

การประยุกต์ใช้โลหะจำรูปสำหรับแขนกลขนาดเล็ก
APPLICATION OF SHAPE MEMORY ALLOYS (SMA)
TO MINIATURE MANIPULATOR



เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 50204

วัน,เดือน,ปี 27 เม.ย. 2547

๒.....
๓.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประยุกต์ใช้โลหะจำรูปร่างสำหรับแขนกลขนาดเล็ก
APPLICATION OF SHAPE MEMORY ALLOYS (SMA)
TO MINIATURE MANIPULATOR



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2545

ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การประยุกต์ใช้โลหะจำรูปสำหรับแขนกลขนาดเล็ก
APPLICATION OF SHAPE MEMORY ALLOYS TO MINIATURE MANIPULATOR

ผู้จัดทำ นาย จุมพล วงศ์มาก 43015299
นาย ภาณุพงษ์ นาคประทุม 43015322



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประยุกต์ใช้โลหะจำรูปร่างสำหรับแขนกลขนาดเล็ก
APPLICATION OF SHAPE MEMORY ALLOYS
TO MINIATURE MANIPULATOR

โดย

นาย จุมพล วงศ์มาก 43015299

นาย ภาณุพงษ์ นาคประทุม 43015322

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร. จงกล งามวิวิทย์

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการประยุกต์ใช้งานโลหะจำรูปร่างเป็นตัวขับเคลื่อนเพื่อสร้างระบบควบคุมแขนกล ซึ่งตัวควบคุมที่ใช้ ประกอบด้วยตัวควบคุมแบบมอดตาม ตัวควบคุมแบบมอดนำ และตัวควบคุมแบบมอดตามกับมอดนำต่อขนานกันทั้งสามตัว เนื่องจากระบบควบคุมแขนกลที่นำโลหะจำรูปร่างมาประยุกต์ใช้งานเป็นตัวขับเคลื่อน มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง จึงใช้ตัวควบคุมฟัซซีลอจิกเป็นตัวเลือกสัญญาณควบคุมของแต่ละตัว จากผลการทดลองควบคุมตำแหน่งของระบบควบคุมแขนกลข้อเดียวด้วยตัวควบคุมที่นำเสนอ พบว่า สามารถควบคุมตำแหน่งได้

Abstract

This thesis presents the study and application of shape memory alloy to be an actuator for robot arm systems. This miniature manipulator is very high nonlinearity so three different controllers, consisting of lead, lag and lead-lag compensator are designed and connected in parallel with the fuzzy logic controller to select control signal from each controller. The results show that controller can control the position of robot arm with only small offset without overshoot.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. จงกล งามวิวิทย์ อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูง ที่ได้ให้ความกรุณาแนะนำและคำปรึกษาตลอดจนให้ความเอาใจใส่ถามถึงความก้าวหน้าอย่างสม่ำเสมอ ทำให้ผู้จัดทำมีความกระตือรือร้น และทำงานอย่างเป็นระบบมากขึ้น

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ถาวร เบญจนราษฎร์ ที่ได้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ รวมถึงแนะนำข้อคิดและให้ความกรุณาเอื้อเฟื้ออุปกรณ์ที่จำเป็น จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ สุมิตร พนาอุดมทรัพย์ ที่ได้คำแนะนำ และ ชี้นำให้เข้าใจถึงระบบการทำงานให้ดีขึ้น จนพบแนวทางการปฏิบัติงานที่ดี

ขอขอบพระคุณ พี่ ดอน อิศรากร ที่ให้การดูแลและให้คำปรึกษาที่จำเป็นอย่างต่อเนื่อง รวมถึงการให้ความสนใจถามถึงความก้าวหน้าอย่างสม่ำเสมอ ทำให้ผู้จัดทำกระตือรือร้นอยู่เสมอ

ขอขอบพระคุณ พี่ สุรกิจ เลิศอุดมสุข ที่ให้ความช่วยเหลือ ด้านโปรแกรม และแนวทางทฤษฎีในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ พี่ อาณัติ บุรานนท์ ที่ได้คำปรึกษา ด้านโปรแกรมภาษาซีทำให้แก้ไขปัญหาทางโปรแกรมได้ถูกต้อง

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือทั้งหมดตลอดจนสถานที่ รวมทั้งอำนวยความสะดวกจนสามารถทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสิ้น

ขอขอบพระคุณ โครงการสำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ (ReCCIT) ที่มอบทุนอุดหนุนการจัดทำโครงการ

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ของผู้จัดทำ ที่ได้ให้ความสนับสนุนให้โอกาสผู้จัดทำได้เล่าเรียนจนถึงทุกวันนี้ และเป็นกำลังใจแก่ผู้จัดทำตลอดมา อีกทั้ง ขอขอบคุณเพื่อนๆที่คอยให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจแก่ผู้จัดทำจนทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสิ้นสมบูรณ์

ผู้จัดทำ

นาย จุมพล วงศ์มาก

นาย ภาณุพงษ์ นาคประทุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
กิตติกรรมประกาศ	II
สารบัญ	III
สารบัญภาพ	V
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.2 ขอบเขตของโครงการ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	2
2.1 โลหะจำรูป	2
2.1.1 ชนิดของโลหะจำรูป	2
2.1.2 หลักการทำงานของโลหะจำรูป	2
2.1.3 รูปแบบการจำของโลหะจำรูป	3
2.1.4 คุณสมบัติของโลหะจำรูป	4
2.2 การมอดูเลตความกว้างรูปคลื่นสี่เหลี่ยม	4
2.3 ตัวควบคุมแบบพีซี	5
2.4 การออกแบบตัวควบคุมชนิดสัญญาณไม่ต่อเนื่อง	6
2.4.1 วิธีการแปลงไบลิเนียร์และวิเคราะห์ผลการตอบสนองเชิงความถี่	8
2.4.2 วิธีออกแบบตัวชดเชยแบบมูมตาม	11
2.4.3 วิธีออกแบบตัวชดเชยแบบมูมน้ำ	13
2.4.4 วิธีออกแบบตัวชดเชยแบบมูมตามและมูมน้ำ	18
บทที่ 3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของโลหะจำรูป	20
3.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโลหะจำรูป	20
3.2 การออกแบบแขนกลทดสอบ	26
3.3 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Modeling)	27
บทที่ 4 การออกแบบตัวควบคุม	31
4.1 การออกแบบตัวควบคุมตัวที่ 1	31
4.2 การออกแบบตัวควบคุมตัวที่ 2	32
4.3 การออกแบบตัวควบคุมตัวที่ 3	33
4.4 การทดสอบตัวควบคุมตัวที่ 1 ตัวที่ 2 และตัวที่ 3	34
4.5 การออกแบบตัวควบคุมรวม	37
4.6 การทดลองร่วมกับตัวภาระ	45
บทที่ 5 ผลการทดลองของแขนกลสามข้อต่อ	49
5.1 การออกแบบแขนกลกับสปริง	49
5.2 การออกแบบแขนกลกับโลหะจำรูป 2 ตัว	49
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง	55
6.1 บทสรุป	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
6.2 ปัญหาที่พบในการทดลอง	55
6.3 ข้อเสนอแนะในการพัฒนา	56
เอกสารอ้างอิง	57
ภาคผนวก	58
ภาคผนวก ก. รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้	59
ภาคผนวก ข. วงจรที่ใช้ในการทดลอง	60
ภาคผนวก ค. แผนภูมิลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม	62
ภาคผนวก ง. โปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง	63



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

	หน้า	
รูปที่ 2.1	กลไกการจํารูปของ โลหะจํารูป	3
รูปที่ 2.2	พัลส์ t_1 และคาบเวลา t_2	4
รูปที่ 2.3	แสดงโครงสร้างพื้นฐานของตัวควบคุมพีชซี	5
รูปที่ 2.4	ระบบควบคุมชนิดสัญญาณต่อเนื่อง	6
รูปที่ 2.5	ระบบควบคุมชนิดสัญญาณไม่ต่อเนื่อง	7
รูปที่ 2.6	ระบบควบคุมชนิดสัญญาณต่อเนื่องที่ใช้ในการออกแบบระบบควบคุมชนิดสัญญาณไม่ต่อเนื่อง	8
รูปที่ 2.7	ระบบควบคุมชนิดสัญญาณไม่ต่อเนื่องภายหลังการออกแบบโดยแปลงฟังก์ชันถ่ายโอนของเครื่องควบคุมและกระบวนการเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมชนิดสัญญาณไม่ต่อเนื่อง	8
รูปที่ 2.8	ระบบควบคุมชนิดสัญญาณไม่ต่อเนื่อง	9
รูปที่ 2.9	ผลการตอบสนองเชิงความถี่ของอุปกรณ์ชดเชยแบบมูมตาม	12
รูปที่ 2.10	แผนภูมิโบลแสดงการออกแบบระบบควบคุมโดยใช้อุปกรณ์ชดเชยแบบมูมตาม	12
รูปที่ 2.11	ผลการตอบสนองเชิงความถี่ของอุปกรณ์ชดเชยแบบมูมนํา	14
รูปที่ 2.12	ความสัมพันธ์ระหว่าง ϕ_{\max} กับอัตราส่วน $\sqrt{\frac{\omega_{wp}}{\omega_{wo}}}$ ของอุปกรณ์ชดเชยแบบมูมนํา	16
รูปที่ 2.13	แผนภูมิโบลของอุปกรณ์ควบคุมแบบมูมนํา	16
รูปที่ 2.14	ผลการตอบสนองเชิงความถี่ของอุปกรณ์ชดเชยแบบมูมตามและมูมนํา	19
รูปที่ 3.1	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาเมื่อป้อนไฟฟ้ากระแสตรงให้กับเส้น ลวด นิกเกิล-ไทเทเนียม	24
รูปที่ 3.2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาเมื่อทำให้ลวด นิกเกิล-ไทเทเนียม เย็นลง	25
รูปที่ 3.3	กราฟเปรียบเทียบระหว่างกระแสไฟฟ้า กับ เวลา ของ ลวด โลหะจํารูป 2 เส้น	26
รูปที่ 3.4	แขนกลทดสอบของลวดโลหะจํารูป 2 เส้น	26
รูปที่ 3.5	แบบของแขนกลทดสอบของ ลวด โลหะจํารูป 2 เส้น	27
รูปที่ 3.6	แสดงผลตอบสนองเชิงเวลาต่อสัญญาณระดับขนาด 4 โวลต์	27
รูปที่ 3.7	แสดงค่าผลตอบสนองเชิงเวลาของสัญญาณอินพุตที่เป็นช่วงๆ	28
รูปที่ 3.8	สัญญาณอินพุตเป็นช่วงๆ ที่ป้อนให้แก่ระบบ	28
รูปที่ 3.9	ผลตอบสนองช่วงมูม 75-85 องศา	29
รูปที่ 3.10	ผลตอบสนองช่วงมูม 85-95 องศา	29
รูปที่ 3.11	ผลตอบสนองช่วงมูม 95-105 องศา	30
รูปที่ 4.1	แสดงเส้นทางรากลของระบบกับตัวควบคุมที่ 1	31
รูปที่ 4.2	แสดงผลตอบสนองต่อสัญญาณระดับขนาดหนึ่งหน่วย	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ(ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ 4.3	แสดงเส้นทางรากลของระบบกับตัวควบคุมที่ 2	32
รูปที่ 4.4	แสดงผลตอบสนองต่อสัญญาณระดับขนาดหนึ่งหน่วย	32
รูปที่ 4.5	แสดงเส้นทางรากลของระบบกับตัวควบคุมที่ 3	33
รูปที่ 4.6	แสดงผลตอบสนองต่อสัญญาณระดับขนาดหนึ่งหน่วย	33
รูปที่ 4.7	แสดงผลตอบสนองของตัวควบคุมที่ 1 กับสัญญาณอ้างอิงที่มุม 85 องศา	34
รูปที่ 4.8	แสดงผลตอบสนองของตัวควบคุมที่ 1 กับสัญญาณอ้างอิงที่มุม 95 องศา	35
รูปที่ 4.9	แสดงผลตอบสนองของตัวควบคุมที่ 1 กับสัญญาณอ้างอิงที่มุม 105 องศา	36
รูปที่ 4.10	แสดงโครงสร้างของตัวควบคุม	37
รูปที่ 4.11	แสดงฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุต	38
รูปที่ 4.12	แสดงฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรเอาต์พุต	38
รูปที่ 4.13	แสดงผลตอบสนองระหว่างตัวควบคุมที่ 3(G_{C3}) และตัวควบคุมรวม(G_{CT})	39
รูปที่ 4.14	แสดงผลตอบสนองเชิงเวลาของตัวควบคุมแบบพีซีซีที่จุดอ้างอิงมุม 100 องศา	40
รูปที่ 4.15	สัญญาณควบคุมทางขวา	40
รูปที่ 4.16	สัญญาณควบคุมทางซ้าย	41
รูปที่ 4.17	แสดงผลตอบสนองของจุดอ้างอิงที่มุม 100 องศา	44
รูปที่ 4.18	สัญญาณควบคุมทางขวา	44
รูปที่ 4.19	สัญญาณควบคุมทางซ้าย	45
รูปที่ 4.20	แสดงผลตอบสนองกับจุดอ้างอิงที่มุม 80 องศา	46
รูปที่ 4.21	สัญญาณควบคุมทางขวา	46
รูปที่ 4.22	สัญญาณควบคุมทางซ้าย	47
รูปที่ 4.23	แสดงผลตอบสนองกับจุดอ้างอิงที่มุม 80 องศา	47
รูปที่ 4.24	สัญญาณควบคุมทางขวา	48
รูปที่ 4.25	สัญญาณควบคุมทางซ้าย	48
รูปที่ 5.1	แกนกลแบบใช้โลหะจํารูปกับสปริงต่อ 1 ข้อต่อ	49
รูปที่ 5.2	แกนกลแบบใช้โลหะจํารูป 2 เส้นต่อ 1 ข้อต่อ	49
รูปที่ 5.3	โครงสร้างของแกนกล 3 ข้อต่อ	50
รูปที่ 5.4	แสดงลำดับขั้นการเคลื่อนที่ของแกนกล	51
รูปที่ 5.5	แสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของข้อต่อที่ 1	52
รูปที่ 5.6	แสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของข้อต่อที่ 2	52
รูปที่ 5.7	แสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของข้อต่อที่ 3	52
รูปที่ 5.8	แสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของข้อต่อที่ 1	53
รูปที่ 5.9	แสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของข้อต่อที่ 2	53
รูปที่ 5.10	แสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของข้อต่อที่ 3	54
รูปที่ ก1	อุปกรณ์แปลงสัญญาณอนาลอกเป็น สัญญาณดิจิตอล	58
รูปที่ ข1	วงจรควบคุม	60
รูปที่ ข2	วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์	61
รูปที่ ค1	แผนภูมิลำดับขั้นการทำงานของโปรแกรม	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันได้มีการนำแกนกลมาใช้ในงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่เป็นจำนวนมาก แต่แกนกลขนาดเล็กในอุตสาหกรรมยังไม่ได้รับการพัฒนาเท่าที่ควร ด้วยข้อดีต่างๆของโลหะจำรูป เช่น มีขนาดเล็ก มีความยืดหยุ่นสูง และไม่มีเสียงดังรบกวน ส่งผลให้โลหะจำรูป(Shape Memory Alloys : SMA) ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวขับเคลื่อนในแกนกลขนาดเล็ก ซึ่งจะทำได้สามารถสร้างตัวขับเคลื่อนตัวใหม่ที่ ให้ประโยชน์กับอุตสาหกรรมขนาดเล็กได้

โลหะจำรูปเป็นโลหะผสมที่มีความสามารถในการจำรูปแบบทางกายภาพได้หลายวิธีด้วยกัน กล่าวคือ สามารถจำได้โดยการฝึกหัด(train) หรือ กำหนดอุณหภูมิที่เหมาะสม สามารถนำมาประยุกต์ใช้ด้วยการป้อนกระแสไฟฟ้าเพื่อให้เกิดความร้อน ซึ่งความร้อนนี้เป็นตัวแปรในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโลหะจำรูป ดังนั้นการควบคุมการเคลื่อนที่ของแกนกลสามารถกำหนดได้โดยระดับกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาที่จ่ายให้กับโลหะจำรูป

การประยุกต์ใช้โลหะจำรูป ในแกนกลขนาดเล็ก เป็นการนำโลหะจำรูปซึ่งมีคุณสมบัติความยืดหยุ่นสูงและมีขนาดเล็กมาใช้เป็นตัวขับเคลื่อน(actuator) ให้แก่ข้อต่อของแกนกลขนาดเล็ก

ด้วยเหตุนี้การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโลหะจำรูปจึงมีความสำคัญเพื่อที่จะนำโลหะจำรูปมาประยุกต์ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังเป็นแนวทางในการค้นคว้าสำหรับผู้ที่ต้องการใช้ในการพัฒนาต่อไป

ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโลหะจำรูป การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ โลหะจำรูป และออกแบบตัวควบคุมเพื่อที่จะควบคุมตำแหน่งมุมของแกนกล โดยขั้นตอนเหล่านี้จะกระทำผ่านทางคอมพิวเตอร์เพื่อที่จะสะดวกในการใช้ควบคุมตำแหน่งมุมของแกนกล และการแสดงผล

1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการ

ศึกษาให้เข้าใจถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโลหะจำรูป เพื่อที่นำโลหะจำรูปนั้นมาประยุกต์ทำเป็นตัวขับเคลื่อนที่ข้อต่อของแกนกลได้ โดยออกแบบตัวควบคุมสำหรับควบคุมตำแหน่งมุมของแกนกลผ่านทางคอมพิวเตอร์ เพื่อสามารถควบคุมตำแหน่งมุมของแกนกลจำนวน 1 ข้อต่อ และพัฒนาเป็นการควบคุมตำแหน่งมุมของแกนกล 3 ข้อต่อ

1.2 ขอบเขตของโครงการ

1. ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโลหะจำรูป
2. หาสมการทางคณิตศาสตร์ของโลหะจำรูป
3. ออกแบบตัวควบคุมระบบเพื่อควบคุมตำแหน่งมุมของแกนกล 1 ข้อต่อโดยใช้โลหะจำรูปเป็นตัวขับเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

ในบทนี้จะกล่าวถึงโลหะจำรูป การมอดูเลต(modulation) ตัวควบคุมพีชชี และการออกแบบตัวควบคุมชนิดสัญญาณไม่ต่อเนื่อง

2.1 โลหะจำรูป

เมื่อนำเส้นลวดที่ทำจากโลหะที่มีคุณสมบัติจำรูป ซึ่งเดิมมีลักษณะเป็นเส้นตรงมาดัดให้โค้งงอ แล้วนำเส้นลวดที่งอมาทำให้อุ่นขึ้นโดยการจุ่มน้ำร้อน หรือจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเส้นลวดดังกล่าวพบว่า เส้นลวดจะสามารถกลับคืนรูปร่างซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นตรงได้เหมือนเดิม ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้เรียกว่า ปรากฏการณ์จำรูป (shape memory effect) และโลหะที่มีคุณสมบัตินี้เรียกว่า โลหะจำรูป

2.1.1 ชนิดของโลหะจำรูป

โลหะจำรูปเป็นโลหะผสมซึ่งมีอยู่หลายชนิด เช่น ทอง-แคดเมียม(Au-Cd) ทองแดง-สังกะสี (Cu-Zn) นิกเกิล-ไทเทเนียม(Ni-Ti) และโลหะจำรูปในกลุ่มทองแดง

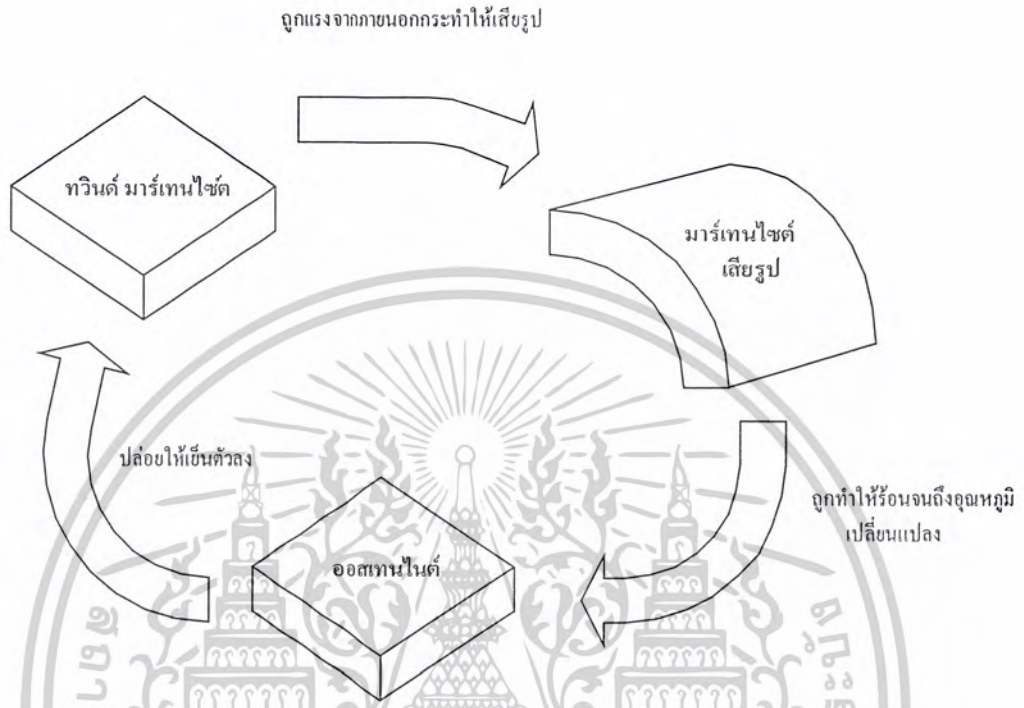
โลหะจำรูปในกลุ่มนิกเกิล-ไทเทเนียม หรือ ไนทินอล (Nitinol) ประกอบด้วยนิกเกิล และไทเทเนียมอย่างละประมาณ 50% โดยจำนวนอะตอม ไนทินอลมีจุดเด่นหลายประการ เช่น ปริมาณความเครียดที่สามารถกลับคืนได้สูงถึง 8% สามารถทนทานต่อการกัดกร่อนสูง และไม่เป็นพิษต่อเนื้อเยื่อของมนุษย์

โลหะจำรูปในกลุ่มทองแดง ได้แก่ Cu-Zn-Al, Cu-Al-Ni และทองแดงผสมซึ่งมีธาตุหลัก 4 อย่าง (quaternary systems) เป็นต้น โลหะจำรูปในกลุ่มนี้มีคุณสมบัติด้อยกว่าไนทินอล คือ ปริมาณความเครียดที่สามารถกลับคืนได้ประมาณ 4-5% และทนทานต่อการกัดกร่อนได้ปานกลาง ส่วนคุณสมบัติที่เหนือกว่าไนทินอล คือ สามารถหลอมเหลวและอัดรีดขึ้นรูปได้ค่อนข้างง่าย มีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง(transformation temperature) อยู่ในช่วงกว้าง อีกทั้งยังมีราคาต่ำกว่าไนทินอล

2.1.2 หลักการทำงานของโลหะจำรูป

การที่โลหะจำรูปสามารถจำรูปร่างเดิมได้เนื่องจากมีโครงสร้างจุลภาคแบบพิเศษที่มีกลไกการจำรูป ดังรูปที่ 2.1

ก่อนการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง โลหะจำรูปมีโครงสร้างจุลภาคแบบ ทวินด์มาร์เทนไซต์ (twinned martensite) (โครงสร้างแบบที่ 1) เมื่อได้รับแรงกระทำโครงสร้างนี้จะเปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างแบบ มาร์เทนไซต์ที่เสียรูป(deformed martensite) (โครงสร้างแบบที่ 2) จากนั้น ถ้าเราทำให้โลหะมีอุณหภูมิสูงขึ้นจนอุณหภูมิถึงค่าหนึ่งเรียกว่า อุณหภูมิเปลี่ยนแปลง โครงสร้างจะเปลี่ยนไปเป็น ออสเทนไนต์ (austenite) (โครงสร้างแบบที่ 3) ซึ่งรูปร่างภายนอกของชิ้นโลหะจะเหมือนกับรูปร่างของชิ้นโลหะก่อนการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง แต่โครงสร้างจุลภาคจะมีรายละเอียดแตกต่างกัน เมื่อปล่อยให้โลหะจำรูปเย็นตัวลงจนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมภายนอก โครงสร้างจุลภาคจะกลับไปเป็นแบบ ทวินด์มาร์เทนไซต์ อีกครั้ง



โลหะจำรูปจะยังคงรักษาความจำไว้ได้ดี ถ้าได้รับความเครียดไม่สูงมากเกินไป ตัวอย่างเช่น ปริมาณความเครียดที่ชิ้นงานที่ทำจากโลหะผสม Ni-Ti ไม่ควรเกิน 6% และ Cu-Zn-Al ไม่ควรเกิน 2% ในระดับความเครียดที่ต่ำกว่านี้ โลหะจำรูปอาจคืนรูปได้นับแสนครั้ง แต่ถ้าระดับความเครียดสูงกว่านี้ โลหะจำรูปอาจคืนรูปได้เพียงไม่กี่ครั้งเท่านั้น

2.1.3 รูปแบบการจำของโลหะจำรูป

การจำของโลหะจำรูป จะมี 2 รูปแบบดังนี้

1. แบบความจำทิศทางเดียว เมื่อนำสปริงซึ่งทำจากโลหะจำรูปมาดึงให้ยืดออก จากนั้นทำให้สปริงนี้ร้อนขึ้น สปริงจะหดกลับคืนรูปร่างเดิม และเมื่อสปริงเย็นตัวลงสปริงก็ยังหดอยู่อย่างเดิม
2. แบบความจำสองทิศทาง เมื่อนำสปริงที่ทำจากโลหะจำรูปซึ่งเดิมหดสั้นที่อุณหภูมิต่ำ มาทำให้สปริงนี้ร้อนขึ้น สปริงก็จะยืดออกโดยอัตโนมัติ และเมื่อสปริงเย็นตัวลงสปริงก็จะหดตัวกลับโดยอัตโนมัติ

โลหะจำรูปแบบความจำสองทิศทาง สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างกลับไปกลับมาใน 2 ลักษณะได้ โดยเพิ่มหรือลดอุณหภูมิเท่านั้น ไม่ต้องใช้แรงบังคับเหมือนโลหะจำรูปแบบทิศทางเดียว

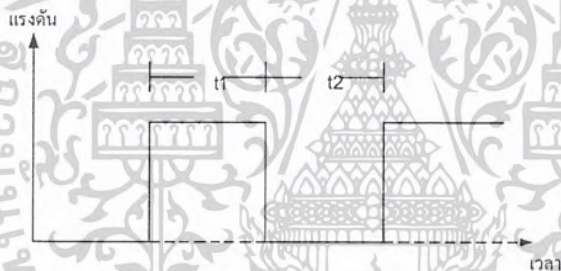
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 คุณสมบัติของโลหะจำรูป

โลหะจำรูปเป็นอุปกรณ์ที่ทำงานโดยอาศัยหลักการขยายตัวของโลหะ ซึ่งในสภาพธรรมชาติของโลหะ เมื่อวัตถุได้รับความร้อนโมเลกุลจะสั่นด้วยความถี่สูงและมีค่าแอมพลิจูด (amplitude) สูง ดังนั้น โมเลกุลจึงกินเนื้อที่กว้างขึ้น วัตถุทั้งชิ้นจะขยายตัว ซึ่งวัตถุแต่ละชนิดนั้นจะมีอัตราการขยายตัวที่ไม่เท่ากัน และเวลาในการตอบสนองต่ออุณหภูมิ (time response) ก็ไม่เท่ากัน ซึ่งในการใช้งานทั่วไปมักจะนำโลหะ 2 ชนิดที่มีค่าสัมประสิทธิ์เพิ่มตามอุณหภูมิ (thermal expansion coefficient) ต่างกันมาประกอบติดกัน เมื่อโลหะทั้งสองชนิดได้รับความร้อนจะทำให้การขยายตัวของเนื้อโลหะแต่ละชนิดไม่เท่ากัน จะทำให้เกิดการโก่งงอขึ้น ซึ่งโลหะจำรูปร่างนั้นทำจากโลหะนิกเกิล และ ไทเทเนียม โดยขึ้นรูปเป็นลักษณะของสปริง แล้วจัดตำแหน่งของโลหะทั้งสองชนิดให้เหมาะสม เพื่อให้ผลลัพธ์ของการขยายตัวของโลหะ มีมากในทิศทางการยืดหดของสปริง

2.2 การมอดูเลตความกว้างรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Pulse Width Modulation Heating)

ในการควบคุมการยืดหดของขดลวดสปริง สามารถใช้การควบคุมความกว้างของพัลส์



รูปที่ 2.2 พัลส์ t_1 และคาบเวลา t_2

สมการในการคำนวณ Duty Cycle ของระบบจ่ายพลังงานเป็น PWM คือ

$$\text{Duty Cycle} = \frac{100}{V_i} \sqrt{P_{avg} * R}$$

$$\text{Duty Cycle} = \frac{100}{I_i} \sqrt{\frac{P_{avg}}{R}}$$

เมื่อ

P_{avg} = กำลังงานเฉลี่ยของพัลส์

I_i = ค่ากระแสของพัลส์

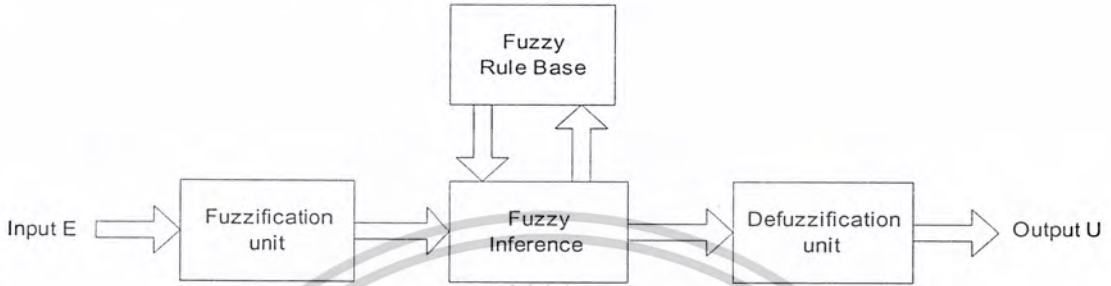
V_i = ค่าแรงดันของพัลส์

R = ความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ตัวควบคุมฟัซซี

โครงสร้างหลักของตัวระบบควบคุม ประกอบด้วย 4 หน่วย คือ หน่วยฟัซซีฟิเคชัน หน่วยอินเฟอร์เรนซ์ หน่วยดีฟัซซีฟิเคชัน และฐานกฎการควบคุมฟัซซี(fuzzy rule base) ดังแสดงในรูปแบบที่ 2.3 การทำงานของแต่ละหน่วยสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.3 แสดง โครงสร้างพื้นฐานของตัวควบคุมฟัซซี

หน่วยฟัซซีฟิเคชัน

หน่วยฟัซซีฟิเคชันทำหน้าที่นำที่นอมอลไลซ์ตัวแปรสถานะของระบบ $x = [x_1, \dots, x_m]^T$ ที่จะใช้เป็นอินพุตของตัวควบคุมให้อยู่ให้อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ที่กำหนด และทำการแปลงตัวแปรอินพุต x ให้เป็นตัวแปรฟัซซี X^k โดยใช้ฟัซซีจิงเกิลตัน ฟัซซีนัมเบอร์ หรือ ไฮบริดนัมเบอร์

ฐานกฎการควบคุมฟัซซี

ฐานกฎการควบคุมฟัซซี เป็นหน่วยที่รวบรวมกฎการควบคุมแบบฟัซซี ซึ่งอยู่ในรูปแบบ IF...THEN....

กำหนดให้ กฎการควบคุมอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\text{IF } x_1 \text{ is } X_1^k \text{ and } \dots \text{ and } x_m \text{ is } X_m^k \text{ THEN } y \text{ is } Y^k$$

หรือ $\text{IF } x \text{ is } X^k \text{ THEN } y \text{ is } Y^k ; k = 1, 2, \dots, M$

โดยที่

x คือ ตัวแปรสถานะของกระบวนการ ซึ่งใช้เป็นอินพุตของตัวควบคุมฟัซซี

$$x = [x_1, \dots, x_m]^T$$

X^k คือ ฟัซซีเซตของตัวแปรอินพุต ในส่วนเหตุของกฎการควบคุม

$$X^k = X_1^k \times \dots \times X_m^k$$

m คือ จำนวนตัวแปรอินพุตของตัวควบคุม

y คือ ตัวแปรเอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซี

Y^k คือ ฟัซซีเซตของตัวแปรเอาต์พุตในส่วนผลของกฎการควบคุมที่ k

M คือ จำนวนกฎการควบคุมทั้งหมดในฐานกฎการควบคุม

หน่วยอินเฟอร์เรนซ์

หน่วยอินเฟอร์เรนซ์ ทำหน้าที่หาค่าเอาต์พุตของระบบฟัซซีจากค่าตัวแปรอินพุตแบบฟัซซี X^k โดยใช้ค่าระดับการเป็นสมาชิก (fire strength) ของแต่ละกฎจากความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

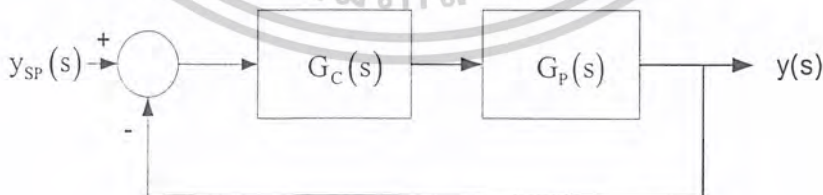
อินพุตแบบพีชชี X^k กับพีชชีเซตในส่วนเหตุของแต่ละกฎ X^k แล้วจึงคำนวณหาค่าเอาต์พุตแบบพีชชีจาก ระดับการเป็นสมาชิกกับพีชชีเซตในส่วนผลของแต่ละกฎ Y^k

หน่วยดีพีชชีพีเคชัน

หน่วยดีพีชชีพีเคชัน ทำหน้าที่แปลงตัวแปรพีชชีเอาต์พุตให้เป็นค่าเชิงเกิตตัน และทำการดีนอมอลไลซ์ให้อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ที่ต้องการ เพื่อใช้เป็นค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมโดยวิธีการดีพีชชีพีเคชัน

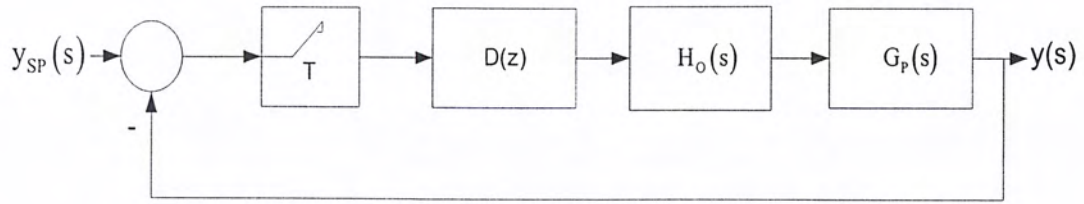
2.4 การออกแบบตัวควบคุมชนิดสัญญาณไม่ต่อเนื่อง

การออกแบบระบบควบคุมชนิดสัญญาณไม่ต่อเนื่อง โดยแปลงฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมชนิดสัญญาณต่อเนื่อง เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมชนิดสัญญาณไม่ต่อเนื่อง สามารถทำได้ โดยพิจารณาระบบควบคุมที่ต้องการออกแบบเป็นระบบควบคุมชนิดสัญญาณต่อเนื่องทั้งระบบและทำการออกแบบเครื่องควบคุมหรืออุปกรณ์ชดเชยชนิดสัญญาณต่อเนื่อง โดยวิธีเส้นทางรากหรือวิธีพิจารณาผลการตอบสนองเชิงความถี่โดยแผนภูมิโพล แล้วจึงแปลงฟังก์ชันถ่ายโอนของเครื่องควบคุมหรืออุปกรณ์ชดเชยชนิดสัญญาณต่อเนื่องที่ได้จากการออกแบบ เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมชนิดสัญญาณไม่ต่อเนื่อง โดยพิจารณาระบบควบคุมชนิดสัญญาณต่อเนื่อง ดังแสดงดังรูปที่ 2.4 การออกแบบระบบควบคุมชนิดสัญญาณไม่ต่อเนื่องโดยแปลงฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมชนิดสัญญาณต่อเนื่อง $G_c(s)$ เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมชนิดสัญญาณไม่ต่อเนื่อง $D(z)$ สามารถทำได้โดยเพิ่มอุปกรณ์สุ่มสัญญาณระหว่างอุปกรณ์รวมสัญญาณกับเครื่องควบคุม และเพิ่มสัญญาณสุ่มและจับสัญญาณ $H(s)$ ระหว่างเครื่องควบคุมกับกระบวนการ $G_p(s)$ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 แต่เนื่องจากอุปกรณ์จับระดับสัญญาณจะทำให้เกิดการหน่วงเวลาระหว่างสัญญาณเข้าและสัญญาณออกของอุปกรณ์จับระดับสัญญาณเกิดขึ้นเสมอ ซึ่งทำให้ระบบควบคุมรวมมีค่ามูตามมากขึ้นและเสถียรภาพลดลง การออกแบบเครื่องควบคุมหรืออุปกรณ์ชดเชยชนิดสัญญาณต่อเนื่องสำหรับระบบควบคุมชนิดสัญญาณไม่ต่อเนื่อง จึงต้องพิจารณาผลการหน่วงเวลาของอุปกรณ์จับระดับสัญญาณด้วยเสมอ



รูปที่ 2.4 ระบบควบคุมชนิดสัญญาณต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ระบบควบคุมชนิดสัญญาณไม่ต่อเนื่อง

ถ้าระบบควบคุมชนิดสัญญาณไม่ต่อเนื่องใช้อุปกรณ์จับระดับสัญญาณอันดับศูนย์ (zero order hold) ซึ่งมีฟังก์ชันถ่ายโอนดังแสดงในสมการคือ

$$H_0(s) = \frac{1 - e^{-Ts}}{s}$$

โดยที่ T คือ คาบเวลาการสุ่ม และกระจายค่า e^{-Ts} โดยใช้อนุกรมไม่รู้จัก

$$e^{-Ts} = \frac{1 - \frac{Ts}{2} + \frac{(Ts)^2}{8} - \dots}{1 + \frac{Ts}{2} + \frac{(Ts)^2}{8} - \dots} \approx \frac{1 - \frac{Ts}{2}}{1 + \frac{Ts}{2}}$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของอุปกรณ์จับระดับสัญญาณอันดับศูนย์สามารถประมาณค่าโดยฟังก์ชันถ่ายโอน

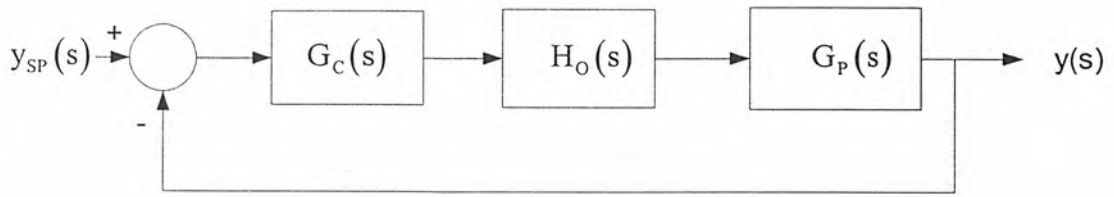
$$\frac{1 - e^{-Ts}}{s} = \frac{1}{s} \left(\frac{1 - \frac{Ts}{2}}{1 + \frac{Ts}{2}} \right)$$

$$\frac{1 - e^{-Ts}}{s} \approx \frac{T}{\frac{T}{2}s + 1}$$

เนื่องจากอัตราขยายรวมของระบบควบคุมสามารถปรับค่าได้ระหว่างการออกแบบระบบควบคุม ฟังก์ชันถ่ายโอนของอุปกรณ์จับระดับสัญญาณที่ใช้ในการพิจารณาออกแบบระบบควบคุมชนิดสัญญาณไม่ต่อเนื่องจึงแสดงโดยฟังก์ชันถ่ายโอนที่อัตราขยายมีค่า 1 ดังสมการ

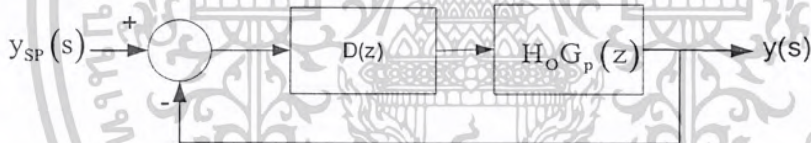
$$H_0(s) = \frac{1}{\frac{T}{2}s + 1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ระบบควบคุมชนิดสัญญาณต่อเนื่องที่ใช้ในการออกแบบระบบควบคุมชนิดสัญญาณไม่ต่อเนื่อง

การออกแบบเครื่องควบคุมหรืออุปกรณ์ชดเชยชนิดสัญญาณต่อเนื่องสำหรับระบบควบคุมชนิดสัญญาณไม่ต่อเนื่อง สามารถทำได้โดยใช้ระบบควบคุมดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนของอุปกรณ์จับระดับสัญญาณร่วมด้วยในการออกแบบ สำหรับรูปที่ 2.7 แสดงระบบควบคุมชนิดสัญญาณไม่ต่อเนื่องที่ได้ภายหลังการเลือกและออกแบบเครื่องควบคุมหรืออุปกรณ์ชดเชยและแปลงฟังก์ชันถ่ายโอนของเครื่องควบคุมและกระบวนการเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมชนิดสัญญาณไม่ต่อเนื่อง เพื่อวิเคราะห์และตรวจสอบเสถียรภาพตลอดจนคุณสมบัติอื่นๆของระบบควบคุมให้สอดคล้องตรงตามวัตถุประสงค์ในการออกแบบระบบควบคุม



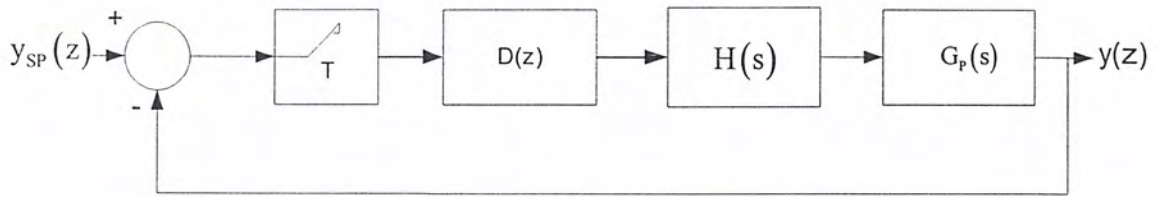
รูปที่ 2.7 ระบบควบคุมชนิดสัญญาณไม่ต่อเนื่องภายหลังการออกแบบ โดยแปลงฟังก์ชันถ่ายโอนของเครื่องควบคุมและกระบวนการเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมชนิดสัญญาณไม่ต่อเนื่อง

2.4.1 วิธีการแปลงไปลิเนียร์และวิเคราะห์ผลการตอบสนองเชิงความถี่

การออกแบบระบบควบคุมชนิดสัญญาณไม่ต่อเนื่องโดยวิธีการแปลงไปลิเนียร์และวิเคราะห์ผลการตอบสนองเชิงความถี่ สามารถทำได้โดยพิจารณาระบบควบคุมชนิดสัญญาณไม่ต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมชนิดสัญญาณไม่ต่อเนื่อง คือ

$$\frac{y(z)}{y_{SP}(z)} = \frac{D(z)HG_p(z)}{1+D(z)HG_p(z)} \quad (1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 ระบบควบคุมชนิดสัญญาณไม่ต่อเนื่อง

สมการคุณลักษณะของระบบควบคุมคือ

$$1 + D(z)HG_p(z) = 0$$

การออกแบบระบบควบคุมชนิดสัญญาณไม่ต่อเนื่องโดยวิธีการแปลงไพลิเนียร์และวิเคราะห์ผลการตอบสนองเชิงความถี่สามารถทำได้โดยการหาฟังก์ชันถ่ายโอนชนิดสัญญาณไม่ต่อเนื่องรวมของอุปกรณ์จับระดับสัญญาณและกระบวนการในรูปของฟังก์ชันการแปลงแซด $HG_p(z)$

$$HG_p(z) = Z[H(s)G_p(s)]$$

แปลงฟังก์ชันถ่ายโอนรวมของอุปกรณ์จับระดับสัญญาณและกระบวนการโดยใช้การแปลงไพลิเนียร์ดังสมการทั้งสองนี้

$$w = \frac{2(z-1)}{T(z+1)} \quad (2)$$

$$z = \frac{\frac{2}{T} + w}{\frac{2}{T} - w} \quad (3)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนรวมของอุปกรณ์จับระดับสัญญาณและกระบวนการสามารถแสดงโดยสมการ

$$HG_p(w) = HG_p(z) \Bigg|_{z = \frac{\frac{2}{T} + w}{\frac{2}{T} - w}} \quad (4)$$

การออกแบบระบบควบคุมโดยใช้อุปกรณ์ซดเซยแบบมูมนำและอุปกรณ์ซดเซยแบบมูมตามสามารถแสดงฟังก์ชันถ่ายโอนชนิดสัญญาณไม่ต่อเนื่องของอุปกรณ์ซดเซย $D(z)$ โดยสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D(z) = K_c \frac{z - z_o}{z - z_p} \quad (5)$$

ผลการตอบสนองเชิงความถี่ของอุปกรณ์ซดเซยสามารถแสดงโดยใช้การแปลงไบลิเนียร์ดังสมการ

$$D(w) = D(z) \left| \begin{array}{l} z = \frac{2+w}{2-w} \end{array} \right.$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของอุปกรณ์ซดเซยสามารถแสดงโดยสมการ

$$D(w) = K_w \frac{1 + \frac{w}{\omega_{wo}}}{1 + \frac{w}{\omega_{wp}}} \quad (6)$$

เมื่อ K_w คืออัตราขยายของอุปกรณ์ซดเซย ω_{wo} และ ω_{wp} คือตำแหน่งซีโรและตำแหน่งโพลในระนาบเชิงซ้อนของอุปกรณ์ซดเซยตามลำดับ โดยความสัมพันธ์ระหว่าง K_c , z_o และ z_p กับ K_w , ω_{wo} และ ω_{wp} สามารถหาในฟังก์ชันถ่ายโอนของอุปกรณ์ซดเซยสมการ (6)

$$D(z) = K_w \frac{1 + \frac{w}{\omega_{wo}}}{1 + \frac{w}{\omega_{wp}}} \left| \begin{array}{l} w = \frac{2(z-1)}{T(z+1)} \end{array} \right.$$

$$D(z) = K_w \frac{\omega_{wp} \left(\omega_{wo} + \frac{2}{T} \right)}{\omega_{wo} \left(\omega_{wp} + \frac{2}{T} \right)} \left[\frac{\frac{2}{T} - \omega_{wo}}{z - \frac{2}{T} - \omega_{wo}} \frac{\frac{2}{T} + \omega_{wo}}{\frac{2}{T} - \omega_{wp}} \frac{\frac{2}{T} - \omega_{wp}}{z - \frac{2}{T} - \omega_{wp}} \frac{\frac{2}{T} + \omega_{wp}}{\frac{2}{T} + \omega_{wp}} \right] \quad (7)$$

เทียบสัมประสิทธิ์สมการ (5) กับ สมการ(7)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_c = K_w \frac{\omega_{wp} \left(\omega_{wo} + \frac{2}{T} \right)}{\omega_{wo} \left(\omega_{wp} + \frac{2}{T} \right)}$$

$$z_o = \frac{\frac{2}{T} - \omega_{wo}}{\frac{2}{T} + \omega_{wo}}$$

$$z_o = \frac{\frac{2}{T} - \omega_{wp}}{\frac{2}{T} + \omega_{wp}} \quad (8)$$

คุณสมบัติของอุปกรณ์ชดเชยตามสมการ(6) สามารถกำหนดโดยตำแหน่งซีโรว์ ω_{wo} และตำแหน่งโพล ω_{wp} และของอุปกรณ์ชดเชยดังนี้

1. ถ้า ω_{wo} น้อยกว่า ω_{wp} อุปกรณ์ชดเชยจะมีคุณสมบัติเป็นอุปกรณ์ชดเชยแบบมูมนำ
2. ถ้า ω_{wo} น้อยกว่า ω_{wp} อุปกรณ์ชดเชยจะมีคุณสมบัติเป็นอุปกรณ์ชดเชยแบบมูมตาม

2.4.2 วิธีออกแบบตัวชดเชยแบบมูมตาม

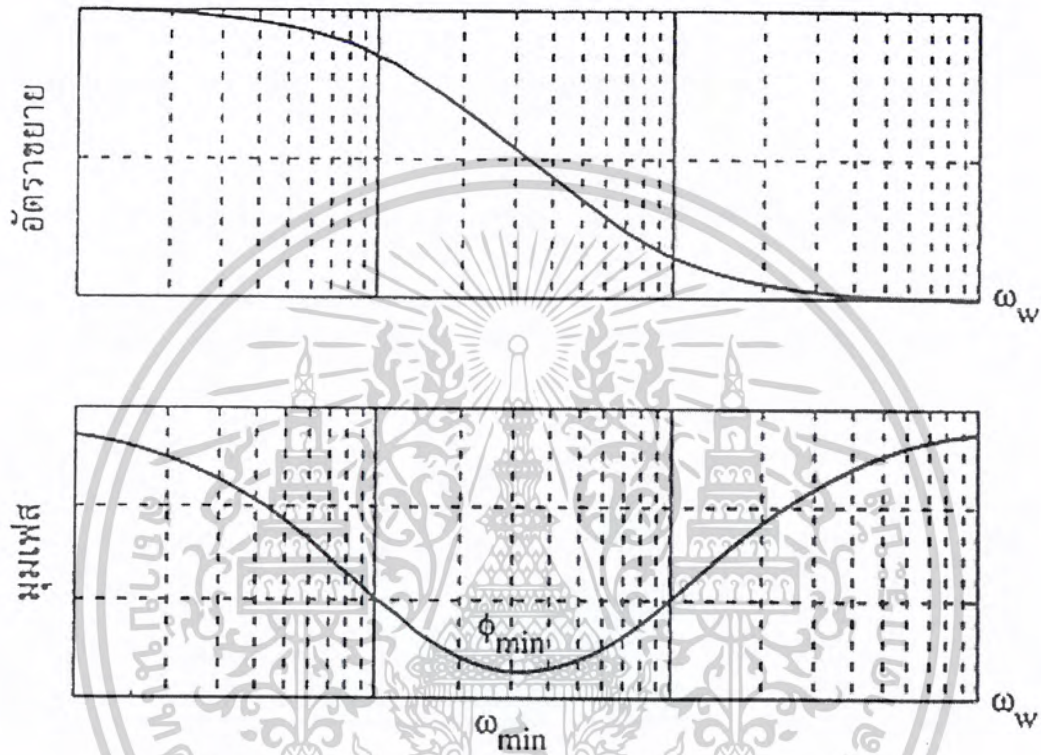
อุปกรณ์ชดเชยแบบมูมตามสามารถช่วยลดอัตราขยายในย่านความถี่สูง ทำให้ระบบควบคุมมีความนุ่มนวลที่สุดท้ายและอัตราขยายสุดท้ายเพิ่มขึ้น และผลการตอบสนองสุดท้ายของระบบควบคุมดีขึ้นโดยไม่เปลี่ยนแปลงลักษณะการตอบสนองช่วงของระบบควบคุม ฟังก์ชันถ่ายโอนของอุปกรณ์ชดเชยแบบมูมตาม $D(w)$ ดังแสดงในสมการที่ (6) มีค่า ω_{wo} มากกว่า ω_{wp} ผลการตอบสนองเชิงความถี่สามารถแสดงโดยแผนภูมิโบริดรูปที่ 2.9 มุมเฟสของอุปกรณ์ชดเชยจะมีค่าน้อยกว่า 0 ระหว่าง 0 ถึง $-\pi/2$ หรือ -90° อัตราขยายของอุปกรณ์ชดเชยในย่านความถี่ต่ำมีค่า K_w เมื่อความถี่สูงขึ้นอัตราขยายของอุปกรณ์ชดเชยจะมีค่าลดลงและสามารถแสดงโดยสมการ

$$\lim_{\omega_w \rightarrow \infty} |D(j\omega_w)| = 20 \log K_w \frac{\omega_{wp}}{\omega_{wo}}$$

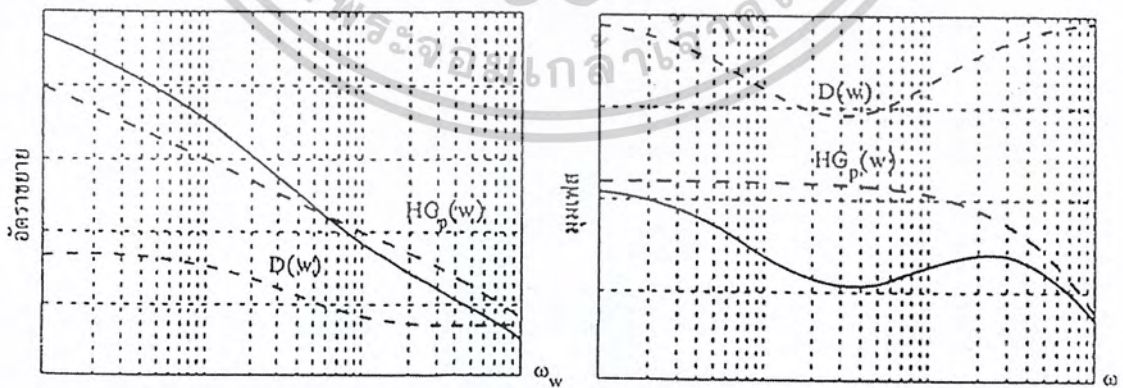
เนื่องจากอุปกรณ์ชดเชยทำให้เกิดมูมตามซึ่งทำให้เสถียรภาพของระบบควบคุมน้อยลง การออกแบบระบบควบคุมโดยใช้อุปกรณ์ชดเชยแบบมูมตามต้องพิจารณาไม่ให้ความถี่หักเห ω_{wp} และ ω_{wo} มีตำแหน่งใกล้เคียงกับความถี่ที่มุมเฟสของกระบวนการเดิมผ่านจุดเสถียรภาพและมีค่า $-\pi$ หรือ -180° โดยความถี่ ω_{wp} และ ω_{wo} มีค่าน้อยกว่าความถี่ที่มุมเฟสของกระบวนการผ่านจุดเสถียรภาพ โดยผลการตอบสนองเชิงความถี่ของอุปกรณ์จับระดับสัญญาณ และระบบสามารถหาได้จากสมการ(7)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$HG_p(w) = HG_p(z) \left| \begin{matrix} z = \frac{2}{T} + w \\ \frac{2}{T} - w \end{matrix} \right.$$



รูปที่ 2.9 ผลการตอบสนองเชิงความถี่ของอุปกรณ์ซัดเซยแบบมมตาม



รูปที่ 2.10 แผนภูมิโบดแสดงการออกแบบระบบควบคุมโดยใช้อุปกรณ์ซัดเซยแบบมมตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ชดเชยแบบมูตามช่วยให้ระบบควบคุมมีค่ามุมเฟสสุดท้ายและอัตราขยายสุดท้ายเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ทำให้ระบบควบคุมมีเสถียรภาพดีขึ้น การออกแบบระบบควบคุมชนิดสัญญาณไม่ต่อเนื่องโดยใช้อุปกรณ์ชดเชยแบบมูตาม มีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดคุณสมบัติของระบบควบคุมโดยมุมเฟสสุดท้าย ϕ และอัตราขยายสุดท้ายของระบบควบคุม
2. กำหนดตำแหน่งความถี่ ω_{w1} ที่ทำให้ระบบควบคุมแบบมูตามมีมุมเฟสสุดท้าย ϕ โดยมุมเฟสของกระบวนการและอุปกรณ์จับสัญญาณ $\angle HG_p(j\omega_{w1})$ มีค่า $-180^\circ + \phi + 5^\circ$
3. กำหนดตำแหน่งความถี่ ω_{w0} ของอุปกรณ์ชดเชยแบบมูตามให้น้อยกว่า ω_{w1} ประมาณ 10 เท่า

$$\omega_{w0} = 0.1 \omega_{w1} \quad (9)$$

4. กำหนดความถี่ ω_{wp} ของอุปกรณ์ชดเชยแบบมูตามให้ความถี่ ω_{w1} มีอัตราขยายรวมของระบบควบคุมวงเปิด $D(z)HG_p(z)$ มีค่า 1

$$|D(j\omega_{w1})HG_p(j\omega_{w1})| = 1 \quad (10)$$

แทนค่าสมการ(8) ในสมการ (9)

$$\omega_{wp} = \frac{0.1\omega_{wp}}{K_w |HG_p(j\omega_{w1})|}$$

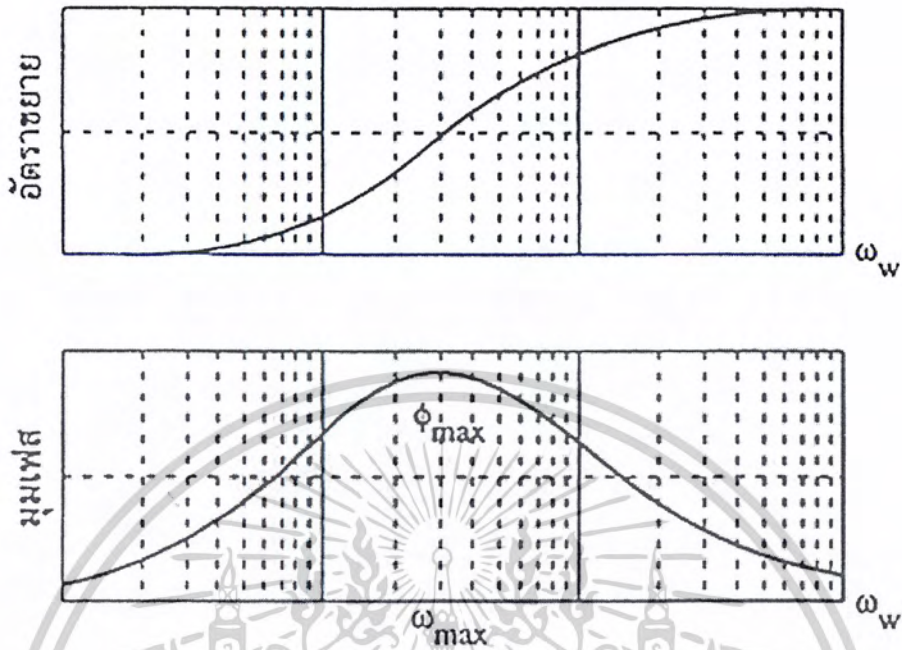
5. ฟังก์ชันถ่ายโอนของอุปกรณ์ชดเชยแบบมูตาม สามารถแสดงโดยสมการ(7)

$$D(z) = K_w \frac{\omega_{wp}(\omega_{wo} + \frac{2}{T})}{\omega_{wo}(\omega_{wp} + \frac{2}{T})} \left[\begin{array}{c} \frac{2}{T} - \omega_{wo} \\ z - \frac{2}{T} + \omega_{wo} \\ \frac{2}{T} + \omega_{wo} \\ \frac{2}{T} - \omega_{wp} \\ z - \frac{2}{T} + \omega_{wp} \end{array} \right]$$

2.4.3 วิธีออกแบบตัวชดเชยแบบมูตามนำ

อุปกรณ์ชดเชยแบบมูตามนำช่วยปรับปรุงเสถียรภาพและแก้ไขคุณสมบัติของระบบควบคุมให้ดีขึ้น ฟังก์ชันถ่ายโอนของอุปกรณ์ชดเชยแบบมูตามนำ $D(w)$ ตามสมการ(4) มีค่า ω_{wo} น้อยกว่า ω_{wp} ผลการตอบสนองเชิงความถี่ของอุปกรณ์ชดเชยแบบมูตามนำแสดงโดยแผนภูมิโบริด รูปที่ 2.11 มุมเฟสของอุปกรณ์ชดเชยแบบมูตามนำ ϕ จะมีค่ามากกว่า 0 และมีค่ามุมเฟสมากที่สุด ϕ_{max} ที่ตำแหน่งความถี่ ω_{max} มีค่าเป็นตัวกลางเรขาคณิตระหว่างความถี่ ω_{wo} กับ ω_{wp}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 ผลการตอบสนองเชิงความถี่ของอุปกรณ์ชดเชยแบบม้วนนำ

$$\omega_{\max} = \sqrt{\omega_{wo} \omega_{wp}} \quad (11)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเฟสสูงสุด ϕ_{\max} กับค่าอัตราส่วน $\omega_{wp} / \omega_{wo}$ สามารถหาค่าได้โดยแทนค่า $w = j\omega_w$ ในสมการ(6)

$$D(j\omega_w) = K_w \frac{1 + j \frac{\omega_w}{\omega_{wo}}}{1 + j \frac{\omega_w}{\omega_{wp}}} \quad (12)$$

ความสัมพันธ์ทางตรีโกณมิติ

$$\tan(\alpha + \beta) = \frac{\tan \alpha - \tan \beta}{1 + \tan \alpha \tan \beta} \quad (13)$$

แทนค่า $\phi = \alpha + \beta$, $\tan \alpha = \frac{\omega_w}{\omega_{wo}}$ และ $\tan \beta = \frac{\omega_w}{\omega_{wp}}$ ในสมการ (13)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tan \phi = \frac{\frac{\omega_w}{\omega_{wo}} - \frac{\omega_w}{\omega_{wp}}}{1 + \frac{\omega_w^2}{\omega_{wo}\omega_{wp}}} \quad (14)$$

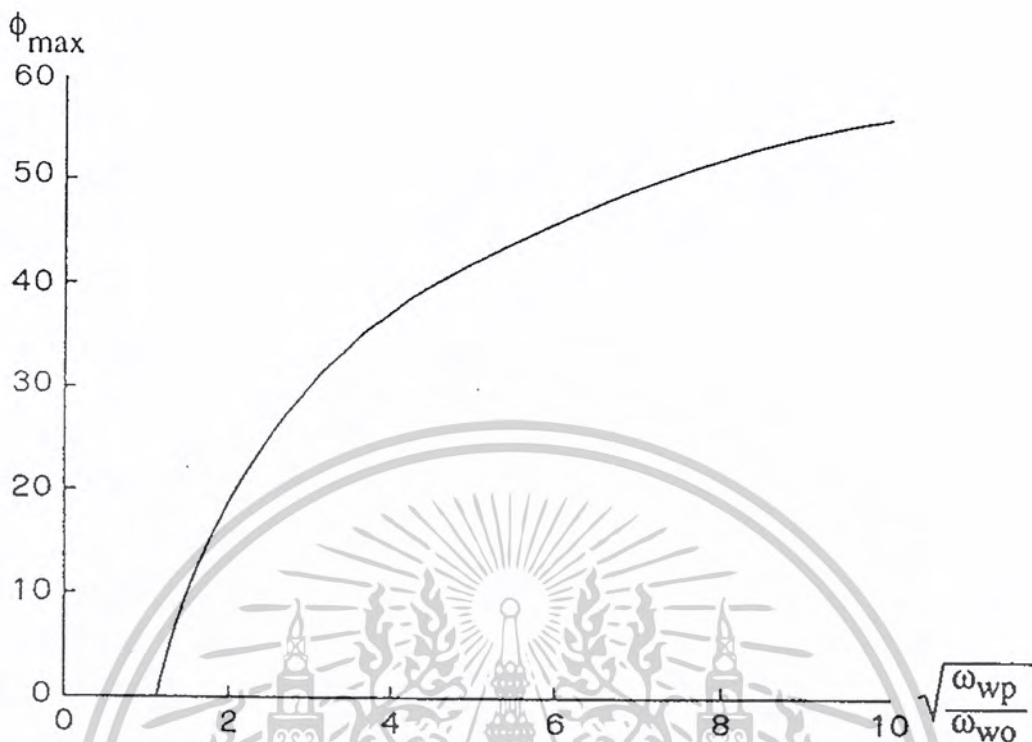
แทนค่า $\omega_{\max} = \sqrt{\omega_{wo}\omega_{wp}}$ จากสมการ 2.51 ในสมการ (14)

$$\tan \phi_{\max} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{\frac{\omega_{wp}}{\omega_{wo}}} - \sqrt{\frac{\omega_{wo}}{\omega_{wp}}} \right] \quad (15)$$

สมการ (15) แสดงว่ามุมเฟสสุด ϕ_{\max} ของอุปกรณ์ซัดเซยแบบมูนนำเปลี่ยนแปลงตามค่าอัตราส่วน ω_{wp}/ω_{wo} ดังแสดงในรูปที่ 2.12 อัตราขยายของอุปกรณ์ซัดเซยแบบมูนนำสามารถแสดงโดยสมการ

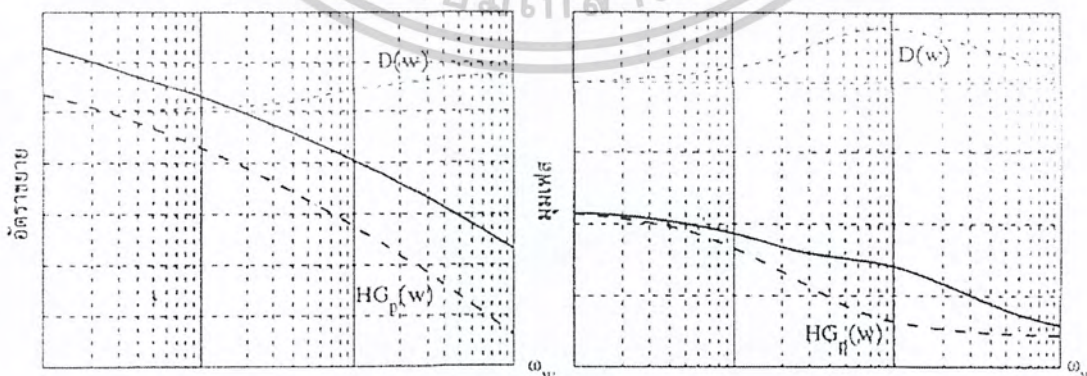
$$\begin{aligned} |D(j\omega_{w_{\max}})| &= K_w \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_w}{\omega_{wo}}\right)^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_w}{\omega_{wp}}\right)^2}} \\ |D(j\omega_{w_{\max}})| &= K_w \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_{wp}}{\omega_{wo}}\right)^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_{wo}}{\omega_{wp}}\right)^2}} \\ |D(j\omega_{w_{\max}})| &= K_w \sqrt{\frac{\omega_{wp}}{\omega_{wo}}} \end{aligned} \quad (16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง ϕ_{max} กับอัตราส่วน $\sqrt{\frac{\omega_{wp}}{\omega_{wo}}}$ ของอุปกรณ์ชดเชยแบบม้วนนำ

เนื่องจากมุมเฟสของอุปกรณ์ชดเชยแบบม้วนนำ มีค่ามากกว่า 0 จึงช่วยลดค่ามุมตามของระบบควบคุมและทำให้ระบบควบคุมมีเสถียรภาพดีขึ้น มุมตามหรือมุมเฟสมีค่าน้อยกว่า 0 เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ระบบควบคุมไม่มีเสถียรภาพ ผลการตอบสนองเชิงความถี่ของระบบควบคุมแบบม้วนนำดังแสดงโดยแผนภูมิโบดรูปที่ 2.13 แสดงว่าอุปกรณ์ชดเชยแบบม้วนนำทำให้อัตราขยายในย่านความถี่สูงของระบบควบคุมมีค่าเพิ่มขึ้น ลักษณะรอบกวนในย่านความถี่สูงจึงมีโอกาสทำให้ระบบควบคุมแบบม้วนนำจะขาดเสถียรภาพได้



รูปที่ 2.13 แผนภูมิโบดของอุปกรณ์ควบคุมแบบม้วนนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบระบบควบคุมโดยใช้อุปกรณซ์ชดเชยแบบมูมนำ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 สามารถทำได้ โดยพิจารณาสมการคุณลักษณะของระบบควบคุมชนิดสัญญาณไม่ต่อเนื่อง

$$1 + D(z)HG_p(z) = 0$$

การออกแบบระบบควบคุมต้องการให้ระบบควบคุมมีมุมเฟสสุดท้าย ϕ และความถี่อัตรายายผ่านจุดเสถียรภาพของระบบควบคุมคือ ω_{w1}

$$D(j\omega_{w1})HG_p(j\omega_{w1}) = |1| \angle (\pi + \phi) \quad (17)$$

อัตรายายของอุปกรณซ์ชดเชยแบบมูมนำคือ

$$|D(j\omega_{w1})| = \frac{1}{|HG_p(j\omega_{w1})|} \quad (18)$$

มุมเฟสของอุปกรณซ์ชดเชยแบบมูมนำคือ

$$\angle D(j\omega_{w1}) = (\pi + \phi) - \angle HG_p(j\omega_{w1}) \quad (19)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของอุปกรณซ์ชดเชยแบบมูมนำตามสมการ (2.47)

$$D(w) = K_w \frac{1 + \frac{w}{\omega_{wo}}}{1 + \frac{w}{\omega_{wp}}} \quad (20)$$

$$D(w) = \frac{K_w + K_w \frac{w}{\omega_{wo}}}{1 + \frac{w}{\omega_{wp}}} \quad (21)$$

แทนค่า $a_0 = K_w$, $a_1 = \frac{K_w}{\omega_{wo}}$ และ $b_1 = \frac{1}{\omega_{wp}}$

$$D(w) = \frac{a_0 + a_1 w}{1 + b_1 w} \quad (22)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ a_0 , a_1 และ b_1 สามารถหาได้จากสมการ (6) สมการ (7) และสมการ (8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$a_o = K_w$$

$$a_1 = \frac{1 - a_o |HG_p(j\omega_{w1})| \cos \theta}{\omega_{w1} |HG_p(j\omega_{w1})| \sin \theta}$$

$$b_1 = \frac{\cos \theta - a_o |HG_p(j\omega_{w1})|}{\omega_{w1} \sin \theta} \quad (23)$$

เมื่อ θ คือ มุมเฟสของตัวชดเชยแบบมูมนำ $\angle D(j\omega_{w1})$ การออกแบบระบบควบคุมแบบมูมนำสามารถทำได้โดยพิจารณาเลือกตำแหน่งความถี่ ω_{w1} จากผลการตอบสนองเชิงความถี่ของกระบวนการและอุปกรณ์จับระดับสัญญาณให้สอดคล้องตามเงื่อนไขดังนี้

1. มุมเฟสของอุปกรณ์ชดเชยแบบมูมนำมีค่ามากกว่า 0 เสมอ เมื่อพิจารณาสมการ (19)

$$\angle HG_p(j\omega_{w1}) < -\pi + \phi$$

2. อัตราขยายเชิงความถี่ของอุปกรณ์ชดเชยแบบมูมนำที่ตำแหน่งความถี่ ω_{w1} มีค่ามากกว่าอัตราขยาย K_w เมื่อพิจารณาสมการ (18)

$$|HG_p(j\omega_{w1})| < \frac{1}{K_w}$$

3. สัมประสิทธิ์ b_1 มีค่ามากกว่า 0 เสมอเมื่อพิจารณาสมการ

$$\cos \theta > K_w |HG_p(j\omega_{w1})|$$

2.4.4 วิธีออกแบบตัวชดเชยแบบมูมตามและมูมนำ

การออกแบบระบบควบคุมโดยใช้อุปกรณ์ชดเชยแบบมูมตามและอุปกรณ์ชดเชยแบบมูมนำอย่างใดอย่างหนึ่งนำเพียงอย่างเดียว บางครั้งอาจไม่เพียงพอสำหรับระบบควบคุมบางระบบเนื่องจากคุณสมบัติของอุปกรณ์ชดเชยแบบมูมตาม และอุปกรณ์ชดเชยแบบมูมนำประกอบด้วยข้อดีและข้อเสียต่างกันดังนี้

อุปกรณ์ชดเชยแบบมูมตาม

ข้อดี

1. เพิ่มอัตราขยายในย่านความถี่ต่ำ
2. ปรับปรุงเสถียรภาพให้ระบบควบคุม
3. กำจัดสัญญาณรบกวนย่านความถี่สูง

ข้อเสีย

1. ลดอัตราขยายในย่านความถี่สูง
2. ลดความเร็วในการตอบสนองของระบบควบคุม
- 3.

อุปกรณ์ชดเชยแบบมูมนำ

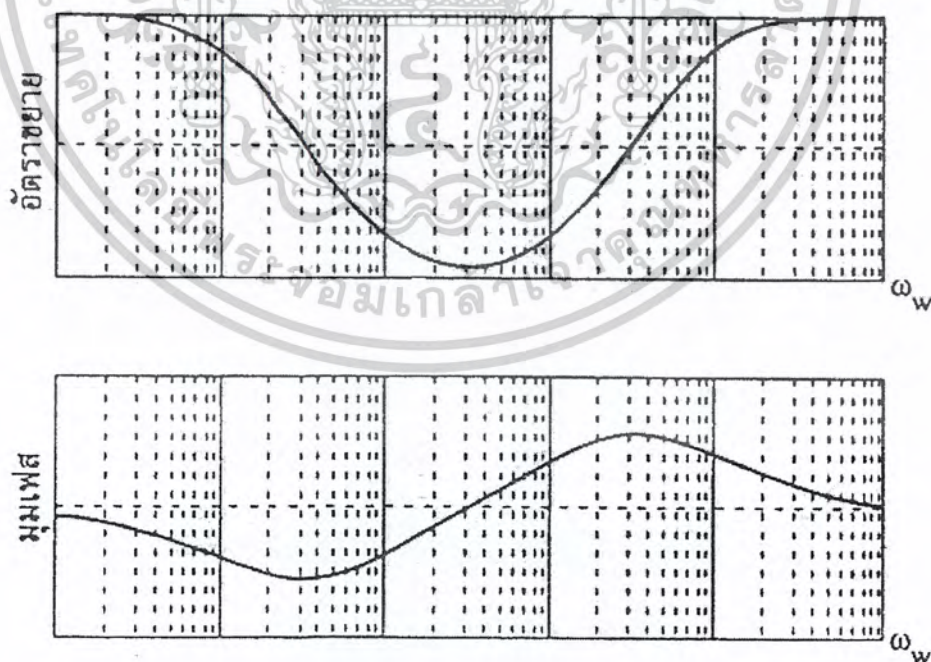
ข้อดี

1. เพิ่มอัตราขยายในย่านความถี่สูง
2. ปรับปรุงเสถียรภาพให้ระบบควบคุม

ข้อเสีย

1. สัญญาณความถี่สูงรบกวนระบบควบคุมได้ง่าย
2. เพิ่มความไม่เป็นเชิงเส้นให้ระบบควบคุม

อุปกรณ์ชดเชยแบบมูมตามและมูมนำจะใช้เมื่อต้องการคุณสมบัติที่ดีของอุปกรณ์ชดเชยทั้งสองแบบร่วมกัน ผลการตอบสนองเชิงความถี่ของอุปกรณ์ชดเชยแบบมูมตามและมูมนำรูปที่ 2.14 แสดงว่าอุปกรณ์ชดเชยแบบมูมตามและมูมนำช่วยให้เสถียรภาพของระบบควบคุมดีขึ้นและเพิ่มอัตราขยายของอุปกรณ์ควบคุมตลอดทุกย่านความถี่



รูปที่ 2.14 ผลการตอบสนองเชิงความถี่ของอุปกรณ์ชดเชยแบบมูมตามและมูมนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของโลหะจำรูป

ในบทนี้จะศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโลหะจำรูป ประกอบด้วยความสัมพันธ์ของตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิ กระแสไฟฟ้า เวลาที่ใช้ในการคืนรูป รวมทั้งความสามารถในการคงตัวเมื่อมีแรงกระทำ จากนั้นนำผลทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ความสามารถ และขีดจำกัดของโลหะจำรูป รวมทั้งใช้ในการออกแบบวงจรควบคุมและวงจรจับกระแส

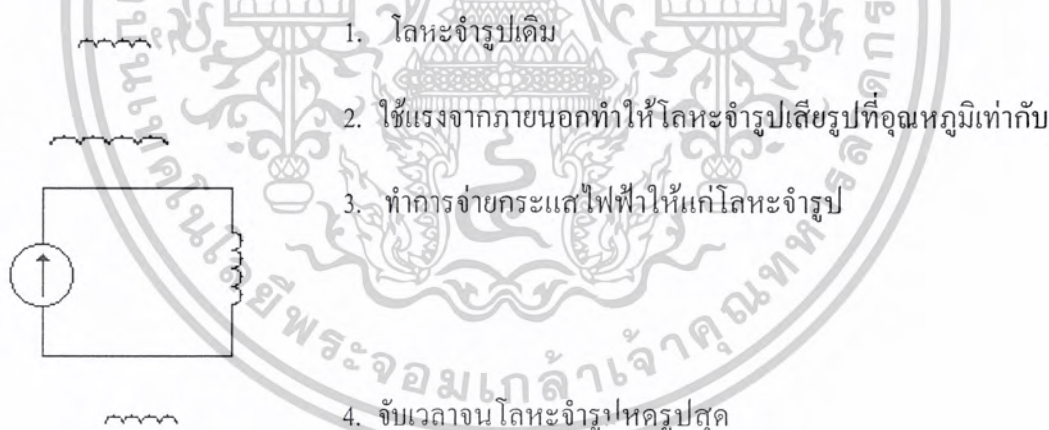
3.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโลหะจำรูป

- หดรูป = โลหะจำรูปหดตัวลงเมื่อถูกจ่ายกระแสไฟฟ้าให้จนเกิดความร้อน
- คืนรูป = โลหะจำรูปเย็นตัวลงจนเข้าสู่สภาวะปกติเมื่อหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าให้

การทดลองที่ 1

ขั้นตอนการทดลองที่ 1

ทำการเปลี่ยนรูปของโลหะจำรูปให้มีการยืดตัว ด้วยแรงกระทำจากภายนอก เพื่อให้โลหะจำรูปมีการเสียรูป โดยที่โลหะจำรูปมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง (T_u ประมาณ 20 องศาเซลเซียส) แล้วจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาดต่างๆ เพื่อให้เกิดความร้อน ซึ่งทำให้โลหะจำรูปหดรูปเป็นรูปเดิม พร้อมทั้งจับเวลาที่ใช้ในการหดรูปเป็นรูปเดิม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าเวลาที่ทำให้โลหะจำรูปหดรูป ตามค่ากระแสขนาดต่างๆ ที่ป้อนให้กับโลหะผสม นิกเกิล-ไทเทเนียม ภายใต้เงื่อนไข $T_A = 20$ องศาเซลเซียส

เส้นผ่านศูนย์กลาง กลาง กระแสไฟฟ้า	0.2 (มม.)	0.3 (มม.)	0.4 (มม.)	0.5 (มม.)	0.6 (มม.)	0.7 (มม.)	0.8 (มม.)
1 แอมป์	4.4 sec	13.4 sec	+	+	+	+	+
2 แอมป์	*	2.7 sec	5.7sec	11.3 sec	23 sec	55.7 sec	+
3 แอมป์	*	*	*	4.5 sec	7.8 sec	13.3 sec	22.6 sec
4 แอมป์	*	*	*	*	4.2 sec	6.9 sec	10.8 sec
5 แอมป์	*	*	*	*	*	*	6.6 sec

- + แสดงถึง ค่ากระแสที่ใช้มีค่าน้อยเกินกว่าที่จะทำให้เกิดการหดรูปของโลหะจำรูป
* แสดงถึง ค่ากระแสที่ใช้มีค่าสูงเกินกว่าที่จะใช้จ่ายให้โลหะจำรูป (โลหะจำรูปเสียหาย)

สรุปผลการทดลองที่ 1

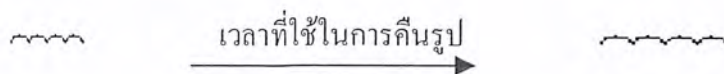
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและขนาดของกระแสที่จ่ายให้ของโลหะจำรูปมีผลต่อระยะเวลาที่ใช้ในการหดรูปของโลหะจำรูปจากตารางพบว่า ค่ากระแสที่ต่ำไปทำให้เกิดความร้อนไม่เพียงพอที่ทำให้โลหะจำรูปหดรูป และ กรณีที่กระแสสูงเกินไปทำให้ โลหะจำรูปหดตัวเร็วมากจนเกิดความร้อนสูงมากอาจเป็นผลให้โลหะจำรูปเกิด **ความเสื่อมได้หากเกิดเป็นเวลานานเกินไป ซึ่งเป็นค่าที่ต้องหลีกเลี่ยง

** ความเสื่อม คือ สภาวะที่โลหะจำรูปเกิดค่าอุณหภูมิในตัวสูงเกิน 65 องศาเซลเซียส จนไม่มี การจำรูปใหม่ได้

การทดลองที่ 2

ขั้นตอนการทดลองที่ 2

จากการทดลองในตารางที่ 3.1 เมื่อทำการหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่โลหะจำรูปแล้ว โลหะจำรูปจะลดอุณหภูมิลงทำให้เริ่มกลับ ไปอยู่ในรูปที่ยืดไว้ในครั้งแรก ซึ่งได้ทำการหาเวลาที่ใช้ในการคืนรูปของโลหะจำรูปจนโลหะจำรูปมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง (T_A ประมาณ 20 องศาเซลเซียส)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าประมาณช่วงเวลาที่ใช้ในการคั้นรูป ภายใต้เงื่อนไข $T_A = 20$ องศาเซลเซียส

เส้นผ่านศูนย์กลาง กลาง กระแสไฟฟ้า	0.2 (มม.)	0.3 (มม.)	0.4 (มม.)	0.5 (มม.)	0.6 (มม.)	0.7 (มม.)	0.8 (มม.)
1 แอมป์	29.5 sec	37.7 sec	+	+	+	+	+
2 แอมป์	*	39.4 sec	41.2sec	43.7 sec	47.6 sec	+	+
3 แอมป์	*	*	*	53.8 sec	53.9 sec	54.3 sec	55.1 sec
4 แอมป์	*	*	*	*	63.8 sec	65.5 sec	67.9 sec
5 แอมป์	*	*	*	*	*	*	77.6 sec

สรุปผลการทดลองที่ 2

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและขนาดของกระแสที่จ่ายให้ของโลหะจำรูปมีผลต่อระยะเวลาที่ใช้ในการคั้นรูปของโลหะจำรูป โดยที่โลหะจำรูปที่มีขนาดเท่ากัน เมื่อจ่ายกระแสที่สูงกว่าจะเกิดความร้อนมากกว่าจนทำให้มีระยะเวลาที่คั้นรูปที่มากกว่าด้วยเช่นกัน และโลหะจำรูปที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าจะใช้เวลาที่ใช้ในการคั้นรูปน้อยกว่าที่กระแสเท่าๆกัน

การทดลองที่ 3

ขั้นตอนการทดลองที่ 3

เป็นผลการทดลองโดยจ่ายกระแสไฟฟ้าจนโลหะจำรูปมีอุณหภูมิประมาณ 65 องศาเซลเซียส ซึ่งประมาณเป็นอุณหภูมิสูงสุดที่โลหะจำรูปทนได้ แล้วทำการวัดระยะเวลาที่ใช้ในการคลายความร้อนจนมีอุณหภูมิประมาณอุณหภูมิห้อง

$$65^{\circ}\text{C} \quad T = \dots\dots\dots\text{Sec} \quad 20^{\circ}\text{C}$$

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าประมาณช่วงเวลาที่ทำให้อุณหภูมิลดลง โดยตรง จากการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียสแล้วหยุดการจ่ายกระแสไฟฟ้าทันที

เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	เวลาที่ทำให้เย็นลง (วินาที)
0.2	19.8
0.3	21.0
0.4	23.0
0.5	25.3
0.6	28.2
0.7	31.6
0.8	35.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลองที่ 3

จากผลการทดลองนี้ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะจํารูปมีผลต่อระยะเวลาที่ใช้ในการหดรูปโดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของโลหะรูป ($65^{\circ}\text{C} \rightarrow 20^{\circ}\text{C}$) โดยโลหะจํารูปที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่กว่าจะใช้ระยะเวลาในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่นานกว่า โลหะจํารูปที่มีขนาดเล็กกว่า

โดยที่ข้อมูลเหล่านี้จะถูกต้องแม่นยำ เมื่อใช้กระแสไฟฟ้าในการทำให้ร้อนและคุณสมบัติของการเย็นตัวของลวด นิกเกิล-ไทเทเนียม ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.38 – 1 มม. ส่วนเส้นลวดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่านั้น คุณสมบัติตามตารางที่ 3.4 จะแตกต่างออกไปโดยเฉพาะเส้นลวดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำกว่า 0.13 มม. เมื่ออัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดกับปริมาตรแตกต่างกันมาก

จากตารางที่ 3.4 เป็นการแสดงคุณสมบัติต่างๆของโลหะจํารูปเช่น ค่าความต้านทาน ค่าแรงกด ค่ากระแสที่ใช้จ่าย ค่าเปอร์เซ็นต์ความยาว และช่วงเวลาที่ใช้ในการหดรูปที่อุณหภูมิเป้าหมาย 70 และ 90 องศาเซลเซียส โดยที่คุณสมบัติเหล่านี้จะมีค่าแตกต่างกัน เมื่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนั้นเปลี่ยนไป ในช่วง 0.025-0.25 มม.

ตารางที่ 3.4 การกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าสำหรับลวดนิกเกิล-ไทเทเนียมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก ๆ

เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	ความต้านทาน (โอห์ม/มม.)	แรงกดสูงสุด (กรัม)	ค่ากระแสโดยประมาณ (มิลลิแอมป์)	เปอร์เซ็นต์ความยาว	ช่วงเวลาเมื่อหยุดที่ 70 องศาเซลเซียส (วินาที)	ช่วงเวลาเมื่อหยุดที่ 90 องศาเซลเซียส (วินาที)
0.025	1.7700	7	20	4%	0.1	0.06
0.050	0.5120	35	50	4%	0.3	0.10
0.075	0.1960	80	100	4%	0.5	0.20
0.100	0.1500	150	180	4%	0.8	0.40
0.125	0.0669	230	250	4%	1.6	0.90
0.150	0.0492	330	400	4%	2.0	1.20
0.200	0.0315	590	610	4%	3.5	2.20
0.250	0.0197	930	1000	4%	5.5	3.50

โลหะจํารูปทำจากโลหะผสมระหว่าง นิกเกิล และ ไทเทเนียมซึ่งโลหะทั้งสองชนิดมีความต้านทานสูง และจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น เมื่อมีการผ่านกระแสไฟฟ้าผ่านตัวมันเข้าไป และถ้าเราใช้ไฟฟ้ากระแสตรง จ่ายให้กับโลหะจํารูปเราสามารถหาเวลา ที่ทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงเป็นค่าต่าง ได้ จากสูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$t_h = J_b \cdot \ln \frac{(T_{\max} - T_A)}{(T_{\max} - T_h)}$$

เมื่อ

t_h = เวลาใดๆที่ทำให้เกิดความร้อน(วินาที)

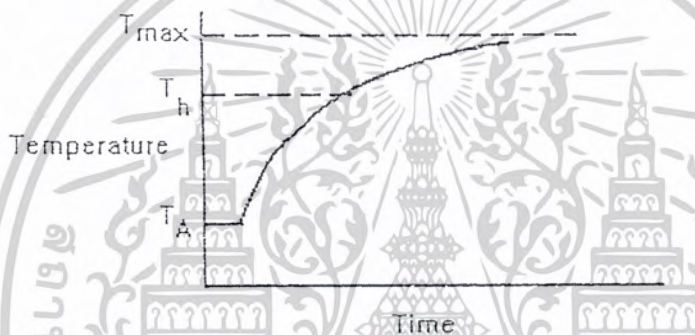
T_{\max} = อุณหภูมิสูงสุดเป็นองศาเซลเซียส

T_A = อุณหภูมิแวดล้อมเป็นองศาเซลเซียส

T_h = อุณหภูมิเป้าหมายเป็นองศาเซลเซียส

J_b = ค่าคงที่

และลักษณะแสดงความสัมพันธ์ของสมการ แสดงดังในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาเมื่อป้อนไฟฟ้ากระแสตรงให้กับเส้นลวดนิกเกิล-ไทเทเนียม

สำหรับการทำให้เย็นลง เพื่อให้ลักษณะทางกายภาพ ของโลหะจำรูปกลับเข้าสู่สภาวะปกติ เราใช้สูตรในการคำนวณคือ

$$t_c = J_c \cdot \ln \frac{(T_H - T_A)}{(T_C - T_A)}$$

เมื่อ

t_c = เวลาใดๆที่ทำให้เย็นลง(วินาที)

T_H = อุณหภูมิเริ่มต้นเป็นองศา

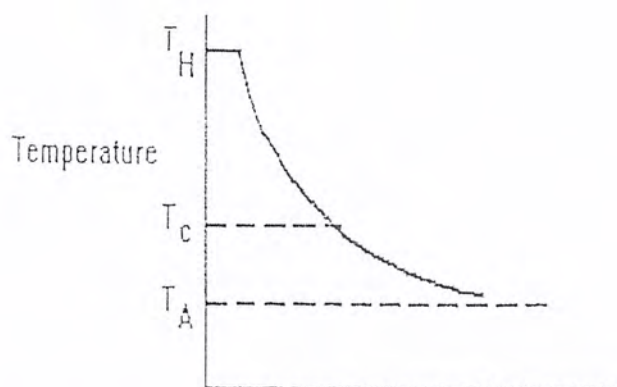
T_A = อุณหภูมิแวดล้อมเป็นองศาเซลเซียส

T_C = อุณหภูมิเป้าหมายเป็นองศาเซลเซียส

J_c = ค่าคงที่

และแสดงลักษณะความสัมพันธ์ของสมการ ได้จากกราฟดังรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาเมื่อทำให้ลวด นิกเกิล-ไทเทเนียม เย็นลง

รายละเอียดการคำนวณค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้า จะมีอยู่ 4 ส่วน คือ

- 1.1 หาค่ากระแสที่ต้องใช้ สำหรับเวลาที่ต้องการในการใช้งาน
- 1.2 หาค่าความต้านทานของ นิกเกิล-ไทเทเนียม ที่สภาวะต่างๆ
- 1.3 แรงดันที่ใช้ สำหรับเพื่อขับเคลื่อนกระแสผ่านอุปกรณ์
- 1.4 ค่ากำลังงานสูญเสีย

ในกรณีที่ 1.1 เราใช้ตาราง 3.1 และ 3.4

ในกรณีที่ 1.2 เราหาค่าความต้านทานจากสูตร

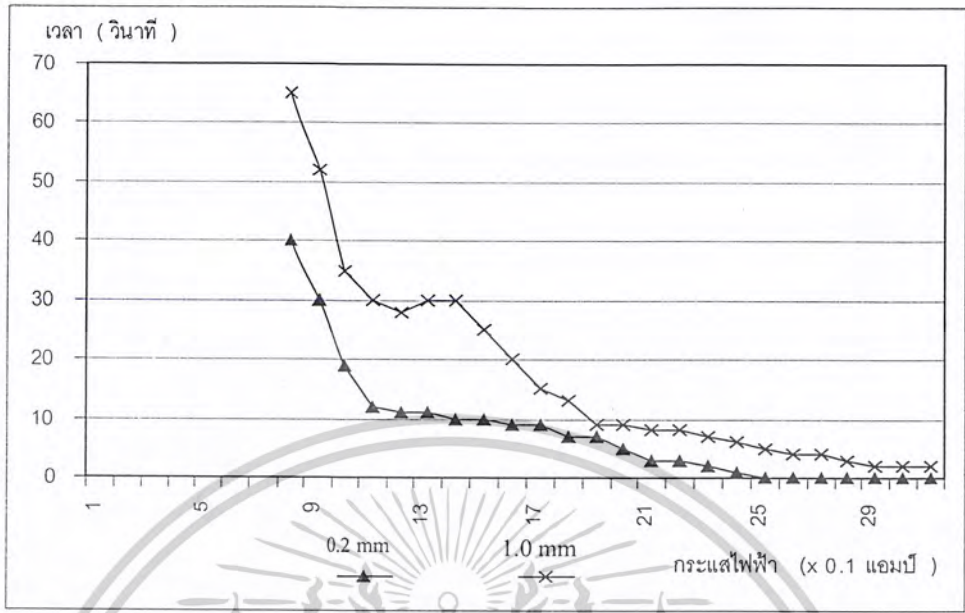
$$\text{ค่าความต้านทาน/มม.} = \frac{1.019 * 10^{-3}}{d^2} \text{ โอห์ม/มม.}$$

ในกรณีที่ 1.3 เราใช้กฎของโอห์มในการหาคือ แรงดันไฟฟ้า = IR

ในกรณีที่ 1.4 เราหาค่ากำลังไฟฟ้าจากสูตร กำลังไฟฟ้า = I²R

ตัวอย่างการคำนวณ เมื่อเราใช้ลวดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางยาวเท่ากับ 0.5 มม. และยาว 250 มม. ซึ่งเป็นลวด นิกเกิล-ไทเทเนียม ในเวลา 5 วินาที ให้คำนวณหาค่าประมาณของเวลาในการทำให้เย็นของกรณีดังต่อไปนี้

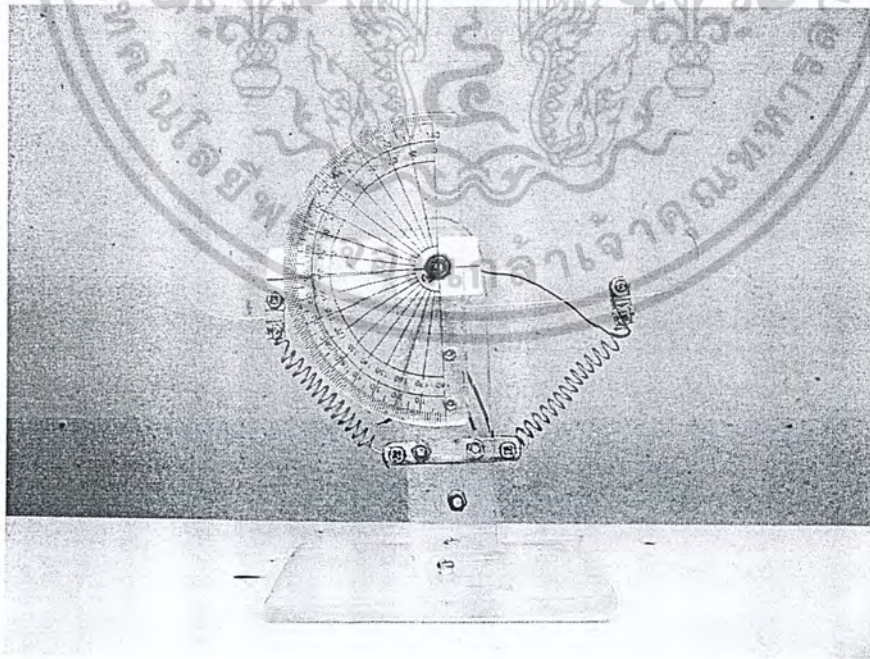
จากรูปที่ 3.3 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาในการหดรูป และขนาดของกระแสไฟฟ้า โดยเป็นการเป็นการเปรียบเทียบของโลหะจำรูป 2 เส้นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม. และ 0.2 มม. ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลตอบสนองเชิงเวลาของโลหะจำรูปมีความไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 3.3 กราฟเปรียบเทียบระหว่างกระแสไฟฟ้า กับ เวลา ของ ลวดโลหะจํารูป 2 เส้น

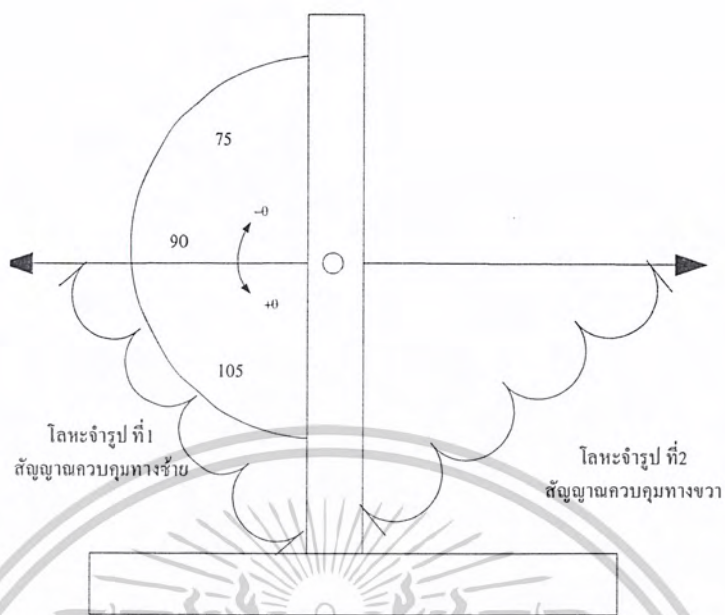
3.2 การออกแบบแขนกลทดสอบ

หลังจากศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโลหะจํารูปแล้วต่อไปได้ออกแบบและสร้างแขนกล 1 ข้อต่อเพื่อใช้ในการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่3.4และ3.5ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 แขนกลทดสอบของลวดโลหะจํารูป 2 เส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



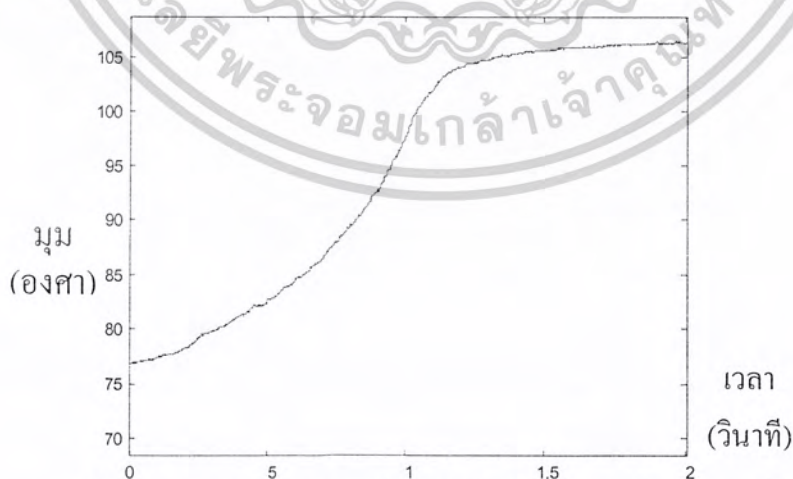
รูปที่ 3.5 แบบของแขนกลทดสอบของ ลวดโลหะจํารูป 2 เส้น

จากรูปที่ 3.5 จะเห็นว่า การเปลี่ยนแปลงระยะของโลหะจํารูป จะส่งผลให้ค่ามุมที่ข้อต่อของแขนกลเปลี่ยนไปตามด้วย จากนั้นจึงนำแขนกลนี้ไปทำการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาตัวควบคุม และ พัฒนา เป็นแขนกล 3 ข้อต่อ

กำหนดให้ สัญญาณควบคุมทางซ้าย คือ สัญญาณที่จ่ายให้กับโลหะจํารูปที่ 1 ซึ่งมีทิศทางทวนเข็มนาฬิกาและสัญญาณควบคุมทางขวา คือ สัญญาณที่จ่ายให้กับโลหะจํารูปที่ 2 ซึ่งมีทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

3.3 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Modeling)

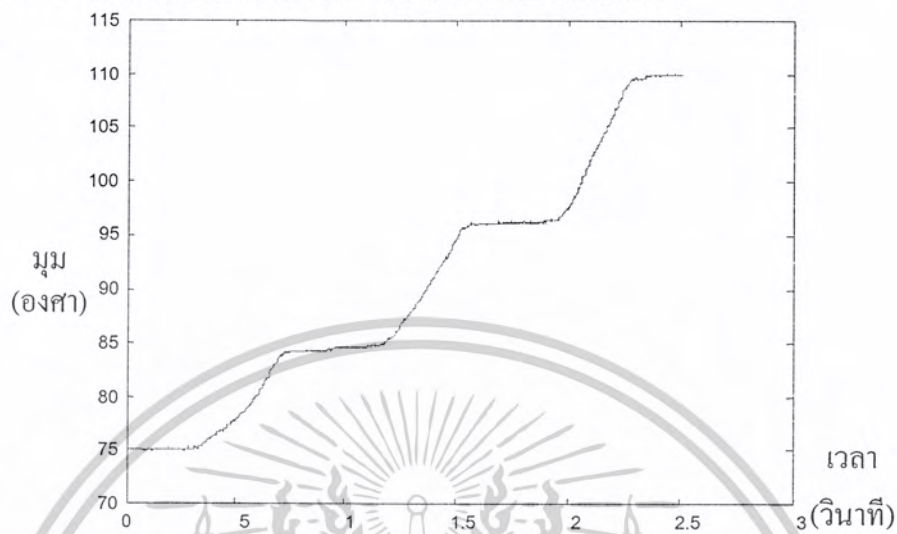
จากผลตอบสนองเชิงเวลาของระบบวงเปิดที่ป้อนค่าอินพุตคงที่ มีความไม่เป็นเชิงเส้น ดังรูปที่ 3.6 จึงไม่สามารถหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ด้วยการใช้แบบจำลองเพียงแบบเดียว



รูปที่ 3.6 แสดงผลตอบสนองเชิงเวลาต่อสัญญาณระดับขนาด 4 โวลท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจึงทำการปรับปรุง โดยการป้อนสัญญาณอินพุตคงที่เป็นช่วงๆ โดยมีขนาดแตกต่างกัน เพื่อให้ผลตอบสนองเชิงเวลาของระบบวงเปิดมีความเป็นเชิงเส้น ในแต่ละช่วงอย่างชัดเจนจึงสามารถนำไปหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบได้อย่างแม่นยำขึ้น



รูปที่ 3.7 แสดงค่าผลตอบสนองเชิงเวลาของสัญญาณอินพุตที่เป็นช่วงๆ

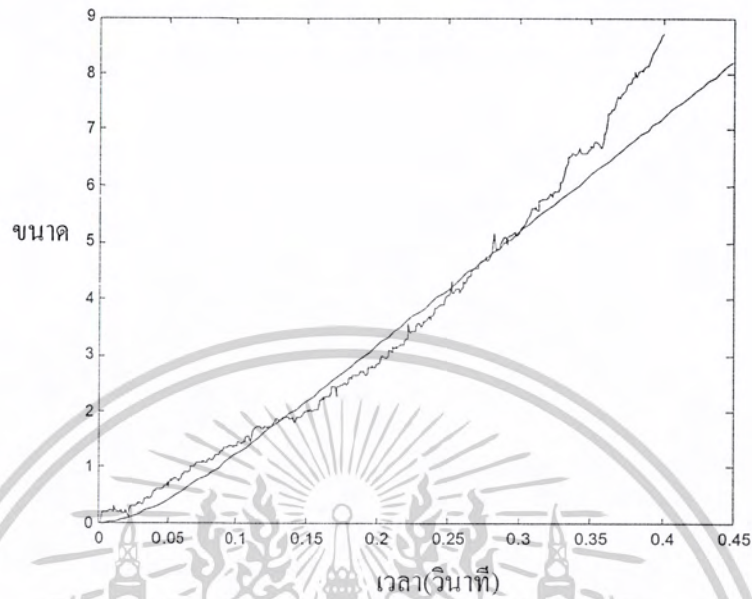


รูปที่ 3.8 สัญญาณอินพุตเป็นช่วงๆ ที่ป้อนให้แก่ระบบ

จากรูปที่ 3.8 แสดงการป้อนสัญญาณอินพุตที่แบ่งผลตอบสนองออกเป็น 3 ช่วง กำหนดช่วงมุมประมาณ 10 องศา โดยนำผลตอบสนองที่ได้มาวิเคราะห์โดยละเอียด

สร้างกราฟจากรูปที่ 3.8 โดยกำหนดเริ่มต้น ที่มุม 75 องศาเป็นจุดอ้างอิง โดยมีอินพุตเป็นสัญญาณระดับขนาด 3.5 โวลต์ ดังนั้นผลตอบสนองต่อสัญญาณระดับเป็นขั้น จากนั้นนำค่าผลตอบสนองที่ได้ไป หาแบบจำลองฟังก์ชันถ่ายโอน จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้

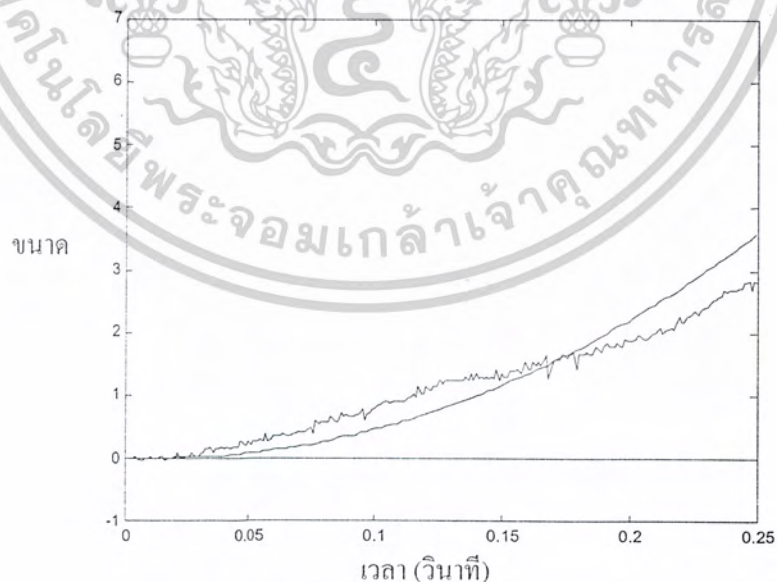
1) มุม 75-85 องศา ; ฟังก์ชันถ่ายโอน $G_{p1}(s) = \frac{4.0476}{s(0.0432s + 1)}$



รูปที่ 3.9 ผลตอบสนองช่วงมุม 75-85 องศา

ทำการแบ่งช่วงที่สอง ซึ่งมีจุดอ้างอิงที่มุม 85 องศาแล้วทำการหาฟังก์ชันถ่ายโอนโดยใช้วิธีเดียวกันกับช่วงแรก ก็จะได้ดังข้างล่าง

2) มุม 85-95 องศา ; ฟังก์ชันถ่ายโอน $G_{p2}(s) = \frac{37.3437}{s^2(0.0288s + 1)}$

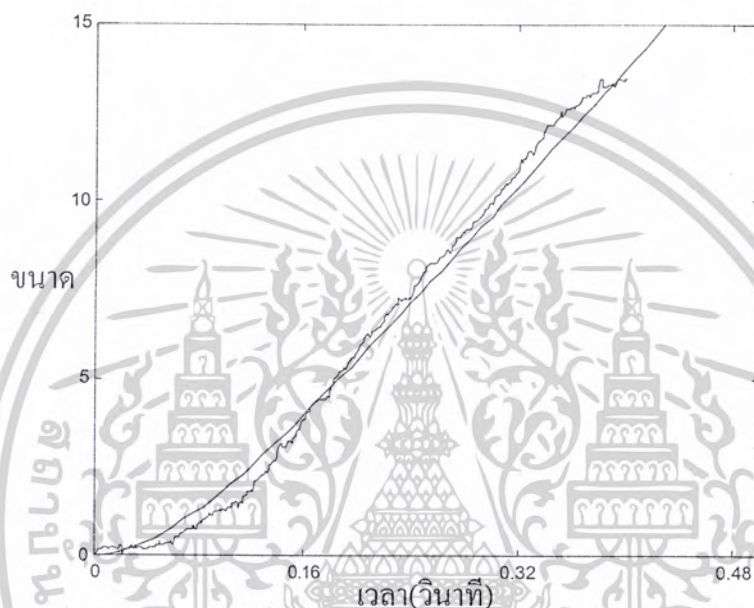


รูปที่ 3.10 ผลตอบสนองช่วงมุม 85-95 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการแบ่งช่วงที่สาม ซึ่งมีจุดอ้างอิงที่มุม 95 องศาแล้วทำการหาฟังก์ชันถ่ายโอนโดยใช้วิธีเดียวกัน ก็จะได้ดังข้างล่าง

$$3) \text{ มุม } 95\text{-}105 \text{ องศา; ฟังก์ชันถ่ายโอน } G_{p3}(s) = \frac{23.688}{s(0.075s + 1)}$$



รูปที่ 4.9 ผลตอบสนองช่วงมุม 95-105 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การออกแบบตัวควบคุม

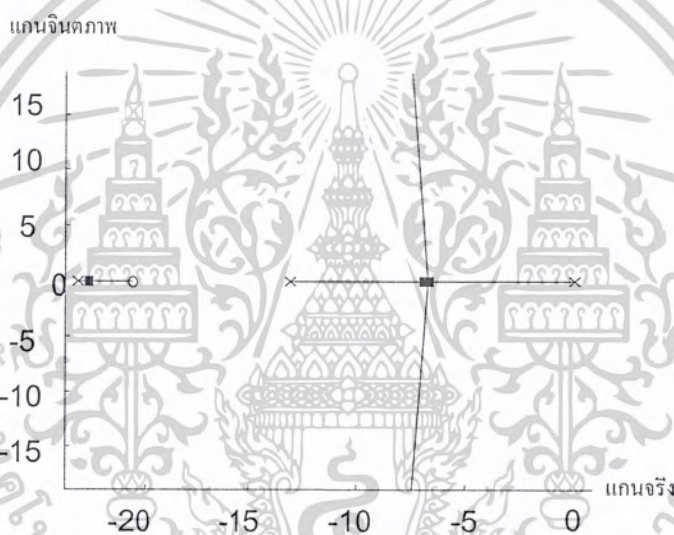
ในการออกแบบตัวควบคุมต้องการผลตอบสนองที่มีช่วงเวลาเข้าที่ น้อย และไม่มีค่าพุ่งเกิน เนื่องจากเงื่อนไขทางตัวอุปกรณ์

4.1 การออกแบบตัวควบคุมตัวที่ 1

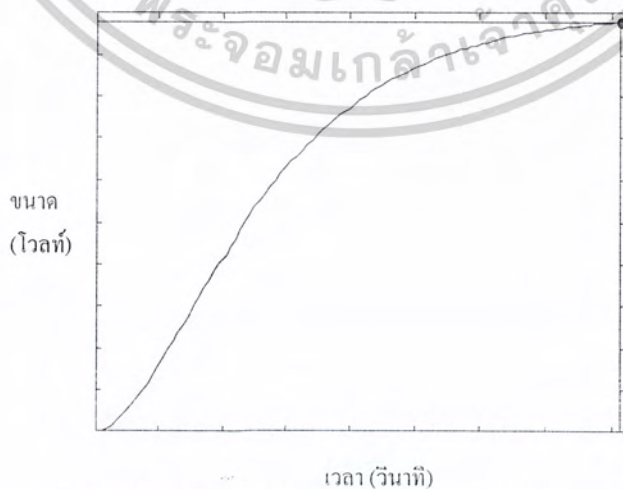
จากฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ $G_{p1}(s)$ จะหาตัวชดเชยได้ด้วยวิธีชดเชยแบบมูมนำ เพื่อปรับปรุงผลตอบสนองของระบบได้ ตัวชดเชยเป็น

$$G_{c1}(s) = \frac{0.5443(s + 20.66)}{(s + 13.09)} ; G_{c1}(z) = \frac{0.5443(z - 0.97955)}{(z - 0.987)} ;$$

ซึ่งทำให้ระบบป้อนกลับมีช่วงเวลาเข้าที่ = 0.814 วินาที



รูปที่ 4.1 แสดงเส้นทางรากของระบบกับตัวควบคุมที่ 1



รูปที่ 4.2 แสดงผลตอบสนองต่อสัญญาณระดับขนาดหนึ่งหน่วย

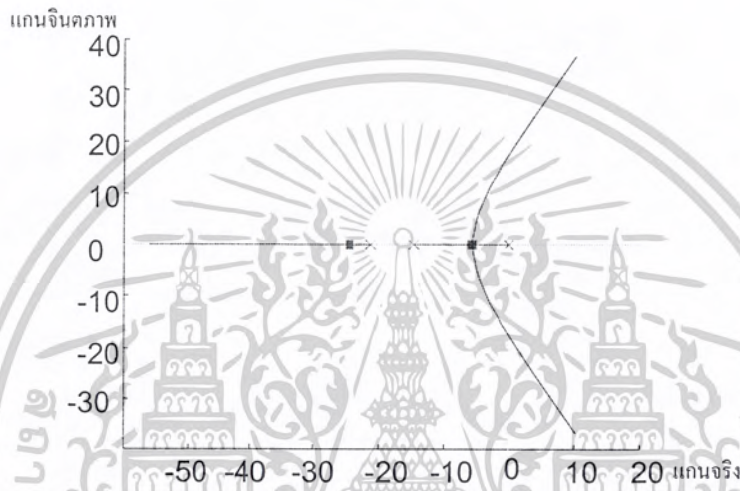
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การออกแบบควบคุมตัวที่ 2

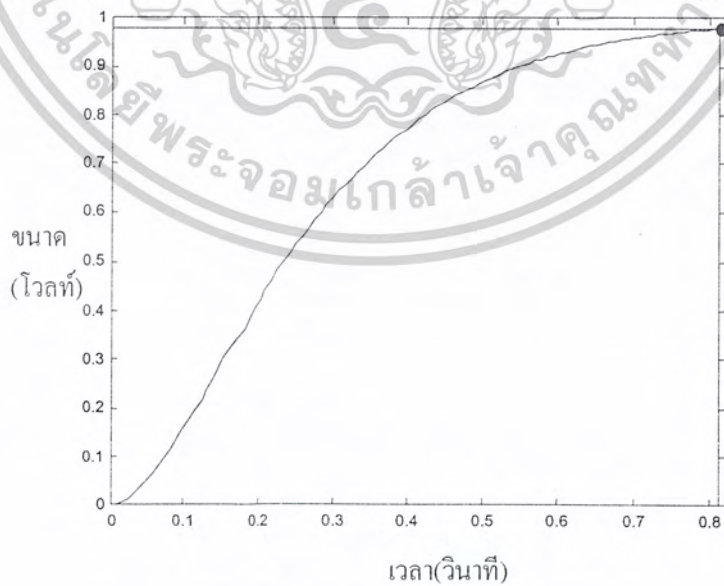
จากฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ $G_{p2}(s)$ จะหาตัวชดเชยได้โดยวิธีตัดกันของโพลและซีโร จะหาตัวชดเชยได้ด้วยวิธีชดเชยแบบมุมตามและมุมนำ เพื่อปรับปรุงผลตอบสนองของระบบ ได้ตัวชดเชยเป็น

$$G_{c2}(s) = \frac{0.6592s(s+34.722)}{(s+21.21)(s+14.58)} ; G_{c2}(z) = \frac{0.6592(z-1)(z-0.96596)}{(z-0.979)(z-0.98553)}$$

และมีช่วงเวลาเข้าที่ = 0.996 วินาที



รูปที่ 4.3 แสดงเส้นทางรากของระบบกับตัวควบคุมที่ 2



รูปที่ 4.4 แสดงผลตอบสนองต่อสัญญาณระดับขนาดหนึ่งหน่วย

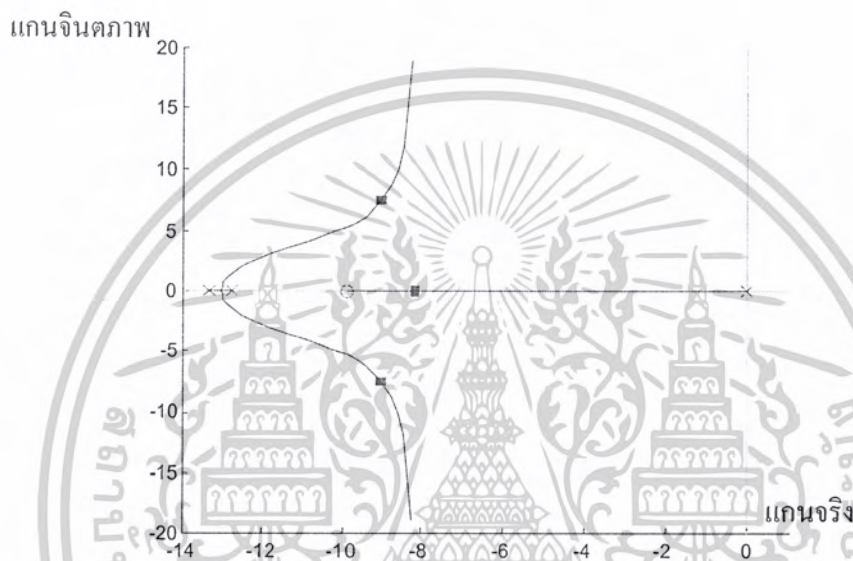
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การออกแบบตัวควบคุมที่ 3

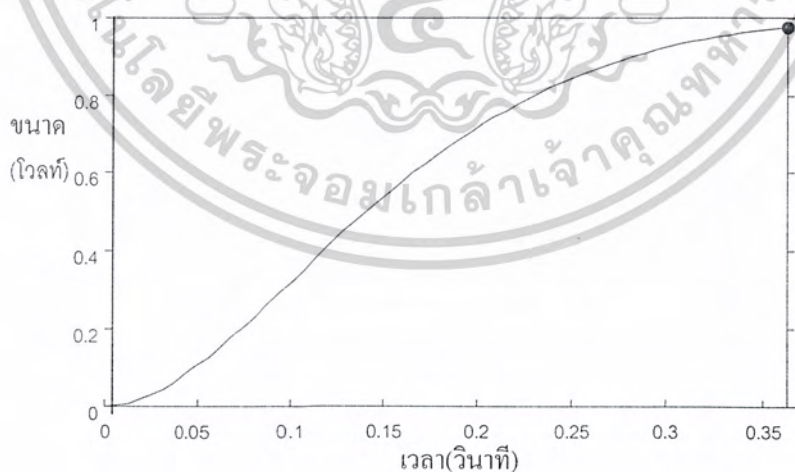
จากฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ $G_{p3}(s)$ จะหาตัวชดเชยได้ด้วยวิธีชดเชยแบบมุมเพื่อปรับปรุงผลตอบสนองของระบบ ได้ ตัวชดเชยเป็น

$$G_{c3}(s) = \frac{4.7317(s+9.88)}{(s+12.77)} ; G_{c3}(z) = \frac{4.7317(z-0.99017)}{(z-0.9873)}$$

และมีช่วงเวลาเข้าที่ = 0.363 วินาที



รูปที่ 4.5 แสดงเส้นทางรากของระบบกับตัวควบคุมที่ 3



รูปที่ 4.6 แสดงผลตอบสนองต่อสัญญาณระดับขนาดหนึ่งหน่วย

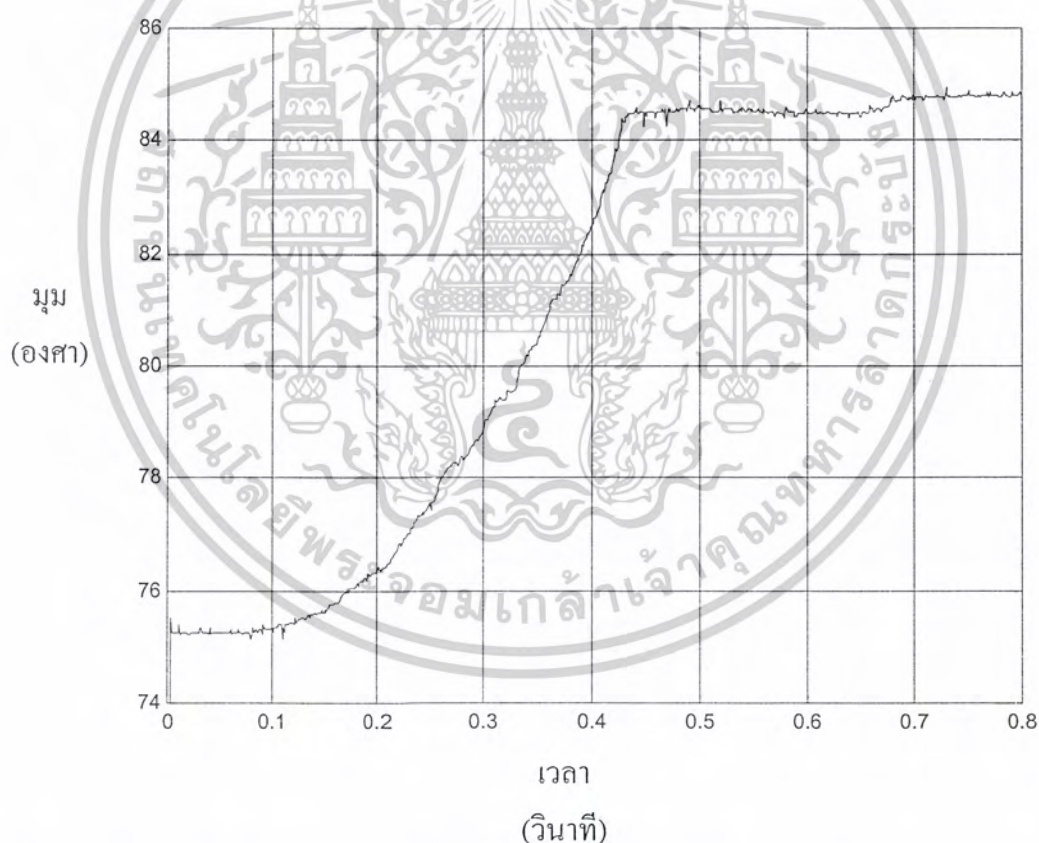
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การทดสอบตัวควบคุมตัวที่1 ตัวที่2 และตัวที่3

เป็นการทดสอบผลตอบแทนของตัวควบคุมกับค่าอินพุตระดับต่างๆ โดยทดสอบกับการทำงานในช่วงและนอกช่วงที่ออกแบบ เพื่อสังเกตผลที่ได้จากตัวควบคุมแต่ละตัว แล้วนำไปแก้ไข ปรับปรุง ให้ได้การทำงาน ที่สมรรถนะดีที่สุด โดยนำค่า ช่วงเวลาเข้าที่ กับ ค่าผิดพลาดสถานะคงตัว เป็นปัจจัยหลักในการพิจารณาสมรรถนะของตัวควบคุม และต้องไม่เกิดค่าพุ่งเกิน ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่จำเป็นของระบบ เพราะค่าพุ่งเกินจะทำให้เกิดการทำงานที่พร้อมๆกันทั้ง 2 ด้านของโลหะจํารูป ยังผลให้เกิดความเสียหายต่อโลหะจํารูป

ทดสอบตัวควบคุมตัวที่ 1

กระทำการทดสอบในย่าน 75 องศา ถึง 85 องศา ในทิศทางเข็มนาฬิกา และ105 องศา ถึง 95 องศา ในทิศทาง ทวนเข็มนาฬิกา



รูปที่4.7 แสดงผลตอบแทนของตัวควบคุมที่ 1 กับสัญญาณอ้างอิงที่มุม 85 องศา

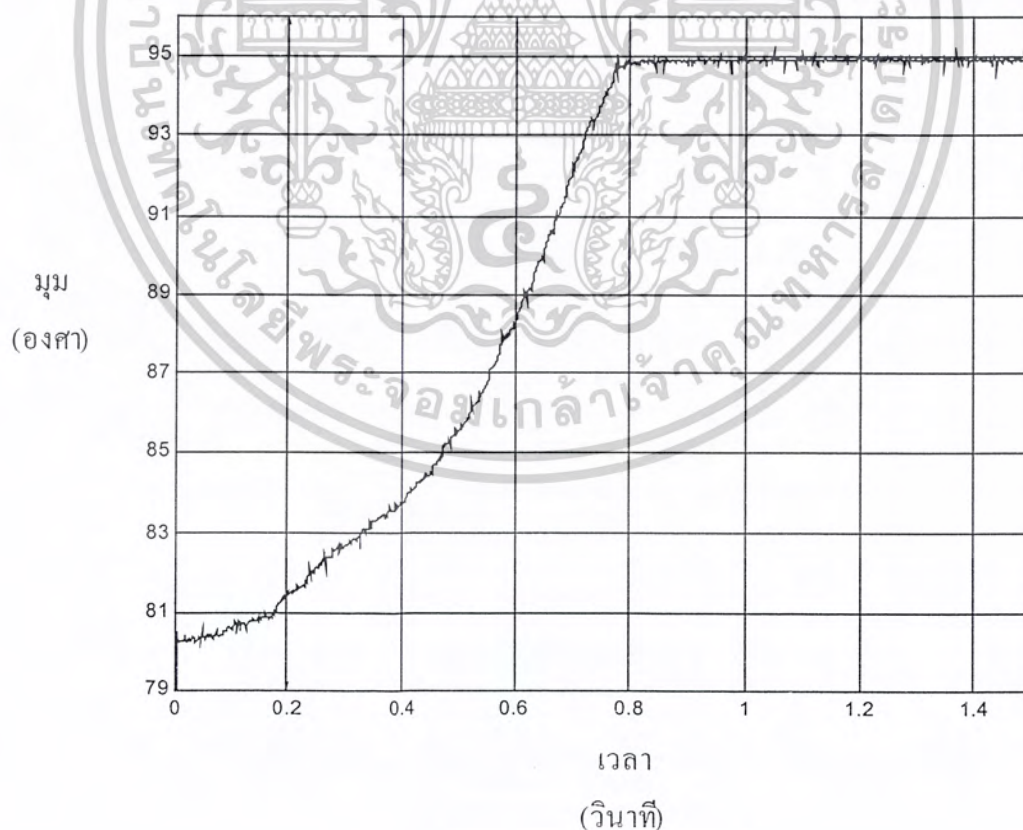
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลตอบสนองที่สัญญาณอ้างอิงที่มุม 95 องศา จะได้ ช่วงเวลาเข้าที่ ประมาณ 0.83 วินาที โดยมีค่าเวลาไร้ผลตอบสนอง ทำให้ได้ค่าช่วงเวลาเข้าที่ที่น้อยกว่าผลการจำลอง(Simulate) ขึ้นต้น

ตารางที่4.1 แสดงค่าผลตอบสนองที่ค่าจุดเริ่มต้น ต่างระดับกัน

จุดเริ่มต้น(องศา)	ช่วงเวลาเข้าที่(วินาที)	ค่าผิดพลาดสถานะคงตัว
75	0.82	0.49
80	0.748	0.34
85	0.574	0.16
90	0.431	0.24
100	0.368	0.43
105	0.387	0.35

ทดสอบตัวควบคุมตัวที่ 2



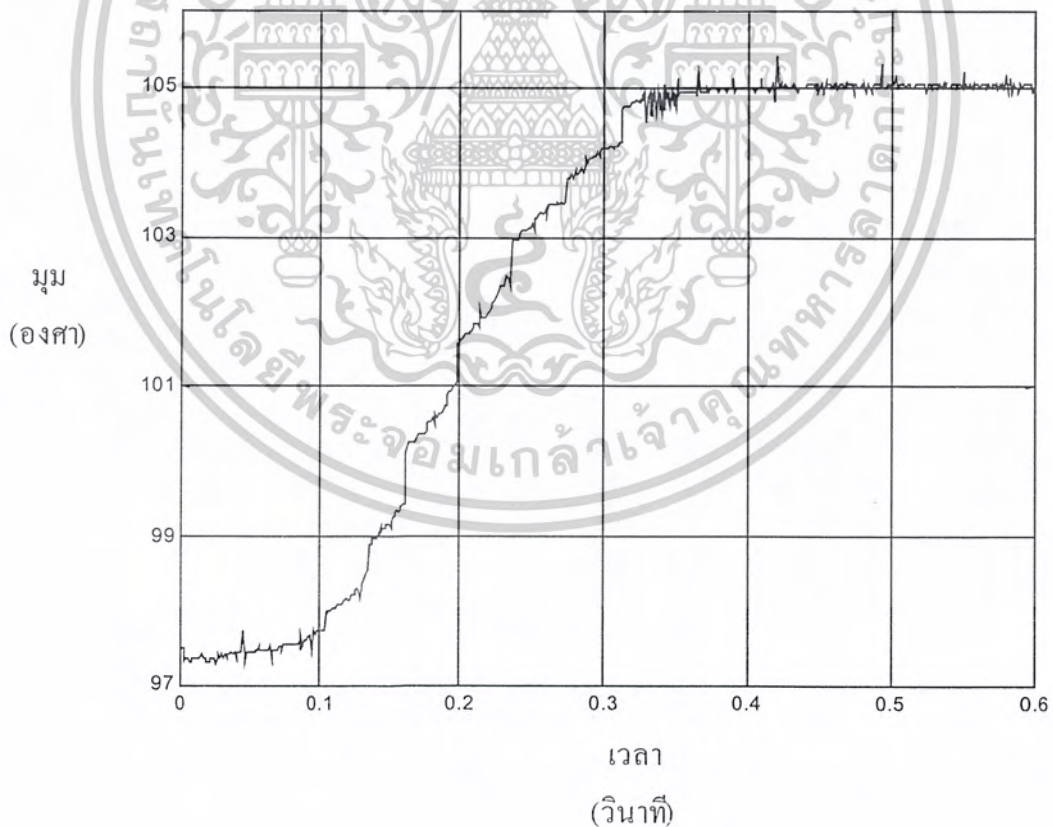
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.8 แสดงผลตอบสนองของตัวควบคุมที่ 1 กับสัญญาณอ้างอิงที่มุม 95 องศา

เป็นผลตอบสนองที่สัญญาณอ้างอิง 95 องศา จะได้ช่วงเวลาเข้าที่ประมาณ 0.512 วินาที โดยมีค่าเวลาไว้ผลตอบสนอง ทำให้ได้ค่าช่วงเวลาเข้าที่ ที่น้อยกว่าผลการจำลองข้างต้น ตารางที่ 4.2 แสดงค่าผลตอบสนองที่ค่าจุดเริ่มต้น ต่างระดับกัน

จุดเริ่มต้น(องศา)	ช่วงเวลาเข้าที่(วินาที)	ค่าผิดพลาดสถานะคงตัว
75	0.924	0.61
80	1.32	0.57
90	0.972	0.56
95	0.512	0.45
100	0.562	0.34
105	0.67	0.25

ทดสอบตัวควบคุมตัวที่ 3



รูปที่ 4.9 แสดงผลตอบสนองของตัวควบคุมที่ 1 กับสัญญาณอ้างอิงที่มุม 105 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

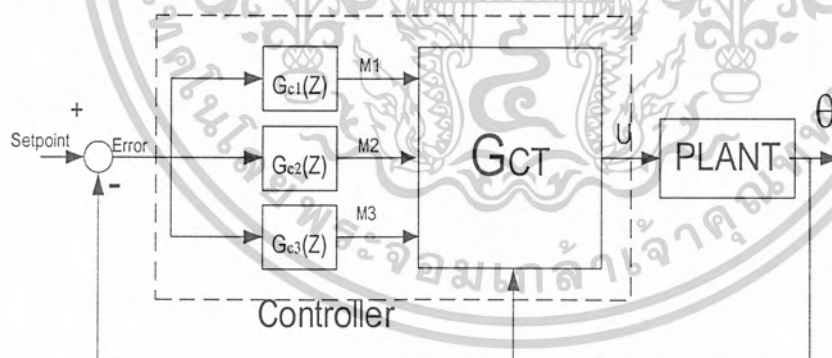
ผลตอบสนองที่สัญญาณอ้างอิง 105 องศา จะได้ ช่วงเวลาเข้าที่ประมาณ 0.38 วินาที โดยมีค่าเวลาไว้ผลตอบสนอง ทำให้ได้ค่าช่วงเวลาเข้าที่ ที่น้อยกว่าผลการจำลอง(Simulate) ข้างต้น

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าผลตอบสนองที่ค่าจุดเริ่มต้น ต่างระดับกัน

จุดเริ่มต้น(องศา)	ช่วงเวลาเข้าที่(วินาที)	ค่าผิดพลาดสถานะคงตัว
80	0.832	0.25
85	0.857	0.34
90	0.913	0.16
95	0.975	0.9
100	1.015	0.83
105	1.254	0.5

4.5 การออกแบบตัวควบคุมรวม

ในการออกแบบระบบควบคุมขั้นตอนนี้ ใช้แนวทางการแก้ปัญหาโดยนำแนวความคิดของพีชชี ซึ่งประกอบด้วย การพีชชีเฟลซัน และฐานกฎการควบคุมพีชชี มาใช้ในการแก้ปัญหา



รูปที่ 4.10 แสดงโครงสร้างของตัวควบคุม

โครงสร้างของตัวควบคุมประกอบด้วยตัวควบคุมย่อย คือ G_{c1} , G_{c2} และ G_{c3} เป็นตัวควบคุมที่ออกแบบมาแต่ละช่วง ซึ่งมี G_{CT} เป็นตัวรวมสัญญาณควบคุม ที่ได้จากตัวควบคุมย่อย โดยทำการพีชชีเฟลซัน ตามรูปที่ 4.10

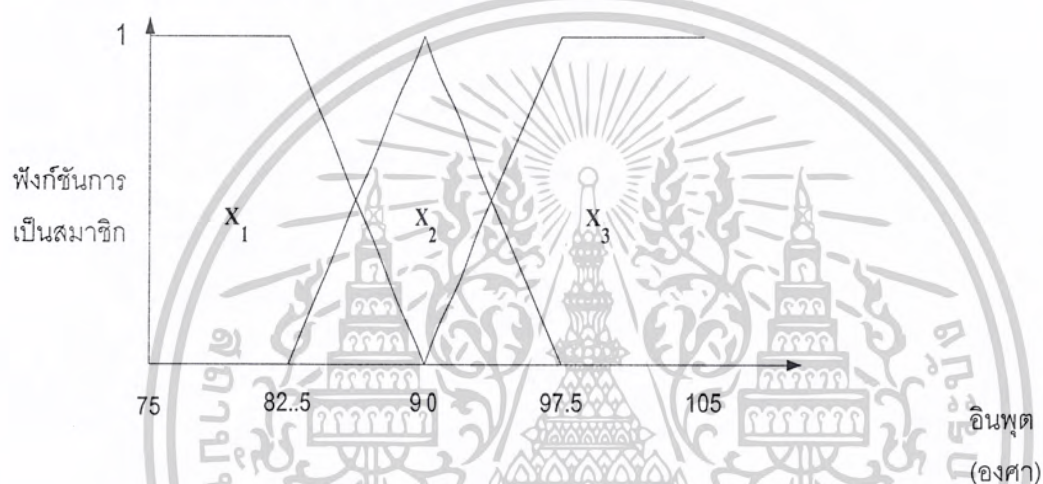
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบโครงสร้างของตัวควบคุมจะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1 กำหนดจำนวนตัวแปรอินพุต และ เอาท์พุตของตัวควบคุม ซึ่งประกอบด้วย หนึ่งอินพุตและหนึ่งเอาท์พุต โดยที่ตัวแปรอินพุตของตัวควบคุม คือตัวแปรสถานะที่อยู่ในรูปค่าผิดพลาด ซึ่งเป็นค่าตำแหน่งมุมของแขนทดลอง และตัวแปรเอาท์พุต ของตัวควบคุมคือ สัญญาณควบคุม(control output)

2. การกำหนดช่วงตัวแปรอินพุตของตัวควบคุมให้อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ที่กำหนด จะต้องรู้ช่วงที่แท้จริงของตัวแปรอินพุต

3. การกำหนดฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรเอาท์พุต จะมีแนวทางคล้ายกันกับในการกำหนดฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุต



รูปที่ 4.11 แสดงฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุต



รูปที่ 4.12 แสดงฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรเอาท์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

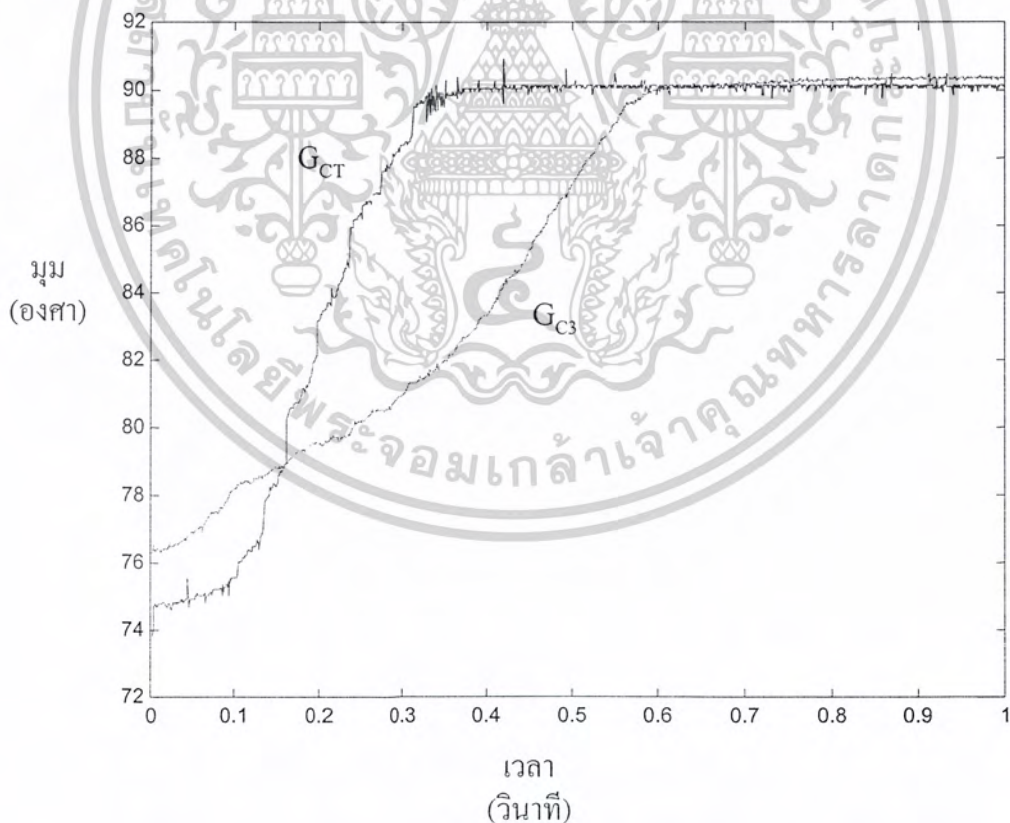
ฐานกฎการควบคุมฟuzzy

Rule 1: IF θ is X_1 THEN U is Y_1 Rule 2: IF θ is X_2 THEN U is Y_2 Rule 3: IF θ is X_3 THEN U is Y_3

จากสัญญาณเอาต์พุต M_1 , M_2 และ M_3 ที่ได้จากตัวควบคุมย่อยสามารถนำมาหาเอาต์พุต U ของตัวควบคุมรวม G_{CT} ซึ่งมีสมการดังต่อไปนี้

$$U = M_1\mu_1 + M_2\mu_2 + M_3\mu_3$$

โดยที่ μ_1 , μ_2 และ μ_3 คือสัมประสิทธิ์ค่าความเป็นสมาชิกของ θ ในเซต X_1 , X_2 และ X_3 ตามลำดับ ที่หามาได้จากการแสดงฟังก์ชันกำหนดในรูปที่ 4.12

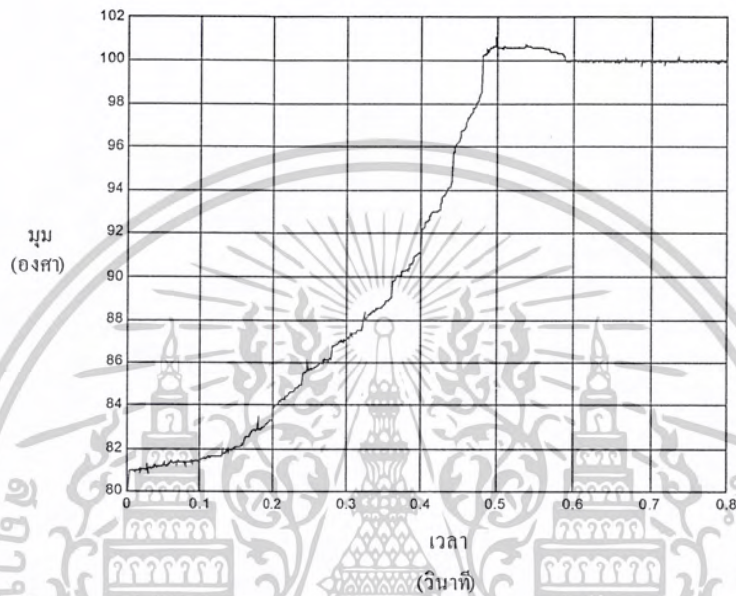


รูปที่ 4.13 แสดงผลตอบสนองระหว่างตัวควบคุมที่ 3 (G_{C3}) และตัวควบคุมรวม (G_{CT})

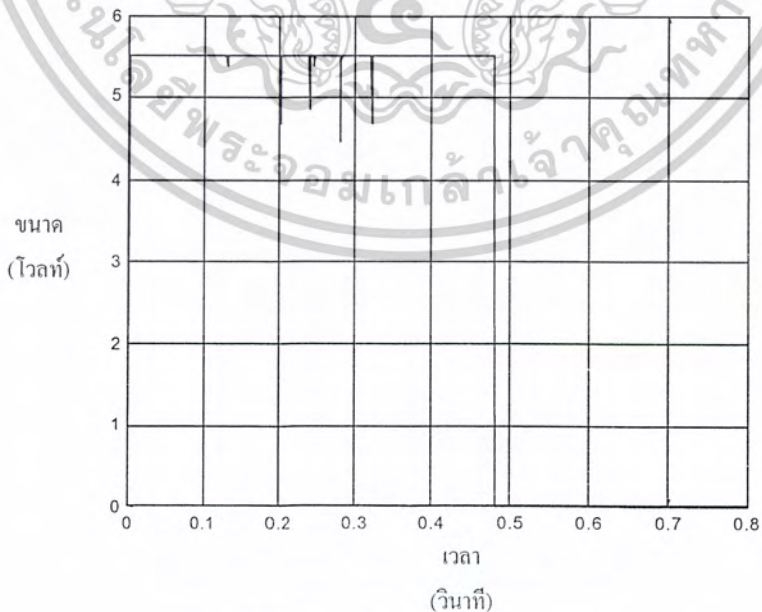
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.13 แสดงผลตอบสนองของตัวควบคุมที่ผ่านการควบคุมโดยตัวควบคุมรวม ที่ให้ผลตอบสนองที่ดีกว่า ตัวควบคุมตัวที่ 3 คือ มีช่วงเวลาเข้าที่ ที่เร็วกว่า เนื่องมาจากในตัวควบคุมที่ 3 ถูกออกแบบให้มีผลตอบสนองช้ามาก

เมื่อทำการทดสอบการทำงานตั้งแต่ค่ามุมเป้าหมายที่ 75 ถึง 105 องศา พบว่า มีช่วง 80 ถึง 100 องศา ที่เกิดค่าพุ่งเกิน

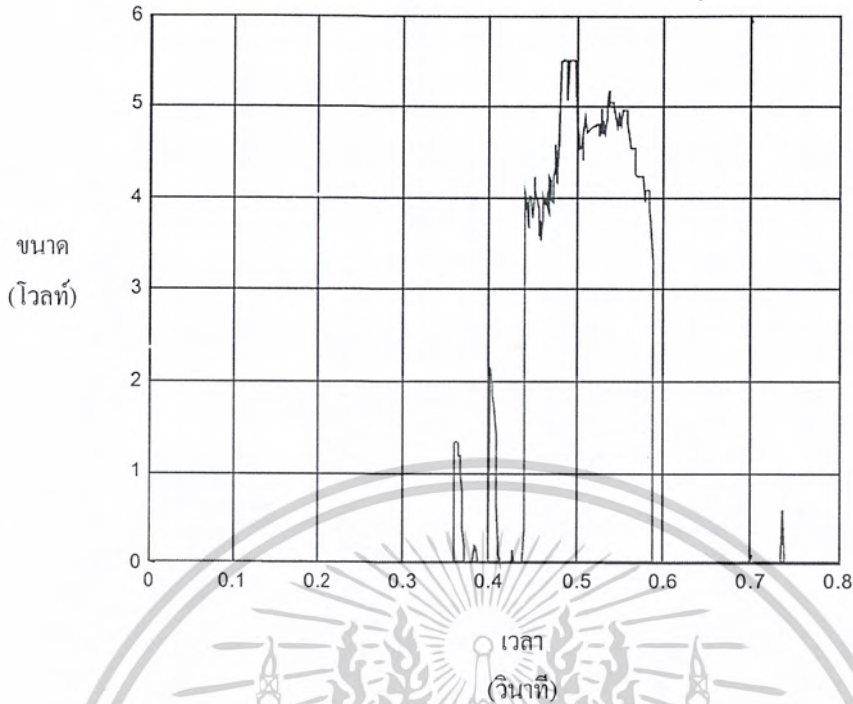


รูปที่ 4.14 แสดงผลตอบสนองเชิงเวลาของตัวควบคุมแบบพีซซีที่จุดอ้างอิงมุม 100 องศา



รูปที่ 4.15 สัญญาณควบคุมทางขวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 สัญญาณควบคุมทางซ้าย

จากผลตอบสนองดังกล่าวทำให้ต้องปรับปรุงตัวควบคุมในแต่ละช่วงโดยการลดอัตราขยาย เพื่อป้องกันการเกิด ค่าพุ่งเกิน แล้วทำการปรับปรุงตัวควบคุมเพื่อให้ทำงานได้ตั้งแต่ 75 ถึง 105 องศา โดยได้ผลการปรับปรุงดังนี้

$$G_{c1}(z) = \frac{0.5443(z - 0.97955)}{(z - 0.987)}$$

$$G_{c2}(z) = \frac{0.5842(z-1)(z-0.96596)}{(z-0.979)(z-0.98553)}$$

$$G_{c3}(z) = \frac{3.3313(z - 0.99017)}{(z - 0.9873)}$$

นำผลที่ได้ มาทำการทดลองตลอดช่วงทำงาน โดยทดลองกับการทำงานที่จุดอ้างอิงต่างๆ กัน เริ่มจาก ตำแหน่ง 105 องศา ได้ค่าผลตอบสนองดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 การทดสอบด้วควบคุมที่ตำแหน่งอ้างอิง 105 องศา

จุดเริ่มต้น(องศา)	ช่วงเวลาเข้าที่(วินาที)	ค่าผิดพลาดสถานะคงตัว
75	0.612	0.49
80	0.546	0.34
85	0.522	0.16
90	0.442	0.24
95	0.412	0.34
100	0.368	0.43

พบว่าสามารถปรับปรุงช่วงเวลาเข้าที่ได้ ดีขึ้น ในช่วงปลาย เท่านั้น อันเป็นผลมาจากขอบเขตการทำงานช่วงเริ่มต้น ที่โลหะจำรูปไม่สามารถเพิ่มความเร็วได้ตาม

ผลการทดลองทำงานที่จุดอ้างอิง 95 องศา

ตารางที่ 4.5 การทดสอบด้วควบคุมที่ตำแหน่งอ้างอิง 95 องศา

จุดเริ่มต้น(องศา)	ช่วงเวลาเข้าที่(วินาที)	ค่าผิดพลาดสถานะคงตัว
75	0.59	0.25
80	0.502	0.39
85	0.412	0.42
90	0.348	0.41
100	0.40	0.38
105	0.487	0.41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองทำงานที่จุดอ้างอิง 85 องศา

ตารางที่ 4.6 การทดสอบตัวควบคุมที่ตำแหน่งอ้างอิง 85 องศา

จุดเริ่มต้น(องศา)	ช่วงเวลาเข้าที่(วินาที)	ค่าผิดพลาดสถานะคงตัว
75	0.478	0.41
80	0.41	0.49
90	0.394	0.36
95	0.423	0.49
100	0.515	0.33
105	0.61	0.31

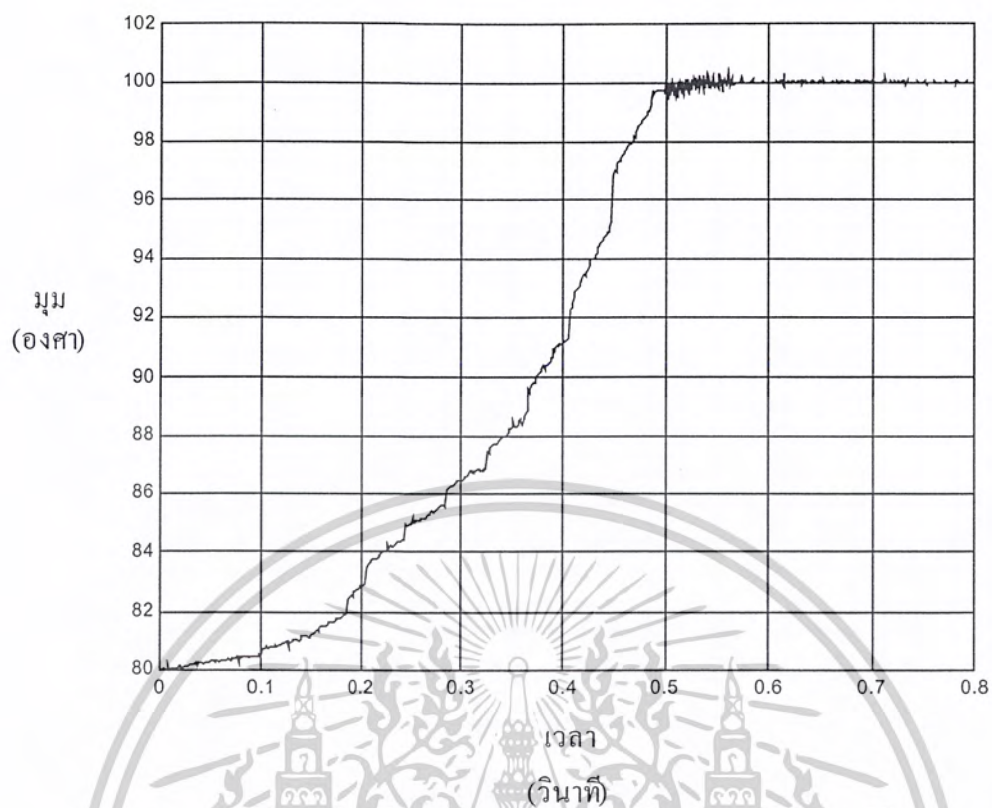
ผลการทดลองทำงานที่จุดอ้างอิง 75 องศา

ตารางที่ 4.7 การทดสอบตัวควบคุมที่ตำแหน่งอ้างอิง 105 องศา

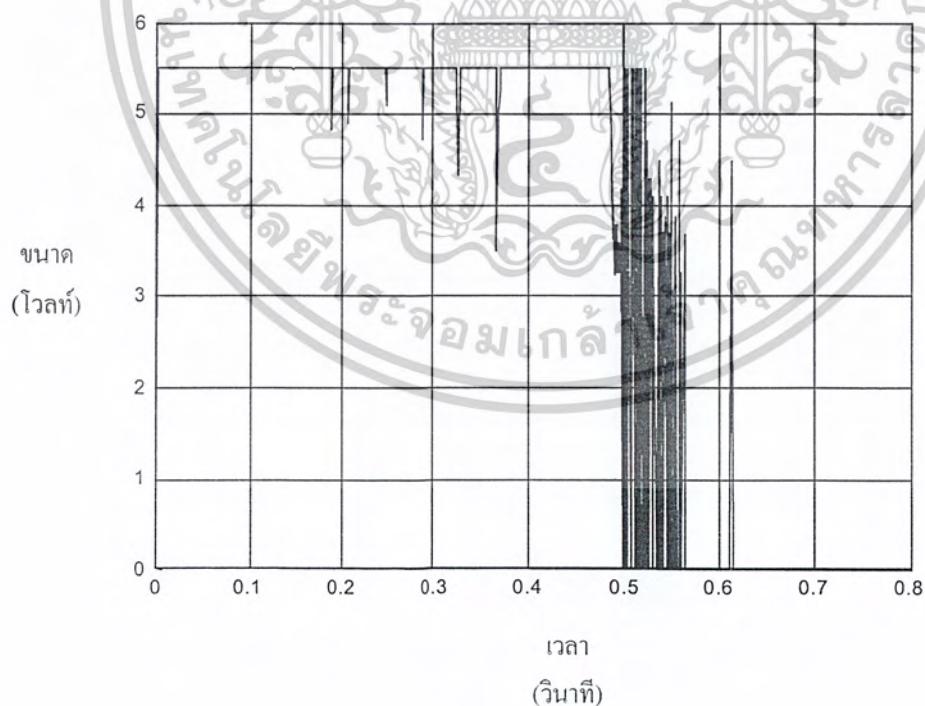
จุดเริ่มต้น(องศา)	ช่วงเวลาเข้าที่(วินาที)	ค่าผิดพลาดสถานะคงตัว
80	0.372	0.36
85	0.41	0.34
90	0.439	0.47
95	0.529	0.35
100	0.560	0.39
105	0.61	0.4

แสดงตัวอย่างของ ผลที่ได้จากการปรับค่าแล้ว เป็นการเริ่มจากจุดประมาณ 80 องศา ไปจุดอ้างอิงประมาณ 100 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

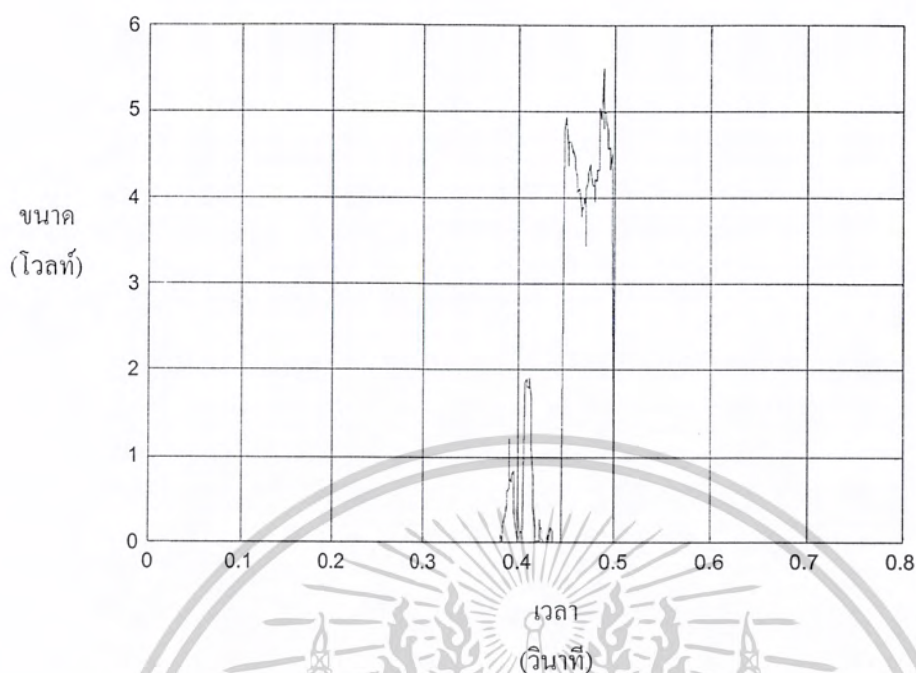


รูปที่ 4.17 แสดงผลตอบสนองของจุดอ้างอิงที่มุม 100 องศา



รูปที่ 4.18 สัญญาณควบคุมทางขวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



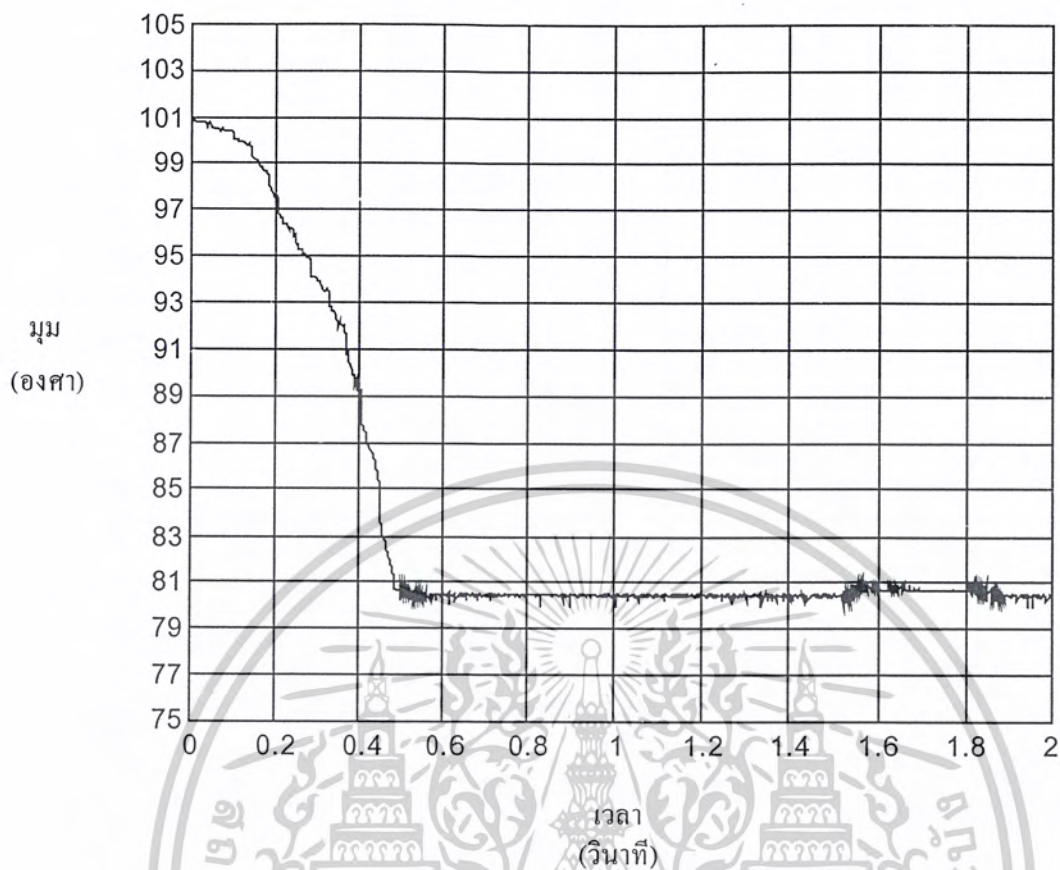
รูปที่ 4.19 สัญญาณควบคุมทางซ้าย

4.6 การทดลองร่วมกับตัวถาระ

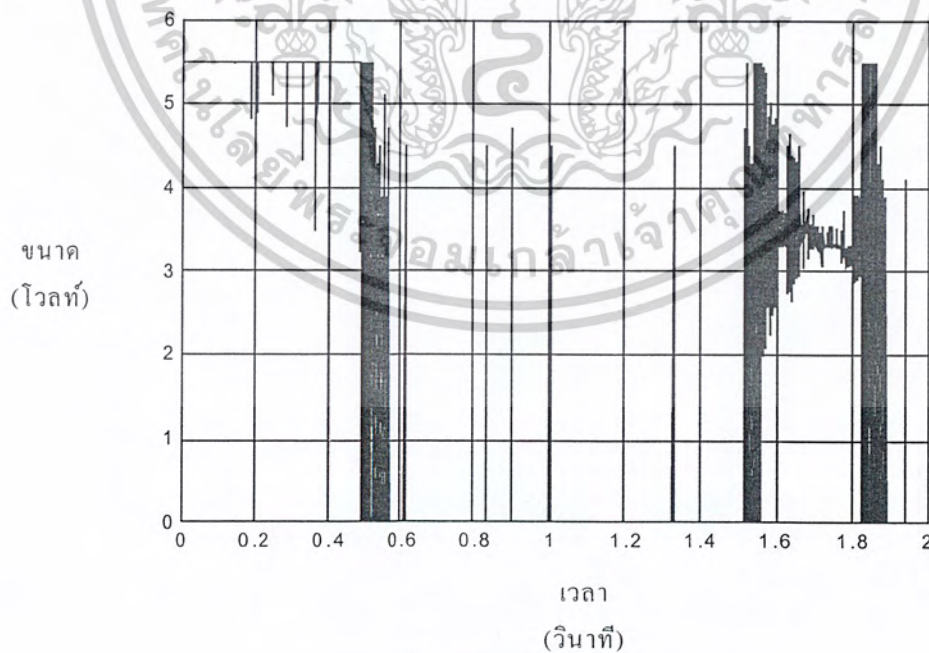
ได้ทำการทดลองโดยการถ่วงดินน้ำมันขนาดต่างๆกัน ที่บริเวณปลายแขน พบว่า ที่มวลน้ำหนัก ต่ำกว่า 100 กรัม แขนกลทดสอบสามารถทำการคงตัวได้เองอัตโนมัติ และที่มวลน้ำหนักมากกว่า 150 กรัม ตัวโลหะจำรูป จะเกิดการเสียรูปแม้จะชั่วขณะก็ตาม ทำให้ผลการใช้งานครั้งต่อไปมีการตอบสนองที่เปลี่ยนแปลง

ผลการทดลอง ป้อนตัวถาระหน่วงในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ป้อนสัญญาณอ้างอิงที่มุม 80 องศาและ ไล่ตัวถาระ ที่เวลา 1.52 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

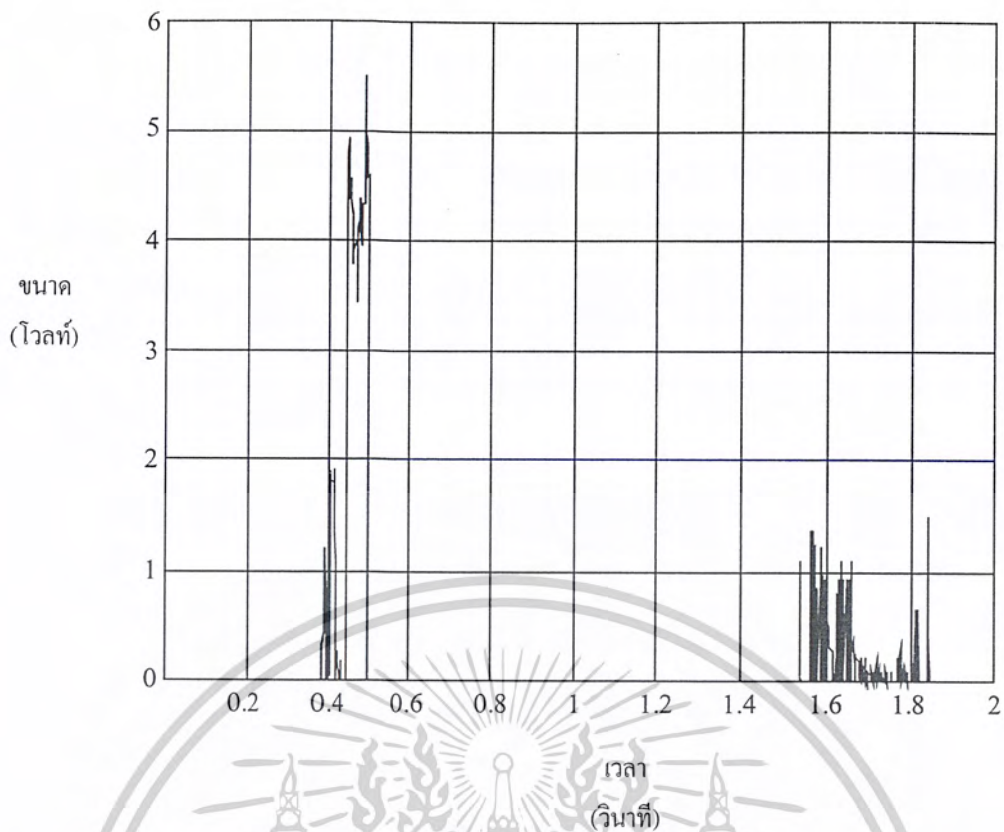


รูปที่ 4.20 ผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงที่มุม 80 องศา



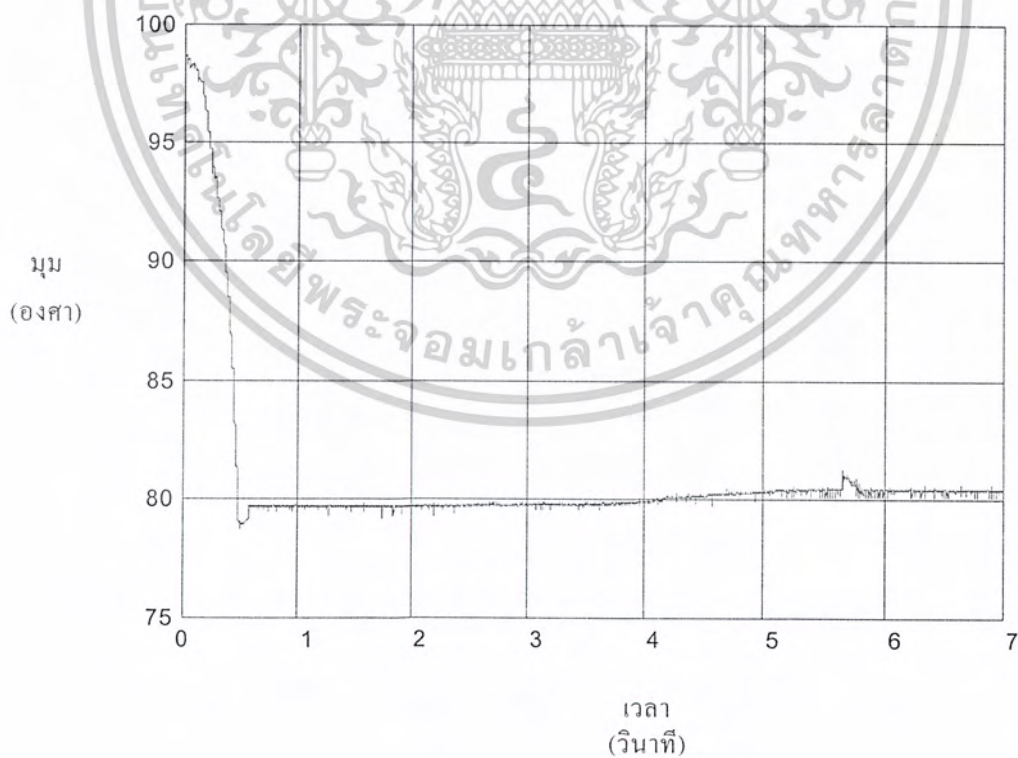
รูปที่ 4.21 สัญญาณควบคุมทางขวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 สัญญาณควบคุมทางซ้าย

ตัวภาระหน่วงในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่เป็นการป้อนค่าจุดอ้างอิงที่มุม 80 องศา และตัวภาระ ที่เวลา 4.2 วินาที



รูปที่ 4.23 แสดงผลตอบสนองกับจุดอ้างอิงที่มุม 80 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 สัญญาณควบคุมทางซ้าย

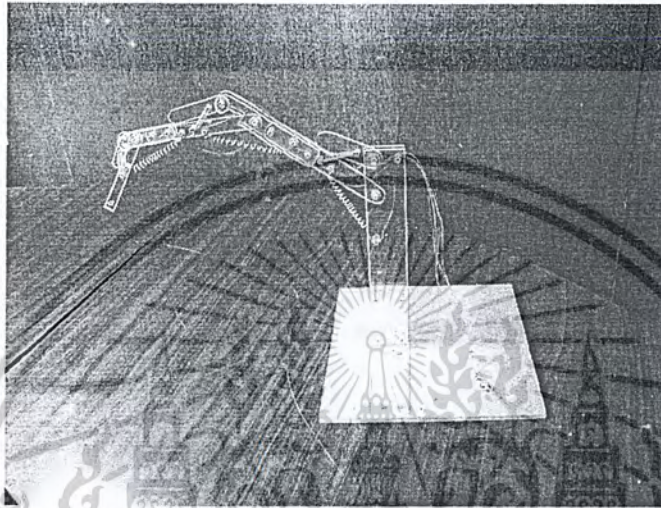
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดลองของแขนกลสามข้อต่อ

ในบทนี้ จะนำตัวควบคุมรวมที่ได้ออกแบบไว้แล้วในบทที่ 4 มาควบคุมแขนกลสามข้อต่อที่ได้ออกแบบและประกอบขึ้นเพื่อใช้ในการทดลองในโครงการนี้

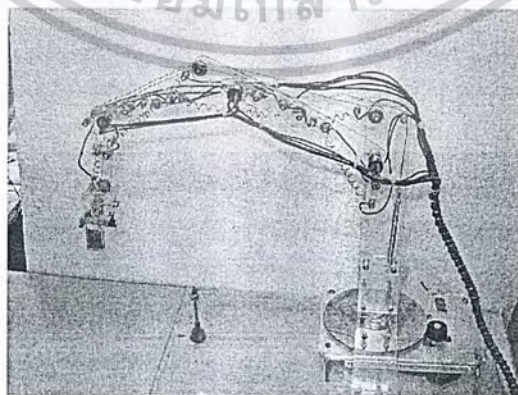
5.1 การออกแบบแขนกลกับสปริง



รูปที่ 5.1 แขนกลแบบใช้โลหะจํารูปกับสปริงต่อ 1 ข้อต่อ

จากรูป 5.1 เป็นการออกแบบด้วย โลหะจํารูป 1 ตัว กับสปริง ค่าแรงที่ได้จากทางกายภาพและสมการของสปริง เมื่อทดลองป้อนไฟฟ้าสามารถควบคุมตำแหน่งได้ดีในช่วงแรกเท่านั้น แต่เมื่อต้องการรักษาตำแหน่งของแขนกล หลังจากหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าจะไม่สามารถทำได้เพราะ เมื่อหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าค่าคงที่ในโลหะจํารูปไม่สามารถสู้แรงของค่าคงที่ในสปริงได้ จึงต้องทำการป้อนกระแสไฟฟ้าค้างไว้เพื่อรักษาตำแหน่ง ทำให้ตัวโลหะจํารูปเสื่อมรูปได้ โดยไม่สามารถแก้ปัญหในการระบายความร้อนเนื่องจากมีความยุ่งยากในการติดตั้งอุปกรณ์ระบายความร้อน ถึงแม้ว่าจะจ่ายกระแสไฟฟ้าเป็นกระแสสลับก็ตาม ดังนั้นจึงแก้ปัญหาดังกล่าวโดยการออกแบบให้ใช้โลหะจํารูป 2 เส้น ต่อ 1 ข้อต่อ

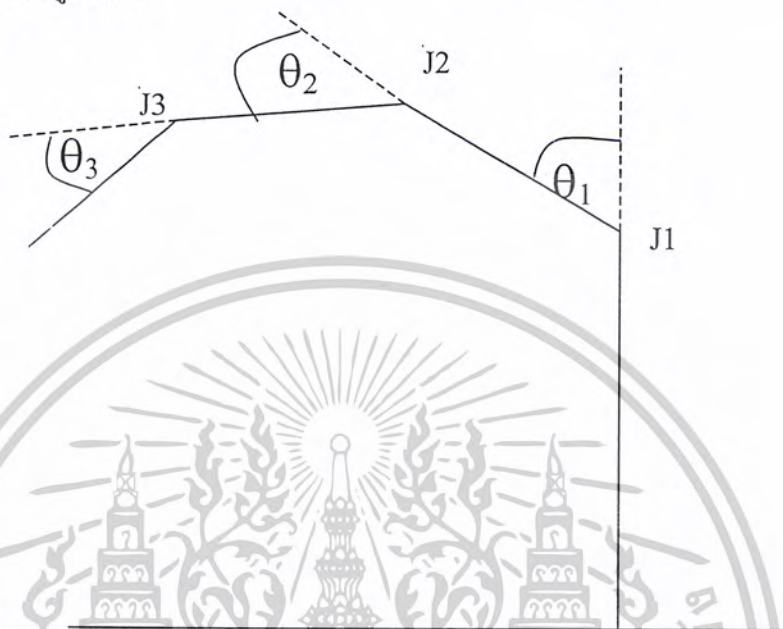
5.2 การออกแบบแขนกลกับโลหะจํารูป 2 เส้นต่อ 1 ข้อต่อ



รูปที่ 5.2 แขนกลแบบใช้โลหะจํารูป 2 เส้นต่อ 1 ข้อต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบแขนกลวิธีนี้สามารถควบคุมตำแหน่งของแขนกลได้ดีกว่าแบบอื่นๆ เพราะมีการปรับค่าตำแหน่งมุมได้ทั้ง 2 ทิศทาง จากรูปที่ 5.2 เมื่อไม่จ่ายกระแสให้แก่โลหะจํารูป แขนกลจะไม่สามารถรักษาสภาพเริ่มต้นได้ เนื่องมาจากค่านําหนักของตัวแขนกล จะเป็นแรงจากภายนอกที่ทำให้โลหะจํารูปเสียรูปไปได้



รูปที่ 5.3 โครงสร้างของแขนกล 3 ข้อต่อ

จากรูปเป็น โครงสร้างของแขนกล 3 ข้อต่อ โดยที่ J1 คือ ข้อต่อที่ 1 , J2 คือ ข้อต่อที่ 2 , J3 คือข้อต่อที่ 3

จากการทดลองเมื่อจ่ายไฟฟ้าให้แก่โลหะจํารูปพร้อมกันทั้ง 3 ข้อต่อ พบว่าโลหะจํารูปต้องการกระแสประมาณ 10 แอมป์ ทำให้แหล่งจ่ายไม่สามารถจ่ายกระแสได้เพียงพอ จึงได้ทำการทดลองควบคุมที่ละข้ออย่างต่อเนื่อง โดยกำหนดให้ทิศทางการเคลื่อนที่ของแขนกลเป็นการเคลื่อนที่ลง ดังแสดงมุมในรูปที่ 5.3

กำหนดให้มี

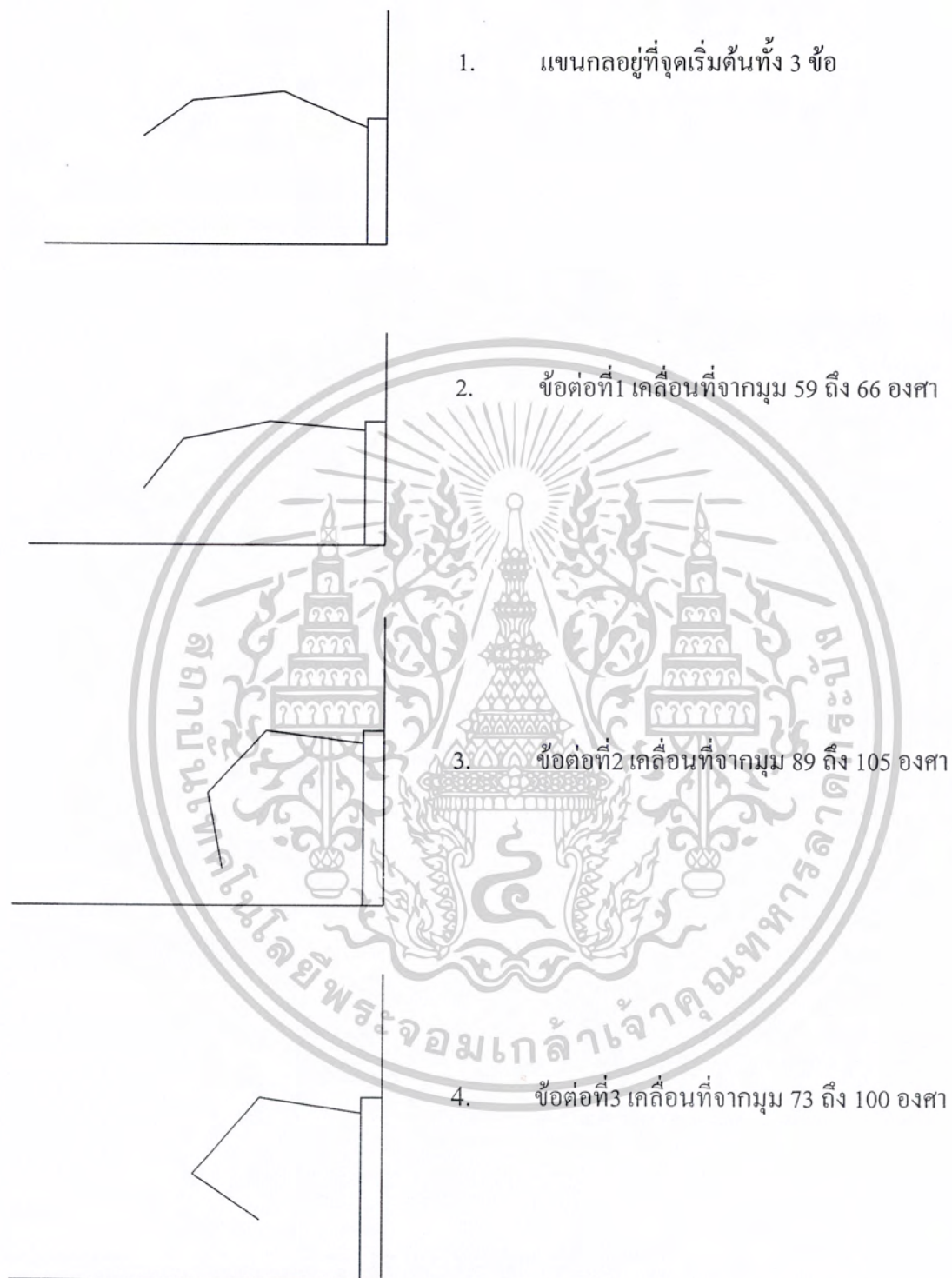
มุมเริ่มต้น θ_1 ของข้อต่อที่ 1 มีมุมเริ่มต้นเป็น 59 องศา

มุมเริ่มต้น θ_2 ของข้อต่อที่ 2 มีมุมเริ่มต้นเป็น 89 องศา

มุมเริ่มต้น θ_3 ของข้อต่อที่ 3 มีมุมเริ่มต้นเป็น 73 องศา

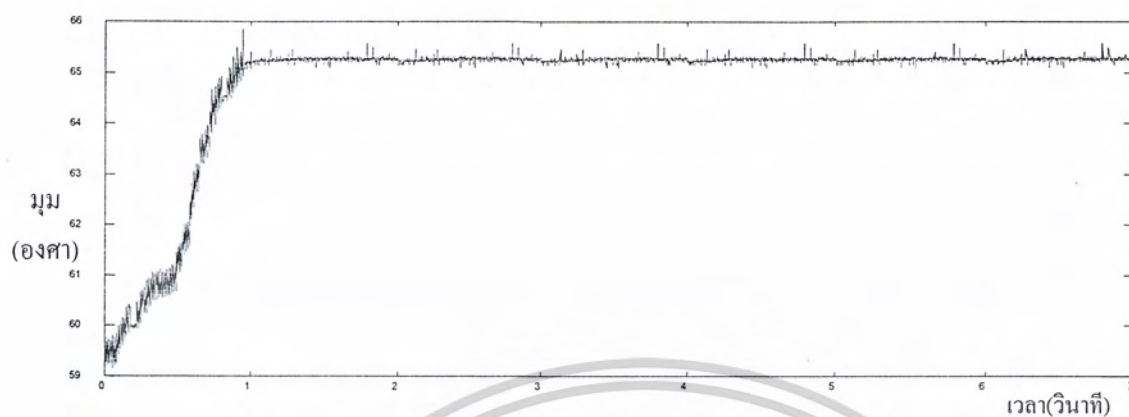
ทำการทดสอบตัวควบคุมโดยทำการกำหนดมุมเป้าหมายของ θ_1 , θ_2 และ θ_3 เป็น 66 105 และ 100 องศา ตามลำดับ ซึ่งกำหนดให้ตัวควบคุมส่งสัญญาณควบคุมช่วงละ 2 วินาที ตามลำดับข้อต่อที่ 1 จนถึงข้อต่อที่ 3 ได้ผลการทดลองตามรูปที่ 5.5 ถึง 5.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

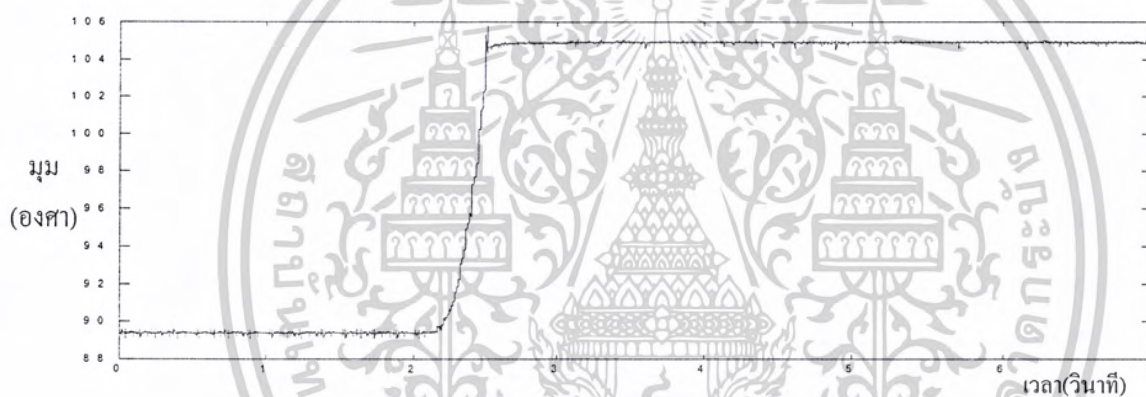


รูปที่ 5.4 แสดงลำดับขั้นการเคลื่อนที่ของแขนง

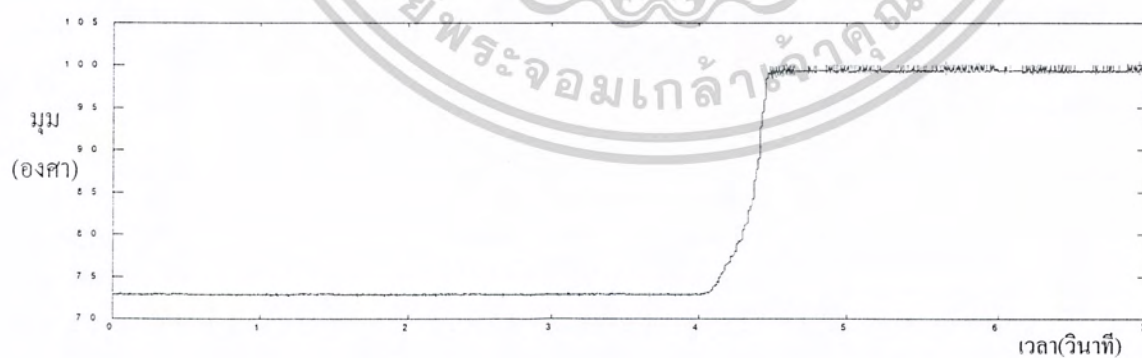
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 แสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของข้อต่อที่ 1



รูปที่ 5.6 แสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของข้อต่อที่ 2



รูปที่ 5.7 แสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของข้อต่อที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลอง พบว่าการเคลื่อนที่ลงของแกนกลให้ผลตอบแทนที่ได้ความเร็วในการเคลื่อนที่ ได้ใกล้เคียงกับแกนกลทดสอบ โดยที่ข้อต่อที่1ให้ผลตอบแทนที่ช้า เนื่องจากโครงสร้างของแกนกลในข้อต่อที่1 มีความไม่สมดุลเพราะต้องรับน้ำหนักจากข้อที่2 และ3 ส่วนข้อที่2 และข้อที่3 ให้ผลตอบแทนที่ดี

ทำการทดลองซ้ำแบบเดิม โดยกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของแกนกลเป็นการเคลื่อนที่ขึ้น

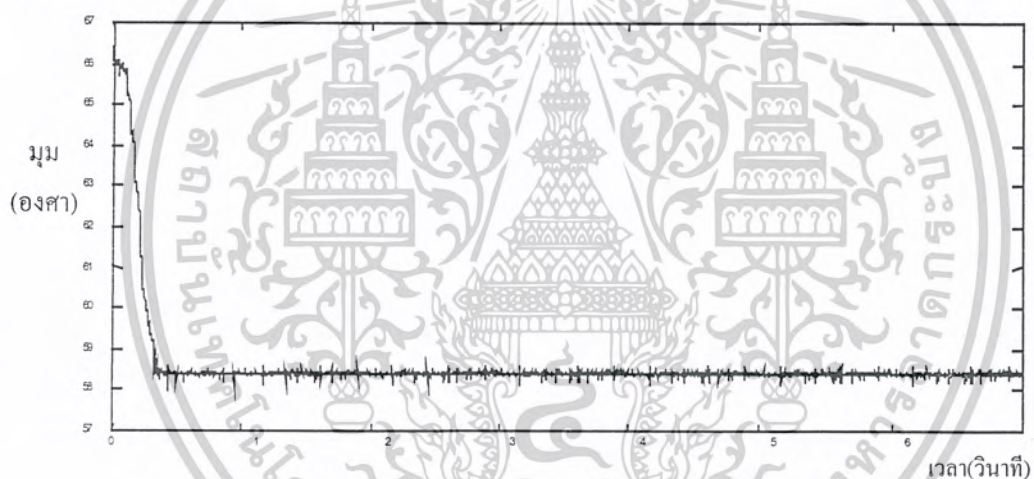
กำหนดให้

มุมเริ่มต้น θ_1 ของข้อต่อที่1 มีมุมเริ่มต้นเป็น 66 องศา

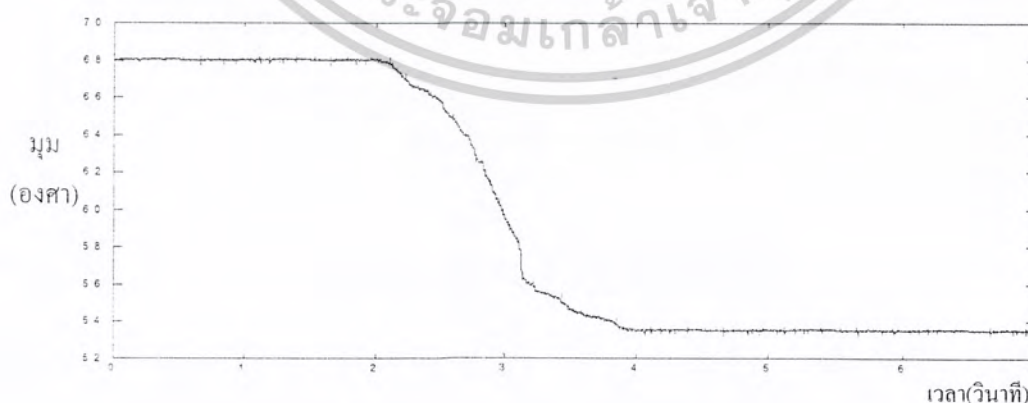
มุมเริ่มต้น θ_2 ของข้อต่อที่2 มีมุมเริ่มต้นเป็น 68 องศา

มุมเริ่มต้น θ_3 ของข้อต่อที่3 มีมุมเริ่มต้นเป็น 99 องศา

ทำการทดสอบตัวควบคุมโดยทำการกำหนดมุมเป้าหมายของ θ_1 , θ_2 และ θ_3 เป็น 57, 52 และ 85 องศา ตามลำดับ ซึ่งกำหนดให้ตัวควบคุมส่งสัญญาณควบคุมช่วงละ 2 วินาที ตามลำดับข้อต่อที่1 จนถึงข้อที่3

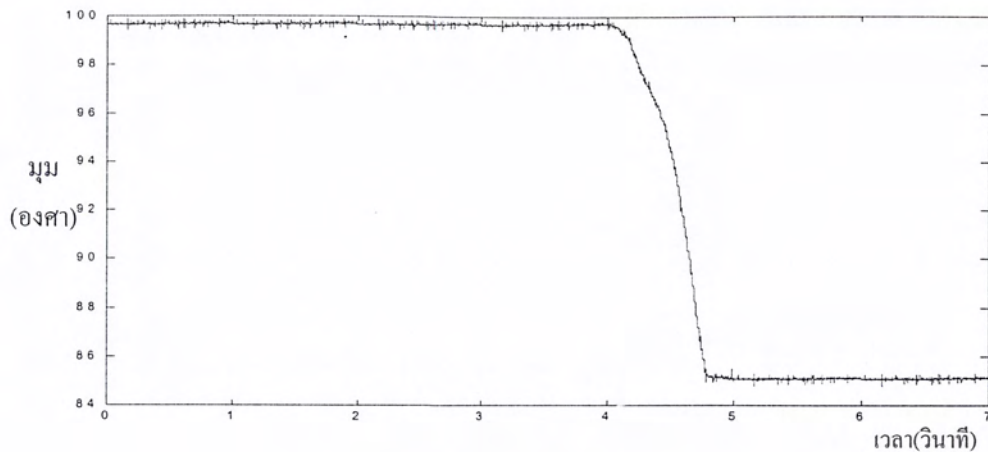


รูปที่ 5.8 แสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของข้อต่อที่ 1



รูปที่ 5.9 แสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของข้อต่อที่2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 แสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของข้อต่อที่ 3

จากผลการทดลอง พบว่าข้อต่อที่ 1 ให้ผลตอบสนองที่เร็วในช่วงแรกแต่มีช่วงเวลาที่ผลตอบสนองทำให้โลหะจำรูปไม่เคลื่อนที่แต่มีความร้อนเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นประมาณ 1.4 องศา มากกว่าจุดที่ตั้งค่าไว้จากตัวควบคุม ข้อต่อที่ 2 ให้ผลตอบสนองที่ช้ามากประมาณ 2 วินาที และไม่สามารถเข้าสู่จุดเป้าหมายได้ อันเนื่องมาจากโครงสร้างของแขนกล ข้อต่อที่ 3 ให้ผลตอบสนองที่ดี เช่นเดียวกับการเคลื่อนที่ลง และมีช่วงเวลาที่เข้าที่ประมาณ 0.5 วินาที และค่าผิดพลาดประมาณ 0.1 องศา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง

6.1 บทสรุป

ในโครงการนี้ได้ทำการทดลองโดยใช้การจ่ายกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดความร้อนแทนการให้ความร้อนโดยตรง ซึ่งพบว่าเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงรูปของโลหะจำรูปนั้น จะแปรตามค่ากระแส และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะจำรูป เมื่อนำค่าของอินพุตที่เป็นกระแสไฟฟ้าจ่ายให้แก่โลหะจำรูปจะพบว่ามีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้น

จากผลการทดลองด้วยวงจรอนุบาลอกโดยที่ออกแบบด้วยตัวควบคุมแบบ P ที่ใช้วงจรออฟแอมป์ ผลตอบสนองเชิงเวลาที่ได้จะมีค่าออฟเซตสูงมาก และเกิดค่าพุ่งเกินเป็นผลให้ตัวโลหะจำรูปไม่สามารถคืนตัวได้ และยากต่อการออกแบบตัวควบคุม เนื่องมาจากค่าข้อมูลที่ได้ไม่มีความละเอียดเพียงพอ จึงนำ ทฤษฎีการควบคุมแบบดิจิทัล มาใช้ในการหา แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากผลตอบสนองวงเปิดพบว่าระบบมีค่า เวลาไร้ผลตอบสนองสูง และมีความไม่เป็นเชิงเส้น แม้จะใช้วิธี identification แบบ off line ยังไม่สามารถประมาณได้ใกล้เคียง จากปัญหาดังกล่าว จึงได้นำทฤษฎีฟuzzy มาช่วยออกแบบตัวควบคุมด้วยการแบ่งช่วงการควบคุม

จากผลการออกแบบตัวควบคุมที่แบ่งช่วงต้องอาศัยประสบการณ์และความเข้าใจต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบ อีกทั้งยังมีปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลอง ซึ่งเกิดจากคุณสมบัติของตัวโลหะจำรูป

6.2 ปัญหาที่พบในการทดลอง

- มีข้อจำกัดในการต่อร่วมกับตัวภาระ ซึ่งมีผลจากแรงโน้มถ่วง

จากรูปที่ 5.2 จะเห็นว่าข้อต่อที่ 3 (ข้อปลาย) ของแขนกล จะไม่มีปัญหาด้านแรงโน้มถ่วง แต่ข้อต่อที่ 2 และ ที่ 1 จะเกิดปัญหาเนื่องจากแรงโน้มถ่วง เพราะต้องแบกภาระของข้อต่อที่ 3 ทำให้การรักษาค่าตำแหน่งมุมของแขนกลทำได้ยาก ดังนั้น ต้องจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ตัวโลหะจำรูปค่อนข้างนานเป็นผลทำให้โลหะจำรูปเกิดการเสื่อมตัวหรือเสียรูปไป

- โลหะจำรูปกินกระแสสูง

การรักษาค่าตำแหน่งของแขนกลจากที่กล่าวมา ก็ต้องจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่โลหะจำรูปซึ่งในการจ่ายแต่ละข้อต่อ จะมีการสูญเสียกระแสไฟฟ้าประมาณ 2- 3 แอมป์ ถ้าเราจะรักษาค่าตำแหน่งของแขนกลพร้อมกันทั้ง 3 ข้อต่อ จึงไม่สามารถทำได้ เนื่องจากวงจรจ่ายกระแสให้แก่โลหะจำรูปไม่สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้เพียงพอ ทำให้เกิดความล่าช้าในการรักษาค่าตำแหน่งมุมของแขนกล

- โลหะจำรูปมีราคาแพง

เมื่อเทียบอายุการใช้งานกับมอเตอร์แล้ว โลหะจำรูปมีอายุการใช้งานที่ต่ำกว่า ดังนั้น ถ้าใช้ในระยะเวลาเท่ากัน โลหะจำรูปจึงเสียค่าใช้จ่ายสูงกว่า ด้วยราคาเส้นละ 100บาท โดยที่ 1 ข้อต่อ ใช้งาน โลหะจำรูป 2 เส้น

- ยังไม่มีวิธีป้องกันโลหะจำรูป

อุณหภูมิ เป็นตัวแปรหลักที่ทำให้โลหะจำรูปเสื่อมสภาพ และเสียหาย การควบคุมอุณหภูมิ และระบายความร้อน จึง เป็นแนวทางแก้ไข แต่เนื่องจาก นำหนักของอุปกรณ์ระบายความร้อนนั้น ทำการติดตั้งได้ลำบากเพราะ แขนกลที่ทำจากโลหะจำรูปมีขนาดค่อนข้างเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โลหะจํารูปมีความร้อนสะสม
การใช้งานโลหะจํารูปให้เคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้ามจะทำให้ได้ยาก ถ้าโลหะจํารูปนั้นยัง
คลายความร้อนออกไม่หมด ทำให้เกิดแรงต่อต้าน ส่งผลให้ควบคุมตำแหน่งมุมของแขนกลไม่ได้
และโลหะจํารูปอาจเสียหาย

- การติดตั้งทำได้ยาก
เนื่องจากโลหะจํารูปมีคุณสมบัติการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน การบัดกรีและการยึดกับ
น็อตจึงทำได้ยาก

6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

การออกแบบแขนกล เป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญมาก เพราะส่งผลถึงการควบคุมตำแหน่ง
มุมของแขนกล และขีดจำกัดของระยะมุมที่แขนกลสามารถเคลื่อนที่ไปได้ รวมถึงปัญหาที่เกิดขึ้น
จากทางไฟฟ้าและทางฟิสิกส์ ล้วนมีผลมาจากการออกแบบแขนกล

จากการทดลองนี้เป็นควบคุมตำแหน่งมุมของแขนกลในแนวตั้ง ซึ่งมีปัญหาเรื่องของตัว
ภาระและ แรงโน้มถ่วง จึงเห็นว่าน่าจะมีการพัฒนาในแนวระนาบ เพื่อลดปัญหาด้านแรงโน้มถ่วงลง
ได้ อีกทั้งด้านการระบายความร้อนของโลหะจํารูป ถ้ามีการพัฒนาให้เกิดขึ้น จําทำให้ปัญหาความ
ร้อนสะสม ลดน้อยลง

จากการทดลองที่ได้กล่าวนั้น ทำให้เราทราบถึงคุณลักษณะทางไฟฟ้า รวมถึงปัญหาต่างๆที่
เกิดขึ้นระหว่างการทดลอง จึงควรนำปัญหาเหล่านี้มาหาวิธีแก้ไขและพัฒนา เพื่อที่จะใช้งาน โลหะ
จํารูปได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

เอกสารอ้างอิง

- [1] รศ. สุเชียร เกียรติสุนทร, “พื้นฐานวิศวกรรมระบบควบคุมในกระบวนการอุตสาหกรรม” , พิมพ์ครั้งที่ 1 : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น), 2539.
- [2] ดร.บัญชา ชนบุญสมบัติ, “โลหะจำรูป” , :ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ(MTEC),2543
- [3] ธิดาพร พิทักษ์พรพันธุ์ , วิทยานิพนธ์เรื่อง “ตัวควบคุมพีชซีแบบปรับแต่งพารามิเตอร์ด้วยตนเอง” : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2539.
- [4] รศ.ดร. มนัส สัจจวรศิลป์,วรรธน์ ภัทรอมรกุล, “ คู่มือการใช้งานMATLAB” ,พิมพ์ครั้งที่2 : อินโฟเพรส , 2543.
- [5]Katsuhiko Ogata , “Modern Control Engineering” , 3rd ed. : Prentice Hall , Inc.
- [6]Katsuhiko Ogata , “Discrete Time Control Systems” , 2rd ed. : Prentice Hall , Inc.,1987.
- [7]Charlse L.Phillips , and H.Troy Nagle, “Digital Control System Analysis and Design” , 3rd ed.: Prentice Hall , Inc.,1990.

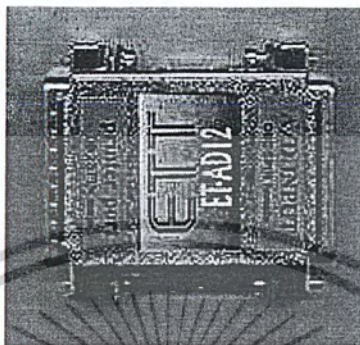


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.
รายละเอียดของอุปกรณ์



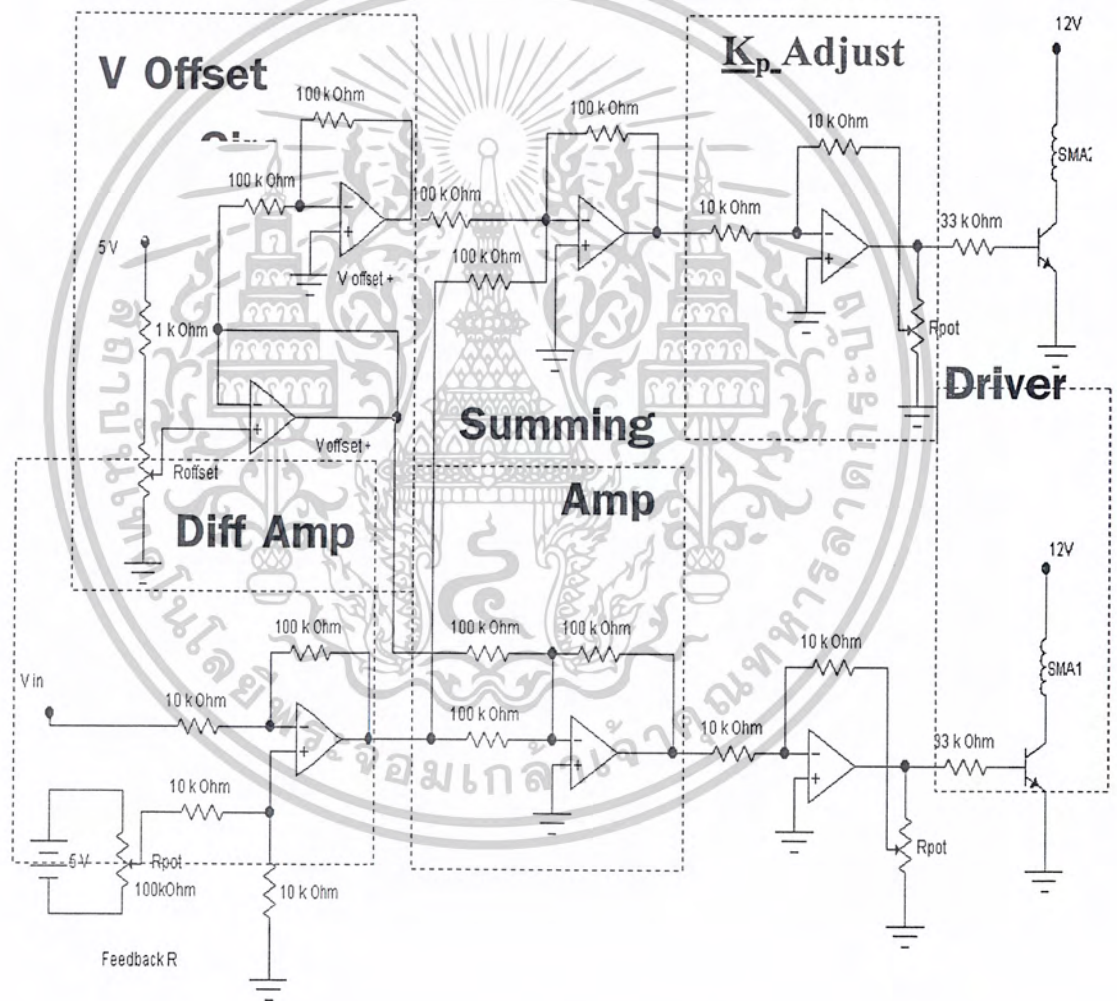
รูปที่ ก1 อุปกรณ์แปลงสัญญาณอนาลอกเป็น สัญญาณดิจิทัล

ET-AD12 เป็นบอร์ดใช้เปลี่ยนสัญญาณจาก ANALOG ให้เป็นสัญญาณทางดิจิทัล ขนาด 12 BIT โดยออกแบบให้เป็น บอร์ดขนาดเล็ก ใช้เชื่อมต่อเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ PC ทางพอร์ตขนาน (PRINTER PORT) ทำให้การเชื่อมต่อเป็นไปได้โดยง่าย ไม่ต้องเปิดฝาเครื่องคอมพิวเตอร์ สามารถเขียน โปรแกรมอ่านค่า A TO D ได้หลายภาษาตามความถนัดของผู้ใช้ เช่น ภาษาซี, ปาสคาล, เบสิก หรือ ภาษาอื่นๆ ที่มีคำสั่งสนับสนุนการทำงาน กับพอร์ตได้

- Analog to Digital , 12 BIT LTC1298 , 2 CHANNEL
- CONVERSION TIME : 60 μ S , GAIN ERROR + / - 2 LSB
- SAMPLING RATE : 11.1 KHZ
- ANALOG INPUT RANGE : - 0.05V TO + 5.05V
- POWER SUPPLY : + 7VDC TO +10VDC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.
วงจรที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ ข1 วงจรควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

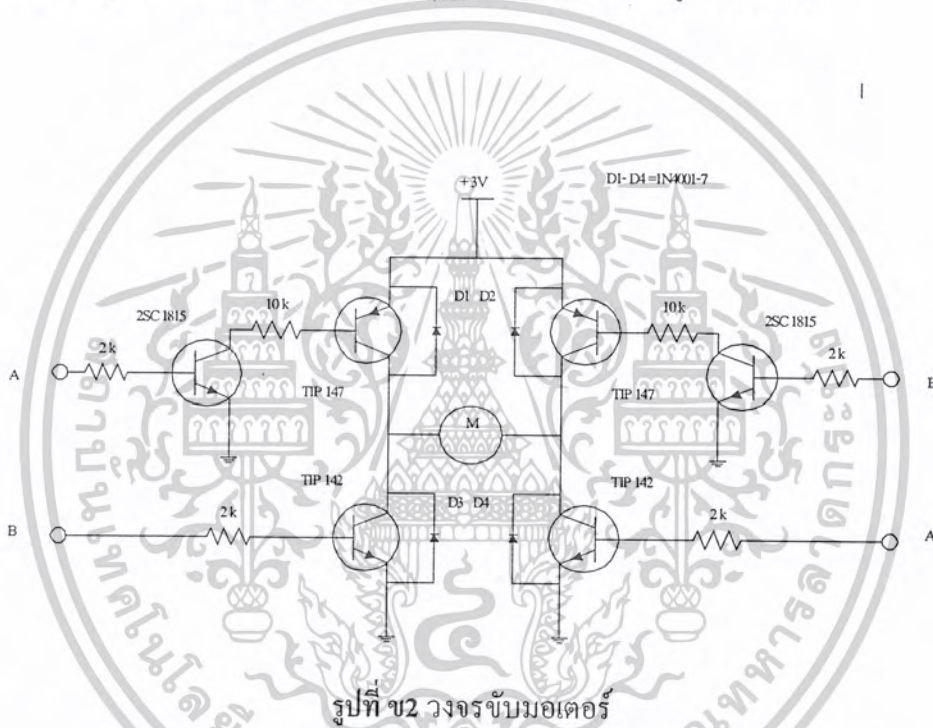
การทำงานของวงจรประกอบไปด้วย 4 ส่วนด้วยกัน กล่าวคือ

1) V Offset Circuit เป็นวงจรสร้างแรงดันที่ใช้เปรียบเทียบกับแรงดันที่ได้จากแรงดันอ้างอิงที่เอาท์พุท ซึ่งค่า Offset ปรับได้ตามค่า R-pot ใช้โอปแอมป์เป็นบัฟเฟอร์ให้ได้แรงดันคงที่ตามต้องการ และสร้าง V-Offset ค่าลบ ด้วยวงจร อินเวอร์ตดิ้งแอมพลิฟาย

2) Differential Amplifier ทำหน้าที่สร้างสัญญาณผลต่างระหว่างแรงดันที่ต้องการกับแรงดันที่อ้างอิงโดยแก่ผลค่าความต้านทาน R_{in} ที่มีค่าสูงกว่าประมาณ 10 เท่า และนำสัญญาณที่ได้ไปเปรียบเทียบกับ V-Offset เพื่อตัดช่วงที่ไม่ต้องการทำงานออก

3) Summing Amplifier เป็นวงจรที่นำค่า V-Offset มารวมกับแรงดันผลต่างจากวงจรขยายความแตกต่าง เพื่อตัดค่า Offset ที่สามารถยอมรับได้ออก

4) Driver เป็นวงจรทรานซิสเตอร์คอมมอนอิมิตเตอร์มีอัตราขยายประมาณ 100 เท่า สามารถหาค่า R_B ที่ใช้ได้ $33 \text{ k}\Omega$ เพื่อให้ได้ $I_{c,max}$ ไม่เกินที่ โลหะจํารูปจะทนได้



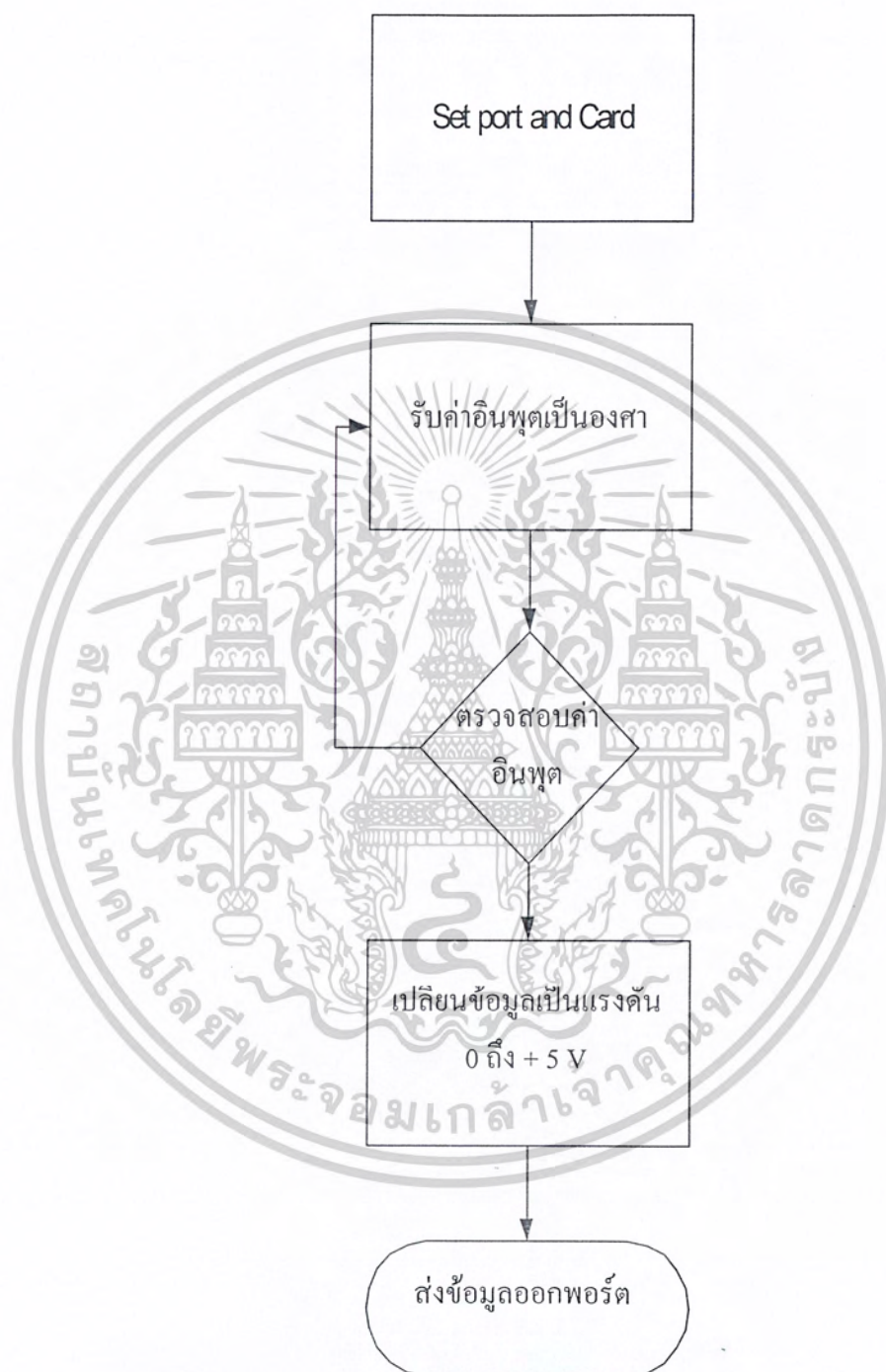
การทำงานของวงจร เป็นวงจรขับมอเตอร์ แบบ PWM (Pulse Width Modulation) มีการทำงาน 4 แบบ

- แบบ Stop Mode คือการจ่ายไฟให้จุด A และจุด B มีค่าเท่ากันเป็น 0
- แบบ Forward Mode คือการจ่ายไฟให้จุด A เป็น + เมื่อเทียบกับจุด B
- แบบ Reverse Mode คือการจ่ายไฟให้จุด A เป็น - เมื่อเทียบกับจุด B
- แบบ Break Mode คือการจ่ายไฟให้จุด A และ จุด B เป็น -

โดยเราสามารถควบคุมความเร็วตามค่าความกว้างของพัลส์ที่จ่ายจากคอมพิวเตอรืผ่านวงจรสร้าง Pulse Width Modulation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.
แผนภูมิลำดับขั้นการทำงานของโปรแกรม



รูปที่ ค1 แผนภูมิลำดับขั้นการทำงานของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.
โปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง

```

#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <math.h>
#include <bios.h>
#include <dos.h>

#define BASE_ADDR          0x378
#define DATA_ADDR        BASE_ADDR + 0
#define STATUS_ADDR       BASE_ADDR + 1
#define CONTROL_ADDR      BASE_ADDR + 2

#define CH 0
#define DAADR 0x0300 /* DA ch.1 I/O adress */
#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 2000 /* Number of collected data */
#define VCT 0x0b /* Interrupt vector IR3 */
#define IMR 0x21
#define MASK 0x08 /* Interrupt mask IR3 */

void DtoA(int needed_ch, long volt_data);

int read_status(void);
void send_control(int com);
int read_data(void);
void READCH0(void);
double status,data;
long ADC_DATA;
int READCOUNT;
long ADC_BUFF;

char s[20];
int i,j,n,nn,p1,p2;
unsigned int dl,dh,vx1,vx2,dd1,dd2;
double volt,volt1,volt2,ref,ref0,ref1,Ts;
double x[NN];
double ya,y2,y3,ya2,y22,y32,ee[NN],yt1[NN],yt2[NN];
FILE *fp_w;
int inter=0;

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 */

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

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);

/*****inital variables*****/
n=2; nn=NN;
yt1[0]=0.0; yt2[0]=0.0; ee[0]=0.0; volt=0.0;
yt1[1]=0.0; yt2[1]=0.0; ee[1]=0.0;

printf("  Input Position (degree 70-110 ) = "); gets(s);

ref1=atof(s);
ref=ref1;

/***** MAIN ROUTINE *****/
while(n<nn)
{
  if(kbhit() !=0) break;
  if(inter==1)
  {
    outp(DATA_ADDR,0x0b); //cs=1
    outp(DATA_ADDR,0x03);
    outp(DATA_ADDR,0x01);
    outp(DATA_ADDR,0x03);
    outp(DATA_ADDR,0x01);
    outp(DATA_ADDR,0x03);
    outp(DATA_ADDR,0x00);
    outp(DATA_ADDR,0x02);
    outp(DATA_ADDR,0x01);
    outp(DATA_ADDR,0x03); //
    ADC_DATA = 0X00 ; // INITIAL ADC DATA
    outp(DATA_ADDR,0x01);
    for(i=1;i<=13;i++)
    {
      ADC_BUFF = inp(STATUS_ADDR)&0x80;
      ADC_BUFF = ADC_BUFF << 6; //..80=B8..LEFT6..B14
      ADC_BUFF = ADC_BUFF >> i; //14-i ...13. ..12...11...10
      ADC_DATA = ADC_DATA|ADC_BUFF;
      outp(DATA_ADDR,0x03);
      outp(DATA_ADDR,0x01);
    }
    ADC_DATA = ADC_DATA &0x0fff;
    outp(DATA_ADDR,0x0b);

    x[n]=(ADC_DATA/23.0465)-8; //angle
    ee[n]=ref-x[n];

    ya=3.31356*(ee[n]-0.9795*ee[n-1])+0.987*yt1[n-1];
    y2=1.6804*(ee[n]-1.9656*ee[n-1])+0.96596*ee[n-2])+1.96453*yt1[n-1]-0.9648*yt1[n-2];

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

y3=4.98739*(4.82*ee[n]+4.81*ee[n-1]-yt1[n-1]);

if(x[n]>75) if(x[n]<82.5) yt1[n]=ya;
if(x[n]>82.5) if(x[n]<90) yt1[n]=ya*(90-x[n])/7.5+y2*(x[n]-82.5)/7.5;
if(x[n]>90) if(x[n]<97.5) yt1[n]=y2*(97.5-x[n])/7.5+y3*(x[n]-90)/7.5;
if(x[n]>97.5) if(x[n]<105) yt1[n]=y3;

if(yt1[n]>5.5) yt1[n]=5.5;
if(yt1[n]<0.0) yt1[n]=0.0;
volt1=yt1[n];

        ee[n]=-ee[n];
y32=3.31356*(ee[n]-0.9795*ee[n-1])+0.987*yt2[n-1];
y22=1.6804*(ee[n]-1.9656*ee[n-1]+0.96596*ee[n-2])+1.96453*yt2[n-1]-0.9648*yt2[n-2];
ya2=4.98739*(4.82*ee[n]+4.81*ee[n-1]-yt2[n-1]);

if(x[n]>75) if(x[n]<82.5) yt2[n]=ya2;
if(x[n]>82.5) if(x[n]<90) yt2[n]=ya2*(90-x[n])/7.5+y22*(x[n]-82.5)/7.5;
if(x[n]>90) if(x[n]<97.5) yt2[n]=y32*(97.5-x[n])/7.5+y32*(x[n]-90)/7.5;
if(x[n]>97.5) if(x[n]<105) yt2[n]=y32;

if(yt2[n]>5.5) yt2[n]=5.5;
if(yt2[n]<0.0) yt2[n]=0.0;
volt2=yt2[n];
ee[n]=-ee[n];

if(ee[n]>0.5)
{
    p1=n;
    volt2=0.0;
}
if(ee[n]<-0.5)
{
    p2=n;
    volt1=0.0;
}
if(ee[n]>-0.5)
if(ee[n]<0.5)
{
    yt1[n]=0.0;
    yt2[n]=0.0;
    volt1=0.0;
    volt2=0.0;
}

        DtoA(0,volt1);
        DtoA(1,volt2);
        inter=0;
        n++;
    }

    if(x[n-1]<70)    break;
    if(x[n-1]>110.0)    break;
}

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

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

/* OUT 0 V. TO DA CH.1*/
volt=0.0;
DtoA(0,volt);
DtoA(1,volt);

/* WRITE DATA TO FILE */
fp_w = fopen("tt3.txt","w");
n=0;
while(n<nn){ fprintf(fp_w,"%f%f%f\n",x[n],yt1[n],yt2[n]);
              n++; }

close(fp_w);
printf("\n Final Position %f (x0.1 degree) = ",x[n-1]);
x[n-1]=p1;
printf("\n Setting time L1 %f (x0.1 degree) = ",x[n-1]);
x[n-1]=p2;
printf("\n Setting time L2 %f (x0.1 degree) = ",x[n-1]);
}

void DtoA(int needed_ch, long volt_data) //CH... DtoA
{
vx1=volt_data/da_deta;
dl=vx1&0xff;
dh=(vx1>>8)&0x0f;
outp(DAADR+2,needed_ch*4+1);
outp(DAADR+0,dl);
outp(DAADR+1,dh);
outp(DAADR+2,needed_ch*4+3);
outp(DAADR+0,0x00);
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้