต้องการลดค่าช่วงเวลาสู่สมดุลให้สั้นที่สุด
- ต้องการลดค่าความคลาดเคลื่อนรวมในการควบคุมให้ค่าน้อยที่สุด

การใช้หลักเกณฑ์ในการเลือกและตัดสินใจต่างกัน จะทำให้ระบบควบคุมได้ผลการควบคุมต่างกัน

### หลักเกณฑ์เบื้องต้นในการเลือกและออกแบบระบบควบคุม

ผู้ออกแบบระบบควบคุมจะต้องกำหนดหลักเกณฑ์ในการตัดสินใจที่ใช้ในการออกแบบระบบควบคุมเพื่อใช้เป็นมาตรฐานเปรียบเทียบระหว่างระบบควบคุมหลาย ๆ ระบบว่า ผลการควบคุมของระบบควบคุมใด สามารถให้ผลการควบคุมที่ดีที่สุดตามเป้าหมายและความต้องการที่กำหนดไว้ใน การออกแบบระบบควบคุมบางครั้งระบบควบคุมระบบหนึ่งอาจให้ผลการควบคุมที่ดี และสอดคล้องกับความต้องการที่สุดสำหรับกระบวนการผลิตอย่างหนึ่ง แต่อาจให้ผลการควบคุมที่ไม่เหมาะสมกับกระบวนการผลิตอื่นก็ได้ เมื่อให้หลักเกณฑ์ในการออกแบบระบบควบคุมที่ต่างกัน เช่น ระบบควบคุม 2 ระบบได้ผลการตอบสนองแสดงโดยโดย A และ B ในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ผลการตอบสนองของระบบควบคุม 2 ระบบ

ถ้าการควบคุมต้องการให้สภาพกระบวนการเข้าสู่เป้าหมายเร็วที่สุดจะต้องเลือกใช้ระบบควบคุมที่จะให้ผลการตอบสนองตามเส้นโค้ง A แต่สำหรับการควบคุมที่ต้องการลดช่วงเวลาที่สมดุลให้สั้นที่สุดควรจะใช้ระบบควบคุมที่ให้ผลการตอบสนองตามเส้นโค้ง B การออกแบบระบบควบคุมจึงต้องเลือกหลักเกณฑ์ที่ใช้การตัดสินใจให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์และความต้องการให้ถูกต้องตรงกับความต้องการก่อน เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบผลการควบคุมของระบบควบคุมทุกระบบในการออกแบบขั้นต่อไปหลักเกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินใจเลือกระบบควบคุมทั่วไปแบ่งออกเป็น

- 1.หลักเกณฑ์การตัดสินใจโดยใช้ผลการตอบสนองทางพลวัต (dynamic response performance criteria)
- 2.หลักเกณฑ์การตัดสินใจโดยใช้ผลการตอบสนองเชิงสถิต (steady state performance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### หลักเกณฑ์การตัดสินโดยใช้ผลการตอบสนองทางพลวัต

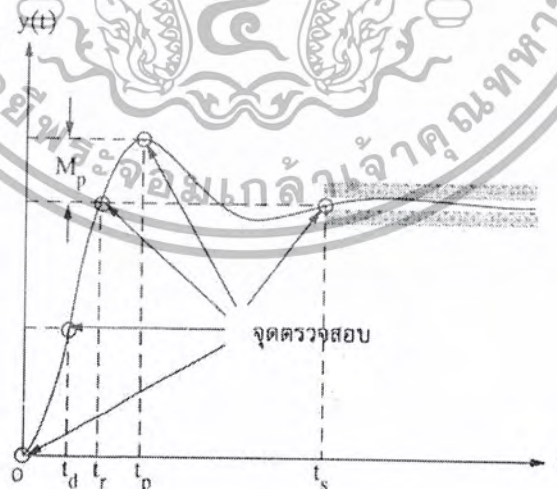
การออกแบบระบบควบคุมโดยใช้ผลการตอบสนองทางพลวัตของระบบควบคุมในการตัดสินใจมี 2 วิธี คือ

1. การตรวจสอบผลการตอบสนองของระบบควบคุมบางจุด การตรวจสอบวิธีนี้ค่อนข้างง่ายแต่ไม่สามารถทราบคุณสมบัติทั้งหมดของระบบควบคุม แต่ทราบเพียงคุณสมบัติโดยประมาณของระบบควบคุมเท่านั้น

2. การตรวจสอบผลการตอบสนองของระบบควบคุมทุกจุด ตั้งแต่กระบวนการเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลา  $t=0$  จนกระบวนการเข้าสู่สภาพสมดุล  $t \rightarrow \infty$  การตรวจสอบวิธีนี้ค่อนข้างยุ่งยากแต่ทำให้สามารถทราบคุณสมบัติต่าง ๆ ทั้งหมดของระบบควบคุมได้ถูกต้องกว่าวิธีแรก

การตรวจสอบผลการตอบสนองของระบบควบคุมบางจุดจะใช้พิจารณาเลือกระบบควบคุมจากคุณสมบัติบางประการ โดยใช้ผลการตอบสนองของกระบวนการภายหลังมีการควบคุมจากรูปที่ 3.9 คือ

1. ค่าพุ่งเกิน (Over shoot)
2. ช่วงเวลาขึ้น (Rise time)
3. ช่วงเวลาเข้าที่ (Settling time)



รูปที่ 3.9 ผลการตอบสนองของระบบควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติแต่ละประการที่ได้จากผลการตอบสนองของระบบควบคุมสามารถเปรียบเทียบกันเพื่อใช้ช่วยในการตัดสินใจเลือกระบบควบคุมที่เหมาะสมกับกระบวนการมากที่สุด แต่บางครั้งคุณสมบัติเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอ จำเป็นต้องใช้คุณสมบัติหลายประการเพื่อประกอบการตัดสินใจ เช่น ต้องการออกแบบระบบควบคุมที่ทำให้กระบวนการมีผลการตอบสนองสูงสุดน้อยที่สุดและช่วงเวลาสู่สมดุลสั้นที่สุดซึ่งบางครั้งความต้องการเหล่านี้มักจะมี ความขัดแย้งกันเองในการออกแบบ เช่น ตัวอย่างผลการตอบสนองดังแสดงในรูปที่ 3.6 การใช้ เครื่องควบคุมแบบพีไอดี ถ้าต้องการลดผลการตอบสนองสูงสุดของกระบวนการโดยการลดค่า  $K_c$  จะทำให้ช่วงเวลาสู่สมดุลของกระบวนการเพิ่มขึ้นด้วย การออกแบบระบบควบคุมจึงต้องพยายามหาข้อยุติและผสมผสานความต้องการต่าง ๆ ที่ขัดแย้งให้ได้ โดยเลือกจะควบคุมที่ทำให้ผลการตอบสนองของระบบควบคุมมีคุณสมบัติรวมต่าง ๆ ใกล้เคียงกับความต้องการทั้งหมดให้มากที่สุด

#### หลักเกณฑ์การตัดสินใจใช้ผลการตอบสนองเชิงสถิติ

การตอบสนองเชิงสถิติของระบบควบคุม คือ ผลการตอบสนองของระบบควบคุม ภายหลังจากเปลี่ยนแปลงของตัวแปรเข้ามานานมากจนกระบวนการเข้าสู่สภาพสมดุลใหม่ระบบ ควบคุมทั่วไปจะมีผลการตอบสนองเชิงสถิติต่างกัน เมื่อได้รับตัวแปรเข้าที่มีลักษณะต่างกันเช่น ระบบควบคุมที่ไม่มีความคลาดเคลื่อนในการควบคุมเกิดขึ้นเลย เมื่อตัวแปรเข้าเป็นสัญญาณระดับ อาจมีความคลาดเคลื่อนในการควบคุมเกิดขึ้น สามารถทำได้โดยการแก้ไขคุณสมบัติของระบบ ควบคุมใหม่ การวิเคราะห์ผลการตอบสนองเชิงสถิติสามารถทำได้โดยพิจารณาแบ่งระบบควบคุม ออกเป็นระบบชนิด (type) ต่าง ๆ ตามลักษณะทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันของระบบควบคุมวงเปิด

#### การเลือกเครื่องควบคุมแบบป้อนกลับ

การเลือกใช้เครื่องควบคุมแบบพี ไอ หรือพีไอดี ในระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ให้ เหมาะสมกับกระบวนการ มีหลักเกณฑ์การปฏิบัติ ดังนี้

1. เลือกหลักเกณฑ์การอินทิเกรตค่าเวลาความคลาดเคลื่อนแบบ ไอเอสอี ไอเออีหรือ ไอที เออีให้สอดคล้องกับความต้องการในการออกแบบระบบควบคุม
2. กำหนดค่าตัวแปรควบคุมของเครื่องควบคุมแบบพี ไอและพีไอดี คือ  $K_c$ ,  $\tau_i$  และ  $\tau_d$  ที่ทำให้การควบคุมมีค่าการอินทิเกรตเวลาความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด
3. เปรียบเทียบค่าอินทิเกรตเวลาความคลาดเคลื่อนของเครื่องควบคุมแบบต่าง ๆ และเลือก เครื่องควบคุมที่ทำให้ค่าอินทิเกรตมีค่าน้อยที่สุด



เหมาะสมกับการควบคุมกระบวนการมากที่สุดคือเครื่องควบคุมแบบพีไอดี ที่สามารถเปลี่ยนแปลงลักษณะผลการตอบสนองของกระบวนการ โดยปรับตัวแปรควบคุมได้ 3 ค่า คือ  $K_c$ ,  $\tau_i$  และ  $\tau_d$  แต่ในขณะเดียวกันก็ทำให้การปรับเครื่องควบคุมยุ่งยากกว่าเครื่องควบคุมแบบอื่น การเลือกชนิดของเครื่องควบคุมแบบป้อนกลับให้การควบคุมกระบวนการได้ผลดีและสามารถปรับเครื่องควบคุมได้ง่าย ควรใช้หลักเกณฑ์การพิจารณาดังต่อไปนี้

1. เลือกใช้เครื่องควบคุมแบบพี ถ้าการควบคุมกระบวนการไม่จำเป็นต้องได้ผลการควบคุมที่แม่นยำมากนัก โดยปรับค่า  $K_c$  ของเครื่องควบคุมให้มีความคลาดเคลื่อนในการควบคุมเกิดขึ้นในช่วงที่ยอมรับได้ หรือกระบวนการที่ควบคุมมีคุณสมบัติเป็นกระบวนการความจุอย่างเดี่ยว การควบคุมแบบพีเพียงอย่างเดียวก็เป็นการเพียงพอและไม่มีความคลาดเคลื่อนในการควบคุมเกิดขึ้น เช่น การควบคุมระดับของเหลวที่ใช้เครื่องสูบล้อปรับอัตราการไหลออกของของเหลวให้คงที่ หรือการควบคุมความดันก๊าซในถังเก็บที่ใช้วาล์วปรับอัตราการไหลออกของก๊าซให้คงที่

2. เลือกใช้เครื่องควบคุมแบบพีไอ ถ้าไม่สามารถใช้เครื่องควบคุมแบบพีเนื่องจากการควบคุมไม่ต้องการให้มีความคลาดเคลื่อนในการควบคุมเกิดขึ้นเลย และกระบวนการที่ควบคุมไม่ใช่กระบวนการความจุอย่างเดี่ยว เครื่องควบคุมแบบพีไอ จึงไม่นิยมให้กับกระบวนการควบคุมระดับของเหลวและความดันก๊าซภายในถังเก็บ แต่มักพบอยู่เสมอในกระบวนการควบคุมอัตราการไหลของของเหลวหรือก๊าซที่มีการตอบสนองของกระบวนการค่อนข้างเร็ว โดยผลการควบคุมแบบไอของเครื่องควบคุมทำให้ระบบรวมมีผลการตอบสนองช้าลง

3. เลือกใช้เครื่องควบคุมแบบพีไอดี ถ้าไม่สามารถใช้เครื่องควบคุมแบบพีไอ เนื่องจากการควบคุมแบบพีไอไม่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการควบคุมเกิดขึ้นและการตอบสนองของกระบวนการช้าลงการเพิ่มความเร็วในการตอบสนองของกระบวนการ โดยปรับค่า  $K_c$  เพิ่มขึ้นจะทำให้ผลการตอบสนองของระบบรวม มีการแกว่งเพิ่มขึ้นและเสถียรภาพลดลง การใช้เครื่องควบคุมแบบพีไอดี จะทำให้ผลการควบคุมไม่มีความคลาดเคลื่อนในการควบคุมเกิดขึ้น สามารถปรับค่า  $K_c$  เพื่อให้กระบวนการตอบสนองเร็วขึ้น โดยเสถียรภาพของระบบยังคงเดิม เครื่องควบคุมแบบพีไอดี เหมาะสำหรับการควบคุมกระบวนการที่ผลการตอบสนองค่อนข้างช้า เช่น การควบคุมอุณหภูมิ อัตราการทำปฏิกิริยาเคมี ความบริสุทธิ์และองค์ประกอบของสาร และ กระบวนการอันดับสูงที่ประกอบด้วยกระบวนการย่อยหลายกระบวนการเรียกซ้อนกัน

### การปรับเครื่องควบคุม

การออกแบบระบบควบคุมเมื่อสามารถเลือกเครื่องควบคุมที่เหมาะสมกับการควบคุมกระบวนการแล้วขั้นตอนสุดท้ายของการออกแบบระบบควบคุม คือ การเลือกค่าตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมกับกระบวนการหรือการปรับเครื่องควบคุมให้สามารถควบคุมกระบวนการได้ดีและมีประสิทธิภาพวิธีการปรับเครื่องควบคุมแบบป้อนกลับในกระบวนการอุตสาหกรรมมี 4 วิธี คือ

1.ปรับเครื่องควบคุมโดยกำหนดหลักเกณฑ์การควบคุมจากผลการตอบสนองของกระบวนการเฉพาะจุด เช่น ลดค่าการตอบสนองสูงสุดให้มีค่าน้อยที่สุด ปรับผลการตอบสนองของกระบวนการให้มีอัตราการลดทอน 1 : 4 ลดเวลาสู่สมดุลของกระบวนการให้สั้นที่สุด ซึ่งการปรับเครื่องควบคุมโดยวิธีนี้มักทำให้ได้ค่าตัวแปรควบคุมหลายชุด

2. ปรับเครื่องควบคุม โดยใช้หลักเกณฑ์การอินทิเกรตค่าเวลาความคลาดเคลื่อนแบบต่าง ๆ เช่น ไอเอสอี ไอเออี หรือไอทีเออี การปรับเครื่องควบคุมโดยวิธีนี้ ต้องใช้การคำนวณค่อนข้างมาก ทำให้เสียเวลาและมักไม่สามารถใช้กับกระบวนการจริงได้

3.การปรับเครื่องควบคุมโดยใช้สูตรสำเร็จที่ได้จากการทดลองในการปรับเครื่องควบคุมแบบป้อนกลับโดยใช้สูตรสำเร็จที่ได้จากผลการทดลองกับกระบวนการชนิดต่าง ๆ แบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ

(ก)วิธีปรับเครื่องควบคุมโดยการหาผลการตอบสนองของกระบวนการเปิด (process reaction curve method)

(ข)วิธีปรับเครื่องควบคุมโดยการหาผลการแกว่งของระบบปิด (closed loop cycling method)

4. การปรับเครื่องควบคุมวิธีทดลองผิดทดลองถูก (trial and error method)

### 3.7 การปรับเครื่องควบคุมโดยวิธีทดลองผิดทดลองถูก

การปรับเครื่องควบคุมโดยใช้สูตรสำเร็จจากการทดลองต่าง ๆ บางครั้งไม่สามารถทำให้การควบคุมกระบวนการได้ผลดีเท่าที่ควร เนื่องจากกระบวนการที่ใช้ในการทดลองหาสูตรสำหรับปรับเครื่องควบคุมมีคุณสมบัติบางอย่างต่างจากกระบวนการจริงที่ต้องการควบคุม ค่าตัวแปรควบคุมที่ได้จากการใช้สูตรสำเร็จเพียงสามารใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการปรับเครื่องควบคุมโดยไม่ทำให้ระบบรวมสูญเสียเสถียรภาพและทดลองปรับเครื่องควบคุมโดยสังเกตผลการควบคุมจากการพิจารณาค่าวัดของตัวแปรกระบวนการตามขั้นตอน ดังนี้

1.ปรับเครื่องควบคุมให้ระบบรวมอยู่ในสภาพสมดุลไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปร

กระบวนการและสัญญาณควบคุม

2. เปลี่ยนค่าเป้าหมายการควบคุม และสังเกตผลการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรกระบวนการจากค่าวัด

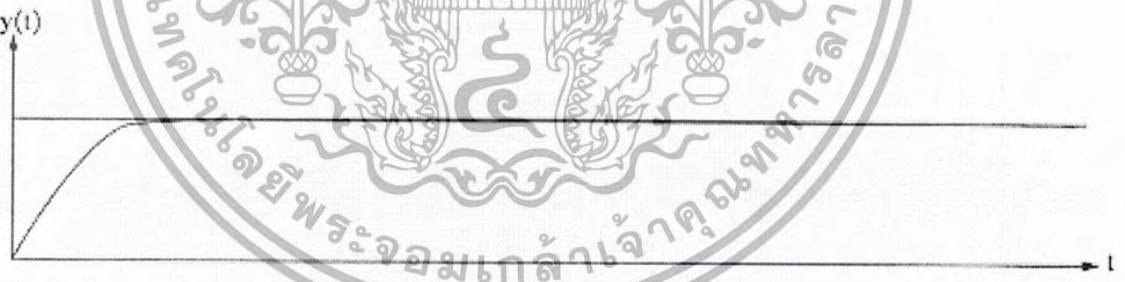
3. ปรับอัตราการควบคุมแบบ  $K_c$  ของเครื่องควบคุมจนได้ผลการตอบสนองของกระบวนการ ได้ผลการควบคุมดีที่สุด

4. ปรับช่วงเวลาการเริ่มต้นอินทิเกรต  $T_i$  ของเครื่องควบคุมจนได้ผลการตอบสนองของกระบวนการ ได้ผลการควบคุมดีที่สุด

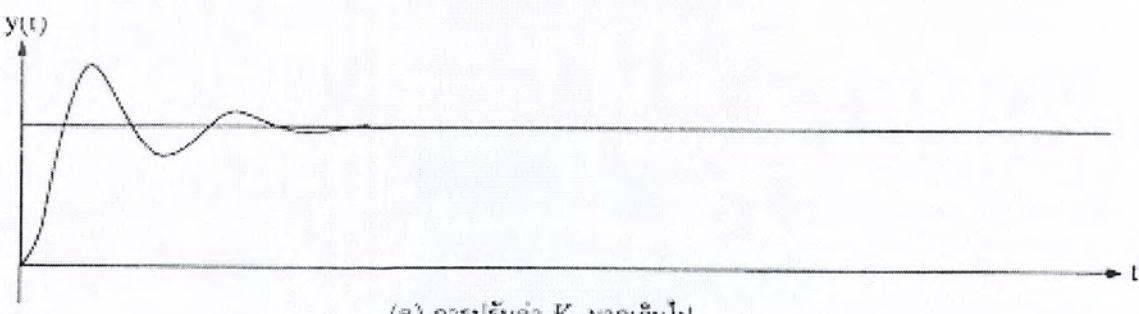
5. ปรับค่าคงที่ของเวลาอนุพันธ์  $T_D$  ของเครื่องควบคุมจนได้ผลการตอบสนองของกระบวนการ ได้ผลการควบคุมดีที่สุด



(ก) การปรับค่า  $K_c$  น้อยเกินไป



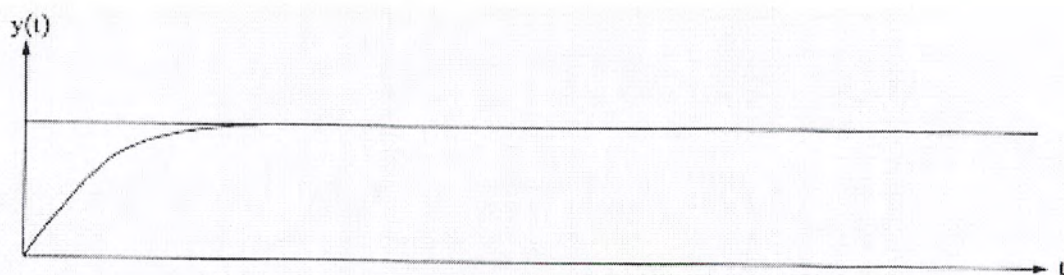
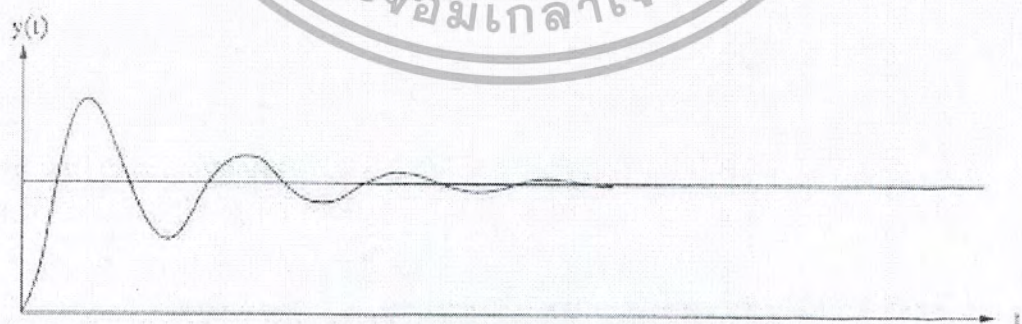
(ข) การปรับค่า  $K_c$  ที่เหมาะสม



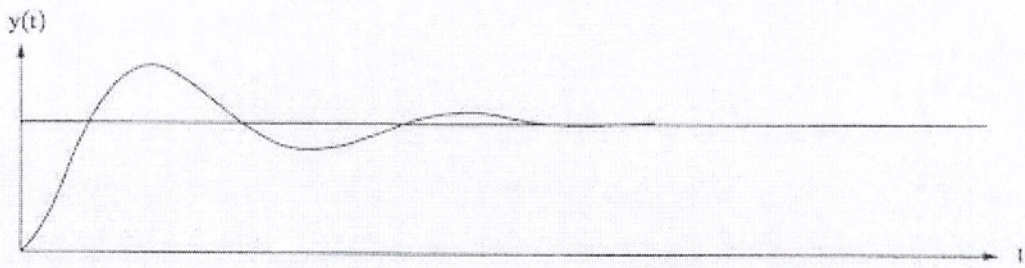
(ค) การปรับค่า  $K_c$  มากเกินไป

รูปที่ 3.10 ผลการปรับค่า  $K_c$  ของเครื่องควบคุมแบบพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น เมื่อผู้ดูแลให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) การปรับค่า  $\tau_r$  มากเกินไป(ข) การปรับค่า  $\tau_r$  น้อยเกินไป(ค) การปรับค่า  $\tau_d$  มากเกินไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) การปรับค่า  $\tau_D$  ที่เหมาะสม



(ค) การปรับค่า  $\tau_D$  น้อยเกินไป

รูปที่ 3.12 ผลการปรับค่า  $\tau_D$  ของเครื่องควบคุมแบบพีไอดี

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง คุณสมบัติของโลหะจำรูป

ในบทนี้จะศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโลหะจำรูป ซึ่งประกอบด้วยความสัมพันธ์ของตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิ กระแสไฟฟ้า เวลาที่ใช้ในการคืนรูป รวมทั้งความสามารถในการคงตัวเมื่อมีแรงมากระทำ ซึ่งได้ออกแบบตัวทดสอบขึ้นมา จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ความสามารถและขีดจำกัดของโลหะจำรูป เพื่อหาช่วงที่จะนำโลหะจำรูปมาใช้งาน รวมทั้งใช้ในการออกแบบวงจรควบคุมและวงจรขับกระแส

#### 4.1 ผลการทดลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโลหะจำรูป

##### คำนิยาม

- หดรูป หมายถึง โลหะจำรูปหดตัวลงเมื่อถูกจ่ายกระแสไฟฟ้าให้จนเกิดความร้อน
- คืนรูป หมายถึง โลหะจำรูปเย็นตัวลงจนเข้าสู่สภาวะปกติเมื่อหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้า

#### การทดลองที่ 1

##### ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการเปลี่ยนรูปของโลหะจำรูปในสภาวะปกติ (ยาว 15 mm.) ให้มีการยืดตัว (ยาว 70 mm.) ด้วยแรงกระทำจากภายนอก เพื่อให้โลหะจำรูปมีการเสียรูป ที่อุณหภูมิห้อง (TA) ประมาณ 25 องศาเซลเซียส
2. จ่ายกระแสไฟฟ้าขนาดต่างๆ เพื่อให้โลหะจำรูปเกิดความร้อน
3. จับเวลาจนโลหะจำรูปหดรูปสุด

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าเวลาที่ทำให้โลหะจำรูปหดรูป ตามค่ากระแสขนาดต่างๆ ที่ป้อนให้กับโลหะผสม นิกเกิล – ไทเทเนียม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1mm. ภายใต้เงื่อนไข TA = 25 องศาเซลเซียส

กระแสไฟฟ้า	เวลาที่ใช้ในการหดตัว
1.00 แอมป์	*
1.25 แอมป์	37.1 วินาที
1.50 แอมป์	23.3 วินาที
1.75 แอมป์	12.1 วินาที
2.00 แอมป์	10.1 วินาที
2.25 แอมป์	8.4 วินาที
2.50 แอมป์	6.3 วินาที
2.75 แอมป์	**

\* แสดงถึง กระแสไฟฟ้ามีค่าไม่มากพอที่จะทำให้โลหะจำรูปสามารถหดตัวได้

\*\* แสดงถึง กระแสไฟฟ้ามีค่ามากเกินไปซึ่งอาจจะทำให้โลหะจำรูปเสียรูปได้

### สรุปผลการทดลองที่ 1

จากการทดลองที่ 1 พบว่าขนาดของกระแสไฟฟ้านั้นมีผลต่อระยะเวลาที่ใช้ในการหดตัวของโลหะจำรูป และขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ต่ำไปทำให้เกิดความร้อนไม่เพียงพอที่ทำให้โลหะจำรูปหดรูป และในกรณีที่กระแสไฟฟ้าสูงเกินไปจะทำให้โลหะจำรูปหดตัวเร็วมากและเกิดความร้อนสูงมาก ซึ่งอาจทำให้โลหะจำรูปเกิดการเสียรูปได้

### การทดลองที่ 2

#### ขั้นตอนการทดลอง

จากตารางผลการทดลองในตารางที่ 4.1 เมื่อทำการหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่โลหะจำรูปแล้ว อุณหภูมิของโลหะจำรูปจะยังคงมีอุณหภูมิที่สูงอยู่และโลหะจำรูปจะอยู่ในลักษณะของการหดตัวอยู่หลังจากนั้นอุณหภูมิจะค่อยลดต่ำลงมา ซึ่งได้ทำการหาเวลาที่ใช้ในการคืนรูปของโลหะจำรูปจนโลหะจำรูปมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง (TA = 25 องศาเซลเซียส)

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าเวลาที่ทำให้โลหะจํารูปเย็นตัว ตามค่ากระแสขนาดต่างๆ ที่ป้อนให้กับโลหะผสม นิกเกิล – ไทเทเนียม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1mm. ภายใต้งี้อุ่นใจ TA = 25 องศาเซลเซียส

กระแสไฟฟ้า	เวลาที่ใช้ในการเย็นตัว
1.00 แอมป์	*
1.25 แอมป์	40 วินาที
1.50 แอมป์	43 วินาที
1.75 แอมป์	49 วินาที
2.00 แอมป์	55 วินาที
2.25 แอมป์	61 วินาที
2.50 แอมป์	72 วินาที
2.75 แอมป์	**

\* แสดงถึง กระแสไฟฟ้าที่มีค่าไม่มากพอที่จะทำให้โลหะจํารูปสามารถหดตัวได้ (จากตารางที่ 4.1)

\*\* แสดงถึง กระแสไฟฟ้าที่มีค่ามากเกินไปซึ่งอาจจะทำให้โลหะจํารูปเสียรูปได้ (จากตารางที่ 4.1)

### สรุปผลการทดลองที่ 2

จากตารางผลการทดลองที่ 2 จะพบว่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโลหะจํารูป มีผลต่อระยะเวลาที่ใช้ในการคืนรูปของโลหะจํารูป กล่าวคือ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีค่าสูงจะเกิดความร้อนมากกว่าการจ่ายกระแสที่มีค่าต่ำ ดังนั้น เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีค่าสูงระยะเวลาในการเย็นตัวของโลหะจํารูปก็จะมากตามไปด้วย

### การทดลองที่ 3

#### ขั้นตอนการทดลอง

จากตารางผลการทดลองในตารางที่ 4.2 เราจะทราบเวลาในการเย็นตัวของโลหะจํารูปที่ขนาดกระแสไฟฟ้าต่างๆ แต่ในการทดลองนี้จะจ่ายกระแสไฟฟ้าจนโลหะจํารูปมีอุณหภูมิประมาณ 65 องศาเซลเซียส ซึ่งประมาณเป็นอุณหภูมิที่โลหะจํารูปทนได้ แล้วทำการวัดระยะเวลาที่ใช้ในการคลายความร้อนจนมีอุณหภูมิที่ประมาณอุณหภูมิห้อง (TA = 25 องศาเซลเซียส)

#### ผลการทดลองที่ 3

$$T = 76 \text{ Sec}$$

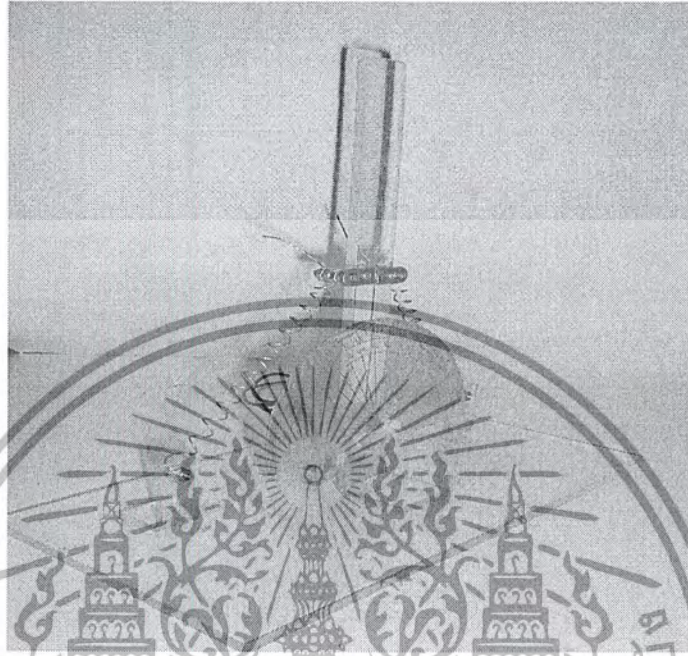
65 °C



25 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การออกแบบชุดทดสอบ



รูปที่ 4. 1 เป็นชุดทดสอบที่ออกแบบเพื่อหาแบบจำลองในการควบคุมตำแหน่งมุมโดยใช้โลหะจํารูป 2 เส้นในการยึดตัวและหัดตัวของ โลหะจํารูป

### การทดลอง

กำหนดให้โลหะจํารูปทางซ้ายมือเป็นตัวควบคุมให้มุมมีค่าตามต้องการในกรณีที่มีมุมปัจจุบันมีค่ามากกว่าค่ามุมที่ต้องการ

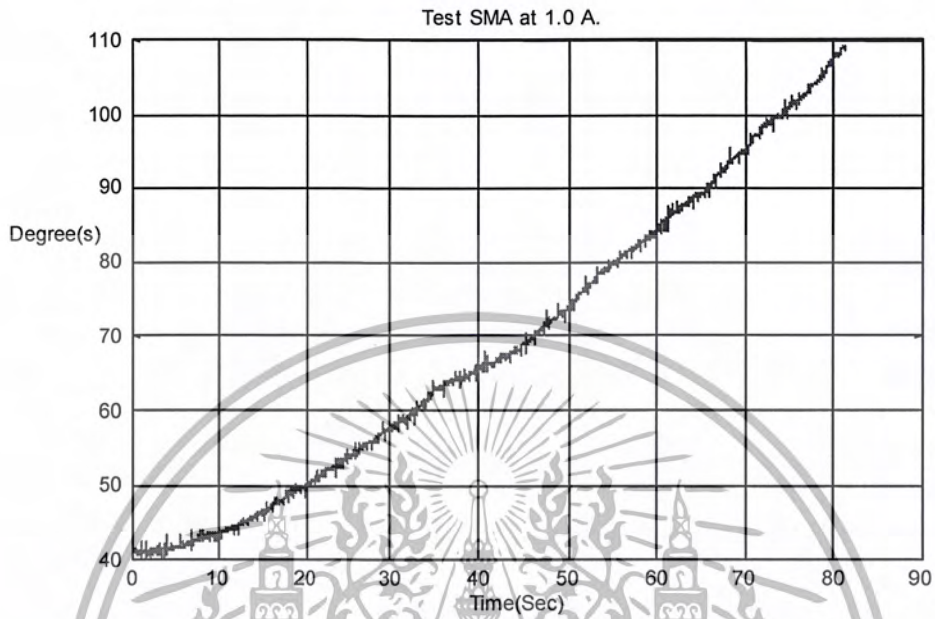
โลหะจํารูปทางขวามือเป็นตัวควบคุมให้มุมมีค่าตามต้องการในกรณีที่มีมุมปัจจุบันมีค่าน้อยกว่าค่ามุมที่ต้องการ

### การทดลองที่ 1

ซึ่งในการทดลองนี้เป็นการทดลองแบบลูปเปิด (Open -Loop ) โดยมี Potentiometer เป็นตัวตรวจสอบตำแหน่งซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนมุมได้ในช่วง 40 Degrees ถึง 140 degrees ซึ่งจากการทดลองพบว่าแขนกลทดสอบนี้สามารถควบคุมตำแหน่งของมุมที่ต้องการได้และจะมีความคลาดเคลื่อนของมุมอยู่บ้างขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโลหะจํารูป ซึ่งจะแสดงให้เห็นดังผลการทดลองดังต่อไปนี้ ซึ่งเริ่มต้นจากมุม 40 Degree(s) ถึง 140 Degree(s) และผลที่ได้

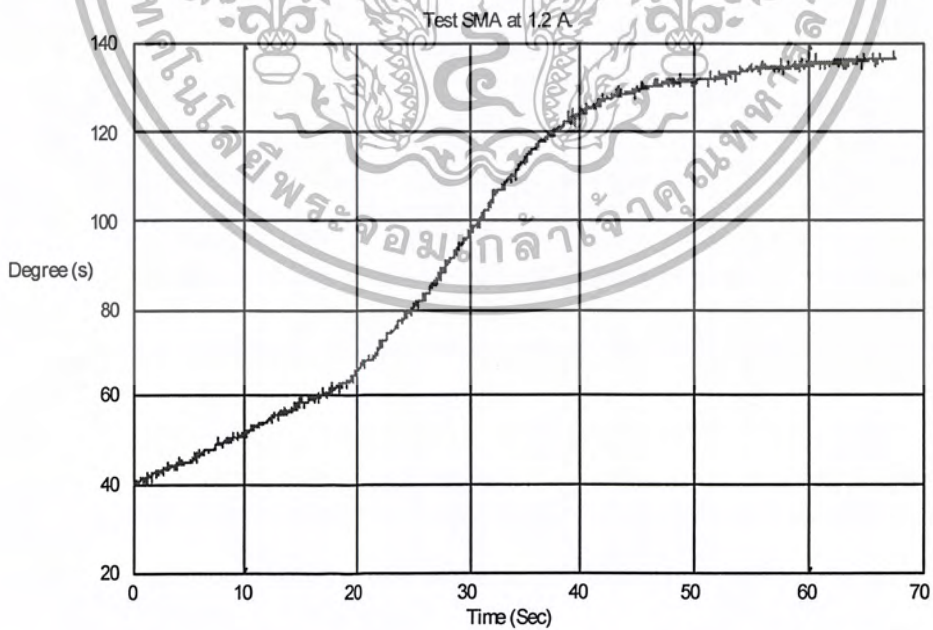
เอกสารนี้เป็นแสดงในรูปแบบของกราฟต่อไปนี้เป็นชิ้นงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.จ่ายกระแส 1.0 A.ในการควบคุมโลหะจำรูป



รูปที่ 4.2 ผลตอบสนองของโลหะจำรูปที่กระแสไฟฟ้า 1.0 A

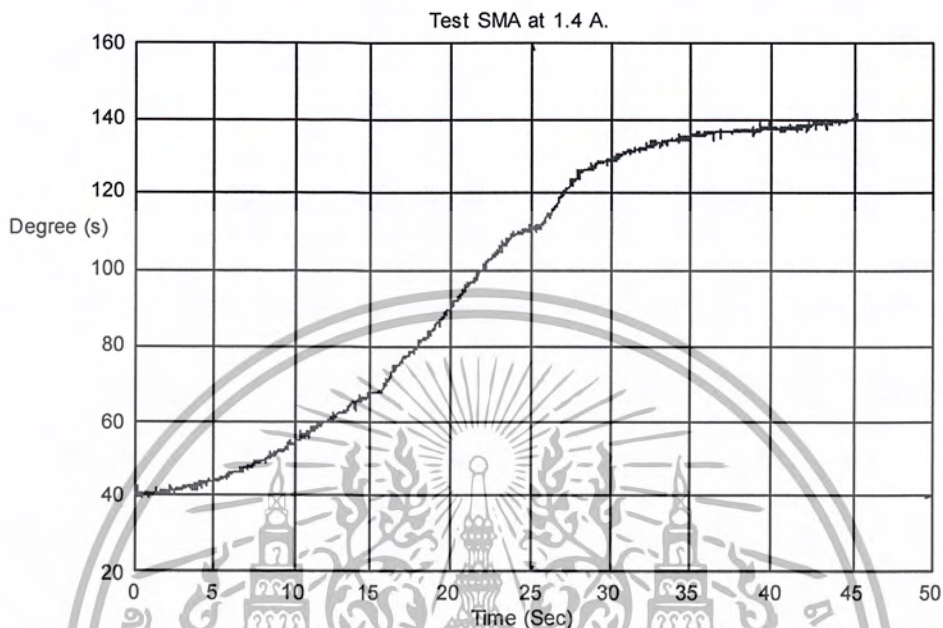
### 2.จ่ายกระแส 1.2 A.ในการควบคุมโลหะจำรูป



รูปที่ 4.3 ผลตอบสนองของโลหะจำรูปที่กระแสไฟฟ้า 1.2 A

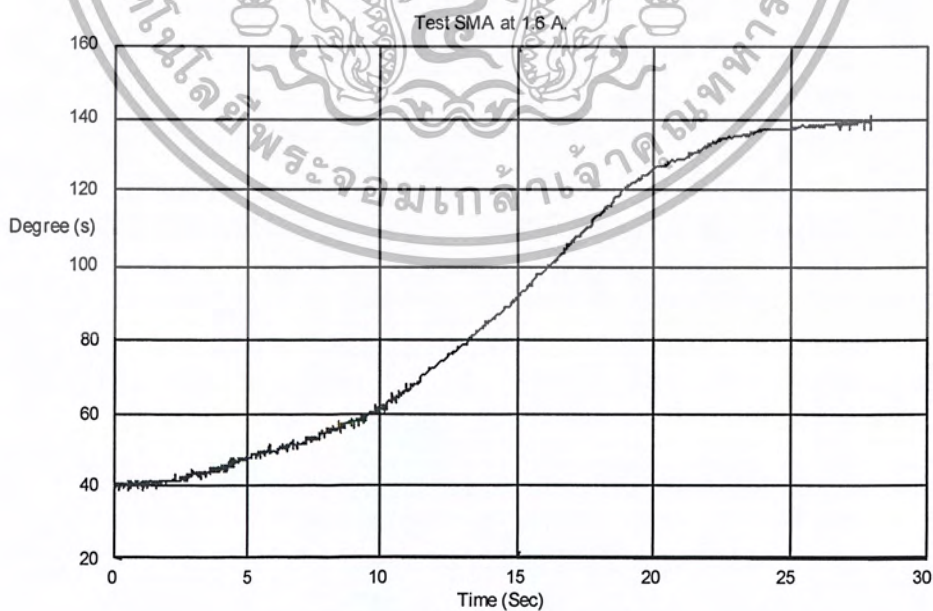
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.จ่ายกระแส 1.4 A.ในการควบคุมโลหะจำรูป



รูปที่ 4.4 ผลตอบสนองของโลหะจำรูปที่กระแสไฟฟ้า 1.4 A

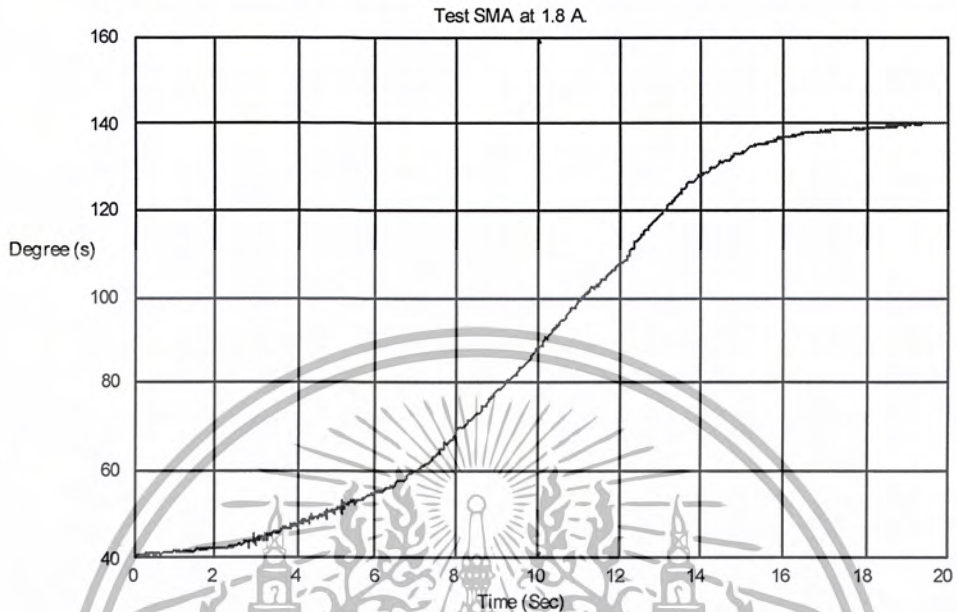
### 4.จ่ายกระแส 1.6 A.ในการควบคุมโลหะจำรูป



รูปที่ 4.5 ผลตอบสนองของโลหะจำรูปที่กระแสไฟฟ้า 1.6 A

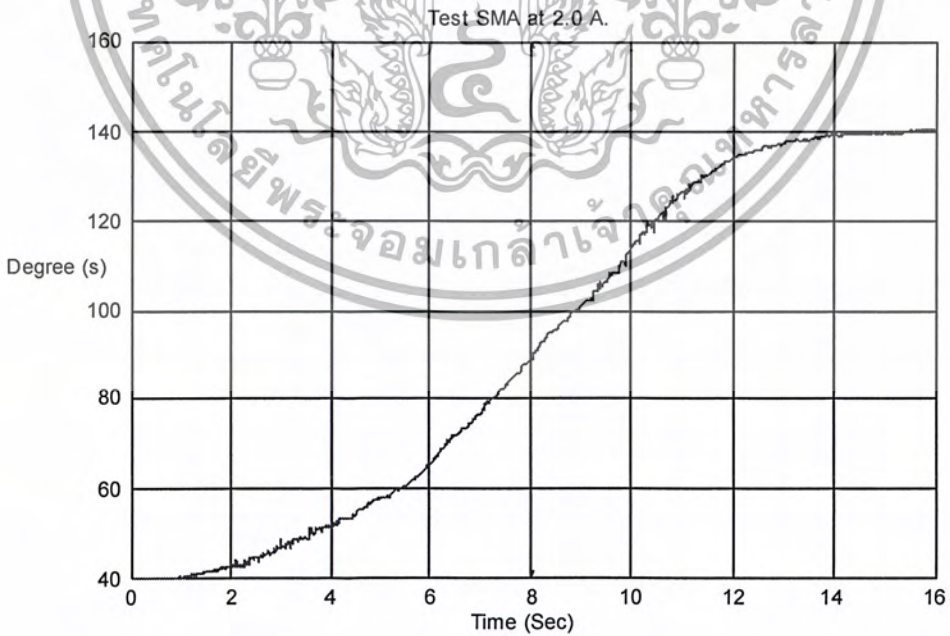
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.จ่ายกระแส 1.8 A.ในการควบคุมโลหะจำรูป



รูปที่ 4.6 ผลตอบสนองของโลหะจำรูปที่กระแสไฟฟ้า 1.8 A

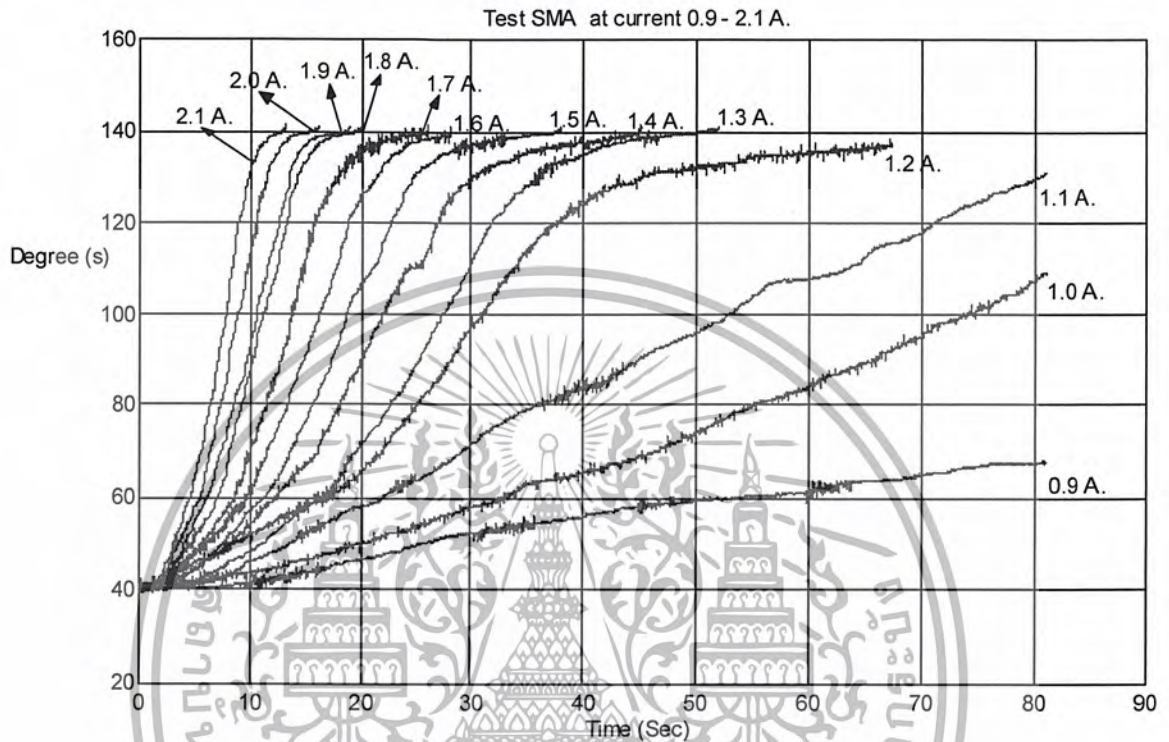
### 6.จ่ายกระแส 2.0 A.ในการควบคุมโลหะจำรูป



รูปที่ 4.7 ผลตอบสนองของโลหะจำรูปที่กระแสไฟฟ้า 2.0 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จากการทดลองที่ผ่านมาเมื่อนำกราฟมาพล็อตรวมกัน จะได้ดังนี้



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าของกระแสต่างๆที่ใช้ควบคุมโลหะจำรูป

#### สรุปผลการทดลอง

- ที่กระแสไฟฟ้าต่ำๆ จะให้ความเป็นเชิงเส้นมากกว่าที่กระแสไฟฟ้าสูงๆ แต่จะใช้เวลาค่อนข้างมากในการปรับเปลี่ยนมุมจาก 40 Degrees ไปยัง 140 Degrees

- ในทางกลับกันที่กระแสไฟฟ้าสูงๆ จะให้ความเป็นเชิงเส้นน้อยกว่าที่กระแสไฟฟ้าต่ำๆ แต่จะใช้เวลาค่อนข้างน้อยในการปรับเปลี่ยนมุมจาก 40 Degrees ไปยัง 140 Degrees

ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากกราฟแล้วจะพบว่าช่วงเวลาที่เหมาะสมคือ 10 - 30 Sec ซึ่งเป็นช่วงเวลาในการเคลื่อนที่ของแขนกลทดสอบที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการออกแบบหุ่นยนต์โดยโลหะจำรูป

## การทดลองที่ 2

- จากการทดลองที่ 1 เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ขนาดต่างๆแล้ว จะพบว่าเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีค่ามากให้กับ โลหะจํารูป จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของมุมที่ต้องการเนื่องจากเมื่อกระแสไฟฟ้ามากย่อมเกิดความร้อนมาก จึงทำให้โลหะจํารูปเกิดการหดตัวอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้ค่ามุมมีค่าเกินกว่าค่าที่ต้องการเนื่องจากเกิดแรงเฉื่อย

- เมื่อเวลาผ่านไปอุณหภูมิของโลหะจํารูปเริ่มลดลง เป็นผลให้โลหะจํารูปที่ขีดตัวอยู่ออกแรงดึง โลหะจํารูปที่หดตัวอยู่กลับมาเล็กน้อย

ซึ่งพิจารณาได้ดังผลการทดลองดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.3 ความคลาดเคลื่อนของมุมที่เกิดจากแรงเฉื่อยของ โลหะจํารูปและที่เกิดจากการเย็นตัวของ โลหะจํารูป

กระแสไฟฟ้า	ค่าองศาที่คลาดเคลื่อนที่เกิดจากแรงเฉื่อยของโลหะจํารูป (Degrees)	ค่าองศาที่คลาดเคลื่อนที่เกิดจากการเย็นตัวของโลหะจํารูป(Degrees)
1.00 แอมป์	0	0
1.25 แอมป์	0	0
1.50 แอมป์	0	0
1.75 แอมป์	0	0.5
2.00 แอมป์	0	1
2.25 แอมป์	1	1
2.50 แอมป์	1	1
2.75 แอมป์	1	2
3.00 แอมป์	2	2

### สรุปผลการทดลอง

- จากตารางที่ 4.3 เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ค่าตั้งแต่ 1.75 แอมป์ ขึ้นไปแล้วจะทำให้เกิดการคลาดเคลื่อนของค่าองศา และเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้า 3.00 แอมป์ นั้นมีความผิดพลาดค่อนข้างมาก ดังนั้นเมื่อพิจารณา ช่วงกระแสตั้งแต่ 1.75 – 2.50 แอมป์ นั้นเป็นช่วงกระแสที่เหมาะสมทั้งในด้านความเร็วในการหดตัวและด้านความคลาดเคลื่อนของมุมที่เกิดขึ้น ซึ่งต้องมีการออกแบบตัวควบคุมเพื่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด และสามารถรักษาตำแหน่งหรือค่าของมุมตามที่ต้องการได้เมื่อมีตัวถูกระเบิดเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย

### 4.3 การออกชุดทดสอบแรงการหดรูปของโลหะจำรูป



รูปที่ 4.9 ชุดทดสอบแรงการหดรูปของโลหะจำรูป

- เนื่องจากเวลาที่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโลหะจำรูปแล้วจะทำให้เกิดความร้อนและทำให้โลหะจำรูปเกิดการหดตัวซึ่งขณะหดตัวนั้นโลหะจำรูปจะเกิดแรงในการหดตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นในการทดลองนี้จะใช้ชุดทดสอบแรงการหดรูปของโลหะจำรูปดังแสดงในรูปที่ 4.2 จึงเป็นตัวทดลองในเรื่องของแรงที่เกิดจากโลหะจำรูปในขณะที่จ่ายกระแสไฟฟ้าขนาดต่างๆ ซึ่งแสดงในตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.4 การวัดค่าเวลาระหว่างน้ำหนักกับกระแสที่ทำให้ โลหะจำรูป คืนรูปเดิม โดยการป้อนกระแสให้กับโลหะจำรูปแล้วมีการหดรูปได้ 3 cm.

น้ำหนัก	1 A	1.5 A	2 A	2.5 A	3 A
50 g	54 sec	16.7 sec	7.2 sec	4 sec	2.2 sec
100 g	*	26.3 sec	8.3 sec	5.5 sec	3.1 sec
150 g	*	20.2 sec	9.1 sec	6 sec	3.9 sec
200 g	*	21 sec	9.3 sec	6.2 sec	4 sec
250 g	*	25.2 sec	13.9 sec	7.8 sec	4.6 sec
300 g	*	69.2 sec	15.5 sec	8 sec	4.8 sec
350 g	*	*	22.4 sec	9.7 sec	7.3 sec
400 g	*	*	30 sec	10 sec	8 sec
450 g	*	*	35 sec	15 sec	10 sec
500 g	*	*	*	** 20 sec	** 13 sec

\* แสดงถึง เวลาผ่านไป 1 นาที โลหะจำรูปหดรูปไม่ถึง 3 ซม. และโลหะจำรูปมีความร้อนจัดจนอาจเสียรูปได้

\*\* แสดงถึงโลหะจำรูป มีความร้อนจัดจนอาจเสียรูปได้

#### สรุปผลการทดลอง

- ที่ 1 A กระแสไฟฟ้าไม่มากพอที่จะทำให้ โลหะจำรูปหดรูปได้
- ที่ 1.5 A กระแสไฟฟ้ามากพอที่จะทำให้โลหะจำรูปหดรูปได้ แต่สามารถหดรูปได้ที่น้ำหนัก 300 g เท่านั้น เพราะเมื่อเวลาผ่านไป 60 sec โลหะจำรูป มีความร้อนจัดจนอาจเสียรูปได้
- ที่ 2 A กระแสไฟฟ้ามากพอที่จะทำให้ โลหะจำรูปหดรูปเดิมได้ และมีการคืนรูปอย่างช้าๆ และต่อเนื่อง จนถึงน้ำหนัก 500 g ก็ไม่สามารถหดได้

- ที่ 2.5 A กระแสไฟฟ้ามากพอที่จะทำให้ โลหะจำรูปหดรูปได้และมีการหดรูปเร็ว และต่อเนื่อง จนถึงน้ำหนัก 500 g โลหะจำรูปมีความร้อนจัดจนอาจเสียรูปได้

- ที่ 3 A กระแสไฟฟ้ามากเกินไปที่จะทำให้ โลหะจำรูปหดรูปได้ และมีการหดรูปเร็วมาก และต่อเนื่อง จนถึงน้ำหนัก 500 g โลหะจำรูปมีความร้อนจัดจนอาจเสียรูปได้

#### 4.4 การคำนวณสำหรับการทำให้ร้อนด้วยไฟฟ้ากระแสตรง มีรายละเอียดในการคำนวณจะมีอยู่ 4 ส่วน คือ

1.1 หาค่ากระแสที่ต้องใช้ สำหรับเวลาที่ต้องการในการใช้งาน

1.2 หาค่าความต้านทานของ Nickel Titanium ที่สภาวะต่างๆ

1.3 แรงดันที่ใช้ สำหรับเพื่อขับเคลื่อนกระแสผ่านอุปกรณ์

1.4 ค่ากำลังงานสูญเสีย

กรณีที่ 1.1 ใช้ตาราง 4.1 และ 4.2

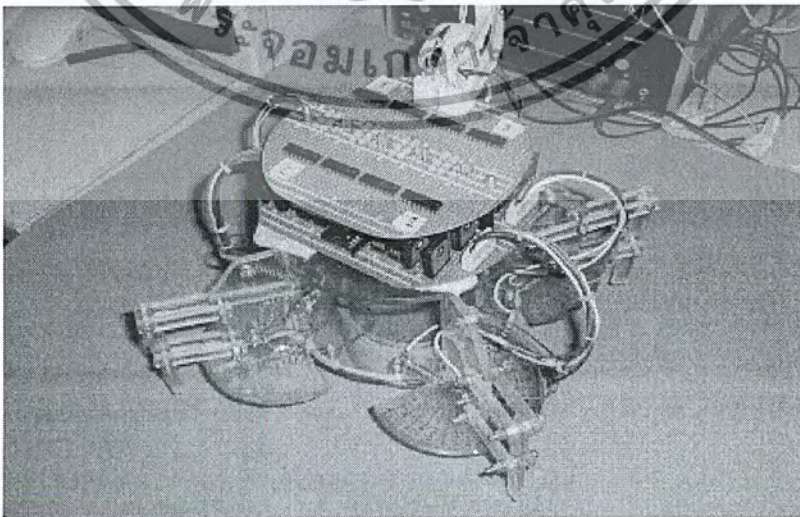
กรณีที่ 1.2 หาค่าความต้านทานจากสูตร

$$\text{Resistance/mm.} = \frac{1.019 \cdot 10^{-3}}{d^2} \text{ Ohm/mm}$$

กรณีที่ 1.3 ใช้กฎของโอห์มในการหา คือ  $V = IR$

กรณีที่ 1.4 หาค่ากำลังไฟฟ้าจากสูตร  $\text{Power} = I^2 R$

#### 4.5 การออกแบบหุ่นยนต์โดยใช้โลหะจำรูป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 4.10 การออกแบบหุ่นยนต์โดยใช้โลหะจำรูป  
 ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป ได้ออกแบบให้หุ่นยนต์มี 4 ขา ซึ่งแต่ละขานั้นจะประกอบด้วยโลหะจํารูปจำนวน 4 เส้น ดังนั้นหุ่นยนต์ 1 ตัวจะใช้โลหะจํารูปทั้งหมด 16 เส้น และที่ขาแต่ละขาของหุ่นยนต์จะมี Potentiometer เป็นอุปกรณ์วัดมุมการเคลื่อนที่ของขา และ Potentiometer จะส่งข้อมูล(แรงดัน)ผ่านการ์ด A/D เข้าไปเพื่อแปลงข้อมูล(แรงดัน)ให้เป็นค่ามุม จากนั้นก็จะประมวลผลและเมื่อต้องการจะสั่งให้ขาของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ก็จะส่งแรงดันผ่านการ์ด D/A ไปสั่งให้วงจรขับจ่ายกระแสให้กับโลหะจํารูปโลหะจํารูปก็จะหดรูปนั้นก็หมายถึงการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

#### 4.6 การใช้งานการ์ด D/A และการ์ด A/D

ในปัจจุบัน คอมพิวเตอร์มีราคาถูกลงอย่างมาก มีการนำไปใช้งานกันอย่างกว้างขวางไม่ว่าจะเป็นในด้านที่เกี่ยวกับเอกสาร หรืองานทั่วไป เช่น การทำเสียงเอฟเฟคใช้ประกอบภาพยนตร์ หรือการทำรูปในด้านการโฆษณา ฯลฯ การใช้งานในด้านต่างๆเหล่านี้ มักจะมีอุปกรณ์ที่ใช้ประกอบการทำงาน ซึ่งเป็นตัวเชื่อมต่อระหว่าง และคอมพิวเตอร์ทำให้การใช้งานเป็นไปอย่างง่ายดายยิ่งขึ้น เช่น จอยสติค เม้าส์ปากกาเขียนจอ (Light Pen) เป็นต้น อุปกรณ์เหล่านี้จะต่อกับคอมพิวเตอร์โดยมีรูปแบบการติดต่อที่เป็นมาตรฐานที่นิยมใช้กันอยู่ทั่วไป คือ มาตรฐานการสื่อสารแบบอนุกรม ( RS-232 ) และมาตรฐานการสื่อสารแบบขนาน (GPIB) ที่จำเป็นต้องมีมาตรฐานเดียวกันเพื่อให้อุปกรณ์นั้นสามารถใช้งานได้อย่างกว้างขวาง ไม่เฉพาะเจาะจงใช้กับเครื่องยี่ห้อใดยี่ห้อหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นคอมพิวเตอร์ไม่ว่าจะเป็นเครื่องรุ่นใดก็ตามหรือยี่ห้อใดก็ตามสามารถใช้อุปกรณ์เหล่านั้นได้ ขอให้รูปแบบการติดต่อที่เหมือนกันก็พอ

แต่อย่างไรก็ตามมาตรฐานเหล่านี้ก็ยังมีข้อจำกัดอยู่บ้าง ดังนั้นสำหรับในโครงการนี้เราจะใช้การเชื่อมต่อ กับ PC โดยอุปกรณ์ I/O ที่ต้องการติดต่อโดยตรงกับระบบบัสของ PC ซึ่งการเชื่อมต่ออุปกรณ์โดยตรงกับระบบบัสของคอมพิวเตอร์เป็นการเพิ่มขีดความสามารถในการติดต่อและเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของอุปกรณ์ I/O ที่ต่ออยู่กับระบบได้ดีขึ้น

การ์ด A/D มีคุณสมบัติดังนี้ คือ มีช่องสัญญาณเข้า 16 ช่องและทำงาน 5 ช่วงคือ ยูนิโพลาร์ 0 ถึง +5V, ไบโพลาร์  $\pm 5V$ , ยูนิโพลาร์ 0 ถึง +10V, ไบโพลาร์  $\pm 10V$ , ยูนิโพลาร์ -2.5 ถึง +2.5V มีค่า Resolution ขนาด 12 บิต กล่าวคือ มีความละเอียด 2.441 mV มีค่าความผิดพลาด  $\pm 0.4\%$

#### 4.7 การทำงานโปรแกรมของชุดทดสอบในการควบคุมตำแหน่งมุมโดยใช้โลหะจํารูป 2 เส้น

การอธิบายขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม โดยแบ่งออกเป็นส่วนๆ ด้วยกัน คือ

##### - Set Port and Card

โดยเริ่มจากการติดต่อพอร์ตตามตำแหน่งของการ์ด D/A และ A/D เพื่อทำการเปิดพอร์ต และกำหนด Address ของการ์ด แล้วทำการเปิดโปรแกรมเพื่อรับค่าจาก Keyboard

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**- อ่านค่าตำแหน่งมุมปัจจุบันของชุดทดสอบ**

โดยจะรับข้อมูลที่เป็นแรงดันจาก Potentiometer เข้าทางการ์ด A/D แล้วเปลี่ยนให้เป็นค่าตำแหน่งมุม

**- รับค่าอินพุตเป็นองศา**

เป็นการรับค่าจาก Keyboard เป็นค่าของมุมมองศาที่ต้องการแล้วนำไปเปลี่ยนเป็นแรงดัน

**- ตรวจสอบค่าอินพุต**

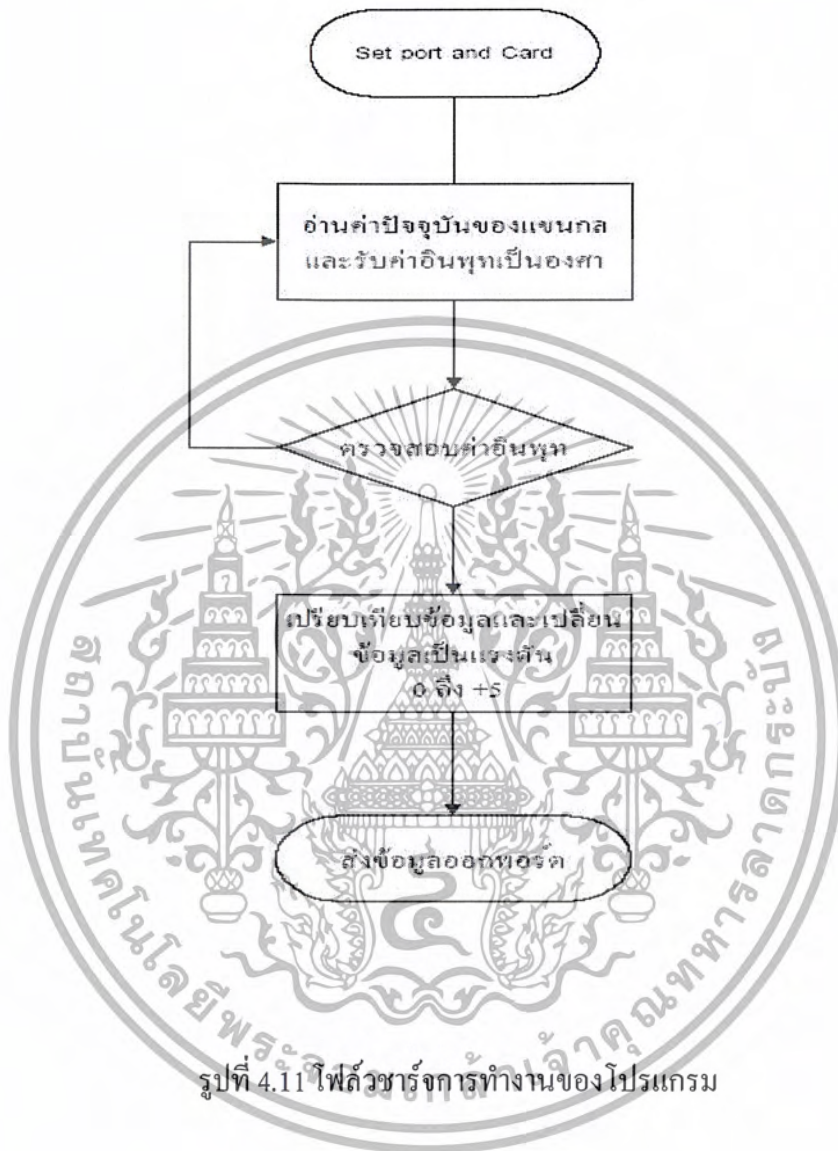
ทำหน้าที่ตรวจสอบค่าที่ได้รับจากอินพุต ว่ามีค่าอยู่ในย่านที่ถูกต้องหรือไม่ ถ้าถูกต้องก็ทำการส่งไปคำนวณต่อไป แต่ถ้าไม่ถูกต้องก็ทำการ Clear ค่าที่ได้รับทิ้งไป และกลับไปรอรับค่าอินพุตใหม่ต่อไป

**- เปรียบเทียบข้อมูลและเปลี่ยนข้อมูลเป็นแรงดัน 0 ถึง +5 V**

ทำหน้าที่เปรียบเทียบอินพุตที่รับมาเป็นองศากับค่าองศาปัจจุบันว่ามีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าและกำหนดให้ค่ามุมอินพุตที่รับเข้ามาเป็น Set point และคำนวณหาค่าผลต่างของมุมที่ต้องการแล้วเปลี่ยนเป็นแรงดัน

**- ส่งข้อมูลออกพอร์ต**

เป็นการส่งข้อมูล 12 บิต ออกสู่พอร์ตเมื่อแรงดันที่ป้อนกลับเข้ามาถึงค่า Set point ก็ส่งสัญญาณออกพอร์ตให้วงจรขับกระแสหยุดทำงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### การหาสมการทางคณิตศาสตร์ขานุ่นยนต์และการออกแบบตัวควบคุมโดยใช้คอมพิวเตอร์

#### 5.1 การหาสมการทางคณิตศาสตร์ (Modeling) ขานุ่นยนต์ที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์

ในการออกแบบตัวควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของขานุ่นยนต์ จำเป็นที่จะต้องรู้สมการทางคณิตศาสตร์(Modeling)ของขานุ่นยนต์

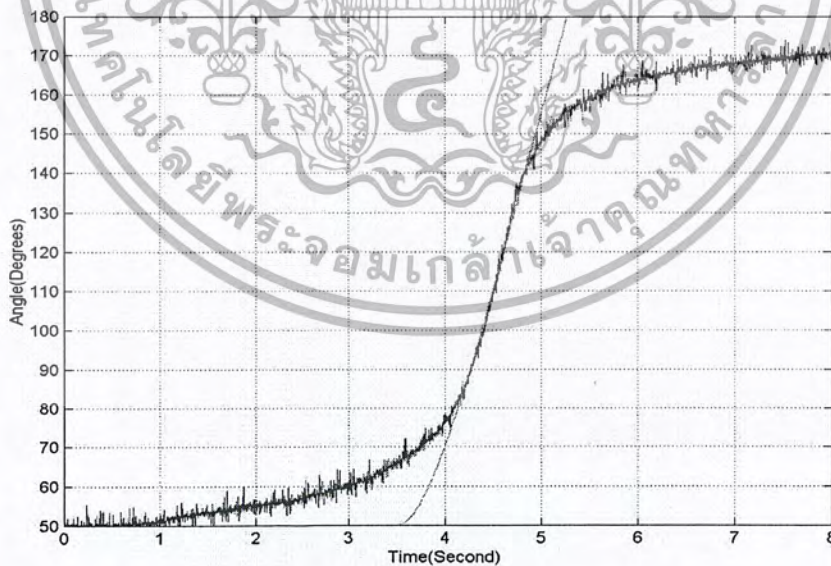
สมการทางคณิตศาสตร์(Modeling)ของขานุ่นยนต์ ของกระบวนการนี้เราจะใช้วิธีการจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรมแมทแลป

แรงดันที่ป้อนให้แก่ระบบนี้คือ 3.5 V

$$G(S) = \frac{K e^{-10S}}{TS^2 + S}$$

#### 1. สมการทางคณิตศาสตร์ (Modeling) ขานุ่นยนต์ 1 ของขานุ่นยนต์

$$G1(S) = \frac{27 e^{-3.5S}}{0.40 S^2 + S}$$

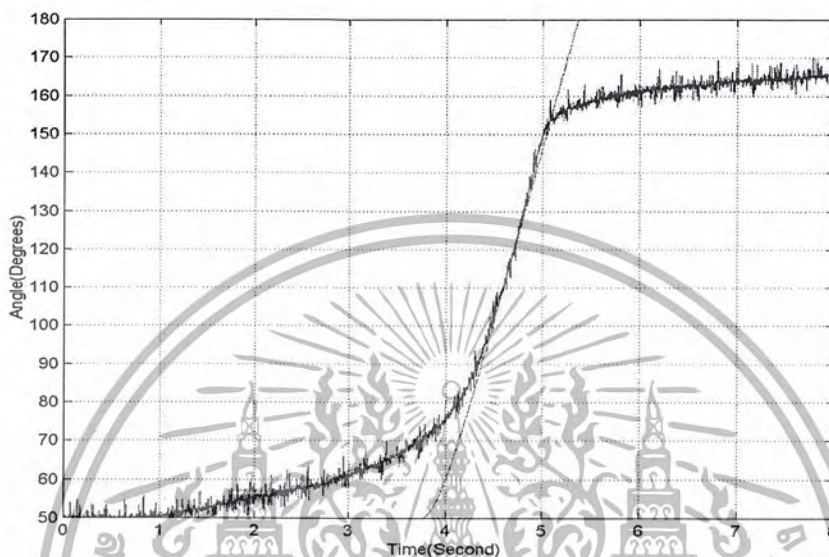


รูปที่ 5.1 แสดงกราฟการประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขานุ่นยนต์ 1 ของขานุ่นยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. สมการทางคณิตศาสตร์ (Modeling) ขาที่ 2 ของหุ่นยนต์

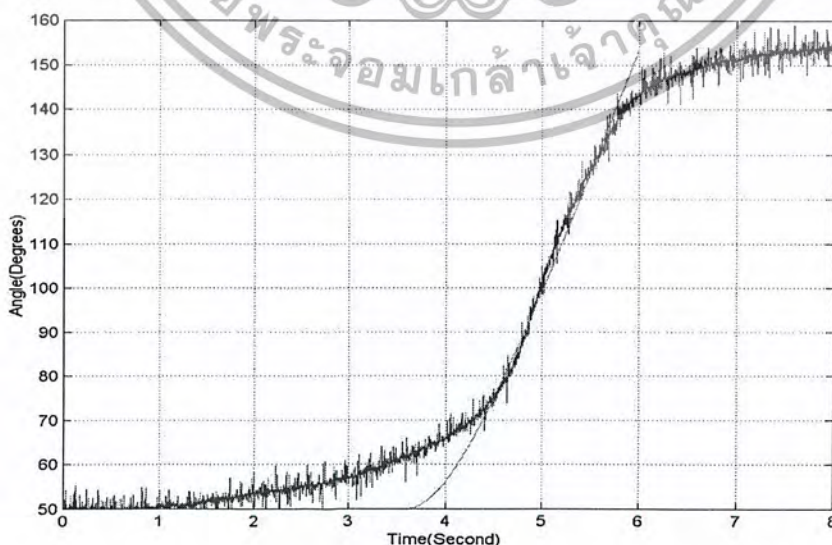
$$G2(S) = \frac{26.19 e^{-3.75S}}{0.2 S^2 + S}$$



รูปที่ 5.2 แสดงกราฟการประมาณหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขาที่ 2 ของหุ่นยนต์

## 3. สมการทางคณิตศาสตร์ (Modeling) ขาที่ 3 ของหุ่นยนต์

$$G3(S) = \frac{16.32 e^{-3.6S}}{0.6 S^2 + S}$$

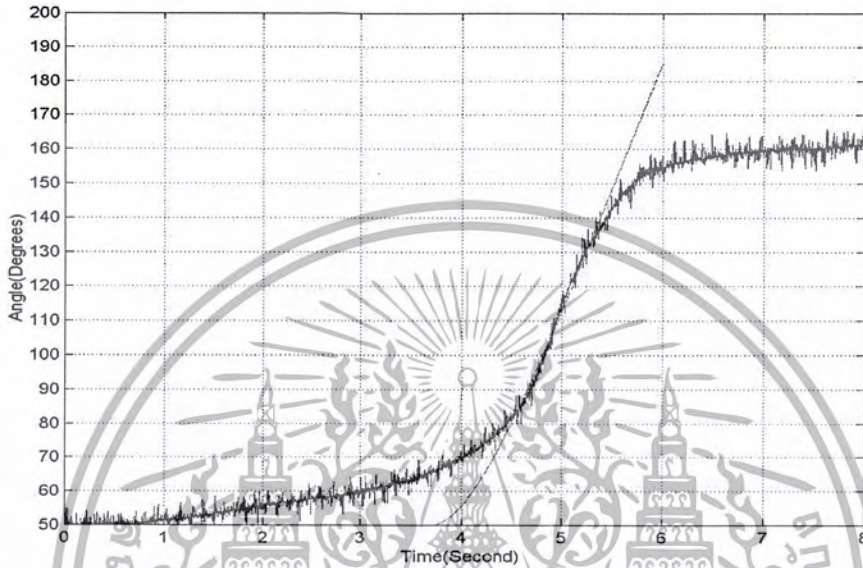


รูปที่ 5.3 แสดงกราฟการประมาณหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขาที่ 3 ของหุ่นยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4 สมการทางคณิตศาสตร์ (Modeling) ขาที่ 4 ของหุ่นยนต์

$$G4(S) = \frac{21.42e^{-3.75S}}{0.5 S^2 + S}$$



รูปที่ 5.4 แสดงกราฟการประมาณหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขาที่ 4 ของหุ่นยนต์

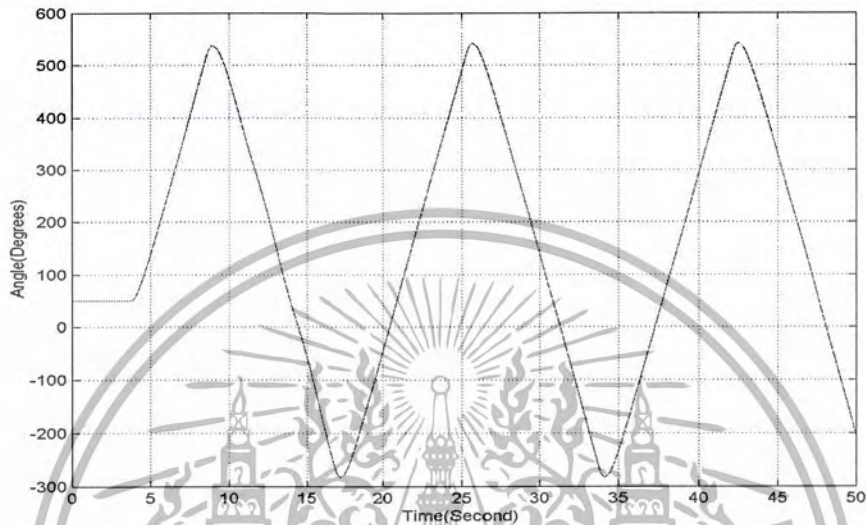
ตารางที่ 5.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 ค่าของระบบ คือ อัตราขยายกระบวนการ (K) ค่าเวลาหน่วงของกระบวนการ ( $t_0$ ) และค่าคงที่ของกระบวนการ (T) ที่ได้มาจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์

ขา	อัตราขยายกระบวนการ(K)	ค่าเวลาหน่วงของกระบวนการ( $t_0$ )	ค่าคงที่ของกระบวนการ(T)
1	27.00	3.50	0.4
2	26.19	3.75	0.2
3	16.32	3.60	0.6
4	21.42	3.70	0.5

## 5.2 สัญญาณตอบสนองแบบ ลูปปิด (Close loop)

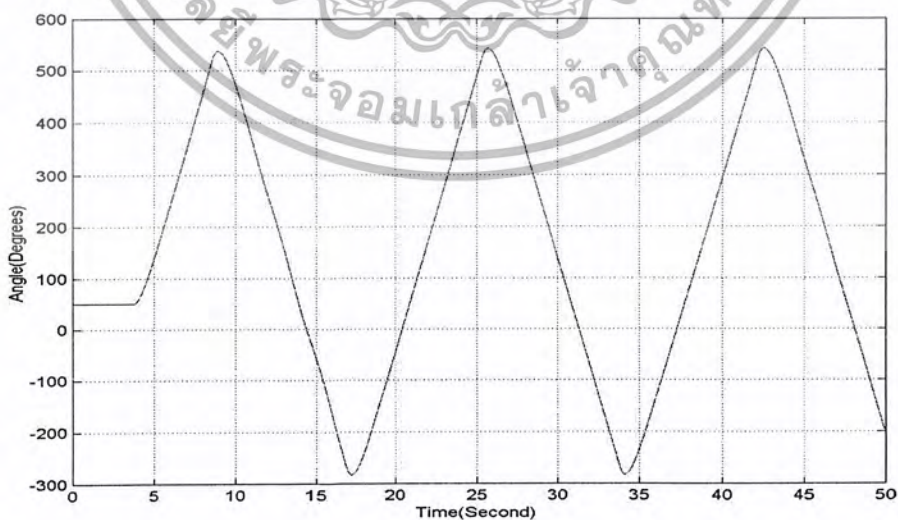
โดยเริ่มต้นที่ 50 องศา ไปยังจุดเป้าหมาย (Set point) = 130 องศา โดยไม่มีการใช้ตัวควบคุม

### 1. ผลตอบสนองแบบลูปปิด (Close loop) ของขาที่ 1 ของหุ่นยนต์



รูปที่ 5.5 แสดงผลตอบสนองแบบลูปปิด (Close Loop) ของขาที่ 1 ของหุ่นยนต์

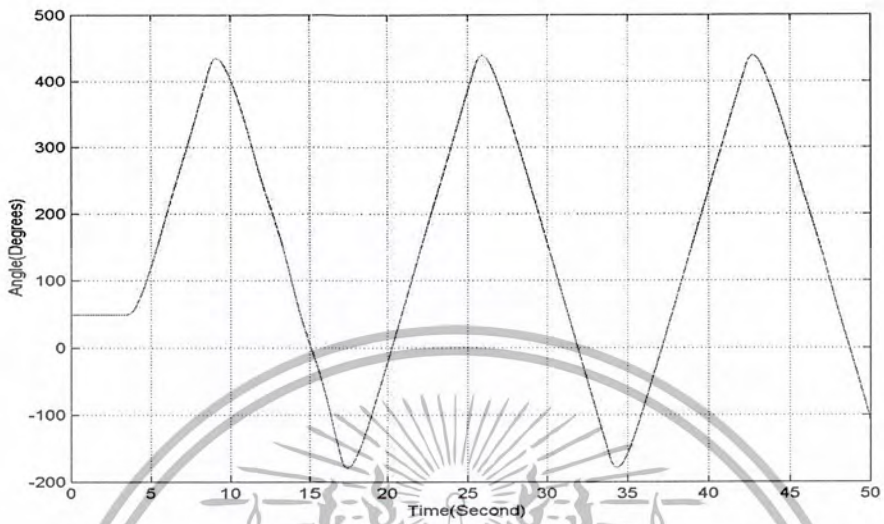
### 2. ผลตอบสนองแบบลูปปิด (Close loop) ของขาที่ 2 ของหุ่นยนต์



รูปที่ 5.6 แสดงผลตอบสนองแบบ ลูปปิด (Close Loop) ของขาที่ 2 ของหุ่นยนต์

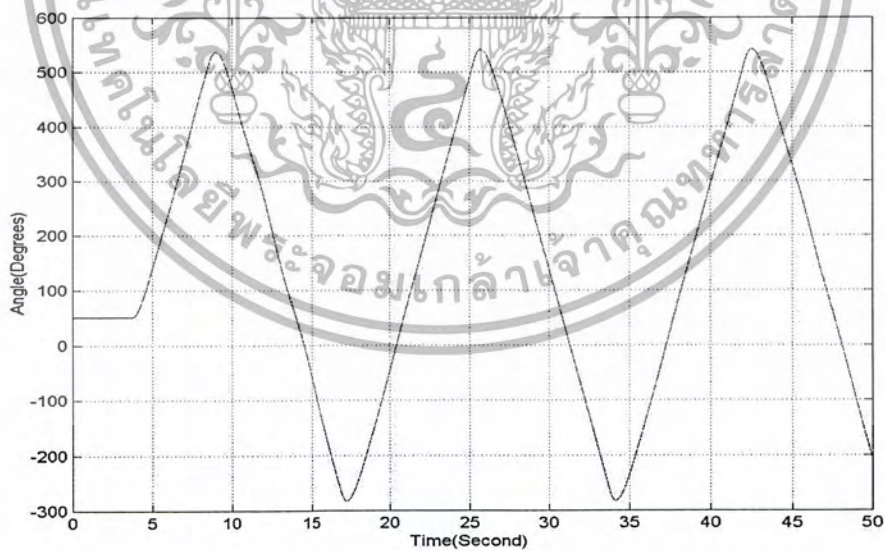
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. ผลตอบสนองแบบลูปิด (Close loop) ของขาที่ 3 ของหุ่นยนต์



รูปที่ 5.7 แสดงผลตอบสนองแบบลูปิด (Close Loop) ของขาที่ 3 ของหุ่นยนต์

### 4. ผลตอบสนองแบบลูปิด (Close loop) ของขาที่ 4 ของหุ่นยนต์



รูปที่ 5.8 แสดงผลตอบสนองแบบลูปิด (Close Loop) ของขาที่ 4 ของหุ่นยนต์

จากกราฟที่ได้ สังเกตว่าระบบของทุกขาเกิดการแกว่ง นั่นหมายถึงระบบไม่มีเสถียรภาพเมื่อทำการหาผลตอบสนองแบบรูปปิด (Close loop) และเป็นการแกว่งที่คงที่ ซึ่ง ได้แก่

ขาที่ 1 มีการแกว่งอยู่ระหว่าง 520 ถึง - 280 องศา

ขาที่ 2 มีการแกว่งอยู่ระหว่าง 520 ถึง - 290 องศา

ขาที่ 3 มีการแกว่งอยู่ระหว่าง 420 ถึง - 180 องศา

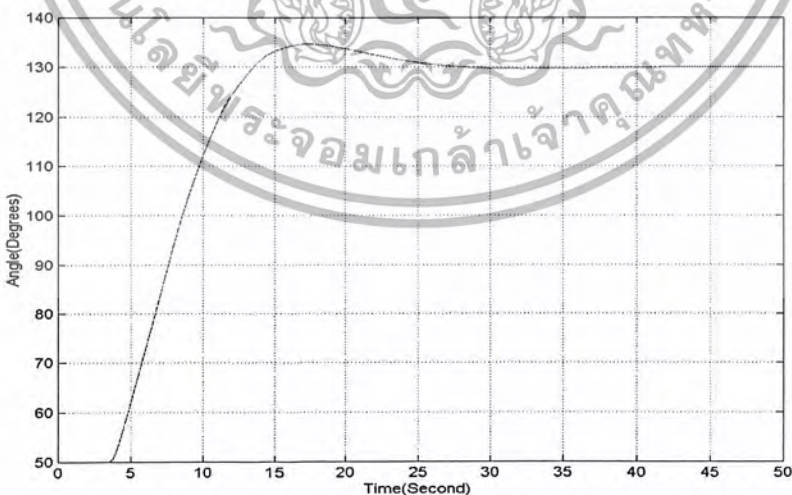
ขาที่ 4 มีการแกว่งอยู่ระหว่าง 540 ถึง - 290 องศา

ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้วระบบไม่สามารถเข้ายังจุดเป้าหมาย (Set point) ได้ ดังนั้นต้องทำการออกแบบตัวควบคุม ที่สามารถทำให้ระบบเข้ายังจุดเป้าหมาย (Set Point) ได้ตามต้องการ โดยใช้ตัวควบคุมพี (P-Controller) ,ตัวควบคุมพีไอ (PI- Controller) และตัวควบคุมพีไอดี (PID-Controller) แล้วพิจารณาว่าตัวควบคุมแบบใด ที่สามารถเข้าจุดเป้าหมาย (Set Point) ได้เร็วที่สุดและมีความเหมาะสมกับระบบมากที่สุด

### 5.3 ออกแบบตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของขาหุ่นยนต์โดยใช้ตัวควบคุมชนิดพี (P – Controller) ที่ใช้การจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์

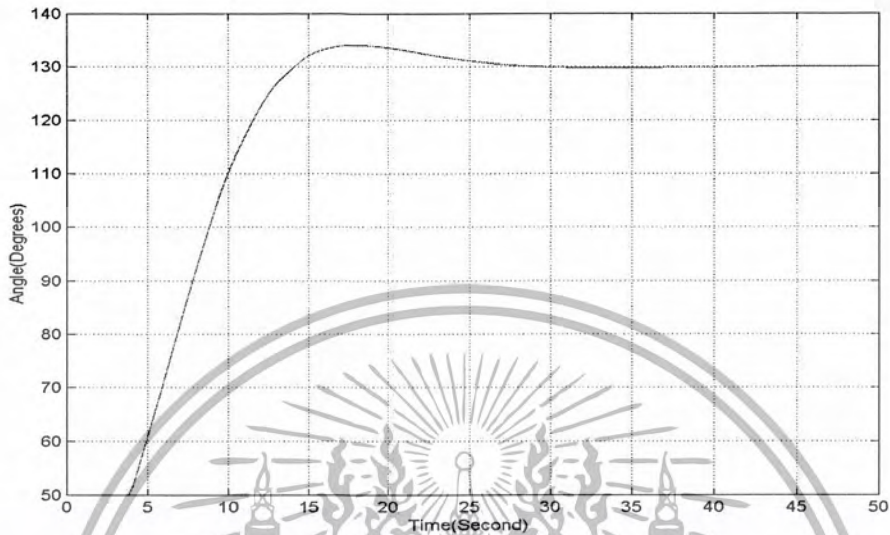
ทำการปรับตัวควบคุมช่วงที่ใช้งานจริงคือ โดยเริ่มต้นที่ 50 องศา ไปยังจุดเป้าหมาย (Set point) = 130 องศา โดยจะใช้ค่า  $K_c = 0.005$  เป็นค่าทดสอบแล้วดูผลตอบสนองสมการการทางคณิตศาสตร์ว่ามีผลตอบสนองเป็นอย่างไร

#### 1. รูปผลตอบสนองขาที่ 1 ของหุ่นยนต์เมื่อ $K_c = 0.005$



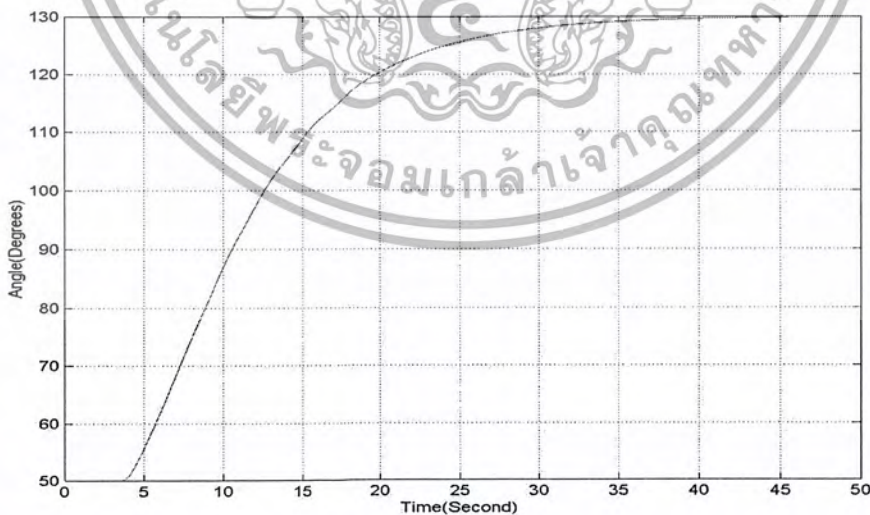
รูปที่ 5.9 แสดงผลตอบสนองของขาที่ 1 เมื่อใช้ตัวควบคุมชนิดพี (P- Controller)

2. รูปผลตอบสนองขาที่ 2 ของหุ่นยนต์เมื่อ  $K_c = 0.005$



รูปที่ 5.10 แสดงผลตอบสนองของขาที่ 2 เมื่อใช้ตัวควบคุมชนิดพี (P- Controller)

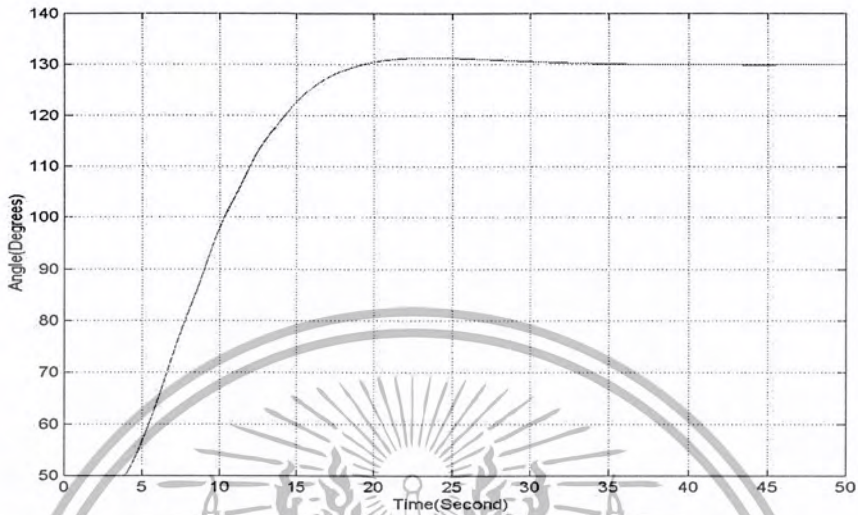
3. รูปผลตอบสนองขาที่ 3 ของหุ่นยนต์เมื่อ  $K_c = 0.005$



รูปที่ 5.11 แสดงผลตอบสนองของขาที่ 3 เมื่อใช้ตัวควบคุมชนิดพี (P- Controller)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. รูปผลตอบสนองของขาที่ 4 ของหุ่นยนต์เมื่อ $K_c = 0.005$



รูปที่ 5.12 แสดงผลตอบสนองของขาที่ 4 เมื่อใช้ตัวควบคุมชนิดพี (P- Controller)

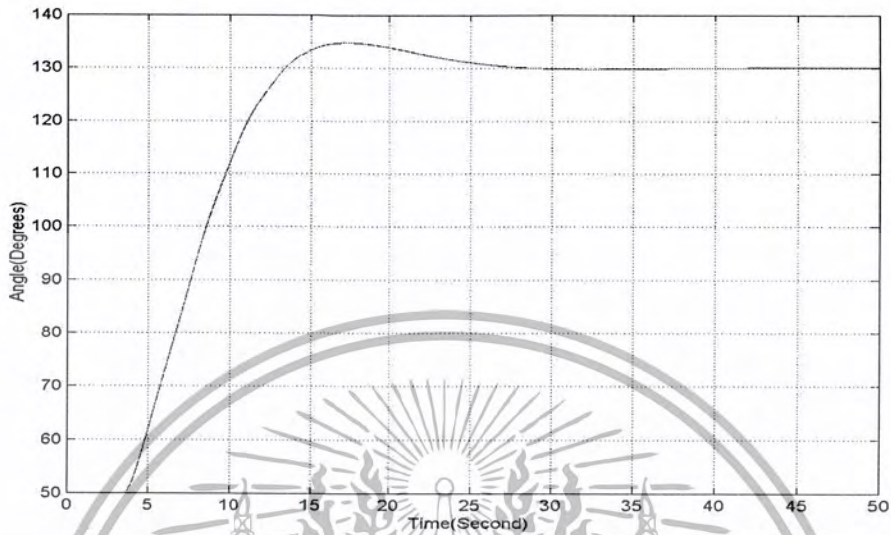
#### การควบคุมแบบพี

- 1.1 การควบคุมแบบพี ทำให้กระบวนการตอบสนองต่อตัวแปรเข้าเร็วขึ้น
- 1.2 ตัวควบคุมพี การทำงานจะเกิดค่าผิดพลาดที่สภาวะคงที่ (Steady State Error)
- 1.3 ค่าอัตราขยายของเครื่องควบคุมที่มากจะให้ค่าคลาดเคลื่อนน้อยแต่จะเกิดการแกว่งมาก
- 1.4 ตัวควบคุมพี คือ มีตัวปรับอัตราขยายเพียงตัวเดียวซึ่งง่ายต่อการจูนค่า

#### 5.4 ออกแบบตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของขาหุ่นยนต์โดยใช้ตัวควบคุมชนิดพีไอ (PI – Controller) ที่ใช้การจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์

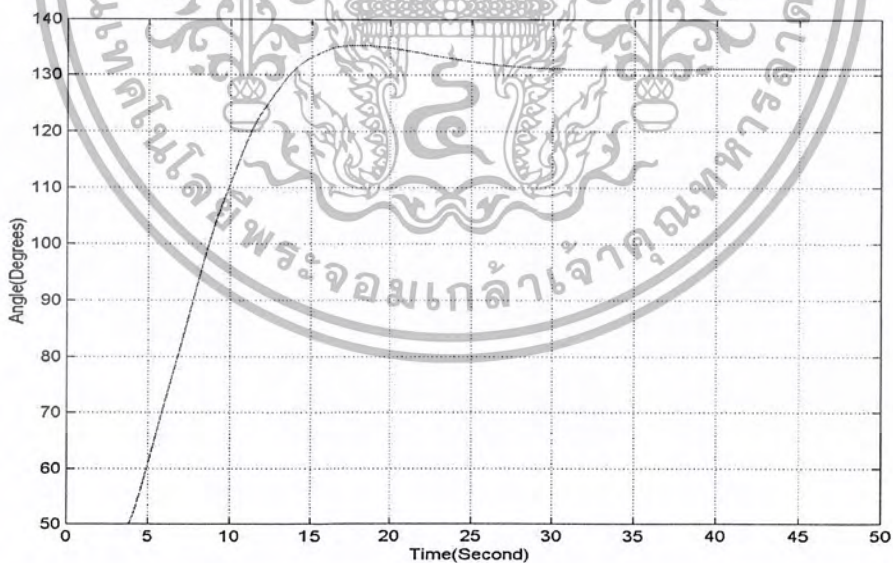
ทำการปรับตัวควบคุมช่วงที่ใช้งานจริงคือโดยเริ่มต้นที่ 50 องศาไปยังจุดเป้าหมาย (Set point) = 130 องศา โดยจะใช้ค่า  $K_c = 0.005$  ,  $T_i = 0.000001$  S เป็นค่าทดสอบแล้วดูผลตอบสนองสมการทางคณิตศาสตร์ว่ามีผลตอบสนองเป็นอย่างไร

1. ผลตอบสนองขาที่ 1 ของหุ่นยนต์เมื่อ  $K_c = 0.005$   $T_i = 0.000001$  S



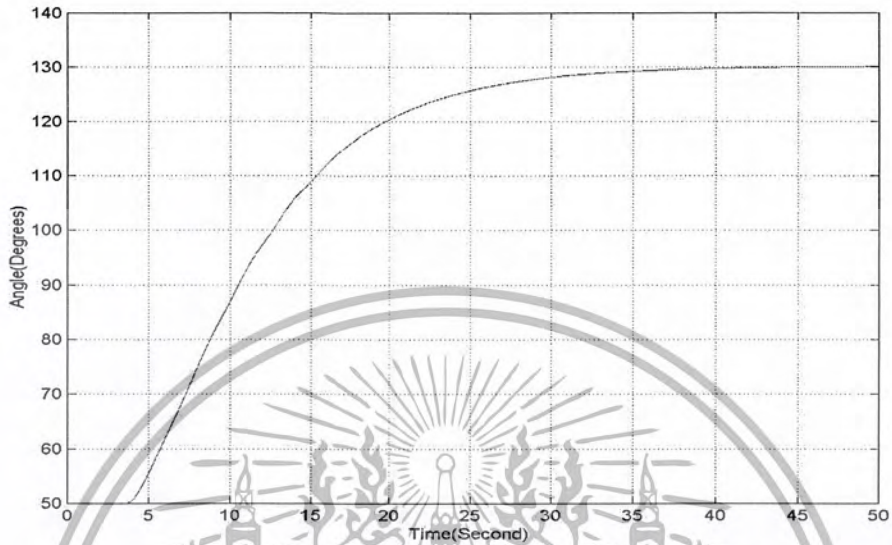
รูปที่ 5.13 แสดงผลตอบสนองของขาที่ 1 เมื่อใช้ตัวควบคุมชนิดพีไอ (PI- Controller)

2 . ผลตอบสนองขาที่ 2 ของหุ่นยนต์เมื่อ  $K_c = 0.005$   $T_i = 0.000001$  S



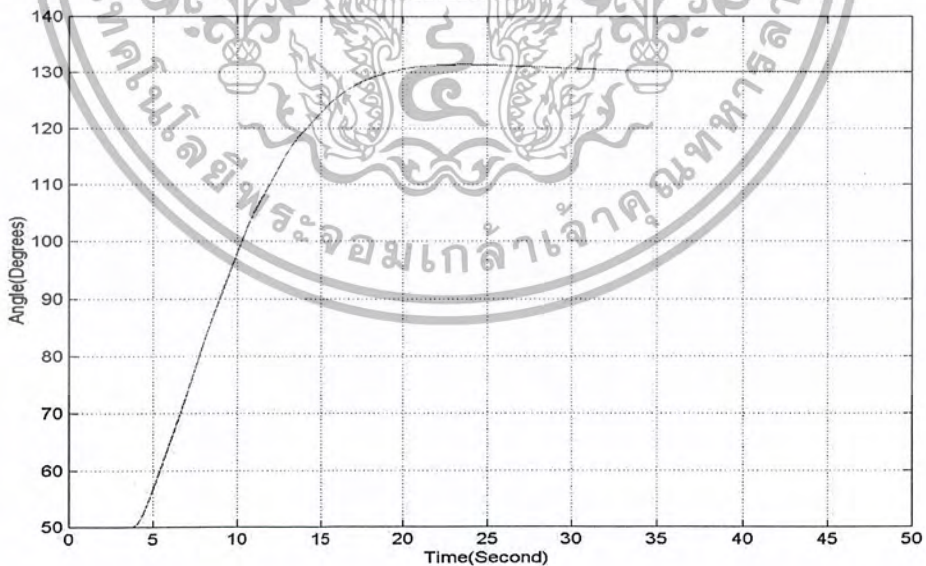
รูปที่ 5.14 แสดงผลตอบสนองของขาที่ 2 เมื่อใช้ตัวควบคุมชนิดพีไอ (PI- Controller)

3. ผลตอบสนองของขาที่ 3 ของหุ่นยนต์เมื่อ  $K_c = 0.005$   $T_i = 0.000001$  S



รูปที่ 5.15 แสดงผลตอบสนองของขาที่ 3 เมื่อใช้ตัวควบคุมชนิดพีไอ (PI- Controller)

4. ผลตอบสนองของขาที่ 4 ของหุ่นยนต์เมื่อ  $K_c = 0.005$   $T_i = 0.000001$  S



รูปที่ 5.16 แสดงผลตอบสนองของขาที่ 4 เมื่อใช้ตัวควบคุมชนิดพีไอ (PI- Controller)

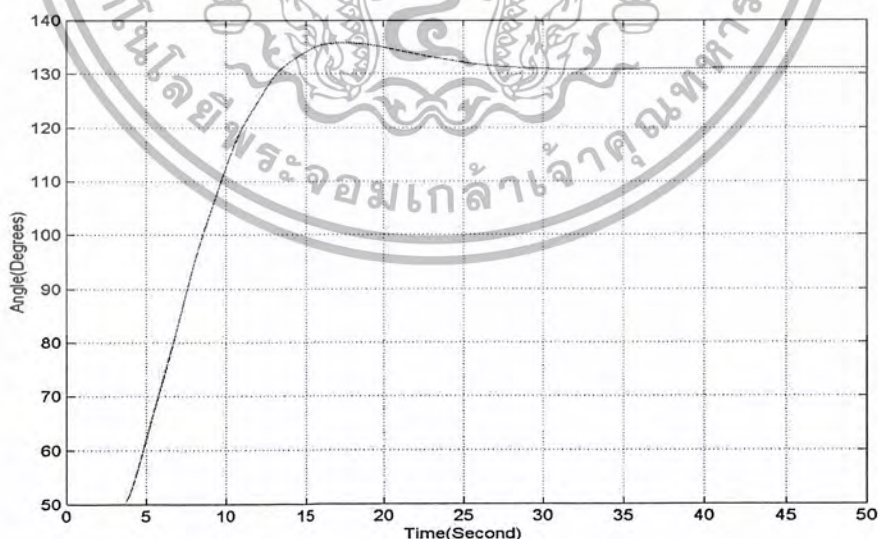
### การควบคุมแบบพีไอ

- 1.1 มีสองพารามิเตอร์ที่จะต้องปรับแต่งได้แก่อัตราขยายและค่าเวลารีเซ็ตหรืออัตรารีเซ็ต
- 1.2 การควบคุมแบบไอทำให้ระบบควบคุมรวมไม่มีความคลาดเคลื่อนในการควบคุม แต่มีค่าการตอบสนองสูงสุดเกิดขึ้นทำให้ความคลาดเคลื่อนในการควบคุมของกระบวนการในช่วงแรกมากกว่า กระบวนการเดิม
- 1.3 การควบคุมแบบไอ ทำให้กระบวนการตอบสนองต่อตัวแปรเข้าภายนอกช้าลงเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเดิมและผลการตอบสนองจะมีการแกว่งเกิดขึ้นเสมอ
- 1.4 การปรับค่า  $K_c$  เพิ่มขึ้นในการควบคุมแบบไอทำให้กระบวนการตอบสนองเร็วขึ้นแต่มีการแกว่งเพิ่มขึ้นทำให้เสถียรภาพของระบบรวมลดลง

### 5.5 ออกแบบตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของขานหุ่นยนต์โดยใช้ตัวควบคุมชนิดพีไอที่ดี (PID - Controller) ที่ใช้การจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์

ทำการปรับตัวควบคุมช่วงที่ใช้งานจริงคือ โดยเริ่มต้นที่ 50 องศา ไปยังจุดเป้าหมาย (Set point) = 130 องศา โดยจะใช้ค่า  $K_c = 0.005$ ,  $T_i = 0.001$  S และ  $T_d = 0.001$  S เป็นค่าทดสอบแล้วดูผลตอบสนองตามการทางคณิตศาสตร์ว่ามีผลตอบสนองเป็นอย่างไร

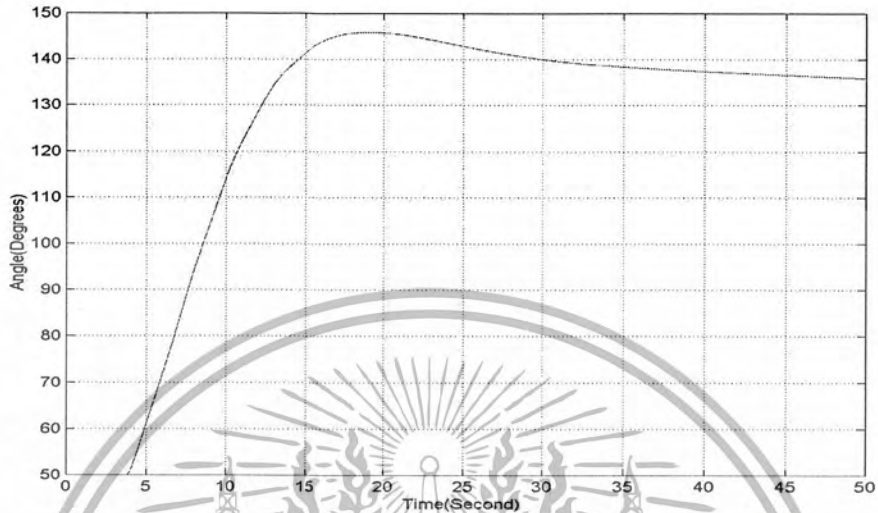
1. ผลตอบสนองขาที่ 1 ของหุ่นยนต์เมื่อ  $K_c = 0.005$ ,  $T_i = 0.001$  S,  $T_d = 0.001$  S



รูปที่ 5.17 แสดงผลตอบสนองของขาที่ 1 เมื่อใช้ตัวควบคุมชนิดพีไอดี (PID- Controller)

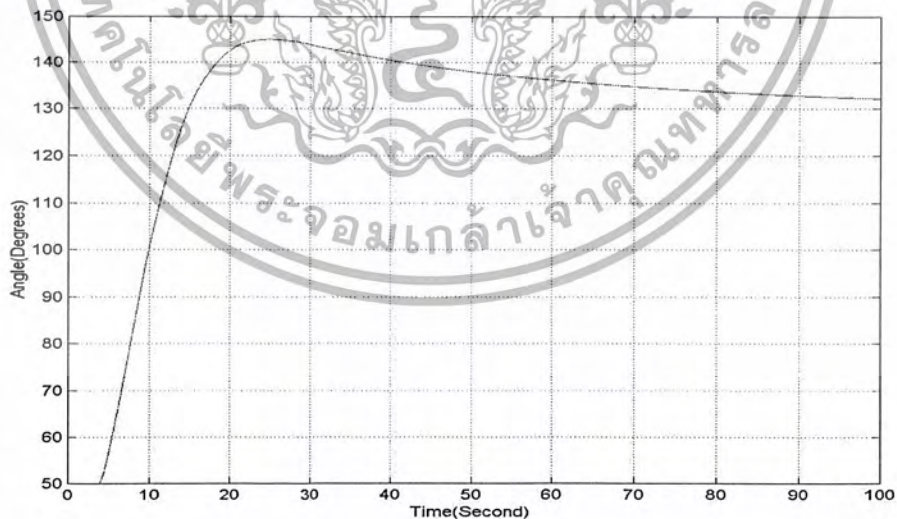
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ผลตอบสนองของชาติ 2 ของหุ่นยนต์เมื่อ  $K_c = 0.005$  ,  $T_i = 0.001$  S ,  $T_d = 0.0001$  S



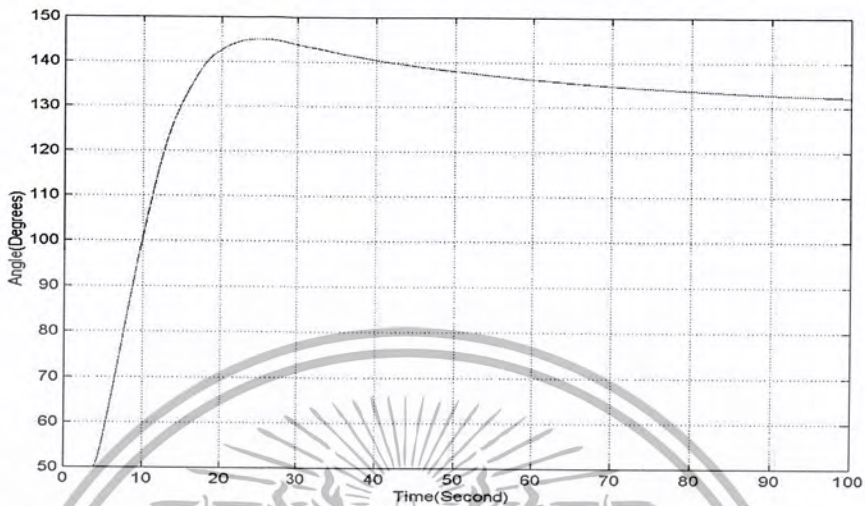
รูปที่ 5.18 แสดงผลตอบสนองของชาติ 2 เมื่อใช้ตัวควบคุมชนิดพีไอดี (PID- Controller)

3. ผลตอบสนองของชาติ 3 ของหุ่นยนต์เมื่อ  $K_c = 0.005$  ,  $T_i = 0.001$  S ,  $T_d = 0.0001$  S



รูปที่ 5.19 แสดงผลตอบสนองของชาติ 3 เมื่อใช้ตัวควบคุมชนิดพีไอดี (PID- Controller)

4. ผลตอบสนองขาที่ 4 ของหุ่นยนต์เมื่อ  $K_c = 0.005$  ,  $T_i = 0.001$  S ,  $T_d = 0.0001$  S



รูปที่ 5.20 แสดงผลตอบสนองของขาที่ 4 เมื่อใช้ตัวควบคุมชนิดพีไอดี (PID- Controller)

#### การควบคุมแบบพีไอดี

- 1.1 เครื่องควบคุมแบบพีไอดี มีสามพารามิเตอร์ที่จะต้องถูกปรับแต่งได้แก่ อัตราขยาย,เวลารีเซ็ตหรืออัตรารีเซ็ต,อัตราต่อเวลา
- 1.2 เครื่องควบคุมแบบพีไอดี จะถูกใช้กับกระบวนการที่มีค่าเวลาคงตัวที่ยาวนานและโดยไม่มีสัญญาณรบกวน
- 1.3 เดอริเวทีฟก็คือจะมีความสามารถในการคาดการณ์ข้างหน้าขณะที่กระบวนการหรือตัวแปรที่ถูกควบคุมมุ่งหน้าไป

#### 5.6 สรุปผลการทดลอง

จากการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพี ไอ และ ตัวควบคุมแบบพีไอดี ค่าที่ได้ยังไม่สามารถควบคุมให้การเคลื่อนที่ของขาหุ่นยนต์ ทำงานได้ตามที่ต้องการ

ดังนั้นการหาค่าพารามิเตอร์ โดยการจำลองทางคอมพิวเตอร์จำเป็นที่จะต้องมีการปรับละเอียดอีกครั้ง เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับกระบวนการ และสามารถนำไปใช้ควบคุมให้การเคลื่อนที่ของขาหุ่นยนต์ทำงานได้ตามความต้องการ และปรับละเอียดเพื่อที่จะได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมนี้ ก็ขึ้นอยู่กับความชำนาญของตัวผู้ออกแบบเอง

## บทที่ 6

### การปรับแต่งตัวควบคุมในระบบจริง

จากผลการทดลองจากบทที่ 5 เราทราบแล้วว่า การหาค่าพารามิเตอร์โดยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ จำเป็นที่จะต้องมีการปรับละเอียดอีกครั้ง เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับกระบวนการจริง การทดลองนี้จะทำการปรับละเอียดอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งจะทำการปรับละเอียดในระบบจริงของขานุ่นยนต์ ที่ต้องการควบคุมการเคลื่อนที่ ที่เริ่มต้น 50 องศา ถึง 130 องศา ซึ่งเป็นช่วงการเคลื่อนที่ ที่ใช้งานจริงของขานุ่นยนต์

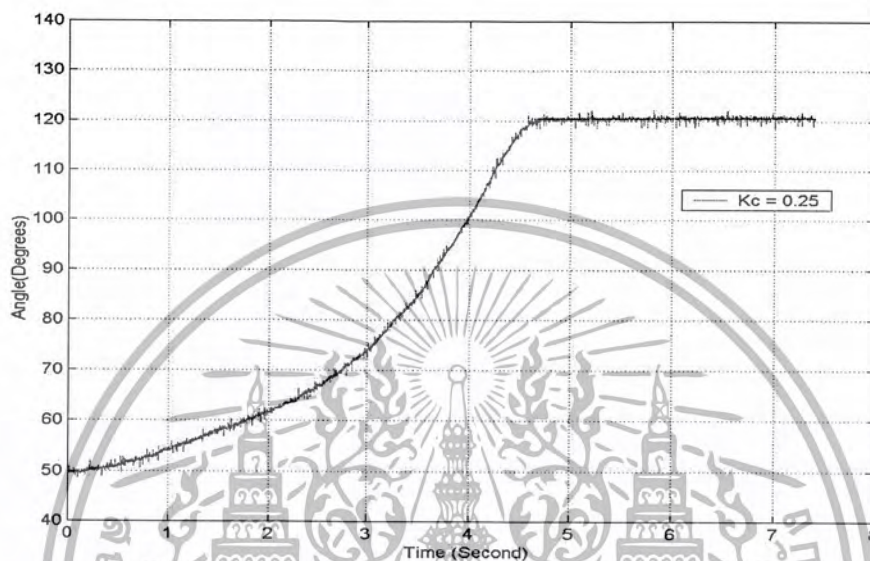


รูปที่ 6.1 แสดงตัวหุ่นยนต์จริงที่ได้ทำการออกแบบ โดยมีโลหะจํารูปเป็นตัวขับเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

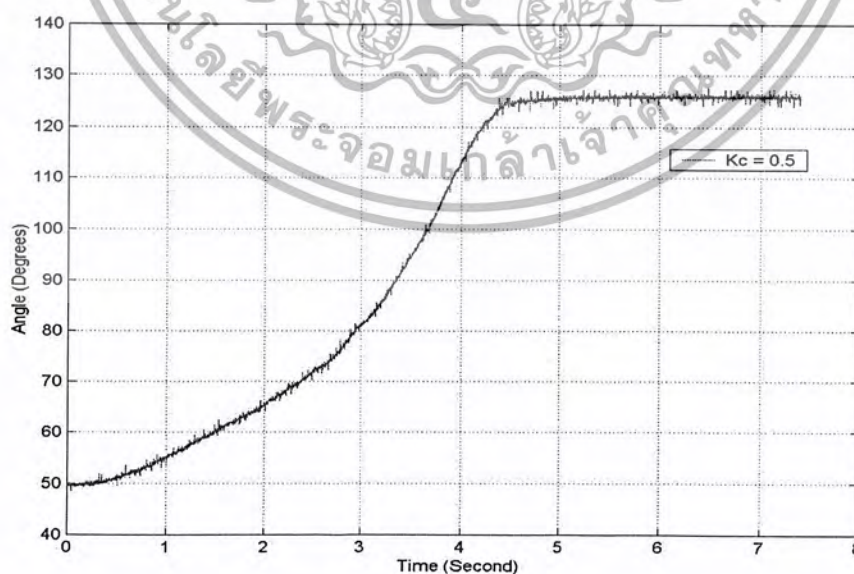
## 6.1 ออกแบบตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของขาหุ่นยนต์จากระบบจริงโดยใช้ตัวควบคุมชนิดพี (P – Controller) ที่มีการปรับละเอียด

1. ผลตอบสนองขาที่ 1 ของหุ่นยนต์เมื่อ  $K_c = 0.25$



รูปที่ 6.2 แสดงผลตอบสนองของขาที่ 1 เมื่อใช้ตัวควบคุมชนิดพี (P- Controller)  $K_c=0.25$

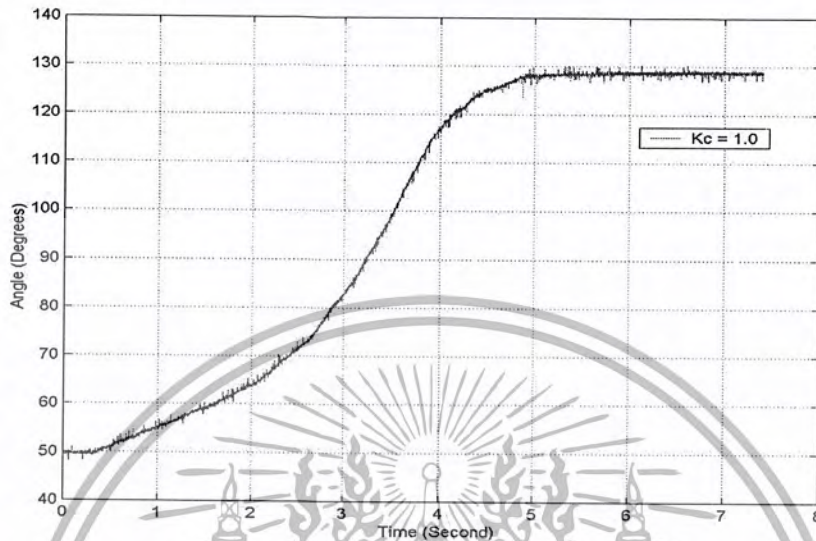
2. ผลตอบสนองขาที่ 1 ของหุ่นยนต์เมื่อ  $K_c = 0.5$



รูปที่ 6.3 แสดงผลตอบสนองของขาที่ 1 เมื่อใช้ตัวควบคุมชนิดพี (P- Controller)  $K_c=0.5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

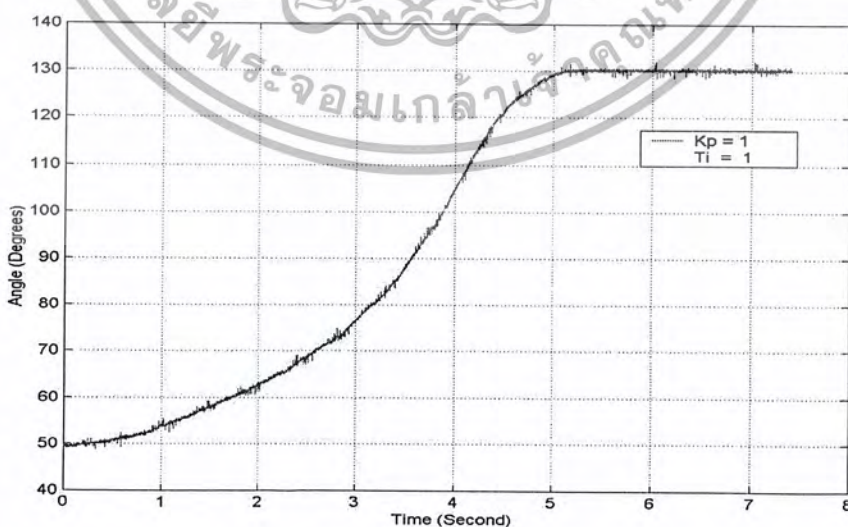
### 3. ผลตอบสนองขาที่ 1 ของหุ่นยนต์เมื่อ $K_c = 1$



รูปที่ 6.4 แสดงผลตอบสนองของขาที่ 1 เมื่อใช้ตัวควบคุมชนิดพี (P- Controller)  $K_c=1$

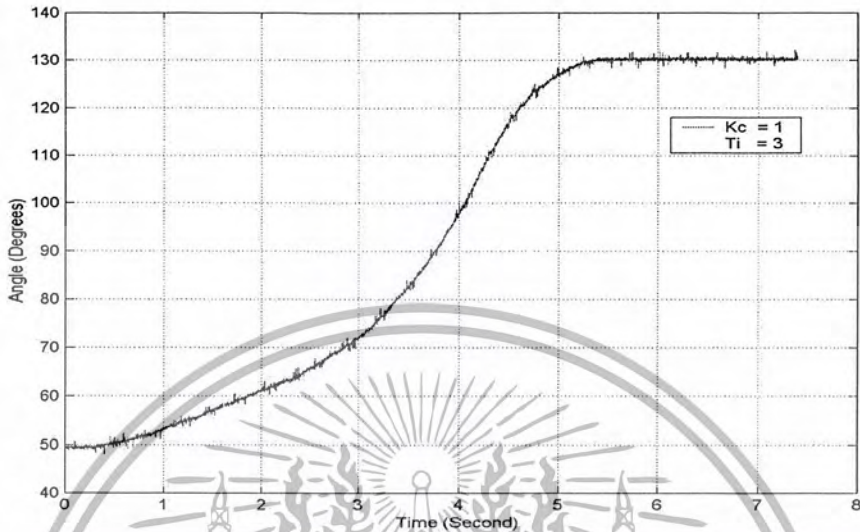
### 6.2 ออกแบบตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของขาหุ่นยนต์จากระบบจริงโดยใช้ตัวควบคุมชนิดพีไอ (PI-Controller) ที่มีการปรับละเอียด

#### 1. ผลตอบสนองขาที่ 1 ของหุ่นยนต์เมื่อ $K_c = 1$ , $T_i = 1$ S (0.016 Min)



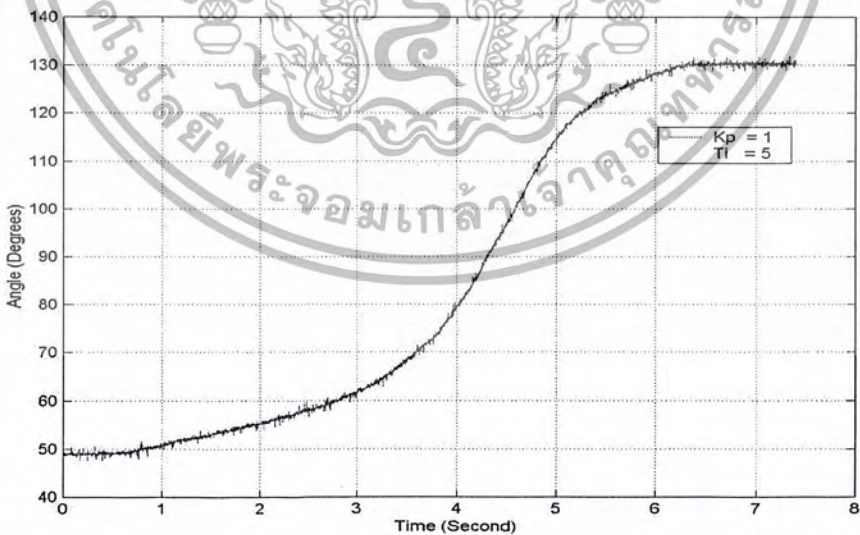
รูปที่ 6.5 แสดงผลตอบสนองของขาที่ 1 เมื่อใช้ตัวควบคุมชนิดพีไอ (PI-Controller)  $K_c = 1$ ,  $T_i = 1$  S

2. ผลตอบสนองของขาที่ 1 ของหุ่นยนต์เมื่อ  $K_c = 1$   $T_i = 3$  S (0.05 Min)



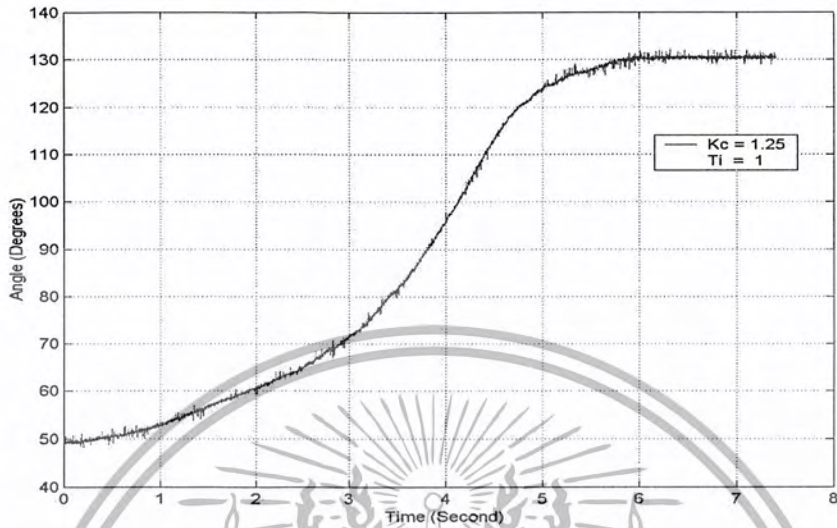
รูปที่ 6.6 แสดงผลตอบสนองของขาที่ 1 เมื่อใช้ตัวควบคุมชนิดพีไอ (PI- Controller)  $K_c = 1$   $T_i = 3$  S

3. ผลตอบสนองของขาที่ 1 ของหุ่นยนต์เมื่อ  $K_c = 1$   $T_i = 5$  S (0.083 Min)



รูปที่ 6.7 แสดงผลตอบสนองของขาที่ 1 เมื่อใช้ตัวควบคุมชนิดพีไอ (PI- Controller)  $K_c = 1$   $T_i = 5$  S

#### 4. ผลตอบสนองของขาที่ 1 ของหุ่นยนต์เมื่อ $K_c = 1.25$ $T_i = 1$ S (0.016 Min)



รูปที่ 6.8 แสดงผลตอบสนองของขาที่ 1 เมื่อใช้ตัวควบคุมชนิดพีไอ (PI- Controller  $K_c = 1.25$   $T_i = 1$  S

### 6.3 สรุปผลการทดลอง

ตัวควบคุมความถี่ของการเคลื่อนที่ของขาหุ่นยนต์จากระบบจริงโดยใช้ตัวควบคุมพีไอ ดังแสดงในรูปที่ 6.1 ถึง รูปที่ 6.3 จะสังเกตเห็นได้ว่าไม่จำเป็นที่จะเพิ่มค่า  $K_c$  มากเท่าใดก็ไม่สามารถที่จะทำการควบคุมการเคลื่อนที่ของขาหุ่นยนต์ ให้เข้ายังจุดเป้าหมาย (Set point) ได้ ดังนั้นในระบบนี้จะไม่นำการควบคุมพีไอมาใช้

ตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของขาหุ่นยนต์จากระบบจริงโดยใช้ตัวควบคุมพีไอ ดังแสดงในรูปที่ 6.4 ถึง รูปที่ 6.7 จะสังเกตเห็นได้ว่า การใช้ตัวควบคุมพีไอ สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของขาหุ่นยนต์ ให้เข้ายังจุดเป้าหมาย (Set point) ได้ ดังนั้นในการควบคุมการเคลื่อนที่ของขาหุ่นยนต์ทุกขา จะใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ

## บทที่ 7

### บทวิจารณ์และบทสรุป

#### 7.1 บทสรุป

การทำโครงการนี้จำเป็นต้องทำการศึกษาความรู้พื้นฐานต่างๆมากมาย ซึ่งสามารถสรุปแบ่งเป็นหัวข้อใหญ่ๆได้ดังนี้ คือ ในส่วนของคุณสมบัติต่างๆของโลหะจำรูป ในส่วนของการออกแบบโครงสร้างของตัวหุ่นยนต์ ในส่วนของโปรแกรมและอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ และ ทฤษฎี และหลักการออกแบบระบบควบคุม อีกทั้งการทำโครงการนี้ก็มีประโยชน์ที่ได้รับด้วยและในทางกลับกันการทำโครงการนี้ต้องมีปัญหาเกิดขึ้นด้วย

#### 7.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการนี้

##### 7.2.1 ในส่วนของคุณสมบัติต่างๆของโลหะจำรูป

จากข้อมูลต่างๆที่ได้รับจากการทดลองในบทที่ 4 นั้นมีประโยชน์อย่างมากในการพิจารณาเลือกใช้งานโลหะจำรูปและเราจะต้องสนใจและระวังในเรื่องใดบ้าง เช่น สามารถทราบได้ว่าที่กระแสไฟฟ้ามากหรือน้อยเท่าไรที่สามารถใช้กับโลหะจำรูปได้ดีและทำให้โลหะจำรูปเสื่อมสภาพและเสียหายได้ช้าที่สุดและทราบว่าช่วงกระแสไฟฟ้าเท่าไรที่สามารถทำให้โลหะจำรูปสามารถยึดตัวด้วยความเป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นรวมทั้งทราบว่าถ้าจ่ายกระแสไฟฟ้าเท่านี้แล้วก็จะทราบเวลาในการหดตัวของ โลหะจำรูป และเรายังทราบว่าโลหะจำรูปที่เราใช้สามารถรับน้ำหนักสูงสุดเท่าไรที่ไม่เกิดความเสียหายให้กับโลหะจำรูป

##### 7.2.2 ในส่วนของการออกแบบโครงสร้างของตัวหุ่นยนต์

ในการออกแบบโครงสร้างของตัวหุ่นยนต์ เราต้องพยายามออกแบบให้ตัวหุ่นยนต์นั้นสามารถใช้โลหะจำรูปให้มีความสมดุลและลงตัวให้มากที่สุด

ซึ่งในส่วนนี้เป็นส่วนที่ยากลำบากมากและใช้เวลาในการออกแบบเป็นระยะเวลาที่นานมากต้องมีการออกแบบหลายรูปแบบเพื่อหาข้อสรุปว่ารูปแบบไหนเหมาะสมที่สุดและเคลื่อนที่ได้ดีที่สุด ซึ่งรูปแบบเห็นได้จาก บทที่ 4

##### 7.2.3 ในส่วนของโปรแกรมและอุปกรณ์คอมพิวเตอร์

ในส่วนของโปรแกรมและอุปกรณ์คอมพิวเตอร์นั้นต้องมีการใช้การ์ด A/D และ D/A เพื่อแปลงสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัล และแปลงสัญญาณดิจิทัลให้เป็นสัญญาณอนาล็อก

ตามลำดับ เพื่อใช้ในการรับค่า และส่งค่า เพื่อใช้ในการคำนวณในโปรแกรมและในส่วนของโปรแกรมนี้ใช้ภาษาซีในการเขียนโปรแกรม

#### 7.2.4 ในทฤษฎีและหลักการออกแบบระบบควบคุม

ในทฤษฎีและหลักการออกแบบระบบควบคุม ต้องมีการหาสมการทางคณิตศาสตร์ของขาหุ่นยนต์แต่ละขามีสมการทางคณิตศาสตร์เป็นอย่างไร เพื่อใช้สมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้ นำมาคูณผลตอบสนองและทำการออกแบบตัวควบคุมของขาหุ่นยนต์แต่ละขา ว่าตัวควบคุมแบบใดมีความเหมาะสมที่สุด ซึ่งจากผลการทดลอง มีการทดลองใช้ ตัวควบคุมแบบพี ตัวควบคุมแบบพีไอ ตัวควบคุมแบบพีไอดี ซึ่งผลการทดลองจากบทที่ 5 ตัวควบคุมแบบพีไอมีความเหมาะสมที่สุดเพราะขาของหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่จุดเป้าหมายตามต้องการและมีการปรับจูนพารามิเตอร์น้อยคือมีแค่ 2 พารามิเตอร์

ในการทดลองบทที่ 6 นำตัวควบคุมพีไอมาควบคุมการเคลื่อนที่ของขาหุ่นยนต์ ซึ่งผลที่ได้คือสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของขาหุ่นยนต์ได้ตามที่ต้องการ

#### 7.3 ปัญหาที่พบในการทำโครงการนี้

- การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ โลหะจำรูปในแต่ละครั้งจะได้ผลการทดลองแตกต่างกันบ้างเล็กน้อย ต้องทดลองหลายๆ ครั้ง
- โลหะจำรูปแต่ละเส้นนั้นยังมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันบ้าง เช่น ถ้าจ่ายกระแสไฟฟ้าให้โลหะจำรูปเส้นจำนวน 2 เส้นในปริมาณขนาดกระแสที่เท่ากันแล้วเวลาที่โลหะจำรูปใช้ในการหดตัวนั้นยังมีค่าไม่เท่ากันเลย เพราะฉะนั้นในการทดลองต้องใช้โลหะจำรูปเพียงเส้นเดียวเท่านั้นในการหาคุณสมบัติทางไฟฟ้า
- โลหะจำรูปมีความร้อนสะสม ซึ่งการใช้งาน โลหะจำรูปให้เคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้ามจะทำได้ยาก ถ้าโลหะจำรูปนั้นยังคลายความร้อนออกมาไม่หมด ทำให้เกิดแรงต่อต้าน
- การออกแบบหุ่นยนต์ทำได้ยาก เพราะการที่จะใช้โลหะจำรูปมาประยุกต์ใช้กับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์นั้นจะต้องออกแบบให้หุ่นยนต์มีขนาดเล็กเพื่อกำจัดปัญหาเรื่องน้ำหนักของตัวหุ่นยนต์ และในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จะค่อนข้างช้าเพราะเนื่องจากคุณสมบัติและข้อจำกัดของโลหะจำรูป
- การหาค่าพารามิเตอร์ โดยใช้วิธีการจำลองทางคอมพิวเตอร์จำเป็นที่จะต้องมีการปรับละเอียดอีกครั้ง เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับกระบวนการ และสามารถนำไปใช้ควบคุมให้การเคลื่อนที่ของขาหุ่นยนต์ทำงานได้ตามความต้องการ และปรับละเอียดเพื่อที่จะได้

ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมนี้ ก็ขึ้นอยู่กับความชำนาญของผู้ออกแบบเอง

#### 7.4 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

การออกแบบหุ่นยนต์ เป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญมาก เพราะส่งผลถึงการควบคุมการเคลื่อนที่และตำแหน่งมุมการเคลื่อนที่ของขาหุ่นยนต์ รวมถึงปัญหาที่เกิดขึ้นจากทางไฟฟ้าและทางฟิสิกส์ ล้วนมีผลมาจากการออกแบบหุ่นยนต์

จากการทดลองนี้เป็นการควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวระนาบ ซึ่งมีปัญหาในเรื่องภาระและแรงเสียดทานเกิดขึ้น จึงเห็นว่าในการออกแบบควรออกแบบให้หุ่นยนต์มีลักษณะที่มีน้ำหนักเบา เพื่อลดปัญหาด้านภาระและแรงเสียดทาน อีกทั้งด้านการระบายความร้อนของโลหะจํารูป ถ้ามีการออกแบบให้ดี จะทำให้ปัญหาความร้อนสะสมลดน้อยลง นั้นส่งผลถึงความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ถ้ามีการระบายความร้อนที่ดี

อาจนำโลหะจํารูปไปประยุกต์ใช้ในงานอย่างอื่น ที่ไม่มีปัญหาเรื่องน้ำหนักเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งอาจจะเป็นการใช้งาน โลหะจํารูปได้เต็มประสิทธิภาพมากกว่า เช่น การควบคุมตำแหน่ง (Position Control )

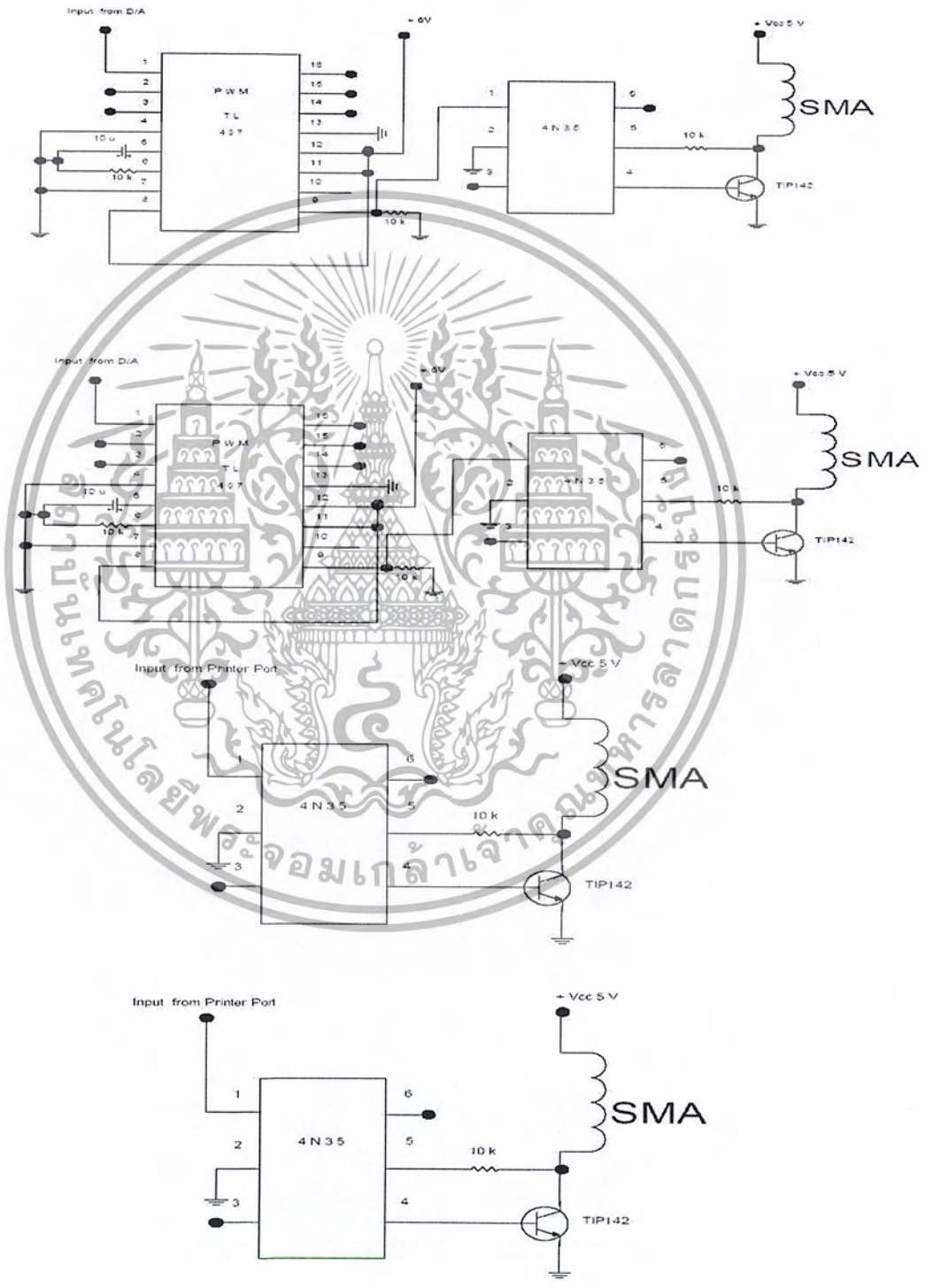
จากการทดลองที่ได้กล่าวนั้น ทำให้เราพบถึงคุณลักษณะทางไฟฟ้า รวมถึงปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างทำการทดลอง จึงควรนำปัญหาเหล่านี้มาหาวิธีแก้ไขและพัฒนา เพื่อที่จะใช้งานโลหะจํารูปได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.  
วงจรที่ใช้ในการทดลอง

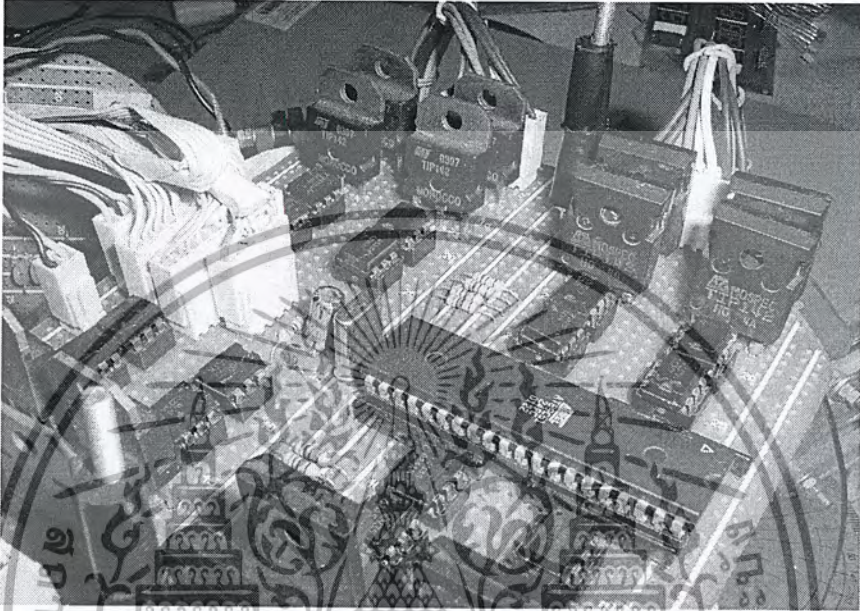


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

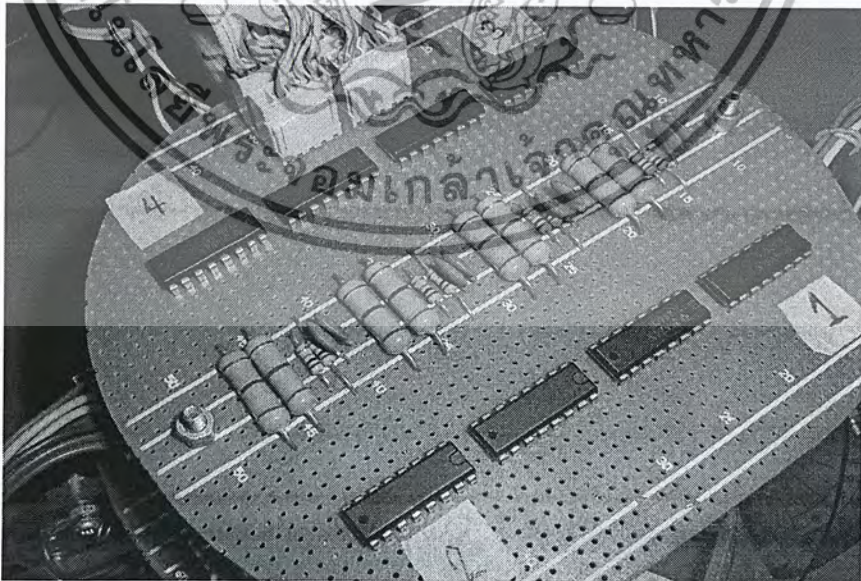
รูปที่ ก1 แสดงวงจรขับเคลื่อนกระแสไฟฟ้าให้กับโลหะจำรูปจำนวน 1 ขา

ภาคผนวก ข

วงจรจริงที่ใช้ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโลหะจำรูปของขาหุ่นยนต์

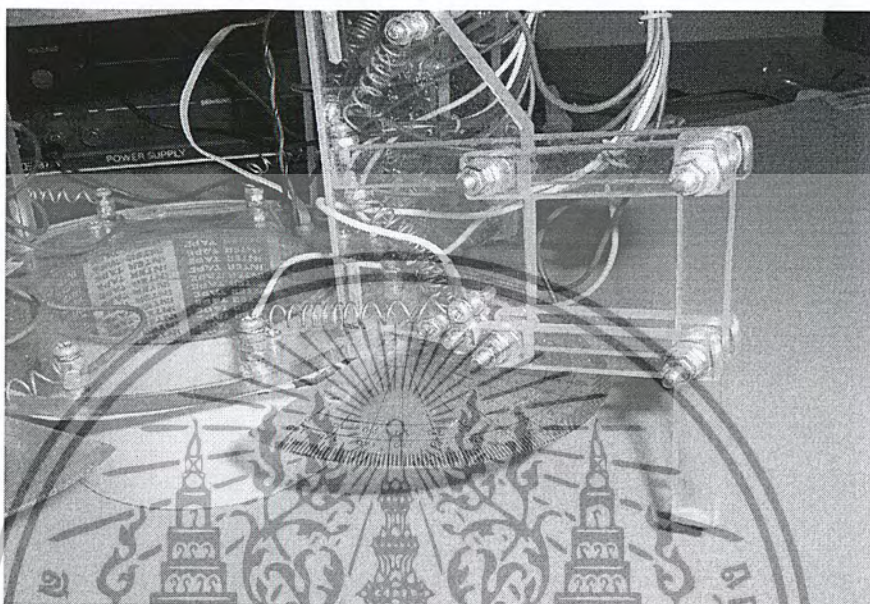


รูปที่ ข1 แสดงวงจรขับเคลื่อนกระแสไฟฟ้าให้กับโลหะจำรูปจำนวน 4 ขา



รูปที่ ข2 แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข3 แสดงการออกแบบขานยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.  
โปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง

โปรแกรม P- Control

```
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <math.h>
#include <bios.h>
#include <dos.h>
#include <time.h>
#define BASE_ADDR 0x378
#define DATA_ADDR BASE_ADDR + 0
#define STATUS_ADDR BASE_ADDR + 1
#define CONTROL_ADDR BASE_ADDR + 2
#define CHAD 0
#define CH0 0
#define CH1 1
#define CH2 2
#define CH3 3
#define CH4 4
#define CH5 5
#define CH6 6
#define CH7 7
#define DAADR 0x0300 /* DA ch.1 I/O adress */
#define ADADR0x0320 /*AD base address */
#define da_deta 0.00244141 /* da_deta=10.0/4096.0 */
#define cls() printf("\x1B[2J")
#define locate(x,y) printf("\x1b[%d;%dH",y+1,x+1)
#define NN 7400 /* Number of collected data */
```

```

#define VCT  0x0b          /* Interrupt vector IR3 */
#define IMR  0x21
#define MASK 0x08        /* Interrupt mask IR3 */

void        DtoA(double volt1);
int         read_status(void);
void        send_control(int com);
int         read_data(void);
double      READCH0(void);
double      status,data;
long        ADC_DATA;
char        s[20];
int         b,i,j,n,nn;
unsigned int dl,dh,vx1,dd1,dd2,dat;
double      vx2,volt,volt1,ref,ref0,ref1,Ts,kp,degree1,degree2,volt2,x1,q;
double      x[NN],u[NN],y[NN],ce[NN];
FILE        *fp_w;
int         inter=0;
float diff_tmp =0.00;

void interrupt far insub(void)
{
    inter=1;
    outp(0x20,0x20);
}

void main(void)
{
    void (interrupt far *savevect)(void);
    Ts=1;
    /* locate(5,1); printf(" Sampling Period in msec (1) = "); gets(s); Ts=atof(s);*/
    /* Initialize Timer with Sampling Frequency = 8Mhz/dd1*dd2 */

```

```

dd1=80; dd2=100;

outp(DAADR+14,0x36);

outp(DAADR+8,dd1 & 0x00ff);

outp(DAADR+8,(dd1 >> 8) & 0x00ff);

outp(DAADR+14,0x74);

outp(DAADR+10,dd2 & 0x00ff);

outp(DAADR+10,(dd2 >> 8) & 0x00ff);

outp(DAADR+6,0x01);

/* Enble and Set Interrupt */
savevect=_dos_getvect(VCT);
_dos_setvect(VCT,insub);
outp((IMR),inp(IMR) & ~MASK);

/*****initial variables*****/
volt1=0.0; n=0; nn=NN;
y[0]=0.0; ee[0]=0.0; volt=0.0;

/*****/
printf("\n - Hit any key to start \n ");getch();
printf("\n - Now your position is %.3lf\n\n",READCH0());
printf(" - Input Position (degree 90 - 130 V) = "); gets(s);
ref=atof(s);
printf("\n Input kp = "); gets(s);
kp=atof(s);
DtoA(3.2);

/***** MAIN ROUTINE *****/

while(n<nn)
{
    if(kbhit() !=0) break;

    if(inter==1)
    {

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

x[n]=READCH0();
ee[n]=ref-x[n];
y[n]=kp*ee[n];
if(y[n]>=3.2)
    y[n]=3.2;
else if(y[n]<=0.0)
    y[n]=0.0;
else
    y[n]=y[n];
    volt=y[n];
    volt1=volt;
    u[n]=volt1;
    DtoA(volt1);
    inter=0;
    n++;
}
}
/* DISABLE AND RESET INTERRUPT */
outp((IMR),inp(IMR) | MASK);
_dos_setvect(VCT,savevect);
outp((IMR),inp(IMR) & ~ MASK);
outp(DAADR+6,0x00);
{
/* printf("\nHit any key to out 0 volt and exit"); getch(); */
/* OUT 0 V. TO DA CH.0*/
outp(DAADR+2,CH0*4+1);
outp(DAADR+0,0xff);
outp(DAADR+1,0x0f);
outp(DAADR+2,CH0*4+3);
outp(DAADR+0,0x00);

```

```

}

{
/* printf("\nHit any key to out 0 volt and exit"); getch(); */
/* OUT 0 V. TO DA CH.1*/
  outp(DAADR+2,CH1*4+1);
  outp(DAADR+0,0xff);
  outp(DAADR+1,0x0f);
  outp(DAADR+2,CH1*4+3);
  outp(DAADR+0,0x00);
}
{
/* printf("\nHit any key to out 0 volt and exit"); getch(); */
/* OUT 0 V. TO DA CH.2*/
  outp(DAADR+2,CH2*4+1);
  outp(DAADR+0,0xff);
  outp(DAADR+1,0x0f);
  outp(DAADR+2,CH2*4+3);
  outp(DAADR+0,0x00);
}
{
/* printf("\nHit any key to out 0 volt and exit"); getch(); */
/* OUT 0 V. TO DA CH.3*/
  outp(DAADR+2,CH3*4+1);
  outp(DAADR+0,0xff);
  outp(DAADR+1,0x0f);
  outp(DAADR+2,CH3*4+3);
  outp(DAADR+0,0x00);
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

/* printf("\nHit any key to out 0 volt and exit"); getch(); */
/* OUT 0 V. TO DA CH.4*/
    outp(DAADR+2,CH4*4+1);
    outp(DAADR+0,0xff);
    outp(DAADR+1,0x0f);
    outp(DAADR+2,CH4*4+3);
    outp(DAADR+0,0x00);
}
{
/* printf("\nHit any key to out 0 volt and exit"); getch(); */
/* OUT 0 V. TO DA CH.5*/
    outp(DAADR+2,CH5*4+1);
    outp(DAADR+0,0xff);
    outp(DAADR+1,0x0f);
    outp(DAADR+2,CH5*4+3);
    outp(DAADR+0,0x00);
}
{
/* printf("\nHit any key to out 0 volt and exit"); getch(); */
/* OUT 0 V. TO DA CH.6*/
    outp(DAADR+2,CH6*4+1);
    outp(DAADR+0,0xff);
    outp(DAADR+1,0x0f);
    outp(DAADR+2,CH6*4+3);
    outp(DAADR+0,0x00);
}
{
/* printf("\nHit any key to out 0 volt and exit"); getch(); */
/* OUT 0 V. TO DA CH.7*/
    outp(DAADR+2,CH7*4+1);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    outp(DAADR+0,0xff);
    outp(DAADR+1,0x0f);

    outp(DAADR+2,CH7*4+3);
    outp(DAADR+0,0x00);
}

/* WRITE DATA TO FILE */
fp_w = fopen("p.txt","w");
n=0;
while(n<nm){ fprintf(fp_w,"%f\n",x[n]);
              n++; }
close(fp_w);
printf("\n Final Position %f (x0.1 degree) = ",x[n-1]);
}
void DtoA(double volt1) /* CH0 D to A */
{
    vx1=volt1/da_deta;
    dl=vx1&0xff;
    dh=(vx1>>8)&0x0f;
    dl=0x95-dl;
    dh=0x0c-dh;

    outp(DAADR+2,CH0*4+1);
    outp(DAADR+0,dl);
    outp(DAADR+1,dh);
    outp(DAADR+2,CH0*4+3);
    outp(DAADR+0,0x00);
}

double READCH0(void) /* A to D Ch1 */
{

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    outp(ADADR+0,CHAD);
        while(!(inp(ADADR+1) & 0x80));

    dat=(inp(ADADR+0)+(inp(ADADR+1) << 8 & 0xff00)) & 0x0fff;
    volt2=dat*da_deta-5;
    degree1=volt2*75.6859;
    degree1=degree1-50.77;
    return degree1;
}

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## โปรแกรม PI- Control

```

#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <math.h>
#include <bios.h>
#include <dos.h>
#include <time.h>
#define BASE_ADDR 0x378
#define DATA_ADDR BASE_ADDR + 0
#define STATUS_ADDR BASE_ADDR + 1
#define CONTROL_ADDR BASE_ADDR + 2
#define CHAD 0
#define CH0 0
#define CH1 1
#define CH2 2
#define CH3 3
#define CH4 4
#define CH5 5
#define CH6 6
#define CH7 7
#define DAADR 0x0300 /* DA ch.1 I/O adress */
#define ADADR0x0320 /*AD base address */
#define da_deta 0.00244141 /* da_deta=10.0/4096.0 */
#define cls() printf("\x1B[2J")
#define locate(x,y) printf("\x1b[%d;%dH",y+1,x+1)
#define NN 7400 /* Number of collected data */
#define VCT 0x0b /* Interrupt vector IR3 */
#define IMR 0x21

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

#define MASK 0x08 /* Interrupt mask IR3 */

void DtoA(double volt1);
int read_status(void);
void send_control(int com);
int read_data(void);
double READCH0(void);
double status,data;
long ADC_DATA;
char s[20];
int b,i,j,n,nn;
unsigned int dl,dh,vx1,dd1,dd2,dat;
double vx2,volt,volt1,ref,ref0,ref1,Ts,ki,kp,degree1,degree2,volt2,x1,q;
double x[NN],u[NN],y[NN],ee[NN];
FILE *fp_w;
int inter=0;
float diff_tmp=0.00;

void interrupt far insub(void)
{
    inter=1;
    outp(0x20,0x20);
}

void main(void)
{
    void (interrupt far *savevect)(void);
    Ts=1;
    /* locate(5,1); printf(" Sampling Period in msec (1) = "); gets(s); Ts=atof(s);*/
    /* Initialize Timer with Sampling Frequency = 8Mhz/dd1*dd2 */
    dd1=80; dd2=100;
    outp(DAADR+14,0x36);

```

```

outp(DAADR+8,dd1 & 0x00ff);
outp(DAADR+8,(dd1 >> 8) & 0x00ff);
outp(DAADR+14,0x74);
outp(DAADR+10,dd2 & 0x00ff);
outp(DAADR+10,(dd2 >> 8) & 0x00ff);
outp(DAADR+6,0x01);

/* Enable and Set Interrupt */
savevect=_dos_getvect(VCT);
_dos_setvect(VCT,insub);
outp((IMR),inp(IMR) & ~ MASK);

/*****initial variables*****/
volt1=0.0;  n=0;  nn=NN;
y[0]=0.0;  ce[0]=0.0;  volt=0.0;
/*****/

printf("\n  - Hit any key to start \n ");getch();
printf("\n  - Now your position is  %.3f\n\n",READCH0());
printf("  - Input Position (degree 90 - 130 V) = "); gets(s);
ref=atof(s);
printf("\n  Input kp = "); gets(s);
kp=atof(s);
printf("\n  Input ki = "); gets(s);
ki=atof(s);
DtoA(3.2);

```

```

/***** MAIN ROUTINE *****/
while(n<nn)
{
    if(kbhit() !=0) break;
    if(inter==1)
    {
        x[n]=READCH0();
        ee[n]=ref-x[n];
        y[n]=ki*ee[n]+kp*(ee[n]-ee[n-1])+y[n-1];
        if(y[n]>=3.2)
            y[n]=3.2;
        else if(y[n]<=-0.0)
            y[n]=0.0;
        else
            y[n]=y[n];
        volt=y[n];
        volt1=volt;
        u[n]=volt1;
        DtoA(volt1);
        inter=0;
        n++;
    }
}

/* DISABLE AND RESET INTERRUPT */
outp((IMR),inp(IMR) | MASK);
_dos_setvect(VCT,savevect);
outp((IMR),inp(IMR) &~ MASK);
outp(DAADR+6,0x00);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{
    /* printf("\nHit any key to out 0 volt and exit"); getch(); */
    /* OUT 0 V. TO DA CH.1*/
    outp(DAADR+2,CH0*4+1);
    outp(DAADR+0,0xff);
    outp(DAADR+1,0x0f);
    outp(DAADR+2,CH0*4+3);
    outp(DAADR+0,0x00);
}
{
    /* printf("\nHit any key to out 0 volt and exit"); getch(); */
    /* OUT 0 V. TO DA CH.1*/
    outp(DAADR+2,CH1*4+1);
    outp(DAADR+0,0xff);
    outp(DAADR+1,0x0f);
    outp(DAADR+2,CH1*4+3);
    outp(DAADR+0,0x00);
}
{
    /* printf("\nHit any key to out 0 volt and exit"); getch(); */
    /* OUT 0 V. TO DA CH.2*/
    outp(DAADR+2,CH2*4+1);
    outp(DAADR+0,0xff);
    outp(DAADR+1,0x0f);
    outp(DAADR+2,CH2*4+3);
    outp(DAADR+0,0x00);
}
{
    /* printf("\nHit any key to out 0 volt and exit"); getch(); */

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

/* OUT 0 V. TO DA CH.3*/
    outp(DAADR+2,CH3*4+1);
    outp(DAADR+0,0xff);
    outp(DAADR+1,0x0f);
    outp(DAADR+2,CH3*4+3);
    outp(DAADR+0,0x00);
}
{
/* printf("\nHit any key to out 0 volt and exit"); getch(); */
/* OUT 0 V. TO DA CH.4*/
    outp(DAADR+2,CH4*4+1);
    outp(DAADR+0,0xff);
    outp(DAADR+1,0x0f);
    outp(DAADR+2,CH4*4+3);
    outp(DAADR+0,0x00);
}
{
/* printf("\nHit any key to out 0 volt and exit"); getch(); */
/* OUT 0 V. TO DA CH.5*/
    outp(DAADR+2,CH5*4+1);
    outp(DAADR+0,0xff);
    outp(DAADR+1,0x0f);
    outp(DAADR+2,CH5*4+3);
    outp(DAADR+0,0x00);
}
{
/* printf("\nHit any key to out 0 volt and exit"); getch(); */
/* OUT 0 V. TO DA CH.6*/
    outp(DAADR+2,CH6*4+1);
    outp(DAADR+0,0xff);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    outp(DAADR+1,0x0f);

    outp(DAADR+2,CH6*4+3);
    outp(DAADR+0,0x00);
}
{
    /* printf("\nHit any key to out 0 volt and exit"); getch(); */
    /* OUT 0 V. TO DA CH.7*/
    outp(DAADR+2,CH7*4+1);
    outp(DAADR+0,0xff);
    outp(DAADR+1,0x0f);
    outp(DAADR+2,CH7*4+3);
    outp(DAADR+0,0x00);
}

    /* WRITE DATA TO FILE */
    fp_w = fopen("p.txt","w");
    n=0;
    while(n<nn){ fprintf(fp_w,"%f\n",x[n]);
                n++; }

    close(fp_w);
    printf("\n    Final Position %f(x0.1 degree)) = ",x[n-1]);
}

```

```

void DtoA(double volt1)    /* CH0 D to A */
{
    vx1=volt1/da_deta;
    dl=vx1&0xff;
    dh=(vx1>>8)&0x0f;
    dl=0x95-dl;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

dh=0x0c-dh;

    outp(DAADR+2,CH0*4+1);
    outp(DAADR+0,dl);
    outp(DAADR+1,dh);
    outp(DAADR+2,CH0*4+3);
    outp(DAADR+0,0x00);
}

double READCH0(void) /* Read data from CH0 */
{
    outp(ADADR+0,CHAD);
    while(!(inp(ADADR+1) & 0x80));
    dat=(inp(ADADR+0)+(inp(ADADR+1) << 8 & 0xff00) & 0x0fff);
    volt2=dat*da_deta-5;
    degree1=volt2*75.6859;
    degree1=degree1-50.77;
    return degree1;
}

```



## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. จงกล งามวิวิทย์ อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูง ที่ได้ให้ความกรุณาแนะนำและคำปรึกษา ตลอดจนให้ความเอาใจใส่ถ่มถึงความก้าวหน้าอย่างสม่ำเสมอ ทำให้ผู้จัดทำมีความกระตือรือร้น และทำงานอย่างเป็นระบบมากขึ้น

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ถาวร เบญจนาสาธุทธิ์ ที่ให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ รวมถึงแนะนำข้อคิดและให้ความกรุณาเพื่ออุปกรณที่จำเป็น จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ คอน อิศรากรที่ให้การดูแลและให้คำปรึกษาที่จำเป็นอย่างต่อเนื่อง รวมถึงการให้ความสนใจถ่มถึงความคืบหน้าอย่างสม่ำเสมอ ตลอดจนสนับสนุนทั้งเรื่องการเงิน และอุปกรณ ทำให้ผู้จัดทำมีกำลังใจในการทำงาน

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม ที่เอื้อเพื่ออุปกรณและเครื่องมือทั้งหมด ตลอดจนสถานที่ รวมทั้งอำนวยความสะดวกจนสามารถทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสิ้น

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ครอบครัว ของผู้จัดทำ ที่ได้ให้ความสนับสนุนให้ โอกาสผู้จัดทำได้เล่าเรียนจนถึงทุกวันนี้ และเป็นกำลังใจแก่ผู้จัดทำตลอดมา อีกทั้งขอขอบคุณเพื่อนๆที่คอยให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจแก่ผู้จัดทำจนทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสิ้นสมบูรณ์

ผู้จัดทำ

นาย ทรงวุฒิ จำเริญพร

นาย นพพล มีสบาย

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. จงกล งามวิวิทย์ อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูง ที่ได้ให้ความกรุณาแนะนำและคำปรึกษา ตลอดจนให้ความสนใจใส่ถามถึงความก้าวหน้าอย่างสม่ำเสมอ ทำให้ผู้จัดทำมีความกระตือรือร้น และทำงานอย่างเป็นระบบมากขึ้น

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ถาวร เบญจนราสุทธิ ที่ได้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ รวมถึงแนะนำข้อคิดและให้ความกรุณาเอื้อเฟื้ออุปการณ์ที่จำเป็น จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ คอน อิศรากรที่ให้การดูแลและให้คำปรึกษาที่จำเป็นอย่างต่อเนื่อง รวมถึงการให้ความสนใจตามถึงความคืบหน้าอย่างสม่ำเสมอ ตลอดจนสนับสนุนทั้งเรื่องการเงินและอุปการณ์ ทำให้ผู้จัดทำมีกำลังใจในการทำงาน

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม ที่เอื้อเฟื้ออุปการณ์และเครื่องมือทั้งหมด ตลอดจนสถานที่ รวมทั้งอำนวยความสะดวกจนสามารถทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสิ้น

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ครอบครัว ของผู้จัดทำ ที่ได้ให้ความสนับสนุนให้ โอกาสผู้จัดทำได้เล่าเรียนจนถึงทุกวันนี้ และเป็นกำลังใจแก่ผู้จัดทำตลอดมา อีกทั้งขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจแก่ผู้จัดทำจนทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสิ้นสมบูรณ์

ผู้จัดทำ

นาย ทรงวุฒิ จำเริญพร

นาย นพพล มีสบาย

### เอกสารอ้างอิง

- [1] รศ.สุเชีร เกียรติสุนทร , “ พื้นฐานวิศวกรรมระบบควบคุมในกระบวนการอุตสาหกรรม ” , พิมพ์ครั้งที่ 1 : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น) , 2539
- [2] ดร.บัญชา รัตนบุญสมบัติ “ โลหะจำรูป ” , :ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC),2543
- [3] รศ.ดร. มนัส สัจจวรศิลป์ , วรรัตน์ กัทธอมรกุล , “คู่มือการใช้MATLAB” พิมพ์ครั้งที่ 2 :2543
- [4] Katsuhiko Ogata , “ Modern Control Engineering ” , 3<sup>rd</sup> ed. : Prentice Hall , Inc.
- [5] Carlos A.Smith , Ph.D.,P.E. University of South Florida , Armando B. Corripio , Ph.D.,P.E. Louisiana State University “ Principles and Practice of Automatic Process Control ” , 2<sup>nd</sup> : 1997

