

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ชุดระบบปฏิบัติการขบวนการ

PROCESS CONTROL PLANT



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 72875
วันเดือนปี 25 ส.ย. 2550

b. 112738AA
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม สาขาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2549

ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง **ชุดระบบปฏิบัติการขบวนการ**
PROCESS CONTROL PLANT

ผู้จัดทำ

นางสาว เมธิรา	ตันสวัสดิ์	46010611
นางสาวอัจฉรา	ถิรชนบูรณ์	46010950
นายเอกปิติ	สุขปิติ	46010988


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย วีรจจา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดระบบปฏิบัติการขบวนการ

โดย

นางสาวเมธิรา ตันสวัสดิ์ 46010611

นางสาวอัจฉรา ถิรธนบูรณ์ 46010950

นายเอกปิติ สุขปิติ 46010988

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ธีรรัฐจา

ปีการศึกษา 2549

บทคัดย่อ

ปฏิญญาพันธบัตรฉบับนี้ นำเสนอวิธีการจัดทำชุดทดลองเกี่ยวกับระบบปฏิบัติการควบคุมระดับน้ำ เพื่อใช้เป็นเครื่องมือสำหรับทำการศึกษา และทดลองกระบวนการควบคุมระบบด้วยตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์และอนุพันธ์ เพิ่มเติมจากชุดทดลองระบบที่ใช้ในห้องปฏิบัติการซึ่งมีราคาสูง โดยขั้นตอนดำเนินการ เริ่มจากการออกแบบและประกอบโครงสร้างของระบบควบคุม ศึกษาและออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่จำเป็นสำหรับระบบ การเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ควบคุมให้ระบบดำเนินไปตามเป้าหมายที่ต้องการ และสุดท้ายทำการทดลอง ซึ่งจากการทดลองพบว่าระบบควบคุมที่ทำการออกแบบนี้ สามารถนำมาใช้เป็นชุดทดลองระบบควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์และอนุพันธ์ได้จริงสอดคล้องกับทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PROCESS PLANT CONTROL

By

Miss.Methira Tansawat 46010611

Miss.Ajchara Thirathanaboon 46010950

Mr. Aekpiti Sukpiti 46010988

Advisor

Assoc.Prof.Dr.Vanchai Riewruja

Academic Year 2006

ABSTRACT

This thesis presents theory and implementation of procedures of liquid-level control and process control using microcontroller. It has been conducted in the following steps. Firstly, equipments and a structure of process control plant are studied, designed and constructed. Secondly, necessary electronic circuits are studied and implemented. Thirdly, interfacing programs are composed. Finally, the experiments on the water-level controlled plant are conducted. The results show that the liquid-level system is controllable to a set point or a desired level with negligible error by using PID controller.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำปฏิญานិพนธ์ฉบับนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จากความช่วยเหลือเป็นอย่างดีของ รศ.ดร.วันชัย ธีร์รุจา ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำที่ดีมาโดยตลอดตั้งแต่เริ่มโครงการ รวมทั้งเอื้อเฟื้ออุปกรณ์ที่จำเป็น และความช่วยเหลืออื่นๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการ ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อ.ธวัชชัย คำศรี ที่ติดตามถามถึงความคืบหน้าและให้คำปรึกษาอยู่เสมอทั้งในส่วนของโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์และระบบการทำงานของโครงการ อ.วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์ ที่ให้คำแนะนำในส่วนของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และอ.วรรณดี เพชรธมมิลำค่า รวมถึงอาจารย์ท่านอื่นๆ ที่ให้คำแนะนำต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในโครงการนี้ด้วย

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมวัดคุมที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับภาพรวมของโครงการและแนวทางในการดำเนินโครงการ

อีกทั้งขอขอบคุณพี่วิโรจน์ วุฒิ (พี่น้อย) และพี่อมรเทพ กาพย์แก้ว (พี่เพชร) ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ และคอยช่วยเหลือและให้คำแนะนำวิธีการใช้เครื่องมือต่างๆ รวมถึงเพื่อนๆ ทุกคนทั้งสาขาแมคคาทรอนิกส์และสาขาระบบควบคุมที่ให้คำแนะนำ ปรึกษา ให้กำลังใจ สอบถามความคืบหน้า แลกเปลี่ยนความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการ ตลอดจนสนับสนุนอุปกรณ์ต่างๆ ของโครงการเป็นอย่างดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยเป็นกำลังใจที่ดีมาโดยตลอด รวมถึงการสนับสนุนในเรื่องของงบประมาณที่ขาดเหลือ ตลอดจนเป็นแรงบันดาลใจที่ดีที่สุดที่ทำให้โครงการนี้สำเร็จสมบูรณ์ลงได้

ผู้จัดทำ

นางสาวเมธิรา

ต้นสวัสดิ์

นางสาวอังฉรา

ดิธธนบูรณ์

นายเอกปิติ

สุขปิติ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญภาพ	VII
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 กล่าวนำ	1
1.1 วัตถุประสงค์ในการทำปริญญานิพนธ์	2
1.2 ขั้นตอนการศึกษาและการจัดทำโครงการ	2
1.3 รายละเอียดของปริญญานิพนธ์	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ส่วนประกอบของระบบระดับของเหลว	4
2.1.1 ค่าความต้านทานและค่าความจุของระบบที่เกี่ยวกับระดับของเหลว	4
2.1.2 กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับระบบระดับของเหลว	7
2.2 ทฤษฎีระบบควบคุมแบบต่างๆ	9
2.2.1 ระบบควบคุมแบบสัดส่วน	9
2.2.2 ระบบควบคุมแบบปริพันธ์	12
2.2.3 ระบบควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์	13
2.2.4 ระบบควบคุมแบบอนุพันธ์	16
2.2.5 ระบบควบคุมแบบสัดส่วนร่วมอนุพันธ์	17
2.2.6 ระบบควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์และอนุพันธ์	18
2.2.7 หลักการปรับแต่งค่าระบบพีไอดี	19
2.2.7.1 การปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีโพรเซสรีแอกชันเคิร์ฟ	19
2.2.7.2 การปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีอัลทิมิทเมทรูด	21
2.2.7.3 การปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีแคมป์ออสซิลเลชัน	23
2.3 หลักการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์	23
2.4 หลักการทำงานของปรากฏการณ์ฮอลล์	24
2.4.1 ปรากฏการณ์ฮอลล์	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.2 สมการที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ฮอลล์	25
2.5 หลักการทำงานของตัวแปลงค่าความดัน	26
2.6 หลักการใช้งานโมดูลต่าง ๆ ภายใน dsPIC30F2010	29
2.6.1 โมดูลแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิทัล	29
2.6.2 โมดูลตรวจจับสัญญาณ ใน dsPIC	31
2.6.3 โมดูล MCPWM ใน dsPIC30F2010 ควบคุมมอเตอร์	32
2.7 โปรแกรมวิซวลเบสิก	38
2.7.1 ความสามารถของ VB6	39
2.7.2 คอมพิวเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับใช้งาน VB6	39
บทที่ 3 หลักการออกแบบ	41
3.1 ถังน้ำทดลอง	41
3.2 ป้อนน้ำและถังพัก	42
3.3 วาล์วควบคุม	42
3.4 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของน้ำ	43
3.4.1 ส่วนที่เกี่ยวข้องกับการหาค่าอัตราการไหลของน้ำ	43
3.4.2 การทำงานของวงจรที่เกี่ยวข้องกับอัตราการไหลของน้ำ	47
3.5 หลักการทำงานของตัวแปลงค่าความดัน	55
3.5.1 การออกแบบวงจรทรานควิเซอร์วัดความดัน	55
3.5.2 การออกแบบวงจรซีโร-สเปน	56
3.6 ไมโครคอนโทรเลอร์	57
3.7 โปรแกรมวิซวลเบสิก	58
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	60
4.1 การทดลองและบันทึกผลการทำงานของอุปกรณ์แปลงค่าความดัน	60
4.2 การทดลองและบันทึกผลที่ได้จากการทำงานของวาล์วควบคุม	64
4.3 การทดลองเพื่อคำนวณหาค่าความดันทานของวาล์วควบคุมการไหลของน้ำขาออก	68
4.4 การทดลองและบันทึกผลการทดลองในส่วนของการควบคุมแบบต่างๆ	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป	101
5.1 สรุปผลการทดลอง	101
5.2 ปัญหาที่พบและแนวทางแก้ไข	101
5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการค้นคว้าพัฒนา	102
ภาคผนวก ก โปรแกรมการประมวลผลภาพและโปรแกรมควบคุม	104
ภาคผนวก ข เอกสารคู่มืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	108
ข.1 เอกสารคู่มือการใช้งาน dsPIC30F2010	108
ข.2 เอกสารคู่มือการใช้งาน HALL EFFECT SENSORS	110
ข.3 เอกสารคู่มือการใช้งาน LM358	112
ข.4 เอกสารคู่มือการใช้งาน LF351	114
ข.5 เอกสารคู่มือการใช้งาน MPX2000	117
เอกสารอ้างอิง	119

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 โครงสร้างของชุดทดลองระบบปฏิบัติการควบคุมระดับน้ำ	1
2.1 ระบบระดับของเหลว	5
2.2 การหาค่าความต้านทานของวาล์ว	7
2.3 การกำหนดช่วงจำกัดของเอาต์พุต	10
2.4 การตอบสนองของคอนโทรลเลอร์แบบระบบควบคุมแบบสัดส่วน	11
2.5 ระบบควบคุมแบบระบบควบคุมแบบสัดส่วน	11
2.6 ลักษณะการตอบสนองของคอนโทรลเลอร์แบบระบบควบคุมแบบปริพันธ์	12
2.7 ระบบควบคุมแบบระบบควบคุมแบบปริพันธ์	13
2.8 แผนภาพบล็อกที่ประกอบด้วยการควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับปริพันธ์	14
2.9 การตอบสนองของการควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับปริพันธ์	14
2.10 การตอบสนองของการควบคุมแบบอนุพันธ์	16
2.11 แผนภาพบล็อกที่ประกอบด้วยการควบคุมแบบอนุพันธ์	17
2.12 แผนภาพบล็อกที่ประกอบด้วยสัดส่วนร่วมกับอนุพันธ์	18
2.13 แผนภาพบล็อกที่ประกอบด้วยการควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์และอนุพันธ์	18
2.14 แสดงวิธีการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีโพไซเทรีแอกชันเคิร์ฟ	20
2.15 การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีโพไซเทรีแอกชันเคิร์ฟ	20
2.16 แสดงบล็อกไดอะแกรมการหาค่าพารามิเตอร์แบบอัลทิมิทเมทอด	22
2.17 แสดงวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยวิธีอัลทิมิทเมทอด	22
2.18 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการแบบวงปิดที่มีอัตราเสื่อม $\frac{1}{4}$	23
2.19 การทำงานของเซอร์โวมอเตอร์	24
2.20 แสดงการเกิดปรากฏการณ์ฮอสลัส	25
2.21 วงจรซีโร-สเปน	27
2.22 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตและค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุต	28
2.23 ไดอะแกรมการทำงานอย่างง่ายของโมดูล ADC ในไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC	30
2.24 แสดงไดอะแกรมการทำงานของโมดูลตรวจจับสัญญาณอินพุต	32
2.25 ไดอะแกรมแสดงการทำงานของโมดูล MCPWM ในไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC	35

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 การออกแบบการวางอุปกรณ์ทั้งหมด	41
3.2 ถังทดลอง	42
3.3 ป้อนน้ำและถังพัก	42
3.4 วาล์วควบคุม	43
3.5 เซอร์โวมอเตอร์ที่ทำการทดสอบแล้ว	43
3.6 ตัววัดอัตราการไหลของน้ำ	43
3.7 กราฟแสดงผลที่ได้ช่วงที่มีและไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน	45
3.8 วงจรจัดการสัญญาณ ที่ได้จากการออกแบบ	46
3.9 แสดงการแบ่งวงจรที่ใช้ออกเป็น 4 ส่วน	47
3.10 กราฟแสดงสัญญาณเอาต์พุตหลังจากผ่านวงจรใน ส่วนที่ 1	48
3.11 วงจรคิฟเฟอเรนเชียล	48
3.12 วงจร นอน-อินเวอร์ตติ้ง แอมพลิไฟเออร์	49
3.13 กราฟแสดงสัญญาณเอาต์พุตหลังจากผ่านวงจรในส่วนที่ 2	50
3.14 วงจรขมิตท์	51
3.15 กราฟแสดงสัญญาณเอาต์พุตหลังจากผ่านวงจรในส่วนที่ 3	52
3.16 วงจรขมิตท์	53
3.17 วงจรคิฟเฟอเรนเชียล	53
3.18 กราฟแสดงผลที่ได้เมื่อผ่านวงจรมายาสัญญาณ	54
3.19 วงจรเซนเซอร์	55
3.20 วงจรซีโร-สเปน	56
3.21 กราฟเปรียบเทียบค่าวงจรซีโร-สเปน	56
3.22 ไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น dsPIC30F2010	57
3.23 โปรแกรมวิซวลเบสิก	58
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับความสูงของน้ำกับค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้	62
4.2 กราฟแสดงผลของเปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วกับอัตราการไหล	66

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 กราฟแสดงเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่ระดับ 25 เซนติเมตร ที่เปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วควบคุมค่าต่างๆ	67
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับระดับความสูง	69
4.5 กราฟผลตอบสนองของระบบ เมื่อกำหนดเซตพอยท์ที่ระดับ 15 เซนติเมตร	73
4.6 กราฟผลตอบสนองของระบบที่อัตราขยายต่างๆ เมื่อกำหนดเซตพอยท์ ที่ระดับ 15 เซนติเมตร	84
4.7 กราฟเปรียบเทียบผลตอบสนองที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์ค่าต่างๆ เมื่อ $K_p = 1$	87
4.8 กราฟผลตอบสนองที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์ค่าต่างๆ เมื่อ $K_p = 4.5$	95
4.9 กราฟผลตอบสนองที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์และอนุพันธ์	99
4.10 กราฟเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบธรรมดา และระบบที่มีการควบคุมแบบต่างๆ	99

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจากการคำนวณด้วยวิธีโพรเซสรีแอกชันเคิร์ฟ	21
2.2 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจากการคำนวณด้วยวิธีแบบอัลทิเมทเมธอด	22
4.1 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างระดับความสูงของน้ำในถังกับค่าแรงดันไฟฟ้า	60
4.2 แสดงช่วงแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทกับช่วงสัญญาณดิจิตอล ที่แปลงได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์	63
4.3 แสดงช่วงสัญญาณดิจิตอลที่ความสูงช่วงต่างๆ และสูตรในการแปลงเป็นค่าความสูง	64
4.4 ตารางบันทึกค่าความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ การเปิดวาล์วกับอัตราการไหลขาเข้า	65
4.5 ตารางบันทึกค่าความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ การเปิดวาล์วกับเวลาที่น้ำเข้าสู่ระดับ ความสูง 25 เซนติเมตร	67
4.6 บันทึกค่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลที่ความสูงระดับต่างๆ	68
4.7 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ได้ เมื่อกำหนดระดับความสูง 15 เซนติเมตร เป็นระดับเซตพอยท์	70
4.8 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วน ด้วยอัตราขยายแบบ สัดส่วน $K_p = 4$ เมื่อกำหนดระดับความสูง 15 เซนติเมตรเป็นระดับเซตพอยท์	74
4.9 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วน ด้วยอัตราขยายแบบ สัดส่วน $K_p = 8$ เมื่อกำหนดระดับความสูง 15 เซนติเมตรเป็นระดับเซตพอยท์	76
4.10 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วน ด้วยอัตราขยายแบบ สัดส่วน $K_p = 15$ เมื่อกำหนดระดับความสูง 15 เซนติเมตรเป็นระดับเซตพอยท์	79
4.11 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วน ด้วยอัตราขยายแบบ สัดส่วน $K_p = 20$ เมื่อกำหนดระดับความสูง 15 เซนติเมตรเป็นระดับเซตพอยท์	81
4.12 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์ เมื่อกำหนดระดับเซตพอยท์ ที่ 10 เซนติเมตร, $K_{PI} = 1$ และ $T_i = 10$	85
4.13 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์ เมื่อกำหนดระดับเซตพอยท์ที่ 10 เซนติเมตร, $K_{PI} = 1$ และ $T_i = 20$	86
4.14 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์ เมื่อกำหนดระดับเซตพอยท์ ที่ 15 เซนติเมตร, $K_p = 4.5$ และ $T_i = 5$	88

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.15 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์ เมื่อกำหนดระดับเซตพอยท์ที่ 15 เซนติเมตร, $K_p = 4.5$, $T_i = 13.33$	90
4.16 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์ เมื่อกำหนดระดับเซตพอยท์ที่ 15.4 เซนติเมตร, $K_p = 4.5$ และ $T_i = 20$	93
4.17 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์และอนุพันธ์ เมื่อกำหนดระดับเซตพอยท์ที่ 15 เซนติเมตร, $K_p = 6$, $T_i = 8$ และ $T_d = 2$	96



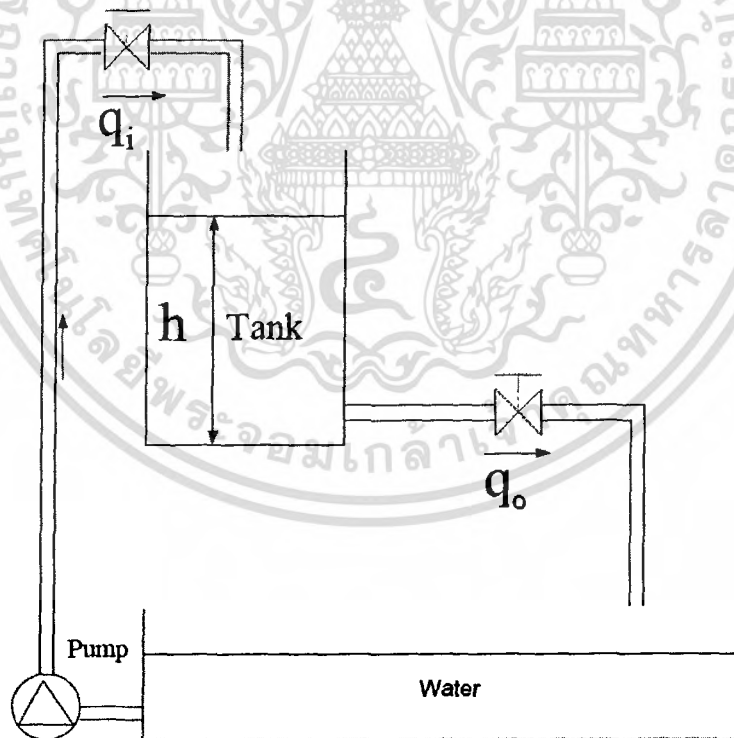
บทที่ 1

บทนำ

1.1 กล่าวนำ

จากการที่ระบบควบคุมอัตโนมัติ (Automatic Control System) ถูกใช้อย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม ก่อให้เกิดความต้องการบุคลากรที่มีความรู้ ความสามารถในการควบคุมให้ระบบสามารถดำเนินการไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยเหตุนี้ นักศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมระบบควบคุมจึงจำเป็นต้องเรียนรู้และศึกษาทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมอัตโนมัติ ตลอดจนปฏิบัติการทดลอง ซึ่งถือเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยให้เกิดความเข้าใจในทฤษฎีที่อธิบายด้วยสมการทางคณิตศาสตร์มากยิ่งขึ้น เพื่อนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบและควบคุมระบบให้มีประสิทธิภาพเป็นไปตามข้อกำหนดหรือความต้องการได้

สำหรับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม ผู้จัดทำได้เลือกทำการศึกษาและสร้างชุดทดลองเกี่ยวกับระบบปฏิบัติการขบวนการ โดยจำลองกระบวนการควบคุมระดับน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ซึ่งถือเป็นตัวอย่างของระบบควบคุมพื้นฐานที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นระบบที่ไม่ซับซ้อนมากนัก



รูปที่ 1.1 โครงสร้างของชุดทดลองระบบปฏิบัติการควบคุมระดับน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากบางระบบยังขาดเสถียรภาพ จึงเลือกทำการควบคุมระบบนั้นด้วยการควบคุมป้อนกลับแบบอัตโนมัติ ซึ่งมีหลายแบบ เช่น การป้อนกลับสถานะ การควบคุมแบบสัดส่วน การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์ การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมอนุพันธ์ และการควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์และอนุพันธ์ เป็นต้น ซึ่งเป้าหมายของการควบคุมคือการทำให้ระดับน้ำคงที่ ณ ระดับใดระดับหนึ่งตามต้องการ

1.2 วัตถุประสงค์ในการทำปริญญานิพนธ์

1. เพื่อศึกษาและทดลองการใช้งานอุปกรณ์ต่างๆในระบบควบคุม
2. เพื่อศึกษาและสร้างชุดทดลองระบบปฏิบัติการควบคุมระดับน้ำ ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์สำหรับประกอบเป็น โครงสร้างทางกล อุปกรณ์ควบคุมและวัดอัตราการไหลของน้ำ อุปกรณ์วัดระดับของน้ำในถังน้ำทดลอง รวมถึงส่วนของการควบคุมและประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ และส่วนแสดงผลที่แสดงผ่านทางคอมพิวเตอร์ซึ่งโปรแกรมการทำงานด้วยโปรแกรมภาษาซี
3. เพื่อศึกษาทฤษฎีของการควบคุมเสถียรภาพของระบบ และทดลองการใช้งานตัวชดเชยแบบต่างๆ ในระบบควบคุมจริง

1.3 ขั้นตอนการศึกษาและการจัดทำโครงการงาน

1. ศึกษาส่วนประกอบทั้งหมดที่เกี่ยวข้องในชุดทดลองระบบปฏิบัติการควบคุมระดับน้ำ ค้นคว้าข้อมูลและศึกษาการทำงานทางกล และทางอิเล็กทรอนิกส์ ควบคู่กับการศึกษา ทฤษฎีการทำงานของระบบควบคุมป้อนกลับอัตโนมัติแบบต่างๆ และศึกษาการเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์
2. จัดหาวัสดุที่นำมาใช้และประกอบขึ้นเป็นอุปกรณ์ ได้แก่ อุปกรณ์ควบคุมการไหลของน้ำ อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของน้ำ อุปกรณ์วัดความดัน และถังน้ำทดลอง พร้อมทั้งศึกษาวางจรอิเล็กทรอนิกส์ที่จำเป็นต่อการทำงานของอุปกรณ์เหล่านั้น
3. ทดสอบ โปรแกรมควบคุมการทำงานของอุปกรณ์แต่ละชิ้น
4. ประกอบเป็น โครงสร้างชุดทดลองระบบปฏิบัติการควบคุมระดับน้ำและทดสอบการทำงาน of ระบบทั้งหมด
5. เขียนโปรแกรมเพื่อใช้สำหรับเป็นตัวควบคุมแบบสัดส่วน ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์ และตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์และอนุพันธ์ และทดสอบการทำงาน of โปรแกรม
6. ทดลองและบันทึกผลการทดลอง รวมถึงสรุปความสอดคล้องระหว่างผลทางทฤษฎี และปฏิบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. เขียนโปรแกรมรับและแสดงผลผ่านทางคอมพิวเตอร์สำหรับทำการทดลองกับชุดทดลองระบบปฏิบัติการควบคุมระดับน้ำ

1.4 รายละเอียดของปริิณญาณิพนธ์

เนื้อหาที่จะกล่าวในปริิณญาณิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความสำคัญ วัตถุประสงค์ ขั้นตอนการศึกษา และการจัดทำโครงการ พร้อมทั้งรายละเอียดของปริิณญาณิพนธ์ของแต่ละบท

บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง อธิบายถึงหลักการและทฤษฎีพื้นฐานสำคัญที่นำมาอ้างอิงและใช้เพื่อจัดทำชุดทดลองระบบปฏิบัติการควบคุมระดับน้ำ

บทที่ 3 หลักการออกแบบ นำเสนอแนวคิดในการออกแบบส่วนประกอบและการทำงานของอุปกรณ์ที่เป็นองค์ประกอบในชุดทดลองอย่างละเอียด

บทที่ 4 การทดลอง เป็นส่วนการทดสอบองค์ประกอบต่างๆ ในระบบ ตลอดจนการทดลองชุดทดลองระบบปฏิบัติการควบคุมระดับน้ำ

บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป เป็นการสรุปผลการดำเนินงาน ปัญหาที่เกิดขึ้น และแนวทางการปรับปรุงพัฒนาโครงการนี้ต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง

จากที่ได้กล่าวในบทที่ 1 แล้วว่า ก่อนที่จะมีการออกแบบและสร้างชุดระบบปฏิบัติการ ขบวนการนั้น จำเป็นอย่างยิ่งในการที่ศึกษาองค์ประกอบต่างๆ ที่จำเป็นของระบบควบคุมให้ เข้าใจเสียก่อน พบว่าในการจำลองระบบควบคุมการไหลของน้ำและอัตราการไหลของน้ำนั้นมีส่วนที่สำคัญหลายส่วนเริ่มจากต้องเข้าใจถึงภาพรวมของระบบเริ่มต้นจากส่วนประกอบต่างๆ ของระบบระดับของเหลว ทฤษฎีระบบควบคุมแบบต่างๆ รวมถึงหลักการปรับแต่งค่าตัวควบคุมที่นำมาใช้งาน และจากนั้นจะเป็นส่วนประกอบทางกลที่นำมาใช้โดยเริ่มจาก การควบคุมการไหลของน้ำได้นำเซอร์โวมอเตอร์มาใช้เพื่อควบคุมปริมาณการไหล เมื่อสามารถควบคุมการไหลได้แล้ว จึงจำเป็นต้องทราบอัตราการไหลของน้ำ โดยนำหลักการทำงานของปรากฏการณ์ฮอลล์มาใช้เพื่อหาอัตราการไหล จากนั้นจะเป็นส่วนของการหาระดับของเหลวในถัง โดยนำความดันมาใช้ในการหาการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำ โดยใช้วงจรรีโตรี-สแปนเพื่อขยายสัญญาณที่จะส่งไปยังคอนโทรลเลอร์ และในส่วนท้ายจะเป็นการทำงานของคอนโทรลเลอร์โดยในที่นี้เลือกใช้ dsPIC30F2010 ซึ่งจะกล่าวถึงส่วนต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการใช้งาน รวมถึง โปรแกรมวิซวลเบสิกที่นำมาใช้เพื่อติดต่อบetween ผู้ใช้และคอนโทรลเลอร์เพื่อควบคุมการทำงานต่อไป

2.1 ส่วนประกอบของระบบระดับของเหลว

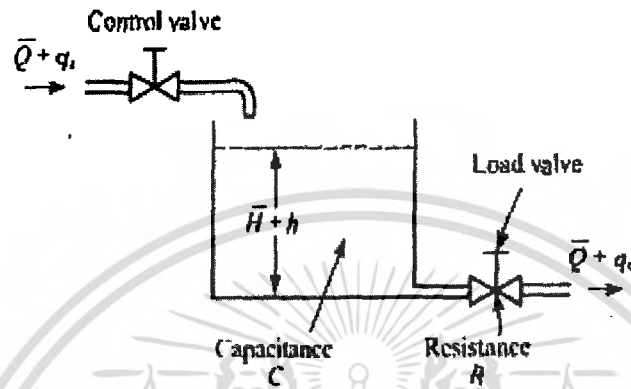
ในการวิเคราะห์ระบบที่เกี่ยวข้องกับของเหลวนั้นจำเป็นต้องเข้าใจถึงส่วนประกอบของระบบระดับของเหลว (Elements of Liquid-Level System) ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับการไหลของของเหลว โดยทั่วไปแล้ว การไหลของของเหลวนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็นสองแบบคือ การไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) ทั้งนี้จะพิจารณาจากค่าเรโนลด์ส์ (Reynolds number) ของของไหล ถ้าเลขเรโนลด์ส์มีค่ามากกว่า 3,000-4,000 แล้วการไหลจะเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ช่วง 2,000-3,000 เป็นช่วงการเปลี่ยนแปลง แต่ถ้าเลขเรโนลด์ส์มีค่าน้อยกว่า 2,000 การไหลนั้นจะเป็นการไหลแบบราบเรียบ ระบบที่เกี่ยวข้องกับการไหลแบบปั่นป่วนนั้นส่วนใหญ่จะแทนด้วยสมการดิฟเฟอเรนเชียลที่ไม่เป็นเชิงเส้น ส่วนระบบที่มีการไหลแบบราบเรียบนั้น จะสามารถแสดงด้วยสมการดิฟเฟอเรนเชียล

2.1.1 ค่าความต้านทานและค่าความจุของระบบที่เกี่ยวข้องกับระดับของเหลว

ในที่นี้พิจารณาถึงค่าความต้านทาน (Resistance) และค่าความจุ (Capacitance) เพื่อที่จะอธิบายถึงคุณลักษณะไดนามิกส์ของระบบเกี่ยวกับระดับของเหลว โดยพิจารณาจากการไหลผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ท่อสั้นๆ ที่ต่ออยู่ระหว่างภาชนะบรรจุ (tank) สองใบ ค่าความต้านทานการไหลของของเหลวจะกำหนดได้ว่าเป็นค่าการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างของระดับของของเหลว (ความแตกต่างของระดับของของเหลวของภาชนะบรรจุทั้งสอง) อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราไหล นั่นคือ การเปลี่ยนแปลงของของเหลวที่สะสมอยู่



รูปที่ 2.1 ระบบระดับของเหลว

เมื่อพิจารณาถึงการไหลผ่านเข้า-ออก จากดังแสดงในรูปที่ 2.1 ความต้านทาน สำหรับของเหลวที่ไหลในท่อ ที่กำหนดการเปลี่ยนแปลงระดับของเหลวต่อการเปลี่ยนของอัตราการไหลของระบบ ซึ่งจะได้สมการที่ (2.1)

$$R = \frac{\text{การเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างของระดับของเหลว}}{\text{การเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหล}} \quad (2.1)$$

เนื่องจากว่า ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราไหลและความแตกต่างของระดับในกรณีของการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วนไม่เหมือนกัน ดังนั้นจึงแยกพิจารณาออกเป็นสองกรณี

เมื่อพิจารณาระบบที่เกี่ยวข้องกับระดับของเหลวดังรูปที่ 2.1 ในระบบนี้ของเหลวจะไหลผ่าน วาล์ว (load valve) ด้านข้างของถัง ถ้าการไหลผ่านสิ่งกีดขวางนี้ถูกกำหนดให้เป็นแบบราบเรียบ ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลในสถานะคงตัว (Steady State) และระดับของเหลวในสถานะคงตัวจะเขียนได้ดังสมการที่ (2.2)

$$Q = KH \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ Q = อัตราการไหลของของเหลวที่ภาวะคงที่

K = สัมประสิทธิ์

H = ความสูงที่ภาวะคงที่

จะเห็นว่า กฎที่เกี่ยวกับการไหลแบบราบเรียบนี้คล้ายคลึงกับกฎของคูลอมบ์ (Coulomb) ที่กล่าวว่า กระแสจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความต่างศักย์

สำหรับการไหลแบบราบเรียบนั้น ค่าความต้านทาน R_t จะหาได้ดังสมการที่ (2.3)

$$R_t = \frac{dH}{dQ} = \frac{H}{Q} \quad (2.3)$$

จะเห็นได้ว่า ความต้านทานสำหรับการไหลแบบราบเรียบนั้นจะมีค่าคงที่ ซึ่งคล้ายคลึงกับความต้านทานของระบบไฟฟ้า ถ้าการไหลผ่านนี้ถูกกำหนดให้เป็นการไหลแบบปั่นป่วน อัตราการไหลในสถานะคงตัวจะได้สมการที่ (2.4)

$$Q = K\sqrt{H} \quad (2.4)$$

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนนั้น ความต้านทาน R_t จะแสดงจากสมการที่ (2.5) ดังนี้

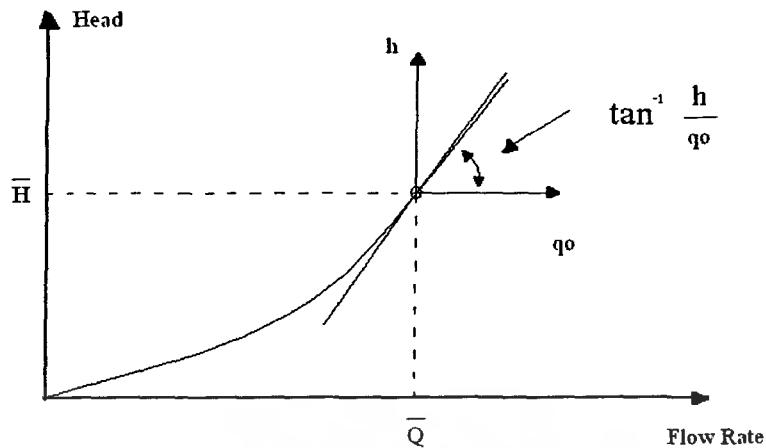
$$R_t = \frac{dH}{dQ} = \frac{2H}{Q} \quad (2.5)$$

ดังนั้น ค่าความต้านทานในกรณีของการไหลแบบปั่นป่วน จึงขึ้นอยู่กับอัตราการไหลและระดับของเหลว อย่างไรก็ตามค่าของความต้านทานของการไหลแบบปั่นป่วน อาจพิจารณาว่ามีค่าคงที่ ถ้าการเปลี่ยนแปลงระดับของเหลว และอัตราการไหลมีค่าน้อย โดยใช้ค่าของความต้านทานของการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและระดับของเหลว จากสมการที่ (2.6)

$$Q = \frac{2H}{R_t} \quad (2.6)$$

ในทางปฏิบัติหลายๆ กรณี ค่าของสัมประสิทธิ์ K ซึ่งขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การไหลและพื้นที่ของสิ่งกีดขวางนั้นเป็นสิ่งที่ไม่รู้ค่า ดังนั้นการหาค่าของความต้านทานจึงอาจจะทำได้โดยการสร้างความชัน (Slope) ของเส้นโค้งที่สภาวะการทำงานดังรูปที่ 2.2 แสดงถึงวิธีการดังที่กล่าวข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 การหาค่าความต้านทานของวาล์ว

ค่าความจุของเหลว (Capacitance, C) ของภาชนะบรรจุนั้นกล่าวได้ว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงของปริมาณของของเหลวที่สะสมอยู่ อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของความสูงนั้น จากสมการที่ (2.7)

$$C = \frac{\text{การเปลี่ยนแปลงของของเหลวที่สะสมอยู่}}{\text{การเปลี่ยนแปลงของความสูง}} \quad (2.7)$$

2.1.2 กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับระบบระดับของเหลว

พิจารณาระบบดังรูปที่ 2.1 ระบบระดับของเหลว (Liquid - Level Systems) ซึ่งจะประกอบไปด้วยค่าการเปลี่ยนแปลงสามารถกำหนดได้ดังนี้

\bar{Q} = อัตราการไหลที่ภาวะคงที่ (ก่อนมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น)

q_1 = อัตราการไหลเข้าที่เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยจากค่าที่ภาวะคงที่

q_0 = อัตราการไหลออกที่เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยจากค่าที่ภาวะคงที่

\bar{H} = ความสูงที่ภาวะคงที่ (ก่อนมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น)

h = ความสูงที่เปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยจากค่าที่ภาวะคงที่

จากที่กล่าวข้างต้น ระบบที่มีการไหลแบบราบเรียบจะถือว่าเป็นเชิงเส้นและแม้ว่าระบบจะมีการไหลแบบปั่นป่วน ระบบก็อาจทำให้เป็นเชิงเส้นได้ถ้าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรมีค่าน้อยมาก ดังนั้นในที่นี้จะถือว่าระบบที่นำมาพิจารณาเป็นเชิงเส้น ซึ่งสามารถหาสมการดิฟเฟอเรนเชียลเชิงเส้นของระบบนี้ได้

เนื่องจากการไหลเข้าลบด้วยการไหลออกในเวลาสั้นๆ (dt) จะเท่ากับจำนวนของ

ของเหลวที่เข้าไปเพิ่มในภาชนะบรรจุ จะได้สมการที่ (2.8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R = \frac{dh}{dt} = q_1 - q_0 \quad (2.8)$$

จากนิยามของความต้านทาน ความสัมพันธ์ระหว่าง q_0 และ h จะได้สมการที่ (2.9)

$$q_0 = \frac{h}{R} \quad (2.9)$$

แทนค่า q_0 ลงในสมการที่(2.5) สมการดิฟเฟอเรนเชียลของระบบเมื่อ R คงที่ จะได้สมการที่ (2.10)

$$RC \frac{dh}{dt} + h = Rq_1 \quad (2.10)$$

จะเห็นได้ว่า RC เป็นค่าเวลาคงที่ (Time Constant) ของระบบ นำสมการที่ (2.6) มาทำการแปลงลาปลาซและกำหนดให้ค่าคงที่ที่สถานะเริ่มต้นเป็นซีโรหมด จะได้สมการที่ (2.11)

$$(RCs + 1)H(s) = RQ_1(s) \quad (2.11)$$

ถ้าให้ q_1 เป็นอินพุต และ h เป็นเอาต์พุต ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบจะได้สมการที่ (2.12)

$$\frac{H(s)}{Q_1(s)} = \frac{R}{(RCs + 1)} \quad (2.12)$$

อย่างไรก็ตาม ถ้าให้ q_0 เป็นเอาต์พุตแล้ว ฟังก์ชันถ่ายโอนจะได้สมการที่ (2.13)

$$\frac{Q_0(s)}{Q_1(s)} = \frac{1}{RCs + 1} \quad (2.13)$$

เมื่อ $Q_0(s)$ เป็นคั้งสมการที่ (2.14)

$$Q_0(s) = \frac{H(s)}{R} \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ทฤษฎีระบบควบคุมแบบต่างๆ

คอนโทรลเลอร์ (Controller) เป็นส่วนประกอบหนึ่งในระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ซึ่งจะมีสัญญาณความผิดพลาดเป็นอินพุตและมีเอาต์พุตเป็นอินพุตของคอร์เรกทีฟอีลิเมนต์ (corrective element) ในส่วนนี้จะกล่าวถึงวิธีการเลือกใช้อินพุตคอนโทรลเลอร์ที่เหมาะสมกับระบบควบคุมแบบป้อนกลับและวิธีการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับคอนโทรลเลอร์ โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของคอนโทรลเลอร์ นิยมเรียก กฎการควบคุม (control Law) โดยจะมี 3 รูปแบบ คือ

1. ระบบควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Control)
2. ระบบควบคุมแบบปริพันธ์ (Integral Control)
3. ระบบควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Control)

ในระบบบางประเภท มีความจำเป็นที่ต้องปรับปรุงสมรรถนะของระบบควบคุม ซึ่งสามารถทำได้โดยการใช้ส่วนประกอบอื่นเพิ่มเติมเข้ากับระบบควบคุม การที่ปรับเปลี่ยนสมรรถนะของระบบควบคุมป้อนกลับแบบนี้เรียกว่า การชดเชย (Compensation)

2.2.1 ระบบควบคุมแบบสัดส่วน

ในระบบควบคุมแบบสัดส่วน จะได้ว่า เอาต์พุตของคอนโทรลเลอร์จะเป็นสัดส่วนกับอินพุตของคอนโทรลเลอร์ และถ้ากำหนดสัญญาณอินพุตที่ให้กับคอนโทรลเลอร์เป็น ค่าความผิดพลาด(e) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลา จะได้สมการที่ (2.15)

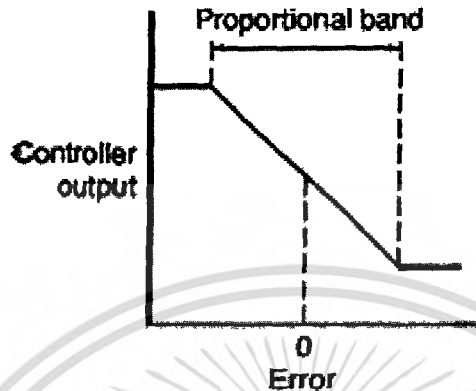
$$\text{Output} = K_p e \quad (2.15)$$

เมื่อ K_p เป็นค่าคงที่เรียกว่า อัตราขยายแบบสัดส่วน (proportional gain) จะพบว่าเอาต์พุตที่ออกจากคอนโทรลเลอร์แบบระบบควบคุมแบบสัดส่วน จะขึ้นกับขนาดของความผิดพลาดในขณะที่กำลังพิจารณาทำให้ฟังก์ชันถ่ายโอนของคอนโทรลเลอร์ $G_c(s)$ จะมีค่าเป็นดังสมการที่ (2.16)

$$G_c(s) = K_p \quad (2.16)$$

ดังนั้น การควบคุมด้วยคอนโทรลเลอร์แบบนี้จะเป็นเพียงการขยายสัญญาณความผิดพลาดเท่านั้น การที่ได้สัญญาณความผิดพลาดขนาดใหญ่ที่เวลาหนึ่ง จะทำให้เกิดเอาต์พุตที่มีขนาดใหญ่จากคอนโทรลเลอร์ในเวลานั้น อย่างไรก็ตามการที่กำหนดให้อัตราขยายคงที่ ในทางปฏิบัติอาจจะกำหนดไว้ในบางช่วงของสัญญาณความผิดพลาดเท่านั้น อาจกำหนดให้คอนโทรลเลอร์ของมีค่าเอาต์พุตไม่น้อยกว่าค่าหนึ่งและไม่มากเกินไปกว่าค่าหนึ่งก็ได้ ซึ่งการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดช่วงจำกัดของเอาต์พุตจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.3 และการกำหนดเอาต์พุตแบบ ระบบควบคุมแบบสัดส่วนช่วงที่มีการกำหนดสัดส่วนนี้ จะเรียกว่า ความกว้างแบบสัดส่วน (Proportional Band, PB)

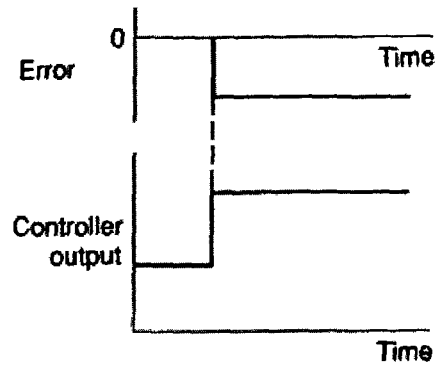


รูปที่ 2.3 การกำหนดช่วงจำกัดของเอาต์พุต

การกำหนดความกว้างแบบสัดส่วนนี้ จะช่วยให้สัญญาณเอาต์พุตมีค่าจำกัดไม่ไปสู่อันันต์ ทั้งทางด้านบวกและทางด้านลบ และเมื่อคอนโทรลเลอร์มีเอาต์พุตสูงที่สุดที่เป็นไปได้ค่าหนึ่งแล้ว ก็นิยมที่จะกำหนดเอาต์พุตค่าใด ๆ เป็นร้อยละของค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่าเอาต์พุตของคอนโทรลเลอร์ 100% ก็หมายความว่าเอาต์พุตจะเปลี่ยนจากค่าต่ำสุดที่เป็นไปได้ ไปเป็นค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ ซึ่งจะได้อสมการที่ (2.17)

$$K_p = \frac{100}{(PB)} \quad (2.17)$$

เนื่องจากเอาต์พุตของคอนโทรลเลอร์จะเป็นสัดส่วนกับอินพุตดังนั้น ถ้าหากอินพุตมีลักษณะเป็นฟังก์ชันขั้นบันได (step) เอาต์พุตที่ได้ก็จะมีลักษณะเป็นขั้นบันไดเช่นกัน โดยลักษณะของกราฟแสดงอินพุตและเอาต์พุตจะมีสัดส่วนที่แน่นอนค่าหนึ่ง ตามรูปที่ 2.4 โดยรูปนี้แสดงถึงการตอบสนองของคอนโทรลเลอร์ เมื่ออินพุตอยู่ในช่วงความกว้างแบบสัดส่วน

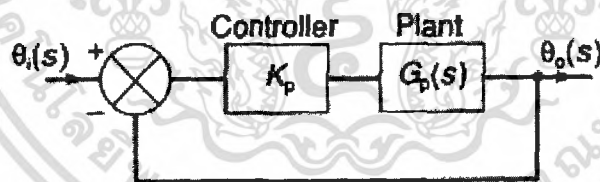


รูปที่ 2.4 การตอบสนองของคอนโทรลเลอร์แบบระบบควบคุมแบบสัดส่วน

ในทางปฏิบัติ ระบบควบคุมแบบสัดส่วนนี้ จะมีลักษณะเหมือนกับเครื่องขยายสัญญาณรูปแบบหนึ่ง ซึ่งอาจจะเป็นในลักษณะของอุปกรณ์ไฟฟ้า หรืออาจจะเป็นเครื่องขยายสัญญาณเชิงกล เช่น คาน ก็ได้ ลักษณะของระบบที่ควบคุมแบบระบบควบคุมแบบสัดส่วนจะมีลักษณะดังที่แสดงในรูปที่ 2.5 และจะทำให้ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนระบบเปิดเป็นดังสมการที่ (2.18)

$$G_o(s) = K_p G_p(s) \quad (2.18)$$

เมื่อ $G_p(s)$ เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ



รูปที่ 2.5 ระบบควบคุมแบบระบบควบคุมแบบสัดส่วน

ข้อเสียประการสำคัญของระบบควบคุมที่คอนโทรลเลอร์คือ ไม่ได้มีการเพิ่มเทอม ($1/s$) (หรือการเพิ่มปริพันธ์) ในส่วนการดำเนินงาน (forward path) ซึ่งหมายความว่า ถ้าระบบเป็นระบบชนิด 0 (type 0) คอนโทรลเลอร์จะไม่ได้เปลี่ยนแปลงชนิดของระบบ ทำให้ระบบเป็นชนิด 0 เหมือนเดิม และทำให้เกิดความผิดพลาดที่สภาพคงตัว เนื่องจากคอนโทรลเลอร์ไม่ได้ทำการเพิ่มโพลหรือซีโรใหม่ให้กับระบบเพียงแค่เปลี่ยนตำแหน่งของโพลหรือซีโรเท่านั้น เนื่องจากระบบควบคุมแบบป้อนกลับขั้นบันได ตามรูปที่ 2.5 จะมีฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเป็นดังสมการที่ (2.19)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G(s) = \frac{K_p G_p(s)}{1 + K_p G_p(s)} \quad (2.19)$$

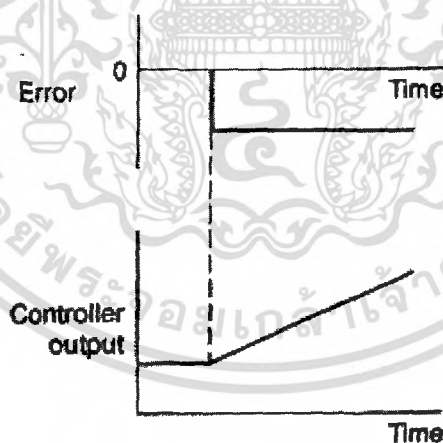
และสมการคุณลักษณะจะเป็น $1 + K_p G_p(s)$ และมีรากเปลี่ยนไปตามค่าของ K_p

2.2.2 ระบบควบคุมแบบปริพันธ์

ในระบบควบคุมแบบปริพันธ์ (Integral Control) เอาท์พุทของคอนโทรลเลอร์จะเป็นสัดส่วนกับปริพันธ์ของสัญญาณผิดพลาดเทียบกับเวลา หรือจากสมการที่ (2.20)

$$\text{Output} = K_i \int e dt \quad (2.20)$$

เมื่อ K_i เป็นค่าคงที่ที่เรียกว่าอัตราขยายแบบปริพันธ์ (Integral gain) ซึ่งจะมีหน่วยเป็น 1/sec รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะการตอบสนองของระบบควบคุมแบบปริพันธ์ เมื่อได้รับสัญญาณความผิดพลาดแบบ ขึ้นบันได ค่าปริพันธ์ระหว่างเวลา t และ 0 จะหมายถึงพื้นที่ใต้กราฟของสัญญาณความผิดพลาดจากเวลา 0 ถึง t ดังนั้นเนื่องจากเริ่มการมีสัญญาณความผิดพลาดแบบ ขึ้นบันได เอาท์พุทที่ออกจากคอนโทรลเลอร์จะมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ ด้วยอัตราที่คงที่ ทำให้เอาท์พุทที่เวลาใดๆจะเป็นสัดส่วนกับความผิดพลาดที่เกิดขึ้น



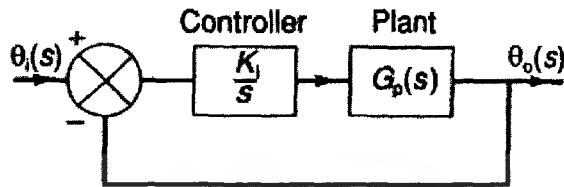
รูปที่ 2.6 ลักษณะการตอบสนองของคอนโทรลเลอร์แบบระบบควบคุมแบบปริพันธ์

เปลี่ยนรูป Laplace ของสมการที่ (2.6) จะทำให้ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของคอนโทรลเลอร์เป็นดังสมการที่ (2.21)

$$G_c(s) = \frac{\text{output}(s)}{e(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นสำหรับระบบที่แสดงในรูปที่ 2.6 การควบคุมแบบระบบควบคุมแบบปริพันธ์จะ
ให้ ฟังก์ชันถ่ายโอนส่วนดำเนินการ (forward-path transfer function) เป็น $\frac{K_i}{s} G_p(s)$ และทำให้
มี ฟังก์ชันถ่ายโอนระบบเปิดเป็นดังรูปที่ 2.7



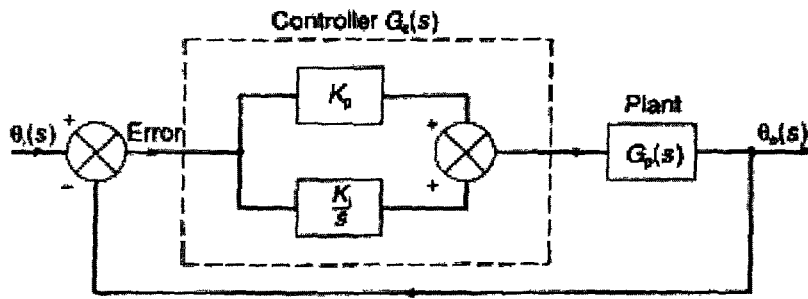
รูปที่ 2.7 ระบบควบคุมแบบระบบควบคุมแบบปริพันธ์

สามารถพิจารณาถึงข้อได้เปรียบของการควบคุมแบบระบบควบคุมแบบปริพันธ์ ได้จาก
สมการที่ (2.21) ซึ่งจะเห็นว่าระบบควบคุมแบบระบบควบคุมแบบปริพันธ์ จะเพิ่มจำนวนโพล
ให้กับระบบควบคุมและเพิ่มชนิดของระบบ จากชนิด 0 เป็นชนิด 1 ซึ่งทำให้ระบบมีความ
ผิดพลาดที่สภาวะคงตัวเป็นศูนย์เทียบต่ออินพุตขั้นบันได อย่างไรก็ตามการเพิ่มโพลที่ s เท่ากับ 0
และไม่มีการเพิ่มซีโรให้กับระบบควบคุม จะทำให้ความแตกต่างระหว่างจำนวนโพล (n) และ
จำนวนซีโร (m) เพิ่มขึ้นอีก 1 ซึ่งจะมีผลให้มุมของอสมโทต (Asymptote Angles) ของทางเดิน
รากลดลง และจุดตัดจะเคลื่อนไปทางครึ่งขวาของระนาบเอส (S-plane) มากขึ้น มีผลทำให้ความ
เสถียรสัมพัทธ์ของระบบลดลงดังสมการที่ (2.22)

$$\text{Asymptote Angle} = \pm \frac{\pi}{n-m}, \frac{3\pi}{n-m}, \dots \quad (2.22)$$

2.2.3 ระบบควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์

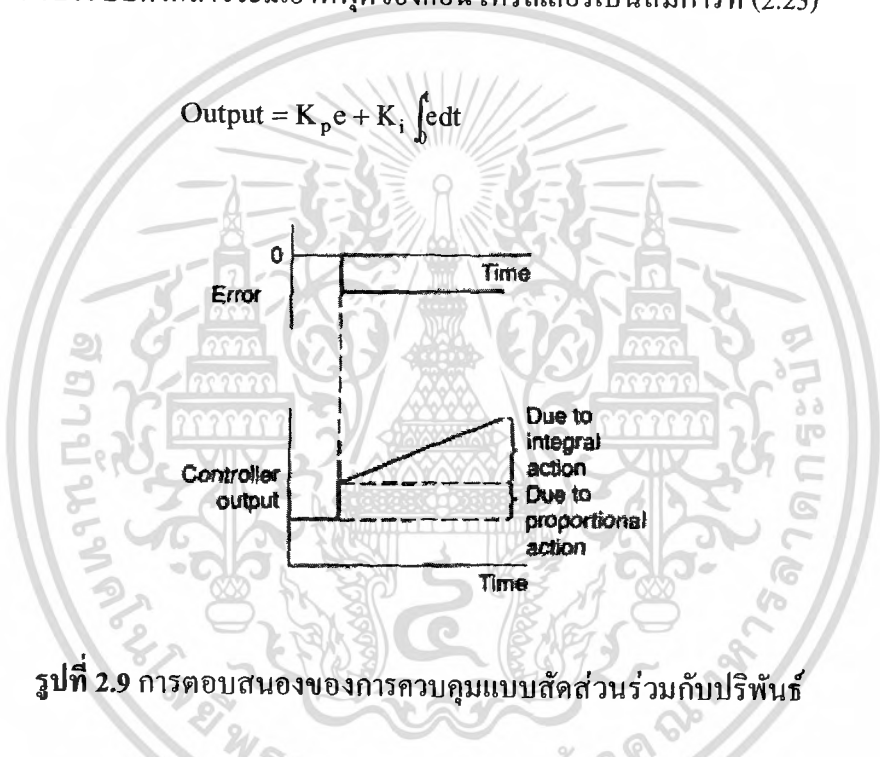
การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับปริพันธ์ (Proportional plus integral Control) นั่นคือ การ
ที่ระบบควบคุมมีความเสถียรสัมพัทธ์ลดลง เมื่อใช้การควบคุมแบบปริพันธ์สามารถแก้ไขได้ใน
ระดับหนึ่งโดยการใช้การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบปริพันธ์ (Proportional plus Integral,
PI) ซึ่งลักษณะของระบบควบคุมจะเป็นตามรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แผนภาพบล็อกที่ประกอบด้วยการควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับปริพันธ์

สำหรับระบบดังกล่าวจะมีเอาต์พุตของคอนโทรลเลอร์เป็นสมการที่ (2.23)

$$\text{Output} = K_p e + K_i \int e dt \tag{2.23}$$



รูปที่ 2.9 การตอบสนองของการควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับปริพันธ์

รูปที่ 2.9 แสดงเอาต์พุตของคอนโทรลเลอร์ที่ได้รับเมื่อมีอินพุตเป็นสัญญาณความผิดพลาดแบบขั้นบันได ถ้าเปลี่ยนรูปลาปลาซของสมการที่ (2.23) จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของคอนโทรลเลอร์แบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์ เป็นคังสมการที่ (2.24)

$$\begin{aligned} G_o(s) &= K_p + \frac{K_i}{s} \\ &= \frac{sK_p + K_i}{s} \\ &= K_p \frac{(s + K_i/K_p)}{s} \end{aligned} \tag{2.24}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ค่าคงที่เวลาปริพันธ์ (Integral time constant, τ_i) จะได้สมการที่ (2.25)

$$\tau_i = \frac{K_p}{K_i} \quad (2.25)$$

ดังนั้นจะได้สมการที่ (2.26)

$$G_c(s) = \frac{K_p \left[s + \left(\frac{1}{\tau_i} \right) \right]}{s} \quad (2.26)$$

และจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนระบบเปิดเป็นดังสมการที่ (2.27)

$$G_o(s) = G_c(s)G_p(s) \quad (2.27)$$

$$= \frac{K_p \left[s + \left(\frac{1}{\tau_i} \right) G_p(s) \right]}{s}$$

จะเห็นว่า มีซีโรที่ s เท่ากับ $-\frac{1}{\tau_i}$ และ โพลที่ s เท่ากับ 0 เพิ่มให้กับฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเมื่อใช้การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์ การที่เพิ่มตัวประกอบ s เข้ากับเทอมส่วนของฟังก์ชันถ่ายโอนก็เสมือนกับเพิ่มแบบของระบบขึ้นไป 1 จึงทำให้ระบบนี้จะไม่มีความผิดพลาดที่สภาพคงตัวสำหรับอินพุตแบบขั้นบันได นอกจากนั้นการที่เพิ่มซีโรให้กับระบบไปพร้อม ๆ กัน ก็จะทำให้ความแตกต่างระหว่างจำนวนโพล n และจำนวนซีโร m มีค่าคงที่ ดังนั้นมุมของอซิมีโทดสำหรับทางเดินของรากมีค่าคงเดิม

อย่างไรก็ตาม จุดตัดของเส้นอซิมีโทดบนแกนจริงจะเคลื่อนที่เข้าหาจุดกำเนิดมากขึ้น ยังผลให้ความเสถียรของระบบลดลงบ้าง

$$\text{จุดตัดของเส้นอซิมีโทด} = (\text{ผลรวมของโพล} - \text{ผลรวมของซีโร}) / (n - m)$$

การเพิ่มโพลที่ s เท่ากับ 0 และซีโรที่ s เท่ากับ $-\frac{1}{\tau_i}$ จะทำให้จุดต้องเปลี่ยนไป

เท่ากับ $\pm \frac{\left(\frac{1}{\tau_i} \right)}{n - m}$ ซึ่งจะทำให้มีค่าเป็นบวกมากขึ้น และจุดตัดจะเคลื่อนที่มาทางขวามือเข้าใกล้จุดกำเนิดมากขึ้น อย่างไรก็ตามการลดลงของความเสถียรสัมพัทธ์นี้จะน้อยกว่าการที่ใช้การควบคุมแบบปริพันธ์เพียงอย่างเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

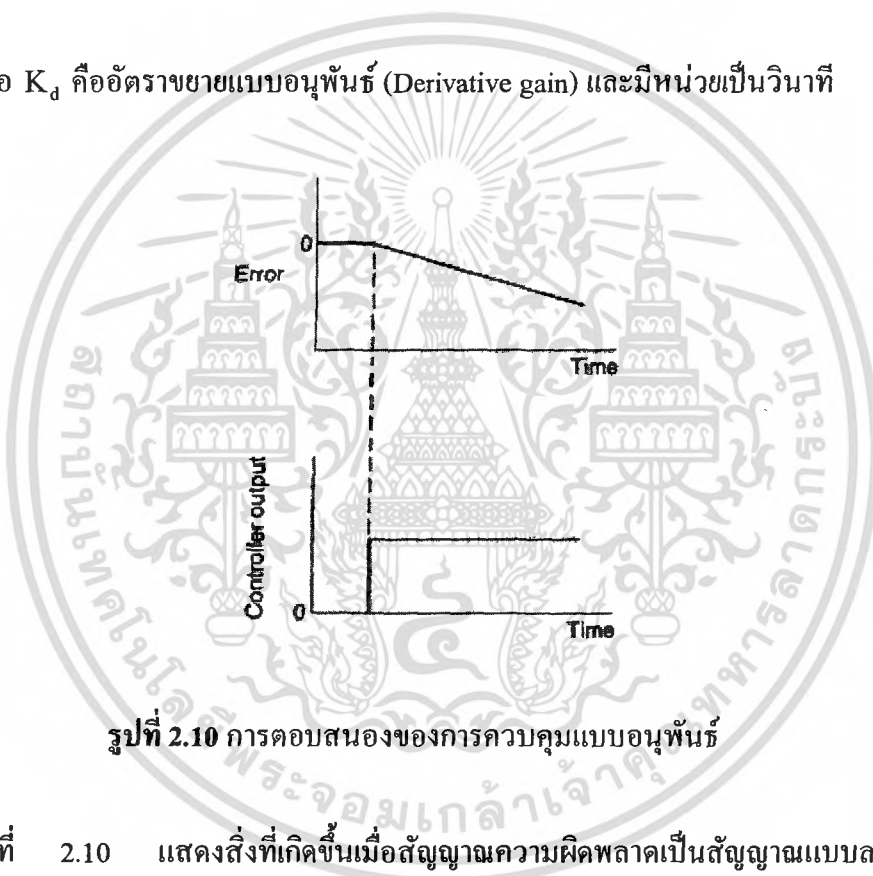
ค่าของ K_p และ K_i จะเป็นค่าที่ใช้กำหนดตำแหน่งของซีโรและโพลของระบบ โดยตำแหน่งของซีโรจะกำหนดด้วยค่า K_p ในขณะที่ K_i จะเป็นค่าที่ใช้กำหนดโพลระบบปิด

2.2.4 ระบบควบคุมแบบอนุพันธ์

การควบคุมอีกแบบหนึ่งก็คือการควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Controller) การควบคุมแบบนี้เอาที่พุดจะเป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงความผิดพลาดเทียบกับเวลา นั่นคือสมการที่ (2.28)

$$\text{Output} = K_d \frac{de}{dt} \quad (2.28)$$

เมื่อ K_d คืออัตราขยายแบบอนุพันธ์ (Derivative gain) และมีหน่วยเป็นวินาที



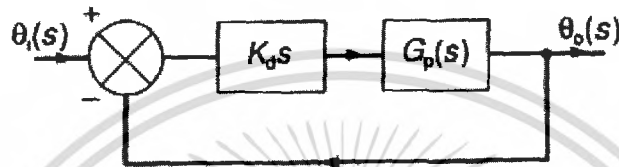
รูปที่ 2.10 การตอบสนองของการควบคุมแบบอนุพันธ์

รูปที่ 2.10 แสดงสิ่งที่เกิดขึ้นเมื่อสัญญาณความผิดพลาดเป็นสัญญาณแบบลาดเอียง (ramp) เมื่อเริ่มได้รับสัญญาณความผิดพลาด และไม่ใช่ค่าของความผิดพลาดซึ่งทำให้ได้สัญญาณส่งออกจากคอนโทรลเลอร์มีค่ามากก่อนที่จะเกิดความผิดพลาดขึ้นมากจริง ๆ อย่างไรก็ตาม หากความผิดพลาดมีค่าคงที่ก็จะไม่มีการสะสมค่าความผิดพลาดแม้ว่าค่าความผิดพลาดจะมีมากก็ตาม ทำให้การควบคุมแบบอนุพันธ์นี้ไม่อ่อนไหวต่อค่าความผิดพลาดที่คงที่หรือเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ ซึ่งผลที่ตามมาการควบคุมแบบนี้จะไม่ใช้เพียงตัวเดียว แต่มักจะใช้ควบคู่ร่วมกับการควบคุมแบบอื่น เปลี่ยนรูปลาปลาสมการที่ (2.28) เพื่อที่จะหาฟังก์ชันถ่ายโอนของคอนโทรลเลอร์ ซึ่งจะเป็นสมการที่ (2.29)

$$G_c(s) = K_d s \quad (2.29)$$

ดังนั้นสำหรับระบบควบคุม ดังที่แสดงในรูปที่ 2.11 การที่มีการควบคุมแบบอนุพันธ์จะ ทำให้ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการที่ (2.30)

$$G_o(s) = \frac{K_d s G_p(s)}{1 + K_d s G_p(s)} \quad (2.30)$$



รูปที่ 2.11 แผนภาพบล็อกที่ประกอบด้วย การควบคุมแบบอนุพันธ์

ถ้าหากว่าระบบเป็นแบบชนิด 1 หรือสูงกว่า การควบคุมแบบอนุพันธ์จะลด S ในเทอม ส่วนลงและลดชนิดของระบบลง 1 อย่างไรก็ตามได้กล่าวก่อนหน้านี้แล้วว่า การควบคุมแบบ อนุพันธ์นี้มักจะไม่ใช่เพียงถ้าพึ่งแต่จะใช้ร่วมกับการควบคุมแบบอื่น เพราะเมื่อใช้การควบคุม แบบอนุพันธ์จะทำให้เพิ่มความเร็วในการตอบสนองของระบบต่อความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

2.2.5 ระบบควบคุมแบบสัดส่วนร่วมอนุพันธ์

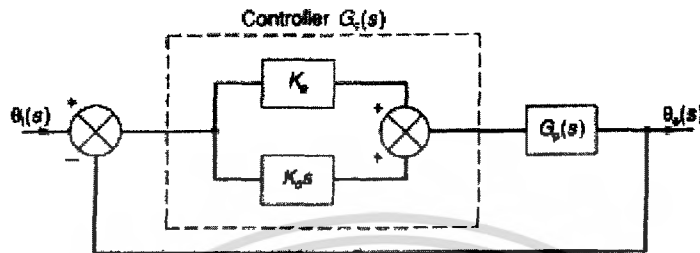
การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับอนุพันธ์ (Proportional plus Derivative Control) ถ้าการ ควบคุมแบบอนุพันธ์ใช้ร่วมกับการควบคุมแบบสัดส่วน (PD) ดังที่แสดงในรูปที่ 2.12 จะได้ ฟังก์ชันถ่ายโอนระบบเปิดเป็นสมการที่ (2.31)

$$G_o(s) = (K_p + K_d s) G_p(s)$$

$$G_o(s) = k_d \left[\left(\frac{1}{\tau_d} \right) + s \right] G_p(s) \quad (2.31)$$

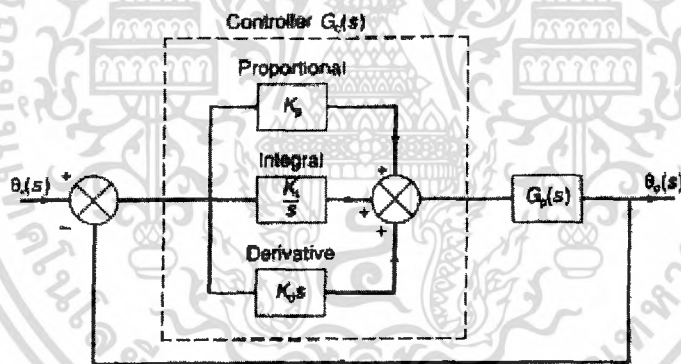
72875

เมื่อ $\tau_d = \frac{K_p}{K_d}$ คือค่าเวลาคงที่อนุพันธ์ (Derivative time constant) ซึ่งในการควบคุมแบบ
 นี้ จะมีซีโรเพิ่มขึ้นที่ $s = -\frac{1}{\tau_d}$ และจะเห็นว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของระบบ ทำให้ไม่มีการ
 เปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัว



รูปที่ 2.12 แผนภาพบล็อกที่ประกอบด้วยสัดส่วนร่วมกับอนุพันธ์

2.2.6 ระบบควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์และอนุพันธ์



รูปที่ 2.13 แผนภาพบล็อกที่ประกอบด้วย PID control

การควบคุมโดยใช้แบบสัดส่วนร่วมกับแบบปริพันธ์และร่วมกับแบบอนุพันธ์ (PID control) หรือที่เรียก การควบคุมแบบ 3 เทอม (tree-term control) ระบบจะมีลักษณะตามรูปที่ 2.13 จะทำให้เอาท์พุทของคอนโทรลเลอร์เมื่อรับอินพุทเป็นความผิดพลาด e ดังสมการที่ (2.32)

$$\text{Output} = K_p e + K_i \int e dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (2.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟังก์ชันถ่ายโอนของคอนโทรลเลอร์ จะได้สมการที่ (2.33)

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + k_d s \quad (2.33)$$

ซึ่งสามารถจัดรูปได้เป็นสมการที่ (2.34)

$$G_c(s) = K_p + \left[1 + \frac{K_i}{K_p s} + \frac{K_d s}{K_p} \right]$$

หรือ

$$G_c(s) = K_p + \left[1 + \frac{K_I}{\tau_i s} + \tau_d s \right] \quad (2.34)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนระบบเปิดของระบบที่แสดงในรูปที่ 2.13 จะเป็นสมการที่ (2.35)

$$G_c(s) = G_c(s)G_p(s) = K_p + \left[1 + \frac{K_I}{\tau_i s} + \tau_d s \right] G_p(s)$$

$$G_c(s) = \frac{K_p + (\tau_i s + 1 + \tau_i \tau_d s^2) G_p(s)}{\tau_i s} \quad (2.35)$$

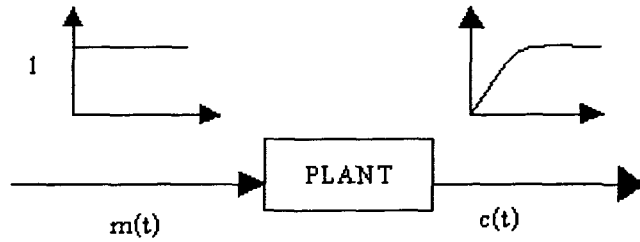
ดังนั้นการควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์และอนุพันธ์ จะเพิ่มจำนวนขั้วโพลให้กับระบบเท่ากับ 2 และเพิ่มจำนวนโพล 1 โพล และทำให้ชนิดของระบบเพิ่มขึ้น 1

2.2.7 หลักการปรับแต่งค่าของระบบพีไอดี

ในการปรับแต่งค่าของพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบสัดส่วน ปริพันธ์และอนุพันธ์นั้น มีด้วยกันหลายวิธี โดยในที่นี้จะกล่าวถึง 3 วิธี ดังนี้

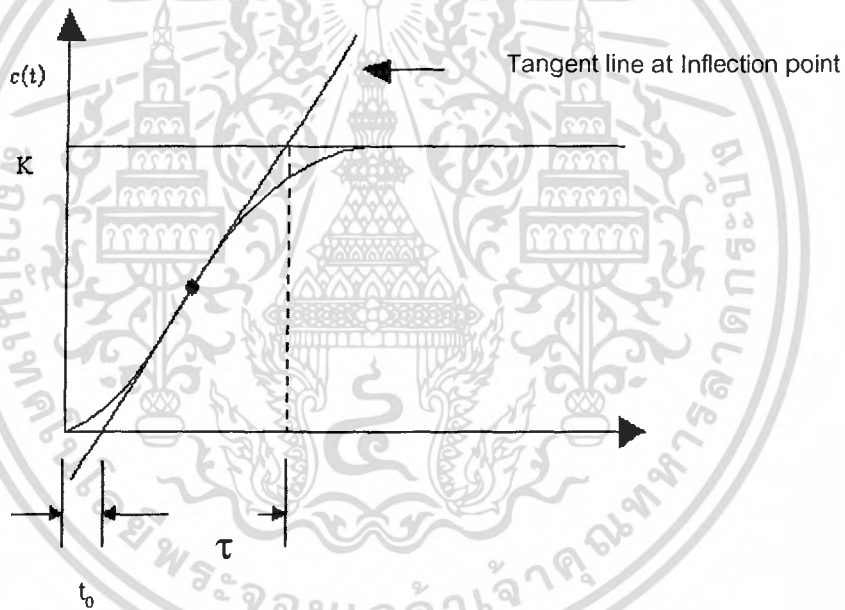
2.2.7.1 การปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีโพสเซสรีแอคชันเคิร์ฟ

วิธีโพสเซสรีแอคชันเคิร์ฟ (Process Reaction Curve) นี้จะหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมสัดส่วนร่วมปริพันธ์และอนุพันธ์ จากผลตอบสนองของกระบวนการเมื่อมีการป้อนอินพุตแบบขั้นบันไดดังรูปที่ 2.14 โดยที่ระบบไม่ได้ต่อร่วมกับตัวควบคุมและมีผลตอบสนองในลักษณะตัว s ซึ่งไม่สามารถใช้วิธีการนี้กับกระบวนการที่ไม่มีการตอบสนองในลักษณะตัว s ได้



รูปที่ 2.14 แสดงวิธีการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีโพเซสรีแอกชันเคิร์ฟ

วิธีการนี้จะแยกพิจารณาค่าคงที่ 2 ค่าคือ ค่าเวลาหน่วง (Delay Time) t_0 และค่าเวลาคงที่ (Time Constant) τ โดยการลากเส้นสัมผัสจุดที่มีอัตราการเบี่ยงเบนสูงสุด เส้นนี้จะตัดกับแกนเวลาและเส้นตรงของเอพาร์ทพุด $C(t)$ ที่ $C(t) = K$ ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีโพเซสรีแอกชันเคิร์ฟ

ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนจะประมาณได้ด้วยระบบอันดับหนึ่งที่มีการหน่วงเวลา แสดงดังสมการที่ (2.36)

$$\frac{C(s)}{M(s)} = \frac{Ke^{-t_0s}}{\tau s + 1} \quad (2.36)$$

จากการคำนวณด้วยวิธีการโพเซสรีแอกชันเคิร์ฟนี้ จะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมตามตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจากการคำนวณด้วยวิธีโพสเซรีแอกชันเคิร์ฟ

ชนิดของตัวควบคุม	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{\tau}{t_o}$	-	-
PI	$0.9 \frac{\tau}{t_o}$	$\frac{t_o}{0.3}$	-
PID	$1.2 \frac{\tau}{t_o}$	$2t_o$	$0.5t_o$

ข้อดีของการใช้วิธีโพสเซรีแอกชันเคิร์ฟ

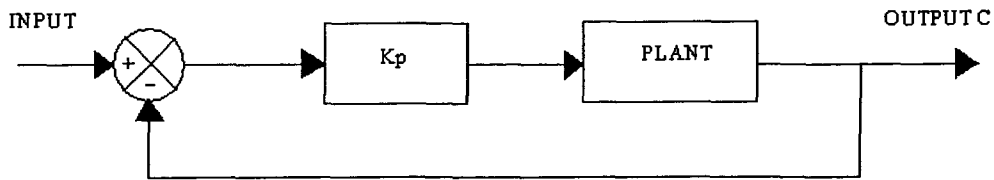
1. ทำการทดสอบเพียงครั้งเดียวเท่านั้น
2. ไม่จำเป็นต้องใช้การลองผิดลองถูก
3. การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์สามารถทำได้ง่าย

แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้มีข้อเสียด้วยกันหลายประการ ดังนี้

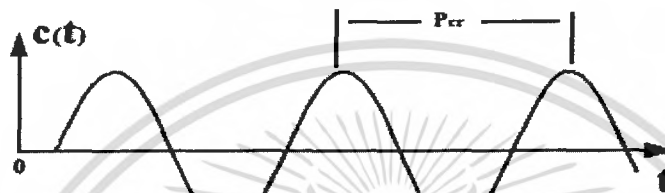
1. การทดสอบจะกระทำภายใต้สภาวะวงเปิด (Open-loop) ดังนั้นหากโหลดมีการเปลี่ยนแปลงขณะทำการทดสอบผลการทดสอบที่ได้จะเกิดความผิดพลาด
2. ในการทดสอบ หากเครื่องมือวัดมีสัญญาณรบกวนหรือกราฟที่ได้จากการทดสอบมีขนาดเล็ก จะทำให้การหาค่าความชันที่ถูกต้องทำได้ยาก
3. วิธีการนี้มีแนวโน้มที่ไวต่อความผิดพลาดจากการสอบเทียบของตัวควบคุม
4. การใช้ค่าพารามิเตอร์ในตารางมีแนวโน้มที่จะทำให้ผลตอบสนองเกิดการแกว่ง
5. วิธีการนี้ไม่เหมาะสมกับกระบวนการที่มีผลตอบสนองแบบแกว่งในวงเปิด เนื่องจากค่าที่ได้จากการทดลองจะเกิดความผิดพลาด

2.2.7.2 การปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีอัลทิเมทเมธอด

วิธีการอัลทิเมทเมธอด (Ultimate Method) นี้จะหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมสัดส่วนร่วมปริพันธ์และอนุพันธ์ จากผลตอบสนองของกระบวนการที่ถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ P ต่ออินพุตแบบขั้นบันได โดยจะทำการปรับค่าของ K_p จนกระทั่งผลตอบสนองเกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง (Sustained Oscillations) ซึ่งวิธีการนี้จะไม่สามารถทำได้หากกระบวนการไม่เกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง ตามรูปที่ 2.16 และ 2.17



รูปที่ 2.16 แสดงบล็อกไดอะแกรมการหาค่าพารามิเตอร์แบบอัลทิเมทเมรูด



รูปที่ 2.17 แสดงวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยวิธีอัลทิเมทเมรูด

ตารางที่ 2.2 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจากการคำนวณด้วยวิธีแบบอัลทิเมทเมรูด

ชนิดของตัวควบคุม	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$	-	-
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{P_{cr}}{1.2}$	-
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	0.125

เมื่อ K_{cr} คืออัตราขยายที่ทำให้ผลตอบสนองเกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง (Critical Gain)

P_{cr} คือคาบเวลาของการแกว่งอย่างต่อเนื่อง (Oscillation Period)

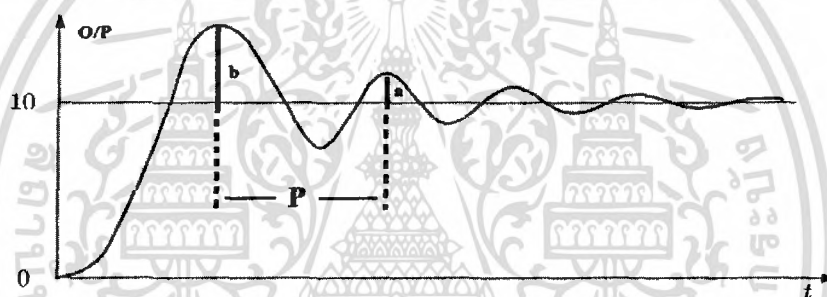
ตารางที่ 2.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจากการใช้วิธีอัลทิเมทเมรูด วิธีการนี้ไม่เป็นที่นิยมมากนัก เนื่องจากระบบต้องทำงานใกล้กับความไม่เสถียรภาพและใช้เวลาค่อนข้างนาน โดยเฉพาะกับกระบวนการที่มีเวลาหน่วงมากๆ เช่นกระบวนการควบคุมอุณหภูมิเป็นต้น การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมสัดส่วนร่วมปริพันธ์และอนุพันธ์ ด้วยวิธีของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ziegler-Nichols นั้น ค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไม่สามารถนำไปใช้งานได้ทันที เนื่องจากเป็นค่าที่ใกล้เคียงเท่านั้นและผลตอบสนองมีค่าพุ่งเกินสูงสุดถึง 25% จึงจำเป็นต้องทำการปรับละเอียดค่าพารามิเตอร์เหล่านี้อีกครั้งหนึ่ง

2.2.7.3 การปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีแอมป์ออสซิลเลชัน

Harriott ได้ปรับปรุงวิธีการแอมป์ออสซิลเลชัน (Damped Oscillation) นี้มาจากวิธีอัลติเมทเมธอด เพื่อนำมาใช้ในกรณีที่ไม่ต้องการให้ผลตอบสนองเกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่องเมื่อทำการปรับค่า K_p

วิธีการนี้จะทำการปรับค่า K_p ไปจนกระทั่งผลตอบสนอง ของกระบวนการในแบบวงปิด มีอัตราการเสื่อม $\frac{1}{4}$ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 จากนั้นจะทำการวัดค่าของ P และใช้ค่าของ $\frac{1}{4} K_p$ คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่เหมาะสมต่อไป



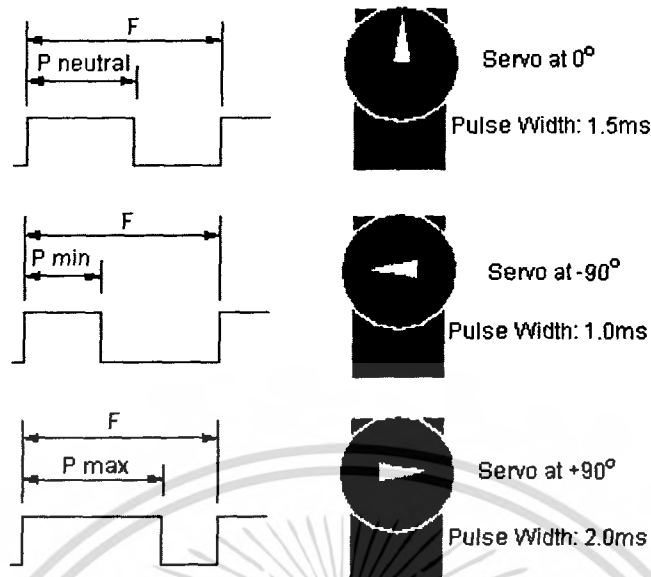
รูปที่ 2.18 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการแบบวงปิดที่มีอัตราเสื่อม $\frac{1}{4}$

ค่าที่ได้จากการคำนวณวิธีนี้คือ

$$k_p = \frac{1}{4} K_p, \quad T_i = \frac{P}{1.5}, \quad T_d = \frac{P}{6}$$

2.3 หลักการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์

การควบคุมการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor) ทำได้โดย การป้อนสัญญาณความกว้างพัลส์ให้กับมอเตอร์ ซึ่งตำแหน่งและทิศทางการหมุนของมอเตอร์นี้จะขึ้นอยู่กับขนาดของความกว้างของพัลส์นั้นๆ โดยทั่วไปแล้วความกว้างของสัญญาณพัลส์ จะมีจุดให้อ้างอิง 3 จุด ดังรูป คือ



รูปที่ 2.19 การทำงานของเซอร์โวมอเตอร์

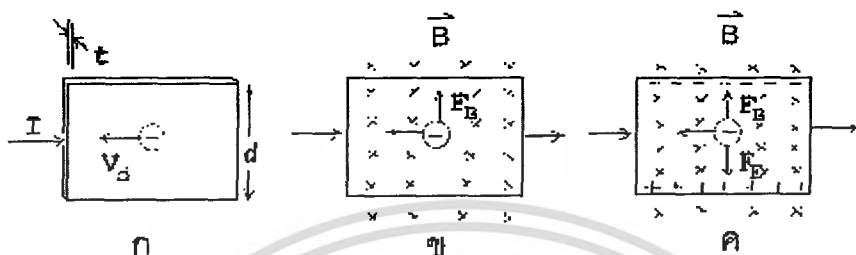
- สัญญาณความกว้างพัลส์ขนาด 1.5 ms จะควบคุมให้เซอร์โวมอเตอร์หมุนไปอยู่ที่ตำแหน่งมุม 0 องศา หรือจุดกึ่งกลางของมอเตอร์
- สัญญาณความกว้างพัลส์ขนาด 1 ms จะควบคุมให้เซอร์โวมอเตอร์หมุนไปอยู่ที่ตำแหน่งมุม - 90 องศา หรือในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา
- สัญญาณความกว้างพัลส์ขนาด 2 ms จะควบคุมให้เซอร์โวมอเตอร์หมุนไปอยู่ที่ตำแหน่งมุม + 90 องศา หรือในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

2.4 หลักการทำงานของปรากฏการณ์ฮอลล์

แม่เหล็ก (magnet) เป็นสิ่งที่สามารถดูดวัสดุบางชนิดได้ เช่น เหล็ก นิกเกิล โคบอลต์ เป็นต้น การที่แม่เหล็กดูดสารบางอย่างได้ เนื่องจากมีสนามแม่เหล็ก (magnetic field) ในบริเวณโดยรอบแม่เหล็ก โดยสามารถวัดสนามแม่เหล็กได้ด้วยตัวรับรู้ฮอลล์ (Linear Hall sensor) ซึ่งทำงานโดยอาศัยหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) ตัวรับรู้ฮอลล์เป็นวงจรรวมที่ทำให้เกิดความต่างศักย์ซึ่งเป็นสัดส่วนตรงกับความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ผ่านในแนวตั้ง

2.4.1 ปรากฏการณ์ฮอลล์

เมื่อนำแผ่นตัวนำบางที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านไปวางไว้ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก พาหะประจุ (charge carriers) ในตัวนำสามารถเบนไปจากแนวทางเดิมได้ และการเบนนี้มีผลทำให้เกิดสนามไฟฟ้าในตัวนำบางในทิศตั้งฉากกับทั้งกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 2.20 แสดงการเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์

การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์อาจอธิบายได้โดยใช้รูปที่ 2.20 ก ถึง ค ดังนี้

ก. แผ่นตัวนำบางที่มีความกว้าง d หนา t และมีกระแสไฟฟ้า (conventional current) I ผ่านในทิศจากด้านซ้ายไปด้านขวา พาหะประจุคืออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ (ด้วยอัตราเร็วลอยเลื่อน v_d) ในทิศตรงข้ามกับกระแสไฟฟ้า I จากด้านขวาไปด้านซ้าย

ข. เมื่อใส่สนามแม่เหล็ก B ในทิศพุ่งเข้าหาและตั้งฉากกับระนาบแผ่นตัวนำบางจะเกิดแรงแม่เหล็ก F_B กระทำกับอิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนเบนไปทางขอบด้านบนของแผ่นตัวนำบาง

ค. เมื่อเวลาผ่านไปจะมีอิเล็กตรอนถูกผลักไปที่ขอบด้านบนจำนวนมาก ส่วนขอบด้านล่างจะเกิดประจุไฟฟ้าบวกจำนวนมากเช่นกัน การที่มีประจุไฟฟ้าต่างชนิดกันที่ขอบทั้งสองทำให้เกิดสนามไฟฟ้า เรียกว่า สนามไฟฟ้าฮอลล์ (Hall field) E_H ในแผ่นตัวนำบางมีทิศจากขอบด้านล่างไปขอบด้านบน สนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดแรงไฟฟ้า F_E กระทำกับอิเล็กตรอน ซึ่งจะทำให้อิเล็กตรอนถูกผลักไปทางขอบด้านล่าง เมื่อแรงไฟฟ้าและแรงแม่เหล็กมีขนาดเท่ากัน อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ในทิศไปทางซ้ายโดยไม่เบน

2.4.2 สมการที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ฮอลล์

สนามไฟฟ้าที่เกิดในแผ่นตัวนำบางมีความสัมพันธ์กับความต่างศักย์หรือโวลเตจ ดังสมการที่ (2.37)

$$E_H = \frac{V_H}{d} \quad (2.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ V_H คือ ความต่างศักย์ฮอลล์ (hall potential difference หรือ hall voltage)

E_H คือ สนามไฟฟ้าฮอลล์

d คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ

จากรูปที่ 2.11 ค. ขณะที่แรงแม่เหล็กและแรงไฟฟ้ามีขนาดเท่ากัน จะได้ สมการที่ (2.38) และสมการที่ (2.39)

$$(-e)E_H = (-e)V_d B \quad (2.38)$$

$$E_H = V_d B$$

$$V_H = V_d B d \quad (2.39)$$

จากอัตราเร็วลอยเลื่อน V_d มีค่าดังสมการที่ (2.40)

$$V_d = \frac{I}{neA} \quad (2.40)$$

เมื่อ n คือ จำนวนพาหะประจุต่อลูกบาศก์เมตร (หรือความหนาแน่นของพาหะประจุ)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นตัวนำบาง

e คือ ประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอน

แทนสมการที่ (2.39) ลงในสมการที่ (2.40) จะได้ สมการที่ (2.41)

$$V_H = \frac{IBd}{neA} \quad (2.41)$$

โดยที่ $A = td$ เมื่อ t คือความหนาของแผ่นตัวนำบาง จะได้สมการที่ (2.42)

$$B = \frac{netV_H}{I} \quad (2.42)$$

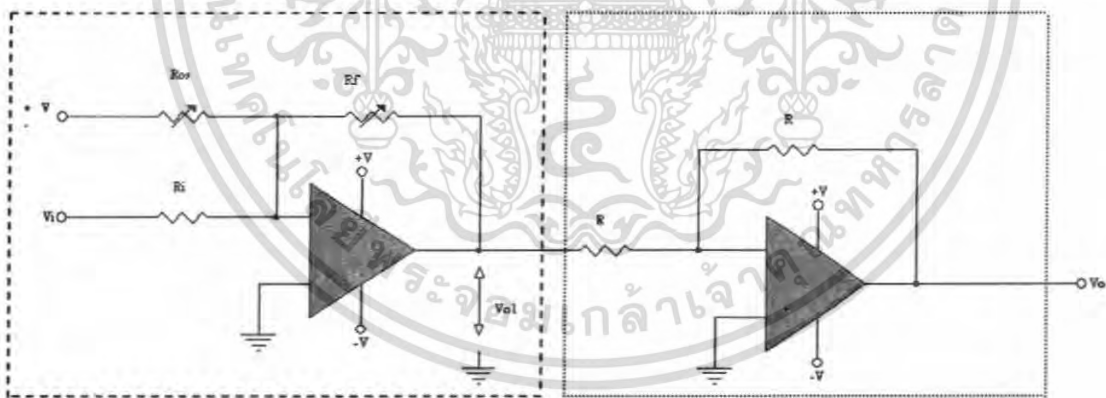
ปริมาณ V_H , I และ t ในสมการที่ (2.42) หาได้จากการวัด ส่วนค่า n ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ทำหัววัด วัสดุที่เป็นสารกึ่งตัวนำจะมีจำนวนพาหะประจุน้อยกว่าตัวนำไฟฟ้าที่ดี แต่ก็ยังมีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่สามารถวัดได้ ส่วนฉนวนมีจำนวนพาหะประจุน้อยมาก แต่ก็ยอมให้กระแสไฟฟ้าปริมาณเล็กน้อยผ่าน จากการศึกษาพบว่า สารกึ่งตัวนำที่เจือสิ่งเจือปนมี

ค่า $n \cong 10^{22} \text{ m}^{-3}$ และโลหะทั่วไปมีค่า $n \cong 10^{28} \text{ m}^{-3}$ ดังนั้นจึงสามารถหาความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ไม่ทราบค่าจากสมการที่ (2.42) ได้

2.5 หลักการทำงานของตัวแปลงค่าความดัน

เครื่องวัดระดับน้ำอัตโนมัติแบบ (Pressure Gauge หรือ Pressure Transducers) เป็นเครื่องมือที่อาศัยหลักการที่เมื่อระดับน้ำเปลี่ยนแปลง จะทำให้ความกดดันของน้ำเปลี่ยนแปลง ทำให้ทรานสดิวเซอร์ (Transducer) เปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณทางไฟฟ้าของสถานีที่ทำการตรวจวัด จากหลักการนี้ทำให้มีการนำไปทำทรานสดิวเซอร์ ที่แตกต่างกันได้หลายแบบแต่ก็จะมีหลักการที่นำเอาความกดดันของน้ำนี้มาแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าทรานสดิวเซอร์ ของค่าความกดดันทางไฟฟ้าจะมีหลักการทำงานที่สำคัญอยู่ 2 ประการคือ ความกดดันซึ่งจะผันแปรกับค่าระดับน้ำ และการแปลงค่าความกดดันเป็นค่าสัญญาณทางไฟฟ้า ซึ่งค่าสัญญาณทางไฟฟ้านี้จะนำไปต่อเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูลอีกทีหนึ่ง

ทรานสดิวเซอร์สำหรับวัดความดันมีลักษณะการทำงานคล้ายกับทรานสดิวเซอร์ที่มีการเปลี่ยนพลังงานด้วยแรง ต่างกันตรงที่จะเปลี่ยนความดันให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าเท่านั้นเอง ถือเป็นส่วนที่นำความดันที่วัดได้ซึ่งสัมพันธ์กับความสูงแปลงเป็นค่าความต่างศักย์เพื่อเป็นสัญญาณส่งกลับไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์



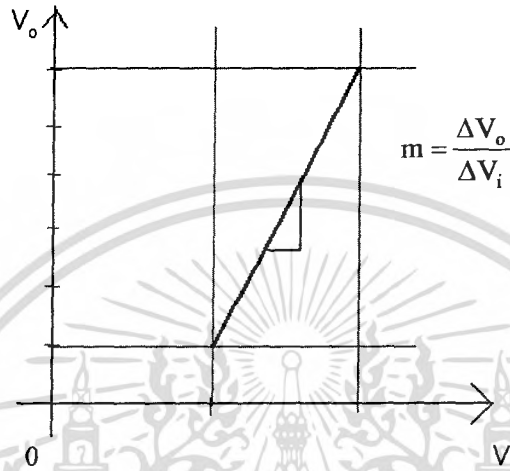
รูปที่ 2.21 วงจรซีโร-สแปน

จากรูปที่ 2.21 วงจรซีโร-สแปนที่นำมาใช้สามารถแยกพิจารณาได้เป็นสองส่วนคือส่วนที่ทำหน้าที่ในการขยายค่าให้อยู่ในช่วงที่ต้องการ และส่วนที่ทำหน้าที่อินเวอร์เตอร์ (Invertor) ซึ่งสามารถหาอัตราขยายได้จากอัตราส่วนของค่าเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตและค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาท์พุต จะได้สมการที่ (2.43)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{GAIN} = \frac{\Delta V_o}{\Delta V_i} \quad (2.43)$$

เมื่อเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตและค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุตจากสมการเส้นตรงจะได้



รูปที่ 2.22 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตและค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุต

จากรูปที่ 2.22 จะได้สมการเส้นตรง: $y = mx + c$

พิจารณาวงจรซีโร-สแปน จะสามารถสมการค่าแรงดันเอาต์พุตได้จาก คังสมการที่ (2.44) และสมการที่ (2.45)

$$V_{o1} = -\left(\frac{R_f}{R_i} V_i + \frac{R_f}{R_{os}} (\pm V)\right) \quad (2.44)$$

และ

$$V_o = \left(\frac{R_f}{R_i} V_i + \frac{R_f}{R_{os}} (\pm V)\right) \quad (2.45)$$

เมื่อเปรียบเทียบกับสมการเส้นตรงข้างต้น จะได้สมการที่ (2.46)

$$m = \frac{R_f}{R_i} \quad (2.46)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้น ทำการเลือกค่าความต้านทาน R_i เพื่อหาค่าความต้านทาน R_f และจะได้ สมการที่ (2.47)

$$C = \frac{R_f}{R_{os}} (\pm V) \quad (2.47)$$

เมื่อ $y = 1$ จากสมการที่ (2.47) จะสามารถหาค่าความต้านทาน R_{os} ได้

$$C = 1 - \frac{R_f}{R_i} (V_i)$$

2.6 หลักการใช้งานโมดูลต่างๆ ภายใน dsPIC30F2010

ในการใช้งาน dsPIC30F2010 จำเป็นอย่างยิ่งในการเข้าใจโมดูลต่างๆที่นำมาใช้งาน เพื่อให้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพอย่างเต็มที่

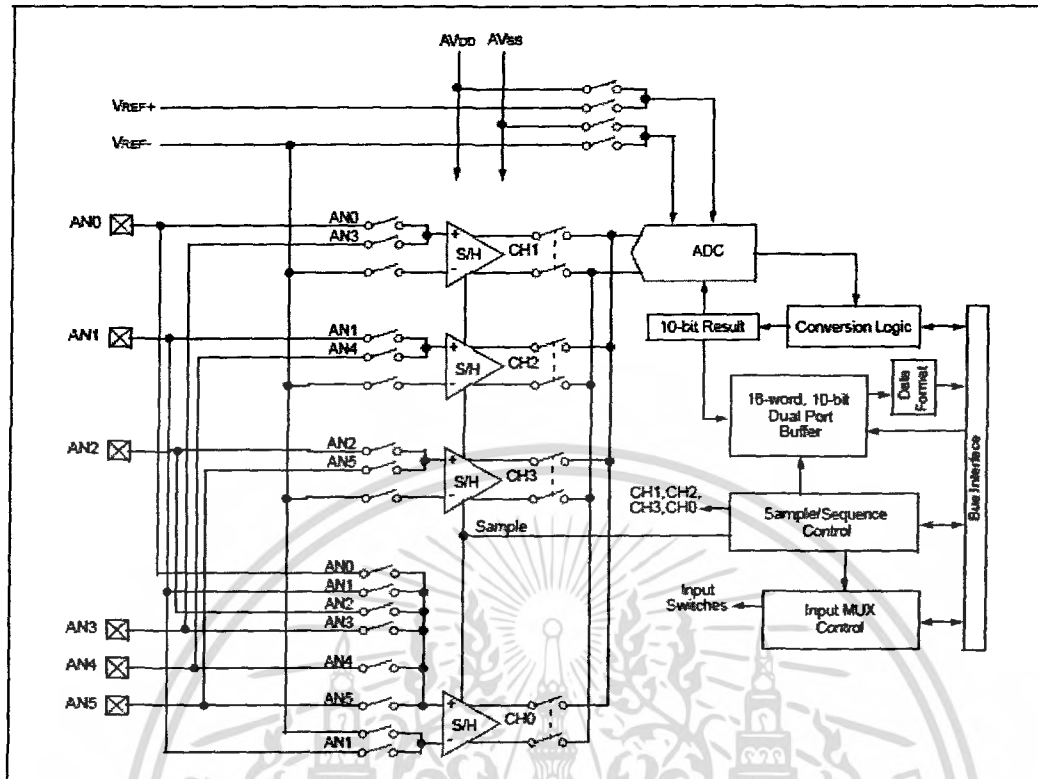
2.6.1 โมดูลแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล (ADC)

1. คุณสมบัติโดยสรุปของ โมดูลแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นดิจิตอล

- เป็นโมดูลแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นดิจิตอลที่มีความละเอียด 10 บิต จำนวน 6 ช่อง
- ใช้วิธีการแปลงสัญญาณแบบประมาณค่าหรือซัคเซสซีฟแอ็ปปริอ็อกซิเมชัน (Successive Approximation)
- มีอัตราเร็วในการสุ่มสัญญาณสูงสุด 500 กิโลแซมเปิลต่อวินาที (ksps) หรือ 500,000 จุดตัวอย่างต่อวินาที
- สามารถกำหนดให้ทำงานได้ขณะเข้าสู่โหมดสลีป (Sleep mode)
- สามารถกำหนดระดับแรงดันอ้างอิงได้ทั้งจากภายในผ่านทางขา AV_{dd} กับ AV_{ss} และภายนอกผ่านทางขา V_{ref+} และ V_{ref-}

2. การทำงานเบื้องต้นของ โมดูล ADC ใน dsPIC30F2010

ในรูปที่ 2.23 เป็นไคอะแกรมการทำงานของโมดูล ADC ใน dsPIC30F2010 ซึ่งมาขาพอร์ตอินพุตแอนะลอกทั้งสิ้น 6 ขา คือ AN0-AN5 โดยมี 2 ขาที่สามารถใช้รับแรงดันอ้างอิงเพื่อขยายย่านของแรงดันอินพุต ภายในโมดูลมีวงจรสุ่มและเก็บค่าสัญญาณ (Sample and Hold : S/H) จำนวน 4 ชุด โดยทำงานร่วมกับส่วนควบคุมการมัลติเพล็กซ์สัญญาณอินพุต ทำให้สามารถจัดสรรวงจร S/H ให้สามารถรองรับกับสัญญาณอินพุตแอนะลอกทั้ง 6 ช่องได้ด้วยความเร็วสูงสุด



รูปที่ 2.23 โค้ดแอมการทำงานอย่างง่ายของโมดูล ADC ในไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F2010

สัญญาณที่ผ่านจากวงจร S/H จะถูกป้อนเข้าสู่วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลแบบซิกเซสซีฟ แอ็ปรีอิกซิเมชัน ขนาด 10 บิต ข้อมูลที่ได้จากการแปลงจะถูกพักไว้ในหน่วยความจำแรม จากนั้นจะได้รับการจัดรูปแบบตามที่ผู้พัฒนาโปรแกรมกำหนด ดังแสดงในรูปที่ 2.23 จากนั้นข้อมูลจะถูกถ่ายทอดลงบนบัสข้อมูลเพื่อส่งไปยังซีพียูต่อไป

อีกองค์ประกอบหนึ่งที่ทำให้โมดูล ADC สามารถแปลงสัญญาณได้รวดเร็วคือ ภายในโมดูล ADC มีบัพเฟอร์ความจุ 16 เวิร์ด นั่นคือ สามารถรองรับข้อมูลที่ได้จากการแปลงสูงสุด 16 ชุดข้อมูล ดังนั้นเมื่อแปลงสัญญาณครั้งหนึ่งก็นำมาเก็บไว้ที่บัพเฟอร์ หากบัพเฟอร์ยังไม่เต็มก็สามารถกลับไปแปลงสัญญาณต่อได้ทันที โดยไม่ต้องรอให้การถ่ายทอดข้อมูลไปยังรีจิสเตอร์ที่ใช้เก็บค่าการแปลงเสร็จสิ้น

3. การกำหนดค่าเพื่อใช้งาน โมดูล ADC มีขั้นตอนโดยสรุปดังนี้

3.1 ตั้งค่าของโมดูล ADC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เลือกขาพอร์ตให้ทำงานเป็นอินพุตแอนะล็อกที่รีจิสเตอร์ ADPCFG
2. เลือกแหล่งจ่ายแรงดันอ้างอิงให้เหมาะสมกับขานแรงดันแอนะล็อกทางอินพุตที่บิต 15 ถึง 13 ของรีจิสเตอร์ ADCON2
3. เลือกสัญญาณนาฬิกาสำหรับการแปลงสัญญาณที่บิต 5 ถึง 0 ของรีจิสเตอร์ ADCON3
4. กำหนดจำนวนช่องของวงจร S/H ที่ต้องใช้ที่บิต 9 และ 8 ของรีจิสเตอร์ ADC และรีจิสเตอร์ ADPCFG
5. กำหนดวิธีการสุ่มสัญญาณที่บิต 3 ของรีจิสเตอร์ ADCON1 และรีจิสเตอร์ ADCSSL
6. กำหนดจำนวนอินพุตที่ต้องทำงานร่วมกับวงจร S/H ที่รีจิสเตอร์ ADCHS
7. เลือกลำดับการสุ่มและแปลงสัญญาณที่บิต 7 ถึง 0 ของรีจิสเตอร์ ADCON1 และบิต 12 ถึง 8 ของรีจิสเตอร์ ADCON3
8. เลือกรูปแบบของผลลัพธ์ที่ต้องการที่บิต 9 และ 8 ของรีจิสเตอร์ ADCON1
9. เลือกการอินเตอร์รัปต์ที่บิต 9 ถึง 5 ของรีจิสเตอร์ ADCON2
10. เปิดการทำงานของโมดูล ADC ที่บิต 15 ของรีจิสเตอร์ ADCON1

3.2 กำหนดการอินเตอร์รัปต์ (ถ้าต้องการ)

1. เคลียร์บิต ADIF
2. เลือกระดับความสำคัญของการอินเตอร์รัปต์

2.6.2 โมดูลตรวจจับสัญญาณ

ใน dsPIC30F2010 บรรจุโมดูลตรวจจับสัญญาณนี้ไว้ 4 โมดูลคือ IC1, IC2, IC7 และ IC8 โดยข้อมูลที่ตรวจจับได้นั้นจะมีขนาด 16 บิต ส่วนไทเมอร์ที่ทำงานเกี่ยวข้องด้วยคือไทเมอร์ 2 และ 3 ซึ่งต้องเลือกตัวใดตัวหนึ่งในการทำงาน ในรูปที่ 2.24 แสดงไดอะแกรมการทำงานของโมดูลตรวจจับสัญญาณอินพุตหรือ IC

คุณสมบัติโดยสรุปของโมดูลตรวจจับสัญญาณอินพุต (Input Capture Module)

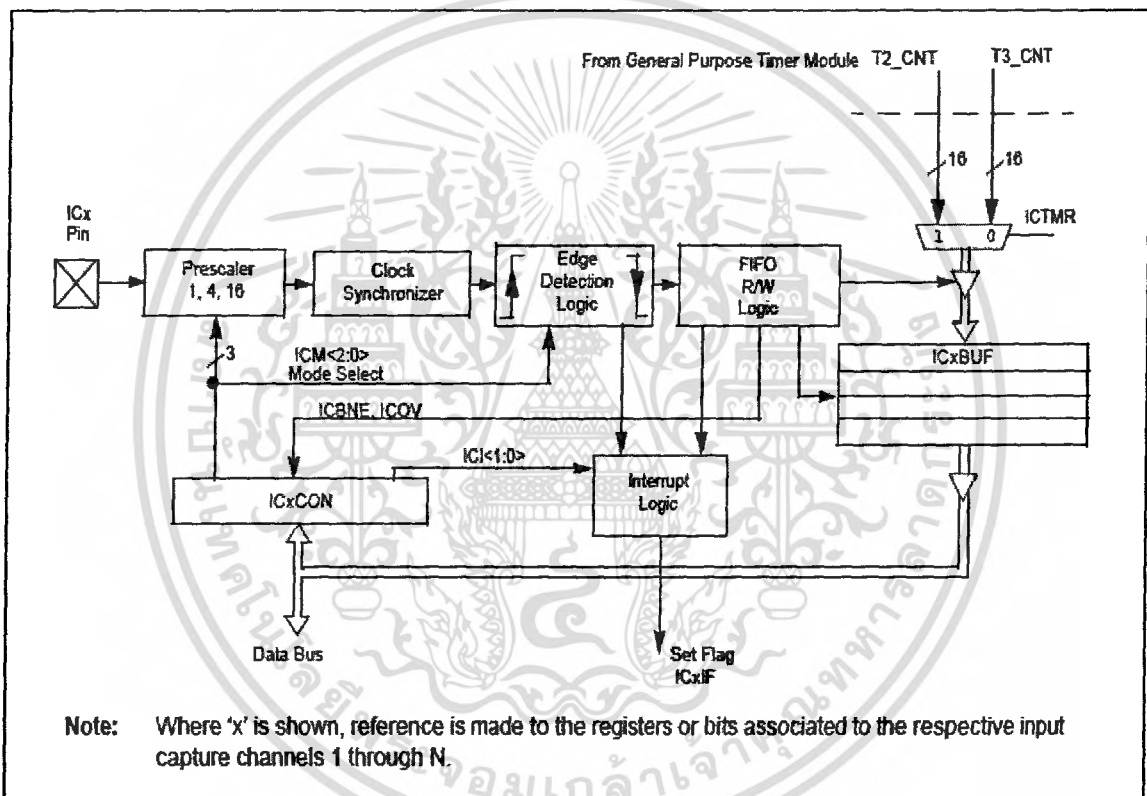
- มีความละเอียดในการตรวจจับสัญญาณ 16 บิต
- สามารถกำหนดการเชื่อมโยงการทำงานร่วมกับไทเมอร์ 2 และ 3
- ในแต่ละโมดูลมีบัฟเฟอร์แบบ FIFO ขนาด 4 เวิร์ด พร้อมคุณสมบัติในการแจ้ง

ข้อผิดพลาดในการตรวจจับสัญญาณ ได้แก่ บัฟเฟอร์ไม่ว่าง (Input Capture Buffer Not Empty)

และค่าในการตรวจจับสัญญาณเกินหรือโอเวอร์โฟลว์ (Capture Overflow)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สามารถกำหนดรูปแบบการตรวจจับสัญญาณได้หลากหลายรูปแบบดังนี้
 - ตรวจเมื่อพบสัญญาณขอบขาลง
 - ตรวจเมื่อพบสัญญาณขอบขาขึ้น
 - ตรวจเมื่อพบสัญญาณขอบขาขึ้นอันดับที่ 4
 - ตรวจเมื่อพบสัญญาณขอบขาขึ้นอันดับที่ 16
 - ตรวจเมื่อพบสัญญาณขอบขาขึ้นและขอบขาลง
- สามารถกำเนิดการอินเทอร์รัปต์เมื่อตรวจพบสัญญาณตามเงื่อนไขที่กำหนด
- มีปริสเกลเลอร์สำหรับหารความถี่และลดทอนอัตราการนับ



รูปที่ 2.24 แสดงไดอะแกรมการทำงานของโมดูลตรวจจับสัญญาณอินพุต

2.6.3 โมดูล MCPWM ใน dsPIC30F2010 ควบคุมมอเตอร์

โมดูลฟังก์ชันพิเศษของ dsPIC คือ โมดูลสร้างสัญญาณ PWM เพื่อควบคุมมอเตอร์ หรือเรียกว่า โมดูล MCPWM (Motor Control PWM) ใน dsPIC บรรจุโมดูลนี้ไว้ตั้งแต่ 6 ถึง 8 ช่อง ในกรณี 6 ช่อง สามารถขับมอเตอร์แบบเฟสเคียวได้ 3 ตัว และมอเตอร์ 3 เฟสได้ 1 ตัว ดังนั้นจึงเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำไปใช้ควบคุมอินดักชันมอเตอร์ 3 เฟส, สวิตซ์รีลักแทนซ์มอเตอร์ (SR),

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่านหรือบลัดเลสมอเตอร์ (BLDC) และในระบบเครื่องสำรองไฟฉุกเฉิน หรือ UPS (Un-interrupted Power Supply)

1. คุณสมบัติโดยสรุปของ โมดูล MCPWM

- ความละเอียดของสัญญาณ PWM ที่สร้างขึ้นเท่ากับ $T_{cy}/2$
- ในโมดูล MCPWM 1 ชุด มี 2 เาต์พุตใน dsPIC30F2010 มีโมดูล 3 ชุดจึงมีทั้งสิ้น 6 ช่อง
- สามารถใช้งานเอาต์พุตของโมดูล MCPWM แยกกันอย่างอิสระและร่วมกัน
- เมื่อทำงานในแบบร่วมกันหรือคอมพลิเมนต์าริสามารถกำหนดค่าเวลาวิกฤต (dead time) เพื่อช่วยให้การขับมอเตอร์ 3 เฟสเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ
- สามารถเลือกโหมดเอาต์พุตได้ 4 โหมด
 - โหมดปรับขอบสัญญาณ (Edge aligned mode)
 - โหมดสัญญาณเดี่ยว (Single event mode)
 - โหมดปรับสัญญาณกึ่งกลาง (Center aligned mode)
 - โหมดปรับสัญญาณกึ่งกลางพร้อมปรับปรุงค่า (Center aligned mode with double updates)
- มีอินพุตสำหรับตรวจจับความผิดพลาดในการทำงาน (FAULT) แบบโปรแกรมได้
- สามารถสร้างสัญญาณกระตุ้นส่งไปยังโมดูลแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลเพื่อกำหนดจังหวะการทำงานให้สัมพันธ์กัน

ในรูปที่ 2.25 แสดงไคอะแกรมการทำงานของโมดูล MCPWM ส่วนประกอบหลักของโมดูลนี้คือ ส่วนกำเนิดสัญญาณ PWM ที่มีอยู่ด้วยกันสูงสุด 4 ชุด โดยใน dsPIC30F2010 จะมี 3 ชุด ซึ่งได้ค่าฐานเวลามาจากรีจิสเตอร์ PTMR และ PTPER ส่วนค่าความถี่ไซเคิลของสัญญาณ PWM ในโมดูล MCPWM นี้สามารถกำหนดได้จากรีจิสเตอร์ความถี่ไซเคิลส่วนกำเนิดสัญญาณ PWM แต่ละส่วนที่เป็นอิสระต่อกัน นอกจากนี้ยังสามารถกำหนดการทำงานของขาพอร์ตเอาต์พุตของโมดูล MCPWM โดยตรงผ่านรีจิสเตอร์ OVDCON

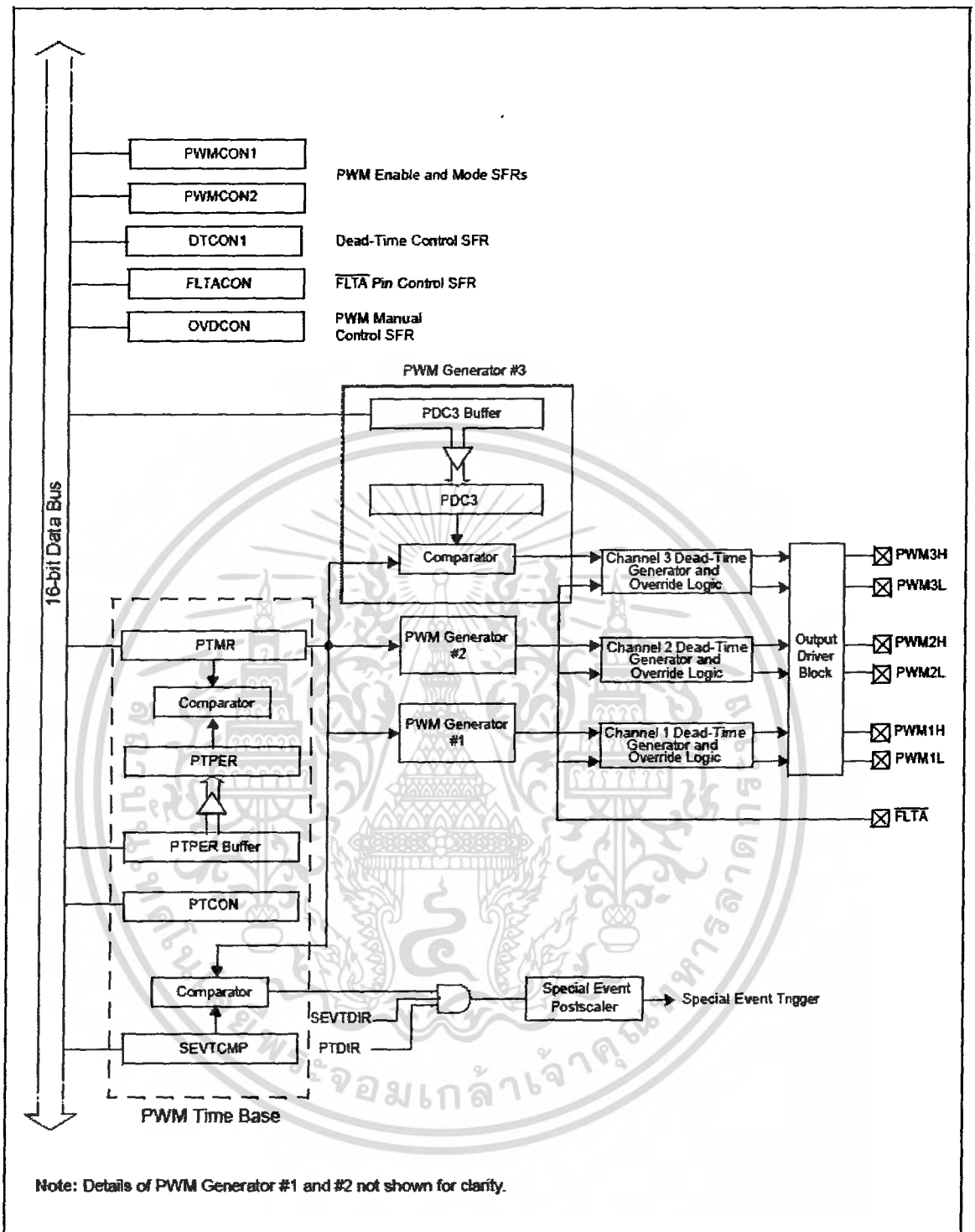
ส่วนกำเนิดสัญญาณ PWM สำหรับควบคุมมอเตอร์แต่ละชุดในโมดูล MCPWM สามารถกำหนดให้ทำงานแยกจากกันเป็นอิสระ (Independent mode) หรือทำงานร่วมกัน (Complementary mode) เพื่อขับมอเตอร์ 3 เฟสได้ โดยกำหนดผ่านรีจิสเตอร์ PWMCON1 และ PWMCON2 และเมื่อกำหนดให้ทำงานร่วมกันจะต้องมีการจัดการสัญญาณเพื่อให้มอเตอร์ในแต่ละเฟสสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง นั่นคือการจัดการค่าเวลาหน่วงเฟส (dead time control) โดยใช้รีจิสเตอร์ DTCON1 และ DTCON2 (ไม่มีใน dsPIC30F2010)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณที่ออกจากโมดูล MCPWM จะมีขาพอร์ต 2 ขาคือขาช่อง นั่นคือ ขาเอาต์พุตด้านแรงดันสูง – PWMxH และขาเอาต์พุตด้านแรงดันต่ำ – PWMxL (x คือหมายเลขของช่องเอาต์พุตมี 4 ค่าคือ 1-4 โดยใน dsPIC30F2010 มีเพียง 1-3) หรือเรียกว่า คู่เอาต์พุต นอกจากนั้นยังสามารถส่งสัญญาณเอาต์พุตผ่าน पोस्टสเกลเลอร์ เพื่อสร้างเป็นสัญญาณกระตุ้นพิเศษให้แก่โมดูลแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (ADC) ด้วย เพื่อให้โมดูล MCPWM สามารถทำงานสัมพันธ์กับโมดูลADC ได้ด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 แสดงไดอะแกรมการทำงานของโมดูล MCPWM ในไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC

นอกจากนั้นในโมดูล MCPWM ยังมีอินพุตสำหรับรับสัญญาณตรวจสอบความผิดปกติ หรือ FAULT เพื่อป้องกันไม่ให้โมดูล MCPWM ทำงานผิดพลาดหรือเสียหายเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในโมดูล MCPWM โดยในส่วนนี้มีพอร์ตอินพุตสำหรับรับสัญญาณ 2 ขา คือ FLTA เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ FLTB สำหรับใน dsPIC30F2010 จะมีเพียงขาเดียวคือ FLTA โดยการทำงานในส่วนนี้ได้รับการควบคุมจากรีจิสเตอร์ FLTACON สำหรับส่วนตรวจสอบความผิดปกติชุด A และ FLTBCON สำหรับส่วนตรวจสอบความผิดปกติชุด B (ไม่มีใน dsPIC30F2010)

2. รีจิสเตอร์ที่ใช้งานโมดูล MCPWM

ในโมดูล MCPWM ของไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC มีรีจิสเตอร์ที่ใช้ควบคุมและกำหนดค่าในการทำงานรวม 14 ตัว ประกอบด้วย

- PTCON รีจิสเตอร์ควบคุมฐานเวลาในการกำเนิดสัญญาณ PWM
- PTMR รีจิสเตอร์กำหนดค่าฐานเวลาของการกำเนิดสัญญาณ PWM
- PTPER รีจิสเตอร์กำหนดคาบของฐานเวลาสำหรับการกำเนิดสัญญาณ PWM
- SEVTCMP รีจิสเตอร์เปรียบเทียบค่า
- PWMCON1 รีจิสเตอร์ควบคุม PWM #1
- PWMCON2 รีจิสเตอร์ควบคุม PWM #2
- DTCON1 รีจิสเตอร์ควบคุมค่าเวลาวิกฤต1 หรือ dead time #1
- DTCON2 รีจิสเตอร์ควบคุมค่าเวลาวิกฤต2 หรือ dead time #2
- FLTACON รีจิสเตอร์ควบคุมการตรวจจับความผิดปกติของการขับมอเตอร์ชุด A
- FLTBCON รีจิสเตอร์ควบคุมการตรวจจับความผิดปกติของการขับมอเตอร์ชุด B
- PDC1 รีจิสเตอร์กำหนดค่าความถี่ไซเคิลของโมดูลกำเนิดสัญญาณ PWM ชุดที่ 1
- PDC2 รีจิสเตอร์กำหนดค่าความถี่ไซเคิลของโมดูลกำเนิดสัญญาณ PWM ชุดที่ 2
- PDC3 รีจิสเตอร์กำหนดค่าความถี่ไซเคิลของโมดูลกำเนิดสัญญาณ PWM ชุดที่ 3
- PDC4 รีจิสเตอร์กำหนดค่าความถี่ไซเคิลของโมดูลกำเนิดสัญญาณ PWM ชุดที่ 4

ใน dsPIC30F2010 มีใช้ทั้งสิ้น 12 ตัว ที่ไม่มีคือ รีจิสเตอร์ FLTBCON เนื่องจากโมดูล MCPWM ของ dsPIC30F2010 มีส่วนตรวจจับความผิดปกติหรือ FAULT เพียง 1 ชุดคือชุด A และรีจิสเตอร์ PDC4 เนื่องจาก dsPIC30F2010 มีโมดูล MCPWM 3 ชุด

3. ฐานเวลาสัญญาณ PWM

การกำหนดฐานเวลาของสัญญาณ PWM ที่ใช้โมดูล MCPWM ซึ่งแยกอิสระจากโมดูลเอาต์พุตเปรียบเทียบ (Output Compare : OC) ค่าฐานเวลาได้มาจากการทำงานของไทมเมอร์ 15 บิต ร่วมกับปริสเกลเลอร์และโพสดีสเกลเลอร์ในโมดูล MCPWM โดยข้อมูล 15 บิตนั้นบรรจุอยู่ใน 15 บิตล่างของรีจิสเตอร์ PTMR ส่วนบิต MSB คือบิต PTDIR เป็นบิตที่อ่านได้อย่างเดียวใช้ในการแสดงทิศทางในการนับค่าในปัจจุบันของฐานเวลา PWM นี้โดยถ้าบิตนี้เป็น “0” แสดงว่า PTMR กำลังนับค่าขึ้น และเป็น “1” เมื่อกำลังนับค่าลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเอ็นเอเบิลให้ส่วนฐานเวลา PWM นี้ทำงานต้องเซตบิต PTEN ซึ่งเป็นบิต 15 ของรีจิสเตอร์ PTCON อย่างไรก็ตาม ค่าในรีจิสเตอร์ PTMR จะไม่ถูกเคลียร์แม้ว่าส่วนฐานเวลาของ PWM นี้จะถูกดีสเอเบิลด้วยการเคลียร์บิต PTEN

ฐานเวลา PWM ในโมดูล MCPWM สามารถกำหนดให้ทำงานได้ 4 โหมดคือ

1. โหมดเปลี่ยนแปลงค่าอิสระ (Free Running mode)
2. โหมดทำงานครั้งเดียว (Single Event mode)
3. โหมดนับค่าขึ้นหรือลงอย่างต่อเนื่อง (Continuous Up/Down Count mode)
4. โหมดนับค่าขึ้นหรือลงอย่างต่อเนื่องพร้อมการอินเตอร์รัปต์เพื่อปรับปรุงค่า (Continuous Up/Down Count mode with interrupts for double-updates)

การเลือกโหมดทำได้ด้วยการกำหนดค่าที่บิต PTMOD1 และ PTMOD0 ซึ่งเป็นบิต 1 และ 0 ในรีจิสเตอร์ PTCON

- ฐานเวลา PWM ในโหมดเปลี่ยนแปลงค่าอิสระ
โหมดนี้ฐานเวลาเพิ่มค่าขึ้นจนกระทั่งตรงกับค่าในรีจิสเตอร์ PTPER จากนั้น PTMR จะรีเซ็ตและทำการนับค่าเพิ่มขึ้นต่อเนื่องไปอีกครบเท่าที่บิต PTEN ยังคงเป็น “1” อยู่

- ฐานเวลา PWM ในโหมดทำงานครั้งเดียว
โหมดนี้ฐานเวลาจะเริ่มนับขึ้นเมื่อมีการเซตบิต PTEN เมื่อค่าของรีจิสเตอร์ PTMR ตรงกับ PTPER รีจิสเตอร์ PTMR จะรีเซ็ต บิต PTEN จะถูกเคลียร์โดยฮาร์ดแวร์โดยกระบวนการทางฮาร์ดแวร์ทำให้ฐานเวลา PWM หยุดทำงานตามไปด้วย

- ฐานเวลา PWM ในโหมดนับค่าขึ้นหรือลงอย่างต่อเนื่อง
โหมดนี้ฐานเวลาเพิ่มค่าขึ้นจนกระทั่งตรงกับค่าในรีจิสเตอร์ PTPER จากนั้นจะกลับทิศทางการนับเป็นนับค่าลงแทน จนกระทั่งเท่ากับ “0” แล้วกลับไปเริ่มต้นนับขึ้นใหม่ บิต PTDIR ซึ่งเป็นบิต 5 ของรีจิสเตอร์ PTMR จะแสดงให้ทราบถึงทิศทางการนับในปัจจุบัน โดยเป็น “0” เมื่อนับขึ้นและเป็น “1” เมื่อนับค่าลง

- ปริสเกลเลอร์ของฐานเวลา PWM

สัญญาณนาฬิกาที่ใช้ในการนับค่าของฐานเวลา PWM ในโมดูล MCPWM ก็คือสัญญาณนาฬิกาในการทำงานของระบบนั่นเอง โดยมีค่าความถี่เท่ากับ FCY (ซึ่งเท่ากับ ¼ ของค่าความถี่หลัก) สัญญาณนาฬิกาจะส่งผ่านไปยังค่าในรีจิสเตอร์ PTMR โดยมีตัวลวดทอนหรือปริสเกลเลอร์

เข้ามาจัดการเพื่อปรับอัตราการทำงานซึ่งส่งผลต่อความถี่ของสัญญาณ PWM อัตราการลดทอนของปริสเกลเลอร์สามารถกำหนดได้จากบิต PTCKPS1 และ PTCKPS0 ของรีจิสเตอร์ PTCON

- โพลัสสเกลเลอร์ของฐานเวลา PWM

เมื่อค่าของรีจิสเตอร์ PTMR ตรงกับค่าของรีจิสเตอร์ PTPER จะเกิดสัญญาณเอาต์พุตขึ้นเพื่อนำไปสร้างเป็นสัญญาณอินเตอร์รัปต์ และในส่วนฐานเวลา PWM นี้ได้เพิ่มเติมความสามารถพิเศษตัวหนึ่งคือ โพลัสสเกลเลอร์เพื่อปรับอัตราสัญญาณเอาต์พุตนี้ โดยแทนที่จะส่งสัญญาณเอาต์พุตออกไปทันทีที่สามารถปรับเอาต์พุตนี้ได้โดยเลือกได้ 16 ระดับ ตั้งแต่ 1:1 จนกระทั่งถึง 1:16 นั่นคือเกิดเหตุการณ์ค่าตรงกัน 16 ครั้งจึงส่งสัญญาณเอาต์พุตออกมา ดังนั้นโพลัสสเกลเลอร์จึงถูกใช้งานในกรณีที่ไม่ต้องการปรับค่าควิตีไซเคิลในทุก ๆ ไซเคิลของสัญญาณ PWM

- การอินเตอร์รัปต์ในส่วนฐานเวลา PWM

สัญญาณอินเตอร์รัปต์ที่เกิดขึ้นจากฐานเวลา PWM นี้สามารถกำหนดได้จากบิต PTMOD1 และ PTMOD2 ร่วมกับบิต PTOPS3 ถึง PTOPS0 โดยขึ้นกับโหมดการทำงานด้วย ดังนี้

- (1) อินเตอร์รัปต์ของฐานเวลา PWM ในโหมดเปลี่ยนแปลงค่าอิสระ
- (2) อินเตอร์รัปต์ของฐานเวลา PWM ในโหมดทำงานครั้งเดียว
- (3) อินเตอร์รัปต์ของฐานเวลา PWM ในโหมดนับค่าขึ้นลงอย่างต่อเนื่อง

จะเกิดขึ้นทุกครั้งที่มีรีจิสเตอร์ PTMR เป็น “0” จากนั้นค่าฐานเวลาจะเริ่มนับค่าขึ้นสามารถใช้โพลัสสเกลเลอร์เพื่อลดค่าความถี่ของเหตุการณ์อินเตอร์รัปต์นี้ได้

(4) อินเตอร์รัปต์ของฐานเวลา PWM ในโหมดนับค่าขึ้นลงอย่างต่อเนื่องพร้อมการอินเตอร์รัปต์เพื่อปรับปรุ่ค่า

จะเกิดขึ้นทุกครั้งที่มีรีจิสเตอร์ PTMR เป็น “0” และทุกครั้งที่มีค่าของคาบเวลาตรงกัน ไม่สามารถใช้โพลัสสเกลเลอร์เพื่อลดค่าความถี่ของเหตุการณ์อินเตอร์รัปต์นี้ได้ นอกจากนี้ในโหมดนี้ยังกำหนดให้เกิดการปรับปรุ่ค่าควิตีไซเคิล 2 ครั้งต่อคาบเวลาโดยสามารถเลือกได้ว่าต้องการให้ทำงานที่ขอบขาขึ้นหรือขาลงของสัญญาณ PWM

2.7 โปรแกรมวิซวลเบสิก

ก่อนที่จะเริ่มใช้งานโปรแกรม VB6 ควรจะต้องทราบความหมายของการเขียนโปรแกรมก่อน ซึ่งการเขียนโปรแกรม ก็คือการสั่งให้คอมพิวเตอร์ทำงานตามที่ต้องการ เช่น โปรแกรมฝึกพิมพ์ดีด เป็นโปรแกรมที่สั่งให้คอมพิวเตอร์ได้ตอบกับการกดแป้นคีย์บอร์ด เพื่อสอนผู้ใช้พิมพ์ดีด เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับ VB6 เป็นเครื่องมือในการสร้างโปรแกรมบนระบบปฏิบัติการวินโดวส์ ที่ใช้งานง่ายโดยการใช้งานใน VB6 นั้น จะเป็นการเลือกเครื่องมือต่างๆ มาออกแบบหน้าจอของโปรแกรมที่จะสร้าง ซึ่งเรียกการเขียนโปรแกรมลักษณะนี้ว่า Visual Programming การเขียนโปรแกรมแบบนี้ จะไม่จำเป็นต้องเขียนคำสั่งต่างๆ มากนัก ก็สามารถสร้างโปรแกรมได้อย่างรวดเร็ว และเมื่อทำการออกแบบหน้าจอโปรแกรมแล้ว จะต้องเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานด้วย โดยใช้ภาษา BASIC (ย่อมาจาก Beginner All-Purpose Symbolic instruction Code) ซึ่งเป็นภาษาที่ใช้งานง่ายเหมาะสำหรับผู้เริ่มต้นศึกษาการเขียนโปรแกรมบนวินโดวส์

2.7.1 ความสามารถของ VB6

1. โปรแกรมทั่วไปที่รันบนระบบปฏิบัติการวินโดวส์ โดยสามารถสร้างโปรแกรมทางด้านกราฟิก โปรแกรมจัดการไฟล์ โปรแกรมคำนวณเลขพื้นฐานให้ตรงกับความต้องการของได้ เป็นต้น
2. โปรแกรมฐานข้อมูล VB6 นั้นช่วยให้การสร้างโปรแกรมฐานข้อมูลเป็นเรื่องง่ายเนื่องจากมีเครื่องมือต่างๆ เกี่ยวกับฐานข้อมูลอย่างครบถ้วน เช่น เครื่องมือในการติดต่อกับฐานข้อมูลทั้ง Microsoft Access หรือฐานข้อมูลบนระบบ Client Server เช่น Microsoft SQL Server โดยการติดต่อกับฐานข้อมูลนั้น เพียงแต่กำหนดตำแหน่งของฐานข้อมูลพร้อมกับข้อมูลที่จำเป็นในการติดต่อกับฐานข้อมูลเท่านั้น สามารถติดต่อกับฐานข้อมูลนั้นได้ทันที
3. คอมโพเนนต์ทางด้าน ActiveX ซึ่งได้แก่ ActiveX Component, ActiveX Control และ ActiveX Document ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ช่วยให้สามารถนำส่วนของโปรแกรมที่ได้สร้างแล้วไปใช้ในโปรแกรมอื่นๆ ได้ เช่น Microsoft Excel เป็นต้น
4. โปรแกรมที่รันบนอินเทอร์เน็ตหรืออินทราเน็ตผ่าน Web Browser ด้วยความสามารถของ VB6 ช่วยให้สามารถสร้างโปรแกรมที่รันบนอินเทอร์เน็ตได้อย่างง่ายดาย โดยที่ไม่ต้องเรียนรู้การเขียนคำสั่งด้วย HTML (Hypertext Markup Language) หรือภาษาสคริปต์ที่ใช้งานบนอินเทอร์เน็ต

2.7.2 คอมพิวเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับใช้งาน VB6

สำหรับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้งาน VB6 จะต้องเป็นเครื่องคอมพิวเตอร์ ที่มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ต้องมีระบบปฏิบัติการ Windows 95 หรือสูงกว่า หรือระบบปฏิบัติการ Windows NT Version 4.0 หรือสูงกว่า
2. หน่วยประมวลผลกลางรุ่น Pentium 90 MHz หรือสูงกว่า
3. เนื้อที่ในฮาร์ดดิสก์อย่างน้อย 50 เมกกะไบต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ต้องการ CD-ROM ไคร์ฟ
5. การ์ดจอ VGA 640x480 หรือสูงกว่าที่ Windows สนับสนุน
6. RAM 24 MB สำหรับ Windows 95, 32 MB สำหรับ Windows NT Version 4.0
7. Microsoft Internet Explorer เวอร์ชัน 4.01 หรือสูงกว่า

เมื่อศึกษาและทำความเข้าใจถึงทฤษฎีและหลักการทำงานในส่วนต่างๆ เป็นอย่างดีแล้ว
 ในบทต่อไปจะกล่าวถึงการออกแบบส่วนประกอบต่างๆ ที่นำมาใช้ในชุดระบบปฏิบัติการ
 ขบวนการต่อไป

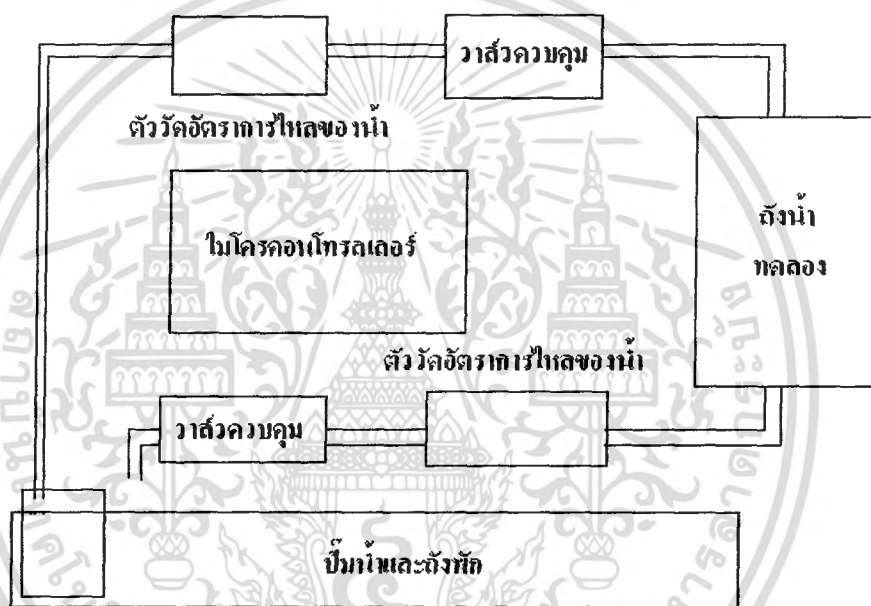


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

หลักการออกแบบ

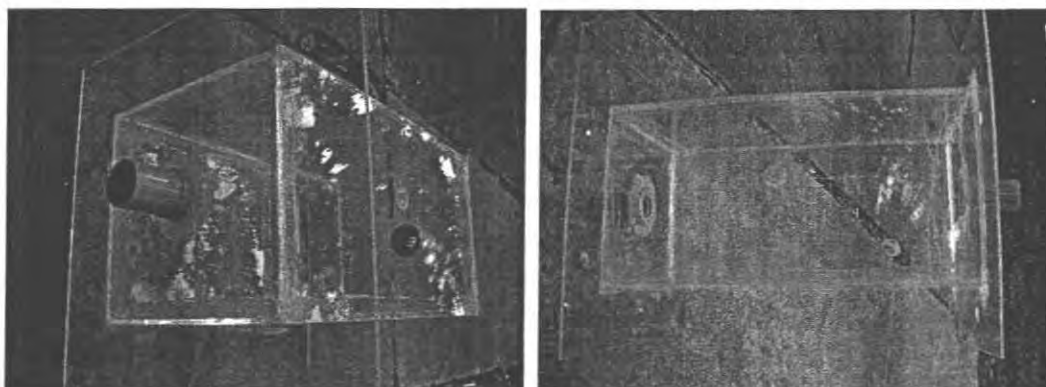
ในการออกแบบอุปกรณ์ในส่วนต่างๆ ก่อนที่จะนำมาประกอบรวมกันดังรูปที่ 3.1 อุปกรณ์บางส่วนเมื่อทำการสร้างแล้วจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ส่วนอื่นมาร่วมในการทดสอบด้วย จึงควรจัดลำดับในการสร้างให้เหมาะสม โดยจัดลำดับการสร้างคือ ถังน้ำทดลอง, ปั๊มน้ำและถังพัก, วาล์วควบคุม, อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของน้ำ, ตัวแปลงค่าความดัน, ไมโครคอนโทรลเลอร์ และโปรแกรมวิหวลเบสิก



รูปที่ 3.1 การออกแบบการวางอุปกรณ์ทั้งหมด

3.1 ถังน้ำทดลอง

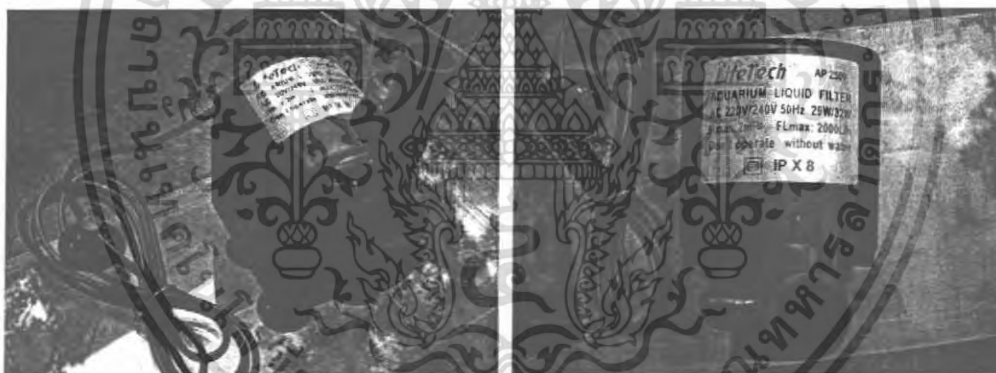
เป็นส่วนที่ใช้สังเกตการเปลี่ยนแปลงในการทดลอง โดยทำจากแผ่นอะคริลิกหนา 3 มม. ประกอบเป็นถังทรงสี่เหลี่ยมมีปริมาตรประมาณ 5 ลิตร มีท่อเพื่อให้น้ำไหลเข้ามาและท่อให้น้ำไหลออก โดยติดตั้งตัวแปลงค่าความดัน ที่ฐานของถังน้ำ ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ถังทดลอง

3.2 ป้อนน้ำและถังพัก

เป็นส่วนที่เก็บน้ำที่เกินความต้องการและรอการสูบไปใช้ เลือกใช้ปั้มน้ำขนาด 30 วัตต์ สามารถปั้มน้ำได้ 0.55 ลิตร/วินาที ดังรูปที่ 3.3 โดยต่อท่อข้างหนึ่งกับถังพัก และอีกข้างกับท่อที่เข้า ถังน้ำทดลอง เหตุผลที่จำเป็นต้องใช้ปั้มน้ำด้วยเพื่อให้ท่อน้ำมีน้ำไหลอยู่เต็มท่อ



รูปที่ 3.3 ปั้มน้ำและถังพัก

3.3 วาล์วควบคุม

วาล์วควบคุมเป็นส่วนที่ปรับอัตราการไหลของน้ำให้เป็นไปตามที่ต้องการ โดยใช้ เซอร์โว มอเตอร์ รุ่น S03T/2BB/J ในการบังคับเซรามิกวาล์วและทำการทดเพื่อระหว่าง เซอร์โวมอเตอร์ และเซรามิกวาล์วในอัตรา 2:1 ดังรูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.5 โดยในที่นี้เลือกใช้เพียงขนาด 30 ฟันและ 15 ฟันเนื่องจากมีขนาดที่เหมาะสมแก่การสังเกตการณ์ทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 วาล์วควบคุม



รูปที่ 3.5 เซอร์โวมอเตอร์ที่ทำการทดเฟืองแล้ว

3.4 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของน้ำ

เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดอัตราการไหลของน้ำแล้วส่งค่ากลับไปยัง ไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อทำการควบคุมวาล์วควบคุม โดยนำเอาฮอลล์เอฟเฟกต์คิโดร่งด้านนอกของมอเตอร์กระแสตรง รูปที่ 3.6 จะถูกติดตั้งไว้สองตำแหน่ง ดังนี้

1. ระหว่างปั๊มและวาล์วควบคุม เพื่อวัดอัตราการไหลขาเข้า
2. ระหว่างเอาต์เลทวาล์วและถังน้ำ เพื่อวัดอัตราการไหลขาออก



รูปที่ 3.6 ตัววัดอัตราการไหลของน้ำ

3.4.1 ส่วนที่เกี่ยวข้องกับการหาค่าอัตราการไหลของน้ำ

การหาอัตราการไหลของน้ำที่เข้าสู่ระบบและออกจากระบบนั้น ได้แบ่งการทำงานออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 : โครงสร้างทางกล

แนวคิดและการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำมิเตอร์ประปามาประยุกต์ใช้ เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่หาได้ง่ายตามท้องตลาด ซึ่งการทำงานเดิมของมิเตอร์ประปานั้น จะบอกค่าปริมาตรของน้ำที่ไหลผ่านโดยอาศัยกลไกการทำงานของเฟืองขับและเฟืองทด การหมุนของใบพัดภายในที่เกิดจากการไหลผ่านของน้ำเป็นตัวขับเคลื่อนเฟือง ทำการทดรอบการหมุนไปเรื่อยๆ เพื่อหมุนตัวเลขแสดงผลทางหน้าปัด ส่งผลให้ข้อมูลเอาท์พุทดังกล่าวไม่สามารถนำไปเชื่อมต่อกับ ไมโครคอนโทรลเลอร์ ได้โดยตรง ดังนั้น จึงจำเป็นต้องทำให้มิเตอร์ประปานี้แสดงผลหรือส่งค่าที่เหมาะสมไปยัง ไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อทำการประมวลผลต่อไป โดยในที่นี้ นำตัววัดค่าสนามแม่เหล็กเชิงเส้นหรือที่คุ้นเคยกันในชื่อของ ฮอลล์เอฟเฟกต์ และแม่เหล็กมาใช้เป็นตัวสร้างสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงตามการหมุนของใบพัด

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้

1. มิเตอร์ประปา ขนาด 13 mm.
2. แม่เหล็ก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm. หนา 1.5 mm.
3. ตัววัดค่าสนามแม่เหล็กเชิงเส้น

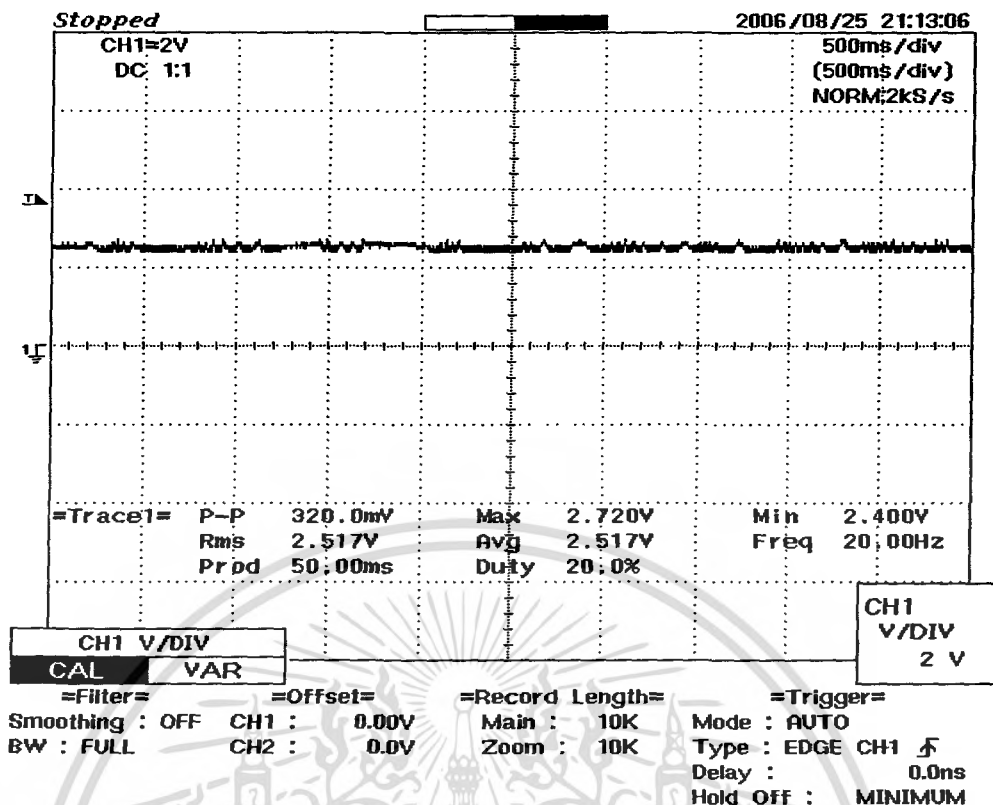
วิธีการสร้าง

ติดแม่เหล็กที่ขอบของทุกใบพัดที่อยู่ภายในมิเตอร์ประปา และติด ฮอลล์เอฟเฟกต์ ที่โครงของมิเตอร์ด้านนอก โดยวางให้ได้ตำแหน่งเดียวกับแม่เหล็ก

หลักการทำงาน

ตัววัดค่าสนามแม่เหล็กเชิงเส้นซึ่งทำงานตามหลักการของ ฮอลล์เอฟเฟกต์ โดยตัวเซนเซอร์นี้เป็นวงจรรวมที่แสดงค่าออกมาในรูปของความต่างศักย์ ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มของสนามแม่เหล็ก เมื่อมีการหมุนของใบพัด ความต่างศักย์ที่ได้จากเอาท์พุทจะออกมาเป็นค่าสูง-ต่ำ ดังรูปที่ 3.7 ที่เนื่องจากขณะที่ใบพัดเคลื่อนที่ผ่านจะมีสนามแม่เหล็กไปยังตัวเซนเซอร์ ทำให้ค่าความต่างศักย์สูงกว่าช่วงที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน จำนวนการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ในหนึ่งหน่วยเวลา ก็คือ อัตราการหมุนของใบพัดและจากผลดังกล่าวสามารถนำมาหาอัตราการไหลของน้ำได้ โดยจะพบว่าอัตราการไหลเป็นสัดส่วน โดยตรงกับอัตราการหมุนของใบพัดนั่นเอง

หลังจากสร้างอุปกรณ์ส่วนนี้แล้ว ทำการทดลองโดยต่อวงจรตามคุณสมบัติ ตัววัดค่าสนามแม่เหล็กเชิงเส้นเพื่อใช้งานอย่างถูกต้อง และบันทึกกราฟ โดยใช้เครื่องมือวัดสัญญาณที่สามารถเก็บค่าได้ วัดค่าความต่างศักย์ที่ได้จากเอาท์พุท (ออกมาในรูปของสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา) แล้ว ได้ผลดังรูปที่ 3.7



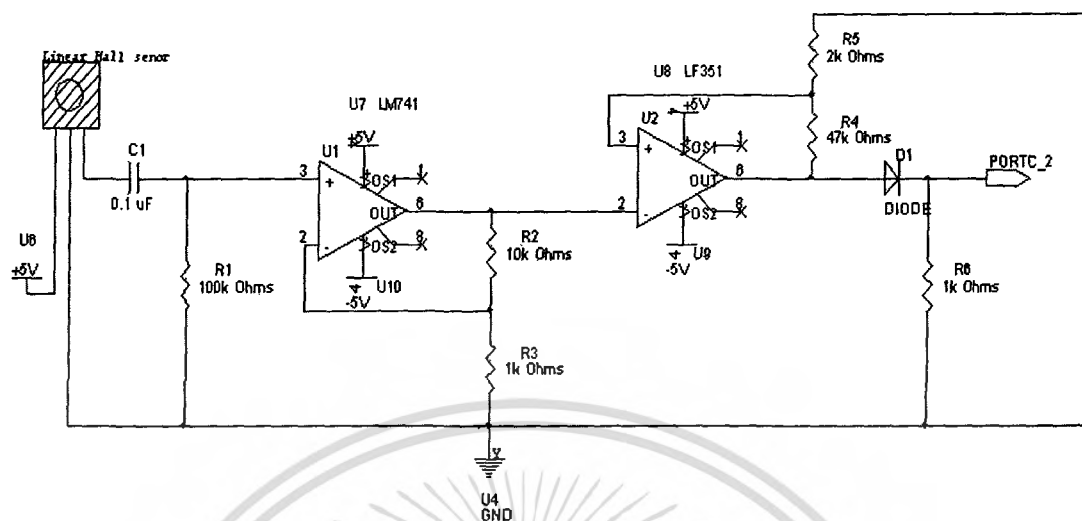
รูปที่ 3.7 กราฟแสดงผลที่ได้ ช่วงที่มีและไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน

จากรูปที่ 3.7 จะเห็นว่ากราฟแรงดันเอาต์พุตเริ่มต้นที่ 2.5 โวลต์ และมีความแตกต่างของแรงดันเมื่อแม่เหล็กผ่านน้อยมาก จึงต้องทำการจัดการกับสัญญาณ

ขั้นตอนที่ 2 : วงจรจัดการสัญญาณ

แนวคิดและการออกแบบ

จากรูปสัญญาณที่ได้ดังรูปที่ 3.7 จะเห็นว่ายังมีค่า ออฟเซ็ทที่เกิดจากคุณสมบัติของตัววัดค่าสนามแม่เหล็กเชิงเส้นและความแตกต่างของค่าแรงดันด้านเอาต์พุต ไม่มากพอที่จะทำให้ไมโครคอนโทรลเลอร์รับรู้สถานะทางลอจิกของสัญญาณที่เข้ามาได้ จึงต้องใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ปรับสัญญาณให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมออกมาเป็นสัญญาณพัลส์ เพื่อนำไปเป็นสัญญาณอินพุตแก่ไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังรูปที่ 3.8

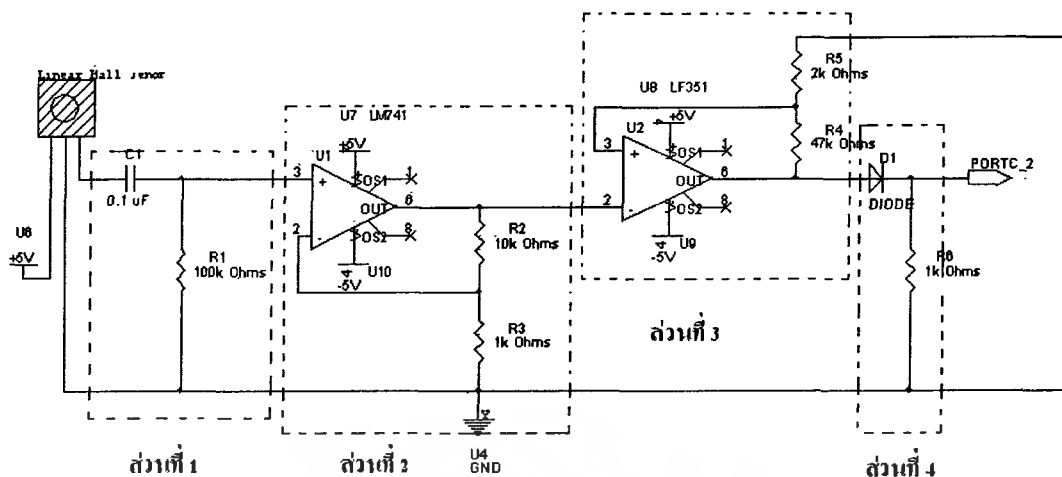


รูปที่ 3.8 วงจรจัดการสัญญาณ ที่ได้จากการออกแบบ

จากรูปที่ 3.8 แบ่งวงจรต่างๆ ที่สำคัญได้แก่

1. วงจรดิฟเฟอเรนเชียล เพื่อกำจัดค่า ออฟเซ็ท
2. วงจรนอน-อินเวิร์ตติง แอมพลิไฟเออร์ เพื่อขยายสัญญาณ
3. วงจรซิมิตท์ เพื่อกลับเฟสและปรับรูปสัญญาณให้เหมาะสม
4. วงจรคลิปเปอร์ เพื่อตัดสัญญาณซีกลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 แสดงการแบ่งวงจรที่ใช้ออกเป็น 4 ส่วน

3.4.2 การทำงานของวงจรที่เกี่ยวข้องกับอัตราการไหลของน้ำ

แยกพิจารณาและอธิบายการทำงานเป็นส่วนๆ ดังรูปที่ 3.9

ส่วนที่ 1 : สัญญาณจากขาเอาต์พุตของ ตัววัดค่าสนามแม่เหล็กเชิงเส้นจะเข้ามายังวงจร RC ที่ต่อในลักษณะ วงจรคิฟเฟอร์เรชเชิตติง

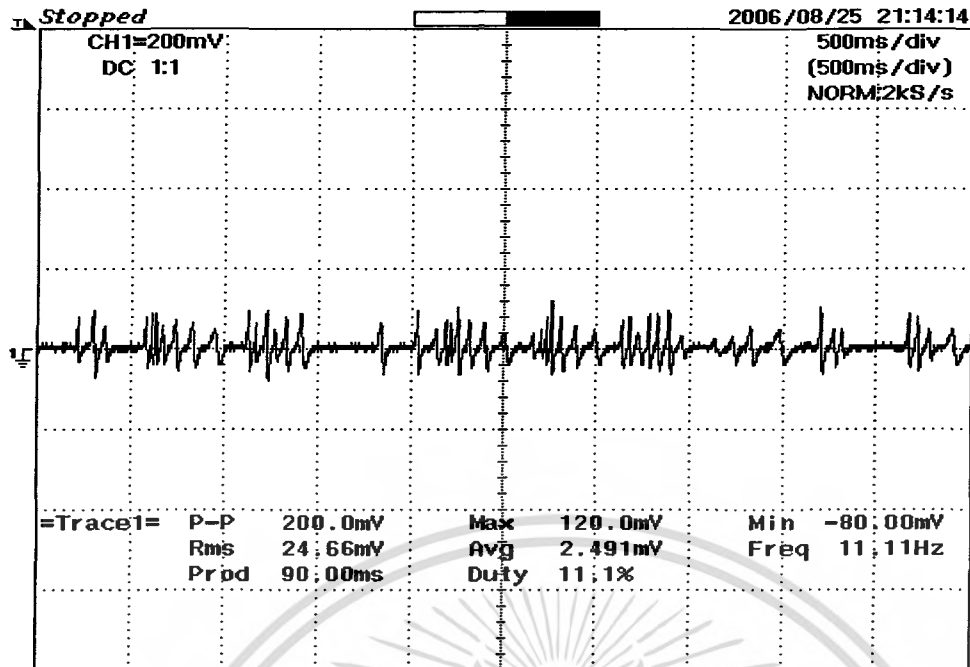
การเลือกค่า C1 และค่า R1

จากกราฟที่ได้พบว่า ความกว้างพัลส์ (PW) มีค่าน้อยมาก จึงทดลองเลือกค่า R และ C ให้สอดคล้องกับสมการ $RC = 0.1 \times PW$ โดยประมาณ $PW = 100 \text{ ms}$

$$RC = 0.1 \times 100 \text{ ms}$$

$$RC = 0.01 \text{ s}$$

ดังนั้น จึงเลือกใช้ขนาด $C1 = 0.1 \text{ } \mu\text{F}$ และค่า $R1 = 100 \text{ k}\Omega$



=Filter= Smoothing : OFF BW : FULL

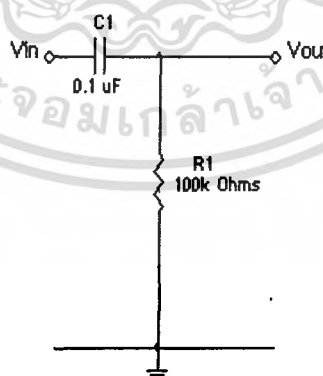
=Offset= CH1 : 0.000V CH2 : 0.0V

=Record Length= Main : 10K Zoom : 10K

=Trigger= Mode : AUTO Type : EDGE CH1 Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM

รูปที่ 3.10 กราฟแสดงสัญญาณเอาต์พุตหลังจากผ่านวงจรใน ส่วนที่ 1

จากรูปที่ 3.10 สรุปได้ว่า ค่า $C1 = 0.1 \mu\text{F}$ และค่า $R1 = 100 \text{ k}\Omega$ เป็นค่าที่สามารถนำมาใช้สำหรับวงจรนี้ได้ ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 วงจรดีฟเฟอเรนเชียล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำงานของวงจรส่วนที่ 1

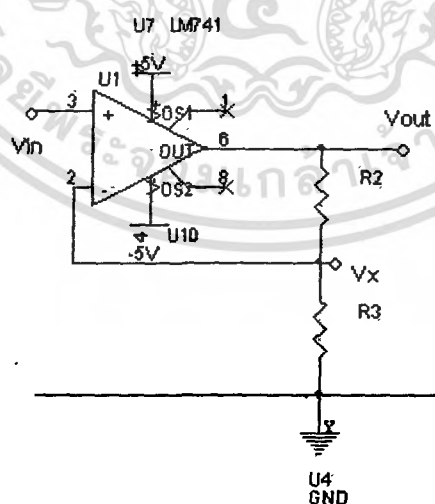
เมื่อสัญญาณเข้ามาทางขาของตัวเก็บประจุ C1 ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเมื่อเทียบกับเวลา ช่วงสั้นๆ สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะมีค่าเท่ากับ 0 โวลต์ ในทางกลับกันเมื่อค่าสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด (ผลมาจากการตัดผ่านของสนามแม่เหล็ก) จะให้ค่าแรงดันด้านเอาต์พุตออกมา ดังนั้นการที่สัญญาณผ่านวงจรนี้ ถือได้ว่าเป็นการตัดค่า ออฟเซ็ท ของสัญญาณให้หมดไป

ตัวเก็บประจุเป็นอุปกรณ์ชนิด พาสซีฟ ทำหน้าที่ในการเก็บสะสมพลังงานในรูปแรงดันเมื่อพิจารณาขณะที่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน พลังงานจะถูกสะสมเพิ่มขึ้นในตัวเก็บประจุ ค่าแรงดันที่ได้จึงมีค่าเป็นบวก ในทางตรงกันข้ามถ้าไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านตัวเก็บประจุจะคายพลังงานออกมา ดังนั้นค่าแรงดันจึงมีค่าเป็นลบ

ส่วนที่ 2 : สัญญาณจากส่วนที่ 1 จะเข้ามายังวงจร นอน-อินเวอร์ตติง แอมพลิไฟเออร์ ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ดังนี้ โอเปอร์เรชันอล แอมพลิไฟเออร์ (OPAMP) เบอร์ LM741 และตัวต้านทาน R2 และ R3

การเลือกค่า R2 และ R3

เนื่องจากความแตกต่างของสัญญาณที่ได้มานั้นยังน้อยมาก จำเป็นต้องทำการขยายสัญญาณให้เกิดความแตกต่างมากขึ้น ดังรูปที่ 3.12 โดยคำนวณค่าอัตราขยายแรงดันของวงจร



รูปที่ 3.12 วงจร นอน-อินเวอร์ตติง แอมพลิไฟเออร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสูตร การแบ่งแรงดัน;

$$V_x = \left(\frac{R_3}{(R_2 + R_3)} \right) V_o; \text{ เมื่อ } V_i = V_x \text{ (คุณสมบัติของ ออปแอมป์)}$$

$$\text{Gain} = \frac{V_o}{V_i} = \frac{(R_2 + R_3)}{R_3}$$

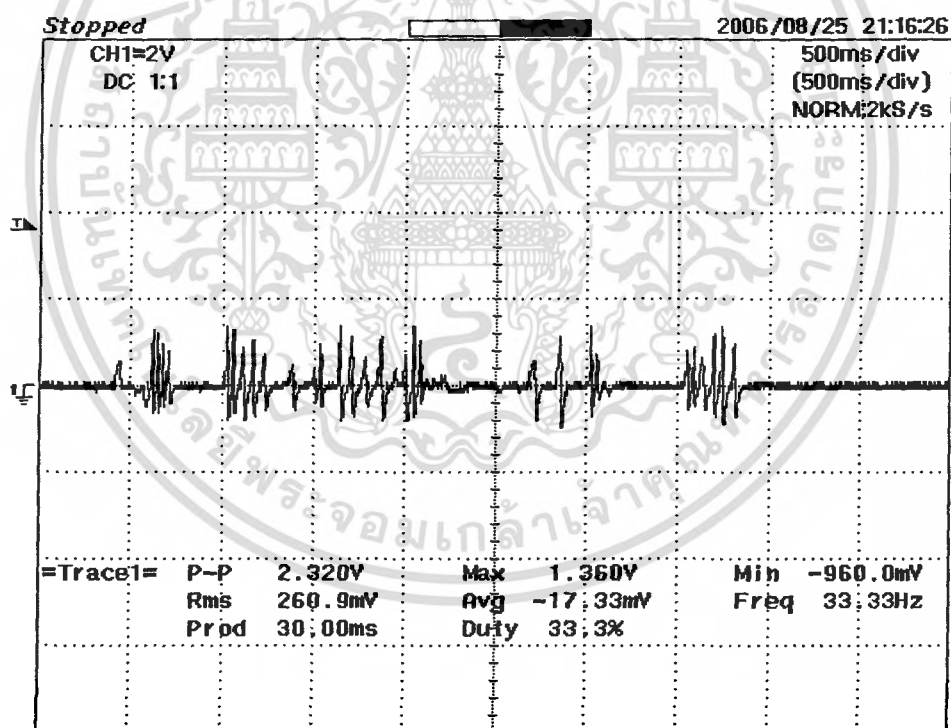
หรือ

$$\text{Gain} = 1 + \frac{R_2}{R_3}$$

จากค่า เกนแบบวิท โพรคักซ์ ใน คาต้าชีท ของ LM741 ทดลองเลือกขยายแรงดันที่ได้ให้มีค่าเป็น 11 เท่า จะได้

$$\frac{R_2}{R_3} = 10$$

เพื่อความสะดวกจึงเลือกใช้ค่า $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ และค่า $R_3 = 1 \text{ k}\Omega$



=Filter=	=Offset=	=Record Length=	=Trigger=
Smoothing : OFF	CH1 : 0.00V	Main : 10K	Mode : AUTO
BW : FULL	CH2 : 0.0V	Zoom : 10K	Type : EDGE CH1 <input checked="" type="checkbox"/>
			Delay : 0.0ns
			Hold Off : MINIMUM

รูปที่ 3.13 กราฟแสดงสัญญาณเอาต์พุตหลังจากผ่านวงจรในส่วนที่2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.13 หากพิจารณาค่าแรงดันสูงสุด จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตสูงขึ้นเป็น 1.36 โวลต์ จากค่าเดิมคือ 0.12 โวลต์ คิดเป็น 11.33 เท่า ดังนั้นค่า $R2=10\text{ k}\Omega$ และค่า $R3=1\text{ k}\Omega$ ที่ออกแบบไว้สามารถนำมาใช้เพื่อขยายผลต่างแรงดันได้

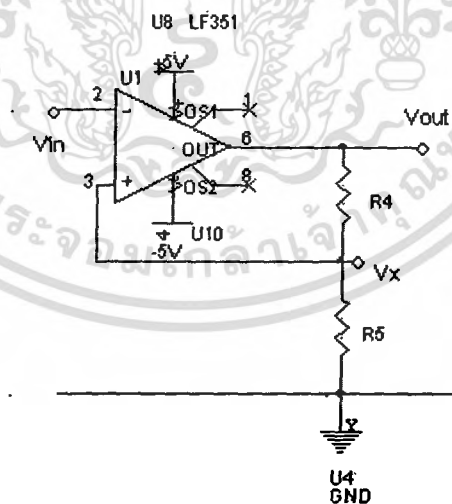
การทำงานของวงจรส่วนที่ 2

เมื่อสัญญาณจาก ส่วนที่ 1 ผ่านเข้ามายังวงจร ส่วนที่ 2 ค่าแรงดันของสัญญาณนั้นจะถูกขยายให้ใหญ่ขึ้นเป็น 11 เท่าโดยที่เฟสของสัญญาณยังคงเหมือนเดิม

ส่วนที่ 3 : สัญญาณจากส่วนที่ 2 จะเข้ามายังวงจรชนิดที่ ดังรูปที่ 3.14 ซึ่งประกอบด้วย โอเพอเรชันแนล แอมพลิไฟเออร์ (ออปแอมป์) เบอร์ LF351 และตัวต้านทาน $R4$ และ $R5$

การเลือกค่า $R4$ และ $R5$

เนื่องจากสัญญาณที่ได้มีค่าแรงดันที่ ไมโครคอนโทรลเลอร์ ไม่สามารถรับรู้สถานะทางลอจิก โดยปกติแล้วระดับสัญญาณระหว่าง 3 โวลต์ ถึง 5 โวลต์ คือค่าที่เหมาะสมที่จะทำให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ทราบว่าเป็นค่าลอจิกสูง จำเป็นต้องทำการขยายให้ค่าสูงมากขึ้นและปรับรูปสัญญาณให้ใกล้เคียงรูปสัญญาณพัลส์ ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 วงจรชนิดที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

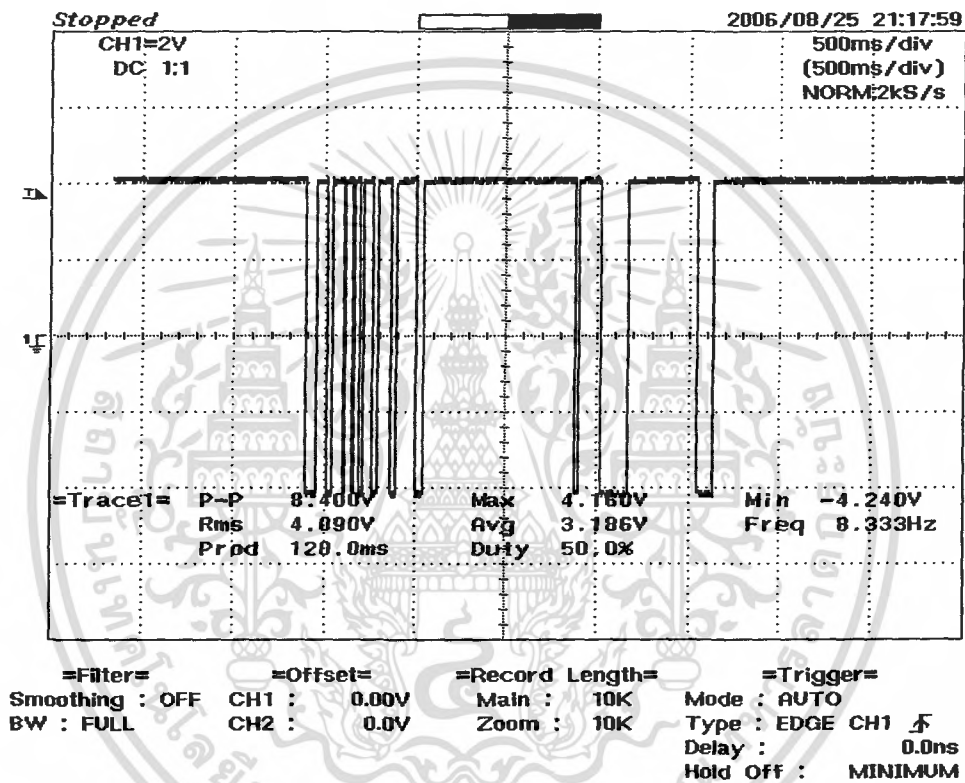
โดยค่า R4 และ R5 คำนวณจาก

$$V_x = \left(\frac{R5}{(R4+R5)} \right) V_o$$

เมื่อกำหนดให้ $V_o = 4 \text{ V}$.

$$V_x = 0.16 \text{ V}.$$

จะได้ $\frac{R5}{(R4+R5)} = 0.04$ เลือกใช้ค่า $R4 = 2 \text{ k}\Omega$ จึงได้ค่า $R5 = 47 \text{ k}\Omega$

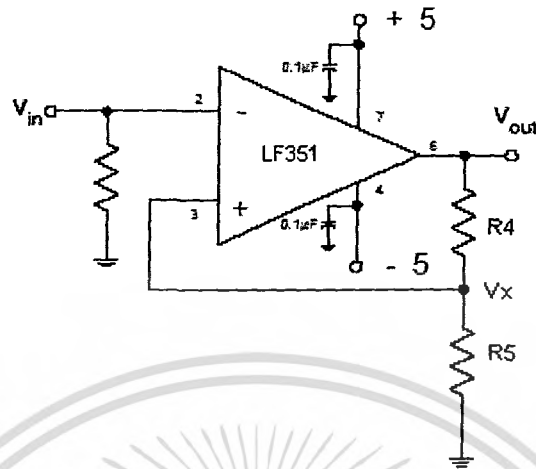


รูปที่ 3.15 กราฟแสดงสัญญาณเอาต์พุตหลังจากผ่านวงจรในส่วนที่ 3

จากรูปที่ 3.15 พบว่าสัญญาณเอาต์พุตถูกปรับแต่งให้ดูสวยงามขึ้นเป็นสัญญาณพัลส์ ที่มีคาบเวลาแต่ละลูกสัญญาณต่างๆ กันซึ่งค่าคาบเวลานี้แปรผัน โดยตรงกับความเร็วในการหมุนของใบพัด หรือก็คือค่าความเร็วในการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กนั่นเอง โดยค่าความต้านทานที่เลือก $R4 = 2 \text{ k}\Omega$ และ $R5 = 47 \text{ k}\Omega$ นำมาใช้งานได้ผลเป็นไปตามความต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

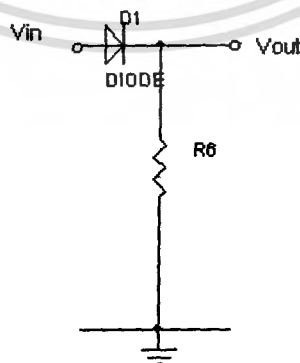
การทำงานของวงจรส่วนที่ 3



รูปที่ 3.16 วงจรขมิตท์

จากรูปที่ 3.16 การทำงานของวงจรเป็นดังนี้ สัญญาณอินพุตเข้าที่ขาลบและมีการป้อนกลับที่ขาบวกของออปแอมป์ เมื่อสัญญาณที่เข้ามาทางขาลบมีแรงดันมากกว่า V_x เพียงเล็กน้อย ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ออกมาจะกลายเป็นค่า negative saturated voltage ส่วนกรณีที่แรงดันอินพุตที่เข้ามามีค่าน้อยกว่า V_x เพียงเล็กน้อย เอาต์พุตที่ได้จะกลายเป็นค่า positive saturated voltage

ส่วนที่ : 4 สัญญาณจากส่วนที่ 3 จะเข้ามายังวงจรคลิปปเปอร์ ดังรูปที่ 3.17 ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ดังนี้ ไดโอด เบอร์ 1N4148 และตัวต้านทาน R6

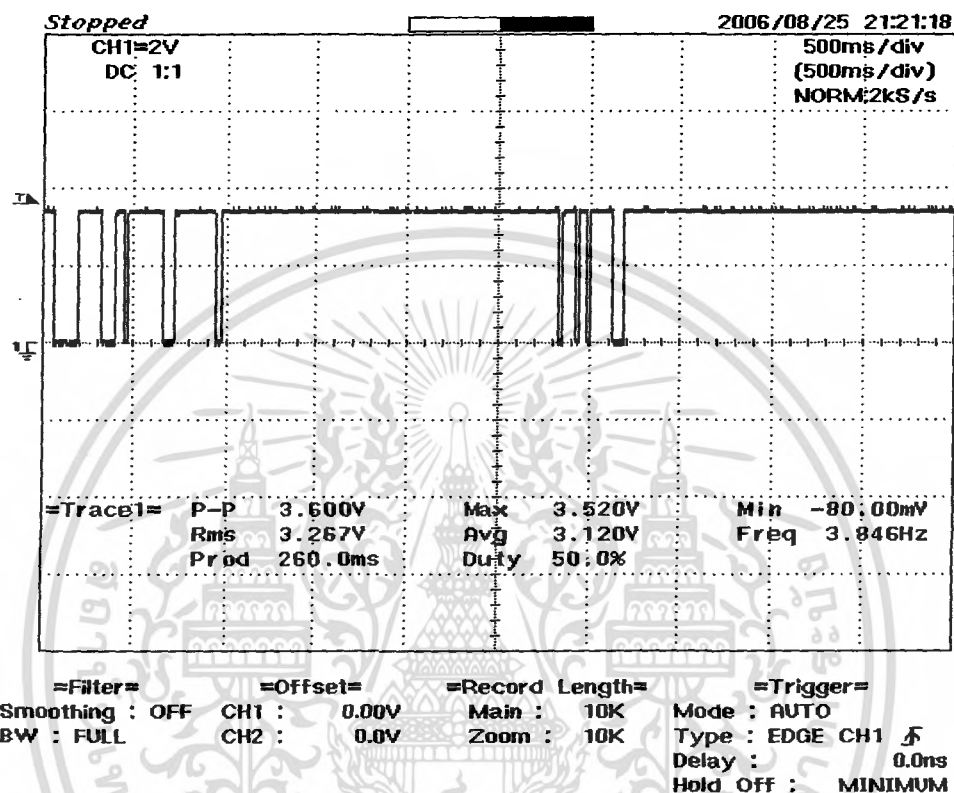


รูปที่ 3.17 วงจรคลิปปเปอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเลือกค่า R6

เลือกขนาดตัวต้านทานให้มีแรงดันตกคร่อมที่ไม่ต่ำเกินไป ในที่นี้เลือก R6 = 1 k Ω



รูปที่ 3.18 กราฟแสดงผลที่ได้เมื่อผ่านวงจรขยายสัญญาณ

จากรูปที่ 3.18 กราฟแสดงผลที่ได้ จากการทดลองใช้งานตัววัดค่าสนามแม่เหล็กเชิงเส้น วัดความต่างศักย์ที่ได้จากการหมุนใบพัดทำให้เกิดช่วงที่มีและไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน โดยผ่านวงจรในส่วนที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเอาท์พุทสุดท้ายที่ผ่านส่วนที่ 4 นั้นพร้อมสำหรับเป็นค่าอินพุทให้แก่ตัวประมวลผลเพื่อควบคุมการทำงานในส่วนอื่นๆ ต่อไป

การทำงานของวงจรส่วนที่ 4

วงจรคลิปเปอร์ เป็นวงจรตัดสัญญาณตามระดับค่าแรงดันที่ตั้งเอาไว้ โดยในที่นี้ ไดโอด จะทำหน้าที่เป็น โพลีทีพ ฮาฟเวฟ เรกตีไฟเออร์ (Positive Half-wave Rectifier) คีอยอมให้สัญญาณซีกบวกผ่านเท่านั้น (ตัดสัญญาณซีกลบทิ้งไป)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

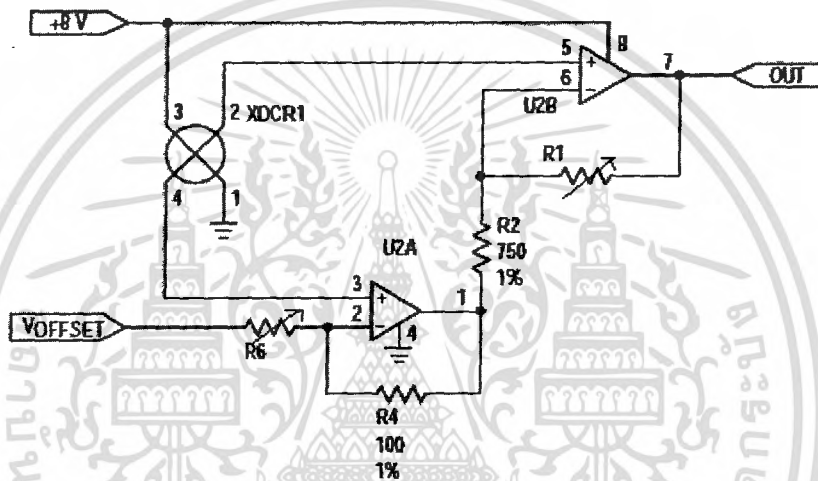
ขั้นตอนที่ 3 : ส่วนของโปรแกรม

เป็นส่วนที่นำสัญญาณที่ได้ไปทำการประมวลผลให้ออกมาเป็นค่าอัตราการไหลของน้ำในหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง (m^3/h) โดย ไมโครคอนโทรลเลอร์

3.5 หลักการทำงานของตัวแปลงค่าความดัน

เป็นอุปกรณ์ที่นำค่าความดันอากาศที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งสัมพันธ์กับระดับความสูงของน้ำ เพื่อนำค่าของความสูงกลับเข้ามาประมวลผลในส่วนของโปรแกรม พีไอดี

3.5.1 การออกแบบวงจรทรานดิวเซอร์วัดความดัน



รูปที่ 3.19 วงจรทรานดิวเซอร์วัดความดัน

จากรูปที่ 3.19 เมื่อความต่างศักย์ที่เข้ามายัง ขา 2 และขา 4 ของเซนเซอร์จะถูกส่งไปยังขา 3 และขา 5 ของ U2A MC 33272 เช่น

เมื่อความแตกต่างของขาเอาต์พุตค่า 100 mV ที่ซึ่งจะให้ค่า 4.05 V ที่ขา 3 ของ U2A และให้ค่า 3.95 V ที่ขา 5 ของ U2B

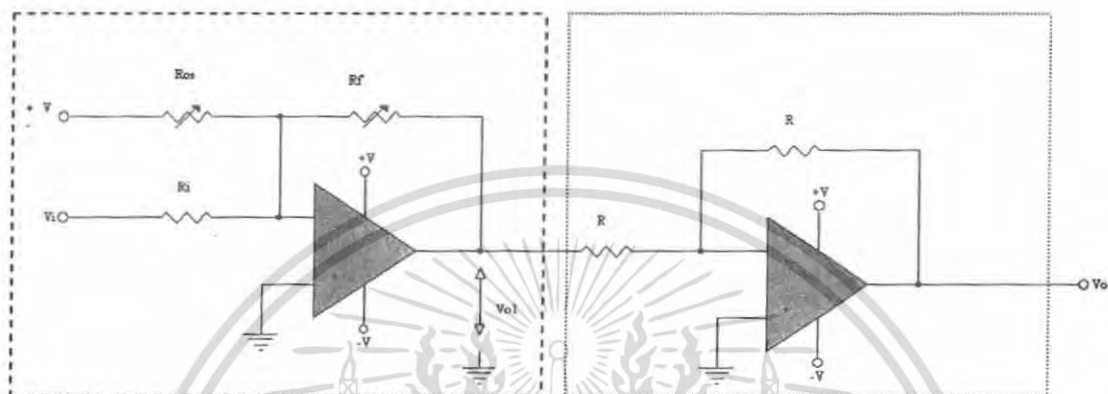
ดังนั้นความดันจะตกคร่อม $R6$ 4.05 V เมื่อ $R6$ มีค่า $10\text{ k}\Omega$ จะได้กระแสที่ไหลผ่านมีค่า $405\text{ }\mu\text{A}$ โดยกระแสนี้จะเท่ากับกระแสที่ผ่าน $R4$ ทำให้ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมมีค่า 40.5 mV ส่งผลให้ขา $R1$ ที่ U2A มีค่า $4050\text{ mV} + 40.5\text{ mV} = 4090.5\text{ mV}$ ความต่างศักย์ที่ตกคร่อม $R2$ มีค่า $4090.5\text{ mV} - 3950\text{ mV} = 140.5\text{ mV}$ ที่ซึ่งให้กระแสผ่าน $187.3\text{ }\mu\text{A}$ ผ่านไปยัง $R1$ ส่งผลให้ความต่างศักย์เอาต์พุตมีค่า $4.05\text{ V} + (187.3\text{ }\mu\text{A} \cdot 20\text{ k}) = 7.8\text{ V}$

นำค่า 7.8 V หารด้วย 100 mV ซึ่งเป็นค่าอินพุตจะได้ค่าอัตราขยายเท่ากับ 78 จะขยายสัญญาณที่ได้ให้มีขนาดใหญ่ขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 การออกแบบวงจรซีโร-สเปน

แรงดันเอาต์พุตที่ออกมาจากวงจรแรงดันที่เราต้องการนำมาขยายนั้นมีค่า 1.790 – 1.850 โวลต์ โดยเราต้องการให้แรงดันขาออกอยู่ในช่วง 1-5 โวลต์

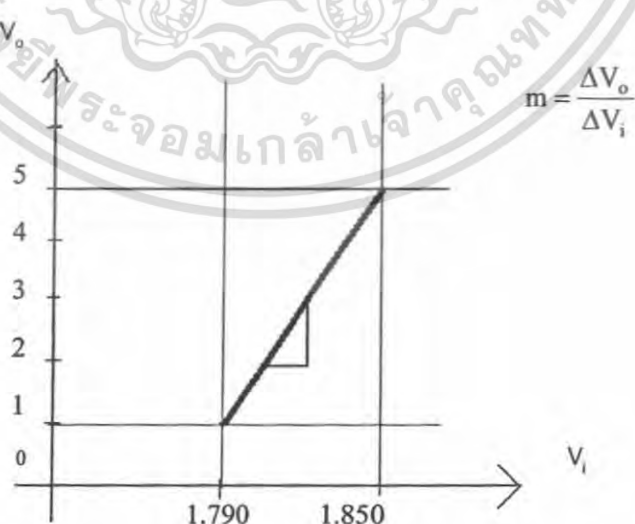


รูปที่ 3.20 วงจรซีโร-สเปน

จากรูปที่ 3.20 สามารถหาอัตราขยายได้ ดังนี้

$$\text{GAIN} = \frac{\Delta V_o}{\Delta V_i} = \frac{(5-1)V}{(1.850-1.790)V} \approx 67$$

จากนั้นเมื่อพิจารณาสมการเส้นตรง จะได้



รูปที่ 3.21 กราฟเปรียบเทียบค่าวงจรซีโร-สเปน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่า ค่า $m = \text{Gain}$ และเมื่อเปรียบเทียบกับสมการ $V_o = \left(\frac{R_f}{R_i} V_i + \frac{R_f}{R_{os}} (\pm V) \right)$

$$m = \frac{R_f}{R_i} = 67$$

เมื่อกำหนดให้ $R_i = 10 \text{ k}\Omega$ จะได้ค่า $R_f = 670 \text{ k}\Omega$ จากนั้นทำการหาค่า R_{os} จาก

$$C = \frac{R_f}{R_{os}} (\pm V) \text{ เมื่อ } R_f = 670 \text{ k}\Omega$$

โดยต้องรู้ค่า C ก่อน จาก $C = 1 - \frac{R_f}{R_i} (V_i) = 1 - 67(1.790) = -118.93$

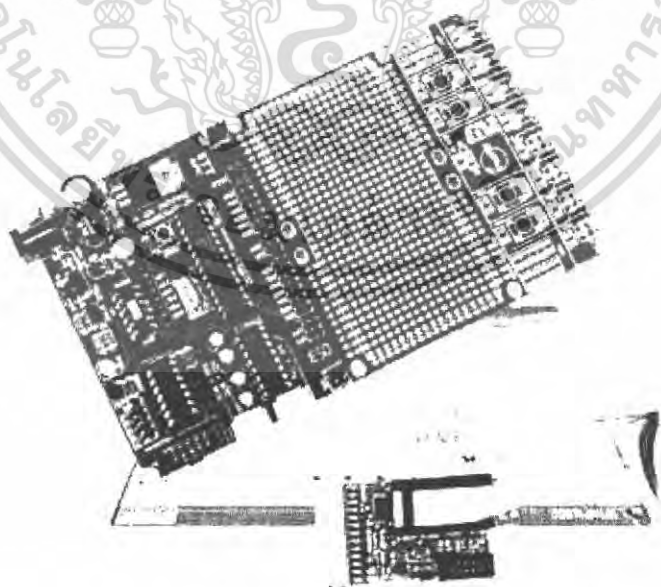
$$-118.93 = \frac{670 \text{ k}\Omega}{R_{os}} (-5)$$

$$R_{os} \cong 28 \text{ k}\Omega$$

และกำหนดค่า $R = 10 \text{ k}\Omega$ ทั้งสองตัวเพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน

3.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์

เป็นส่วนในการเชื่อมต่อระหว่างผู้ทำการทดลองและชุดทดลอง โดยไมโครคอนโทรลเลอร์จะรับค่าต่างๆ จากผู้ทำการทดลอง เช่น ค่าระดับของการเปิด-ปิดวาล์วควบคุม และรับค่าจากชุดทดลองส่งมาประมวลผลและแสดงให้ผู้ทดลองได้ทราบ เช่น ค่าความดันจากตัววัดค่าความดัน, อัตราการไหลของน้ำ จากตัววัดอัตราการไหลของน้ำ



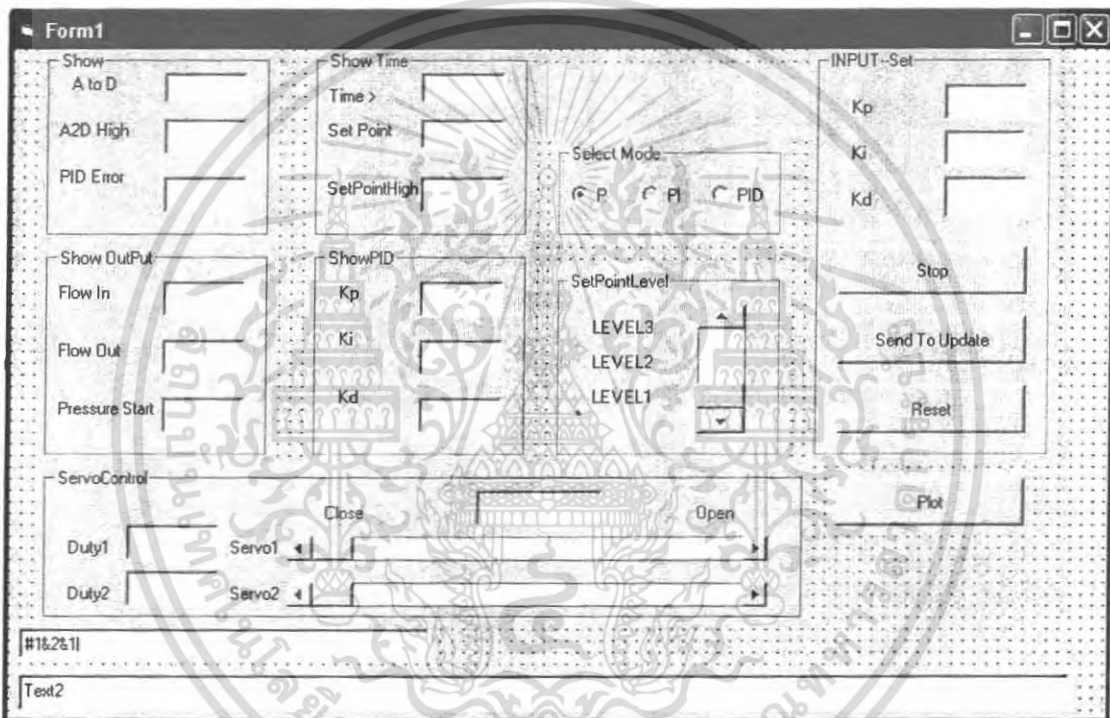
รูปที่ 3.22 ไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น dsPIC30F2010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น dsPIC30F2010 ดังรูปที่ 3.22 เนื่องจากมีฟังก์ชันที่ใช้ตั้งงานควบคุมมอเตอร์ภายในตัวซึ่งสามารถควบคุมได้ 2 ตัวในเวลาเดียวกัน และมีไทมเมอร์ 3 ตัวที่สามารถทำงานอิสระจากกันทำให้สามารถทำงานได้หลายแบบในเวลาเดียวกัน

3.7 โปรแกรมวิซวลเบสิก

โปรแกรมวิซวลเบสิกเป็นส่วนที่ให้ผู้ทดลองติดต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ได้สะดวกและง่ายขึ้น โดยผู้ทำการทดลองไม่จำเป็นต้องมีความรู้ในการติดต่อและควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 3.23 โปรแกรมวิซวลเบสิก

จากรูปที่ 3.23 ได้ทำการออกแบบให้ผู้ทดลองเลือกระดับความสูงที่ต้องการควบคุมระดับน้ำและเลือกรูปแบบตัวควบคุมและค่าของตัวควบคุมนั้นๆ

เมื่อกดที่ Start (จากรูปที่ 3.23 คือปุ่ม Stop/Start) ค่าต่างๆจากผู้ทดลองจะถูกส่งไปที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ และทำการประมวลผลเพื่อควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ และเมื่อต้องการทำการเปลี่ยนแปลงค่าต่างๆสามารถกดที่ Send to update ในขณะที่เดียวกันไมโครคอนโทรลเลอร์ก็จะส่งค่าต่างๆกลับมาที่โปรแกรมวิซวลเบสิก เพื่อแสดงผลให้ผู้ทดลองได้ทราบ เมื่อกด Plot โปรแกรมจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงกราฟผลตอบแทนของระบบ และเมื่อกด Reset จะเป็นการลบค่าทั้งหมดเพื่อเตรียมทำการทดลองใหม่

ค่าต่างๆที่ไม่โครคอนโทรลเลอร์ส่งมาแสดงให้ผู้ทำการทดลองทราบจะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือการแสดงค่าต่างๆ เช่น ค่าความสูง, ค่าความผิดพลาด, เวลาที่ใช้ทำการทดลอง, อัตราการไหลของน้ำ และอีกส่วนคือการแสดงภาพจำลองการทำงานของวาล์วควบคุม โดยแสดงเป็นระดับการปิด-เปิดของวาล์วควบคุมแต่ละตัว

เมื่อออกแบบและสร้างส่วนประกอบทั้งหมดของชุดปฏิบัติการทดลองที่กล่าวมาทั้งในส่วนของตัวแพลนท์และส่วนของโปรแกรมที่ใช้ จะต้องนำส่วนต่างๆเหล่านี้ไปทำการปรับค่าของอุปกรณ์แต่ละส่วนให้เหมาะสมอีกครั้ง และทำการทดสอบการทำงานของทั้งระบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งทำการทดลองก่อนที่จะนำไปใช้งานจริง โดยจะกล่าวถึงในบทต่อไป



บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้เป็นส่วนของการทดลองการทำงานของชุดทดลองระบบปฏิบัติการควบคุมระดับน้ำที่ประกอบขึ้นอย่างสมบูรณ์แล้ว ซึ่งเริ่มตั้งแต่การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าที่ได้จากการวัดและการแปลงค่าโดยอุปกรณ์ที่เป็นองค์ประกอบในระบบ โดยอาศัยหลักการหรือทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเป็นแนวทางในการดำเนินการ จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์เพื่อหาค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่า และสิ้นสุดที่การทดลองเพื่อพิสูจน์ให้เห็นว่าผลการทดลองมีความสอดคล้องกับหลักการและถูกต้องตามทฤษฎีที่อ้างถึงในบทที่ 2 ในส่วนของข้อมูลผลการทดลองต่างๆ ที่บันทึกได้เหล่านี้ สามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงและแก้ไข ตลอดจนเป็นแนวทางสำหรับการพัฒนาชุดทดลองนี้ให้ดียิ่งขึ้นต่อไป

4.1 การทดลองและบันทึกผลการทำงานของอุปกรณ์แปลงค่าความดัน

การทดลองที่ 1 ผลของระดับความสูงของน้ำต่อการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากทรานสดิวเซอร์วัดความดัน

ผลการทดลองที่ 1

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างระดับความสูงของน้ำในถังกับค่าแรงดันไฟฟ้า

ระดับความสูงน้ำ (cm)	ความต่างศักย์ไฟฟ้าจุด 1 (Volts)			ความต่างศักย์ไฟฟ้าเอาต์พุต (Volts)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
1.5	1.796	1.797	1.7965	0.559	0.603	0.581
2	1.798	1.798	1.798	0.667	0.702	0.6845
2.5	1.8	1.799	1.7995	0.78	0.724	0.752
3	1.801	1.8	1.8005	0.885	0.795	0.84
3.5	1.803	1.801	1.802	0.981	0.875	0.928
4	1.804	1.802	1.803	1.077	0.995	1.036
4.5	1.805	1.805	1.805	1.165	1.154	1.1595

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

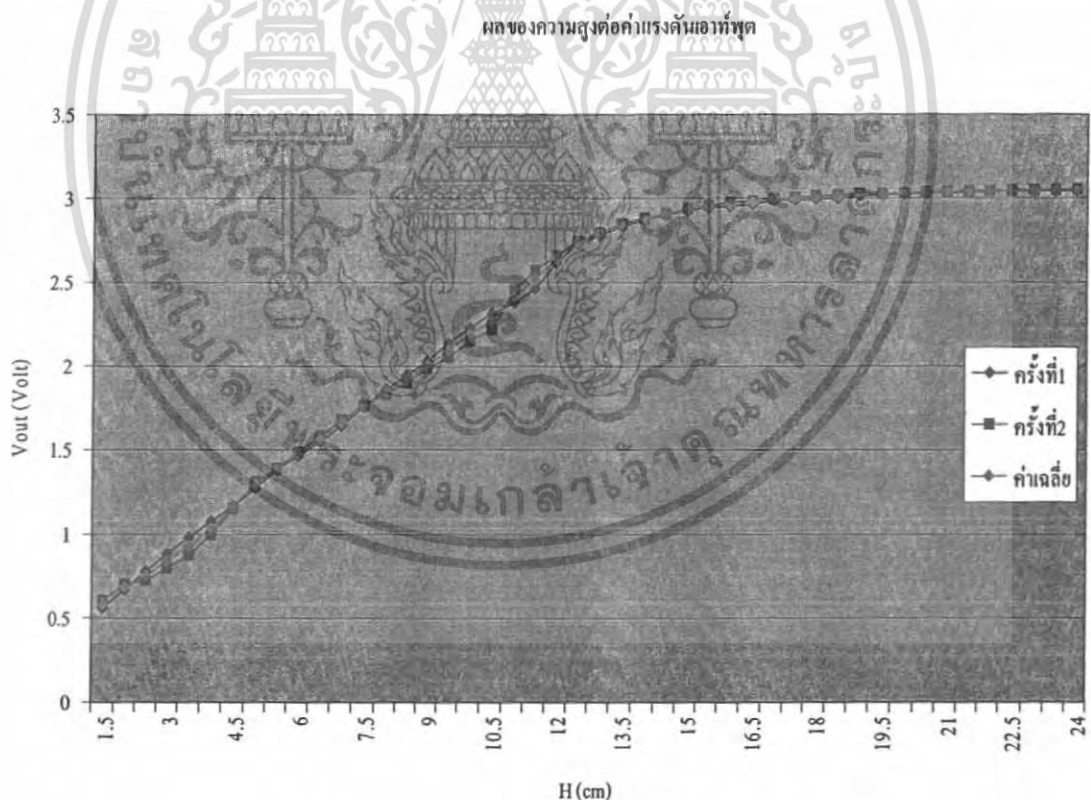
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างระดับความสูงของน้ำในถังกับค่าแรงดันไฟฟ้า (ต่อ)

ระดับความ สูงน้ำ (cm)	ความต่างศักย์ไฟฟ้าจุด 1 (Volts)			ความต่างศักย์ไฟฟ้าเอาต์พุต (Volts)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
5	1.807	1.807	1.807	1.273	1.311	1.292
5.5	1.808	1.808	1.808	1.385	1.39	1.3875
6	1.809	1.809	1.809	1.465	1.484	1.4745
6.5	1.81	1.811	1.8015	1.549	1.583	1.566
7	1.812	1.812	1.812	1.644	1.68	1.662
7.5	1.813	1.813	1.813	1.757	1.764	1.7605
8	1.815	1.814	1.8145	1.862	1.83	1.846
8.5	1.816	1.815	1.8155	1.944	1.902	1.923
9	1.817	1.816	1.8165	2.028	1.984	2.006
9.5	1.818	1.817	1.8175	2.137	2.051	2.094
10	1.82	1.818	1.819	2.227	2.148	2.1875
10.5	1.821	1.819	1.82	2.314	2.219	2.2665
11	1.822	1.822	1.822	2.376	2.455	2.4155
11.5	1.823	1.824	1.8235	2.461	2.57	2.5155
12	1.825	1.825	1.825	2.616	2.66	2.638
12.5	1.827	1.826	1.8265	2.73	2.745	2.7375
13	1.828	1.828	1.828	2.778	2.795	2.7865
13.5	1.829	1.829	1.829	2.832	2.847	2.8395
14	1.831	1.831	1.831	2.87	2.88	2.875
14.5	1.832	1.832	1.832	2.9	2.907	2.9035
15	1.833	1.834	1.8335	2.929	2.936	2.9325
15.5	1.834	1.835	1.8345	2.944	2.956	2.95
16	1.835	1.836	1.8355	2.95	2.974	2.962
16.5	1.837	1.838	1.8375	2.964	2.984	2.974
17	1.839	1.839	1.839	2.988	2.995	2.9915
17.5	1.84	1.841	1.8405	2.99	3.003	2.9965
18	1.842	1.842	1.842	2.996	3.011	3.0035
18.5	1.843	1.843	1.843	2.999	3.016	3.0075
19	1.844	1.845	1.8445	3.016	3.031	3.0235
19.5	1.845	1.846	1.8455	3.021	3.025	3.023

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างระดับความสูงของน้ำในถังกับค่าแรงดันไฟฟ้า (ต่อ)

ระดับความ สูงน้ำ (cm)	ความต่างศักย์ไฟฟ้าจุด 1 (Volts)			ความต่างศักย์ไฟฟ้าเอาต์พุต (Volts)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
20	1.846	1.847	1.8465	3.026	3.03	3.028
20.5	1.848	1.848	1.848	3.031	3.034	3.0325
21	1.849	1.849	1.849	3.034	3.037	3.0355
21.5	1.85	1.85	1.85	3.036	3.04	3.038
22	1.851	1.851	1.851	3.04	3.042	3.041
22.5	1.852	1.852	1.852	3.042	3.044	3.043
23	1.853	1.854	1.8535	3.043	3.048	3.0455
23.5	1.854	1.855	1.8545	3.044	3.049	3.0465
24	1.856	1.856	1.856	3.046	3.051	3.0485



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับความสูงของน้ำกับค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้แปรผันโดยตรงกับค่าความสูงของน้ำ ทั้งนี้เนื่องมาจากการทำงานของทรานสดิวเซอร์วัดความดัน (Pressure Transducer) เมื่อสังเกตกราฟที่ได้จากรูปที่ 4.1 ค่าความชันที่ระดับความสูงแต่ละช่วงไม่เท่ากัน ทั้งนี้เพราะค่านั้นในการส่งค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากตัวแปลงค่าความดันน้ำไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อแปลงค่าจากสัญญาณอะนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล แล้วนำค่าดังกล่าวไปใช้ในประมวลผลและแสดงเป็นค่าความสูงของระดับน้ำนั้น ไม่สามารถนำค่าแรงดันที่ได้มาแปลงเป็นความสูงด้วยสมการเส้นตรงเพียงสมการเดียว จำเป็นต้องแยกค่าเป็นการเป็นช่วงๆ เนื่องจากบางช่วง ระดับความสูงของน้ำเกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ค่าแรงดันเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงมากจึงมีความละเอียดมากกว่า ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าช่วงที่ความสูงเปลี่ยนแปลงมากแต่ให้การเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตน้อยซึ่งถือเป็นช่วงที่ไม่ละเอียด เกิดความคลาดเคลื่อนมาก

การทดลองที่ 2 สมการที่ใช้ในการหาระดับความสูงของน้ำจากค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากทรานสดิวเซอร์ความดัน ซึ่งถูกเก็บไว้ในรูปของสัญญาณดิจิทัล

ผลการทดลองที่ 2

ตารางที่ 4.2 แสดงช่วงแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตกับช่วงสัญญาณดิจิทัลที่แปลงได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์

ช่วงแรงดันเอาต์พุต(V)	ค่าดิจิทัลที่แปลงได้
0 ถึง 5	0 ถึง 1024

จากหลักการแปลงค่าสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลโดยการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.2 สามารถคำนวณความละเอียดของค่าแรงดันเอาต์พุต ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้

ค่าดิจิทัลเปลี่ยน 1024 ค่า -----> แรงดันเอาต์พุตเปลี่ยน 5 โวลต์

ดังนั้น ค่าดิจิทัลเปลี่ยน 1 ค่า -----> แรงดันเอาต์พุตเปลี่ยน 0.0049 โวลต์

แสดงให้เห็นว่าตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลมีเก็บค่าแรงดันเอาต์พุตที่ความละเอียดสูงสุดที่ 0.0049 โวลต์หรือประมาณ 0.005 โวลต์

โดยสมการที่ใช้สำหรับแปลงค่าสัญญาณแอนะล็อกเป็นระดับความสูง ได้นำมาแสดงไว้ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงช่วงสัญญาณดิจิทัลที่ความสูงต่างๆ และสูตรในการแปลงเป็นค่าความสูง

ระดับความสูง ,H (cm)	ค่าสัญญาณดิจิทัล(D)	สมการที่ใช้แปลงเป็นความสูง
$1.5 < H \leq 5$	322-396	$5 - 0.040541*(396-D)$
$5 < H \leq 8$	397-463	$8 - 0.044776*(463-D)$
$8 < H \leq 10$	464-509	$10 - 0.043478*(509-D)$
$10 < H \leq 13$	510-569	$13 - 0.05*(569-D)$
$13 < H \leq 15$	570-595	$15 - 0.076923*(595-D)$
$15 < H \leq 18$	596-613	$18 - 0.166667*(613-D)$
$18 < H \leq 20$	614-618	$20 - 0.4*(618-D)$
$20 < H \leq 23$	619-621	$23 - 0.375*(621-D)$
$23 < H \leq 25$	622-623	$25 - (623-D)$

สมการแปลงค่าความสูงที่ได้ จะถูกโปรแกรมเพื่อคำนวณและแสดงผลแก่ผู้ที่ทำการทดลองผ่านทางคอมพิวเตอร์

4.2 การทดลองและบันทึกผลที่ได้จากการทำงานของวาล์วควบคุม

การทดลองที่ 3 ผลของเปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วควบคุมที่มีต่ออุปกรณ์วัดค่าอัตราการไหลขาเข้า

วิธีการทดลอง 3

1. ตั้งค่าวาล์วควบคุมการไหลขาของน้ำ โดยเปิดวาล์วด้วยการหมุนเพียงตามเพิ่มขึ้นทีละ 5.625 องศา
2. บันทึกค่าอัตราการไหลที่ได้จากไฮเปอร์เทอร์มินอลและนำไปพล็อตกราฟ โดยกำหนดให้ไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงรอบการหมุนของใบพัดทุกๆ 3 วินาที

ผลการทดลองที่ 3

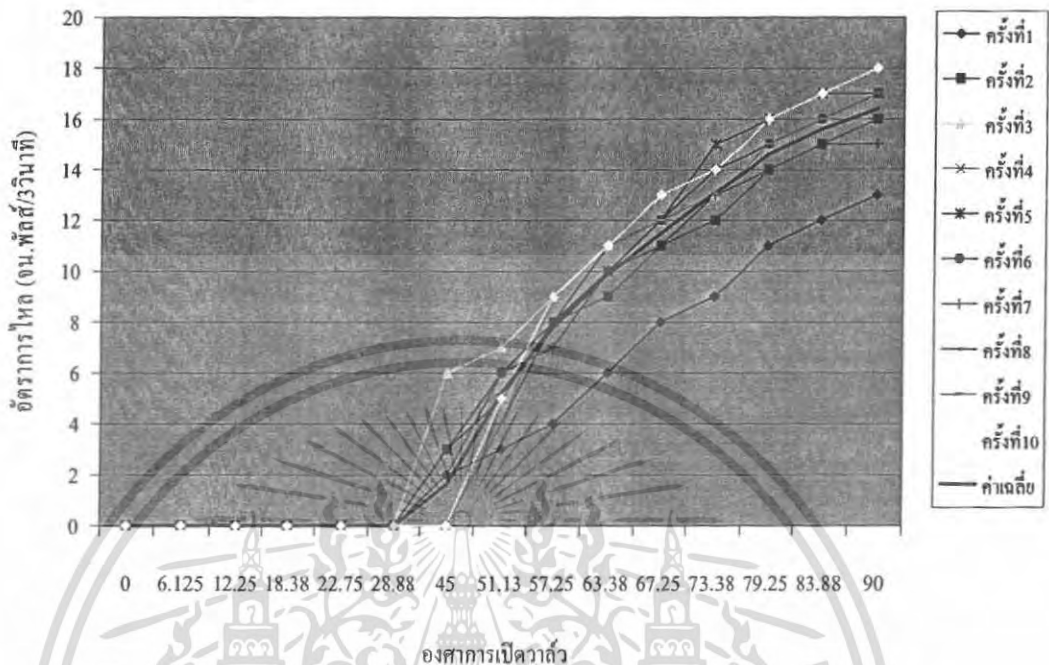
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ตารางบันทึกความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วกับอัตราการไหลขาเข้า

วาล์วควบคุม		อัตราการไหล (จำนวนพัลส์/วินาที)										ค่าเฉลี่ย
		ครั้งที่										
องศาการเปิดวาล์ว (degree)	เปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์ว (%)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
90	100	13	16	17	17	17	17	15	17	17	18	16.4
84.375	93.75	12	15	16	16	17	16	15	16	16	17	15.6
73.125	81.25	9	12	13	14	15	14	13	14	13	14	13.1
67.500	75	8	11	12	12	12	12	11	12	12	13	11.5
61.875	68.75	6	9	11	10	10	10	10	11	11	11	9.9
56.250	62.50	4	8	9	8	8	8	7	8	9	9	7.8
50.625	56.25	3	6	7	6	5	6	6	4	4	5	5.2
45	50	2	0	6	0	3	3	2	0	0	0	1.6
39.375	43.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33.750	37.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28.125	31.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22.500	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16.875	18.27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11.250	12.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.625	6.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของการเปิดวาล์วต่ออัตราการไหล



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลของเปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วกับอัตราการไหล

จากกราฟรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าที่องศาการเปิดวาล์วระหว่าง 0 ถึง 40 องศา อัตราการไหลมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งทำให้ทราบว่าน้ำเริ่มไหลผ่านวาล์วซึ่งหมุนเปิดไปที่ 40 องศา (เปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วเท่ากับ 44 %) และจะมีการไหลเกิดขึ้นแน่นอนที่องศาการหมุนเปิดวาล์ว 45 องศา หรือที่ 50% นั่นเองเมื่อพิจารณากราฟจะเห็นว่าอัตราการไหลของน้ำแปรผันตรงกับเปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์ว คืออัตราไหลสูงขึ้นเมื่อเปิดวาล์วมากขึ้น

การทดลองที่ 4 ผลของเปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วควบคุมต่อเวลาที่น้ำเข้าสู่ระดับความสูง 25 ซม.

วิธีการทดลอง 4

1. ตั้งค่าวาล์วควบคุมการไหลของน้ำให้ออกให้ปิดอยู่ที่ 0%
2. ตั้งค่าวาล์วควบคุมการไหลเข้าของน้ำที่ค่าต่างๆ และบันทึกค่าเวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มน้ำเริ่มเข้าสู่ถึงจนกระทั่งถึงระดับ 25 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองที่ 4

ตารางที่ 4.5 ตารางบันทึกค่าความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วกับเวลาที่น้ำเข้าสู่ระดับความสูง 25 เซนติเมตร

เปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์ว (%)	เวลาที่ใช้ (sec)
0	-
10	-
20	1840
30	460
40	200
50	156
60	92
70	75
80	68
90	61
100	55



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่ระดับ 25 เซนติเมตรที่เปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วควบคุมค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณารูปที่ได้ดังรูปที่ 4.3 พบว่า เวลาที่ใช้เพื่อให้น้ำเข้าสู่ระดับที่ต้องการแปรผกผันกับเปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วควบคุม คือ การเข้าสู่ระดับความสูง 25 เซนติเมตรจะใช้เวลาน้อยลงเมื่อเปิดวาล์วควบคุมมากขึ้น

4.3 การทดลองเพื่อคำนวณค่าความต้านทานของวาล์วควบคุมการไหลของน้ำขาออก

การทดลองที่ 5 หาค่าความต้านทานของวาล์วควบคุมการไหลของน้ำเมื่อทำการเปิดวาล์ว 50%

วิธีการทดลอง 5

1. ตั้งค่าวาล์วควบคุมการไหลของน้ำขาออกให้ปิดอยู่ที่ 0%
2. ปล่อยน้ำเข้าสู่ระบบ รจนกระทั่งระดับน้ำอยู่ที่ ระดับ 29.5 เซนติเมตร
3. ปรับค่าวาล์วควบคุมการไหลของน้ำขาออกให้เปิดที่ 50%
4. บันทึกค่าอัตราการไหลที่ได้จากไฮเปอร์เทอร์มินอลและนำไปพล็อตกราฟ โดยกำหนดให้ไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงรอบการหมุนของใบพัดทุกๆ 3 วินาที

ผลการทดลองที่ 5

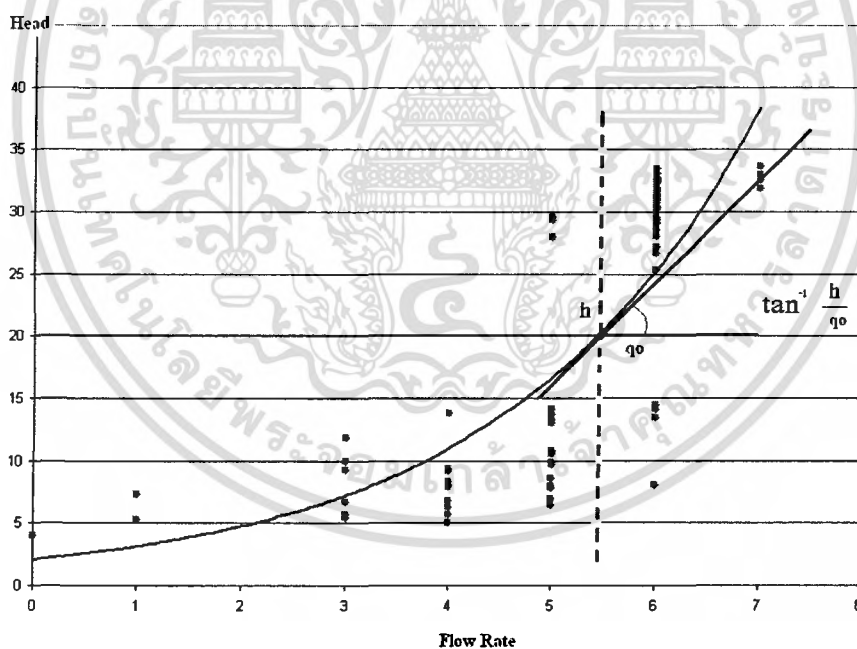
ตารางที่ 4.6 บันทึกค่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลที่ความสูงระดับต่างๆ

ความสูง (cm)	อัตรา การไหล	ความสูง (cm)	อัตรา การไหล	ความสูง (cm)	อัตรา การไหล	ความสูง (cm)	อัตรา การไหล
1	0	6.212384	4	14.33898	6	26.62714	6
2.32353	1	6.26161	3	14.52941	6	26.96612	7
2.028174	4	6.729257	5	15.11764	6	27.14239	6
2.668112	3	6.852322	5	17.96611	5	27.41019	6
2.717338	4	7.22938	4	19.40679	6	27.8816	6
3.480341	5	7.360062	4	19.57628	6	28.02714	6
3.446595	3	7.901548	5	20.05086	6	28.79663	6
3.947988	5	7.8235	5	20.57628	5	28.98816	6
4.332663	4	7.70585	5	21.54239	7	29.07968	6
4.701858	3	8.70585	5	22.32205	5	28.16273	6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 บันทึกค่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลที่ความสูงระดับต่างๆ (ต่อ)

ความสูง (cm)	อัตรา การไหล	ความสูง (cm)	อัตรา การไหล	ความสูง (cm)	อัตรา การไหล	ความสูง (cm)	อัตรา การไหล
5.317183	1	8.99996	5	22.3729	6	29.2712	6
5.824923	4	10.05881	5	22.86443	7	29.13562	6
5.907895	4	10.4235	5	23.64409	7	29.21697	6
6.006347	5	10.47058	6	23.86443	6	29.33222	6
5.883282	5	11.2941	5	24.45765	6	29.41019	6
6.080186	6	11.70587	5	24.94917	6	29.4746	6
6.055573	4	12.52941	6	25.54239	6	29.49765	6
6.350929	4	13.7647	4	25.74239	6	29.53087	6
6.572446	5	14.11764	5	25.78189	6		



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับระดับความสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงกับอัตราการไหลของน้ำขาออกที่ได้ ดังกราฟรูปที่ 4.4 นำมาคำนวณหาค่าความต้านทานของวาล์วที่ใช้ควบคุมการไหลออกของน้ำได้ โดยอ้างถึงสมการตามทฤษฎีที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 ดังนี้

$$\text{จากสมการที่ (2.9)} \quad R = h/q_0$$

จากการที่หน่วยของ q_0 เป็น ฟลัส/วินาที จึงต้องทำการแปลงหน่วยเป็นหน่วยมาตรฐาน โดยคูณด้วย 5.7×10^{-6} เมตร³/ฟลัส ดังนั้น

$$q_0 = (5.4 \text{ ฟลัส-วินาที}^{-1}) \times (5.7 \times 10^{-6} \text{ เมตร}^3\text{-ฟลัส}^{-1}) \\ = 3.078 \times 10^{-5} \text{ เมตร}^3\text{-วินาที}^{-1}$$

แทนค่า

$$R = 20 / (3.078 \times 10^{-5}) \\ = 6.5 \times 10^5 \text{ วินาที-เมตร}^{-2} \\ = 65 \text{ วินาที-เซนติเมตร}^{-2}$$

4.4 การทดลองและบันทึกผลการทดลองในส่วนของกระบวนการควบคุมแบบต่างๆ

การทดลองที่ 6 ผลตอบสนองของระบบป้อนกลับอัตโนมัติธรรมดา ที่ยังไม่ใช้ตัวควบคุมใดๆ

วิธีการทดลอง 6

1. ตั้งค่าวาล์วควบคุมการไหลของน้ำขาออกให้เปิดที่ 50%
2. ป้อนค่าระดับความสูงที่ 15 เซนติเมตรเป็นค่าที่ต้องการให้ระบบปฏิบัติการเพื่อเข้าสู่ระดับดังกล่าวและรักษาระดับให้คงที่
3. ปล่อน้ำเข้าสู่ระบบ สังเกตการทำงานของวาล์วควบคุม ระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลง พร้อมทั้งบันทึกผลการทดลอง

ผลการทดลองที่ 6

ตารางที่ 4.7 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ได้ เมื่อกำหนดระดับความสูง 15 เซนติเมตรเป็นระดับเซตพอยท์

เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	อัตราการไหลเข้า	อัตราการไหลออก	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	อัตราการไหลเข้า	อัตราการไหลออก
0	0.297244	0	0	30	6.20896	12	5

ตารางที่ 4.7 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ได้ เมื่อกำหนดระดับความสูง 15 เซนติเมตรเป็นระดับเซตพอยท์ (ต่อ)

เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	อัตราการไหลเข้า	อัตราการไหลออก	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	อัตราการไหลเข้า	อัตราการไหลออก
1	0.337785	0	1	26	6.65672	13	5
2	0.459408	16	4	27	5.223888	13	6
3	0.378326	27	3	28	5.895528	9	5
4	0.337785	28	4	29	6.164184	12	5
5	0.337785	27	4	31	6.343288	12	5
6	1.189146	28	3	32	6.522392	12	6
7	2.283753	27	4	33	5.671648	10	5
8	2.324294	24	4	34	6.43284	8	5
9	2.689163	24	3	35	7.10448	10	6
10	2.486458	24	4	36	7.373136	10	5
11	3.135114	24	4	37	6.119408	8	5
12	3.702688	24	3	38	6.388064	6	5
13	3.094573	20	4	39	7.059704	10	6
14	3.175655	20	4	40	7.194032	10	5
15	4.229721	20	3	41	6.164184	7	5
16	3.621606	17	4	42	6.567168	7	6
17	3.945934	17	4	43	6.253736	9	5
18	4.432426	18	4	44	6.65672	10	5
19	4.878377	18	4	45	7.014928	10	5
20	5.940304	16	4	46	7.820896	8	6
21	5.805976	14	4	47	7.238808	7	5
22	5.08956	12	4	48	7.283584	0	5
23	4.597024	13	4	49	7.059704	0	6
24	4.910456	13	4	50	6.522392	1	5
25	5.000008	13	4	51	7.417912	1	5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

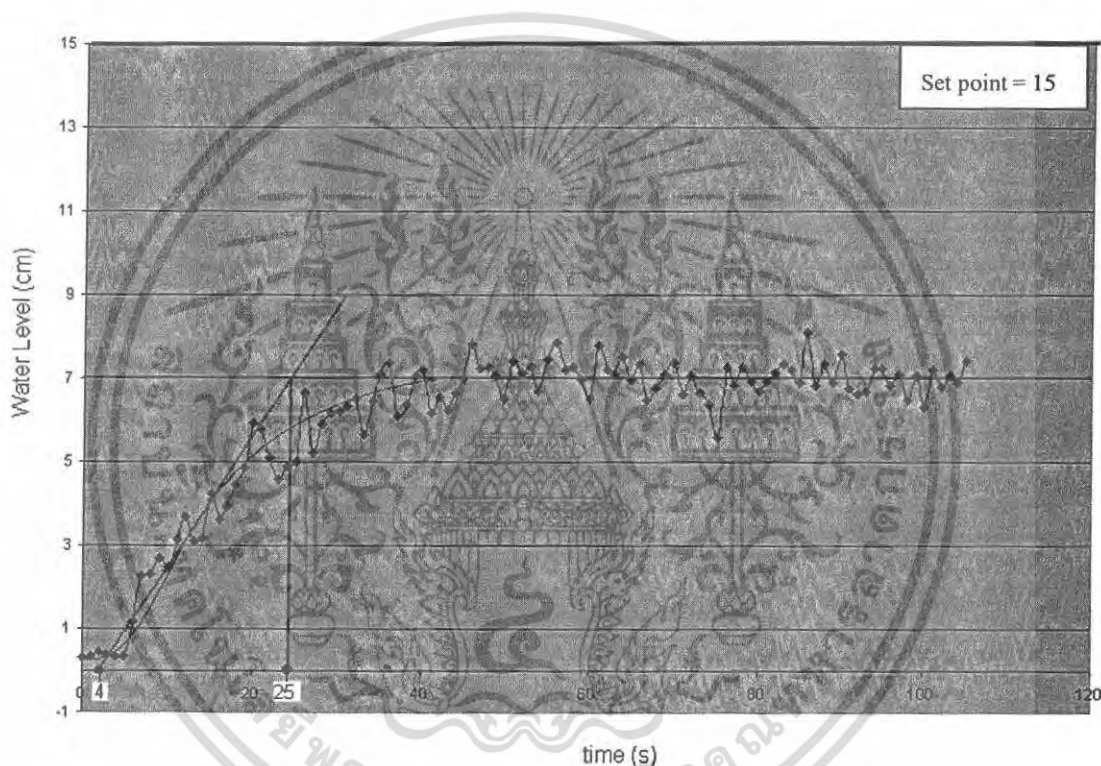
ตารางที่ 4.7 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ได้ เมื่อกำหนดระดับความสูง 15 เซนติเมตรเป็นระดับเซต พอยท์ (ต่อ)

เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	อัตราการไหลเข้า	อัตราการไหลออก	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	อัตราการไหลเข้า	อัตราการไหลออก
52	7.149256	0	2	77	7.283584	7	5
53	7.283584	2	3	78	6.835824	7	6
54	6.701496	1	4	79	7.283584	7	5
55	7.462688	0	4	80	6.925376	7	5
56	7.865672	1	5	81	6.701496	6	6
57	7.194032	1	5	82	6.925376	6	5
58	7.283584	0	5	83	7.149256	7	5
59	7.32836	1	6	84	7.32836	7	5
60	6.970152	0	6	85	7.194032	7	6
61	6.522392	2	5	86	6.8806	7	5
62	7.77612	1	5	87	8.089552	4	5
63	7.194032	1	5	88	6.835824	3	6
64	7.10448	2	6	89	6.8806	2	5
65	7.507464	1	5	90	7.597016	1	5
66	6.970152	1	5	91	6.746272	1	5
67	7.32836	1	6	92	6.611944	2	6
68	6.477616	1	5	93	6.701496	1	5
69	6.746272	1	5	94	7.238808	1	5
70	7.10448	1	5	95	7.238808	1	6
71	7.373136	2	6	96	6.835824	2	5
72	6.611944	10	5	97	7.10448	1	5
73	7.059704	9	5	98	6.477616	0	5
74	6.65672	7	6	99	7.059704	2	6
75	6.388064	7	5	100	6.298512	2	5
76	5.582096	6	5	101	7.194032	1	5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ได้ เมื่อกำหนดระดับความสูง 15 เซนติเมตรเป็นระดับเซ็ตพอยท์ (ต่อ)

เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	อัตราการไหลเข้า	อัตราการไหลออก	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	อัตราการไหลเข้า	อัตราการไหลออก
102	6.791048	2	6	104	6.8806	1	6
103	7.059704	1	5	105	7.417912	1	6



รูปที่ 4.5 กราฟผลตอบสนองของระบบ เมื่อกำหนดเซ็ตพอยท์ที่ระดับ 15 เซนติเมตร

จากผลการทดลองที่บันทึกในตารางที่ 4.7 พบว่าการดำเนินการของระบบเป็นไปในทิศทางเดียวกับคำสั่งที่เขียนใน โปรแกรม คือ หากระดับน้ำยังไม่ถึงค่าเซ็ตพอยท์ ก็จะส่งเป็นค่าความคลาดเคลื่อนกลับไปเป็นสัญญาณเพื่อใช้ควบคุมการทำงานของวาล์วควบคุมต่อ ซึ่งจะช่วยให้เกิดความคลาดเคลื่อนลดลง ซึ่งกราฟที่แสดงดังรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าเมื่อระบบปฏิบัติการไปจะถึงระดับความสูงที่ 7 เซนติเมตรแล้ว ระบบเริ่มทำการรักษาระดับไว้ได้ที่ค่านี้ต่อไป ไม่สามารถเข้าสู่เซ็ตพอยท์ได้

การทดลองที่ 7 ผลตอบสนองของระบบป้อนกลับอัตโนมัติ ที่ใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน

วิธีการทดลอง 7

1. ตั้งค่าตัวควบคุมการไหลของน้ำขาออกให้เปิดที่ 50%
2. ป้อนค่าระดับความสูงที่ 15 เซนติเมตรเป็นค่าที่ต้องการให้ระบบปฏิบัติการเพื่อเข้าสู่ระดับดังกล่าวและรักษาระดับให้คงที่
3. ป้อนค่า K หรือค่าอัตราขยายของตัวควบคุมเท่ากับ 4 , 8, 15, 20 ตามลำดับ
4. ปล่อน้ำเข้าสู่ระบบ สังเกตการทำงานของวาล์วควบคุม ระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลง พร้อมทั้งบันทึกผลการทดลอง

ผลการทดลองที่ 7

ตารางที่ 4.8 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วน ด้วยอัตราขยายแบบสัดส่วน $K_p = 4$ เมื่อกำหนดระดับความสูง 15 เซนติเมตรเป็นระดับเซตพอยท์

เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	อัตราการไหลเข้า	อัตราการไหลออก	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	อัตราการไหลเข้า	อัตราการไหลออก
0	0.381343	0	0	12	2.838977	28	3
1	1.059311	3	1	13	2.372874	28	4
2	0.296597	26	4	14	3.601691	27	4
3	0.127105	27	3	15	3.432199	28	3
4	0.296597	28	4	16	3.050842	28	4
5	0.00034	28	4	17	4.110167	27	4
6	0.423716	27	3	18	3.898302	28	4
7	1.313549	28	4	19	4.449151	27	4
8	1.313549	28	4	20	4.703389	28	4
9	1.864398	28	3	21	6.164184	27	4
10	1.694906	27	4	22	5.582096	28	4
11	2.45762	28	4	23	6.791048	27	4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วน ด้วยอัตราขยายแบบ
สัดส่วน $K_p = 4$ เมื่อกำหนดระดับความสูง 15 เซนติเมตรเป็นระดับเซ็ตพอยท์ (ต่อ)

เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	อัตราการ ไหลเข้า	อัตราการ ไหลออก	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	อัตราการ ไหลเข้า	อัตราการ ไหลออก
24	6.164184	28	4	49	10.25	0	5
25	7.77612	28	4	50	10.35	8	5
26	7.462688	27	5	51	9.869566	12	5
27	8.04349	28	6	52	10	17	3
28	8.47827	27	5	53	11.45	13	4
29	8.304358	27	5	54	11.6	1	4
30	8.69566	28	5	55	11.25	0	5
31	9.13044	28	6	56	10.95	0	5
32	9.391308	26	5	57	10.7	0	5
33	10	23	5	58	10.2	0	6
34	10.2	15	6	59	10.75	8	6
35	10.25	12	5	60	10.65	7	5
36	10	13	5	61	10.25	6	5
37	10.05	13	5	62	10.7	10	5
38	10.35	12	6	63	10.9	5	6
39	10.25	12	5	64	11.05	0	5
40	10.15	11	5	65	10.85	3	5
41	10.45	14	6	66	10.35	3	6
42	11.4	11	5	67	10.35	9	5
43	11.3	2	5	68	10.5	10	5
44	10.75	0	5	69	10.5	11	5
45	10.65	1	6	70	10.85	10	6
46	11.05	2	5	71	11.05	6	5
47	11.1	0	5	72	10.95	0	5
48	11.05	0	6	73	10.95	0	6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วน ด้วยอัตราขยายแบบ
สัดส่วน $K_p = 4$ เมื่อกำหนดระดับความสูง 15 เซนติเมตรเป็นระดับเซ็ตพอยท์ (ต่อ)

เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	อัตราการ ไหลเข้า	อัตราการ ไหลออก	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	อัตราการ ไหลเข้า	อัตราการ ไหลออก
74	11.6	0	5	90	10.9	0	5
75	10.8	0	5	91	10.7	2	6
76	9.78261	0	6	92	10.6	3	5
77	10.5	16	5	93	10.5	2	5
78	10.75	12	5	94	11.55	9	5
79	11.1	5	5	95	10.95	3	5
80	10.3	2	6	96	11.05	0	6
81	10.6	9	5	97	10.9	0	5
82	11.2	0	6	98	10.35	2	5
83	10.75	0	5	99	10.9	6	6
84	10.35	1	6	100	10.3	5	6
85	10.75	9	5	101	11.6	10	6
86	10.55	7	5	102	10.65	5	6
87	11.25	6	5	103	11	1	6
88	11.1	0	6	104	10.45	1	5
89	10.8	0	5	105	10.15	0	6

ตารางที่ 4.9 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วน ด้วยอัตราขยายแบบ
สัดส่วน $K_p = 8$ เมื่อกำหนดระดับความสูง 15 เซนติเมตรเป็นระดับเซ็ตพอยท์

เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	อัตราการ ไหลเข้า	อัตราการ ไหลออก	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	อัตราการ ไหลเข้า	อัตราการ ไหลออก
0	0.662113	0	0	2	0.9459	27	4
1	0.702654	21	1	3	0.743195	27	3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วน ด้วยอัตราขยายแบบ
สัดส่วน $K_p = 8$ เมื่อกำหนดระดับความสูง 15 เซนติเมตรเป็นระดับเซ็ทพอยท์ (ต่อ)

เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	อัตราการ ไหลเข้า	อัตราการ ไหลออก	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	อัตราการ ไหลเข้า	อัตราการ ไหลออก
4	1.229687	28	4	29	9.56522	27	5
5	1.189146	27	4	30	9.56522	28	5
6	1.797261	27	3	31	11.4	28	6
7	1.594556	27	4	32	10.15	28	5
8	2.56754	28	4	33	10.3	24	5
9	2.445917	27	3	34	12.1	27	6
10	2.56754	27	4	35	12.35	26	5
11	2.810786	27	4	36	11.55	0	5
12	2.97295	27	3	37	11.3	0	5
13	3.621606	27	4	38	11.8	0	6
14	3.418901	28	4	39	11.05	0	5
15	5.268664	27	3	40	11.3	0	5
16	5.08956	27	4	41	11.3	8	6
17	4.507472	27	4	42	12.1	8	5
18	5.98508	27	4	43	10.95	5	5
19	6.20896	28	4	44	11.6	1	5
20	6.925376	27	4	45	11.15	13	6
21	6.835824	27	4	46	11.45	4	5
22	6.970152	27	4	47	12.45	6	5
23	7.731344	27	4	48	11	7	6
24	8.69566	28	4	49	11.2	1	5
25	8.173924	27	4	50	11.85	8	5
26	8.347836	28	5	51	11.5	11	5
27	9.304352	27	6	52	11.65	3	3
28	9.304352	28	5	53	12.3	0	4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วน ด้วยอัตราขยายแบบ
สัดส่วน $K_p = 8$ เมื่อกำหนดระดับความสูง 15 เซนติเมตรเป็นระดับเซ็ตพอยท์ (ต่อ)

เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	อัตราการ ไหลเข้า	อัตราการ ไหลออก	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	อัตราการ ไหลเข้า	อัตราการ ไหลออก
54	11.35	0	4	79	11.1	1	5
55	11.7	0	5	80	11.65	3	6
56	11.7	0	5	81	11.95	10	5
57	11.35	0	5	82	10.85	0	6
58	11.45	0	6	83	11.55	0	5
59	11	0	6	84	11.75	0	6
60	11.15	2	5	85	11.32	0	5
61	11.3	12	5	86	10.96	8	5
62	11.75	11	5	87	11.72	8	5
63	11.55	5	6	88	11.02	5	6
64	10.85	0	5	89	11.82	1	5
65	11.15	17	5	90	12.1	13	5
66	11.8	18	6	91	11.7	4	6
67	12.3	13	5	92	11.35	6	5
68	11.3	4	5	93	12.55	7	5
69	12.05	0	5	94	11.55	1	5
70	12.2	0	6	95	12	8	5
71	11.55	0	5	96	11.55	11	6
72	10.95	0	5	97	11.05	3	5
73	12	17	6	98	10.95	4	5
74	11.55	18	6	99	11.65	0	6
75	11.05	7	5	100	11.7	0	6
76	11.65	0	5	101	11.7	0	6
77	11.35	11	5	102	11.35	0	6
78	11.7	3	5	103	11.45	17	6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วน ด้วยอัตราขยายแบบ
สัดส่วน $K_p = 8$ เมื่อกำหนดระดับความสูง 15 เซนติเมตรเป็นระดับเซ็ตพอยท์ (ต่อ)

เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	อัตราการ ไหลเข้า	อัตราการ ไหลออก	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	อัตราการ ไหลเข้า	อัตราการ ไหลออก
104	12.01	17	6	105	11.92	4	6

ตารางที่ 4.10 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วน ด้วยอัตราขยายแบบ
สัดส่วน $K_p = 15$ เมื่อกำหนดระดับความสูง 15 เซนติเมตรเป็นระดับเซ็ตพอยท์

เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	อัตราการ ไหลเข้า	อัตราการ ไหลออก	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	อัตราการ ไหลเข้า	อัตราการ ไหลออก
0	1.189146	0	0	17	5	27	4
1	0.621572	0	1	18	4.554049	28	4
2	0.621572	0	4	19	4.351344	27	4
3	1.270228	0	3	20	6.522392	28	4
4	0.54049	12	4	21	5.447768	27	4
5	0.175621	27	4	22	6.164184	27	4
6	0.175621	27	3	23	6.835824	27	4
7	0.297244	27	4	24	5.895528	27	4
8	1.108064	27	4	25	6.477616	28	5
9	1.635097	27	3	26	7.55224	27	6
10	1.75672	27	4	27	7.462688	27	5
11	2.202671	28	4	28	8.826094	27	5
12	3.337819	27	3	29	9.173918	27	5
13	3.094573	27	4	30	8.521748	27	6
14	3.094573	27	4	31	9.086962	27	5
15	3.905393	28	3	32	9.478264	26	5
16	4.716213	27	4	33	8.304358	26	5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วน ด้วยอัตราขยายแบบ
สัดส่วน $K_p = 15$ เมื่อกำหนดระดับความสูง 15 เซนติเมตรเป็นระดับเซ็ตพอยท์ (ต่อ)

เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	อัตราการ ไหลเข้า	อัตราการ ไหลออก	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	อัตราการ ไหลเข้า	อัตราการ ไหลออก
34	8.826094	25	6	59	11.1	0	6
35	9.869566	26	5	60	12.15	0	5
36	10.4	24	5	61	11.75	0	5
37	10.9	26	5	62	10.5	6	5
38	11.6	26	6	63	12.15	25	6
39	11.45	27	5	64	12.1	11	5
40	12	27	5	65	12.05	3	5
41	11.05	27	6	66	11.3	24	6
42	10.95	15	5	67	11.3	6	5
43	11.75	5	5	68	12.6	0	5
44	12.75	4	5	69	13.05	5	5
45	11.7	27	5	70	12.3	22	6
46	12.5	4	6	71	11.65	22	5
47	11.4	0	5	72	12.3	9	5
48	11.65	0	5	73	12.4	1	6
49	11	0	6	74	11.9	0	6
50	12.25	0	5	75	12.2	0	5
51	12.3	13	5	76	11.9	0	5
52	12.25	12	3	77	11.85	0	5
53	11.65	0	4	78	11.35	0	6
54	11.65	0	4	79	11.6	0	5
55	12.6	0	5	80	11.4	0	5
56	11.8	0	5	81	11.2	1	6
57	12.05	1	5	82	12.4	18	5
58	11.55	0	6	83	11.1	14	5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วน ด้วยอัตราขยายแบบสัดส่วน $K_p = 15$ เมื่อกำหนดระดับความสูง 15 เซนติเมตรเป็นระดับเซตพอยท์ (ต่อ)

เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	อัตราการไหลเข้า	อัตราการไหลออก	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	อัตราการไหลเข้า	อัตราการไหลออก
84	11.3	21	5	95	12.2	0	6
85	10.85	3	6	96	11.1	0	5
86	11.85	0	5	97	11.7	0	5
87	12.05	14	5	98	11.7	0	6
88	12.6	24	6	99	12	9	5
89	12.05	27	5	100	12.05	7	5
90	12.65	8	6	101	11.15	3	5
91	11.75	0	5	102	11.55	0	6
92	11.85	0	5	103	10.6	14	6
93	12.5	0	6	104	11.4	27	6
94	11.85	0	5	105	12.5	17	6

ตารางที่ 4.11 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วน ด้วยอัตราขยายแบบสัดส่วน $K_p = 20$ เมื่อกำหนดระดับความสูง 15 เซนติเมตรเป็นระดับเซตพอยท์

เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	อัตราการไหลเข้า	อัตราการไหลออก	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	อัตราการไหลเข้า	อัตราการไหลออก
0	0	0	0	8	1.148605	27	4
1	0.013457	7	1	9	1.797261	27	4
2	0.053998	27	4	10	1.310769	28	4
3	0.175621	28	3	11	2.16213	27	4
4	0.053998	27	4	12	2.97295	28	3
5	0.013457	27	4	13	2.526999	27	4
6	0.418867	27	3	14	3.135114	28	4
7	1.108064	28	4	15	3.945934	28	3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วน ด้วยอัตราขยายแบบ
สัดส่วน $K_p = 20$ เมื่อกำหนดระดับความสูง 15 เซนติเมตรเป็นระดับเซตพอยท์ (ต่อ)

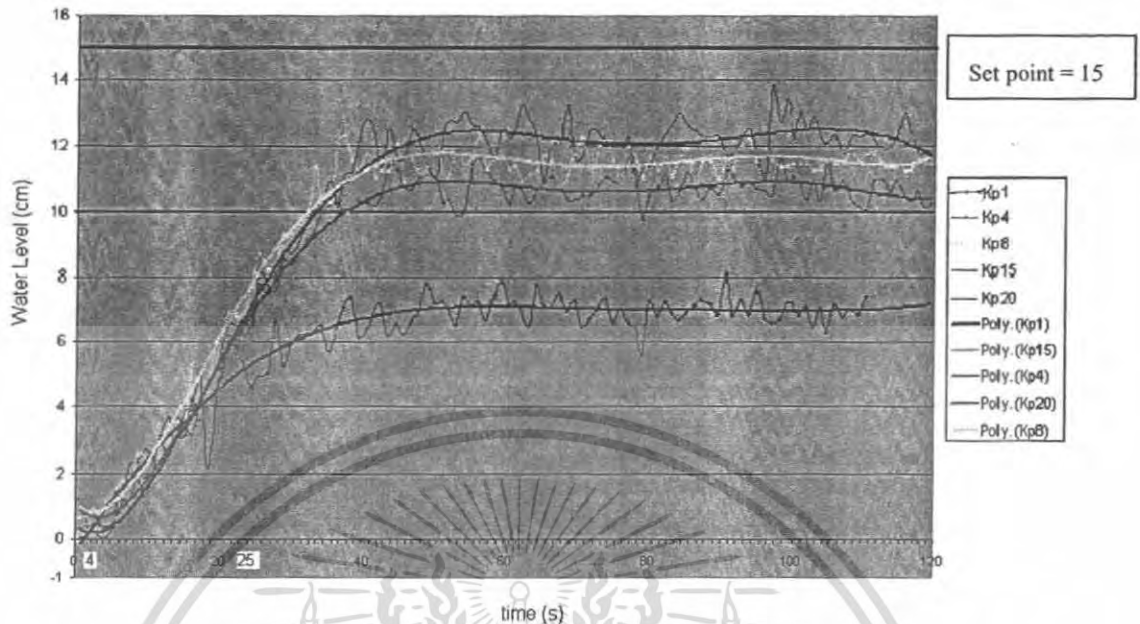
เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	อัตราการ ไหลเข้า	อัตราการ ไหลออก	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	อัตราการ ไหลเข้า	อัตราการ ไหลออก
16	3.945934	28	4	40	12.1	0	5
17	5.081082	27	4	41	11.4	0	5
18	2.16213	28	3	42	12.5	20	6
19	3.824311	27	4	43	11.55	9	5
20	5.582096	28	4	44	11.75	13	5
21	6.567168	28	4	45	12.5	5	6
22	6.477616	27	4	46	12.15	0	5
23	6.164184	30	4	47	11.45	13	5
24	6.611944	28	4	48	11.1	27	5
25	8.086968	28	5	49	12.45	26	6
26	7.782622	27	6	50	12.8	6	5
27	7.60871	28	5	51	12.7	0	5
28	8.652182	28	5	52	13.05	0	6
29	8.652182	27	5	53	12.6	0	5
30	9.043484	28	6	54	12.6	0	5
31	9.652176	28	5	55	12.15	0	5
32	10.25	27	5	56	11.7	0	6
33	10.15	28	5	57	12.5	6	5
34	11	28	6	58	12.25	0	5
35	10.1	27	6	59	12.5	0	6
36	11.15	28	5	60	13.3	0	6
37	11.25	28	5	61	12.8	0	5
38	12.25	27	5	62	12.1	0	5
39	12.85	15	6	63	10.9	0	5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วน ด้วยอัตราขยายแบบ
สัดส่วน $K_p = 20$ เมื่อกำหนดระดับความสูง 15 เซนติเมตรเป็นระดับเซตพอยท์ (ต่อ)

เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	อัตราการ ไหลเข้า	อัตราการ ไหลออก	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	อัตราการ ไหลเข้า	อัตราการ ไหลออก
64	12.05	17	6	85	12.3	0	5
65	12.05	8	5	86	12.3	10	5
66	13.3	1	5	87	11.7	10	5
67	11.55	2	6	88	11.8	5	6
68	11.75	13	5	89	12.3	0	5
69	12.5	2	5	90	12.5	14	5
70	12.35	0	6	91	11.65	13	6
71	12.15	0	5	92	11.1	24	6
72	12	0	5	93	13.84616	13	6
73	11.8	0	6	94	12.75	1	5
74	12.25	0	6	95	13.46154	0	6
75	10.95	0	5	96	12.25	0	5
76	11.5	23	5	97	13.07693	0	5
77	11.4	27	5	98	12.45	0	6
78	12	27	5	99	12.9	0	5
79	12.4	15	6	100	12.25	0	6
80	12.65	2	5	101	12.1	0	6
81	13	0	5	102	12.35	0	6
82	12.6	0	6	103	11.8	0	5
83	12.45	0	6	104	12.07	1	6
84	12.3	0	5	105	12	1	6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 กราฟผลตอบสนองของระบบที่อัตราขยายต่างๆ เมื่อกำหนดเซตพอยท์ที่ระดับ 15 ซม.

จากการทดลองพบว่าผลตอบสนองของระบบดังรูปที่ 4.6 จะเข้าใกล้ระดับเซตพอยท์มากขึ้นเมื่อค่าอัตราขยายแบบสัดส่วน (K_p) มากขึ้น แต่ไม่สามารถเข้าสู่ระดับดังกล่าวได้ โดยจะเห็นได้จากค่าความคลาดเคลื่อนที่ปรากฏอยู่

ทำการหาค่าอัตราขยายแบบสัดส่วนจากกราฟรูปที่ 4.5 โดยอาศัยหลักการปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีโพเซสรีแอกชันเคิร์ฟ (Process Reaction Curve) อ่านค่าคงที่ของเวลา (Time Constant) เท่ากับ 20 วินาทีและค่าเวลาไร้ผลตอบสนองเท่ากับ 4 วินาที ดังนั้นได้ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมเท่ากับ 5

การทดลองที่ 8 เปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบป้อนกลับอัตโนมัติ ที่ใช้อัตราขยายแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์ค่าต่างๆ

วิธีการทดลอง 8

1. ตั้งค่าวาล์วควบคุมการไหลของน้ำขาออกให้เปิดที่ 50%
2. ป้อนค่าระดับความสูงที่ 10 เซนติเมตรเป็นค่าที่ต้องการให้ระบบปฏิบัติการเพื่อเข้าสู่ระดับดังกล่าวและรักษาระดับให้คงที่
3. กำหนดค่า K_p หรือค่าอัตราขยายของตัวควบคุมเท่ากับ 1
4. ป้อนค่า T_i หรือเวลาปริพันธ์เท่ากับ 10 และ 20 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ปล่อน้ำเข้าสู่ระบบ สังเกตการทำงานของวาล์วควบคุม ระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลง พร้อม
ทั้งบันทึกผลการทดลอง

ผลการทดลองที่ 8

ตารางที่ 4.12 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์

เมื่อกำหนดระดับเซตพอยท์ ที่ 10 เซนติเมตร, $K_{PI} = 1$ และ $T_i = 10$

เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)
1	1.453	22	9.248	43	11.2224	64	10.3438
2	1.302	23	9.1536	44	11.0696	65	10.0382
3	1.604	24	9.6728	45	10.4584	66	10.4966
4	1.9815	25	9.72	46	10.2292	67	10.6876
5	2.359	26	10.0382	47	10.2674	68	10.191
6	3.416	27	10.5348	48	9.8616	69	10.191
7	3.869	28	10.9168	49	9.9088	70	10.0382
8	4.3975	29	11.2606	50	10.1528	71	9.9088
9	4.8505	30	11.146	51	10.1528	72	10.191
10	4.775	31	11.0696	52	10.5348	73	10.1528
11	5.5664	32	11.0696	53	10.573	74	10.3056
12	5.944	33	10.8786	54	10.3438	75	10.382
13	6.0384	34	10.9168	55	10.1146	76	10.3438
14	6.6992	35	10.955	56	10.191	77	10.191
15	6.6048	36	10.8022	57	10.382	78	10.573
16	6.9824	37	10.9168	58	10.2674	79	10.7258
17	7.6904	38	10.9932	59	10.1146	80	10.7258
18	7.8792	39	10.8404	60	10.0382	81	10.5348
19	7.5016	40	10.4966	61	10	82	10.1528
20	7.6432	41	10.1528	62	9.956	83	10.382
21	8.9176	42	10.8022	63	10.573	84	10.1528

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์
เมื่อกำหนดระดับเซตพอยท์ที่ 10 เซนติเมตร, $K_{PI} = 1$ และ $T_i = 10$ (ต่อ)

เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)
85	10.7258	93	10.1146	101	10.9932	109	10.382
86	10.8404	94	9.9088	102	11.0314	110	10.6112
87	10.3438	95	9.6728	103	10.4202	111	10.4966
88	10.191	96	9.956	104	10.3056	112	10.3438
89	10.0382	97	10.8404	105	10.5348	113	10.5348
90	9.956	98	11.1078	106	10.382	114	10.4966
91	10	99	10.9932	107	10.2292	115	10.4202
92	10.2292	100	10.8786	108	10.0382	116	10.382

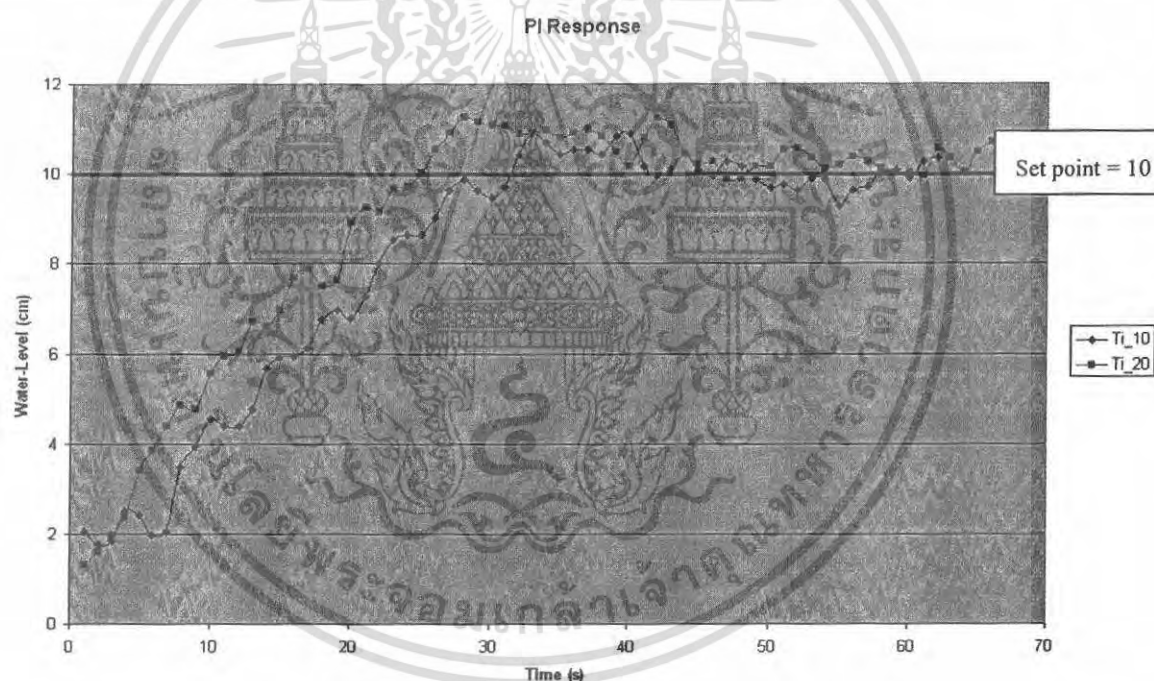
ตารางที่ 4.13 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์
เมื่อกำหนดระดับเซตพอยท์ที่ 10 เซนติเมตร, $K_{PI} = 1$ และ $T_i = 20$

เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)
1	1.755	11	4.3975	21	8.0208	31	10.4202
2	1.8305	12	4.775	22	8.54	32	10.8786
3	2.51	13	5.6608	23	8.6344	33	10.6876
4	2.4345	14	5.8968	24	8.6344	34	10.4202
5	1.9815	15	5.944	25	9.012	35	10.5348
6	2.057	16	6.1328	26	9.6256	36	10.5348
7	3.4915	17	6.7464	27	9.8616	37	10.4202
8	3.9445	18	6.9824	28	9.6256	38	10.8404
9	4.5485	19	6.7936	29	9.484	39	10.8786
10	4.3975	20	7.2656	30	9.72	40	10.1528

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์
เมื่อกำหนดระดับเซตพอยท์ที่ 10 เซนติเมตร, $K_p = 1$, $T_i = 20$ (ต่อ)

เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)
41	9.956	46	10.1528	51	9.9088	56	10.0382
42	10.1146	47	9.8616	52	9.8616	57	10.0764
43	10.4584	48	10.2674	53	9.2952	58	9.9088
44	10.0764	49	9.7672	54	9.6256	59	10.2674
45	9.956	50	9.6256	55	9.72	60	10.3438



รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบผลตอบสนองที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์ค่าต่างๆ เมื่อ $K_p = 1$

กราฟผลตอบสนองดังรูปที่ 4.7 กำหนดค่าเซตพอยท์ที่ระดับ 10 เซนติเมตร ค่าอัตราขยายสัดส่วน (K_p) เท่ากับ 1 จะเห็นได้ว่าที่ค่าคงที่เวลาปริพันธ์ (T_i) เท่ากับ 20 ให้ผลตอบสนองเร็วกว่าค่าคงที่เวลาปริพันธ์ (T_i) เท่ากับ 10

การทดลองที่ 9 ผลตอบสนองของระบบป้อนกลับอัตโนมัติ ที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วนร่วม ปริพันธ์

ทำการหาค่าอัตราขยายแบบสัดส่วนและค่าคงที่เวลาปริพันธ์ โดยใช้หลักการปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีโพเซสรีแอคชันเคิร์ฟ (Process Reaction Curve) เมื่อค่าคงที่ของเวลา (Time Constant) เท่ากับ 20 วินาที และค่าเวลาไร้ผลตอบสนองเท่ากับ 4 วินาที ได้ค่าอัตราขยายแบบสัดส่วนสำหรับการควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์ (K_p) เท่ากับ 4.5 และค่าคงที่เวลาปริพันธ์ (T_i) เท่ากับ 13.3 วินาที

วิธีการทดลอง 9

1. ตั้งค่าวาล์วควบคุมการไหลของน้ำขาออกให้เปิดที่ 50%
2. ป้อนค่าระดับความสูงที่ 15 เซนติเมตรเป็นค่าที่ต้องการให้ระบบปฏิบัติการเพื่อเข้าสู่ระดับดังกล่าวและรักษาระดับให้คงที่
3. กำหนดค่า K_p หรือค่าอัตราขยายของตัวควบคุมเท่ากับ 4.5
4. ป้อนค่า T_i หรือเวลาปริพันธ์เท่ากับ 5, 13.3 และ 20 ตามลำดับ
5. ปลดปล่อยน้ำเข้าสู่ระบบ สังเกตการทำงานของวาล์วควบคุม ระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลง พร้อมทั้งบันทึกผลการทดลอง

ผลการทดลองที่ 9

ตารางที่ 4.14 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์
เมื่อกำหนดระดับเซตพอยท์ ที่ 15 เซนติเมตร, $K_p = 4.5$ และ $T_i = 5$

เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)
0	0	8	1.906	16	6.5576	24	9.2008
1	0.396	9	3.1895	17	7.2184	25	9.1536
2	0.1695	10	4.02	18	7.4072	26	10.2674
3	0.9245	11	4.5485	19	7.5488	27	10.5348
4	1	12	5.3304	20	8.2096	28	10.573
5	1.0755	13	5.7552	21	8.4456	29	10.8786
6	1.453	14	6.0384	22	8.776	30	11.1078
7	1.0755	15	6.0856	23	9.012	31	11.3752

ตารางที่ 4.14 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์
เมื่อกำหนดระดับเซ็ตพอยท์ ที่ 15 เซนติเมตร, $K_p = 4.5$ และ $T_i = 5$ (ต่อ)

เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)
32	11.91	56	14.3548	80	15.3172	104	14.775
33	12.101	57	14.1638	81	14.6222	105	14.8896
34	11.8336	58	14.2784	82	14.4312	106	14.775
35	12.5594	59	14.4694	83	14.4694	107	14.5458
36	12.8268	60	14.6604	84	14.5458	108	14.393
37	12.9032	61	14.9278	85	14.584	109	14.2402
38	12.9032	62	15.3172	86	14.7368	110	14.2402
39	13.0178	63	15.3172	87	15.0793	111	14.3548
40	13.3998	64	15.5551	88	14.9278	112	14.6222
41	13.6672	65	15.5551	89	14.775	113	14.775
42	14.1256	66	15.1586	90	14.7368	114	15.2379
43	14.775	67	14.966	91	14.7368	115	15.793
44	14.9278	68	14.7368	92	14.8132	116	15.3172
45	15.5551	69	14.3548	93	14.6986	117	15.3172
46	15.7137	70	15.5551	94	14.4694	118	15.5551
47	15.0793	71	14.8896	95	14.7368	119	14.775
48	16.0309	72	14.966	96	14.775	120	14.5076
49	16.7446	73	14.8514	97	14.584	121	14.5076
50	15.9516	74	14.9278	98	14.8514	122	14.8514
51	15.6344	75	15.0793	99	15	123	15.3172
52	15.2379	76	15.5551	100	14.7368	124	15
53	14.9278	77	15.9516	101	14.8896	125	14.8514
54	14.8132	78	15.7137	102	15.0793	126	14.584
55	14.775	79	15.2379	103	14.775	127	14.6222

ตารางที่ 4.14 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์
เมื่อกำหนดระดับเซตพอยท์ที่ 15 เซนติเมตร, $K_p = 4.5$ และ $T_i = 5$ (ต่อ)

เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)
128	14.6604	146	15.1586	164	14.4312	182	14.4694
129	14.775	147	14.966	165	14.5076	183	14.5076
130	15.1586	148	14.8514	166	14.6222	184	14.7368
131	15.3172	149	14.8896	167	14.2402	185	14.6986
132	14.966	150	15.0793	168	14.8896	186	15
133	15.5551	151	14.6986	169	15.1586	187	15.1586
134	15.2379	152	14.8896	170	16.0309	188	15.8723
135	14.8514	153	14.775	171	15.9516	189	15.5551
136	15.0793	154	14.9278	172	16.0309	190	15.6344
137	14.966	155	15.0793	173	15.3965	191	15.8723
138	14.775	156	15.1586	174	14.8896	192	15.7137
139	14.5076	157	15.2379	175	14.8132	193	15.3172
140	14.2784	158	14.966	176	15.1586	194	14.966
141	14.584	159	15.2379	177	15	195	15.3965
142	14.6986	160	14.7368	178	14.6986	196	15.3965
143	14.7368	161	14.5076	179	14.393	197	15.3965
144	15.2379	162	14.5458	180	14.3166	198	15.1586
145	15.2379	163	14.5458	181	14.4312	199	14.6986

ตารางที่ 4.15 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์
เมื่อกำหนดระดับเซตพอยท์ที่ 15 เซนติเมตร, $K_p = 4.5$, $T_i = 13.33$

เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)
0	0	1	0.9245	2	1	3	1.5285

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.15 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์

เมื่อกำหนดระดับเซตพอยท์ที่ 15.4 เซนติเมตร, $K_p = 4.5$ และ $T_i = 13.33$ (ต่อ)

เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)
4	1.8305	29	10.9932	54	16.0309	79	14.5458
5	2.359	30	11.146	55	15.4758	80	14.393
6	2.4345	31	11.4134	56	15.2379	81	14.3166
7	2.51	32	11.6808	57	15.0793	82	14.2402
8	3.416	33	12.2156	58	14.8132	83	14.3548
9	4.3975	34	12.483	59	14.584	84	14.584
10	4.8505	35	12.4066	60	14.4312	85	14.775
11	5.0472	36	13.0178	61	14.2784	86	14.584
12	5.4248	37	13.629	62	14.2402	87	14.584
13	6.0856	38	13.4762	63	14.3548	88	14.6604
14	6.5104	39	13.5144	64	14.5076	89	14.775
15	6.416	40	13.8582	65	14.5458	90	14.6986
16	6.652	41	14.3548	66	14.5458	91	14.8132
17	7.1712	42	14.5076	67	14.5076	92	14.584
18	7.2184	43	14.4694	68	14.6222	93	14.2784
19	7.596	44	14.584	69	14.7368	94	14.202
20	8.776	45	14.6222	70	15.0793	95	14.202
21	9.248	46	14.5458	71	14.7368	96	14.393
22	9.5784	47	14.4312	72	14.7368	97	14.775
23	10	48	14.1256	73	15.4758	98	14.8896
24	10.0764	49	14.0492	74	14.584	99	14.8132
25	10.1528	50	14.3166	75	14.6604	100	14.6604
26	10.2292	51	14.3548	76	14.6604	101	14.775
27	10.2292	52	14.775	77	14.584	102	14.8132
28	10.4966	53	16.2688	78	14.6222	103	14.6986

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.15 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์
เมื่อกำหนดระดับเซตพอยท์ที่ 15.4 เซนติเมตร, $K_p = 4.5$ และ $T_i = 13.33$ (ต่อ)

เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)
104	14.6222	128	14.1638	152	14.5458	176	14.3166
105	14.202	129	14.1256	153	14.6986	177	14.1638
106	14.0874	130	14.4312	154	14.6222	178	14.2402
107	13.8582	131	14.6222	155	14.3548	179	14.5076
108	13.8582	132	14.8896	156	14.5458	180	14.6604
109	14.7368	133	14.7368	157	14.3548	181	14.6986
110	15.1586	134	14.6222	158	14.0492	182	14.6604
111	15.3172	135	14.5076	159	14.5458	183	14.7368
112	14.9278	136	15.3965	160	14.9278	184	14.6986
113	15.2379	137	14.8514	161	14.9278	185	14.6986
114	15.3172	138	14.966	162	15.3172	186	14.5076
115	15.0793	139	14.8896	163	14.8514	187	14.584
116	14.9278	140	14.5458	164	14.6222	188	14.3548
117	14.7368	141	14.4694	165	14.5076	189	14.3548
118	14.5458	142	14.3548	166	14.5458	190	14.3548
119	14.5458	143	14.1256	167	14.2784	191	14.4694
120	14.6222	144	14.2784	168	14.3548	192	14.4312
121	14.8132	145	14.775	169	14.6986	193	14.2784
122	14.8896	146	14.6604	170	14.8896	194	14.202
123	14.8514	147	14.6604	171	14.5458	195	14.393
124	14.8514	148	14.4694	172	14.6986	196	14.5458
125	14.5458	149	14.5458	173	14.8132	197	14.775
126	14.011	150	14.8132	174	14.966	198	14.8896
127	14.011	151	14.775	175	14.6222	199	14.8896

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.16 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์
เมื่อกำหนดระดับเซตพอยท์ที่ 15.4 เซนติเมตร, $K_p = 4.5$ และ $T_i = 20$

เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)
0	0.9245	25	10.6112	50	14.4312	75	14.0492
1	1.2265	26	10.9932	51	14.5076	76	14.202
2	1.151	27	11.1842	52	14.6986	77	14.2784
3	1.151	28	11.0314	53	14.4694	78	14.4694
4	1.755	29	11.4898	54	14.3166	79	14.7368
5	2.812	30	11.7954	55	14.202	80	14.5076
6	2.812	31	11.7954	56	14.5458	81	14.6222
7	2.8875	32	12.1774	57	14.6222	82	14.3166
8	3.567	33	12.6358	58	14.3548	83	14.3166
9	5.2832	34	12.7504	59	14.2784	84	14.1638
10	5.708	35	12.9032	60	14.4312	85	14.2784
11	6.2272	36	13.1324	61	14.6986	86	14.4312
12	6.3688	37	13.3998	62	14.6604	87	14.5076
13	6.3688	38	13.5144	63	15	88	14.4312
14	6.7464	39	13.8582	64	14.775	89	14.5458
15	6.7936	40	14.2402	65	14.2402	90	14.6604
16	6.8408	41	14.2402	66	14.393	91	14.7368
17	7.4544	42	14.4694	67	14.393	92	14.8132
18	7.832	43	14.6222	68	14.4694	93	14.5458
19	8.2096	44	14.3548	69	14.5458	94	14.584
20	8.4928	45	14.393	70	14.6604	95	14.5076
21	8.9176	46	14.2402	71	14.5458	96	14.5076
22	9.5312	47	14.2402	72	14.4312	97	14.6222
23	9.5784	48	14.202	73	14.4694	98	14.6986
24	9.8144	49	14.3548	74	14.1638	99	14.7368

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

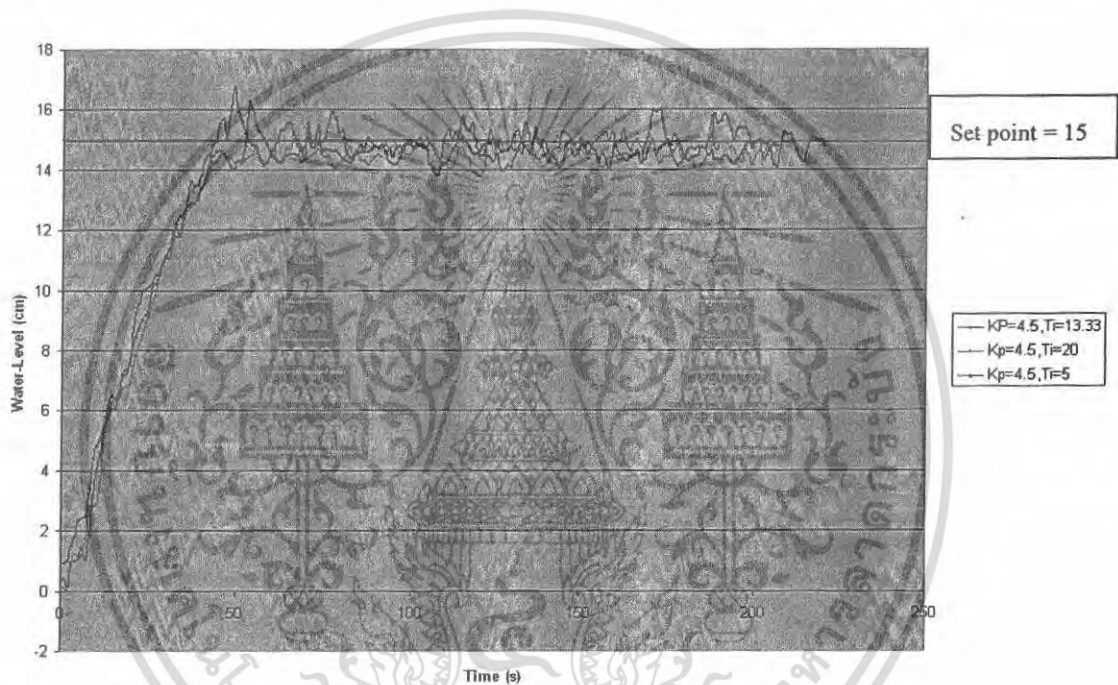
ตารางที่ 4.16 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์
เมื่อกำหนดระดับเซตพอยท์ที่ 15.4 เซนติเมตร, $K_p = 4.5$ และ $T_i = 20$ (ต่อ)

เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)
100	14.8896	124	14.6222	147	14.5458	172	14.4694
101	15.0793	125	14.584	149	14.3548	173	14.584
102	14.8132	126	14.6986	150	14.5076	174	14.775
103	14.9278	127	14.6222	151	14.5076	175	14.4312
104	14.6604	128	14.6986	152	14.2784	176	14.3548
105	14.3548	129	14.5458	153	14.0874	177	14.5458
106	14.1256	130	14.6986	154	14.202	178	14.4312
107	14.202	131	14.775	155	14.393	179	14.0874
108	14.0492	132	14.6604	156	14.4312	180	13.9728
109	14.0492	133	14.5076	157	14.4312	181	14.1638
110	14.3166	134	14.3548	158	14.3166	182	14.3166
111	14.6604	135	14.4694	159	14.393	183	15.0793
112	14.6986	136	14.5458	160	14.2784	184	15.793
113	14.4694	137	14.393	161	14.5076	185	14.775
114	14.393	138	14.202	162	14.8896	186	14.6222
115	13.9346	139	14.202	163	15	187	14.8514
116	13.8964	140	14.0492	164	14.6986	188	14.8896
117	13.7818	141	14.0874	165	14.6604	189	14.8514
118	13.9728	142	14.5076	166	15.0793	190	14.6986
119	14.4694	143	14.8132	167	14.966	191	14.6604
120	14.393	144	14.8132	168	14.4694	192	14.393
121	14.2784	145	14.775	169	14.2402	193	14.2402
122	14.7368	146	14.6222	170	14.4312	194	14.6222
123	15	147	14.6222	171	14.4312	195	14.5076

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.16 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์
เมื่อกำหนดระดับเซตพอยท์ที่ 15 เซนติเมตร, $K_p = 4.5$ และ $T_i = 20$ (ต่อ)

เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)
196	14.5638	197	14.4694	198	14.584	199	14.6222



รูปที่ 4.8 กราฟผลตอบสนองที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์ค่าต่างๆ เมื่อ $K_p = 4.5$

พิจารณากราฟรูปที่ 4.8 ที่ได้จากการทดลอง เมื่อกำหนดให้ระดับที่ต้องการอยู่ที่ 15 เซนติเมตรและค่าอัตราขยายสัดส่วน (K_p) เท่ากับ 4.5 จะเห็นได้ว่าที่ค่าคงที่เวลาปริพันธ์ (T_i) เท่ากับ 5 วินาทีให้ผลตอบสนองที่เกิดค่าเกิน (Overshoot) สูงที่สุด และมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าคงที่เวลาปริพันธ์สูงขึ้น ซึ่งผลตอบสนองของระบบที่มีการควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์นี้สามารถเข้าสู่ระดับเซตพอยท์ที่ตั้งไว้ได้โดยไม่มีค่าความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น

การทดลองที่ 10 ผลตอบสนองของระบบป้อนกลับอัตโนมัติ ที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์และอนุพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการหาค่าอัตราขยายแบบสัดส่วนและค่าคงที่เวลาปริพันธ์ โดยใช้หลักการปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีโพสเซรีแอคชันเคิร์ฟ (Process Reaction Curve) เมื่อค่าคงที่ของเวลา (Time Constant) เท่ากับ 20 วินาที และค่าเวลาไร้ผลตอบสนองเท่ากับ 4 วินาทีได้ค่าอัตราขยายแบบสัดส่วนสำหรับใช้เป็นพารามิเตอร์ในการควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์และอนุพันธ์ (K_p) เท่ากับ 6, ค่าคงที่เวลาปริพันธ์ (T_i) เท่ากับ 8 วินาที และค่าคงที่เวลาอนุพันธ์ (T_d) เท่ากับ 2 วินาที

วิธีการทดลอง 10

1. ตั้งค่าวาล์วควบคุมการไหลของน้ำขาออกให้เปิดที่ 50%
2. ป้อนค่าระดับความสูงที่ 15 เซนติเมตรเป็นค่าที่ต้องการให้ระบบปฏิบัติการเพื่อเข้าสู่ระดับดังกล่าวและรักษาระดับให้คงที่
3. กำหนดค่า K_p หรือค่าอัตราขยายของตัวควบคุมเท่ากับ 6
4. ป้อนค่า T_i หรือเวลาปริพันธ์เท่ากับ 8
5. ป้อนค่า T_d หรือเวลาอนุพันธ์เท่ากับ 2
6. ปลดอยน้ำเข้าสู่ระบบ สังเกตการทำงานของวาล์วควบคุม ระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลง พร้อมทั้งบันทึกผลการทดลอง

ผลการทดลองที่ 10

ตารางที่ 4.17 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์และอนุพันธ์ เมื่อกำหนดระดับเซตพอยท์ ที่ 15 เซนติเมตร, $K_p = 6$, $T_i = 8$ และ $T_d = 2$

เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)
0	0	8	2.661	16	5.6136	24	7.7376
1	0.7735	9	2.51	17	5.708	25	8.2568
2	1.0755	10	1.9815	18	6.3216	26	8.8704
3	0.9245	11	1.9815	19	6.5576	27	9.1064
4	1.151	12	3.265	20	6.5576	28	9.5784
5	1.151	13	4.6995	21	6.7936	29	10.0382
6	1.3775	14	5.472	22	7.5488	30	10.4202
7	2.359	15	5.8968	23	7.7376	31	10.573

ตารางที่ 4.17 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์และ

อนุพันธ์ เมื่อกำหนดระดับเซตพอยท์ ที่ 15 ซม., $K_{PID} = 6$, $T_i = 8$ และ $T_d = 2$ (ต่อ)

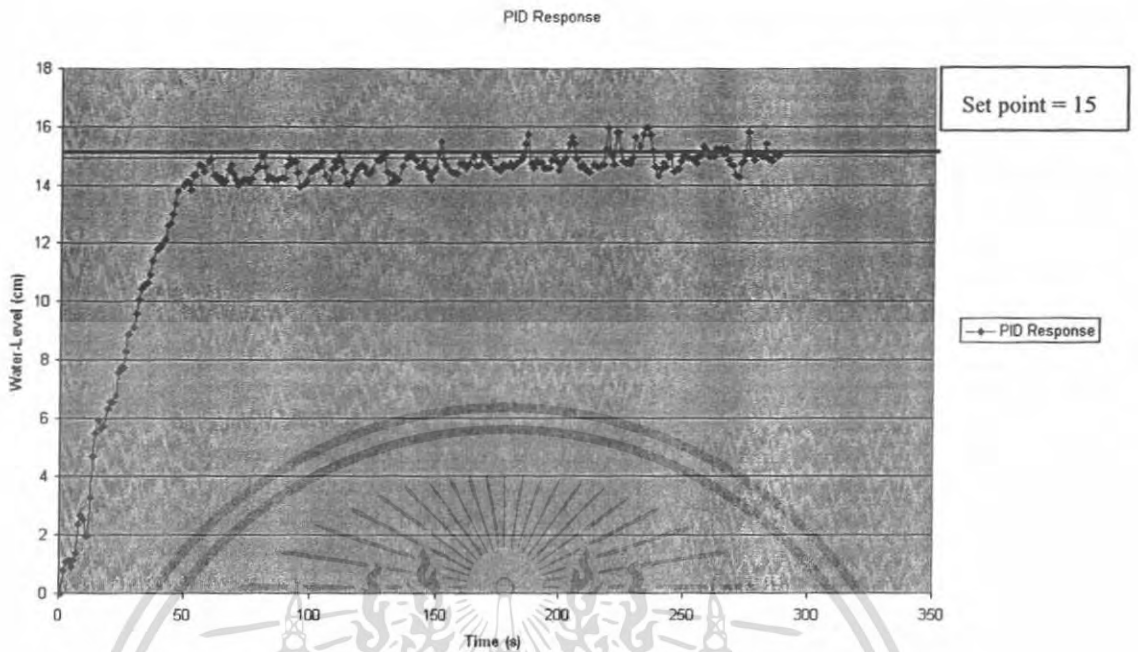
เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)
32	10.6494	55	14.3548	78	14.1638	101	14.9278
33	10.9168	56	14.3548	79	14.1638	102	14.775
34	11.3752	57	14.1638	80	14.2402	103	14.4694
35	11.7954	58	14.202	81	14.202	104	14.0492
36	11.8336	59	14.0492	82	14.6604	105	14.011
37	11.9482	60	14.1256	83	14.8896	106	14.0874
38	12.1392	61	14.5458	84	14.775	107	14.3548
39	12.5976	62	14.6986	85	14.8132	108	14.5458
40	12.674	63	14.393	86	14.4312	109	14.6604
41	12.9796	64	14.1638	87	13.9346	110	14.6986
42	13.3616	65	13.9728	88	14.011	111	14.6222
43	13.7818	66	14.0492	89	14.1256	112	14.4312
44	13.9728	67	14.1638	90	14.4694	113	14.393
45	14.0874	68	14.1638	91	14.5076	114	14.5076
46	14.0874	69	14.0874	92	14.6222	115	14.8514
47	13.82	70	14.202	93	14.584	116	14.8514
48	14.3548	71	14.5458	94	14.6986	117	15
49	14.3548	72	14.6604	95	14.8132	118	15.0793
50	14.6986	73	15	96	14.3548	119	14.4694
51	14.6604	74	14.6222	97	14.1256	120	14.0492
52	14.4694	75	14.1638	98	14.5458	121	14.3548
53	14.8132	76	14.3166	99	14.8132	122	14.1638
54	14.8896	77	14.202	100	14.6222	123	14.1638

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

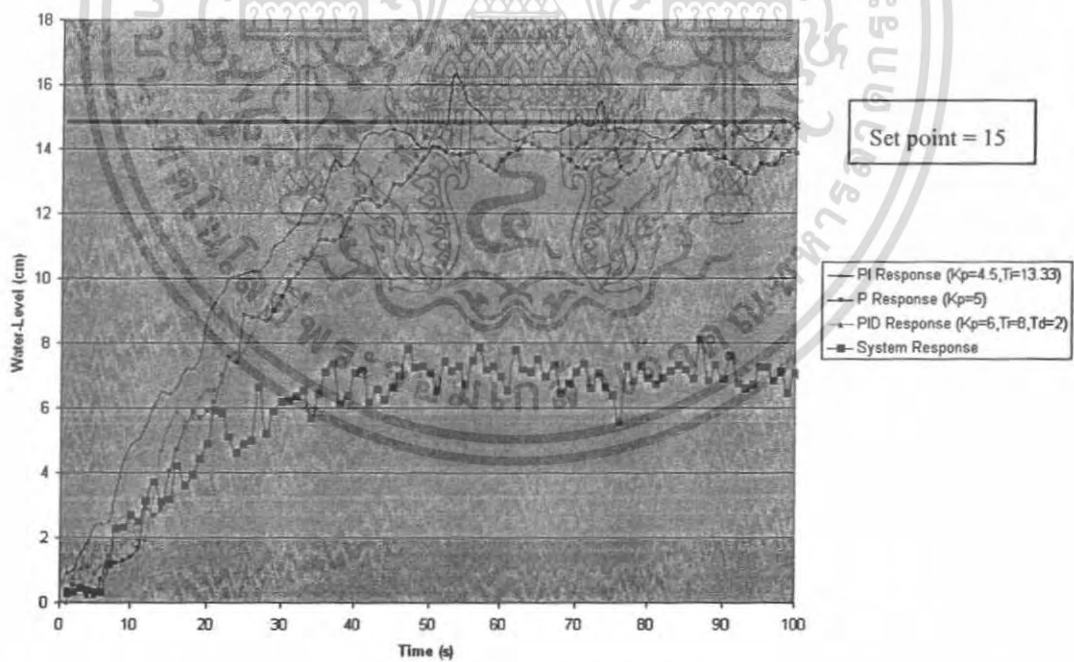
ตารางที่ 4.17 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์และอนุพันธ์เมื่อกำหนดระดับเซ็ตพอยท์ ที่ 15 ซม., $K_{PID} = 6$, $T_i = 8$ และ $T_d = 2$ (ต่อ)

เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)	เวลา (s)	ระดับน้ำ (cm)
124	14.6604	143	14.966	162	14.584	181	14.6986
125	14.9278	144	14.775	163	14.8514	182	15.2379
126	14.966	145	14.584	164	15.0793	183	15
127	15	146	14.5458	165	14.8132	184	14.6986
128	14.9278	147	14.5076	166	14.7368	185	15.793
129	14.8514	148	14.6986	167	14.8896	186	15.793
130	14.6222	149	14.7368	168	15.3965	187	15.1586
131	14.6222	150	14.6222	169	15.6344	188	14.8132
132	14.393	151	14.7368	170	15.3965	189	14.7368
133	14.7368	152	14.8514	171	14.6986	190	14.775
134	14.7368	153	14.966	172	14.5458	191	14.7368
135	14.7368	154	15.3965	173	14.5076	192	14.9278
136	14.584	155	15.7137	174	14.4312	193	15.6344
137	14.7368	156	14.7368	175	14.6986	194	15.3172
138	14.966	157	14.584	176	14.6222	195	15.7137
139	14.6604	158	14.8132	177	14.8896	196	15.9516
140	14.6986	159	14.775	178	14.6222	197	15.9516
141	15	160	14.775	179	14.6222	198	15.7137
142	14.9278	161	14.584	180	14.6986	199	15.1586

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 กราฟผลตอบสนองที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์และอนุพันธ์



รูปที่ 4.10 กราฟเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบธรรมดาและระบบที่ควบคุมแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟแสดงผลตอบสนองของระบบที่ใช้การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์และอนุพันธ์ดังรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 แสดงเห็นว่าค่าอัตราขยายแบบสัดส่วน ค่าเวลาปริพันธ์ และค่าเวลาอนุพันธ์ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ของการควบคุมแบบพีไอดี ช่วยให้ระบบสามารถดำเนินการเพื่อให้ผลตอบสนองเข้าสู่ระดับที่ต้องการ(Set point)ได้ เนื่องจากการทำงานของส่วนควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Control) ทำให้ผลตอบสนองเข้าใกล้ระดับที่ต้องการเพิ่มขึ้น โดยช่วยลดค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ให้น้อยลง ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวสามารถกำจัดให้หมดไปได้โดยการทำงานของส่วนปริพันธ์ (Integral Control) แต่จะมีผลกระทบต่อผลตอบสนองของระบบโดยทำให้เกิดค่าเกิน (Overshoot) ในช่วงแรกและผลตอบสนองของระบบเข้าสู่ระดับที่ต้องการช้าลง ผลกระทบดังกล่าวถูกแก้ไขโดยส่วนควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative control) ดังนั้นการทำงานของระบบที่มีการควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์และอนุพันธ์จะช่วยให้ผลตอบสนองเข้าสู่ระดับที่ต้องการได้ดีที่สุด



บทที่ 5

บทวิจารณ์และสรุปผล

5.1 สรุปผล

1. หลังจากการออกแบบและวางเค้าโครงทั้งหมดของชุดปฏิบัติการขบวนการแล้ว จะเห็นว่าสามารถแยกส่วนประกอบได้เป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นหลักการและทฤษฎีที่นำมาใช้ในการประมวลผล ส่วนที่เป็นโครงสร้างทางกลของระบบและอุปกรณ์ต่างๆ ที่จะนำมาใช้ในการรับและส่งค่ารวมถึงควบคุมการทำงานของระบบ ส่วนสุดท้ายเป็นส่วนที่เกี่ยวข้องกับการแสดงผลและติดต่อระหว่างผู้ใช้งานและคอนโทรลเลอร์

2. เมื่อทำการศึกษาทฤษฎีและการทำงานของส่วนต่างๆ ของระบบแล้ว จะเห็นว่าในส่วนของการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุม ได้เลือกใช้วิธีโพรเซสรีแอคทีฟ (Process Reactive Curve) เนื่องจากผลตอบสนองของระบบที่ได้จากกระบวนการ เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได โดยที่ระบบไม่ได้ต่อร่วมกับตัวควบคุมนั้น มีลักษณะเป็นรูปตัว S ซึ่งวิธีดังกล่าวเหมาะสมกับระบบระดับของเหลวที่ใช้ในงานนี้

3. ในการออกแบบนั้น เลือกใช้โปรแกรมวิซวลเบสิกในการติดต่อระหว่างผู้ใช้และไม่โครคอนโทรลเลอร์โดยเลือกใช้ภาษาซีในการประมวลผลของไมโครคอนโทรลเลอร์และในการรับ-ส่งค่าควบคุมวงจร เนื่องจากมีความสะดวกต่อการใช้งานและมีความรวดเร็วเป็นที่น่าพอใจ การออกแบบในส่วนการวัดอัตราการไหลของของเหลวได้เลือกใช้ปรากฏการณ์ฮอลล์เพื่อส่งค่าพัลส์เพื่อความสะดวกในการประมวลผล เลือกใช้เซอร์โวมอเตอร์ในการควบคุมวาล์วเพื่อควบคุมปริมาณการไหลของของเหลว และทรานสดิวเซอร์ความดันในการหาระดับของเหลว

4. จากการทดลองจะเห็นได้ว่า โปรแกรมวิซวลเบสิกที่ใช้ในการควบคุมและแสดงค่าสามารถทำงานติดต่อไมโครคอนโทรลเลอร์ได้เป็นอย่างดี และเมื่อเราทดลองการทำงานโดยใช้การควบคุมแบบสัดส่วน เมื่อเพิ่มค่าอัตราขยายสัดส่วนให้กับตัวควบคุมมากขึ้น จะทำให้ผลตอบสนองของระบบเข้าใกล้ระดับที่กำหนดไว้แต่ไม่สามารถถึงระดับดังกล่าว เมื่อเพิ่มการควบคุมแบบปริพันธ์ผลตอบสนองสามารถเข้าสู่ระดับของเหลวที่กำหนดแต่จะเกิดการแกว่งและระบบเข้าสู่ระดับที่กำหนดช้า และเมื่อเพิ่มการควบคุมแบบอนุพันธ์จะทำให้ผลตอบสนองเข้าสู่ระดับที่กำหนดและทำให้การทำงานของระบบเร็วขึ้นได้

5.2 ปัญหาที่พบและแนวทางแก้ไข

1. ในการออกแบบและวางเค้าโครงของระบบนั้น ได้วางขอบข่ายที่กว้างเกินกว่าความจำเป็นทำให้ต้องเสียเวลาในการศึกษามากและเกินกว่าที่ต้องใช้งานจริง จึงได้จำกัดขอบเขตให้ชัดเจนและครอบคลุมเนื้อหาให้มากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การออกแบบ โครงสร้างทางกลนั้นมีความยากลำบากในการเลือกใช้วัสดุ เนื่องจากงบประมาณที่มีจำกัด และขนาดของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ยากต่อการจัดวาง
3. ในช่วงแรกเลือกใช้วาล์วน้ำมีทางให้น้ำออกขนาดเล็กถึงแม้จะเปิดเต็มที่แล้วก็ตาม ซึ่งเปรียบเหมือนการเพิ่มความต้านทานเข้าไปในระบบ จึงควรเลือกวาล์วที่ไม่กั้นทางการเดินของน้ำ
4. เพียงตามที่ใช้การควบคุมวาล์วมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กเกินไป จึงต้องใช้แรงในการขับเคลื่อนสูงและความละเอียดในการควบคุมต่ำ จึงควรเลือกเพียงตามที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อให้ใช้แรงน้อยลงและการควบคุมละเอียดยิ่งขึ้น
5. เส้นทางการไหลของน้ำยาวเกินไปทำให้แรงดันของน้ำลดลงก่อนเข้าระบบ ดังนั้นควรคำนึงถึงระยะทางเดินของน้ำให้สัมพันธ์กับขนาดของปั้มน้ำ เพื่อให้แรงดันเพียงพอต่อการทำงานของระบบ
6. สายที่ใช้ในการส่งผ่านความดันไปยังทรานดิวเซอร์ความดันมีความยืดหยุ่นมาก ทำให้เกิดการสูญเสียความดันภายในท่อ จึงควรเลือกใช้ท่อที่มีความยืดหยุ่นน้อย เช่น ท่อที่ทำจากอะลูมิเนียม
7. เอาท์พุทจากทรานดิวเซอร์วัดความดันมีช่วงการเปลี่ยนแปลงน้อย ซึ่งยากต่อการนำมาใช้งาน ดังนั้น ควรทำการขยายช่วงการเปลี่ยนแปลงด้วยวงจรซีโร-สเปกก่อนส่งค่าไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์
8. เนื่องจากถังน้ำที่ทำการออกแบบมีข้อจำกัดในเรื่องขนาด จึงทำให้เกิดปัญหาในการทดลองระบบควบคุมสัดส่วนร่วมปริพันธ์ที่ได้เพียงระดับของเหลวอ้างอิงที่ไม่สูงมากนักเท่านั้น ซึ่งหากต้องการทดลองในระดับอ้างอิงที่สูงขึ้นควรทำขนาดถังให้สูงเพิ่มขึ้น

5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการค้นคว้าพัฒนา

เครื่องมือวัดอัตราการไหลของเหลวและเครื่องมือที่ใช้ในการวัดความสูงของถัง ในปัจจุบันมีหลายชนิด ซึ่งควรทำการศึกษาเพิ่มเติมให้มีความเหมาะสม คัดแปลงหรือเลือกใช้เครื่องมือวัดชนิดอื่นเพื่อให้สามารถใช้งานได้อย่างแม่นยำมากยิ่งขึ้นและลดความผิดพลาดให้น้อยลง

นอกจากนี้ ระบบที่ใช้ในการทดลองนั้นจากเดิมที่เป็นชุดทดลองเพียงถังเดียว ควรเพิ่มเติมระบบที่เกี่ยวข้องกับระดับของเหลวที่มีปฏิริยาซึ่งกันและกัน เช่น ถังทดลองสองถังเชื่อมต่อกัน เพื่อศึกษาและทำความเข้าใจในระบบที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ได้เป็นอย่างดี และสามารถพัฒนาในส่วนของารติดต่อกันระหว่างผู้ใช้งานและไมโครคอนโทรลเลอร์ให้สามารถทำงานได้จากที่ต่างๆ เพื่อเพิ่มความสะดวกและง่ายต่อการใช้งานยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรวุฒิ เฉลิมมีกุล, กฤษณะ พุทธิขจร, “การออกแบบและการสร้างชุดทดลองการควบคุมระดับน้ำและอัตราการไหล,” ปรินญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2546.
- [2] ฐานิต สรรพสังเกศ, สิทธิพล ปิ่นสุข, “แขนกลตีม้องวงใหญ่,” ปรินญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548.
- [3] ประจัน พลังสันติกุล, เรียนรู้และใช้งาน CCS C คอมไพเลอร์ เขียนโปรแกรมภาษา C ควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC, พิมพ์ครั้งที่1, กรุงเทพฯ : อินโนเวตีฟ เอ็กเพอริเมนต์. 2547.
- [4] นคร ภัคศิชาติ, ชัยวัฒน์ ลิ้มพรจิตรวิไล, คู่มือการทดลอง dsPIC Microcontroller เบื้องต้น ด้วยโปรแกรมภาษา C กับ MPLAB C30, พิมพ์ครั้งที่1, กรุงเทพฯ : อินโนเวตีฟ เอ็กเพอริเมนต์. 2547.
- [5] ฉัททวุฒิ พิษผล, พิชิต สันติกุลานนท์, พร้อมเลิศ หล่อวิจิตร, คู่มือเรียน Visual Basic 6 (ฉบับปรับปรุง), พิมพ์ครั้งที่2, กรุงเทพฯ : โปรวิชั่น 2547.
- [6] สัจจะ รุ่งรวีวร, คู่มือการเขียนโปรแกรมและใช้งาน Visual Basic 6.0, พิมพ์ครั้งที่1, กรุงเทพฯ : อินโฟเพรส. 2544.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

โปรแกรมการประมวลผลภาพและโปรแกรมควบคุม

โปรแกรมวิหวลเบสิก ซึ่งเขียนเพื่อใช้ในการเลือกระบบการควบคุมระดับของเหลวและตรวจสอบระดับของเหลวรวมถึงอัตราการไหลของของเหลว ประกอบด้วย หน้าต่างเชื่อมต่อกับผู้ใช้(Graphical User Interface) ดังรูปที่ ก.1 และโค้ดโปรแกรม ดังต่อไปนี้

1. หน้าต่างเชื่อมต่อกับผู้ใช้

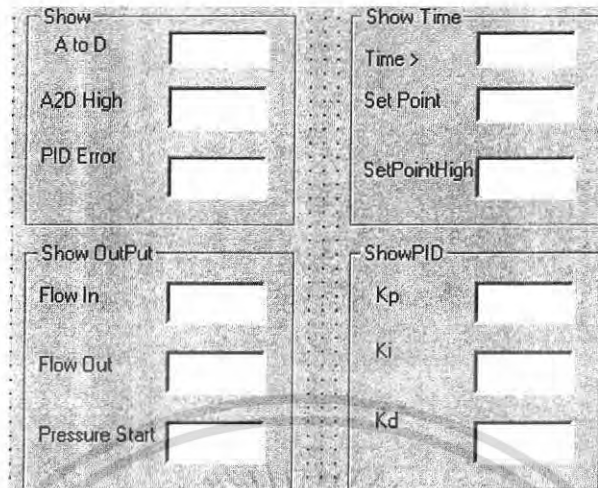
รูปที่ ก.1 หน้าต่างเชื่อมต่อกับผู้ใช้ใน โปรแกรมควบคุมและตรวจสอบระดับของเหลว

จากรูปที่ ก.1 ในส่วนของหน้าต่างเชื่อมต่อกับผู้ใช้นั้นจะแบ่งเป็นส่วนๆ ดังนี้

1. ส่วนแสดงค่าต่างๆ จากการทำงานของระบบควบคุมระดับของเหลว
2. ส่วนเลือกโหมดการทำงานของระบบควบคุมและระดับน้ำอ้างอิง
3. ส่วนใส่ค่าตัวควบคุมแบบต่างๆ และปุ่มควบคุมการทำงานของระบบ
4. ส่วนแสดงค่าและควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ และปุ่มสร้างกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ส่วนแสดงผลของโปรแกรมทดลอง



รูปที่ ก.2 ส่วนแสดงผลของโปรแกรมทดลอง

จากรูปที่ ก. 2 แสดงส่วนในการแสดงผลจากการทำงานของระบบควบคุมระดับของเหลว ซึ่งประกอบด้วย 4 ส่วนย่อย ดังนี้

1. ส่วนแสดงค่าแอนะล็อกเป็นอิจิตอลที่มาจากทรานสดิวเซอร์วัดความดัน ส่วนแสดงความสูงของระดับของเหลวและส่วนของค่าความผิดพลาด
2. ส่วนแสดงเวลา ค่าระดับของเหลวอ้างอิงทั้งแอนะล็อกเป็นอิจิตอลและความสูง
3. ส่วนแสดงอัตราการไหลทั้งขาเข้าและขาออก และความดันเมื่อเริ่มต้นการทำงาน
4. ส่วนแสดงค่าตัวควบคุมที่ทำงานอยู่ในขณะนั้น

- ส่วนเลือกโหมดการทำงานของระบบควบคุมและระดับน้ำอ้างอิง

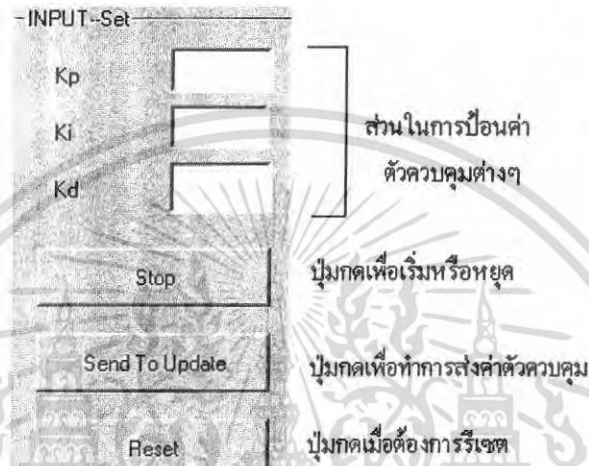


รูปที่ ก. 3 ส่วนเลือกโหมดการทำงานและระดับน้ำอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ ก. 3 ส่วนบนแสดงปุ่มเลือกโหมดการทำงานของระบบควบคุม โดยมี 3 ระบบคือ ระบบควบคุมแบบสัดส่วน(Proportional Control, P) ระบบควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์ (Proportional plus Integral Control, PI) ระบบควบคุมแบบสัดส่วนร่วมปริพันธ์และอนุพันธ์ (Proportional plus Integral and Derivative Control, PID)

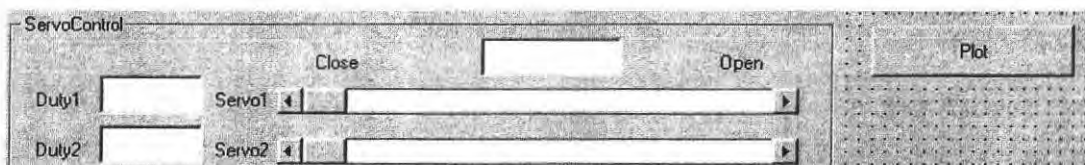
- ส่วนป้อนค่าตัวควบคุมแบบต่างๆ และปุ่มควบคุมการทำงานของระบบ



รูปที่ ก.4 ส่วนป้อนค่าตัวควบคุมและปุ่มควบคุมการทำงานของระบบ

จากรูปที่ ก.4 จะเห็นได้ว่า สามารถป้อนค่าตัวควบคุมได้ 3 ประเภท ที่ตัวควบคุมแบบสัดส่วน ตัวควบคุมแบบปริพันธ์ และตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ ด้านล่างจะเป็นปุ่มกดเพื่อให้เริ่มหรือสิ้นสุดการทำงาน ถัดมาเป็นส่วนของการส่งค่าตัวควบคุมต่างๆ เพื่อนำไปประมวลผล และส่วนสุดท้ายคือปุ่มรีเซ็ต เมื่อต้องการเริ่มการทำงานใหม่ซึ่งจะมีผลให้เวลาเริ่มต้นใหม่ด้วย

- ส่วนแสดงค่าและควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ และปุ่มสร้างกราฟ

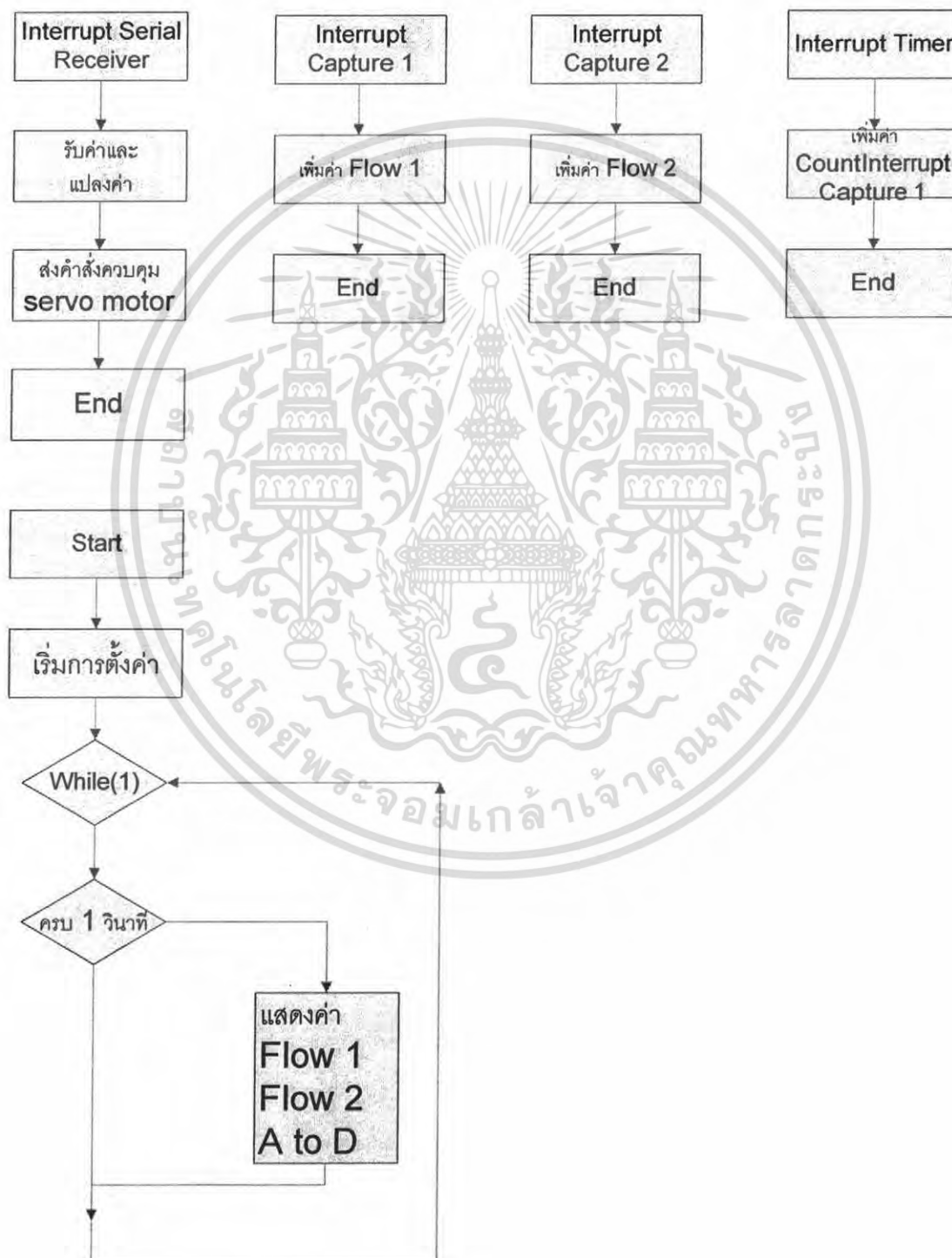


รูปที่ ก.5 ส่วนแสดงการทำงานและควบคุมเซอร์โว และปุ่มแสดงกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ ก.5 ส่วนควบคุมเซอร์โวมอเตอร์และแสดงค่าการทำงานซึ่งหากขณะนั้นยังไม่เริ่มการทำงานจะสามารถควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ได้ แต่เมื่อเริ่มการทำงานแล้วจะเป็นการแสดงผลการทำงานในขณะนั้น ด้านขวาจะเป็นส่วนของปุ่มกดเมื่อต้องการแสดงค่าการทำงานในรูปแบบกราฟ ซึ่งจะเปรียบเทียบระหว่างเวลาและระดับของเหลว

2. โฟลว์ชาร์ทการทำงานของโปรแกรมในไมโครคอนโทรลเลอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

เอกสารคู่มืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

ข.1 เอกสารคู่มือการใช้งาน dsPIC 30F2010

ไอซี dsPIC 30F2010 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการประมวลผลขนาด 8 บิต มีรายละเอียดต่างๆดังนี้



28-Pin dsPIC30F2010 Enhanced Flash 16-Bit Digital Signal Controller

<p>Note: This data sheet summarizes features of this group of dsPIC30F devices and is not intended to be a complete reference source. For more information on the CPU, peripherals, register descriptions and general device functionality, refer to the "dsPIC30F Family Reference Manual" (DS70046). For more information on the device instruction set and programming, refer to the "dsPIC30F/33F Programmer's Reference Manual" (DS70157).</p>	<p>Peripheral Features:</p> <ul style="list-style-type: none"> • High current sink/source I/O pins: 25 mA/25 mA • Three 16-bit timers/counters; optionally pair up 16-bit timers into 32-bit timer modules • Four 16-bit capture input functions • Two 16-bit compare/PWM output functions <ul style="list-style-type: none"> - Dual Compare mode available • 3-wire SPI modules (supports 4 Frame modes) • I²C™ module supports Multi-Master/Slave mode and 7-bit/10-bit addressing • Addressable UART modules with FIFO buffers
<p>High-Performance Modified RISC CPU:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Modified Harvard architecture • C compiler optimized instruction set architecture • 83 base instructions with flexible addressing modes • 24-bit wide instructions, 16-bit wide data path • 12 Kbytes on-chip Flash program space • 512 bytes on-chip data RAM • 1 Kbyte nonvolatile data EEPROM • 16 x 16-bit working register array • Up to 30 MIPs operation: <ul style="list-style-type: none"> - DC to 40 MHz external clock input - 4 MHz-10 MHz oscillator input with PLL active (4x, 8x, 16x) • 27 interrupt sources • Three external interrupt sources • 8 user-selectable priority levels for each interrupt • 4 processor exceptions and software traps 	<p>Motor Control PWM Module Features:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 6 PWM output channels <ul style="list-style-type: none"> - Complementary or Independent Output modes - Edge and Center-Aligned modes • 4 duty cycle generators • Dedicated time base with 4 modes • Programmable output polarity • Dead-time control for Complementary mode • Manual output control • Trigger for synchronized A/D conversions
<p>DSP Engine Features:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Modulo and Bit-Reversed modes • Two 40-bit wide accumulators with optional saturation logic • 17-bit x 17-bit single-cycle hardware fractional/integer multiplier • Single-cycle Multiply-Accumulate (MAC) operation • 40-stage Barrel Shifter • Dual data fetch 	<p>Quadrature Encoder Interface Module Features:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Phase A, Phase B and Index Pulse input • 16-bit up/down position counter • Count direction status • Position Measurement (x2 and x4) mode • Programmable digital noise filters on inputs • Alternate 16-bit Timer/Counter mode • Interrupt on position counter rollover/underflow <p>Analog Features:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 10-bit Analog-to-Digital Converter (ADC) with: <ul style="list-style-type: none"> - 1 Msps (for 10-bit A/D) conversion rate - Six input channels - Conversion available during Sleep and Idle • Programmable Brown-out Reset

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Digital Signal Controller Features:

- Enhanced Flash program memory:
 - 10,000 erase/write cycle (min.) for industrial temperature range, 100K (typical)
- Data EEPROM memory:
 - 100,000 erase/write cycle (min.) for industrial temperature range, 1M (typical)
- Self-reprogrammable under software control
- Power-on Reset (POR), Power-up Timer (PWRT) and Oscillator Start-up Timer (OST)
- Flexible Watchdog Timer (WDT) with on-chip low-power RC oscillator for reliable operation
- Fail-Safe clock monitor operation

- Detects clock failure and switches to on-chip low-power RC oscillator
- Programmable code protection
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) programming capability
- Selectable Power Management modes
 - Sleep, Idle and Alternate Clock modes

CMOS Technology:

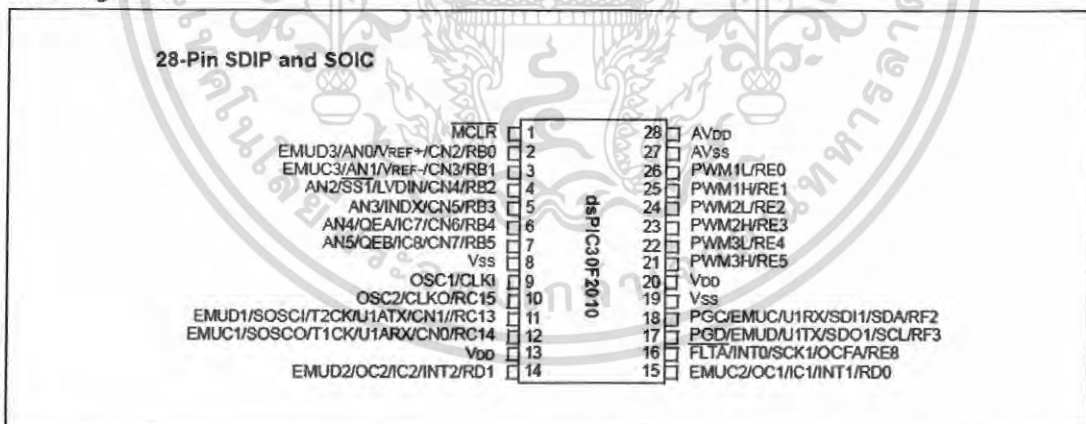
- Low-power, high-speed Flash technology
- Wide operating voltage range (2.5V to 5.5V)
- Industrial and Extended temperature ranges
- Low power consumption

dsPIC30F Motor Control and Power Conversion Family*

Device	Pins	Program Mem. Bytes/Instructions	SRAM Bytes	EEPROM Bytes	Timer 16-bit	Input Cap	Output Comp/Std PWM	Motor Control PWM	A/D 10-bit 1 Msps	Quad Enc	UART	SPI	IC™	CAN
dsPIC30F2010	28	12K/4K	512	1024	3	4	2	6 ch	6 ch	Yes	1	1	1	-
dsPIC30F3010	28	24K/8K	1024	1024	5	4	2	6 ch	6 ch	Yes	1	1	1	-
dsPIC30F4012	28	48K/16K	2048	1024	5	4	2	6 ch	6 ch	Yes	1	1	1	1
dsPIC30F3011	40/44	24K/8K	1024	1024	5	4	4	6 ch	9 ch	Yes	2	1	1	-
dsPIC30F4011	40/44	48K/16K	2048	1024	5	4	4	6 ch	9 ch	Yes	2	1	1	1
dsPIC30F5015	64	66K/22K	2048	1024	5	4	4	8 ch	16 ch	Yes	1	2	1	1
dsPIC30F6010	80	144K/48K	8192	4096	5	8	8	8 ch	16 ch	Yes	2	2	1	2
dsPIC30F6010A	80	144K/48K	8192	4096	5	8	8	8 ch	16 ch	Yes	2	2	1	2

* This table provides a summary of the dsPIC30F2010 peripheral features. Other available devices in the dsPIC30F Motor Control and Power Conversion Family are shown for feature comparison.

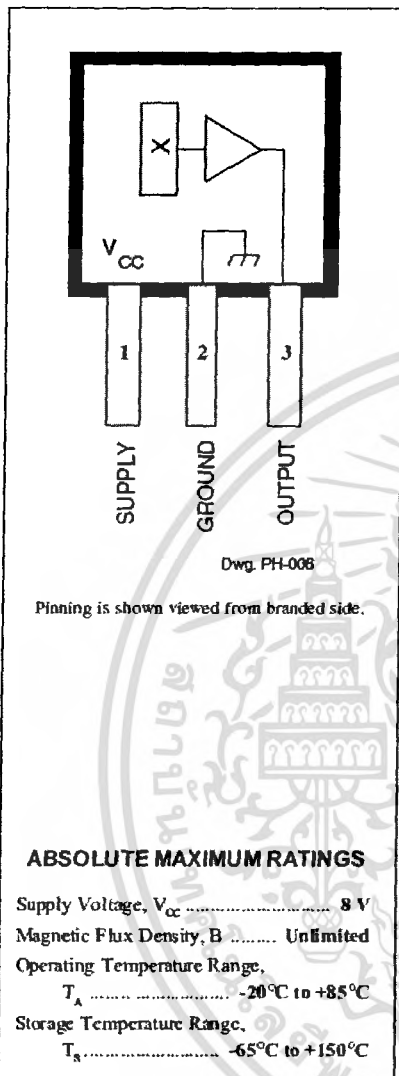
Pin Diagrams



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.2 เอกสารคู่มือการใช้งาน HALL-EFFECT SENSORS

RATIOMETRIC, LINEAR HALL-EFFECT SENSORS



The UGN3503LT, UGN3503U, and UGN3503UA Hall-effect sensors accurately track extremely small changes in magnetic flux density—changes generally too small to operate Hall-effect switches.

As motion detectors, gear tooth sensors, and proximity detectors, they are magnetically driven mirrors of mechanical events. As sensitive monitors of electromagnets, they can effectively measure a system's performance with negligible system loading while providing isolation from contaminated and electrically noisy environments.

Each Hall-effect integrated circuit includes a Hall sensing element, linear amplifier, and emitter-follower output stage. Problems associated with handling tiny analog signals are minimized by having the Hall cell and amplifier on a single chip.

Three package styles provide a magnetically optimized package for most applications. Package suffix 'LT' is a miniature SOT-89/TO-243AA transistor package for surface-mount applications; suffix 'U' is a miniature three-lead plastic SIP, while 'UA' is a three-lead ultra-mini-SIP. All devices are rated for continuous operation over the temperature range of -20°C to +85°C.

FEATURES

- Extremely Sensitive
- Flat Response to 23 kHz
- Low-Noise Output
- 4.5 V to 6 V Operation
- Magnetically Optimized Package

Always order by complete part number, e.g., **UGN3503UA**.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS at $T_A = +25^\circ\text{C}$, $V_{CC} = 5\text{ V}$

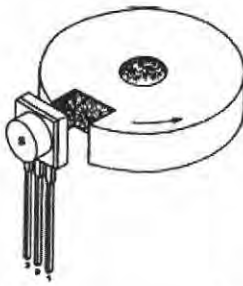
Characteristic	Symbol	Test Conditions	Limits			Units
			Min.	Typ.	Max.	
Operating Voltage	V_{CC}		4.5	—	6.0	V
Supply Current	I_{CC}		—	9.0	13	mA
Quiescent Output Voltage	V_{OUT}	$B = 0\text{ G}$	2.25	2.50	2.75	V
Sensitivity	ΔV_{OUT}	$B = 0\text{ G to } \pm 900\text{ G}$	0.75	1.30	1.75	mV/G
Bandwidth (-3 dB)	BW		—	23	—	kHz
Broadband Output Noise	V_{out}	BW = 10 Hz to 10 kHz	—	90	—	μV
Output Resistance	R_{OUT}		—	50	220	Ω

All output-voltage measurements are made with a voltmeter having an input impedance of at least 10 k Ω .

Magnetic flux density is measured at most sensitive area of device located 0.016" (0.41 mm) below the branded face of the 'U' package; 0.020" (0.51 mm) below the branded face of the 'UA' package; and 0.030" (0.76 mm) below the branded face of the 'LT' package.

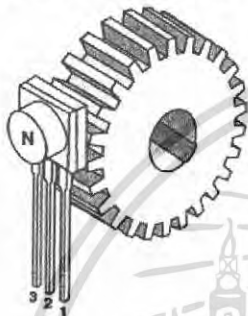
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NOTCH SENSOR



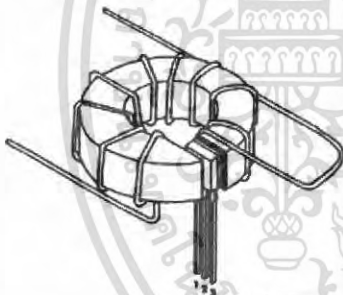
Dwg. A-12,574

GEAR TOOTH SENSOR



Dwg. A-12,512

CURRENT MONITOR



Dwg. A-12,513

OPERATION

The output null voltage ($B = 0$ G) is nominally one-half the supply voltage. A south magnetic pole, presented to the branded face of the Hall-effect sensor will drive the output higher than the null voltage level. A north magnetic pole will drive the output below the null level.

In operation, instantaneous and proportional output-voltage levels are dependent on magnetic flux density at the most sensitive area of the device. Greatest sensitivity is obtained with a supply voltage of 6 V, but at the cost of increased supply current and a slight loss of output symmetry. The sensor's output is usually capacitively coupled to an amplifier that boosts the output above the millivolt level.

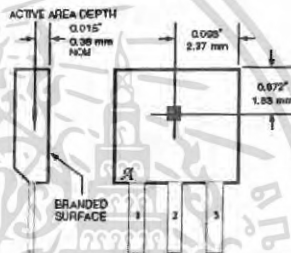
In two applications shown, a permanent bias magnet is attached with epoxy glue to the back of the epoxy package. The presence of ferrous material at the face of the package acts as a flux concentrator.

The south pole of a magnet is attached to the back of the package if the Hall-effect IC is to sense the presence of ferrous material. The north pole of a magnet is attached to the back surface if the integrated circuit is to sense the absence of ferrous material.

Calibrated linear Hall devices, which can be used to determine the actual flux density presented to the sensor in a particular application, are available.

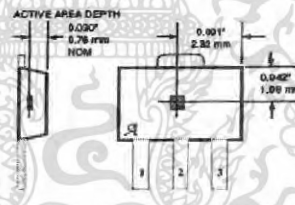
SENSOR LOCATIONS

SUFFIX "U"



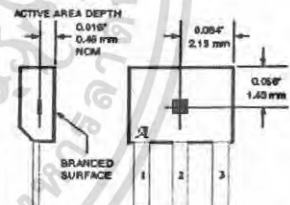
Dwg. M4-025-10

SUFFIX "LT"



Dwg. M7-026-6

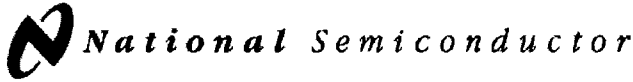
SUFFIX "UA"



Dwg. M4-014-20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.3 เอกสารคู่มือการใช้งาน LM358



December 1994

LM158/LM258/LM358/LM2904 Low Power Dual Operational Amplifiers

General Description

The LM158 series consists of two independent, high gain, internally frequency compensated operational amplifiers which were designed specifically to operate from a single power supply over a wide range of voltages. Operation from split power supplies is also possible and the low power supply current drain is independent of the magnitude of the power supply voltage.

Application areas include transducer amplifiers, dc gain blocks and all the conventional op amp circuits which now can be more easily implemented in single power supply systems. For example, the LM158 series can be directly operated off of the standard +5V power supply voltage which is used in digital systems and will easily provide the required interface electronics without requiring the additional $\pm 15V$ power supplies.

Unique Characteristics

- In the linear mode the input common-mode voltage range includes ground and the output voltage can also swing to ground, even though operated from only a single power supply voltage.
- The unity gain cross frequency is temperature compensated.
- The input bias current is also temperature compensated.

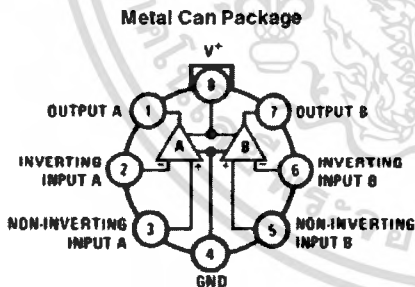
Advantages

- Two internally compensated op amps in a single package
- Eliminates need for dual supplies
- Allows directly sensing near GND and V_{OUT} also goes to GND
- Compatible with all forms of logic
- Power drain suitable for battery operation
- Pin-out same as LM1558/LM1458 dual operational amplifier

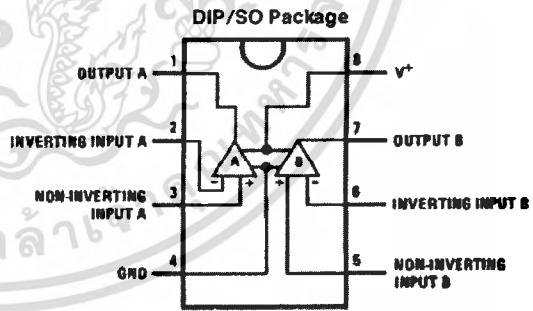
Features

- Internally frequency compensated for unity gain
- Large dc voltage gain 100 dB
- Wide bandwidth (unity gain) 1 MHz
(temperature compensated)
- Wide power supply range:
 - Single supply 3V to 32V
 - or dual supplies $\pm 1.5V$ to $\pm 16V$
- Very low supply current drain (500 μA)—essentially independent of supply voltage
- Low input offset voltage 2 mV
- Input common-mode voltage range includes ground
- Differential input voltage range equal to the power supply voltage
- Large output voltage swing 0V to $V^+ - 1.5V$

Connection Diagrams (Top Views)



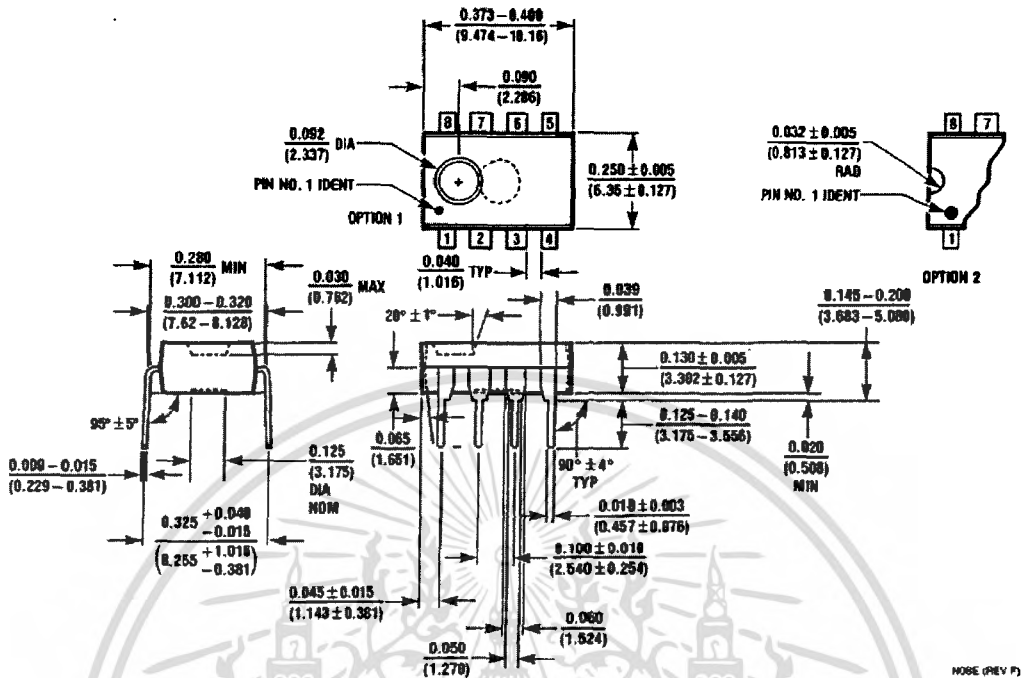
Order Number LM158AH, LM158AH/883*,
LM158H, LM158H/883*, LM258H or LM358H
See NS Package Number H08C



Order Number LM158J, LM158J/883*,
LM158AJ or LM158AJ/883*
See NS Package Number J08A
Order Number LM358M, LM358AM or LM2904M
See NS Package Number M08A
Order Number LM358AN, LM358N or LM2904N
See NS Package Number N08E

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Physical Dimensions inches (millimeters)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

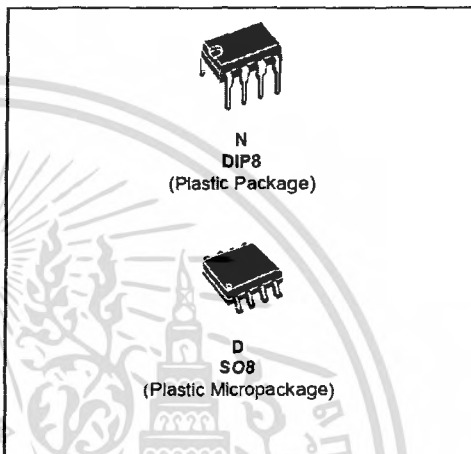
ข.4 เอกสารคู่มือการใช้งาน LF351



LF151
LF251 - LF351

WIDE BANDWIDTH
SINGLE J-FET OPERATIONAL AMPLIFIER

- INTERNALLY ADJUSTABLE INPUT OFFSET VOLTAGE
- LOW POWER CONSUMPTION
- WIDE COMMON-MODE (UP TO V_{CC}^+) AND DIFFERENTIAL VOLTAGE RANGE
- LOW INPUT BIAS AND OFFSET CURRENT
- OUTPUT SHORT-CIRCUIT PROTECTION
- HIGH INPUT IMPEDANCE J-FET INPUT STAGE
- INTERNAL FREQUENCY COMPENSATION
- LATCH UP FREE OPERATION
- HIGH SLEW RATE : 16V/ μ s (typ)

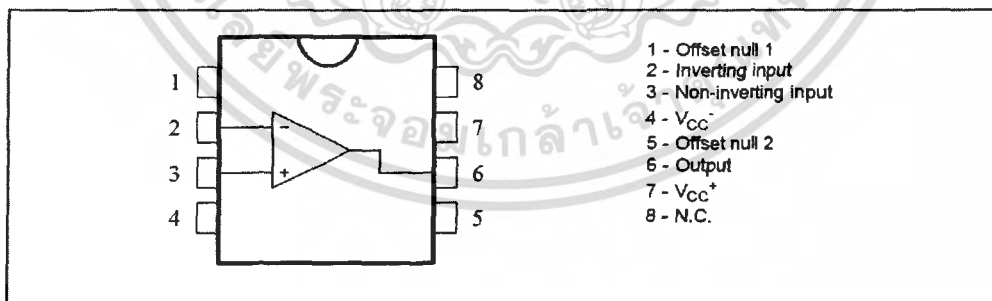


DESCRIPTION

These circuits are high speed J-FET input single-operational amplifiers incorporating well matched, high voltage J-FET and bipolar transistors in a monolithic integrated circuit.

The devices feature high slew rates, low input bias and offset currents, and low offset voltage temperature coefficient.

PIN CONNECTIONS (top view)



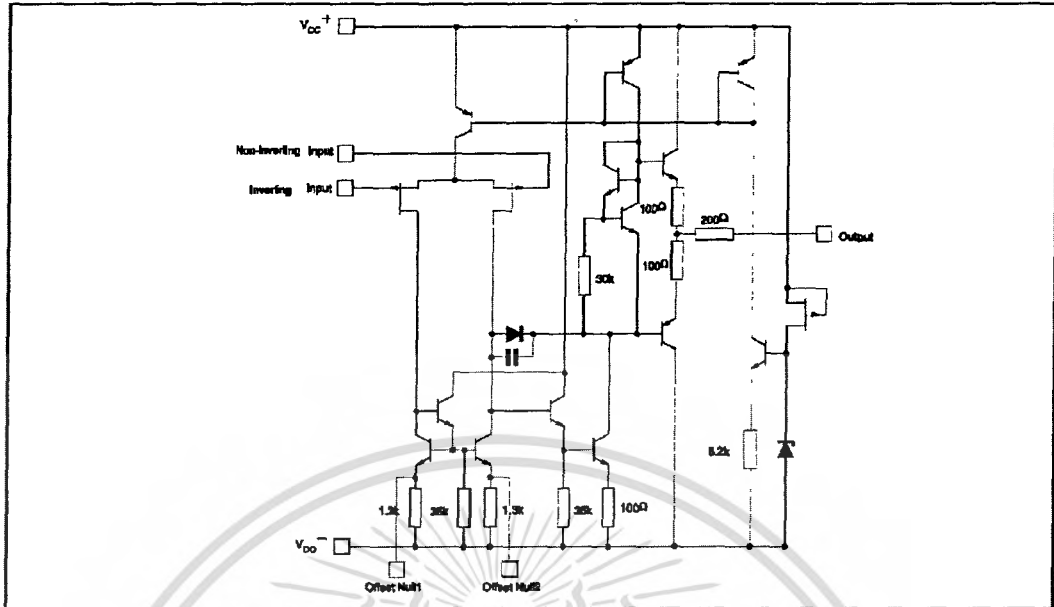
ORDER CODE

Part Number	Temperature Range	Package	
		N	D
LF351	0°C, +70°C	•	•
LF251	-40°C, +105°C	•	•
LF151	-55°C, +125°C	•	•

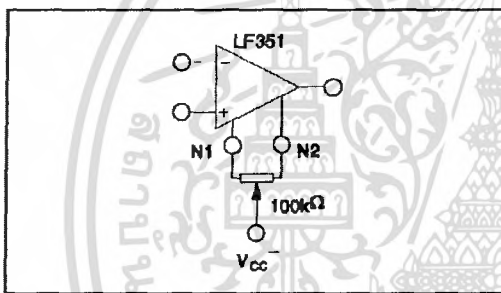
N = Dual In Line Package (DIP)
D = Small Outline Package (SO) - also available in Tape & Reel (DT)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SCHEMATIC DIAGRAM



INPUT OFFSET VOLTAGE NULL CIRCUIT



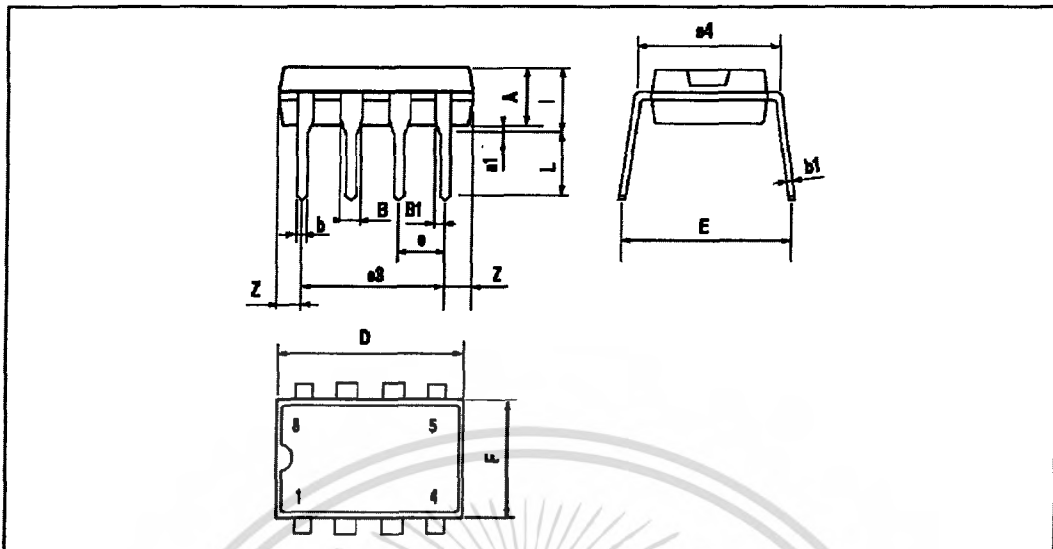
ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	LF151	LF251	LF351	Unit
V_{CC}	Supply voltage - note 1)		± 18		V
V_i	Input Voltage - note 2)		± 15		V
V_{id}	Differential Input Voltage - note 3)		± 30		V
P_{tot}	Power Dissipation		680		mW
	Output Short-circuit Duration - note 4)		Infinite		
T_{oper}	Operating Free-air Temperature Range	-55 to +125	-40 to +105	0 to +70	$^{\circ}C$
T_{stg}	Storage Temperature Range		-65 to +150		$^{\circ}C$

1. All voltage values, except differential voltage, are with respect to the zero reference level (ground) of the supply voltages where the zero reference level is the midpoint between V_{CC+} and V_{CC-} .
2. The magnitude of the input voltage must never exceed the magnitude of the supply voltage or 15 volts, whichever is less.
3. Differential voltages are the non-inverting input terminal with respect to the inverting input terminal.
4. The output may be shorted to ground or to either supply. Temperature and/or supply voltages must be limited to ensure that the dissipation rating is not exceeded.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PACKAGE MECHANICAL DATA
8 PINS - PLASTIC DIP



Dim.	Millimeters			Inches		
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.
A		3.32			0.131	
a1	0.51			0.020		
B	1.15		1.65	0.045		0.065
b	0.356		0.55	0.014		0.022
b1	0.204		0.304	0.008		0.012
D			10.92			0.430
E	7.95		9.75	0.313		0.384
e		2.54			0.100	
e3		7.62			0.300	
e4		7.62			0.300	
F			6.6			0.260
i			5.08			0.200
L	3.18		3.81	0.125		0.150
Z			1.52			0.060

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.5 เอกสารคู่มือการใช้งาน MPX2000



100 kPa High Z_{in}, On-Chip Temperature Compensated & Calibrated Silicon Pressure Sensors

The new MPX7100 series pressure sensor incorporates all the innovative features of Motorola's MPX2000 series family including the patented, single piezoresistive strain gauge (X-ducer) and on-chip temperature compensation and calibration. In addition, the MPX7100 series has a high input impedance of typically 10 kΩ for those portable, low power and battery-operated applications. This device is suitable for those systems in which users must have a dependable, accurate pressure sensor that will not consume significant power. The MPX7100 series device is a logical and economical choice for applications such as portable medical instrumentation, remote sensing systems with 4–20 mAmp transmission and field barometers/altimeters.

Features

- Temperature Compensated Over 0°C to +85°C
- Unique Silicon Shear Stress Strain Gauge
- Easy to Use Chip Carrier Package Options
- Available in Differential and Gauge Configurations
- Ratio-metric to Supply Voltage
- ±0.25% Linearity (MPX7100D)

Application Examples

- Portable Medical Instrumentation
- Field Altimeters
- Field Barometers

Figure 1 illustrates a schematic of the internal circuitry on the stand-alone pressure sensor chip.

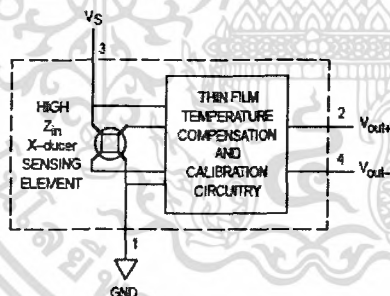


Figure 1. Temperature Compensated Pressure Sensor Schematic

VOLTAGE OUTPUT versus APPLIED DIFFERENTIAL PRESSURE

The differential voltage output of the X-ducer is directly proportional to the differential pressure applied.

The absolute sensor has a built-in reference vacuum. The output voltage will decrease as vacuum, relative to ambient, is drawn on the pressure (P1) side.

The output voltage of the differential or gauge sensor increases with increasing pressure applied to the pressure (P1) side relative to the vacuum (P2) side. Similarly, output voltage increases as increasing vacuum is applied to the vacuum (P2) side relative to the pressure (P1) side.

Preferred devices are Motorola recommended choices for future use and best overall value. Senseon and X-ducer are trademarks of Motorola, Inc.

**MPX7100
SERIES**
Motorola Preferred Device

0 to 100 kPa (0 to 14.5 psi)
40 mV FULL SCALE SPAN
(TYPICAL)

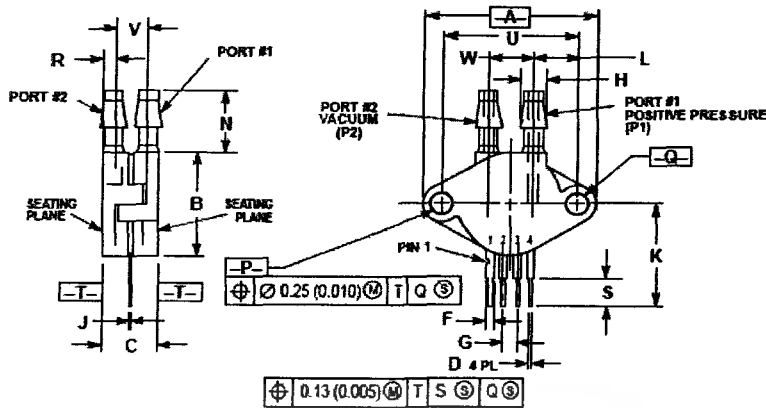
**BASIC CHIP
CARRIER ELEMENT
CASE 344-15, STYLE 1**

**DIFFERENTIAL
PORT OPTION
CASE 344C-01, STYLE 1**

NOTE: Pin 1 is the notched pin.

PIN NUMBER			
1	Gnd	3	V _S
2	+V _{out}	4	-V _{out}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



NOTES:
 1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
 2. CONTROLLING DIMENSION INCH.

DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	1.145	1.175	29.08	29.85
B	0.685	0.715	17.40	18.16
C	0.405	0.435	10.29	11.05
D	0.016	0.020	0.41	0.51
F	0.048	0.064	1.22	1.63
G	0.100 BSC			
H	0.182	0.194	4.62	4.93
J	0.014	0.016	0.36	0.41
K	0.695	0.725	17.65	18.42
L	0.250	0.300	7.37	7.62
N	0.420	0.440	10.67	11.18
P	0.153	0.159	3.89	4.04
Q	0.153	0.159	3.89	4.04
R	0.063	0.063	1.60	2.11
S	0.220	0.240	5.59	6.10
U	0.910 BSC			
V	0.263	0.278	6.70	7.06
W	0.310	0.330	7.87	8.38

STYLE 1:
 PIN 1. GROUND
 2. + OUTPUT
 3. + SUPPLY
 4. - OUTPUT

CASE 344C-01
 ISSUE B



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้