

การพัฒนาอุปกรณ์ควบคุมต้นทุนต่ำและการประยุกต์ใช้กับ

กระบวนการระดับ

LOW-COST CONTROLLER DEVELOPMENT AND ITS APPLICATION
TO LEVEL PROCESS



กันตภณ วัชรเจียรสกุล

กิตติพัฒน์ มีศักดิ์ดา

ณัฐวดี เทียมธรรมวงศ์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

การพัฒนาอุปกรณ์ควบคุมต้นทุนต่ำและการประยุกต์ใช้กับ
กระบวนการระดับ
LOW-COST CONTROLLER DEVELOPMENT AND ITS APPLICATION
TO LEVEL PROCESS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาก่อนหน้าปีการศึกษา 2557
จึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LOW-COST CONTROLLER DEVELOPMENT AND ITS
APPLICATION TO LEVEL PROCESS



KUNTAPHON VATCHARATIANSAKUL
KITTIPHAT MEESAKDA
NATTAWADEE THIAMTHUMMAWONG

THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN CONTROL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2557

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การพัฒนาอุปกรณ์ควบคุมต้นทุนต่ำและการประยุกต์ใช้กับกระบวนการระดับ
LOW-COST CONTROLLER DEVELOPMENT AND ITS APPLICATION TO
LEVEL PROCESS

ผู้จัดทำ

นายกันตภณ วัชรเจียรสกุล

54010089

นายกิตติพัฒน์ มีศักดิ์ดา

54010112

นางสาวณัฐวดี เทียมธรรมวงศ์

54010449


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. ถาวร เบนญนราสุทธิ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาอุปกรณ์ควบคุมต้นทุนต่ำและการประยุกต์ใช้กับ

กระบวนการระดับ

โดย

นายกันตภณ วัชรเจียรสกุล

54010089

นายกิตติพัฒน์ มีศักดิ์ดา

54010112

นางสาวณัฐวดี เทียมธรรมวงศ์

54010449

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร. ถาวร เบญจนาสุสุทธิ

ปีการศึกษา 2557

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการออกแบบและสร้างกล่องควบคุมต้นทุนต่ำที่มีความสามารถเทียบเคียงกับอุปกรณ์ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม และเพิ่มความสะดวกในการใช้งานให้มากยิ่งขึ้นโดยผนวกหน้าจอสัมผัสเพิ่มเข้ามาทำให้ผู้ใช้ใช้งานง่ายและสามารถเลือกแสดงผลเป็นกราฟผลตอบสนองได้อีกด้วย

เพื่อสาธิตความสามารถของกล่องควบคุมที่พัฒนาขึ้นว่าสามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ปรับปรุงชุดทดลองกระบวนการไหลและระดับของเหลวขึ้นเพื่อใช้ทดสอบกล่องควบคุม โดยทดสอบในส่วนของการเชื่อมต่ออุปกรณ์เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย รวมถึงการทดสอบการควบคุมวงปิดด้วยตัวควบคุมพีไอดีและปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ผลการทดลองพบว่ากล่องควบคุมที่ออกแบบสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ของชุดทดลองรวมถึงสามารถควบคุมวงปิดโดยใช้ตัวควบคุมพีไอดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LOW-COST CONTROLLER DEVELOPMENT AND ITS APPLICATION TO LEVEL PROCESS

By

Mr. Kuntaphon Vatcharatiansakul 54010089

Mr. Kittiphath Meesakda 54010112

Mrs. Nattawadee Thiamthummawong 54010449

Advisor

Assoc. Prof. Dr. Tawon Benjanarasuth

Academic Year 2014

ABSTRACT

This thesis presents the design and implementation of a controller box compatible with other industrial devices. The touchscreen is added into the proposed controller box, making it more convenient to use and enabling the graphical display mode.

To demonstrate the performance of the controller box, a flow and level process plant is modified and used with the controller box. The experiments on interfacing the controller box with sensor and final control devices and on the closed-loop control by a PID controller with various parameters are conducted. The results confirm the capability of the developed controller box in practical usage.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ถาวร เบญจนาสุทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูง ที่ได้ให้คำปรึกษาแนวทางการแก้ปัญหา ความคิดริเริ่ม ตลอดจนการฝึกฝนให้ผู้เขียนมีความสามารถในการทำวิจัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงให้ความเอาใจใส่ดูแลสอบถามถึงความก้าวหน้าอย่างสม่ำเสมอ ทำให้ผู้เขียนทำงานอย่างมีระบบและใช้เวลาอย่างมีประสิทธิภาพ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์เทพจิตร เขยโสภา ที่ได้ให้คำแนะนำวิธีการแก้ปัญหา ต่างๆ ที่เกิดขึ้นทั้งทางทฤษฎีและทางปฏิบัติแก่ผู้เขียนเสมอมา รวมทั้งได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์สำหรับการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณดี เพชรณิล้ำค่า ที่ได้ให้คำแนะนำในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นและคอยติดตามผลของการแก้ปัญหาอยู่เสมอ

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัย ตลอดจนอำนวยความสะดวก ให้แก่ผู้เขียนจนสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสิ้น

ท้ายที่สุด ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่รักและเคารพ ที่สนับสนุนให้โอกาสแก่ผู้เขียน ได้เล่าเรียนจนถึงวันนี้ ตลอดจนเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ในห้องวิจัย ทุกคนที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และเป็นกำลังใจให้ด้วยดีเสมอมาจนสามารถนำสิ่งต่างๆ ที่ได้รับมานั้นจัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ให้เสร็จสมบูรณ์

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

กันตภณ วัชรเธียรสกุล

กิตติพัฒน์ มีศักดิ์

ณัฐวดี เทียมธรรมวงศ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 จุดประสงค์ของโครงการ.....	1
1.2 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.3 อุปกรณ์และซอฟต์แวร์ที่ใช้.....	2
1.4 เนื้อหาปริญาณิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การควบคุมแบบลูปเดี่ยว.....	4
2.2 ตัวควบคุมด้วยพีไอดี.....	5
2.2.1 ตัวควบคุมแบบพี.....	5
2.2.2 ตัวควบคุมแบบไอ.....	6
2.2.3 ตัวควบคุมแบบดี.....	7
2.2.4 ตัวควบคุมแบบพีไอดี.....	8
2.2.5 ตัวควบคุมแบบพีไอดีเวลาติสครีต.....	9
2.2.6 การสะสมค่าเกินระดับการอิมิตัวจากการปรีฟันซ์และการระงับการปรีฟันซ์.....	10
2.3 หลักการทำงานของสแต็ปมอเตอร์.....	13
2.4 ทรานสมิทเตอร์.....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การออกแบบและโครงสร้าง	16
3.1 กล้องควบคุม.....	16
3.1.1 คุณสมบัติของ ET-ARM7 STAMP LPC2138.....	17
3.1.2 หน้าจอสัมผัส ET-TFT240320TP-3.2 REV.D และการใช้งาน.....	19
3.1.3 โปรแกรมส่วนกราฟิกและการสัมผัส.....	21
3.1.4 โปรแกรมรับส่งค่าออกจากไมโครคอนโทรลเลอร์.....	31
3.1.5 โปรแกรมการควบคุมแบบพีไอดี.....	33
3.1.6 โปรแกรมการรีเซตค่าเทอมปริพันธ์.....	34
3.1.7 วงจรแปลงสัญญาณ.....	36
3.1.7.1 วงจรเปลี่ยนกระแสเป็นแรงดัน.....	36
3.1.7.2 วงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์.....	37
3.2 ชุดกระบวนการไหลและระดับของเหลว.....	39
3.2.1 การออกแบบการขับเคลื่อนวาล์วโดยใช้สเต็ปมอเตอร์.....	41
3.2.1.1 การควบคุมสเต็ปมอเตอร์ด้วยคอนโทรลเลอร์.....	41
3.2.1.2 โปรแกรมควบคุมมอเตอร์.....	43
3.2.2 การออกแบบการไหลของน้ำ.....	46
บทที่ 4 ผลการทดลอง	48
4.1 การทดลองการอ่านค่าของกล้องควบคุม.....	48
4.2 การทดลองการส่งสัญญาณของกล้องควบคุมไปยังวาล์ว.....	52
4.3 การทดลองการวัดอัตราการไหล.....	55
4.4 การทดลองการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี.....	57
บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุปผล	62
5.1 สรุปการทดลอง.....	62
5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข.....	63

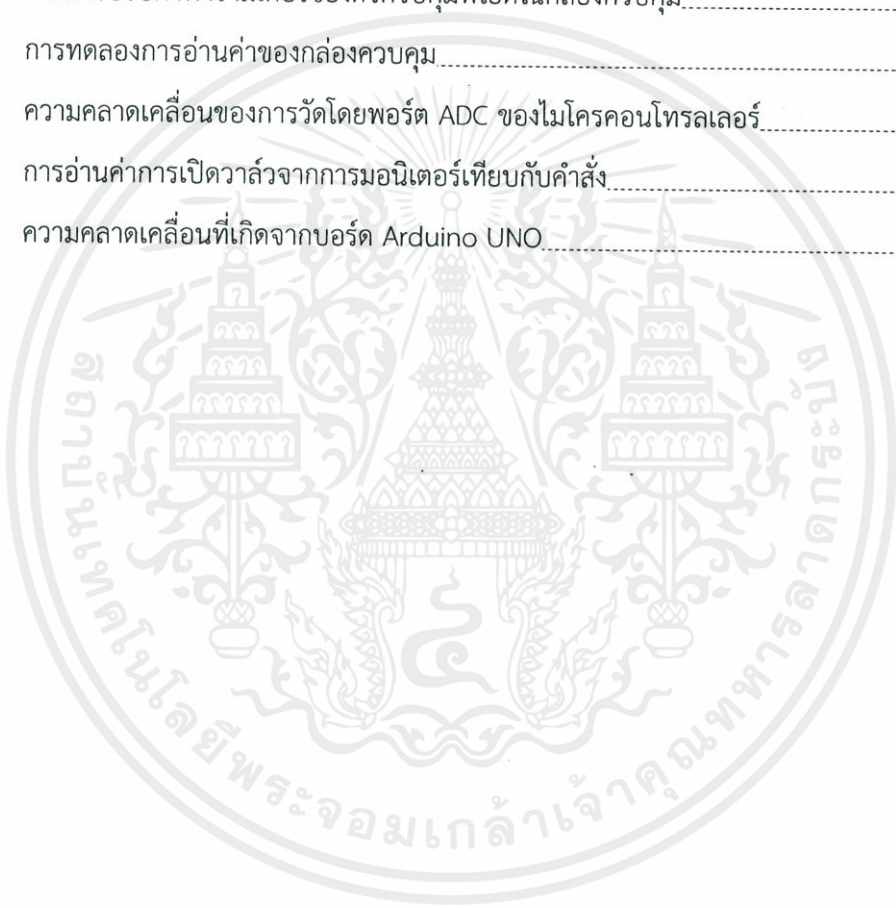
สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก คู่มือการใช้งานอุปกรณ์ในโรงงาน.....	65
ก.1 เอกสารคู่มือการใช้งานไอซี 7805.....	65
ก.2 เอกสารคู่มือการใช้งานไอซี LM1117T.....	67
ก.3 เอกสารคู่มือการใช้งานไอซี L298N.....	69
ภาคผนวก ข แบบและโครงสร้าง.....	71
ข.1 โครงสร้างของกล่องควบคุม.....	71
ข.2 โครงสร้างของอุปกรณ์ยึดมอเตอร์.....	77
เอกสารอ้างอิง.....	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลกระทบจากการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดี.....	9
2.2 การป้อนสัญญาณแก่ขดลวดของสเต็ปมอเตอร์แบบฟูลสเต็ป 2 เฟส.....	14
3.1 ช่วงการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีในกล่องควบคุม.....	28
4.1 การทดลองการอ่านค่าของกล่องควบคุม.....	49
4.2 ความคลาดเคลื่อนของการวัดโดยพอร์ต ADC ของไมโครคอนโทรลเลอร์.....	51
4.3 การอ่านค่าการเปิดวาล์วจากการมอนิเตอร์เทียบกับคำสั่ง.....	52
4.4 ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากบอร์ด Arduino UNO.....	54



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 การควบคุมแบบลูปเดี่ยว.....	5
2.2 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบพี.....	6
2.3 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบไอ.....	7
2.4 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบดี.....	8
2.5 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบพีไอดี.....	9
2.6 ผลตอบสนองเมื่อไม่มีและมีการระงับการบริพันธ์.....	11
2.7 วงจรภายในของสเต็ปมอเตอร์.....	13
2.8 ทรานสมิเตอร์แบบวัดความดันแตกต่าง.....	15
3.1 ภาพรวมของโครงการ.....	16
3.2 โครงสร้างบอร์ด ET-ARM7 STAMP LPC2138.....	18
3.3 โมดูลหน้าจอสัมผัสเบอร์ ET-TFT240320TP-3.2 REV.D.....	19
3.4 การต่อ ET-ARM7 STAMP LPC2138 กับจอ ET-TFT240320TP-3.2 REV.D.....	20
3.5 การต่อขาที่ไม่มีการใช้งานของจอ ET-TFT240320TP-3.2 REV.D.....	21
3.6 โฟลว์ชาร์ตของโปรแกรมในส่วนกราฟิกและการสัมผัส.....	22
3.7 หน้าจอเริ่มต้น.....	23
3.8 หน้าจอตั้งค่า.....	24
3.9 หน้าจอพร้อมใช้งาน.....	25
3.10 หน้าจอโหมดแมนนวล.....	26
3.11 หน้าจอโหมดอัตโนมัติ.....	27
3.12 หน้าจอกราฟเมื่อเริ่มต้น.....	28
3.13 หน้าจอกราฟเมื่อกดปุ่มเริ่มต้น.....	29
3.14 หน้าจอกราฟเมื่อกดปุ่มหยุด.....	30
3.15 หน้าจอหลักเมื่ออยู่ในสถานะหยุดทำงาน.....	30
3.16 หน้าจอหลักเมื่ออยู่ในสถานะทำงานอยู่หรือหน้าจออัตโนมัติ.....	31

เอกสารนี้ 3.15 หน้าจอหลักเมื่ออยู่ในสถานะหยุดทำงาน การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณี 3.16 หน้าจอหลักเมื่ออยู่ในสถานะทำงานอยู่หรือหน้าจออัตโนมัติ เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.17 การเชื่อมต่อวงจรในการรับส่งสัญญาณข้อมูล.....	32
3.18 ฟังก์ชันในการรับสัญญาณอินพุต.....	32
3.19 ฟังก์ชันการส่งสัญญาณเอาต์พุต.....	33
3.20 ฟังก์ชันการควบคุมแบบพีไอดี.....	34
3.21 ปุ่มรีเซ็ตเทอมปริพันธ์.....	35
3.22 ฟังก์ชันการรับค่ารีเซ็ตเทอมปริพันธ์.....	35
3.23 ระดับสัญญาณและการรับส่งในระบบ.....	36
3.24 วงจรเปลี่ยนกระแสให้เป็นแรงดันแบบลอยตัว.....	37
3.25 วงจรปรับความชันและตำแหน่งศูนย์.....	38
3.26 กล่องควบคุม.....	39
3.27 กระบวนการไหลและระดับของเหลว (ก่อนปรับปรุง).....	40
3.28 กระบวนการไหลและระดับของเหลว (หลังปรับปรุง).....	40
3.29 การยืดสแต็ปมอเตอร์กับวาล์วทองเหลือง.....	41
3.30 การต่อบอร์ด Arduino UNO R3, วงจรขับ L298N และสแต็ปมอเตอร์.....	42
3.31 วงจรควบคุมและขับสแต็ปมอเตอร์.....	42
3.32 โพล์วาร์ดของโปรแกรมควบคุมมอเตอร์.....	43
3.33 ระบบการไหลของน้ำก่อนเข้าคอนโทรลวาล์ว.....	46
3.34 ชุดทดลองกระบวนการไหลและระดับของเหลว.....	47
4.1 การทดลองการอ่านค่าของกล่องควบคุม.....	48
4.2 เปรียบเทียบค่ากระแสที่วัดได้จากทรานสมิเตอร์กับค่ากระแสมาตรฐาน.....	50
4.3 เปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ที่อ่านได้กับค่าตามทฤษฎี.....	50
4.4 เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการมอดูเลเตอร์กับแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน.....	53
4.5 เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าจากตัวควบคุมกับระดับการเปิดวาล์วอ่านจากการมอดูเลเตอร์.....	55
4.6 เปรียบเทียบระดับการเปิดวาล์วกับอัตราการไหล.....	56

สารบัญญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 การเตรียมการทดลองการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี.....	57
4.8 ผลการทดลองการปรับค่าพีไอดีเมื่อ $P=1, I=0$ และ $D=0$	58
4.9 ผลการทดลองการปรับค่าพีไอดีเมื่อ $P=2, I=0$ และ $D=0$	58
4.10 ผลการทดลองการปรับค่าพีไอดีเมื่อ $P=1, I=1$ และ $D=0$	59
4.11 ผลการทดลองการปรับค่าพีไอดีเมื่อ $P=1, I=2$ และ $D=0$	59
4.12 ผลการทดลองการปรับค่าพีไอดีเมื่อ $P=1, I=2$ และ $D=1$	60
4.13 ผลการทดลองการปรับค่าพีไอดีเมื่อ $P=1, I=2$ และ $D=10$	60
4.14 ผลการทดลองการปรับค่าพีไอดีเมื่อ $P=1, I=2$ และ $D=100$	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ระบบควบคุมมีความสำคัญอย่างมากในอุตสาหกรรม เพื่อให้กระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพ จำเป็นต้องมีตัวควบคุมที่มีประสิทธิภาพ ในปัจจุบันมีอุปกรณ์ควบคุมสำเร็จรูปสำหรับควบคุมกระบวนการย่อยๆ ในสายการผลิตซึ่งสามารถทำงานได้โดยอิสระไม่ต้องเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์คือ ก่อ่งควบคุม โดยก่่งควบคุมมาตรฐานที่ใช้ในอุตสาหกรรมก็มีหลายประเภทขึ้นกับความต้องการในการใช้งาน โดยมีทั้งแบบแสดงผลเป็นกราฟได้รวมทั้งสามารถควบคุมได้ทั้งแบบลูปเดี่ยว (Single-loop Control) และแบบแคสเคด (Cascade Control) อาทิเช่น Yokogawa YS-1700 หรือแบบแสดงผลเป็น 7-Segment ที่สามารถควบคุมได้แบบลูปเดี่ยวเท่านั้นอย่าง Yokogawa UT551 อย่างไรก็ตาม ราคาของก่่งควบคุมมีราคาที่สูงโดยก่่งควบคุมที่มีราคาต่ำที่สุดยังมีราคาสูงกว่าหนึ่งหมื่นบาทซึ่งมักเป็นรุ่นต่ำและแสดงผลโดยใช้ 7-Segment เท่านั้น ด้วยเหตุนี้ทางคณะผู้จัดทำจึงได้มีแนวคิดพัฒนาก่่งควบคุมต้นทุนต่ำขึ้นโดยต้องการให้ก่่งควบคุมที่พัฒนาขึ้นมีความสามารถเทียบเคียงกับอุปกรณ์มาตรฐานที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมแต่มีความสะดวกในการใช้งานมากขึ้นโดยได้ผนวกหน้าจอสัมผัสเพิ่มเข้ามาทำให้ผู้ใช้ใช้งานง่ายขึ้นและสามารถเลือกแสดงผลเป็นกราฟผลตอบสนองได้อีกด้วย และเพื่อสาธิตความสามารถของก่่งควบคุมที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้ตรงตามวัตถุประสงค์ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จึงปรับปรุงชุดทดลองกระบวนการไหลและระดับของเหลวขึ้นเพื่อใช้ทดสอบก่่งควบคุม

1.1 จุดประสงค์ของโครงการ

1. สร้างก่่งควบคุมสามารถให้สามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ทรานสมิตเตอร์ (Transmitter) และอุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย (Final Control Device) และสามารถควบคุมกระบวนการแบบลูปเดี่ยวได้โดยใช้การควบคุมแบบพีไอดี (Proportional-Integral-Derivative)

2. ปรับปรุงชุดทดลองกระบวนการไหลและระดับของเหลวโดยสามารถควบคุมระดับของเหลวได้ด้วยสัญญาณควบคุมแบบสัญญาณต่อเนื่องและสามารถรับสัญญาณควบคุมจากก่่งควบคุมและ

เอกสารนี้เป็นจำนวนสตีปการหมื่นของสตีปมอเตอร์เพื่อเปิด/ปิดวาล์วเป็นเปอร์เซ็นต์ตั้งแต่ 0-100 มีด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีเปอร์เซ็นต์ได้อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เชื่อมต่อกล่องควบคุมให้สามารถควบคุมระดับของเหลวของชุดทดลองกระบวนการไหลและระดับได้และสามารถปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี

1.2 ขอบเขตของโครงการ

1. สร้างกล่องควบคุมโดยให้มีคุณสมบัติดังนี้
 - สามารถสั่งงานได้ผ่านหน้าจอสัมผัสได้
 - สามารถแสดงผลเป็นกราฟผลตอบสนองได้
 - สามารถควบคุมกระบวนการแบบลูปเดียวได้โดยใช้การควบคุมด้วยพีไอดี
 - มีวงจรปรับแต่งสัญญาณด้านอินพุตและเอาต์พุตเพื่อให้รับส่งเป็นสัญญาณมาตรฐานได้ โดยเป็นไปตามมาตรฐานที่ใช้ในอุตสาหกรรม
2. ปรับปรุงชุดทดลองกระบวนการไหลและระดับของเหลวโดยให้มีคุณสมบัติดังนี้
 - ชุดทดลองสามารถควบคุมกระบวนการไหลและระดับได้แบบสัญญาณต่อเนื่องโดยรับค่าสัญญาณควบคุมจากกล่องควบคุมและนำสัญญาณที่ได้ไปสั่งงานวาล์วที่ทำจากสเต็ปมอเตอร์ให้เปิดเป็นเปอร์เซ็นต์ตั้งแต่ 0-100 เปอร์เซ็นต์ได้

1.3 อุปกรณ์และซอฟต์แวร์ที่ใช้

1. บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ET-ARM7 STAMP LPC2138 ใช้เป็นตัวควบคุมอินพุต เอาต์พุตของกระบวนการควบคุมและใช้เป็นตัวควบคุมหน้าจอสัมผัส
2. บอร์ดหน้าจอส ET-TFT240320TP-3.2 REV.D ใช้เป็นตัวแสดงผลและรับคำสั่ง
3. บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO R3 ใช้เป็นตัวควบคุมสเต็ปมอเตอร์และใช้รับสัญญาณควบคุมจากกล่องควบคุม
4. Microcontroller Development Kit MDK-ARM Version 5.12 เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมสั่งการทำงานของ MPU ด้วยภาษา C แล้วสร้างเป็น HEX File เพื่อใช้ในการติดตั้งโปรแกรมลง MPU ต่อไป
5. Philips LPC2000 Flash Utility Version 2.2.3 เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการอัปโหลด HEX File เข้าสู่ MPU LPC2138
6. Arduino เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมสั่งการทำงานของบอร์ด Arduino UNO R3 และใช้ในการอัปโหลดโปรแกรมลงบอร์ด โดยใช้ภาษา Arduino ในการเขียน

1.4 เนื้อหาปฏิญญานิพนธ์

ปฏิญญานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งออกเป็น 5 บทซึ่งรายละเอียดโดยคร่าวของแต่ละบทสามารถอธิบายได้ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวนำถึงวัตถุประสงค์ ขอบเขตของโครงการ พร้อมทั้งรายละเอียดของปฏิญญานิพนธ์ของแต่ละบทในปฏิญญานิพนธ์

บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการจัดทำโครงการ การควบคุมแบบลูปเดียว การควบคุมด้วยพีไอดีทั้งแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องทางเวลา การทำงานของสแต็ปมอเตอร์ และความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับทรานสมิเตอร์

บทที่ 3 หลักการออกแบบ นำเสนอการออกแบบกล่องควบคุมและชุดทดลองกระบวนการไหล และระดับของเหลว วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้อง โปรแกรมที่พัฒนาขึ้น

บทที่ 4 ผลการทดลอง เป็นส่วนการทดสอบกล่องควบคุมที่พัฒนาขึ้นในโครงการ

บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป ซึ่งจะสรุปผลการดำเนินงานในโครงการทั้งหมด ปัญหาที่พบและแนวทางการปรับปรุงแก้ไขรวมไปถึงการพัฒนาโครงการนี้ต่อไป

และในส่วนท้ายของปฏิญญานิพนธ์ ประกอบด้วยภาคผนวก ซึ่งมีคู่มือการใช้งานของไอซีต่างๆ รวมถึงภาพร่างต้นแบบของกล่องควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง

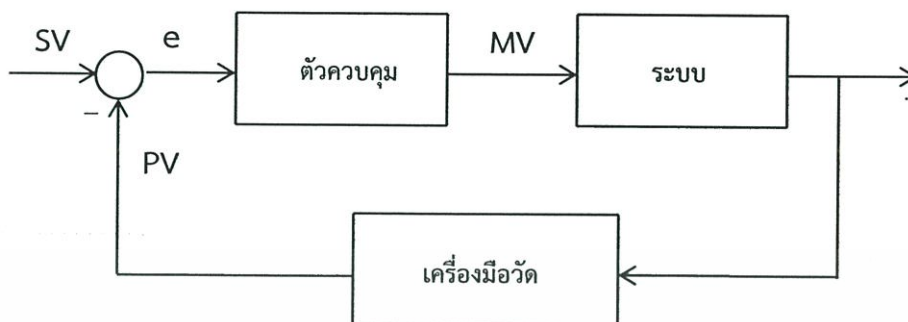
การควบคุม หมายถึง การควบคุมระบบพลวัต ให้มีค่าเอาต์พุตที่ต้องการ ซึ่งระบบควบคุมสามารถพบได้รอบตัวในชีวิตประจำวัน ไม่ว่าจะเป็น เครื่องปรับอากาศ เครื่องทำน้ำอุ่น ที่มีค่าอินพุตเป็นค่าของอุณหภูมิที่เราต้องการ ซึ่งระบบเหล่านี้เป็นระบบควบคุมอย่างง่ายที่ส่วนใหญ่เป็นการควบคุมแบบเปิด/ปิด (On-Off Control) แต่ในทางอุตสาหกรรมที่ต้องการการควบคุมที่มีความละเอียดและแม่นยำจำเป็นต้องใช้การควบคุมแบบสัญญาณต่อเนื่องโดยใช้ตัวควบคุมพีไอดี

ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะพัฒนากล่องควบคุมซึ่งมีความสามารถในการควบคุมแบบสัญญาณต่อเนื่องแบบลูปเดี่ยวและอาศัยตัวควบคุมพีไอดี โดยจะทดสอบการทำงานกับชุดทดลองกระบวนการไหลและระดับของเหลว ซึ่งมีอุปกรณ์ควบคุมสุดท้ายเป็นวาล์วควบคุมที่พัฒนาขึ้นเองโดยอาศัยสเต็ปมอเตอร์ ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและความรู้ที่จำเป็นในการจัดทำปริญญานิพนธ์ดังต่อไปนี้

2.1 การควบคุมแบบลูปเดี่ยว

การควบคุมแบบลูปเดี่ยวคือการควบคุมโดยมีอุปกรณ์เครื่องมือวัด 1 ตัวและอุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย 1 ตัว เป็นหลักการพื้นฐานในระบบควบคุมป้อนกลับ จากรูปที่ 2.1 สังเกตว่าจะเป็นการป้อนกลับแบบลบเพราะสัญญาณจากเครื่องมือวัด PV (Process Value) จะถูกนำไปหักล้างกับสัญญาณอ้างอิง SV (Setpoint Value) จะได้ออกมาเป็นค่าความคลาดเคลื่อน e (Error) ซึ่งจะนำไปป้อนเข้าสู่ตัวควบคุมและตัวควบคุมจะสร้างสัญญาณควบคุม MV (Manipulated Value) ส่งไปยังอุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย เพื่อให้ระบบที่ต้องการควบคุมมีค่าตามที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 การควบคุมแบบลูปเดี่ยว

2.2 ตัวควบคุมพีไอดี

ตัวควบคุมแบบพีไอดีเป็นตัวควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ซึ่งค่าที่นำไปใช้ในการคำนวณเป็นค่าความคลาดเคลื่อน e ที่ได้มาจากความแตกต่างของตัวแปรในกระบวนการและค่าเป้าหมายที่ต้องการตั้งที่อธิบายไปแล้วในหัวข้อที่ 2.1 โดยตัวควบคุมพีไอดีจะพยายามลดค่าความคลาดเคลื่อนให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการปรับค่าสัญญาณควบคุม MV

การควบคุมแบบพีไอดีได้ชื่อตามการรวมกันของเทอมของการควบคุมสามแบบตามสมการ

$$MV(t) = P_{out} + I_{out} + D_{out} \quad (2.1)$$

2.2.1 ตัวควบคุมแบบพี

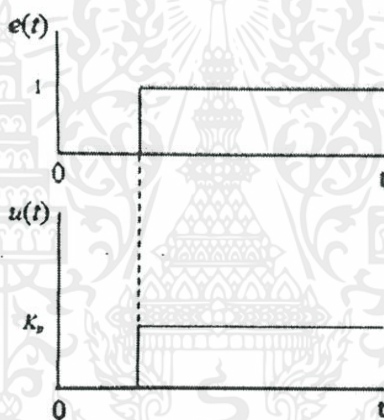
ตัวควบคุมแบบพี เอาต์พุตของตัวควบคุม $u(t)$ จะเป็นสัดส่วนกับอินพุตของตัวควบคุมและถ้ากำหนดสัญญาณอินพุตของตัวควบคุมเป็นค่าความคลาดเคลื่อน $e(t)$ จะได้เอาต์พุตของตัวควบคุมดังสมการที่ (2.2)

$$u(t) = P_{out} = K_p e(t) \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เมื่อ K_p คืออัตราขยายแบบสัดส่วน (Proportional Gain) เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากเอาต์พุตของตัวควบคุมจะเป็นสัดส่วนกับอินพุต ดังนั้นถ้าหากอินพุตมีลักษณะเป็นสัญญาณระดับ (Step Signal) เอาต์พุตที่ได้ก็จะมีลักษณะเป็นสัญญาณระดับเช่นกัน โดยลักษณะของกราฟแสดงอินพุตและเอาต์พุตจะมีสัดส่วนที่แน่นอนค่าหนึ่งดังแสดงในรูปที่ 2.2

ดังนั้นการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีจะเป็นเพียงการขยายสัญญาณความคลาดเคลื่อนเท่านั้น การที่ได้สัญญาณความคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่ที่เวลาหนึ่ง ทำให้เกิดเอาต์พุตที่มีขนาดใหญ่จากตัวควบคุมในเวลานั้น อย่างไรก็ตาม เมื่อค่า PV เริ่มเข้าใกล้ SV ส่งผลให้ค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าลดลง สัญญาณควบคุม MV ก็จะมีค่าลดลงเช่นกัน ส่งผลให้การใช้ตัวควบคุมแบบพีเพียงอย่างเดียวอาจจะทำให้ระบบเกิดออฟเซตโดย PV จะไม่อยู่ที่ค่า SV พอดี



รูปที่ 2.2 ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพี

2.2.2 ตัวควบคุมแบบไอ

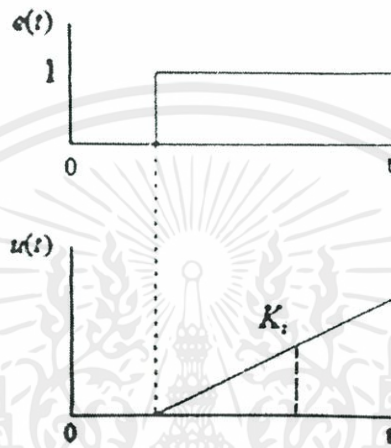
ตัวควบคุมแบบไอ เอาต์พุตของตัวควบคุมจะเป็นสัดส่วนกับการปริพันธ์สัญญาณของค่าความคลาดเคลื่อนเทียบเวลา ดังสมการที่ (2.3)

$$u(t) = I_{out} = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.3)$$

เมื่อ K_i คือ อัตราขยายแบบปริพันธ์ (Integral Gain) ซึ่งมักจะมีหน่วยเป็น sec^{-1}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ (2.3) สามารถอธิบายได้ว่าเทอมปริพันธ์เป็นอัตราส่วนของค่าความคลาดเคลื่อน ไม่ว่าจะอยู่ในหนึ่งช่วงเวลา (ปัจจุบัน ย้อนไปอดีต) ค่า I_{out} เกิดจากผลคูณของค่าคงที่ K_i กับผลรวมของ

$e(t)$ ตั้งแต่เริ่มปรีพัน์จนถึงเวลาปัจจุบัน รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะการตอบสนองของตัวควบคุมแบบโอ เมื่อได้รับสัญญาณอินพุตแบบระดับ ค่า $u(t)$ ณ เวลา t ใดๆ หมายถึงพื้นที่ใต้กราฟของสัญญาณอินพุต จากเวลา 0 ถึง t คูณด้วยอัตราขยายแบบปรีพัน์ ดังนั้นเมื่อเริ่มมีค่าอินพุตแบบระดับ เอาต์พุตที่ออก จากตัวควบคุมจึงมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ ด้วยอัตราคงที่ ในลักษณะรูปสัญญาณความชัน (Ramp Signal)



รูปที่ 2.3 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบโอ

เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบโอร่วมกับตัวควบคุมแบบพี จะช่วยเร่งให้ระบบวิ่งเข้าหา SV เร็วขึ้นและช่วยกำจัดค่าออฟเซตอันอาจเกิดจากการใช้ตัวควบคุมแบบพีอย่างเดียว เนื่องจากเทอมปรีพัน์เกิดจากการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดในอดีตด้วย ซึ่งอาจส่งผลให้ระบบเกิดค่าพุ่งเกินสูงสุด (Maximum Overshoot) เกิน SV ในค่าปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม เทอมปรีพัน์อาจสะสมค่าความคลาดเคลื่อนถึงแม้สัญญาณควบคุมเกินระดับการอิมตัวแล้ว ซึ่งจะส่งผลให้ถึงแม้ว่า PV ถึงค่า SV แล้วสัญญาณควบคุม MV จะยังไม่ลดลงทันทีซึ่งสามารถแก้ไขได้ด้วยการระงับการปรีพัน์ (Anti-Windup) ซึ่งจะอธิบายโดยละเอียดในหัวข้อที่ 2.2.5

2.2.3 ตัวควบคุมแบบดี

ตัวควบคุมแบบดี เอาต์พุตของตัวควบคุมจะเป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงอินพุตความ

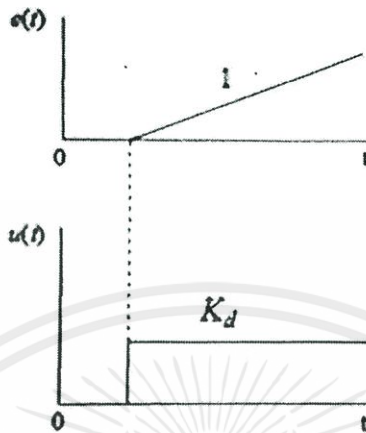
คลาดเคลื่อนเทียบกับเวลา ดังสมการที่ (2.4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u(t) = D_{out} = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.4)$$

เมื่อ K_d คืออัตราขยายแบบอนุพันธ์ (Derivative Gain)



รูปที่ 2.4 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบดี

รูปที่ 2.4 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมแบบดี เมื่อสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณแบบความชัน จากสมการที่ (2.4) จะเห็นว่า ตัวควบคุมแบบดีจะให้สัญญาณออกจากตัวควบคุมมีค่ามากเมื่อค่าอินพุตความคลาดเคลื่อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในอัตราที่สูงก่อนที่ความผิดพลาดจะเกิดขึ้นจริง ฉะนั้นเทอมอนุพันธ์จึงช่วยลดการเกิดค่าพุ่งเกินสูงสุด ซึ่งเกิดจากตัวควบคุมแบบพีหรือแบบไอได้

อย่างไรก็ตาม หากค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าคงที่ตัวควบคุมแบบดีจะไม่มีการสะสมค่าความคลาดเคลื่อน แม้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนจะมีมากก็ตาม ทำให้การควบคุมแบบนี้ ไม่เปลี่ยนแปลงต่อค่าความผิดพลาดที่คงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างช้าๆ ดังนั้นการควบคุมแบบนี้จึงไม่นิยมใช้ตามลำพัง แต่มักใช้ร่วมกับการควบคุมแบบอื่น

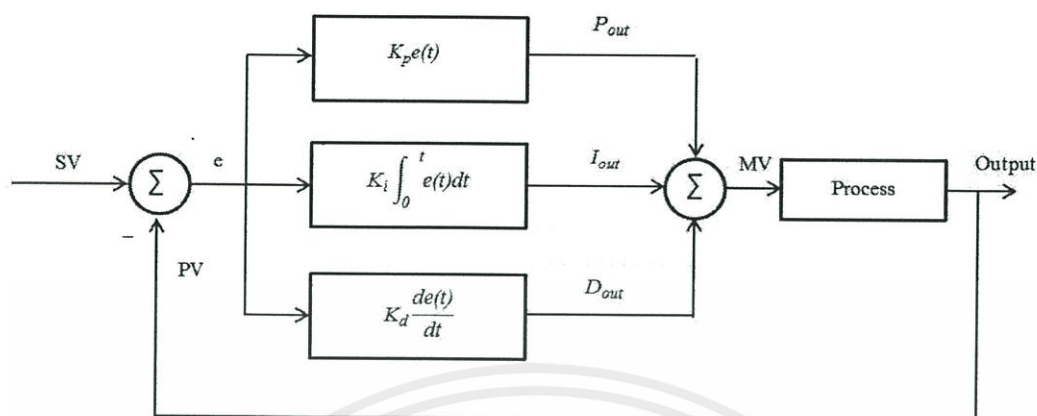
2.2.4 ตัวควบคุมแบบพีไอดี

สัญญาณขาออกของตัวควบคุมแบบพีไอดีเป็นผลจากการรวมของเทอมสัดส่วน, ปริพันธ์ และอนุพันธ์ โดยสัญญาณขาออก $MV(t)$ ตามสมการที่ (2.1) สามารถเขียนได้เป็น

$$MV(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม ลิขสิทธิ์นี้ให้ดัดแปลงเนื้อหา และข้อมูลอ้างอิงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ซึ่งสามารถแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบพีไอดี

และผลจากการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีโดยทั่วไปสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลกระทบจากการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดี

พารามิเตอร์	ช่วงเวลาขึ้น (Rise Time)	ค่าพุ่งเกิน (Overshoot)	เวลาสู่สมดุล (Settling Time)	ความผิดพลาดที่ สถานะคงตัว (Steady-State Error)
K_p	ลด	เพิ่ม	เปลี่ยนแปลง เล็กน้อย	ลด
K_i	ลด	เพิ่ม	เพิ่ม	ลดลงอย่าง มีนัยสำคัญ
K_d	ลดลงเล็กน้อย	ลดลงเล็กน้อย	ลดลงเล็กน้อย	ไม่มีผล

2.2.5 ตัวควบคุมแบบพีไอดีเวลาติสคริต

เนื่องจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เป็นระบบดิจิทัลในการประมวลผล ซึ่งระบบดิจิทัลไม่สามารถคำนวณแบบเวลาต่อเนื่องได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการประมาณการ ดำเนินการสัญญาณเวลาต่อเนื่องจากข้อมูลที่ได้จากการซิกตัวอย่างทุกคาบเวลาการซิกตัวอย่าง

(Sampling Period) T_s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีการควบคุมแบบพีไอทีเวลาติสครีต (Discrete-Time PID Control) ก็พิจารณาสมการการควบคุมแบบพีไอทีเวลาต่อเนื่องในสมการที่ (2.5) โดยประมาณค่าเทอมปริพันธ์และเทอมอนุพันธ์ด้วยวิธีเชิงเลข (Numerical Method) สามารถประมาณการดำเนินการปริพันธ์และอนุพันธ์ได้ดังนี้

สมการเทอมปริพันธ์

$$I_{out} = K_i \int_0^t e(t) dt = K_i T_s \sum_{i=0}^k e[i] \quad (2.6)$$

สมการเทอมอนุพันธ์

$$D_{out} = K_d \frac{de(t)}{dt} = K_d \frac{e[k] - e[k-1]}{T_s} \quad (2.7)$$

และสามารถเขียนสมการการควบคุมแบบพีไอทีเวลาติสครีตได้ดังสมการต่อไปนี้

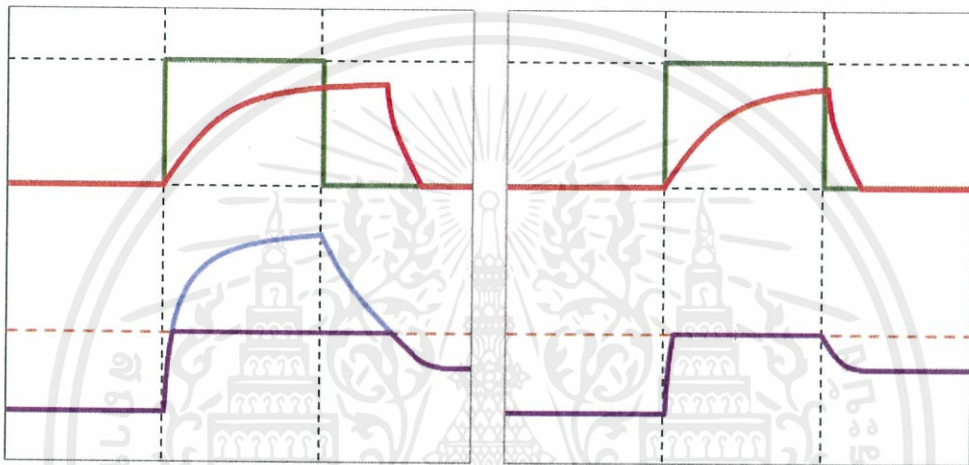
$$MV = u[k] = K_p e[k] + K_i T_s \sum_{i=0}^k e[i] + K_d \frac{e[k] - e[k-1]}{T_s} \quad (2.8)$$

สมการการควบคุมแบบพีไอทีเวลาติสครีตในสมการที่ (2.8) นี้สามารถที่จะนำมาใช้ในการเขียนโปรแกรมควบคุมในตัวควบคุมดิจิทัลได้โดยตรง

2.2.6 การสะสมค่าเกินระดับการอิมิตัวจากการปริพันธ์และการระงับการปริพันธ์

ปรากฏการณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่พบได้ทั่วไปในทางปฏิบัติได้แก่การอิมิตัวของการควบคุม ซึ่งปกติอุปกรณ์ควบคุมสุดท้ายจะมีขีดจำกัดทางกายภาพในการทำงาน ยกตัวอย่างเช่น มอเตอร์ที่มีขีดจำกัดในเรื่องความเร็ว หรือวาล์วที่ไม่สามารถทำงานได้มากกว่าการเปิด/ปิดสุด เป็นต้น โดยสำหรับระบบควบคุมที่มีการทำงานเกินกว่าช่วงของเงื่อนไขนี้จะทำให้ค่าของสัญญาณควบคุมที่คำนวณได้มีค่าเกินกว่าขีดจำกัดของอุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย ซึ่งเป็นสาเหตุเสมือนให้การควบคุมแบบป้อนกลับหรือแบบปิดถูกทำลายและระบบจะดำเนินการด้วยการควบคุมแบบเปิดแทน นั่นคืออุปกรณ์ควบคุมสุดท้ายจะทำงานอยู่ที่ขีดจำกัดของอุปกรณ์หรือเกิดการอิมิตัวอยู่นั่นเอง แต่อย่างไรก็ตามการคำนวณตามเทอมปริพันธ์และค่าสัญญาณควบคุม MV ที่คำนวณได้ ไม่ได้มีการอิมิตัวตามไปด้วย โดยค่าทั้งสองจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากเทอมปริพันธ์ถูกสร้างขึ้นจากการสะสมค่าความคลาดเคลื่อนมาตั้งแต่เริ่มการใช้งานจนถึงปัจจุบัน โดยการเพิ่มขึ้นในส่วนที่เกินกว่าขีดจำกัดของอุปกรณ์จะไม่มีผลต่อ

กระบวนการเลย และจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการก็ต่อเมื่อค่าที่ส่งออกจากตัวควบคุม กลับมาอยู่ช่วงการทำงานของอุปกรณ์ ซึ่งต้องใช้ค่าความคลาดเคลื่อนที่มีเครื่องหมายตรงข้ามและ เวลาที่ค่อนข้างมากในการชดเชยค่าที่สะสมในเทอมปริพันธ์ให้กลับสู่ช่วงการทำงาน จึงทำให้เกิดความ ล่าช้าของผลตอบสนองหรือเอาต์พุตของกระบวนการ ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “การสะสมค่าเกิน ระดับจากการปริพันธ์ (Integral Windup)” ที่สามารถอธิบายได้จากรูปที่ 2.3 (ก)



(ก) เมื่อไม่มีการระงับการปริพันธ์

(ข) เมื่อมีการระงับการปริพันธ์

รูปที่ 2.6 ผลตอบสนองเมื่อไม่มีและมีการระงับการปริพันธ์

โดยที่	เส้นสีเขียว	คือค่าเป้าหมาย SV
	เส้นสีแดง	คือค่าตัวแปรกระบวนการหรือผลตอบสนอง PV
	เส้นสีฟ้า	คือค่าสัญญาณควบคุมจากตัวระบบควบคุม MV
	เส้นสีน้ำเงิน	คือการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย
	เส้นประสีส้ม	คือขีดจำกัดสูงสุดของอุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย

โดยในรูปที่ 2.3 (ก) แสดงถึงระบบที่มีการอิ่มตัวของสัญญาณควบคุมและเกิดการสะสมค่าเกินระดับการอิ่มตัวจากการปริพันธ์ โดยสังเกตว่าระบบมีการสะสมค่าความคลาดเคลื่อนในเทอม

ปริพันธ์มากกว่าขีดจำกัด ทำให้ค่าสัญญาณควบคุมมากกว่าขีดจำกัดด้วย ซึ่งแม้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนจะมีการกลับเครื่องหมายเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายแล้ว แต่ระบบก็ยังต้องใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลาในการสะสมค่าความผิดพลาดให้สามารถชดเชยค่าเพื่อให้สัญญาณควบคุมกลับมาทำงานในช่วงที่ต่ำกว่าขีดจำกัดสูงสุดของอุปกรณ์จึงจะส่งผลให้ผลตอบสนองเกิดการเปลี่ยนแปลง

ปัญหาการสะสมค่าเกินระดับการอิ่มตัวจากการปรีฟันท์ที่กล่าวมาข้างต้นนั้นสามารถแก้ไขได้ด้วยการระงับการปรีฟันท์ โดยจากสมการการประมาณการปรีฟันท์ในเวลาติดครีตตามสมการที่ (2.6) ค่าเอาต์พุต I_{out} สามารถพิจารณาได้ดังสมการที่ (2.9)

$$I_{out}[k]=K_i T_s \sum_{i=0}^k e[i] =K_i T_s (e[k]+\sum_{i=0}^{k-1} e[i]) \quad (2.9)$$

ซึ่งเห็นว่าการสะสมความคลาดเคลื่อน $\sum_{i=0}^k e[i]$ ถูกจำแนกออกเป็น 2 ส่วนคือ ความคลาดเคลื่อนสะสมก่อนหน้า $\sum_{i=0}^{k-1} e[i]$ และความคลาดเคลื่อนปัจจุบัน $e[k]$ ดังนั้นการดำเนินการระงับการปรีฟันท์สามารถทำได้โดยอาศัยเงื่อนไขขึ้นกับค่า MV และ $e[k]$ ดังต่อไปนี้

- ถ้า MV มีค่ามากกว่าขีดจำกัดสูงสุดของอุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย และความคลาดเคลื่อนปัจจุบันมีทิศทางเพิ่มขึ้น ($e[k] > 0$) จะกำหนดผลของการปรีฟันท์คงค่าเดิม หรือเขียนในรูปสมการได้ตามสมการที่ (2.10)

$$I_{out}[k] = I_{out}[k-1] \quad (2.10)$$

- ถ้า MV มีค่าน้อยกว่าขีดจำกัดต่ำสุดของอุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย และความคลาดเคลื่อนปัจจุบันมีทิศทางลดลง ($e[k] < 0$) จะกำหนดผลของการปรีฟันท์คงค่าเดิมได้ตามสมการที่ (2.10) เช่นกัน

- ถ้า MV อยู่ในช่วงการทำงาน of อุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย โดยไม่คำนึงถึงทิศทางของความคลาดเคลื่อนปัจจุบัน จะกำหนดให้มีการปรีฟันท์ตามสมการที่ (2.9)

จากเงื่อนไขข้างต้นสามารถกล่าวอย่างสรุปตามสมการที่ (2.11)

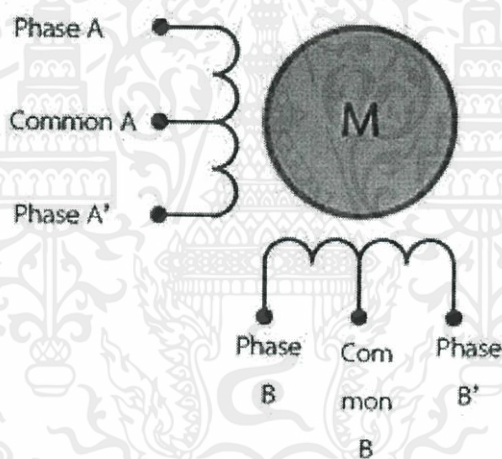
$$I_{out}[k]= \begin{cases} I_{out}[k-1], & MV > \text{Maximum Limit and } e[k] > 0 \\ I_{out}[k-1], & MV < \text{Minimum Limit and } e[k] < 0 \\ I_{out}[k-1]+K_i T_s e[k], & MV \text{ in desired range} \end{cases} \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยตัวอย่างผลจากการระงับการบริพันธ์ในการควบคุมได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.3 (ข) ซึ่งสังเกตว่าผลตอบสนองมีการตอบสนองเร็วขึ้นทันต่อการเปลี่ยนสัญญาณเป้าหมาย เนื่องจากไม่ต้องมีการสะสมสัญญาณความผิดพลาดในทิศทางตรงกันข้ามเพื่อชดเชยค่าในเทอมบริพันธ์ ทำให้ไม่เกิดความล่าช้า อีกทั้งยังช่วยป้องกันการเกิดค่าพุ่งเกินของผลตอบสนองอีกด้วย

2.3 หลักการทำงานของสแต็ปมอเตอร์

ในปริยญาณินพจน์ฉบับใช้สแต็ปมอเตอร์ในการควบคุมการเปิด/ปิดวาล์วโดยจะควบคุมสแต็ปมอเตอร์ให้หมุนอยู่ในช่วง 0 ถึง 90 องศา ซึ่งจะได้เปอร์เซ็นต์การเปิด/ปิดวาล์ว 0-100 เปอร์เซ็นต์โดยสแต็ปมอเตอร์ที่เลือกใช้งานหมุนสแต็ปละ 1.8 องศา โดยสแต็ปมอเตอร์ที่ใช้เป็นแบบ 4 เฟส 6 สาย โดยจะมีสายเฟส (Phase) 4 สาย และสายคอมมอน (Common) 2 สาย ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 วงจรภายในของสแต็ปมอเตอร์

ในการควบคุมมอเตอร์เพื่อให้สแต็ปมอเตอร์หมุน มีวิธีการควบคุมกระแสไฟที่จ่ายให้กับขดลวดสเตเตอร์ (Stator) ในแต่ละเฟสของมอเตอร์ อย่างเป็นลำดับที่แน่นอน โดยถ้าหากต้องการให้กระแสไหลในเฟสใดๆ ก็จะทำให้สถานะของเฟสนั้นๆ เป็นสถานะลอจิก "1" ซึ่งได้ทำการกระตุ้นแบบฟูลสแต็ป 2 เฟส (Full-Step Two Phase) เป็นการป้อนไฟให้กับขดลวด 2 ขด ของมอเตอร์พร้อมๆ กันไป และจะกระตุ้นเรียงถัดกันไปตามตารางที่ 2.2 เช่นเดียวกับแบบหนึ่งเฟส ดังนั้นการกระตุ้นแบบนี้จึงต้องใช้กำลังไฟมากขึ้น แต่จะทำให้มีแรงบิดของมอเตอร์มากกว่าการกระตุ้นแบบ 1 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาร่วมกัน มิใช่เพื่อเผยแพร่เป็นประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 การป้อนสัญญาณแก่ขดลวดของสเต็ปมอเตอร์แบบฟูลสเต็ป 2 เฟส

ลำดับ	ขดลวดที่ 1	ขดลวดที่ 2	ขดลวดที่ 3	ขดลวดที่ 4
1	1	1	0	0
2	0	1	1	0
3	0	0	1	1
4	1	0	0	1

2.4 ทรานสมิทเตอร์

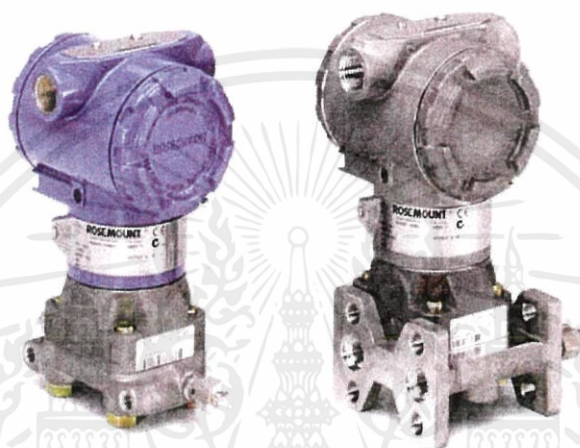
ทรานสมิทเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณทางไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตที่ได้จากทรานสดิวเซอร์ให้เป็นสัญญาณมาตรฐาน แบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ สัญญาณนิวแมติกส์ (Pneumatics Signal) และสัญญาณทางไฟฟ้า (Electrical Signal)

1. สัญญาณนิวแมติกส์ เป็นสัญญาณมาตรฐานที่อยู่ในรูปของความดันลม ใช้ความดันของลมในการควบคุมกระบวนการ ตัวอย่างสัญญาณมาตรฐานชนิดนิวแมติกส์ ได้แก่ 3-15 psi (BS) 0.2-1 bar (SI) และ 0.2-1 kg/cm² (Metric)
2. สัญญาณทางไฟฟ้า เป็นสัญญาณมาตรฐานที่อยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ แรงดันไฟฟ้า 1-5 V และกระแสไฟฟ้า 4-20 mA

ในทางปฏิบัตินิยมออกแบบให้ทรานสมิทเตอร์เป็นส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่องมือวัด ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งภายในเครื่องมือวัดมักประกอบด้วยทรานสดิวเซอร์ที่ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงพลังงานในรูปแบบหนึ่งให้อยู่ในอีกรูปแบบหนึ่ง จากนั้นนำสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากทรานสดิวเซอร์ในบางครั้งต้องนำมาขยาย (Amplified) ลดทอน (Attenuated) รวมกัน (Integrated) ลบกัน (Differentiated) ผสมกัน (Modulated) หรือแปลง (Converted) สัญญาณให้อยู่ในรูปแบบของสัญญาณดิจิทัล และแปลงสัญญาณไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตให้อยู่ในรูปของสัญญาณมาตรฐานด้วยทรานสมิทเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปฏิญญาพันธบัตรฉบับนี้อาศัยระบบควบคุมระดับของเหลวด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ดังนั้น จะใช้อุปกรณ์เครื่องมือวัดหรือทรานสมิตเตอร์แบบวัดความดันแตกต่างระหว่างความดันกันแทงค์กับความดันบรรยากาศ และสัญญาณมาตรฐานที่ได้จากทรานสมิตเตอร์คือสัญญาณกระแสไฟฟ้า 4-20 mA แปรผันไปตามความดันกันแทงค์ที่ระดับ 0- 100 เปอร์เซ็นต์ ด้วยอุปกรณ์ในรูปที่ 2.8



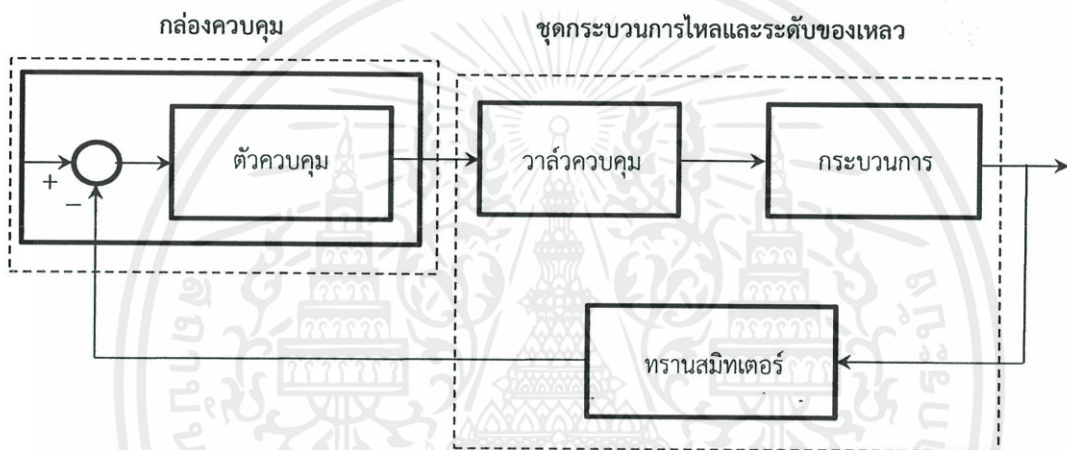
รูปที่ 2.8 ทรานสมิตเตอร์แบบวัดความดันแตกต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและโครงสร้าง

ในโครงงานนี้จะแบ่งงานออกเป็นสองส่วนหลักดังรูปที่ 3.1 คือ กล้องควบคุม และชุดกระบวนการไหลและระดับของเหลว ซึ่งกล้องควบคุมทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมโดยรับสัญญาณจากทรานสมิตเตอร์และส่งสัญญาณควบคุมไปยังอุปกรณ์ควบคุมสุดท้ายซึ่งคือวาล์วควบคุม



รูปที่ 3.1 ภาพรวมของโครงงาน

3.1 กล้องควบคุม

ส่วนของการออกแบบและสร้างกล้องควบคุมในโครงงานนี้มีความจำเป็นต้องใช้พอร์ต ADC (Analog to Digital Converter) และพอร์ต DAC (Digital to Analog Converter) เป็นโครงสร้างหลักในการทำงาน เนื่องจากใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างการประมวลผลภายในไมโครคอนโทรลเลอร์กับอุปกรณ์ภายนอกเพื่อรับสัญญาณอินพุตที่ได้จากเครื่องมือวัดและส่งสัญญาณเอาต์พุตซึ่งเป็นสัญญาณควบคุมไปยังอุปกรณ์ควบคุมสุดท้ายที่มีผลต่อกระบวนการ โดยอ้างอิงจากรูปที่ 3.1 จะพบว่าเครื่องมือที่ใช้ในการวัดคือทรานสมิตเตอร์ และอุปกรณ์ควบคุมสุดท้ายคือวาล์วควบคุมนั่นเอง

ด้วยเหตุนี้ทางคณะผู้จัดทำจึงเลือกใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ET-ARM7 STAMP LPC2138 ของบริษัท อีทีที จำกัด เป็นหน่วยประมวลผลหลักของโครงงาน เนื่องจากบอร์ดนี้มีฟังก์ชันการทำงานเพียงพอต่อความต้องการในการดำเนินโครงงาน อีกทั้งสถาปัตยกรรม ARM7 ยังเป็น

สถาปัตยกรรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ถูกนำไปใช้ในการพัฒนาและผลิตเป็นตัวประมวลผลอย่างมากในปัจจุบัน ดังนั้นจึงมีความน่าสนใจและเป็นโอกาสที่ดีที่จะเรียนรู้และนำมาใช้ในโครงการนี้

3.1.1 คุณสมบัติของ ET-ARM7 STAMP LPC2138

ET-ARM7 STAMP LPC2138 เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล ARM7TDMI-S Core ซึ่งเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ 32-Bit ขนาด 64 Pin แบบใช้พลังงานต่ำเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ประจำบอร์ด ซึ่งบอร์ดนี้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ LPC2138 ของ Philips โดยการออกแบบโครงสร้างของบอร์ดนั้นจะเน้นเรื่องการจัดวางบอร์ดให้มีขนาดเล็กเพื่อให้ง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน โดยได้นำไมโครคอนโทรลเลอร์มาจัดวางจรร่วมกับอุปกรณ์พื้นฐานที่จำเป็นและจัดขาออกมาให้ใช้งานภายนอก ซึ่งการจัดเรียงขาสัญญาณจะทำการจัดเรียงอย่างเป็นระเบียบเพื่อให้สามารถต่อใช้งานได้โดยสะดวก ตัวบอร์ดใช้ไฟ +3.3 V สามารถรองรับสัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณ 5 V ได้ ตัวบอร์ดมีพอร์ตเชื่อมต่อ UART0 (RS-232) จำนวน 1 พอร์ตสำหรับทำการดาวน์โหลดโปรแกรม

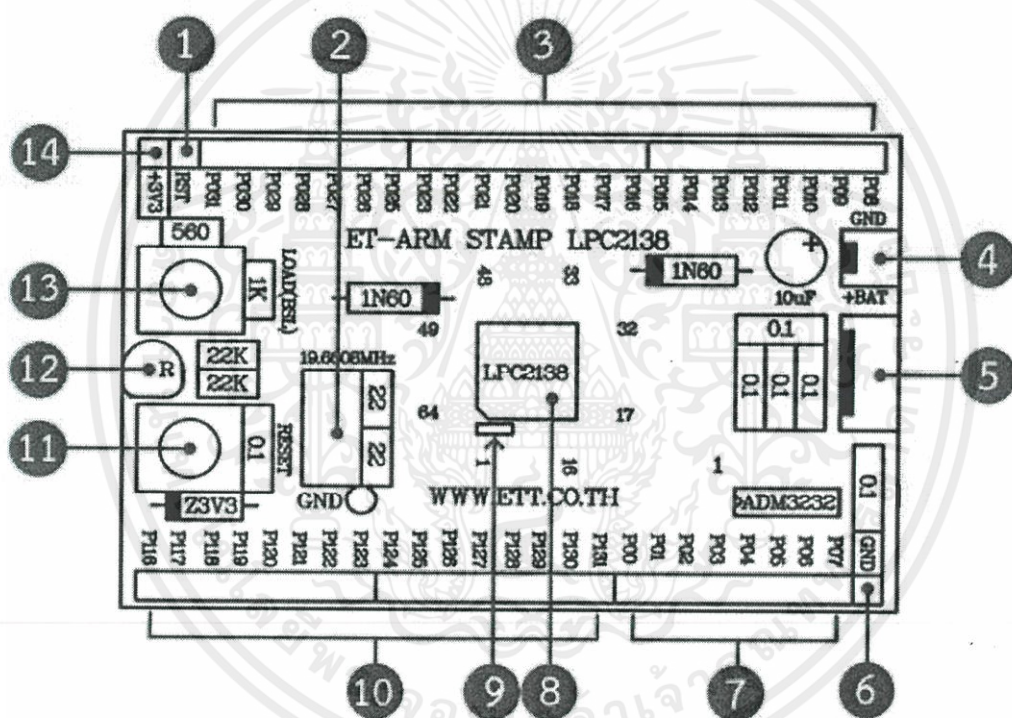
คุณสมบัติด้านการประมวลผล

- ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล ARM7TDMI-S เบอร์ LPC2138 ของ Philips ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 32-Bit
- ใช้ผลึกคริสตัล 19.6608 MHz โดยไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถประมวลผลด้วยความเร็วสูงสุดที่ 58.9824 MHz เมื่อใช้งานร่วมกับ Phase-Locked Loop (PLL) ภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์เอง
- รองรับการโปรแกรมแบบ In-System Programming (ISP) และ In-Application Programming (IAP) ผ่านทาง On-Chip Boot-Loader Software ทางพอร์ต UART0
- ใช้แรงดันไฟฟ้า +3.3 V เท่านั้น (3.0 V – 3.6 V + 10% Error)
- ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์มีหน่วยความจำโปรแกรมแบบ Flash ขนาด 512 KB, หน่วยความจำข้อมูล Static RAM ขนาด 32 KB
- จำนวน GPIO สูงสุดถึง 47 I/O Pins สามารถเชื่อมต่อกับระบบ I/O ที่เป็นสัญญาณ 5 V ได้ ซึ่งขาสัญญาณ GPIO จะมีการใช้งานร่วมกันของฟังก์ชันอื่นๆอีกดังนี้

- SPI จำนวน 2 ช่อง, I2C 2 ช่อง, 8-Channel 10 Bit A/D Converter จำนวน 2 ชุด, 1-Channel 10 Bit D/A Converter

- UART แบบ Full-Duplex จำนวน 2 ช่อง คือ UART 0 มาตรฐาน 4 Pin ETT เป็นสัญญาณระดับ RS232 Level และ UART 1 เป็นสัญญาณระดับ TTL Level
 - Timer 32-bit จำนวน 2 ช่อง (4 Input Capture / 4 Output Compare), 6-Channel PWM
 - Output, Watchdog Timer, Real Time Clock
- อุณหภูมิใช้งานระหว่าง -40 to +85°C

โดยโครงสร้างบอร์ด ET-ARM7 STAMP LPC2138 แสดงดังรูปที่ 3.2 ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่างๆดังนี้



รูปที่ 3.2 โครงสร้างบอร์ด ET-ARM7 STAMP LPC2138

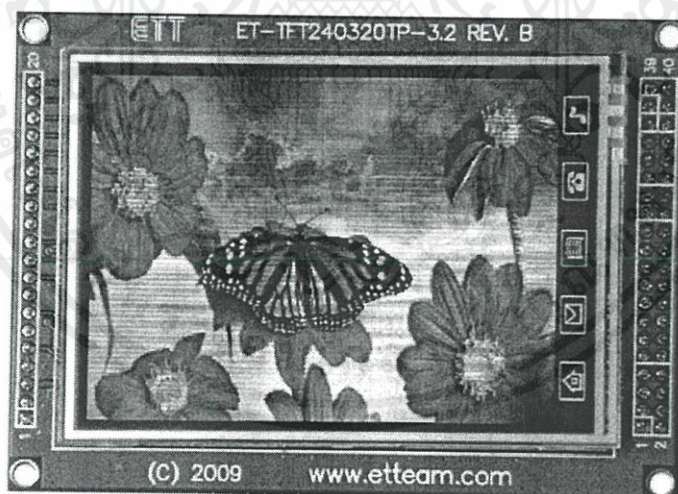
- หมายเลข 1 คือ จุดต่อสัญญาณ RESET สำหรับ Reset อุปกรณ์ภายนอก
- หมายเลข 2 คือ ผลึกคริสตัล 19.6608 MHz
- หมายเลข 3 และ 7 คือ GPIO 0 ตั้งแต่ P0.0 – P0.23 และ P0.25 – P0.31 จำนวนทั้งหมด 31 Pins สามารถรองรับอุปกรณ์ที่มีสัญญาณ I/O เป็น 3.3 V และ 5 V ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของ ETT จำกัด การนำออกจำหน่ายโดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย
 หมายเลข 4 คือ Connector +BAT (VBAT) สำหรับต่อ RTC Power Supply เพื่อจ่ายไฟให้ RTC
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนั้น ETT ขอสงวนสิทธิ์ในข้อมูลและข้อมูลทั้งหมดที่ปรากฏในเอกสารฉบับนี้
 ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจาก ETT

- หมายเลข 5 คือ UART 0 หรือ Serial Port สำหรับติดต่อกับอุปกรณ์มาตรฐาน RS232 และเป็น ISP Download Connector สำหรับโปรแกรม Hex file ลง LPC2138
- หมายเลข 6 คือ จุดต่อกราวด์ และ หมายเลข 14 คือ จุดต่อแหล่งจ่ายไฟ +3.3 V ของบอร์ด
- หมายเลข 8 คือ ไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7TDMI-S LPC2138 ของ Philips
- หมายเลข 9 คือ ออสซิลเลเตอร์ 32.768 KHz ของ Real Time Clock (RTC)
- หมายเลข 10 คือ GPIO 1 ตั้งแต่ P1.16 – P1.31 จำนวนทั้งหมด 16 Pins สามารถรองรับอุปกรณ์ที่มีสัญญาณ I/O เป็น 3.3 V และ 5 V ได้
- หมายเลข 11 คือ สวิตช์ RESET ส่วน หมายเลข 13 คือ สวิตช์ LOAD (BSL)
- หมายเลข 12 คือ หลอดไฟแอลอีดีสีแดง แสดงสถานะในการทำงานของแหล่งจ่ายไฟ

3.1.2 หน้าจอสัมผัส ET-TFT240320TP-3.2 REV.D และการใช้งาน

เพื่อให้กล่องควบคุมที่พัฒนาขึ้นมานี้มีความสะดวกในการใช้งาน จึงได้ออกแบบให้ใช้หน้าจอสัมผัสในการแสดงผลและรับคำสั่งจากผู้ใช้งาน โดยการเลือกใช้โมดูลหน้าจอสัมผัสสำเร็จรูปของบริษัท อีทีที จำกัด เบอร์ ET-TFT240320TP-3.2 REV.D ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 โมดูลหน้าจอสัมผัส ET-TFT240320TP-3.2 REV.D

โมดูลหน้าจอสัมผัส ET-TFT240320TP-3.2 REV.D เป็นโมดูลหน้าจอสัมผัสที่มีขนาด 3.2 นิ้ว

มีความละเอียดในการแสดงผล 240x320 จุด โดยแสดงสีได้ทั้งหมด 65536 เฉดสี และใช้ไฟเลี้ยงเป็น

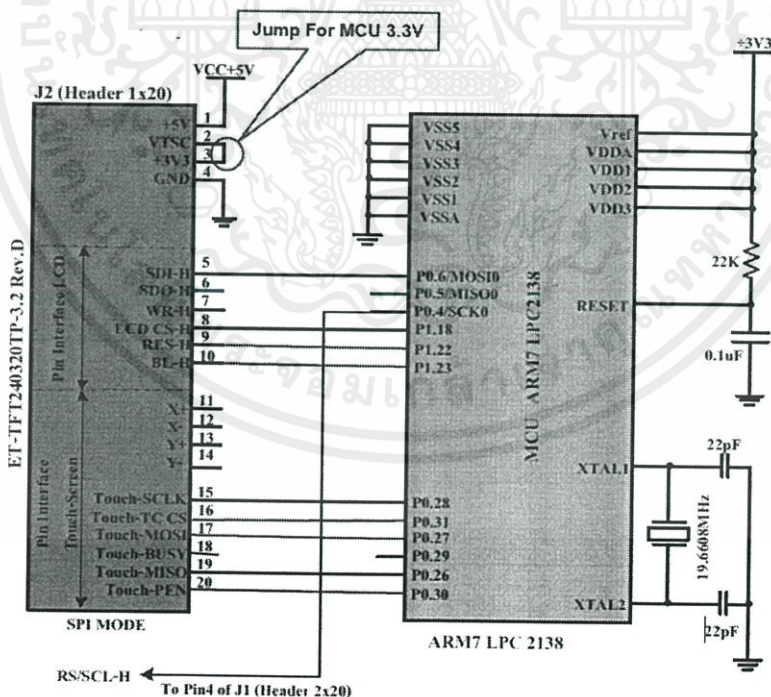
ไฟฟ้ากระแสตรง +5V นอกจากนี้ยังสามารถเชื่อมต่อกับตัวควบคุม ซึ่งเลือกการสื่อสารได้ทั้งหมด 3

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คิดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณาไปใช้
แบบ คือ Parallel Mode 8-bit, Parallel Mode 16-bit และ Serial Mode SPI

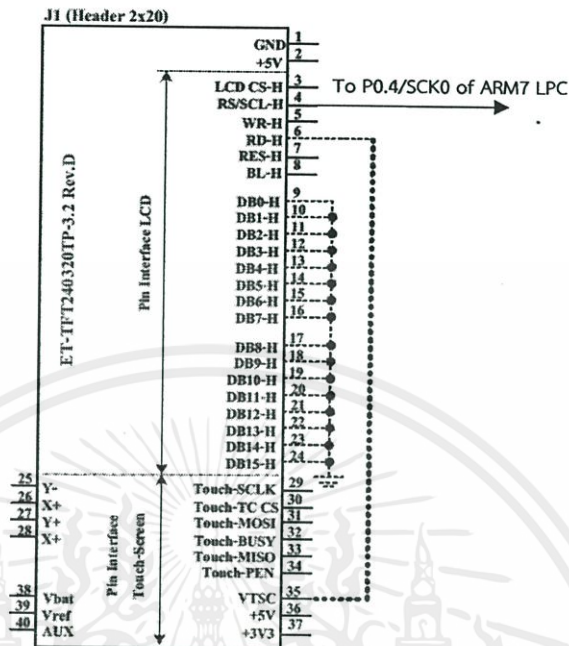
การเชื่อมต่อหน้าจอสัมผัสกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

จากรูปที่ 3.3 สังเกตว่าโมดูลหน้าจอสัมผัสจะแบ่งขาออกเป็น 2 ฝั่งของหน้าจอส คือฝั่งซึ่งมี 2 แถวซึ่งเรียกว่า Header 2x20 และฝั่งซ้ายฝั่ง 1 แถวจะเรียกว่า Header 1x20 โดยในการเชื่อมต่อหน้าจอสัมผัสกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับการสื่อสารแบบ Parallel Mode 8-bit และ 16-bit จะใช้ Header 2x20 ในการเชื่อมต่อ ในขณะที่การสื่อสารแบบ Serial Mode SPI จะใช้ Header 1x20 และขา RS/SCL-H (ขาที่ 4) ของ Header 2x20 ซึ่งในการสื่อสารนี้จะทำหน้าที่เป็นขาจับสัญญาณนาฬิกา (SCLK)

โครงการนี้เลือกการสื่อสารกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ Serial Mode SPI ซึ่งมีการเชื่อมต่ออุปกรณ์ระหว่างบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ET-ARM7 STAMP LPC2138 และบอร์ดหน้าจอสัมผัส ET-TFT240320TP-3.2 REV.D ได้ดังรูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.5 โดยในฝั่ง Header 2x20 รูปที่ 3.5 ขาที่ 6 จะถูกต่อเข้ากับขาที่ 35 และสังเกตว่าขา 9 ถึง 24 ซึ่งใช้ในการรับส่งแบบ Parallel ซึ่งไม่ได้เลือกใช้งานในโมดูลนี้จะถูกต่อลงกราวด์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.4 การต่อ ET-ARM7 STAMP LPC2138 กับจอ ET-TFT240320TP-3.2 REV.D
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



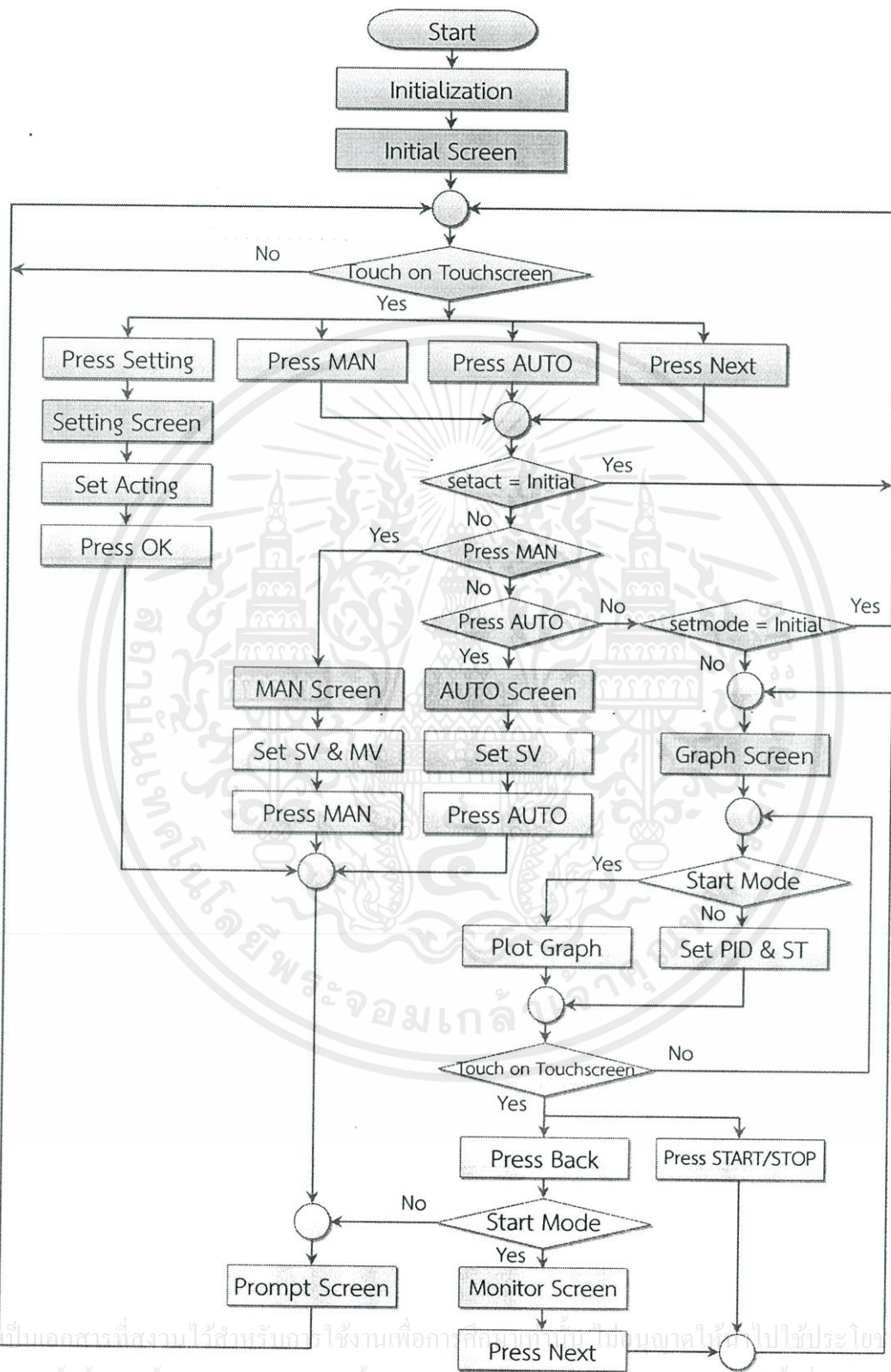
รูปที่ 3.5 การต่อขาที่ไม่มีการใช้งานของจอ ET-TFT240320TP-3.2 REV.D

3.1.3 โปรแกรมส่วนกราฟิกและการสัมผัส

จากการวางแผนการใช้งานและฟังก์ชันภายในกล่องควบคุมอย่างคร่าวๆ ทำให้สามารถเขียนโพล์ชาร์ตของโปรแกรมได้ดังรูปที่ 3.6 ซึ่งจากโพล์ชาร์ตนี้จะแยกรายละเอียดของโปรแกรมในส่วนกราฟิกและการสัมผัสออกได้ดังนี้

1. การกำหนดค่าเริ่มต้น (Initialization) โดยกำหนดให้

- ค่าโหมดการทำงาน (MAN/AUTO) เริ่มต้นเป็น 1 (setmode = 1)
- ค่าสถานะการทำงาน (Start/Stop) เริ่มต้นเป็น 0 (setrun = 0) คืออยู่ในสถานะหยุดทำงาน
- ค่าชนิดของอุปกรณ์ควบคุมตัวสุดท้ายที่เชื่อมต่อกับตัวควบคุม (Forward/Reverse) เริ่มต้นเป็น 1 (setact = 1)
- ค่าการออกจากหน้าโหมดการทำงาน (Mode/Next) เริ่มต้นเป็น 1 (nextadd = 1)
- ค่าเป้าหมาย (set point) เริ่มต้นเป็น 0 (SV = 0)
- ค่าที่ออกจากตัวควบคุมในโหมดแมนนวล (Manual) เริ่มต้นเป็น 0 (MV = 0)
- ค่าที่ออกจากตัวควบคุมในโหมดอัตโนมัติ (Automatic) เริ่มต้นเป็น 0 (MVA = 0)
- ค่าตัวแปรกระบวนการ (Process Variable) เริ่มต้นเป็น 0 (PV = 0)



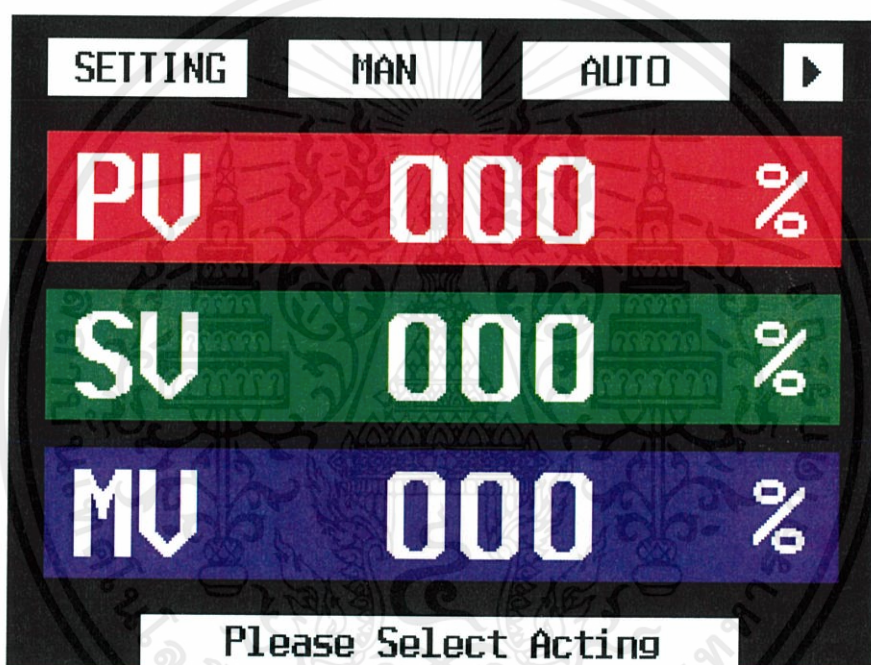
รูปที่ 3.6 โฟลว์ชาร์ตของโปรแกรมส่วนกราฟิกและการสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ค่าตัวควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional) เริ่มต้นเป็น 0 ($P = 0$)
- ค่าตัวควบคุมแบบปริพันธ์ (Integral) เริ่มต้นเป็น 0 ($I = 0$)
- ค่าตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative) เริ่มต้นเป็น 0 ($D = 0$)
- ค่าช่วงเวลาในการชั่งตัวอย่าง (Sampling Time) เริ่มต้นเป็น 0 ($ST = 0$)

2. การกำหนดหน้าจอเริ่มต้น (Initial Screen)

ได้ออกแบบการแสดงผลกราฟิกหน้าจอเริ่มต้นได้ดังรูปที่ 3.7



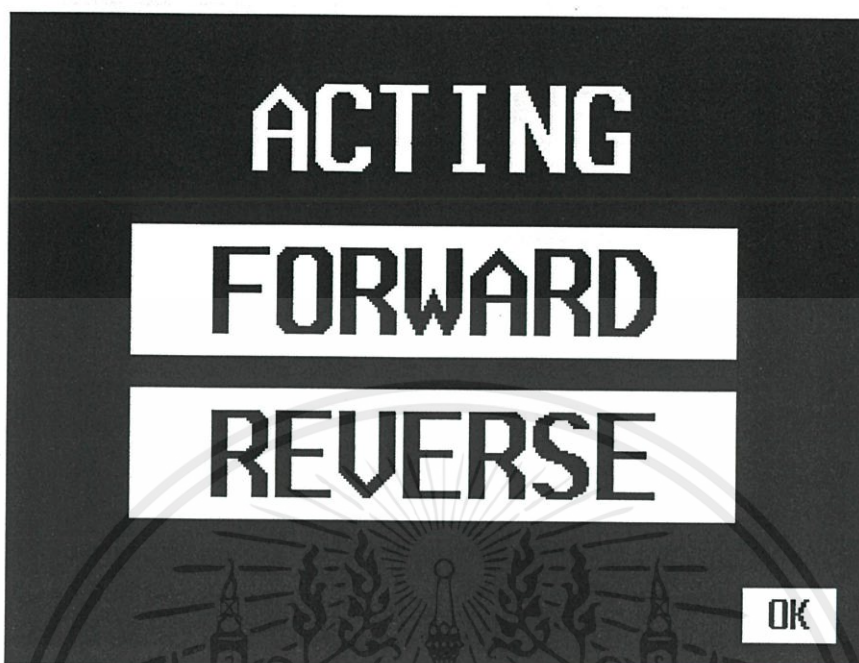
รูปที่ 3.7 หน้าจอเริ่มต้น

โดยที่หน้าจอเริ่มต้นนี้จะไม่สามารถกดไปที่ปุ่มใดๆได้ยกเว้นปุ่ม Setting ซึ่งเป็นการบังคับให้มีการเลือกชนิดของอุปกรณ์ควบคุมตัวสุดท้ายที่เชื่อมต่อกับตัวควบคุมก่อน

3. การกำหนดหน้าจอการตั้งค่า (Setting Screen)

เมื่อมีการกดปุ่ม Setting หน้าจอจะแสดงกราฟิกดังรูปที่ 3.8 โดยปุ่ม Setting นี้จะไม่สามารถกดได้เมื่อค่าสถานะการทำงานมีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งหมายถึงกำลังมีการทำงานอยู่ในสถานะสตาร์ท หรือกำลังรันโปรแกรมอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



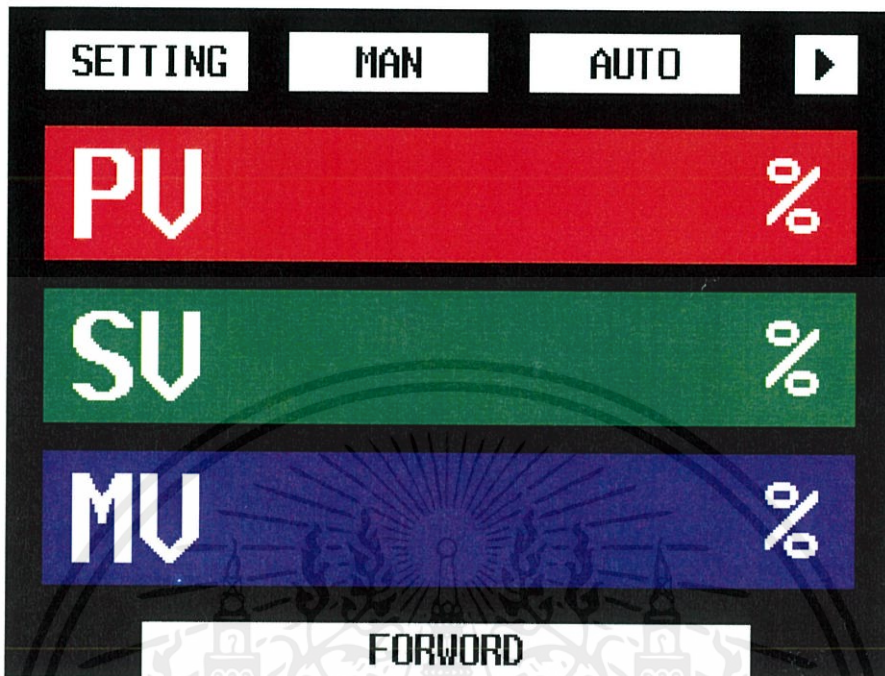
รูปที่ 3.8 หน้าจอตั้งค่า

โดยการแสดงกราฟิกในหน้าจอการตั้งค่านี้จะขึ้นอยู่กับค่าชนิดของอุปกรณ์ควบคุมตัวสุดท้ายที่เชื่อมต่อกับตัวควบคุม (setact) โดยมีการแสดงผลดังนี้

- ถ้าชนิดของอุปกรณ์ควบคุมตัวสุดท้ายเป็นค่าเริ่มต้น (setact = 1) กราฟิกจะแสดงแถบคำสั่งทั้ง FORWARD และ REVERSE เป็นสีขาว
- ถ้าชนิดของอุปกรณ์ควบคุมตัวสุดท้ายเป็นแบบไปข้างหน้า (Forward Acting) (setact = 0) กราฟิกจะแสดงแถบคำสั่ง FORWARD สีแดง และแถบคำสั่ง REVERSE เป็นสีขาว
- ถ้าชนิดของอุปกรณ์ควบคุมตัวสุดท้ายเป็นแบบไปข้างหน้า (setact = 2) กราฟิกจะแสดงแถบคำสั่ง FORWARD สีขาว และแถบคำสั่ง REVERSE เป็นสีแดง

ซึ่งสามารถออกจากหน้าจอการตั้งค่าได้โดยการกดปุ่ม OK ที่มุมล่างทางขวามือ และเมื่อเลือกชนิดของอุปกรณ์ควบคุมตัวสุดท้ายแล้ว (setact = 0 หรือ 2) การแสดงกราฟิกบนหน้าจอเมื่อออกจากหน้าจอการตั้งค่าจะแสดงดังรูปที่ 3.9 โดยแถบข้อความด้านล่างจะแสดงถึงชนิดของอุปกรณ์ควบคุมตัวสุดท้ายที่ได้ทำการเลือก ซึ่งหน้าจอนี้เรียกว่าหน้าจอพร้อมใช้งาน (Prompt Screen)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 หน้าจอพร้อมใช้งาน

4. การกำหนดหน้าจอโหมดการทำงานแบบโหมดแมนนวลและอัตโนมัติ (MAN Screen and AUTO Screen)

การตั้งค่าโหมดการทำงานสามารถเลือกได้โดยการกดปุ่ม MAN หรือ AUTO ซึ่งหมายถึงการเลือกโหมดการทำงานแบบแมนนวลหรืออัตโนมัติตามลำดับ ซึ่งปุ่มตั้งค่าโหมตการทำงานนี้จะไม่สามารถกดได้เมื่อมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

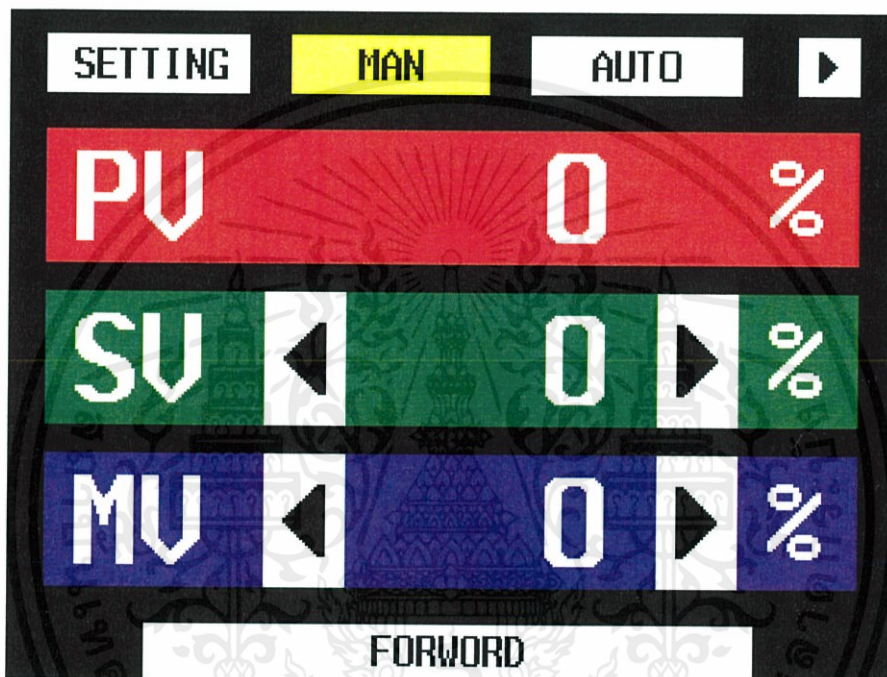
- ค่าสถานะการทำงาน (setrun) มีค่าเป็น 1 ซึ่งหมายถึงตัวควบคุมอยู่ในสถานะทำงานอยู่
- ค่าชนิดของอุปกรณ์ควบคุมตัวสุดท้ายที่เชื่อมต่อกับตัวควบคุมมีค่าเริ่มต้น
- ค่าโหมตการทำงาน (setmode) มีค่าไม่เป็น 1 ซึ่งหมายถึงตัวควบคุมอยู่ในโหมดการทำงานแบบแมนนวลหรืออัตโนมัติที่ตรงข้ามกับโหมตการทำงานที่ต้องการเลือกอยู่

โดยที่การแสดงผลกราฟิกในหน้าจอโหมตการทำงานนี้จะขึ้นอยู่กับค่าโหมตการทำงาน โดยมีการแสดงผลดังนี้

- ถ้าโหมตการทำงานเป็นค่าเริ่มต้น (setmode = 1) กราฟิกจะแสดงแถบคำสั่งทั้ง MAN และ AUTO เป็นสีขาว ซึ่งหมายถึงว่ายังไม่มีทางเลือกโหมตการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ถ้าโหมดการทำงานเป็นแบบแมนนวล (setmode = 0) กราฟิกจะแสดงแถบคำสั่ง MAN เป็นสีเหลือง และแถบคำสั่ง AUTO เป็นสีขาว
- ถ้าโหมดการทำงานเป็นแบบอัตโนมัติ (setmode = 2) กราฟิกจะแสดงแถบคำสั่ง MAN เป็นสีขาว และแถบคำสั่ง AUTO เป็นสีเหลือง

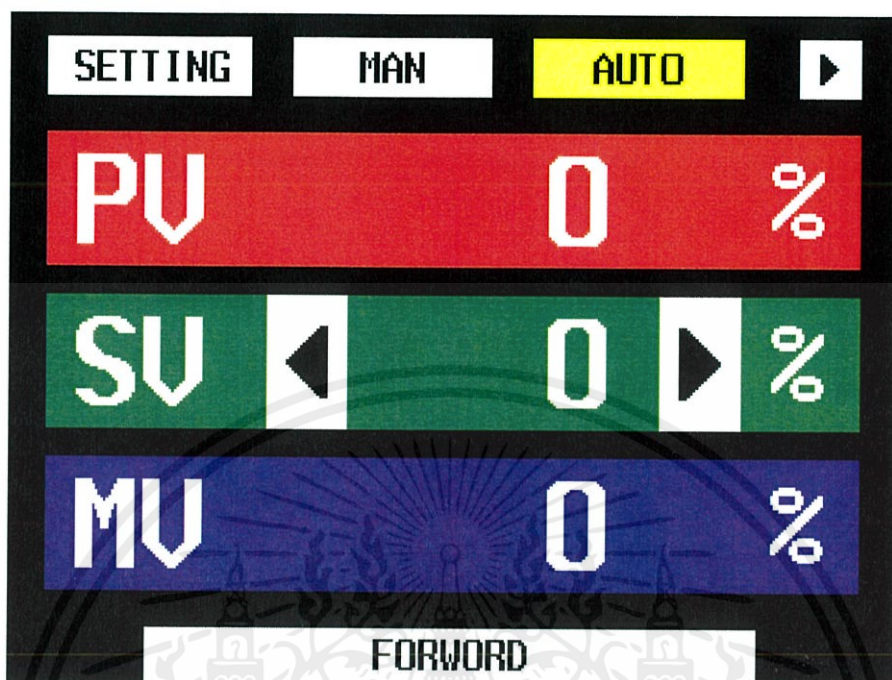


รูปที่ 3.10 หน้าจอโหมดแมนนวล

โดยการแสดงกราฟิกในหน้าจอโหมดการทำงานตามในรูปที่ 3.10 และรูปที่ 3.11 นี้จะแสดงผล โดยค่าทั้งหมดจะมีหน่วยในรูปของเปอร์เซ็นต์ของกระบวนการหรือวาล์ว ซึ่งถ้าตัวควบคุมมีโหมดการทำงานเป็นแบบแมนนวลจะสามารถที่จะปรับค่า SV และ MV ได้โดยการสัมผัสบนหน้าจอ บริเวณที่มีลูกศรเพื่อทำการเพิ่มหรือลดค่า เช่นเดียวกับกับโหมดการทำงานแบบแมนนวล ในกรณีที่ตัวควบคุมมีโหมดการทำงานเป็นแบบอัตโนมัติ ก็จะสามารถที่จะปรับค่า SV ได้เช่นกัน

เมื่อต้องการที่จะออกจากโหมดการทำงาน หรือต้องการเปลี่ยนโหมดการทำงาน หรือต้องการให้โหมดการทำงานเป็นค่าเริ่มต้น ให้กดปุ่มโหมดที่ทำงานอยู่ซ้ำอีกครั้งหนึ่งเป็นการออกจากโหมดการทำงานที่ใช้อยู่ไปโหมดการทำงานเริ่มต้น

เอกสารนี้จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 หน้าจอโหมดอัตโนมัติ

5. การกำหนดหน้าจอแสดงผลกราฟ (Graph Screen)

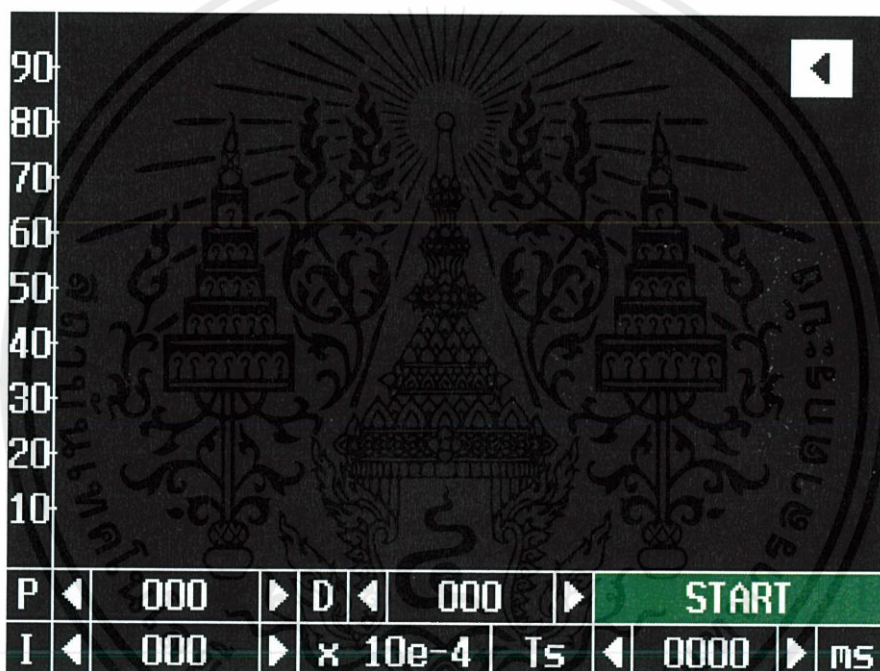
หลังจากที่มีการตั้งค่าโหมดการทำงานและค่าชนิดของอุปกรณ์ควบคุมตัวสุดท้ายเรียบร้อยแล้ว ซึ่งหมายความว่าค่าโหมดการทำงานและค่าชนิดของอุปกรณ์ควบคุมตัวสุดท้ายจะต้องไม่เป็นค่าเริ่มต้น (setmode \neq 1 และ setact \neq 1) จะสามารถกดปุ่มถัดไป (next) ที่มีลักษณะเป็นรูปลูกศรด้านบนขวามือได้ โดยการกดปุ่มถัดไปนี้จะนำเข้าสู่หน้าจอแสดงผลกราฟที่แสดงกราฟิกตามรูปที่ 3.12

จะเห็นจากรูปที่ 3.12 ว่าในหน้าจอแสดงผลกราฟนี้สามารถที่จะปรับค่าช่วงเวลาในการชักตัวอย่างซึ่งอธิบายด้วยกราฟิกคำว่า “Ts” และค่าที่ใช้ในการคำนวณเพื่อควบคุมแบบอัตโนมัติ นั่นคือ อัตราขยายของค่าตัวควบคุมแบบสัดส่วน ตัวควบคุมแบบปริพันธ์ และตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ ซึ่งนำไปใช้ในฟังก์ชันควบคุมแบบพีไอดีเพื่อคำนวณหาค่าที่ออกจากตัวควบคุมในโหมดอัตโนมัติ (MVA) ที่ใช้ในการควบคุมอุปกรณ์ควบคุมสุดท้ายนั่นเอง โดยสามารถที่จะปรับค่าเหล่านี้ได้โดยการสัมผัสบนหน้าจอบริเวณที่เป็นลูกศรของค่านั้นเพื่อทำการเพิ่มหรือลดค่าซึ่งสามารถปรับได้ตามช่วงในตารางที่

3.1 โดยจะเห็นว่าค่าตัวควบคุมแบบปริพันธ์นั้นมีการปรับเพิ่มหรือลดทีละ 1 แต่ค่านี้มีการนำไปปรับอัตราส่วนโดยการคูณกับ 10^{-4} ซึ่งได้มีการแสดงกราฟิกไว้ตามรูปที่ 3.12 ทำให้การเพิ่มหรือลดตามความจริงนั้นจะมีค่าเท่ากับ 0.0001 เท่านั้น

ตารางที่ 3.1 ช่วงการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีในกล่องควบคุม

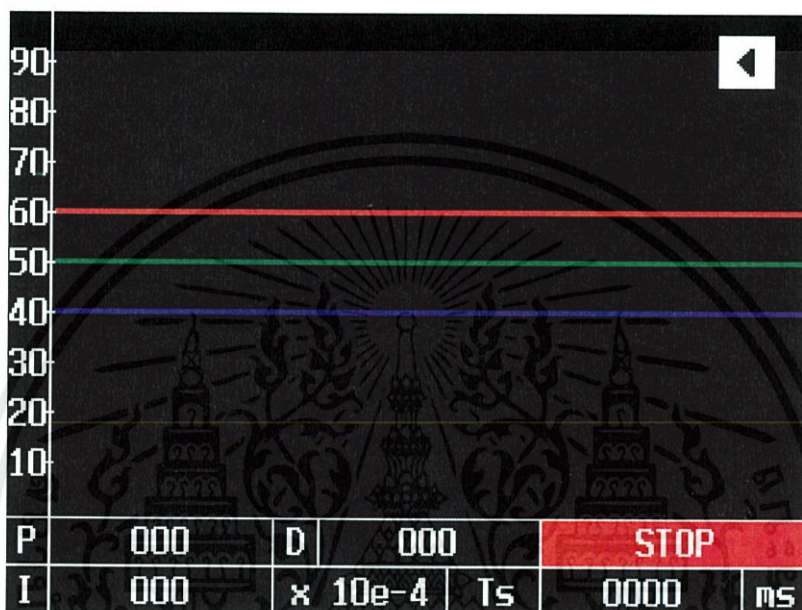
พารามิเตอร์	ตัวย่อ	ช่วงการปรับ	การเพิ่ม/ลด
อัตราขยายของตัวควบคุมแบบสัดส่วน	P	0 - 999	1
อัตราขยายของตัวควบคุมแบบปริพันธ์	I	0 - 999	1
อัตราขยายของตัวควบคุมแบบอนุพันธ์	D	0 - 999	1
ช่วงเวลาในการซึกตัวอย่าง	ST	0 - 1000	1



รูปที่ 3.12 หน้าจอกราฟเมื่อเริ่มต้น

ทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนหน้าจอกอื่นมาที่หน้าจอกกราฟ กราฟที่แสดงหน้าจอกกราฟจะเป็นหน้าจอกเริ่มต้นตามรูปที่ 3.12 และเมื่อมีการกดปุ่ม START สีเขียวจะทำให้ค่าสถานะการทำงานจะเปลี่ยนจาก 0 เป็น 1 และแถบคำสั่งจะเปลี่ยนจากแถบ START สีเขียวเป็นแถบ STOP สีแดง ซึ่งหมายถึงสถานะในการทำงานของตัวควบคุมถูกเปลี่ยนจากหยุดเป็นเริ่มทำงาน โดยที่กราฟของค่าตัวแปรกระบวนการที่ควบคุม (PV), ค่าเป้าหมายของกระบวนการที่ต้องการควบคุม (SV) และค่าที่ออกจากตัวควบคุม (MV) จะแสดงดังรูปที่ 3.13 ซึ่งในการพล็อตกราฟจะมีความเร็วในการพล็อตกราฟไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ แปรผันไปตามค่าช่วงเวลาในการซึกตัวอย่าง นั่นคือจะพล็อตกราฟทุกๆ 100 เท่าของช่วงเวลาซึก

ตัวอย่าง เช่น กำหนดค่าช่วงเวลาชักตัวอย่างเท่ากับ 1 ms จะทำให้มีการพล็อตกราฟทุกๆ 100 ms นั้นเอง และจะมีการวนกลับมาพล็อตที่ตำแหน่งเดิมหากว่ากราฟพล็อตไปสุดหน้าจอแล้ว รวมถึงระหว่างการพล็อตกราฟนี้ จะไม่สามารถทำการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้

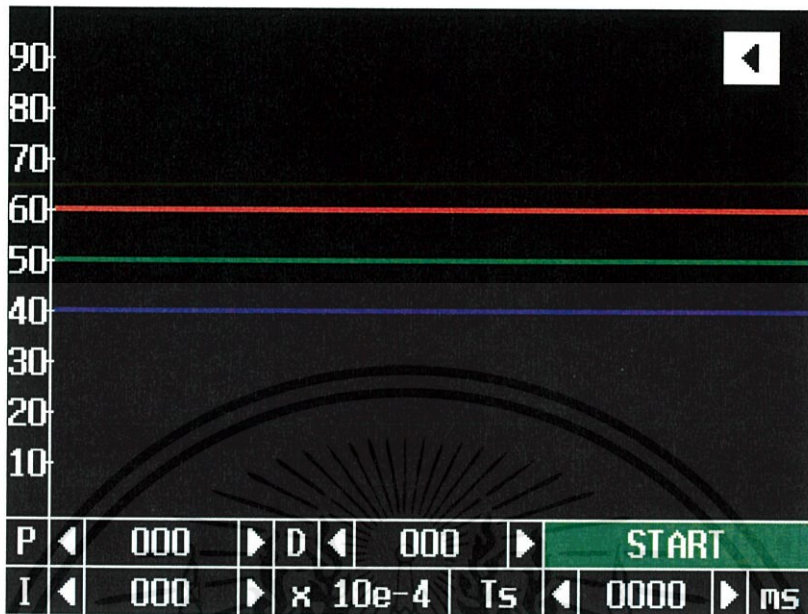


รูปที่ 3.13 หน้าจอกราฟเมื่อกดปุ่มเริ่มต้น

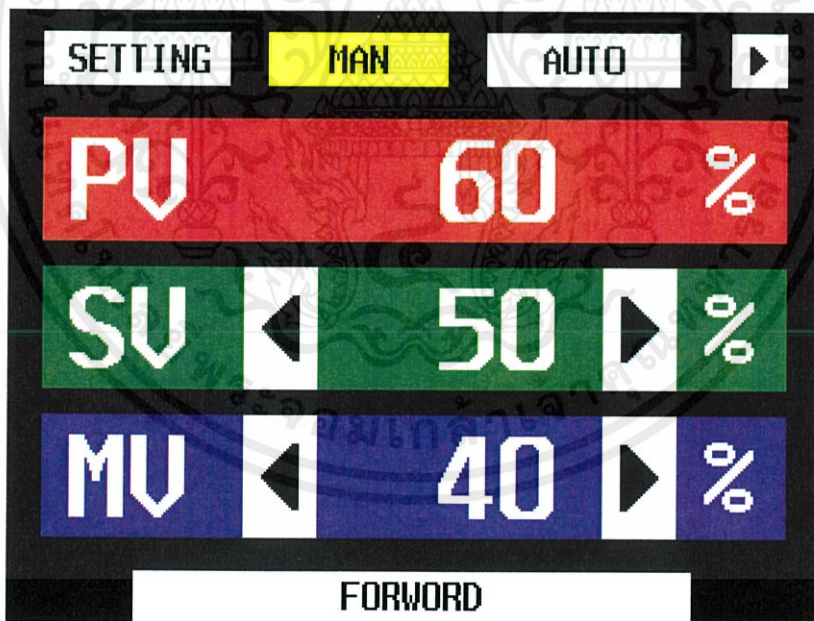
ในกรณีกลับกันหากว่าต้องการหยุดการทำงานของตัวควบคุมให้กดปุ่ม STOP สีแดงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าสถานะการทำงานจาก 1 เป็น 0 และแถบคำสั่งจะเปลี่ยนจากแถบ STOP สีแดงเป็นแถบ START สีเขียว ซึ่งหมายถึงสถานะในการทำงานของตัวควบคุมถูกเปลี่ยนจากที่ทำงานอยู่เป็นหยุดการทำงาน โดยกราฟที่แสดงบนหน้าจอกราฟจะค้างไว้ตามที่พล็อตครั้งสุดท้ายตามรูปที่ 3.14 และจะสามารถกลับมาปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้ดังเดิม

การแสดงผลการพิกเมื่อกดปุ่มย้อนกลับ (back) จะขึ้นอยู่กับค่าสถานะการทำงาน โดยจะแสดงผลการพิกดังนี้

- ถ้าสถานะการทำงานของตัวควบคุมอยู่ในสถานะหยุดทำงาน กราฟพิกจะแสดงตามรูปที่ 3.15 ซึ่งหากต้องการจะปรับค่าพารามิเตอร์ที่ออกจากตัวควบคุมหรือค่าเป้าหมายของกระบวนการที่ต้องการควบคุม ให้กดที่ปุ่มโหมดที่ทำงานอยู่ (แถบที่แสดงสีเหลือง) ซ้ำถึงจะทำการปรับค่าได้ โดยขั้นตอนต่อจากนี้จะซ้ำกับขั้นตอนการตั้งค่าโหมดการทำงาน

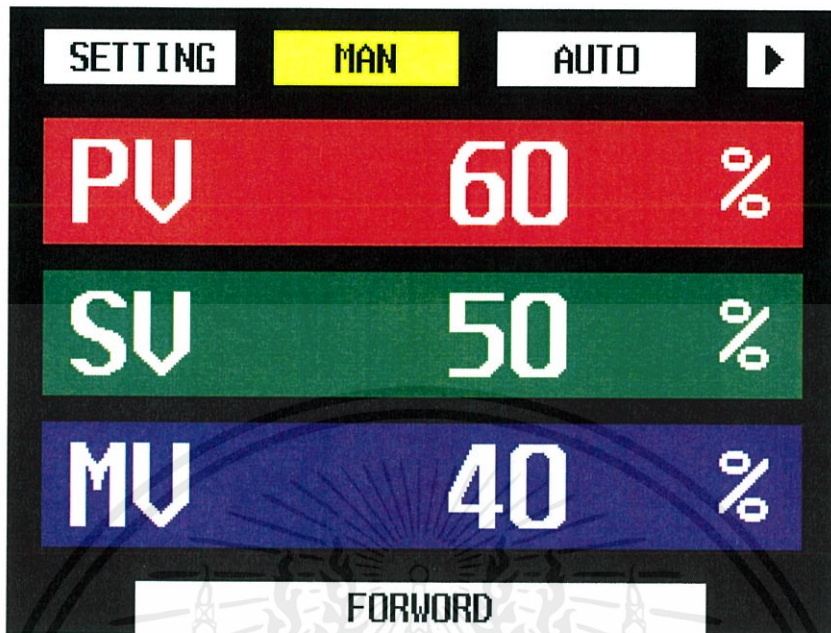


รูปที่ 3.14 หน้าจอกราฟเมื่อกดปุ่มหยุด



รูปที่ 3.15 หน้าจอหลักเมื่ออยู่ในสถานะหยุดทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 หน้าจอหลักเมื่ออยู่ในสถานะทำงานอยู่หรือหน้าจอมอนิเตอร์

- ถ้าสถานะการทำงานของตัวควบคุมอยู่ในสถานะทำงานอยู่ (setrun = 1) กราฟิกจะแสดงตามรูปที่ 3.16 ซึ่งเรียกหน้าจอนี้ว่าหน้าจอมอนิเตอร์ (Monitor Screen) โดยจะแสดงค่าพารามิเตอร์ตัวแปรกระบวนการที่ควบคุม, เป้าหมายของกระบวนการที่ต้องการควบคุม และค่าที่ออกจากตัวควบคุมในรูปของเปอร์เซ็นต์ โดยเปลี่ยนแปลงไปตามช่วงเวลาการชักตัวอย่างที่ตั้งค่าไว้ในหน้าจอกราฟ ในหน้าจอโหมดที่ทำงานอยู่นี้จะไม่สามารถกดปุ่มใดๆบนหน้าจอได้นอกจากปุ่มถัดไป ซึ่งจะย้อนกลับสู่หน้าจอเดิม ถ้าหากต้องการแก้ไขค่าพารามิเตอร์ต่างๆจะต้องกดปุ่ม STOP ก่อน ซึ่งหมายถึงเป็นการหยุดการทำงานนั่นเอง

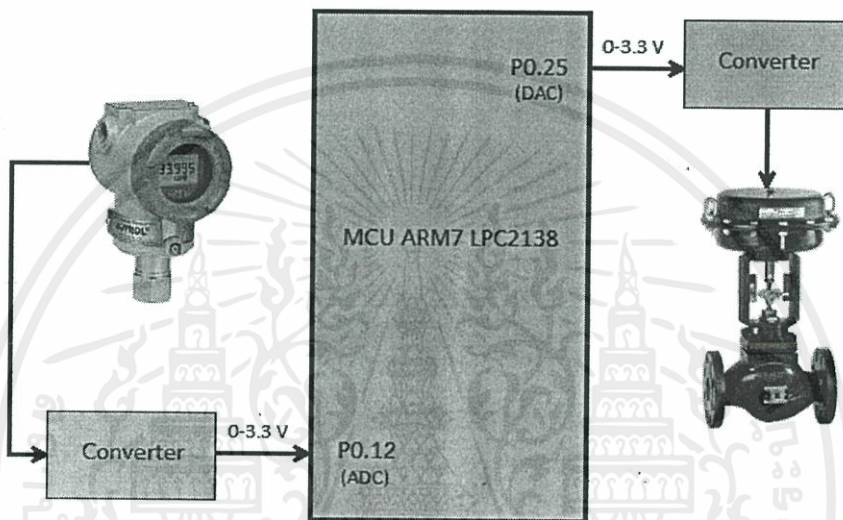
โดยการทำงานของกราฟิกบนหน้าจอนี้จะทำงานก็ต่อเมื่อมีการจ่ายไฟให้กับตัวไมโครคอนโทรลเลอร์และหน้าจอสัมผัส และจะทำงานวนลูปตามที่ได้อธิบายไปแล้วจนกระทั่งหยุดการจ่ายไฟจึงหยุดการทำงาน

3.1.4 โปรแกรมรับส่งค่าออกจากไมโครคอนโทรลเลอร์

ในการสร้างกล่องควบคุมระดับของของเหลวนี้ได้ออกแบบให้สามารถรับอินพุตได้ 1 อินพุต จากเครื่องมือวัด เช่น เซนเซอร์หรือทรานสมิเตอร์โดยสัญญาณของเครื่องมือวัดเหล่านี้จะต้องอยู่ในรูปของสัญญาณมาตรฐาน 4-20 mA และส่งออกเอาต์พุตได้ 1 เอาต์พุตไปที่อุปกรณ์ควบคุมสุดท้ายใช้

เช่น วาล์ว โดยสัญญาณที่ส่งออกนี้จะอยู่ในรูปของสัญญาณมาตรฐาน 1-5 V เช่นกัน ซึ่งการแปลงสัญญาณเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นจะกล่าวถึงในหัวข้อ 3.1.7.1

จากการออกแบบข้างต้นจึงทราบพอร์ตของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในการรับอินพุตสัญญาณอินพุตคือพอร์ต ADC และใช้ในการส่งออกสัญญาณเอาต์พุตคือพอร์ต DAC โดยในที่นี้ใช้ขา P0.12 เป็น ADC และใช้ขา P0.25 เป็นขา DAC ตามรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 การเชื่อมต่อวงจรในการรับส่งสัญญาณข้อมูล

โดยโปรแกรมที่ใช้ในการรับสัญญาณอินพุตสามารถเขียนเป็นฟังก์ชันได้ดังในรูปที่ 3.18

```
void adc_read(void)
{
    AD1CR = 0x01210608;
    do
    {
        PV = AD1DR;
    }
    while ((PV & 0x80000000) == 0);
    PV = (PV >> 6) & 0x03FF;
    VPV = (PV*100)/1023.0;
    if (VPV < 0) {VPV = 0;}
    if (VPV > 100) {VPV = 100;}
}
```

รูปที่ 3.18 ฟังก์ชันในการรับสัญญาณอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลที่พอร์ต ADC อ่านได้นั้นคือค่าตัวแปรกระบวนการ โดยในตอนแรกนั้นจะอยู่ในรูปของเลขฐานสิบหกจำนวน 10 บิตซึ่งมีจำนวนทั้งหมด 1024 ค่าคือ 0 ถึง 1023 ดังนั้นจึงต้องแปลงค่าให้อยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์เพื่อใช้ในการแสดงผลและการคำนวณต่อไป โดยมีการจำกัดค่าของตัวแปรที่ต้องการควบคุม ให้อยู่ในช่วง 0 ถึง 100

ในการทำงานเกี่ยวกับการรับสัญญาณอินพุต การส่งออกสัญญาณเอาต์พุตก็มีฟังก์ชันเช่นเดียวกัน ซึ่งเขียนได้ดังในรูปที่ 3.19 โดยข้อมูลที่จะสามารถส่งออกจากพอร์ต DAC ได้นั้นจะต้องอยู่ในรูปของเลขฐานสิบหกจำนวน 10 บิต ดังนั้นจึงต้องแปลงค่าจากจำนวน 0 ถึง 100 ในรูปเปอร์เซ็นต์เป็นจำนวน 0 ถึง 1023 เพื่อให้อยู่ในรูปของเลขฐานสิบหกจำนวน 10 บิต

```
void dac_write(float value)
{
    unsigned int val16;
    val16 = ((value/100)*1023.0);
    DACR = ((val16 & 0x03FF) << 6);
}
```

รูปที่ 3.19 ฟังก์ชันในการส่งสัญญาณเอาต์พุต

3.1.5 โปรแกรมการควบคุมแบบพีไอดี

ในโหมดการควบคุมแบบอัตโนมัติ นั้น ค่าที่ออกจากตัวควบคุมจะไม่เหมือนกับโหมดแมนนวลที่สามารถจะปรับได้ด้วยมือ แต่ในโหมดนี้จะต้องมีการคำนวณผ่านตัวควบคุมแบบพีไอดี ซึ่งสามารถเขียนฟังก์ชันการควบคุมตามสมการควบคุมพีไอดีแบบดิสครีทในสมการที่ (2.8) ในบทที่ 2 ได้ดังรูปที่ 3.20

ผลลัพธ์ที่ได้จากฟังก์ชันนี้คือค่า MVA ซึ่งหมายถึงค่าที่ส่งออกจากตัวควบคุมที่อยู่ในโหมดอัตโนมัติ ซึ่งค่า MVA นั้นจะถูกจำกัดให้อยู่ในช่วง 0 ถึง 100 เนื่องจากอุปกรณ์ควบคุมตัวสุดท้ายสามารถที่จะเปิด/ปิดได้อยู่ในช่วง 0 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น

โดยฟังก์ชันพีไอดีนี้ได้มีการใช้ทฤษฎีการสิ้นสุดการบริพันธ์ที่ได้กล่าวถึงไปแล้วในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.2.2 เพื่อกำจัดความล่าช้าของผลตอบสนองหรือค่าตัวแปรกระบวนการในการเข้าสู่ค่าเป้าหมาย ซึ่งหน้าที่ของการสิ้นสุดการบริพันธ์คือการจำกัดค่าเทอมบริพันธ์เมื่อค่าที่ออกจากตัวควบคุมในโหมดอัตโนมัติ (MVA) เกิดการอ้อมตัวหรือเกินกว่าช่วงที่ต้องการ ซึ่งในที่นี้คือ 0 – 100

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปอร์เซ็นต์ โดยมีการดำเนินการคือการจำกัดทอมปริพันธ์ไม่ให้มีการเพิ่มขึ้นเมื่อ MVA เกินค่า 100 เปอร์เซ็นต์ หรือไม่ให้มีการลดลงเมื่อ MVA ต่ำกว่าค่า 0 เปอร์เซ็นต์

```
float PIDfunction(float SVF,float PVF,float Kp,float Ki,float Kd,float dt)
{
    error = SVF - PVF;
    windup = error*dt;
    if(((MVA==0)&&(error<0))||((MVA==100)&&(error>0))) {windup = 0;}
    integral = integral + windup;
    Iterm = Ki*pow(10,-4)*integral;
    derivative = (error - previous_error)/dt;
    if(dt==0) {derivative = 0;}
    MVA = (Kp*error) + Iterm + (Kd*derivative);
    previous_error = error;
    if(MVA < 0) {MVA = 0;}
    if(MVA > 100) {MVA = 100;}
    else {};
    return MVA;
}
```

รูปที่ 3.20 ฟังก์ชันการควบคุมแบบพีไอดี

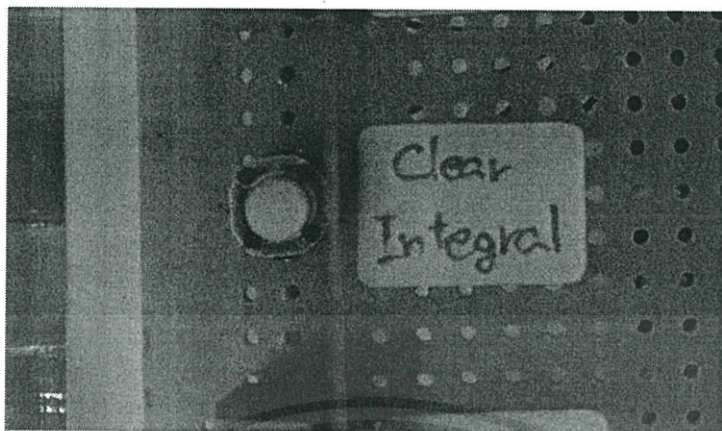
นอกจากนี้ยังมีการปรับอัตราส่วนของค่าตัวควบคุมแบบปริพันธ์ เพื่อให้สามารถเห็นผลความเปลี่ยนแปลงของค่า MVA ได้ชัดเจนมากขึ้นและเพื่อให้สมดุลกับค่าช่วงเวลาในการชักตัวอย่างโดยการคูณ 10^{-4} เข้าไปในทอมปริพันธ์เพื่อลดสัดส่วนการเพิ่ม/ลดในการปรับค่าตัวควบคุมแบบปริพันธ์ ซึ่งในฟังก์ชันนี้คือค่า Ki

สังเกตว่าค่าที่ป้อนเข้าฟังก์ชันพีไอดีนั้นเป็นค่าที่สามารถปรับได้ทั้งหมดตามที่แสดงไว้ในโปรแกรมกราฟที่ได้อีกว่ามาข้างต้นแล้ว ซึ่งค่าเหล่านี้มีผลกับค่าที่ออกจากตัวควบคุมที่ใช้ในการควบคุมอุปกรณ์ควบคุมตัวสุดท้ายที่ส่งผลต่อกระบวนการและค่าตัวแปรกระบวนการที่ต้องการควบคุม

3.1.6 โปรแกรมการรีเซ็ตค่าทอมปริพันธ์

เนื่องจากในโปรแกรมได้มีการตั้งค่าเริ่มต้นของค่าทอมปริพันธ์และค่าความคลาดเคลื่อนก่อนหน้า (Pre-error) ให้มีค่าเท่ากับ 0 โดยไว้ในส่วนแรกของโปรแกรม ซึ่งเมื่อมีการเริ่มทดสอบและใช้ฟังก์ชันพีไอดี ค่าทั้งสองนี้จะทำการเก็บค่าใหม่เข้าไปแทนที่ค่าเก่าในตัวแปรโดยค่าเหล่านี้จะส่งผลต่อการควบคุมแบบพีไอดี ทำให้เมื่อผู้ใช้งานต้องการเริ่มต้นการใช้งานส่วนฟังก์ชันพีไอดีใหม่ จะต้องทำการรีเซ็ต ตัวควบคุมพร้อมทั้งตั้งค่าใหม่ทั้งหมดตั้งแต่ต้น ซึ่งความไม่สะดวกนี้เองทำให้เกิดปุ่มรีเซ็ตทอมปริพันธ์ขึ้นมา ซึ่งปุ่มนี้อยู่ระหว่างพอร์ตเอาต์พุตกับอินพุตของกล่องควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษายกเว้นกรณีอื่น มิฉะนั้นให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 ปุ่มรีเซ็ตเทอมปริพันธ์

ปุ่มนี้จะทำหน้าที่ในการรีเซ็ตค่าเทอมปริพันธ์และค่าความคลาดเคลื่อนก่อนหน้าให้มีค่าเท่ากับ 0 ซึ่งเป็นค่าเริ่มต้น ซึ่งทำงานโดยการกดปุ่มสวิตช์เพื่อป้อนสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจำนวน 3.3 V เข้าพอร์ต ADC ซึ่งโปรแกรมในส่วนการรับค่าจากพอร์ต ADC สามารถเขียนได้ดังในรูปที่ 3.22

```
void reset_integral(void)
{
  AD1CR = 0x01210680;
  do
  {
    RSItem = AD1DR;
  }
  while ((RSItem & 0x80000000) == 0);
  RSItem = (RSItem >> 6) & 0x03FF;
}
```

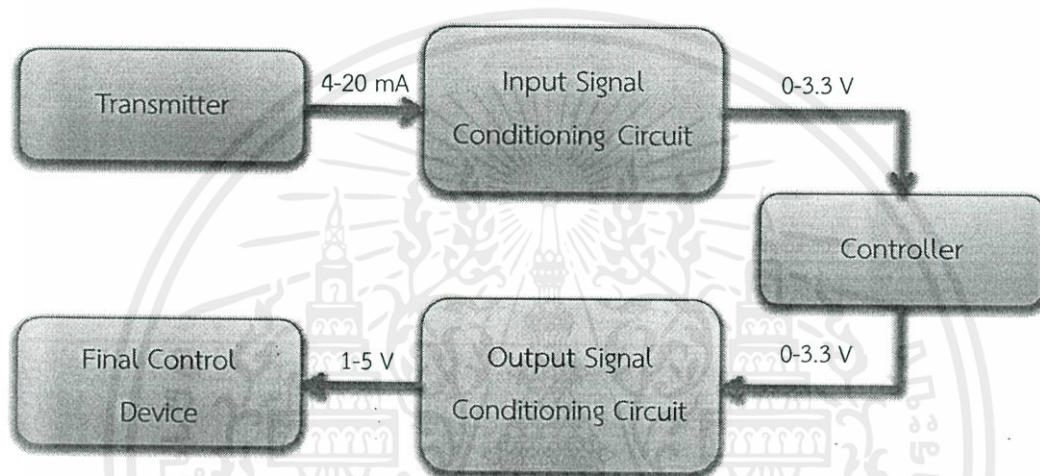
รูปที่ 3.22 ฟังก์ชันการรับค่ารีเซ็ตเทอมปริพันธ์

นอกจากที่มีการเขียนโปรแกรมรับค่าของพอร์ต ADC แล้วยังต้องมีการตั้งเงื่อนไขในโปรแกรมด้วย โดยถ้ามีการจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าพอร์ต ADC ซึ่งนั่นหมายถึงค่า RSItem จะต้องมีค่ามากกว่า 900 โปรแกรมจะสั่งให้เกิดการรีเซ็ตค่าเทอมปริพันธ์และค่าความคลาดเคลื่อนก่อนหน้า โดยการทำงานของปุ่มรีเซ็ตเทอมปริพันธ์นี้จะถูกจำกัดการใช้งานอยู่ในหน้าจอกกราฟเมื่อหยุดการทำงาน (ตามรูปที่ 3.14) เท่านั้น ซึ่งหมายถึงถ้ามีการกดปุ่มนี้ในหน้าจออื่น ๆ จะไม่มีผลให้เกิดการรีเซ็ตค่าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.7 วงจรแปลงสัญญาณ

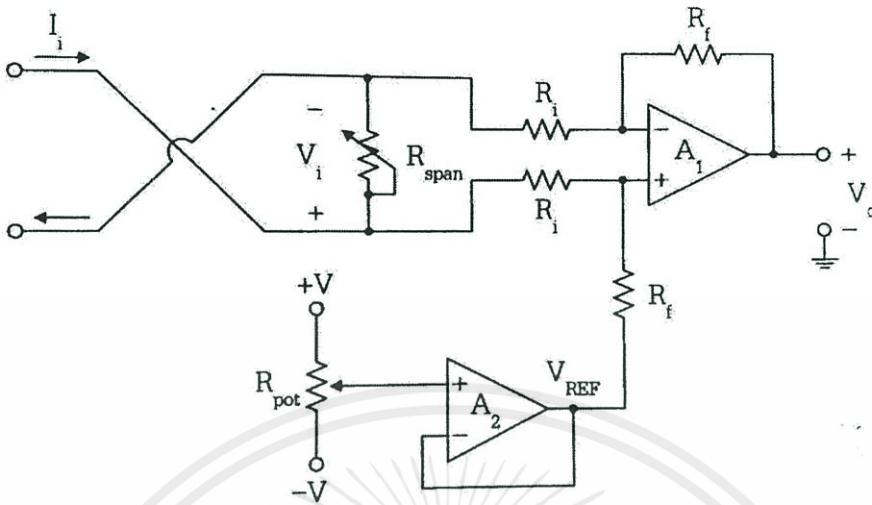
เนื่องจากสัญญาณเอาต์พุตของทรานสมิตเตอร์และอินพุตของอุปกรณ์ควบคุมสุดท้ายมีการสื่อสารด้วยสัญญาณมาตรฐาน 4-20 mA และ 1-5 V ตามลำดับ แต่พอร์ตอินพุตและเอาต์พุตของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รับส่งข้อมูลด้วยสัญญาณ 0-3.3 V ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวงจรแปลงสัญญาณเพื่อให้อุปกรณ์ภาควัดและอุปกรณ์ควบคุมสุดท้ายสื่อสารกับไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ โดยที่วงจรแปลงสัญญาณจะแบ่งออกเป็นสองส่วนคือด้านอินพุตและด้านเอาต์พุตดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 ระดับสัญญาณและการรับและส่งในระบบ

3.1.7.1 วงจรเปลี่ยนกระแสเป็นแรงดัน

เนื่องจากทรานสมิตเตอร์ สื่อสารด้วยสัญญาณมาตรฐาน 4-20 mA แต่ขาอินพุตของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ET-ARM7 STAMP LPC2138 รับสัญญาณเป็นแรงดันไฟฟ้าในช่วง 0-3.3 V ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวงจรเปลี่ยนกระแสให้เป็นแรงดันโดยจะใช้วงจรเปลี่ยนกระแสให้เป็นแรงดันแบบลอยตัวดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 วงจรเปลี่ยนกระแสให้เป็นแรงดันแบบลอยตัว

ซึ่งสามารถคำนวณค่าความต้านทานต่างๆได้จากสมการ

$$R_{span} = \frac{V_{max} - V_{min}}{\left(\frac{R_f}{R_i}\right)(I_{max} - I_{min})} = \frac{3.3-0}{\left(\frac{R_f}{R_i}\right)(20\text{ mA} - 4\text{ mA})} \quad 3.3-0$$

โดยในโครงงานนี้ เลือกใช้ $R_i = 10\text{ k}\Omega$ ก็จะได้ $R_f = 100\text{ k}\Omega$ ซึ่งจะได้ $R_{span} = 20.625\ \Omega$ และสามารถคำนวณหาค่า V_{REF} จาก

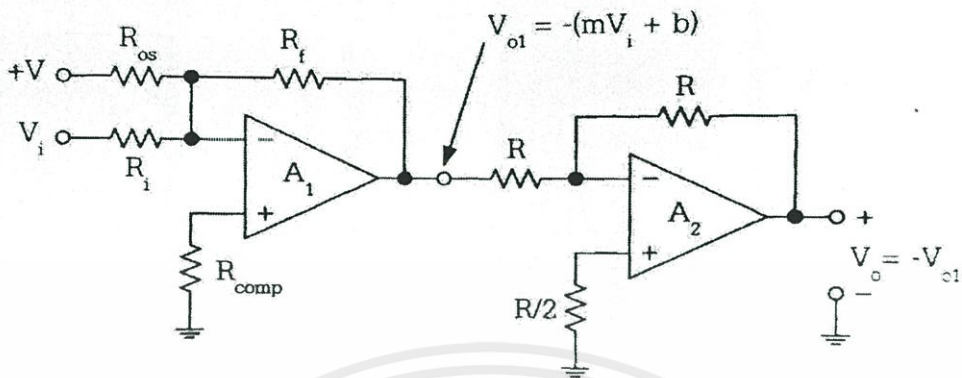
$$\begin{aligned} V_{REF} &= V_{min} - \left(\frac{R_f}{R_i}\right)I_{min}R_{span} \\ &= 0 - 10(4\text{ mA})(20.625\ \Omega) = -0.825\text{ V} \end{aligned}$$

โดยการปรับค่า V_{REF} ทำได้โดยการปรับค่า R_{pot}

3.1.7.2 วงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์

เนื่องจากอุปกรณ์ควบคุมสุดท้ายสื่อสารด้วยสัญญาณมาตรฐาน 1-5 V แต่ขาเอาต์พุตของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นส่งสัญญาณเป็นแรงดันไฟฟ้าในช่วง 0-3.3 V ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าตามที่อุปกรณ์ควบคุมสุดท้ายต้องการ โดยวงจรที่ออกแบบไว้เป็นไปตามรูปที่ 3.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.25 วงจรปรับความชันและตำแหน่งศูนย์

ความสัมพันธ์ของการแปลงระดับสัญญาณสามารถอธิบายได้โดยสมการเส้นตรง

$$y = mx + b$$

โดยที่ y คือ แรงดันทางด้านเอาต์พุต ซึ่งในกรณีนี้คือ V_o

x คือ แรงดันทางด้านอินพุต ซึ่งในกรณีนี้คือ V_i

ดังนั้นสามารถหาค่า m ได้โดยความสัมพันธ์ดังนี้

$$m = \frac{V_{o(max)} - V_{o(min)}}{V_{i(max)} - V_{i(min)}} = \frac{5 - 1}{3.3 - 1} = 1.21$$

หรือ $m = \frac{R_f}{R_i} = 1.21$ ถ้าเลือก $R_f = 120 \text{ k}\Omega$ จะได้ $R_i = 100 \text{ k}\Omega$

และจากสมการเส้นตรงสามารถเขียนได้เป็น $V_o = mV_i + b$ จะหาค่า b ได้ดังนี้

โดยที่ $V_i = 0 \text{ V}$ ต้องได้ว่า $V_o = 1 \text{ V}$ นั่นคือ

$$1 \text{ V} = (1.21)(0) + b$$

หรือจะได้ค่า $b = 1 \text{ V}$

เนื่องจาก $b = \frac{R_f}{R_i}(\pm V) = 1 \text{ V}$

ดังนั้นต้องเลือกไฟเลี้ยงเป็นไฟบวกและในที่นี้เลือก $V = 3.3 \text{ V}$ จะได้

ซึ่งสามารถคำนวณค่าความต้านทานต่างๆได้จากสมการ

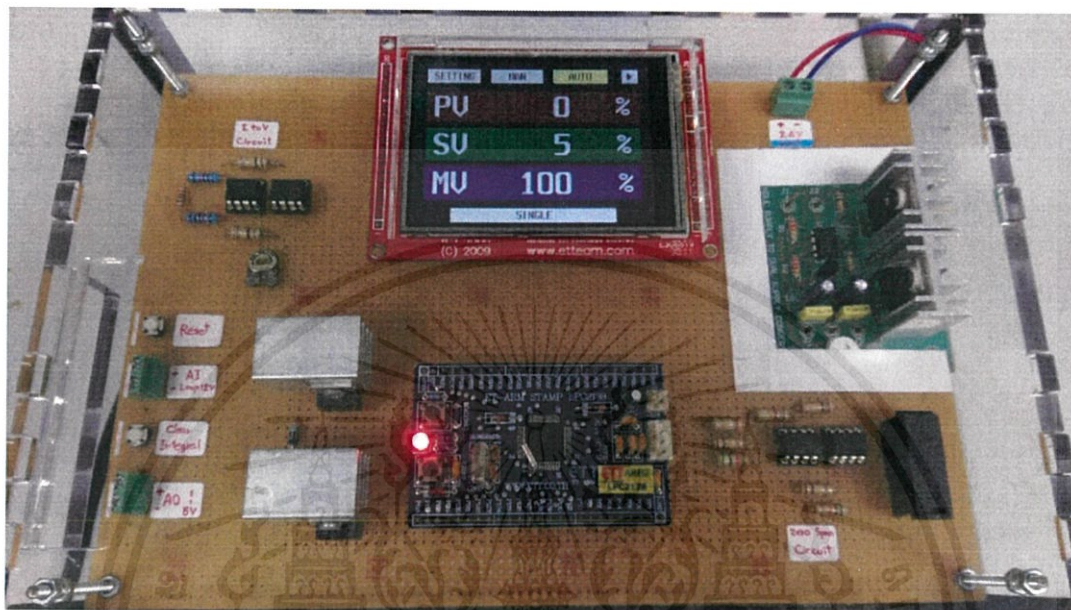
$$R_{os} = \frac{R_f}{b}(\pm V) = \frac{(120 \text{ k}\Omega)(+3.3 \text{ V})}{1} = 396 \text{ k}\Omega$$

และ $R_{comp} = R_f/R_i/R_{os} = 47.9 \text{ k}\Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเมื่อนำวงจรที่ออกแบบทั้งหมดมาต่อใช้งานจริงและอัปเดตโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นทั้งหมดลงไมโครคอนโทรลเลอร์จะได้กล่องควบคุมที่พัฒนาแล้วเสร็จพร้อมใช้งานดังรูปที่ 3.26

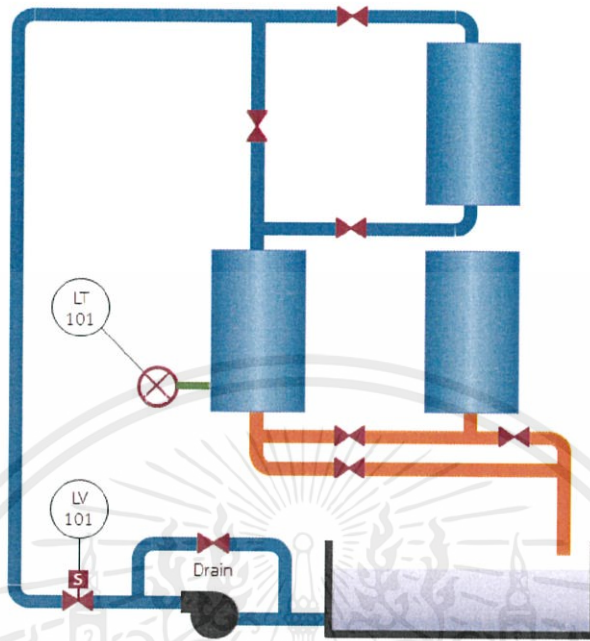


รูปที่ 3.26 กล่องควบคุม

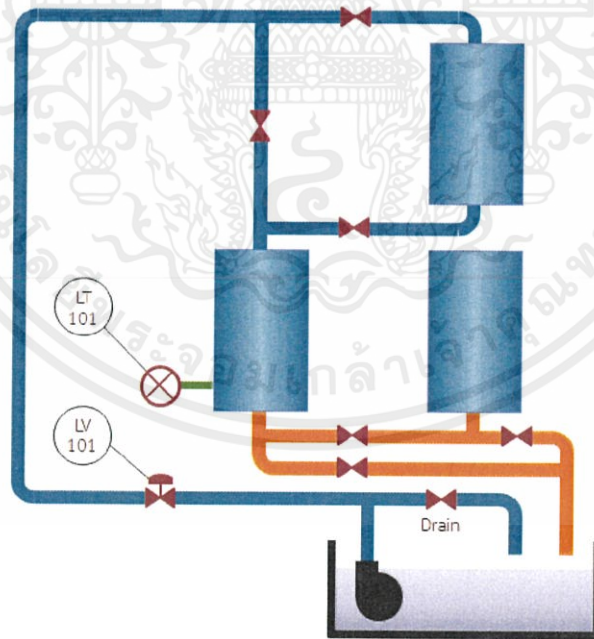
3.2 ชุดกระบวนการไหลและระดับของเหลว

ชุดกระบวนการไหลและระดับของเหลวในปฏิยานุพันธ์นี้เป็นการปรับปรุงจากโครงงานเดิมของรุ่นพี่ซึ่งโครงสร้างของระบบแท่งค้ำจะเหมือนเดิมทั้งหมด โดยในระบบเดิมเป็นการควบคุมระดับด้วยการควบคุมแบบเปิด/ปิด ดังรูปที่ 3.27 ในปฏิยานุพันธ์นี้ได้ปรับให้เข้ากัับวัตถุประสงค์ในการพัฒนากล่องควบคุมเพื่อให้สามารถควบคุมระดับได้แบบต่อเนื่องกล่าวคือ ชุดกระบวนการไหลและระดับของเหลวที่ปรับปรุงจะสามารถควบคุมอัตราการไหลของของเหลวได้โดยใช้วาล์วที่ทำจากสเต็ปมอเตอร์ ซึ่งโครงสร้างของชุดกระบวนการไหลและระดับของเหลวที่พัฒนาแล้วแสดงดังรูปที่ 3.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.27 กระบวนการไหลและระดับของเหลว (ก่อนปรับปรุง)

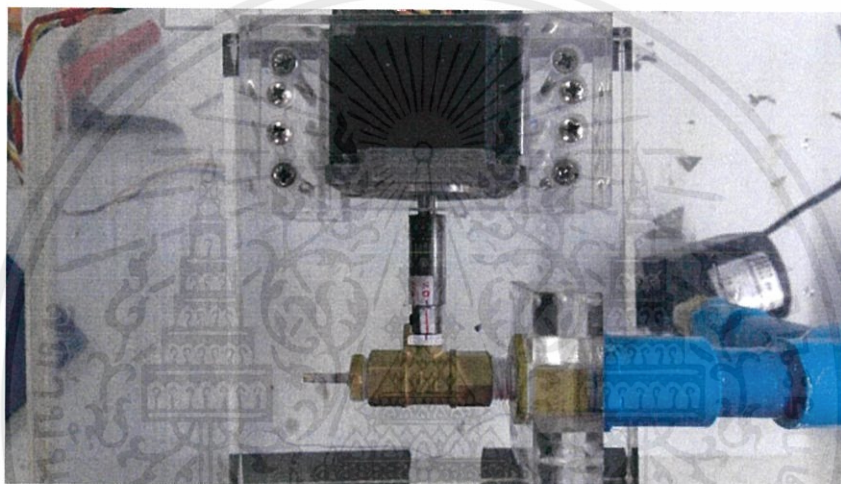


รูปที่ 3.28 กระบวนการไหลและระดับของเหลว (หลังปรับปรุง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 การออกแบบการขับเคลื่อนวาล์วโดยใช้สเต็ปมอเตอร์

จากที่กล่าวมาข้างต้นชุดกระบวนกรไหลและระดับของเหลวเดิมใช้โซลินอยด์วาล์วเป็นตัวควบคุมการไหลของของเหลว แต่ในโครงการนี้ต้องการใช้การควบคุมแบบพีไอดีซึ่งเป็นการควบคุมแบบต่อเนื่อง ดังนั้นจึงต้องการวาล์วควบคุมที่สามารถทำได้ไม่เพียงแค่การเปิด-ปิดเท่านั้น อย่างไรก็ตามวาล์วควบคุมสำเร็จรูปที่ใช้ในอุตสาหกรรมนั้นมีราคาสูง ดังนั้นในโครงการนี้จึงได้จำทำวาล์วควบคุมขึ้นเองโดยอาศัยสเต็ปมอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนวาล์วดังรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.29 การยึดสเต็ปมอเตอร์กับวาล์วทองเหลือง

สเต็ปมอเตอร์ที่นำมาประยุกต์ใช้งานในการควบคุมการเปิดปิดของวาล์วทองเหลืองมี สเต็ปการหมุนอยู่ที่ 200 สเต็ปต่อ 1 รอบการหมุนแต่วาล์วทองเหลืองมีองศาการหมุนตั้งแต่ 0-100 เปอร์เซนต์ อยู่ที่ 0-90 องศา ดังนั้นการหมุนของสเต็ปมอเตอร์ 1 สเต็ปจะเปลี่ยนแปลงเปอร์เซนต์ของวาล์ว 2 เปอร์เซนต์ โดยจะจำกัดรอบการหมุนไปกลับให้อยู่ในช่วง 50 สเต็ปแรก ซึ่งจะกล่าวในลำดับต่อไป

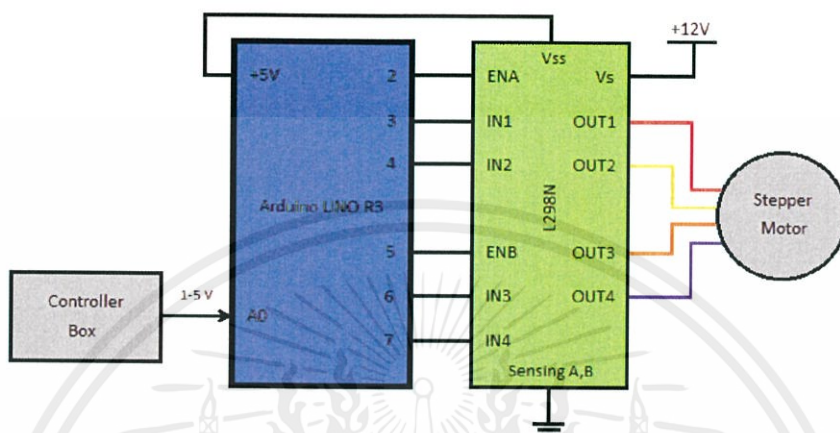
3.2.1.1 การควบคุมสเต็ปมอเตอร์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

ในส่วนของการควบคุมสเต็ปมอเตอร์ทางคณะผู้จัดทำได้เลือกใช้ บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

Arduino UNO R3 เป็นตัวควบคุม ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวแปลงสัญญาณควบคุมมาตรฐาน 1 ถึง 5 V

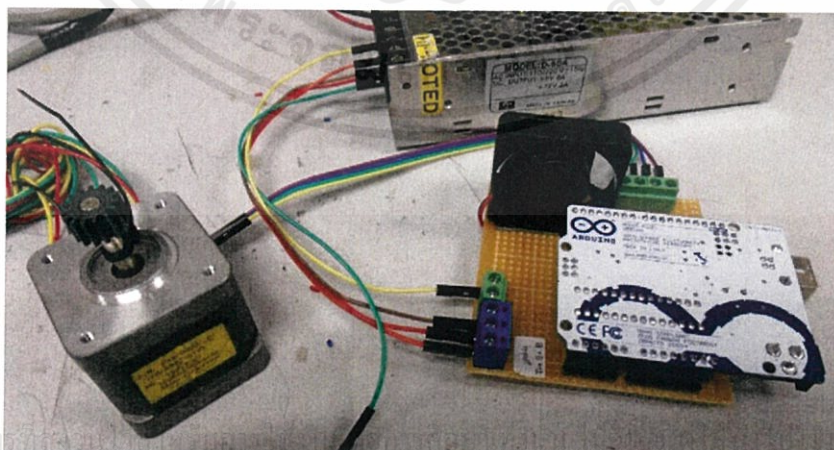
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกร ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เป็นสัญญาณดิจิทัลที่ใช้ในการสั่งงานมอเตอร์ โดยต่อร่วมกับวงจรขับสเต็ปมอเตอร์ L298N โดยไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้อาศัยการขยายแรงดันไฟฟ้าจากแรงดันเอาต์พุตของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ให้เป็นแรงดันที่

เพียงพอต่อการทำให้มอเตอร์หมุนซึ่งการต่อวงจรระหว่างบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์กับ L298N แสดงดังรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 การต่อบอร์ด Arduino UNO R3, วงจรขับ L298N และสเต็ปมอเตอร์

จากรูปที่ 3.30 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จะรับสัญญาณควบคุมจากกล่องควบคุมโดยอยู่ในรูปของสัญญาณมาตรฐาน 1 ถึง 5 V ซึ่งจะนำเข้าสู่สัญญาณผ่านขา A0 สัญญาณนี้จะถูกแปลงเป็นจำนวนสเต็ปในการหมุนของสเต็ปมอเตอร์และสร้างเป็นสัญญาณดิจิทัลที่ใช้ในการสั่งงานมอเตอร์ โดยถูกส่งออกมาที่ขาดิจิทัล 3, 4, 6 และ 7 ตามรูปการต่อวงจรข้างต้น ซึ่งเมื่อนำมาต่อใช้งานจริงจะได้วงจรดังรูปที่ 3.31

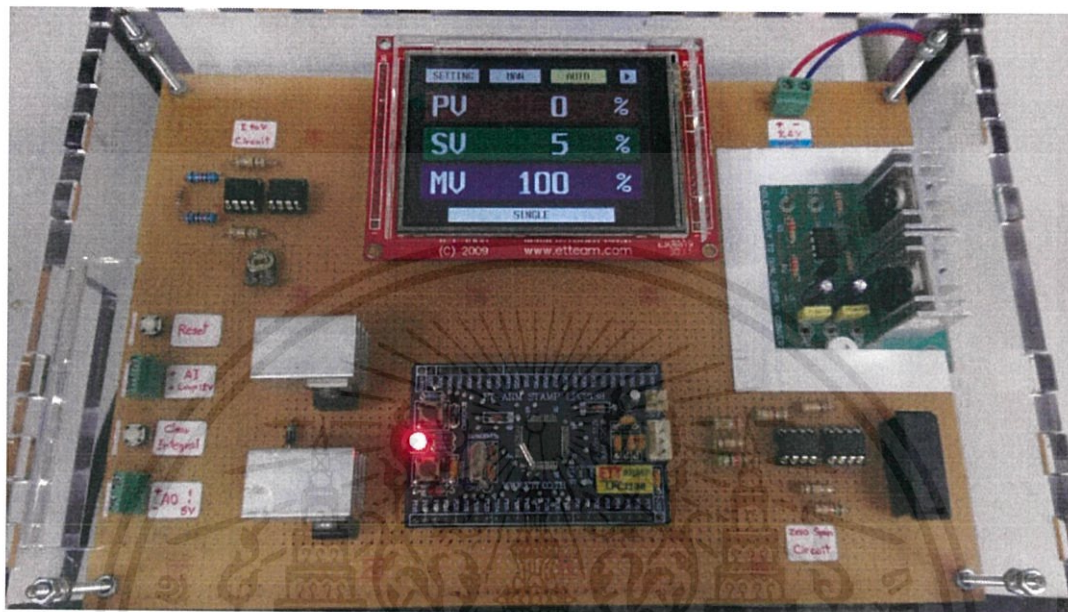


รูปที่ 3.31 วงจรควบคุมและขับสเต็ปมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... ระเบียบข้อบังคับด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้... ระบุที่ 3.31 วงจรควบคุมและขับสเต็ปมอเตอร์

ซึ่งเมื่อนำวงจรที่ออกแบบทั้งหมดมาต่อใช้งานจริงและอัปเดตโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นทั้งหมดลงไมโครคอนโทรลเลอร์จะได้กล่องควบคุมที่พัฒนาแล้วเสร็จพร้อมใช้งานดังรูปที่ 3.26

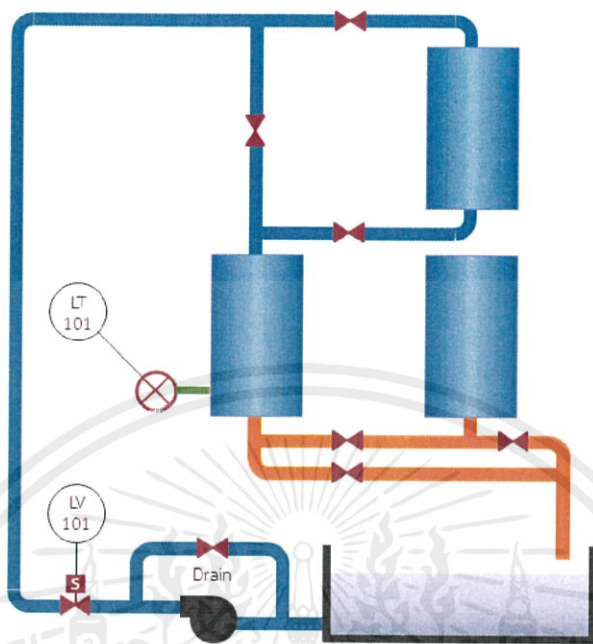


รูปที่ 3.26 กล่องควบคุม

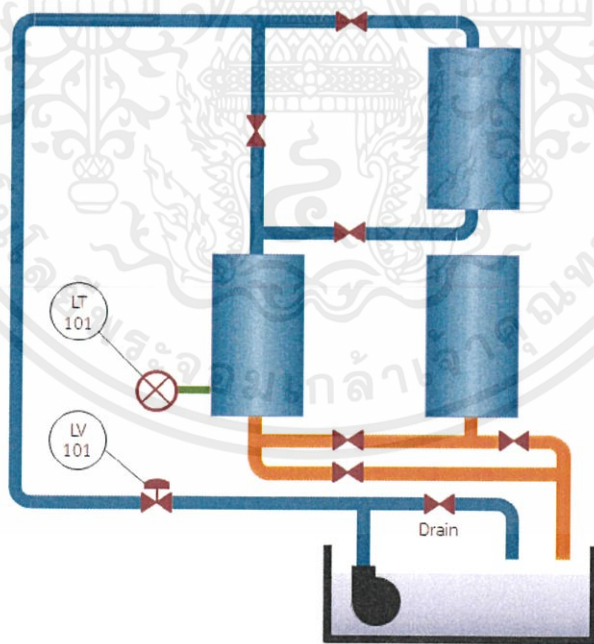
3.2 ชุดกระบวนการไหลและระดับของเหลว

ชุดกระบวนการไหลและระดับของเหลวในปฏิยานิพนธ์นี้เป็นการปรับปรุงจากโครงงานเดิมของรุ่นพี่ซึ่งโครงสร้างของระบบแท่งค้ำน้ำจะเหมือนเดิมทั้งหมด โดยในระบบเดิมเป็นการควบคุมระดับด้วยการควบคุมแบบเปิด/ปิด ดังรูปที่ 3.27 ในปฏิยานิพนธ์นี้ได้รับให้เข้ากับวัตถุประสงค์ในการพัฒนากล่องควบคุมเพื่อให้สามารถควบคุมระดับได้แบบต่อเนื่องกล่าวคือ ชุดกระบวนการไหลและระดับของเหลวที่ปรับปรุงจะสามารถควบคุมอัตราการไหลของของเหลวได้โดยใช้วาล์วที่ทำจากสเต็ปมอเตอร์ ซึ่งโครงสร้างของชุดกระบวนการไหลและระดับของเหลวที่พัฒนาแล้วแสดงดังรูปที่ 3.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.27 กระบวนการไหลและระดับของเหลว (ก่อนปรับปรุง)

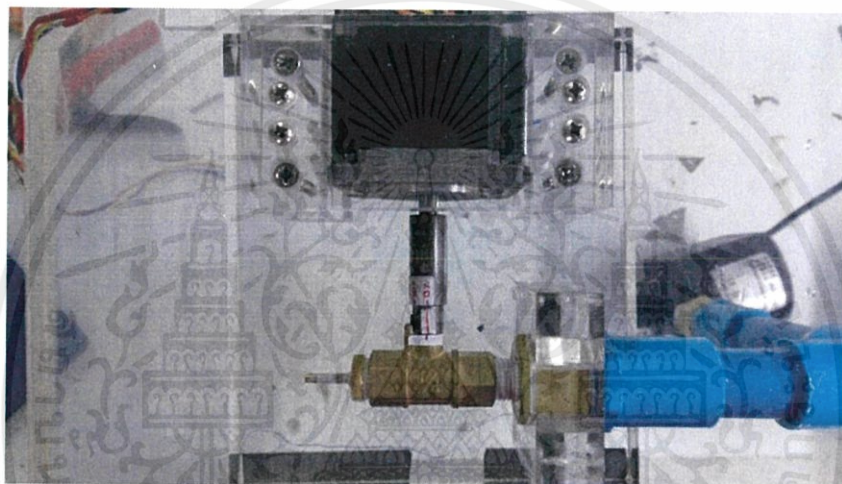


รูปที่ 3.28 กระบวนการไหลและระดับของเหลว (หลังปรับปรุง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 การออกแบบการขับเคลื่อนวาล์วโดยใช้สเต็ปมอเตอร์

จากที่กล่าวมาข้างต้นชุดกระบวนการไหลและระดับของเหลวเดิมใช้โซลินอยด์วาล์วเป็นตัวควบคุมการไหลของของเหลว แต่ในโครงการนี้ต้องการใช้การควบคุมแบบพีไอดีซึ่งเป็นการควบคุมแบบต่อเนื่อง ดังนั้นจึงต้องการวาล์วควบคุมที่สามารถทำได้ไม่เพียงแค่การเปิด-ปิดเท่านั้น อย่างไรก็ตามวาล์วควบคุมสำเร็จรูปที่ใช้ในอุตสาหกรรมนั้นมีราคาสูง ดังนั้นในโครงการนี้จึงได้จำทำวาล์วควบคุมขึ้นเองโดยอาศัยสเต็ปมอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนวาล์วดังรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.29 การยึดสเต็ปมอเตอร์กับวาล์วของเหลว

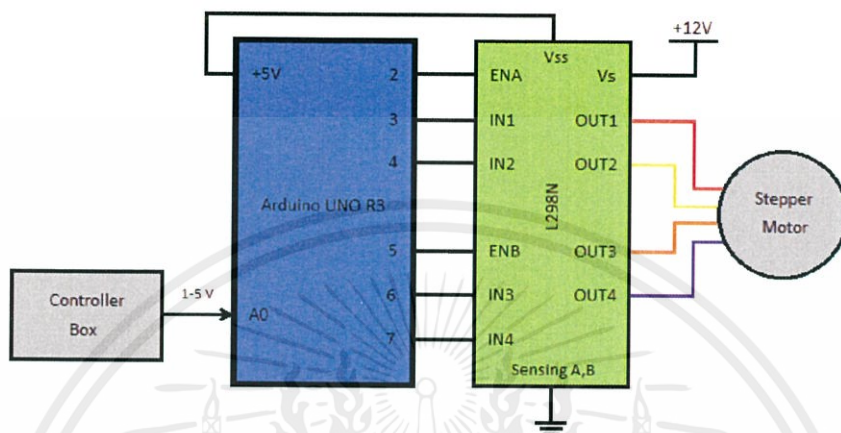
สเต็ปมอเตอร์ที่นำมาประยุกต์ใช้งานในการควบคุมการเปิดปิดของวาล์วของเหลวมี สเต็ปการหมุนอยู่ที่ 200 สเต็ปต่อ 1 รอบการหมุนแต่วาล์วของเหลวมีองศาการหมุนตั้งแต่ 0-100 เปอร์เซ็นต์ อยู่ที่ 0-90 องศา ดังนั้นการหมุนของสเต็ปมอเตอร์ 1 สเต็ปจะเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์ของวาล์ว 2 เปอร์เซ็นต์ โดยจะจำกัดรอบการหมุนไปกลับให้อยู่ในช่วง 50 สเต็ปแรก ซึ่งจะกล่าวในลำดับต่อไป

3.2.1.1 การควบคุมสเต็ปมอเตอร์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

ในส่วนของการควบคุมสเต็ปมอเตอร์ทางคณะผู้จัดทำได้เลือกใช้ บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

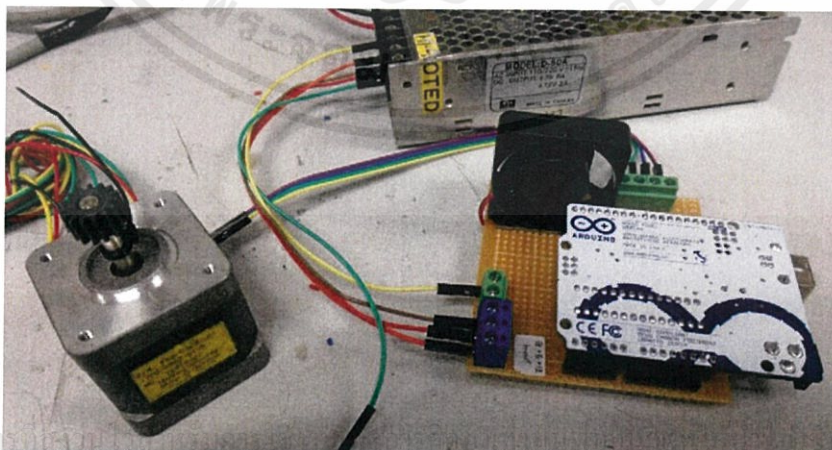
Arduino UNO R3 เป็นตัวควบคุม ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวแปลงสัญญาณควบคุมมาตรฐาน 1 ถึง 5 V เป็นสัญญาณดิจิทัลที่ใช้ในการสั่งงานมอเตอร์ โดยต่อร่วมกับวงจรขับสเต็ปมอเตอร์ L298N โดยอาศัยการขยายแรงดันไฟฟ้าจากแรงดันเอาต์พุตของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ให้เป็นแรงดันที่

เพียงพอต่อการทำให้มอเตอร์หมุนซึ่งการต่อวงจรระหว่างบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์กับ L298N แสดงดังรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 การต่อบอร์ด Arduino UNO R3, วงจรขับ L298N และสเต็ปมอเตอร์

จากรูปที่ 3.30 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จะรับสัญญาณควบคุมจากกล่องควบคุมโดยอยู่ในรูปของสัญญาณมาตรฐาน 1 ถึง 5 V ซึ่งจะนำเข้าสู่สัญญาณผ่านขา A0 สัญญาณนี้จะถูกแปลงเป็นจำนวนสเต็ปในการหมุนของสเต็ปมอเตอร์และสร้างเป็นสัญญาณดิจิทัลที่ใช้ในการสั่งงานมอเตอร์ โดยถูกส่งออกมาที่ขาดิจิทัล 3, 4, 6 และ 7 ตามรูปการต่อวงจรข้างต้น ซึ่งเมื่อนำมาต่อใช้งานจริงจะได้วงจรดังรูปที่ 3.31



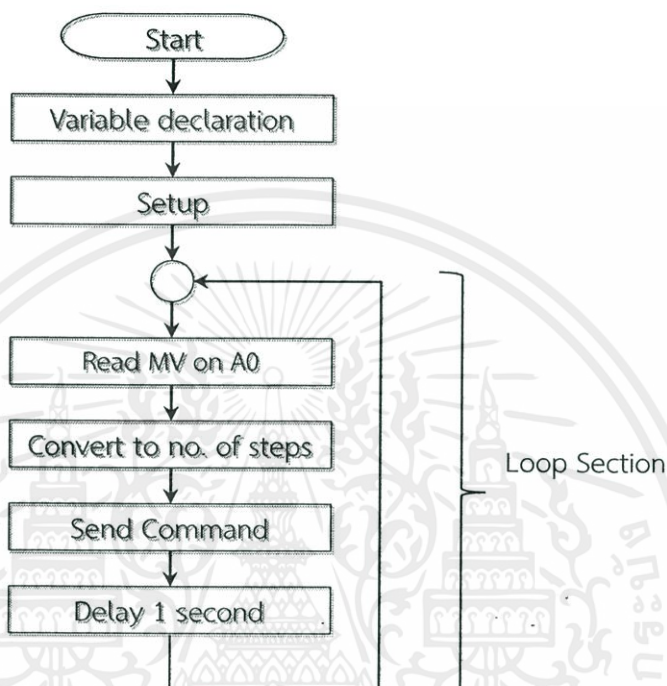
รูปที่ 3.31 วงจรควบคุมและขับสเต็ปมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ระเบียบข้อบังคับด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ใช้ข้อมูลนี้เพื่อเผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

3.2.1.2 โปรแกรมควบคุมมอเตอร์

จากสัญญาณที่ป้อนเข้าและส่งออกของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO R3 เพื่อควบคุมการทำงานของสเต็ปมอเตอร์ทำให้สามารถออกแบบโปรแกรมได้ดังรูป



รูปที่ 3.32 โฟลว์ชาร์ตของโปรแกรมควบคุมมอเตอร์

สังเกตว่าโปรแกรมนี้ไม่มีส่วนจบการทำงาน (End) ซึ่งหมายความว่าโปรแกรมจะทำงานในส่วนการทำงานลูปไปเรื่อยๆ และจะหยุดทำงานก็ต่อเมื่อหยุดจ่ายไฟให้กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยจากโฟลว์ชาร์ตของโปรแกรมควบคุมมอเตอร์ยังพบว่าโปรแกรมจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่นั้นคือ

1. ส่วนการประกาศค่าตัวแปร (Variable declaration) เป็นส่วนที่มีการกำหนดค่าตัวแปรและขาของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้งาน รวมถึงการเรียกใช้ Library ต่างๆ ซึ่งในที่นี้มีการเรียกใช้ Library ทั้งหมด 1 Library นั่นคือ

```
#include <Stepper.h>
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย Stepper.h เป็น Library ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของสเต็ปมอเตอร์ ซึ่งจะประกอบด้วย ฟังก์ชันที่ใช้ในการกำหนดขาที่ใช้ในการสั่งงานมอเตอร์ และการควบคุมการหมุนและความเร็วของมอเตอร์

ต่อมาเป็นส่วนการกำหนดค่าตัวแปรและขาของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้งาน โดยได้มีการประกาศดังต่อไปนี้ ซึ่งกำหนดให้

- ขาที่ใช้ในการสั่งการทำงานของสเต็ปมอเตอร์เป็นขาดิจิตอล 3, 4, 6 และ 7 โดยใช้ฟังก์ชัน stepper ใน Stepper Library

```
Stepper stepper(200, 3, 4, 6, 7);
```

- ขาที่ระบุงการใช้งานมอเตอร์ (Enable A, Enable B) เป็นขาดิจิตอล 2 และ 5 ตามลำดับ

```
int ENA = 2;
int ENB = 5;
```

- ขาที่รับค่าที่รับสัญญาณควบคุมจากกล่องควบคุม เป็นขานาฬิกา

```
int CtrlPin = A0;
```

- ค่าควบคุมในรูปดิจิตอลจำนวน 10 บิต เป็นค่าเริ่มต้นซึ่งมีค่าเท่ากับ 0 (CtrlValue = 0)
- ค่าควบคุมในรูปเปอร์เซ็นต์ เป็นค่าเริ่มต้นซึ่งมีค่าเท่ากับ 0 (PercentValue = 0)
- ค่าควบคุมในรูปเปอร์เซ็นต์ในการวนลูการทำงานครั้งก่อนหน้า ซึ่งมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 0 (PrePercent = 0)

2. ส่วนการตั้งค่า (Setup) เป็นโปรแกรมส่วนที่ทำงานเพียงแคครั้งเดียวทุกการกดรีเซ็ตบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ 1 ครั้ง โดยส่วนมากจะใช้เป็นการตั้งค่าเริ่มต้นของการทำงานนั้นๆ ซึ่งในการทำงานนี้ได้มีการตั้งค่าเริ่มต้นดังต่อไปนี้

- ตั้งค่าขาดิจิตอล 2 และ 5 ให้ทำหน้าที่เป็นเอาต์พุต และส่งออกค่าลอจิก 1 ตลอด

```
pinMode (ENA, OUTPUT);
pinMode (ENB, OUTPUT);
digitalWrite (ENA, HIGH);
digitalWrite (ENB, HIGH);
```

- ตั้งค่าความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ให้มีค่าเท่ากับ 20 รอบต่อนาที โดยผ่านฟังก์ชัน setSpeed ใน Stepper Library

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
stepper.setSpeed(20);
```

- ตั้งค่าความเร็วในการรับส่งข้อมูลเท่ากับ 9600

```
Serial.begin(9600);
```

3. ส่วนการทำงานลูป (Loop Section) เป็นโปรแกรมส่วนที่มีการทำงานซ้ำหรือเรียกว่าการทำงานแบบวนลูป โดยโปรแกรมในส่วนนี้เป็นส่วนหลักของโปรแกรมทั้งหมด ซึ่งใช้เพื่อควบคุมมอเตอร์ โดยได้มีการเขียนโปรแกรมให้ทำงานตามขั้นตอนต่อไปนี้เป็นลำดับ

- อ่านข้อมูลจากขานาล็อก A0 และนำค่านั้นมาเก็บไว้ในตัวแปร CtrlValue

```
CtrlValue = analogRead(CtrlPin);
```

- จำกัดข้อมูลที่อ่านได้ให้อยู่ในช่วง 205 ถึง 1023 เท่านั้น เนื่องจากข้อมูลที่ป้อนเข้าขา A0 อยู่ในช่วง 1 ถึง 5 V

```
if(CtrlValue < 205) {CtrlValue = 205;}
```

- แปลงค่าควบคุมจากที่อยู่ในรูปดิจิตอลจำนวน 10 บิต เป็นในรูปเปอร์เซ็นต์

```
PercentValue = map(CtrlValue, 205, 1023, 0, 100);
```

- สั่งงานให้มอเตอร์หมุน โดยผ่านฟังก์ชัน myRotary ซึ่งจำนวน Step ที่ใช้สั่งงานมอเตอร์ ได้มาจากการนำค่าผลต่างของค่าควบคุมมาหารสอง

```
myRotary((PercentValue - PrePercent) / 2);
```

- เก็บค่าควบคุมไว้ในค่าควบคุมในการวนลูปครั้งก่อนหน้า (PrePercent = PercentValue)

หลังจากที่ทำคำสั่งเหล่านี้ตามลำดับจนถึงคำสั่งสุดท้ายแล้วจะมีการวนกลับไปทำคำสั่งที่หนึ่งใหม่ ซึ่งได้มีการตั้งเวลาทุกๆ 1 วินาทีในการวนกลับไปทำคำสั่งที่หนึ่งใหม่โดยใช้คำสั่ง delay

โดยจากการอธิบายการทำงานในส่วนต่างๆของโปรแกรมข้างต้นพบว่ายังมีส่วนสำคัญในการสั่งการหมุนของมอเตอร์นั่นก็คือฟังก์ชัน myRotary ซึ่งมีการโปรแกรมดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

void myRotary(int Steprota)
{
  if(Steprota > 50) {Steprota = 50;}
  if(Steprota < -50) {Steprota = -50;}
  stepper.step(Steprota);
}

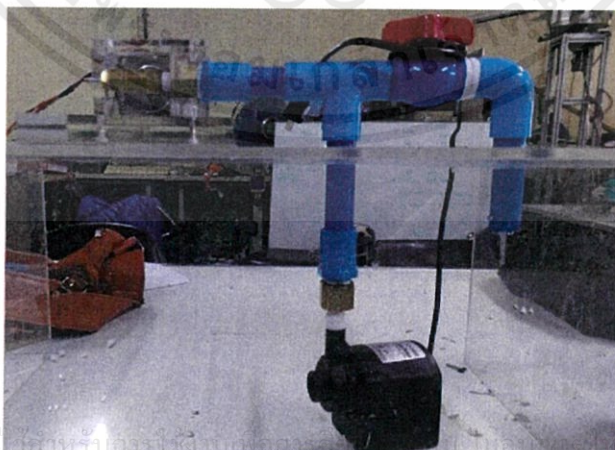
```

ฟังก์ชัน myRotary นี้จะประกอบด้วยกำกััดจำนวนสเต็ปในการหมุนมอเตอร์ เนื่องจากการหมุนวาล์วนั้นจะใช้การหมุนเพียงแค่ 1 ใน 4 หรือ 90 องศาเท่านั้น ซึ่งสเต็ปมอเตอร์ที่ได้ใช้งานหมุนได้ 200 สเต็ปต่อหนึ่งรอบ ดังนั้นจึงหมายความว่าจำนวนสเต็ปที่ใช้ในการสั่งการทำงานของมอเตอร์จะมีค่าเกิน 50 สเต็ปไม่ได้ แต่ในโปรแกรมนี้ได้กำกััดจำนวนสเต็ปอยู่ในช่วง -50 ถึง 50 เนื่องจากเครื่องหมายหน้าจำนวนสเต็ปนั้นบ่งบอกถึงทิศทางในการหมุนด้วย

จากโปรแกรมฟังก์ชันที่ใช้ในการควบคุมการหมุนของวาล์วที่แท้จริงนั้นคือฟังก์ชัน step ใน Stepper Library โดยฟังก์ชันนี้จะให้สัญญาณดิจิทัลเป็นสเต็ปตามจำนวนสเต็ปที่สั่งงาน ซึ่งในที่นี้ได้ควบคุมการหมุนสเต็ปมอเตอร์แบบฟูลบริดจ์ 2 เฟส

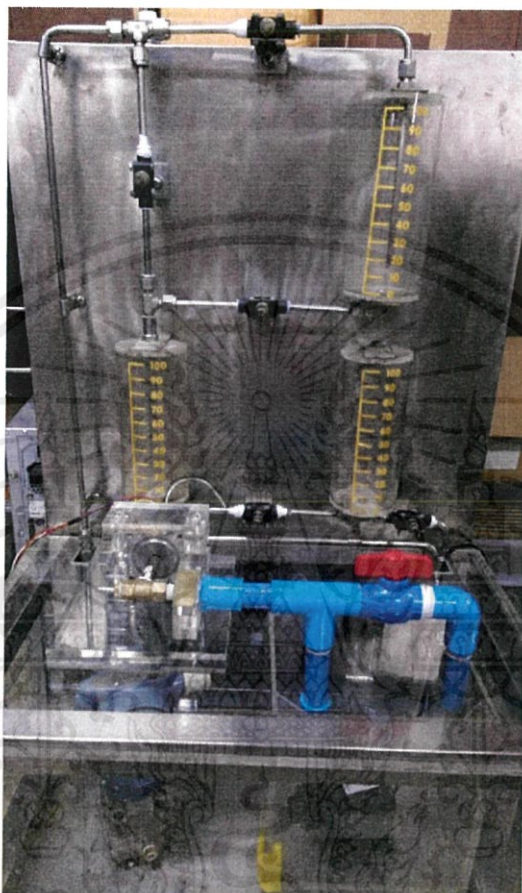
3.2.2 การออกแบบการไหลของน้ำ

จากไดอะแกรมดังรูปที่ 3.28 จะสังเกตเห็นว่ามีวาล์วสำหรับระบายน้ำออก สาเหตุที่ต้องมีเนื่องจากเมื่อวาล์วปิดอยู่ที่ 0 เปอร์เซ็นต์จะทำให้เกิดการอั้นของน้ำอันเนื่องมาจากการทำงานของปั้มน้ำอยู่ตลอดเวลา เพื่อหลีกเลี่ยงการเสียหายของปั้มน้ำจึงจำเป็นต้องออกแบบการไหลของน้ำให้สามารถไหลกลับสู่แหล่งน้ำได้เมื่อวาล์วปิดอยู่ที่ 0 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 3.33



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับโครงการวิจัยเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามรูปที่ 3.33 ระบบการไหลของน้ำก่อนเข้าคอนโทรลวาล์วทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำชุดวาล์วและระบบการไหลที่ได้ทำการออกแบบมาทำการติดตั้งกับโครงสร้างชุดทดลองเดิมจะได้ชุดทดลองที่ปรับปรุงแล้วเสร็จดังรูปที่ 3.34



รูปที่ 3.34 ชุดทดลองกระบวนการไหลและระดับของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

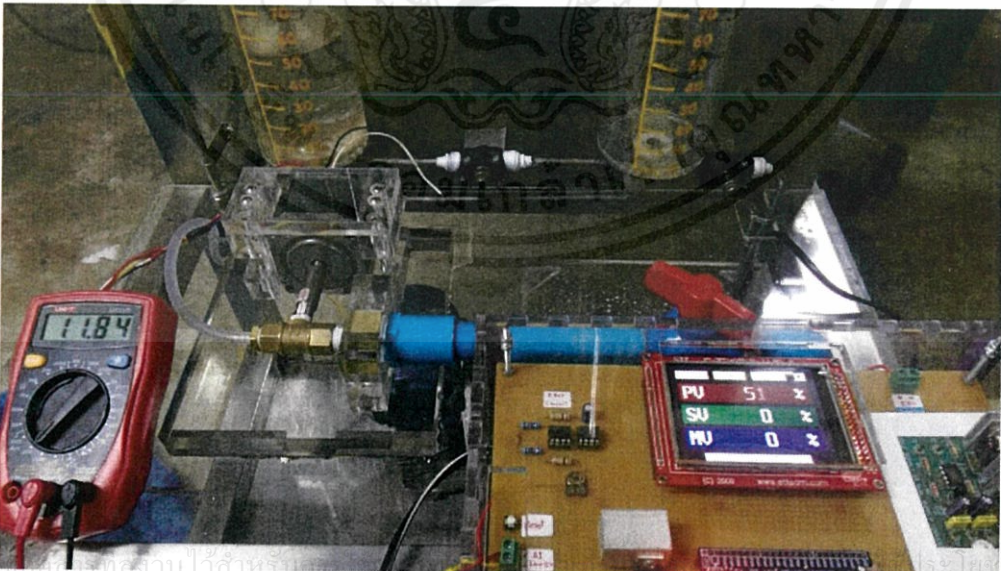
บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในบทนี้นำเสนอการทดลองของโครงการ ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 4 การทดลอง โดยการทดลองแรกเป็นการทดลองการอ่านค่าของกล่องควบคุม การทดลองที่สองเป็นการทดลองการส่งสัญญาณของกล่องควบคุมไปยังวาล์ว การทดลองที่สามเป็นการทดลองการวัดอัตราการไหล และการทดลองที่สี่เป็นการทดลองเพื่อใช้กล่องควบคุมและปรับค่าพีไอดีเพื่อควบคุมกระบวนการของชุดทดลอง โดยรายละเอียดของการทดลองเป็นดังนี้

4.1 การทดลองการอ่านค่าของกล่องควบคุม

ในการทดลองนี้เป็นการทดลองโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น รวมถึงเป็นการทดสอบการทำงานของวงจรแปลงสัญญาณว่าอ่านค่าสัญญาณที่ได้จากทรานสมิตเตอร์ได้ถูกต้องใกล้เคียงกับสเกลที่ติดไว้ที่แท่งค้ำน้ำมากน้อยแค่ไหนซึ่งจะทดลองจะทดลองที่ระดับต่างๆ จาก 0 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ โดยเพิ่มครั้งละ 5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการเตรียมการทดลองแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.1 และค่าที่บันทึกได้จากการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.1

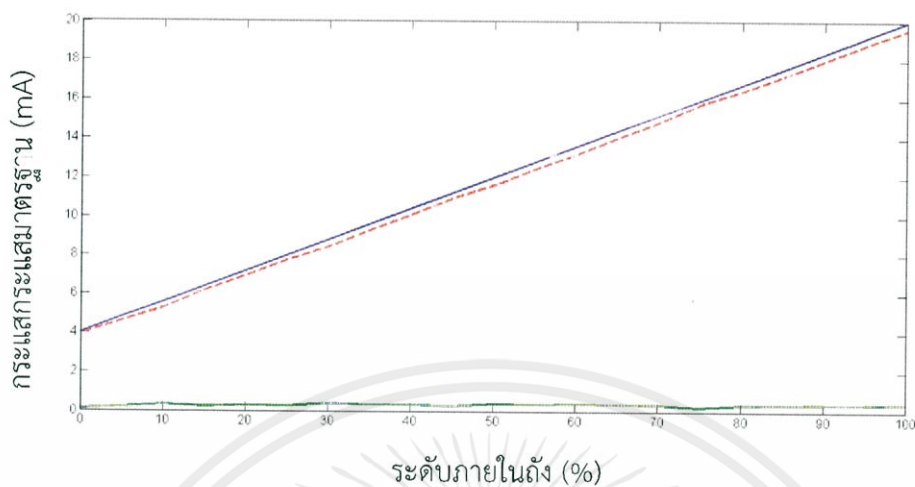


รูปที่ 4.1 การทดลองการอ่านค่าของกล่องควบคุม

ตารางที่ 4.1 การทดลองการอ่านค่าของกล่องควบคุม

ระดับตามสเกล (เปอร์เซ็นต์)	ระดับจากจอ กราฟิก (เปอร์เซ็นต์)	กระแสไฟฟ้า มาตรฐาน (mA)	สัญญาณจาก ทรานสมิตเตอร์ (mA)	ความคลาด เคลื่อนสัมบูรณ์
0	0	4	3.91	0.09
5	1	4.8	4.61	0.19
10	5	5.6	5.28	0.32
15	11	6.4	6.18	0.22
20	16	7.2	6.93	0.27
25	22	8	7.74	0.26
30	26	8.8	8.43	0.37
35	31	9.6	9.29	0.31
40	35	10.4	10.08	0.32
45	42	11.2	10.94	0.26
50	46	12	11.62	0.38
55	51	12.8	12.44	0.36
60	55	13.6	13.21	0.39
65	61	14.4	14.05	0.35
70	64	15.2	14.87	0.33
75	70	16	15.79	0.21
80	76	16.8	16.46	0.34
85	80	17.6	17.24	0.36
90	86	18.4	18.03	0.37
95	89	19.2	18.83	0.37
100	94	20	19.61	0.39
ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย				0.3076

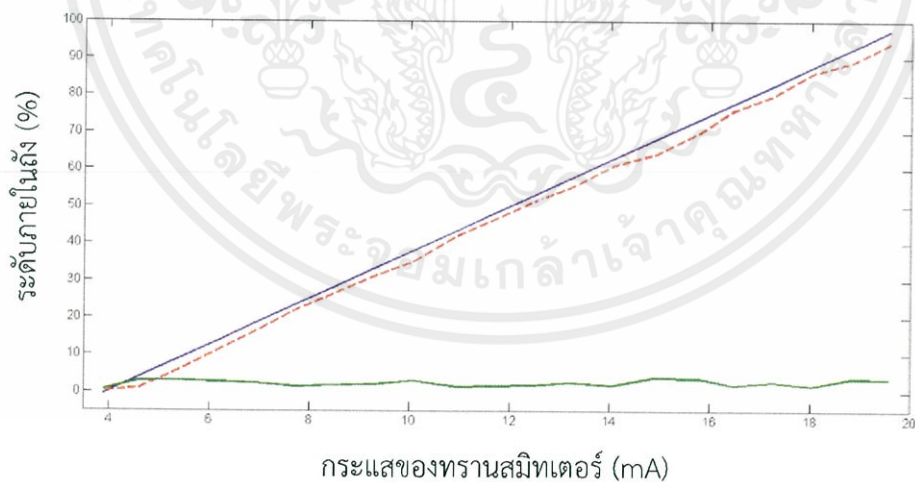
จะเห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยอยู่ที่ 0.3076 mA ซึ่งสามารถแสดงเป็นกราฟให้
 เอกสาร เห็นได้ดังรูปที่ 4.2 วาดไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบค่ากระแสที่วัดได้จากทรานสมิเตอร์กับค่ากระแสมาตรฐาน

โดยที่ เส้นสีน้ำเงินคือกระแสมาตรฐาน 4-20 mA เส้นสีแดงคือกระแสจากทรานสมิเตอร์ และเส้นสีเขียวค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์

และเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าที่แสดงผลบนหน้าจอกับค่าตามกระแสที่วัดได้ จะได้ดังตารางที่ 4.2 และกราฟในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ที่อ่านได้กับค่าตามทฤษฎี

โดยที่ เส้นสีน้ำเงินคือระดับจากการคำนวณโดยกระแสจากทรานสมิเตอร์ เส้นสีแดงคือระดับจากการคำนวณค่าการแสดงผลบนหน้าจอกราฟิก และเส้นสีเขียวค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์

ตารางที่ 4.2 ความคลาดเคลื่อนของการวัดโดยพอร์ต ADC ของไมโครคอนโทรลเลอร์

กระแสไฟฟ้าจาก ทรานสมิทเตอร์ (mA)	ระดับน้ำจาก กระแสไฟฟ้า (เปอร์เซ็นต์)	ระดับน้ำจาก การแสดงผลบน จอกราฟิก (เปอร์เซ็นต์)	ความคลาด เคลื่อนสัมบูรณ์ (เปอร์เซ็นต์)	ความคลาด เคลื่อนโดยรวม (เปอร์เซ็นต์)
3.91	-0.56	0	0	0
4.61	3.81	4	4	4
5.28	8.00	5	5	5
6.18	13.63	4	4	4
6.93	18.31	4	4	4
7.74	23.38	3	3	3
8.43	27.69	4	4	4
9.29	33.06	4	4	4
10.08	38.00	5	5	5
10.94	43.38	3	3	3
11.62	47.63	4	4	4
12.44	52.75	4	4	4
13.21	57.56	5	5	5
14.05	62.81	4	4	4
14.87	67.94	6	6	6
15.79	73.69	5	5	5
16.46	77.88	4	4	4
17.24	82.75	5	5	5
18.03	87.69	4	4	4
18.83	92.69	6	6	6
19.61	97.56	6	6	6
ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย			2.3690	4.2381

จะเห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยอยู่ที่ 2.3690 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทดลองการส่งสัญญาณของกล่องควบคุมไปยังวาล์ว

ในการทดลองนี้เป็นการทดลองโดยการส่งสัญญาณควบคุมไปทำการควบคุมการเปิดของวาล์วและทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการมอนิเตอร์ระดับการเปิดของวาล์วที่ควบคุมจากบอร์ด Arduino UNO R3 ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 การอ่านค่าการเปิดวาล์วจากการมอนิเตอร์เทียบกับคำสั่ง

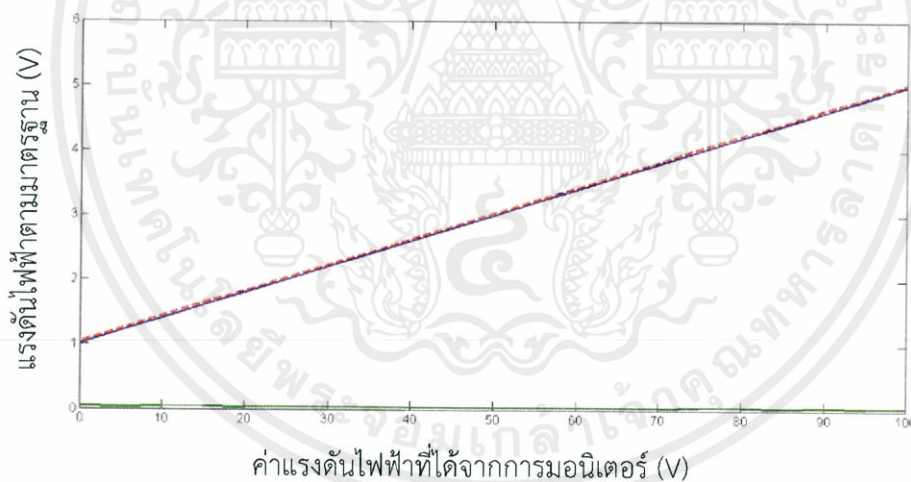
ระดับการเปิดวาล์วโดยสั่งจากตัวควบคุม (เปอร์เซ็นต์)	แรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน (V)	แรงดันไฟฟ้าที่ส่งออกจากตัวควบคุม (V)	ระดับการเปิดวาล์วที่อ่านได้จากการมอนิเตอร์บอร์ด Arduino (เปอร์เซ็นต์)	ความคลาดเคลื่อนของแรงดันที่ส่งออกจากตัวควบคุม (V)
0	1.0	1.04	0	0.04
5	1.2	1.23	5	0.03
10	1.4	1.44	11	0.04
15	1.6	1.64	15	0.04
20	1.8	1.83	20	0.03
25	2.0	2.03	25	0.03
30	2.2	2.23	31	0.03
35	2.4	2.43	35	0.03
40	2.6	2.63	40	0.03
45	2.8	2.83	45	0.03
50	3.0	3.03	50	0.03
55	3.2	3.23	56	0.03
60	3.4	3.43	61	0.03
65	3.6	3.63	65	0.03
70	3.8	3.83	71	0.03
75	4.0	4.04	75	0.04
80	4.2	4.24	80	0.04
85	4.4	4.43	85	0.03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ที่ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 การอ่านค่าการเปิดวาล์วจากการมอนิเตอร์เทียบกับคำสั่ง (ต่อ)

ระดับการเปิดวาล์ว โดยสั่งจากตัว ควบคุม (เปอร์เซ็นต์)	แรงดันไฟฟ้า มาตรฐาน (V)	แรงดันไฟฟ้า ที่ส่งออกจาก ตัวควบคุม (V)	ระดับการเปิดวาล์ว ที่อ่านได้จากการ มอนิเตอร์บอร์ด Arduino (เปอร์เซ็นต์)	ความคลาดเคลื่อน ของแรงดันที่ ส่งออกจากตัว ควบคุม (V)
90	4.6	4.64	91	0.04
95	4.8	4.83	95	0.03
100	5.0	5.03	100	0.03
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย				0.0328

จะเห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 0.0328 V ซึ่งสามารถแสดงเป็นกราฟให้เห็นได้ดัง
รูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการมอนิเตอร์กับแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน

โดยที่ เส้นสีน้ำเงินคือแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน 1-5 V เส้นสีแดงคือแรงดันไฟฟ้าที่ส่งออกจากตัวควบคุม และเส้นสีเขียวคือค่าความคลาดเคลื่อน

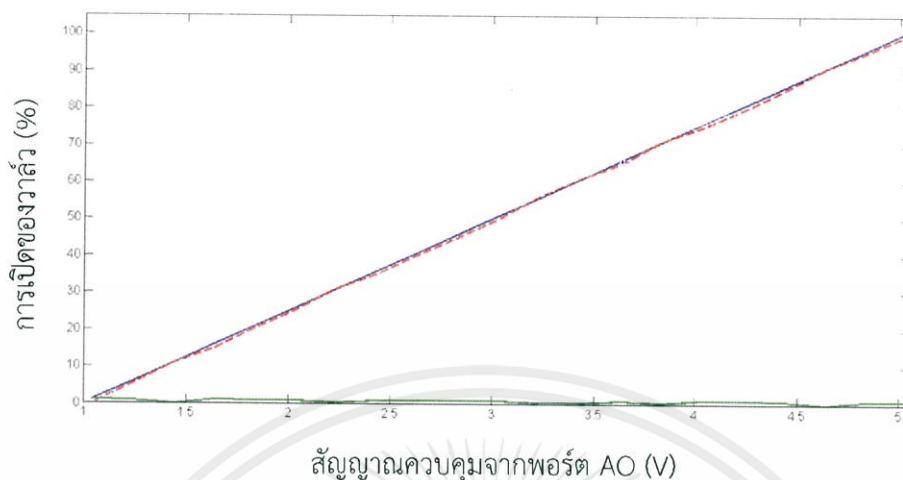
และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างระดับการเปิดของวาล์วที่อ่านได้จากการมอนิเตอร์จากบอร์ด

เอกสารนี้ Arduino UNO R3 กับแรงดันไฟฟ้าที่ส่งออกจากตัวควบคุม จะได้ดังตารางที่ 4.4 ำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากบอร์ด Arduino UNO

ระดับการเปิดของวาล์วที่ อ่านได้จากการมอเนเตอร์ บอร์ด Arduino (เปอร์เซ็นต์)	แรงดันไฟฟ้าที่ส่งออก จากตัวควบคุมเป็น ระดับการเปิดของวาล์ว (เปอร์เซ็นต์)	ความคลาดเคลื่อนที่ เกิดจากบอร์ด Arduino (เปอร์เซ็นต์)	ความคลาด เคลื่อนโดยรวม (เปอร์เซ็นต์)
0	1	1	0
5	5.75	0.75	0
11	11	0	1
15	16	1	0
20	20.75	0.75	0
25	25.75	0.75	0
31	30.75	0.25	1
35	35.75	0.75	0
40	40.75	0.75	0
45	45.75	0.75	0
50	50.75	0.75	0
56	55.75	0.25	1
61	60.75	0.25	1
65	65.75	0.75	0
71	70.75	0.25	1
75	76	1	0
80	81	1	0
85	85.75	0.75	0
91	91	0	1
95	95.75	0.75	0
100	100.75	0.75	0
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย		0.6310	0.2857

จะเห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 0.6310 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถแสดงเป็นกราฟให้
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 เห็นได้ดังรูปที่ 4.5
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าจากตัวควบคุมกับระดับการเปิดวาล์วอ่านจากการมอนิเตอร์

โดยที่ เส้นสีแดงคือระดับการเปิดของวาล์วที่อ่านได้จากการมอนิเตอร์บอร์ด UNO
 เส้นสีน้ำเงินคือแรงดันไฟฟ้าที่ส่งออกจากตัวควบคุมเป็นระดับการเปิดของวาล์ว
 เส้นสีเขียวคือความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากบอร์ด UNO

4.3 การทดลองการวัดอัตราการไหล

ในการทดลองนี้เป็นการทดลองโดยใช้โหมดแมนนวลในการส่งสัญญาณควบคุมไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ควบคุมการทำงานของสเต็ปมอเตอร์ให้เปิดวาล์วตามเปอร์เซ็นต์ที่กำหนด และทำการจับเวลาที่ระดับน้ำเพิ่มค่าจาก 10 ไปถึง 30 เปอร์เซ็นต์ว่าใช้เวลาเท่าใดซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.5

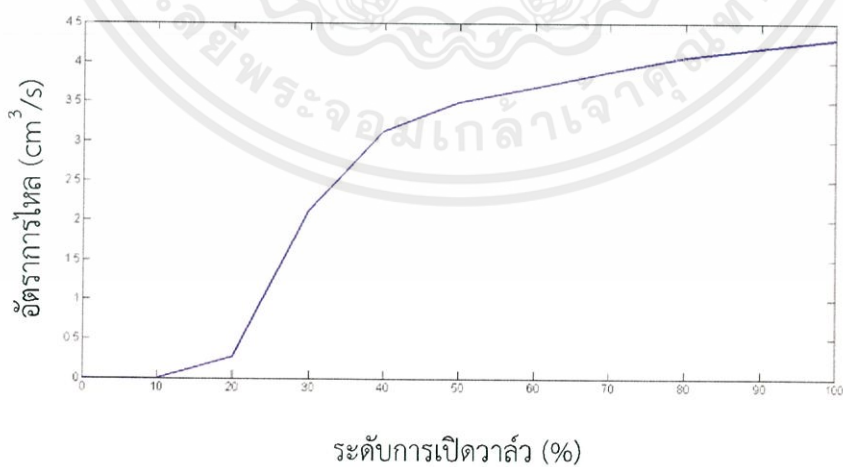
จากตารางที่ 4.5 จะเห็นว่าเมื่อวาล์วเปลี่ยนแปลงจากปิด 0 จนถึงเปิด 100 เปอร์เซ็นต์ระยะเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำจาก 10 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์มีแนวโน้มเร็วขึ้นตามลำดับ และเมื่อแปลงเป็นอัตราการไหลเชิงปริมาตร โดย ถังมีรัศมี 3.7 เซนติเมตร ระดับความสูงของถังที่ทำการวัดมีความสูง 2.9 เซนติเมตร คิดเป็นปริมาตรที่ทำการวัดเท่ากับ 124.77 ลูกบาศก์เซนติเมตร

จะเห็นว่าระดับการเปิดวาล์วส่งผลต่ออัตราการไหล ซึ่งสามารถแสดงเป็นกราฟดังรูปที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ระยะเวลาการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำ

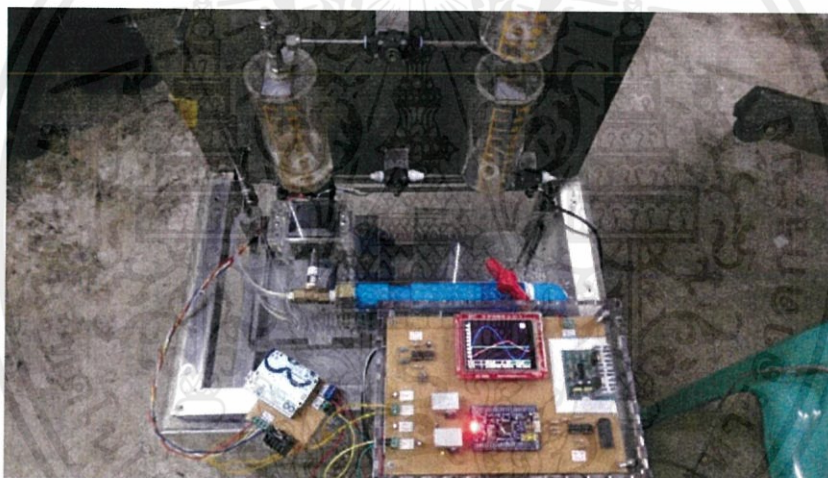
คำสั่งเปิดวาล์วโดยตัว ควบคุม (เปอร์เซ็นต์)	เวลาที่ใช้ในการเพิ่มระดับน้ำ (วินาที)	อัตราการไหล (ลูกบาศก์ เซนติเมตรต่อวินาที)
0	น้ำไม่ไหล	0
10	น้ำไม่ไหล	0
20	462.52	0.27
30	58.82	2.12
40	39.86	3.13
50	35.69	3.50
60	33.85	3.68
70	32.11	3.88
80	30.67	4.07
90	29.78	4.19
100	29.05	4.30



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนรูปที่ 4.6 เปรียบเทียบระดับการเปิดวาล์วกับอัตราการไหล นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

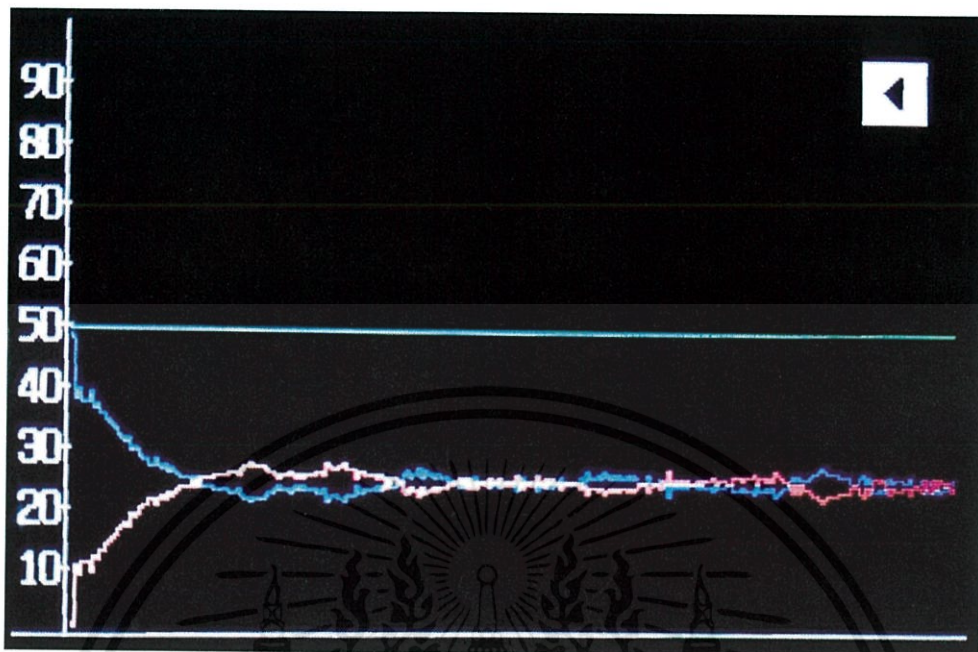
4.4 การทดลองการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี

การทดลองในส่วนนี้เป็นการทดลองการควบคุมวงปิดโดยทดลองปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีในโหมดอัตโนมัติ โดยตั้งค่าเป้าหมายโดยใช้กระบวนการไหลและระดับของน้ำเพียงอย่างเดียวได้แก่ ถึงที่ติดทรานสมิตเตอร์ โดยตั้งระดับความสูงเป้าหมายไว้ที่ 50 เปอร์เซ็นต์และปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี เพื่อเปรียบเทียบผลของการปรับค่าพารามิเตอร์ที่ต่างกัน การเตรียมการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.7 และได้ผลการทดลองเมื่อแปรค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังรูปที่ 4.8 ถึงรูปที่ 4.14 โดยเส้นสีแดงเป็นค่าตัวแปรของกระบวนการที่ควบคุมซึ่งแสดงผลของระดับน้ำที่วัดได้ เส้นสีเขียวเป็นค่าเป้าหมายที่ได้ทำการกำหนดค่า และเส้นสีน้ำเงินเป็นค่าที่ออกจากตัวควบคุมซึ่งแสดงค่าที่วัดได้จากทรานสมิตเตอร์

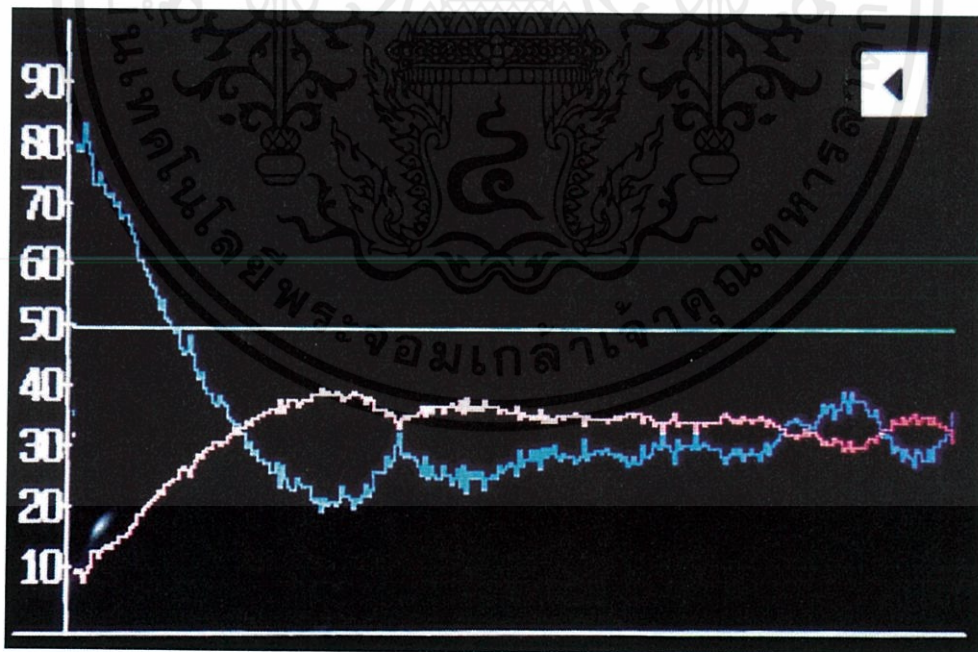


รูปที่ 4.7 การเตรียมการทดลองการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

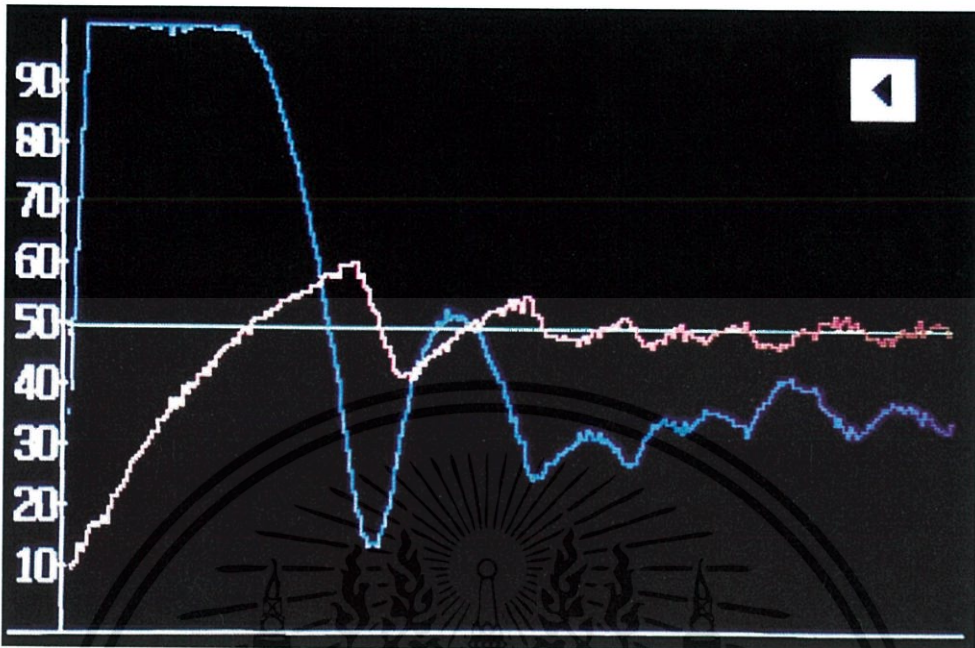


รูปที่ 4.8 ผลการทดลองการปรับค่าพีไอดีเมื่อ $P = 1$, $I = 0$ และ $D = 0$
(คาบเวลาการซึกตัวอย่าง 15 ms จอแสดงผล 0-450 วินาที)

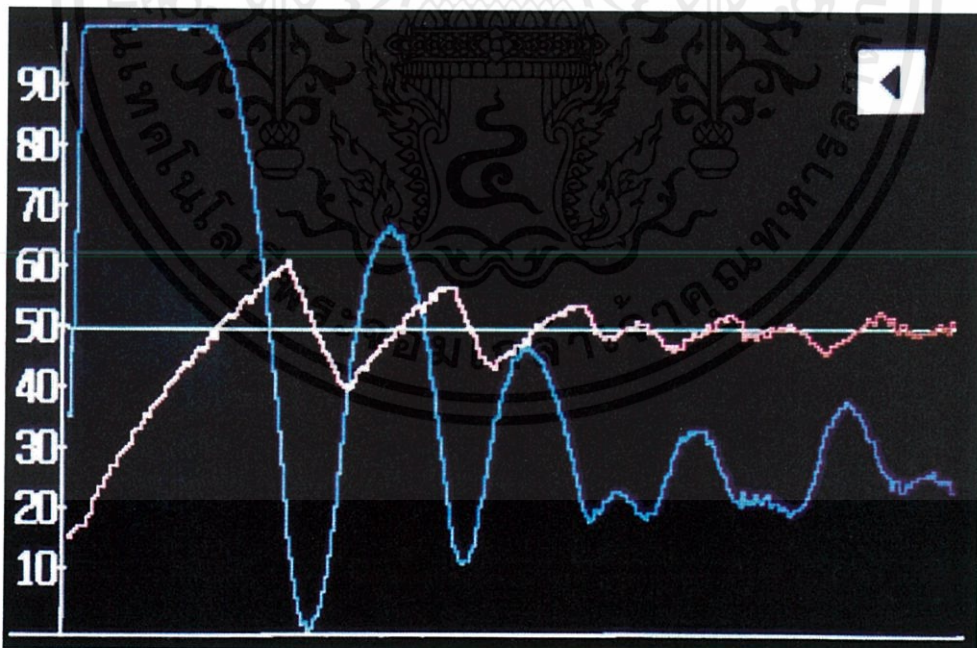


รูปที่ 4.9 การทดลองการปรับค่าพีไอดีเมื่อ $P = 2$, $I = 0$ และ $D = 0$
(คาบเวลาการซึกตัวอย่าง 15 ms จอแสดงผล 0-450 วินาที)

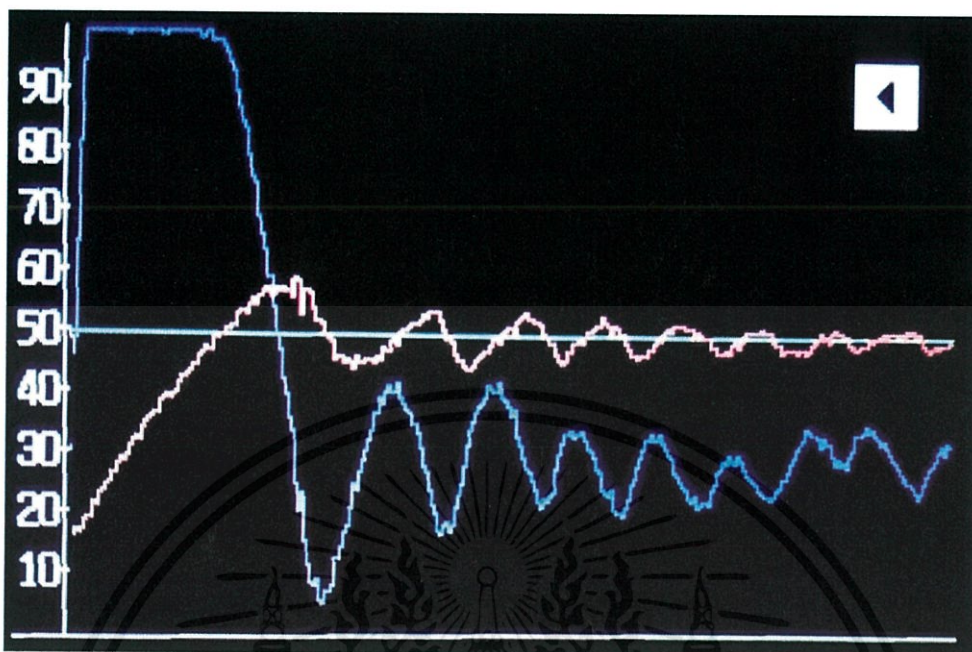
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยฯ ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



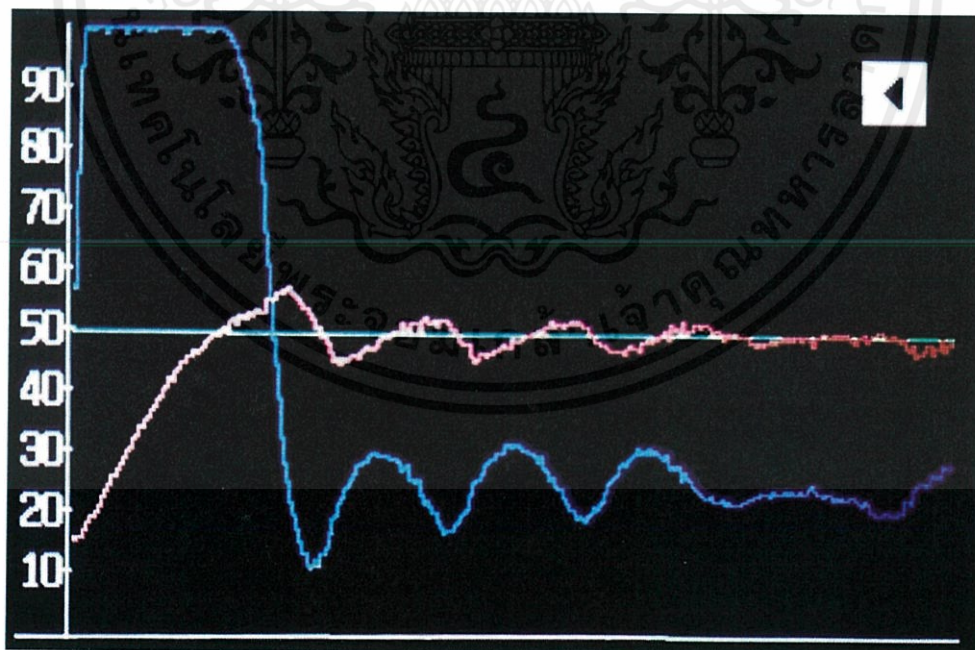
รูปที่ 4.10 การทดลองการปรับค่าพีไอดีเมื่อ $P = 1$, $I = 1$ และ $D = 0$
(คาบเวลาการซึกตัวอย่าง 25 ms จอแสดงผล 0-750 วินาที)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 4.11 การทดลองการปรับค่าพีไอดีเมื่อ $P = 1$, $I = 2$ และ $D = 0$ ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้ง (คาบเวลาการซึกตัวอย่าง 25 ms จอแสดงผล 0-750 วินาที) ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

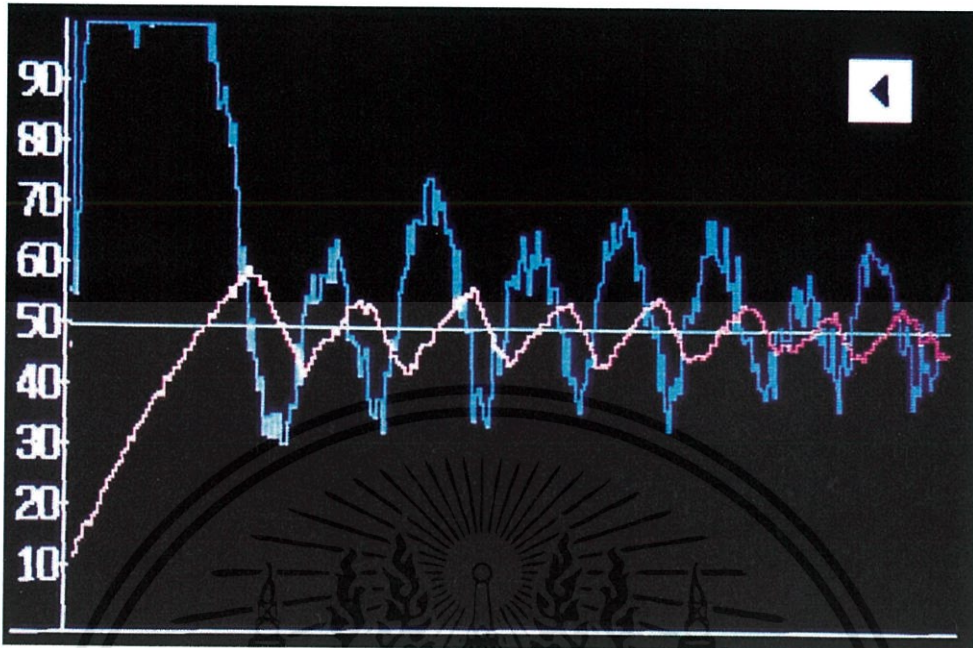


รูปที่ 4.12 การทดลองการปรับค่าพีไอดีเมื่อ $P = 1$, $I = 2$ และ $D = 1$
(คาบเวลาการซึกตัวอย่าง 25 ms จอแสดงผล 0-750 วินาที)



รูปที่ 4.13 การทดลองการปรับค่าพีไอดีเมื่อ $P = 1$, $I = 2$ และ $D = 10$
(คาบเวลาการซึกตัวอย่าง 25 ms จอแสดงผล 0-750 วินาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 การทดลองการปรับค่าพีไอดีเมื่อ $P = 1$, $I = 2$ และ $D = 100$
(คาบเวลาการซีกตัวอย่าง 25 ms จอแสดงผล 0-750 วินาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทวิจารณ์และสรุปผล

5.1 สรุปการทดลอง

ในการทดลองแรกผลการทดลองพบว่าเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นจากการวัดค่าตัวแปรกระบวนการโดยทรานสมิเตอร์ เป็นค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยเท่ากับ 0.3076 mA ซึ่งทั้งนี้เนื่องจากความผิดพลาดในการเลือกใช้ทรานสมิเตอร์จากกระบวนการเก่า โดยทรานสมิเตอร์ที่ใช้ในการวัดมีช่วงในการวัดตั้งแต่ 0-20,000 mmH₂O แต่ค่าที่ใช้วัดในกระบวนการมีค่าอยู่ในช่วง 300-460 mmH₂O เท่านั้น จึงทำให้ความละเอียดในการวัดของทรานสมิเตอร์ไม่ดีเท่าที่ควร อีกทั้งการแปลงค่าจากกระแสไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟฟ้าและการรับค่าของพอร์ต ADC ของไมโครคอนโทรลเลอร์ยังทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการแสดงผลค่าระดับน้ำในถังทดลอง โดยค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยเท่ากับ 2.3690 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งความคลาดเคลื่อนทั้งหมดนี้ทำให้การแสดงผลบนหน้าจอกราฟิกมีค่าไม่สัมพันธ์กับระดับน้ำจริงโดยมีความคลาดเคลื่อนรวมประมาณ 4.24 เปอร์เซ็นต์

ในการทดลองที่สองการทดลองการส่งสัญญาณของกล่องควบคุมไปยังวาล์ว โดยใช้การวัดสัญญาณควบคุมที่อยู่ในรูปแรงดันไฟฟ้าเปรียบเทียบกับสัญญาณมาตรฐาน พบว่าเกิดความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณ 0.03 V ซึ่งเป็นความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากพอร์ต AO ของตัวควบคุมและเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าระหว่างระดับระดับการเปิดของวาล์วที่อ่านได้จากการมอนิเตอร์บอร์ด UNO กับ แรงดันไฟฟ้าที่ส่งออกจากตัวควบคุมเป็นระดับการเปิดของวาล์วในหน่วยเปอร์เซ็นต์แล้วพบว่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากบอร์ด Arduino UNO R3 นั้นมีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.63 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งความคลาดเคลื่อนทั้งหมดที่ทำให้ระดับการเปิดวาล์วนั้นไม่เป็นไปตามการสั่งงานของตัวควบคุมมีค่าประมาณ 0.28 เปอร์เซ็นต์

ในการทดลองที่สามหาความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ที่สั่งผ่านหน้าจอกราฟิกกับความเร็วในการไหลของน้ำที่ไหลเข้าถังทดลองโดยการจับเวลาของระดับน้ำที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 10 – 30 เปอร์เซ็นต์ของถังพบว่าในช่วงการสั่งค่าที่ส่งออกจากตัวควบคุม ที่ 0 – 10 เปอร์เซ็นต์ไม่สามารถนิยามค่าเวลาได้เนื่องจากการเปิดวาล์วที่น้อยมากจนแรงดันน้ำไม่สามารถส่งให้น้ำไหลเข้าถังทดลองได้ ค่าเวลาในการเพิ่มระดับน้ำจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 10 – 40 เปอร์เซ็นต์ โดยลดลงจากค่าเวลาที่ไม่

สามารถนิยามได้ไปจนถึง 39.86 วินาที และผลการทดลองต่อจากการสั่งเปิดวาล์วผ่านหน้าจอรภาพิก 40 เปอร์เซ็นต์มีแนวโน้มที่ลดลงที่ละเล็กลง ซึ่งเวลาโดยเฉลี่ยแล้วอยู่ประมาณ 30 – 35 วินาที ซึ่งจากผลการทดลองนี้สามารถกล่าวได้ว่าวาล์วที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการสามารถควบคุมการไหลของน้ำโดยมีแนวโน้มตามการควบคุมจากตัวควบคุม แต่การเปิดวาล์วที่ 40 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไปพบว่า อัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มลดลง

ในการทดลองที่สี่เป็นการทดลองเพื่อใช้กล่องควบคุมและทดลองปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี พบว่ากล่องควบคุมนี้สามารถทำงานได้จริง และผลจากการปรับค่านั้นเป็นไปตามทฤษฎีการควบคุมแบบพีไอดี โดยในการควบคุมแบบพี เมื่อทำการเพิ่มค่าในเทอมสัดส่วนจะทำให้เกิดค่าพุ่งเกินสูงสุดที่มากขึ้นและความผิดพลาดที่สถานะคงตัวมีค่าน้อยลง ดังรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 ในการควบคุมแบบพีไอ เมื่อทำการเพิ่มค่าในเทอมปริพันธ์จะทำให้สามารถกำจัดความผิดพลาดที่สถานะคงตัว แต่ถ้าเพิ่มมากเกินไปจะทำให้เกิดการแกว่งมากขึ้นดังรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 และในส่วนของ การควบคุมแบบพีไอดี เมื่อทำการเพิ่มค่าในเทอมอนุพันธ์จะทำให้ค่าพุ่งเกินสูงสุดที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าลดลง เข้าสู่สถานะคงตัวได้เร็วขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มค่าเทอมอนุพันธ์ที่มากเกินไปก็อาจเกิดการแกว่งเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.12 ถึงรูปที่ 4.14 นอกจากนั้นสังเกตได้จากรูปที่ 4.10 ถึงรูปที่ 4.14 ว่าการระงับการปริพันธ์สามารถทำงานได้ถูกต้อง โดยสัญญาณควบคุมจะเปลี่ยนแปลงทันทีเมื่อเอาต์พุตมีค่ามากเกินไปกว่าค่าเป้าหมาย

ผลการทดลองทั้งหมดยืนยันถึงประสิทธิภาพของกล่องควบคุมที่พัฒนาขึ้นว่าสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้จริง และมีต้นทุนต่ำในวงเงิน 4,500 บาท สำหรับกล่องควบคุมต้นแบบนี้

5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข

1. ทรานสมิเตอร์ที่ใช้มีช่วงในการวัดที่ไม่เหมาะสมกับกระบวนการ ทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัด ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยเปลี่ยนทรานสมิเตอร์หรือแก้ไขกระบวนการให้มีขนาดใหญ่ขึ้น
2. การสั่งงานการหมุนของวาล์วโดยใช้สเต็ปมอเตอร์มีรอบจำนวนสเต็ปที่ใช้ในการหมุนต่อเปอร์เซ็นต์ค่าที่ส่งออกจากตัวควบคุมน้อยเกินไป คือ 1 สเต็ปต่อ 2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถเพิ่มความละเอียดในการควบคุมได้โดยการใส่เฟืองทดเพื่อลดมุมการหมุนในแต่ละสเต็ปของสเต็ปมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

คู่มือการใช้งานอุปกรณ์ในโครงการ

ก.1 เอกสารคู่มือการใช้งานไอซี 7805



L7800 series

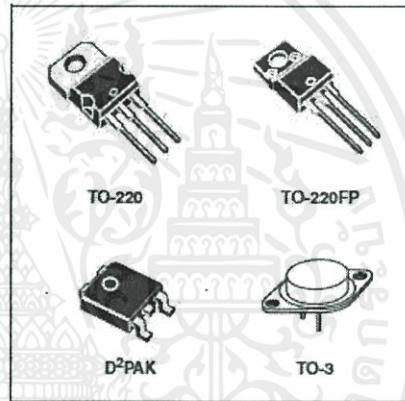
Positive voltage regulators

Feature summary

- Output current to 1.5A
- Output voltages of 5; 5.2; 6; 8; 8.5; 9; 10; 12; 15; 18; 24V
- Thermal overload protection
- Short circuit protection
- Output transition SOA protection

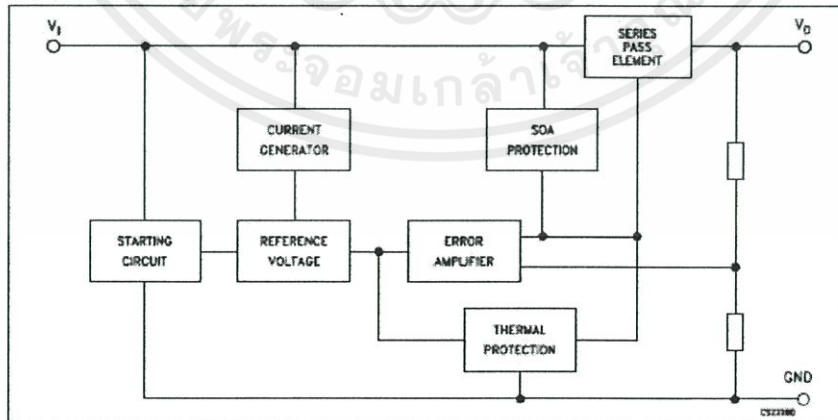
Description

The L7800 series of three-terminal positive regulators is available in TO-220, TO-220FP, TO-3 and D²PAK packages and several fixed output voltages, making it useful in a wide range of applications. These regulators can provide local on-card regulation, eliminating the distribution problems associated with single point regulation. Each type employs internal current limiting, thermal shut-down and safe area protection, making it essentially indestructible. If adequate heat sinking is provided, they can deliver over 1A output current. Although designed



primarily as fixed voltage regulators, these devices can be used with external components to obtain adjustable voltage and currents.

Schematic diagram



August 2006

Rev. 13

1/47

www.st.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจาก ST
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4 Electrical characteristics


Table 3. Electrical characteristics of L7805 (refer to the test circuits, $T_J = -55$ to 150°C , $V_I = 10\text{V}$, $I_O = 500\text{ mA}$, $C_I = 0.33\ \mu\text{F}$, $C_O = 0.1\ \mu\text{F}$ unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Test conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
V_O	Output voltage	$T_J = 25^\circ\text{C}$	4.8	5	5.2	V
V_O	Output voltage	$I_O = 5\text{mA to } 1\text{A}$, $P_O \leq 15\text{W}$ $V_I = 8$ to 20V	4.65	5	5.35	V
$\Delta V_O^{(1)}$	Line regulation	$V_I = 7$ to 25V , $T_J = 25^\circ\text{C}$		3	50	mV
		$V_I = 8$ to 12V , $T_J = 25^\circ\text{C}$		1	25	
$\Delta V_O^{(1)}$	Load regulation	$I_O = 5\text{ mA to } 1.5\text{A}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$			100	mV
		$I_O = 250$ to 750mA , $T_J = 25^\circ\text{C}$			25	
I_Q	Quiescent current	$T_J = 25^\circ\text{C}$			6	mA
ΔI_Q	Quiescent current change	$I_O = 5\text{mA to } 1\text{A}$			0.5	mA
		$V_I = 8$ to 25 V			0.8	
$\Delta V_O/\Delta T$	Output voltage drift	$I_O = 5\text{mA}$		0.6		mV/ $^\circ\text{C}$
eN	Output noise voltage	$B = 10\text{Hz to } 100\text{kHz}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$			40	$\mu\text{V}/V_O$
SVR	Supply voltage rejection	$V_I = 8$ to 18V , $f = 120\text{Hz}$	88			dB
V_d	Dropout voltage	$I_O = 1\text{A}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$		2	2.5	V
R_O	Output resistance	$f = 1\text{ KHz}$		17		m Ω
I_{sc}	Short circuit current	$V_I = 35\text{V}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$		0.75	1.2	A
I_{scp}	Short circuit peak current	$T_J = 25^\circ\text{C}$	1.3	2.2	3.3	A

1. Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in V_O due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty cycle is used.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2 เอกสารคู่มือการใช้งานไอซี LM1117T


April 2001

LM1117/LM1117I

800mA Low-Dropout Linear Regulator

General Description

The LM1117 is a series of low dropout voltage regulators with a dropout of 1.2V at 800mA of load current. It has the same pin-out as National Semiconductor's industry standard LM317.

The LM1117 is available in an adjustable version, which can set the output voltage from 1.25V to 13.8V with only two external resistors. In addition, it is also available in five fixed voltages, 1.8V, 2.5V, 2.85V, 3.3V, and 5V.

The LM1117 offers current limiting and thermal shutdown. Its circuit includes a zener trimmed bandgap reference to assure output voltage accuracy to within $\pm 1\%$.

The LM1117 series is available in SOT-223, TO-220, and TO-252 D-PAK packages. A minimum of 10 μ F tantalum capacitor is required at the output to improve the transient response and stability.

Features

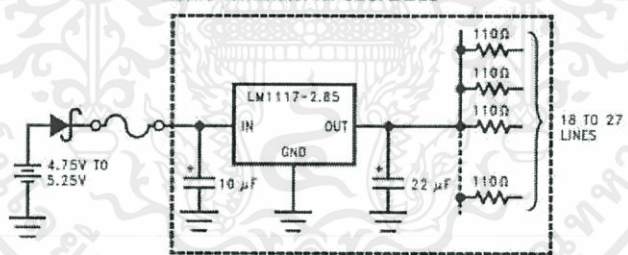
- Available in 1.8V, 2.5V, 2.85V, 3.3V, 5V, and Adjustable Versions
- Space Saving SOT-223 Package
- Current Limiting and Thermal Protection
- Output Current 800mA
- Line Regulation 0.2% (Max)
- Load Regulation 0.4% (Max)
- Temperature Range
- LM1117 0°C to 125°C
- LM1117I -40°C to 125°C

Applications

- 2.85V Model for SCSI-2 Active Termination
- Post Regulator for Switching DC/DC Converter
- High Efficiency Linear Regulators
- Battery Charger
- Battery Powered Instrumentation

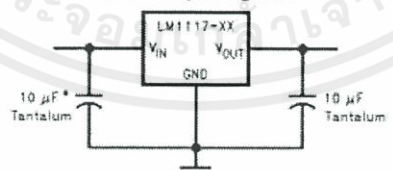
Typical Application

Active Terminator for SCSI-2 Bus



DS100919-5

Fixed Output Regulator



* Required if the regulator is located far from the power supply filter.
DS100919-2B

LM1117/LM1117I

Absolute Maximum Ratings (Note 1)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

Maximum Input Voltage (V_{IN} to GND)

LM1117-ADJ, LM1117-1.8,
LM1117-2.5, LM1117-3.3,
LM1117-5.0, LM1117I-ADJ,
LM1117I-5.0

Power Dissipation (Note 2)

20W
Internally Limited

Junction Temperature (T_J) (Note 2)

150°C

Storage Temperature Range

-65°C to 150°C

Lead Temperature

TO-220 (T) Package

260°C, 10 sec

SOT-223 (IMP) Package

260°C, 4 sec

ESD Tolerance (Note 3)

2000V

Operating Ratings (Note 1)Input Voltage (V_{IN} to GND)

LM1117-ADJ, LM1117-1.8,

LM1117-2.5, LM1117-3.3,

LM1117-5.0, LM1117I-ADJ,

LM1117I-5.0

15V

LM1117-2.85

10V

Junction Temperature Range (T_J) (Note 2)

LM1117

0°C to 125°C

LM1117I

-40°C to 125°C

LM1117 Electrical Characteristics

Typicals and limits appearing in normal type apply for $T_J = 25^\circ\text{C}$. Limits appearing in Boldface type apply over the entire junction temperature range for operation, 0°C to 125°C.

Symbol	Parameter	Conditions	Min (Note 5)	Typ (Note 4)	Max (Note 5)	Units		
V_{REF}	Reference Voltage	LM1117-ADJ $I_{OUT} = 10\text{mA}$, $V_{IN} - V_{OUT} = 2\text{V}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$ $10\text{mA} \leq I_{OUT} \leq 800\text{mA}$, $1.4\text{V} \leq V_{IN} - V_{OUT} \leq 10\text{V}$	1.238 1.225	1.250 1.250	1.262 1.270	V V		
		LM1117-1.8 $I_{OUT} = 10\text{mA}$, $V_{IN} = 3.8\text{V}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$ $0 \leq I_{OUT} \leq 800\text{mA}$, $3.2\text{V} \leq V_{IN} \leq 10\text{V}$	1.782 1.746	1.800 1.800	1.818 1.854	V V		
V_{OUT}	Output Voltage	LM1117-2.5 $I_{OUT} = 10\text{mA}$, $V_{IN} = 4.5\text{V}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$ $0 \leq I_{OUT} \leq 800\text{mA}$, $3.9\text{V} \leq V_{IN} \leq 10\text{V}$	2.475 2.450	2.500 2.500	2.525 2.550	V V		
		LM1117-2.85 $I_{OUT} = 10\text{mA}$, $V_{IN} = 4.85\text{V}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$ $0 \leq I_{OUT} \leq 800\text{mA}$, $4.25\text{V} \leq V_{IN} \leq 10\text{V}$ $0 \leq I_{OUT} \leq 500\text{mA}$, $V_{IN} = 4.10\text{V}$	2.820 2.790 2.790	2.850 2.850 2.850	2.880 2.910 2.910	V V V		
		LM1117-3.3 $I_{OUT} = 10\text{mA}$, $V_{IN} = 5\text{V}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$ $0 \leq I_{OUT} \leq 800\text{mA}$, $4.75\text{V} \leq V_{IN} \leq 10\text{V}$	3.267 3.235	3.300 3.300	3.333 3.365	V V		
		LM1117-5.0 $I_{OUT} = 10\text{mA}$, $V_{IN} = 7\text{V}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$ $0 \leq I_{OUT} \leq 800\text{mA}$, $6.5\text{V} \leq V_{IN} \leq 12\text{V}$	4.950 4.900	5.000 5.000	5.050 5.100	V V		
		ΔV_{OUT}	Line Regulation (Note 6)	LM1117-ADJ $I_{OUT} = 10\text{mA}$, $1.5\text{V} \leq V_{IN} - V_{OUT} \leq 13.75\text{V}$		0.035	0.2	%
				LM1117-1.8 $I_{OUT} = 0\text{mA}$, $3.2\text{V} \leq V_{IN} \leq 10\text{V}$		1	6	mV
LM1117-2.5 $I_{OUT} = 0\text{mA}$, $3.9\text{V} \leq V_{IN} \leq 10\text{V}$				1	6	mV		
LM1117-2.85 $I_{OUT} = 0\text{mA}$, $4.25\text{V} \leq V_{IN} \leq 10\text{V}$				1	6	mV		
LM1117-3.3 $I_{OUT} = 0\text{mA}$, $4.75\text{V} \leq V_{IN} \leq 15\text{V}$				1	6	mV		
LM1117-5.0 $I_{OUT} = 0\text{mA}$, $6.5\text{V} \leq V_{IN} \leq 15\text{V}$				1	10	mV		

www.national.com

4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.3 เอกสารคู่มือการใช้งานไอซี L298N



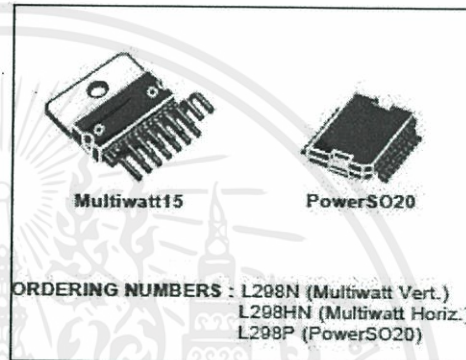
L298

DUAL FULL-BRIDGE DRIVER

- OPERATING SUPPLY VOLTAGE UP TO 46 V
- TOTAL DC CURRENT UP TO 4 A
- LOW SATURATION VOLTAGE
- OVERTEMPERATURE PROTECTION
- LOGICAL "0" INPUT VOLTAGE UP TO 1.5 V (HIGH NOISE IMMUNITY)

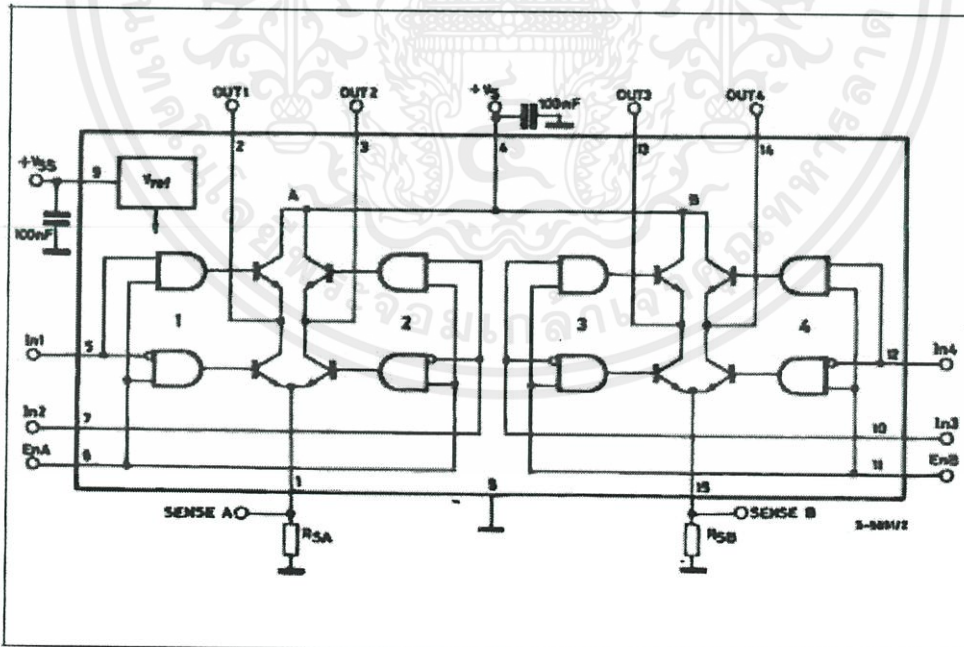
DESCRIPTION

The L298 is an integrated monolithic circuit in a 15-lead Multiwatt and PowerSO20 packages. It is a high voltage, high current dual full-bridge driver designed to accept standard TTL logic levels and drive inductive loads such as relays, solenoids, DC and stepping motors. Two enable inputs are provided to enable or disable the device independently of the input signals. The emitters of the lower transistors of each bridge are connected together and the corresponding external terminal can be used for the con-



nection of an external sensing resistor. An additional supply input is provided so that the logic works at a lower voltage.

BLOCK DIAGRAM

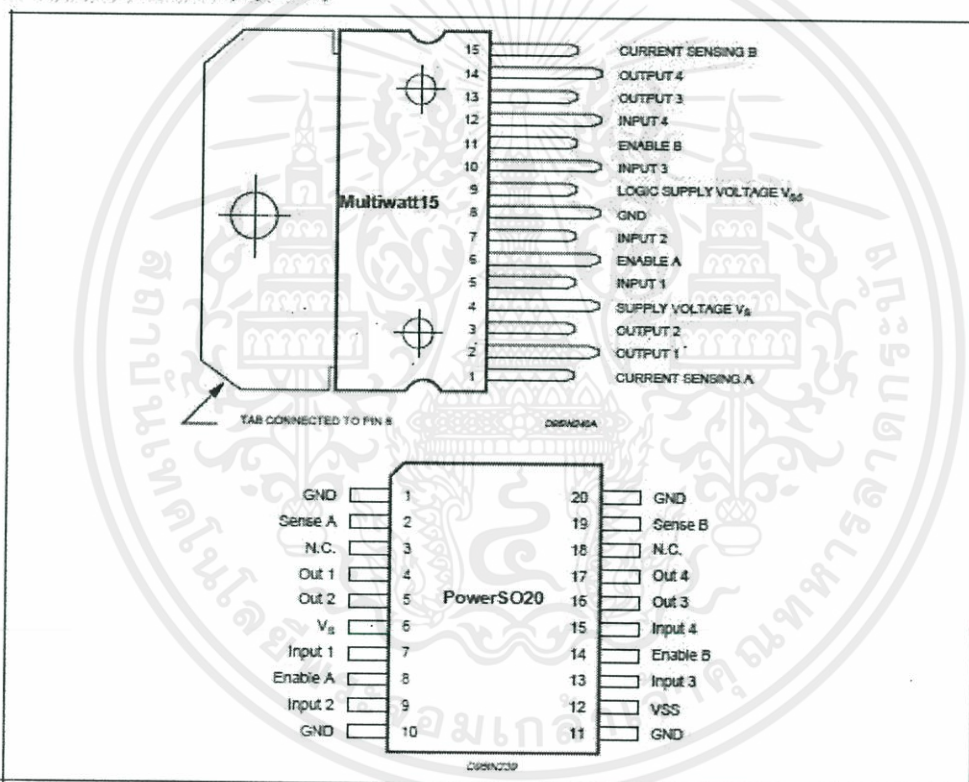


L298

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Unit
V_{S}	Power Supply	50	V
V_{SS}	Logic Supply Voltage	7	V
V_{I}, V_{EN}	Input and Enable Voltage	-0.3 to 7	V
I_{O}	Peak Output Current (each Channel)		
	- Non Repetitive ($t = 100\mu s$)	3	A
	- Repetitive (80% on -20% off, $t_{on} = 10ms$)	2.5	A
	-DC Operation	2	A
V_{Sens}	Sensing Voltage	-1 to 2.3	V
P_{tot}	Total Power Dissipation ($T_{case} = 75^{\circ}C$)	25	W
T_{op}	Junction Operating Temperature	-25 to 130	$^{\circ}C$
T_{stg}, T_{j}	Storage and Junction Temperature	-40 to 150	$^{\circ}C$

PIN CONNECTIONS (top view)



THERMAL DATA

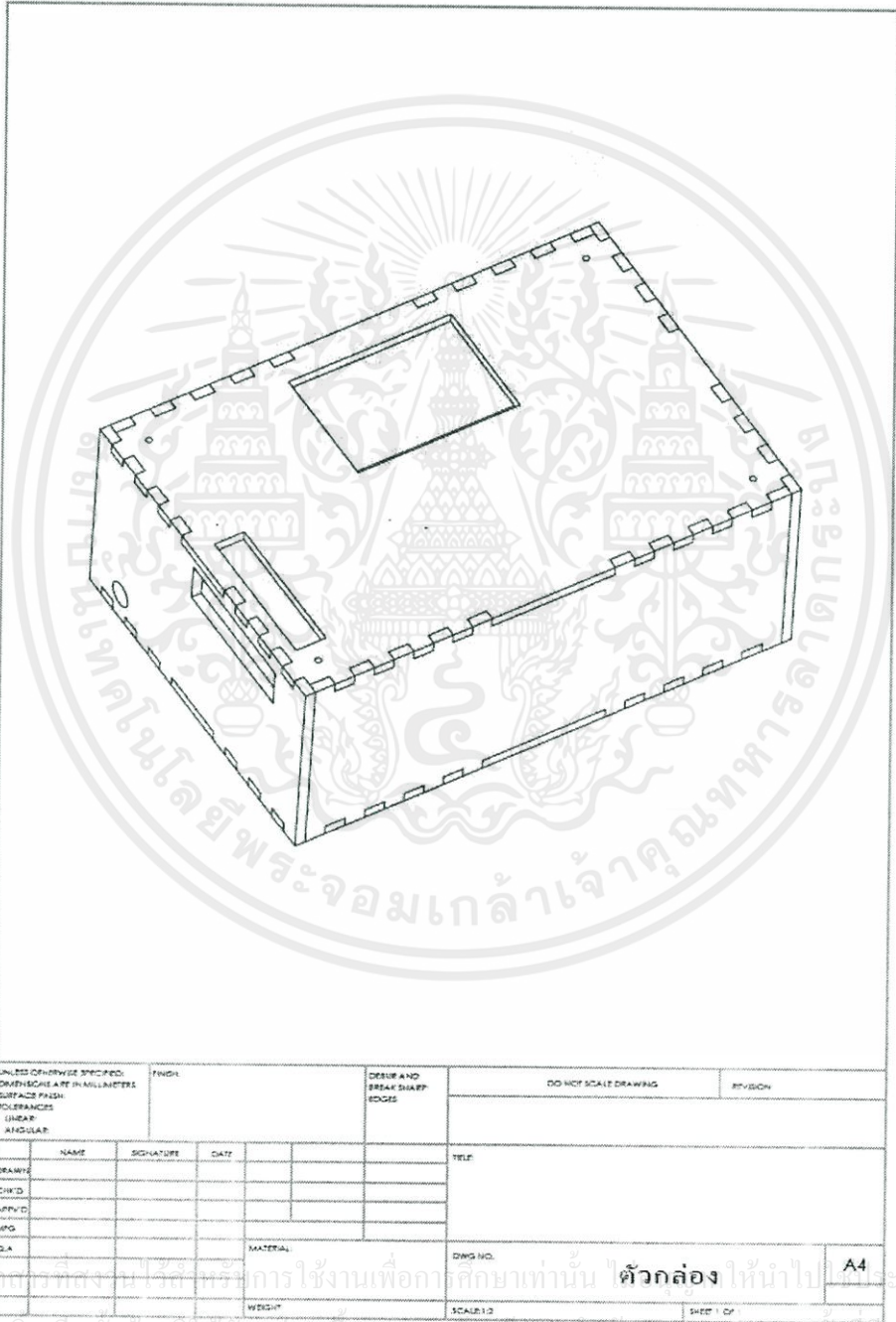
Symbol	Parameter		PowerSO20	Multiwatt15	Unit
$R_{th(j-case)}$	Thermal Resistance Junction-case	Max.	-	3	$^{\circ}C/W$
$R_{th(j-amb)}$	Thermal Resistance Junction-ambient	Max.	13 (*)	35	$^{\circ}C/W$

(*) Mounted on aluminum substrate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
แบบและโครงสร้าง

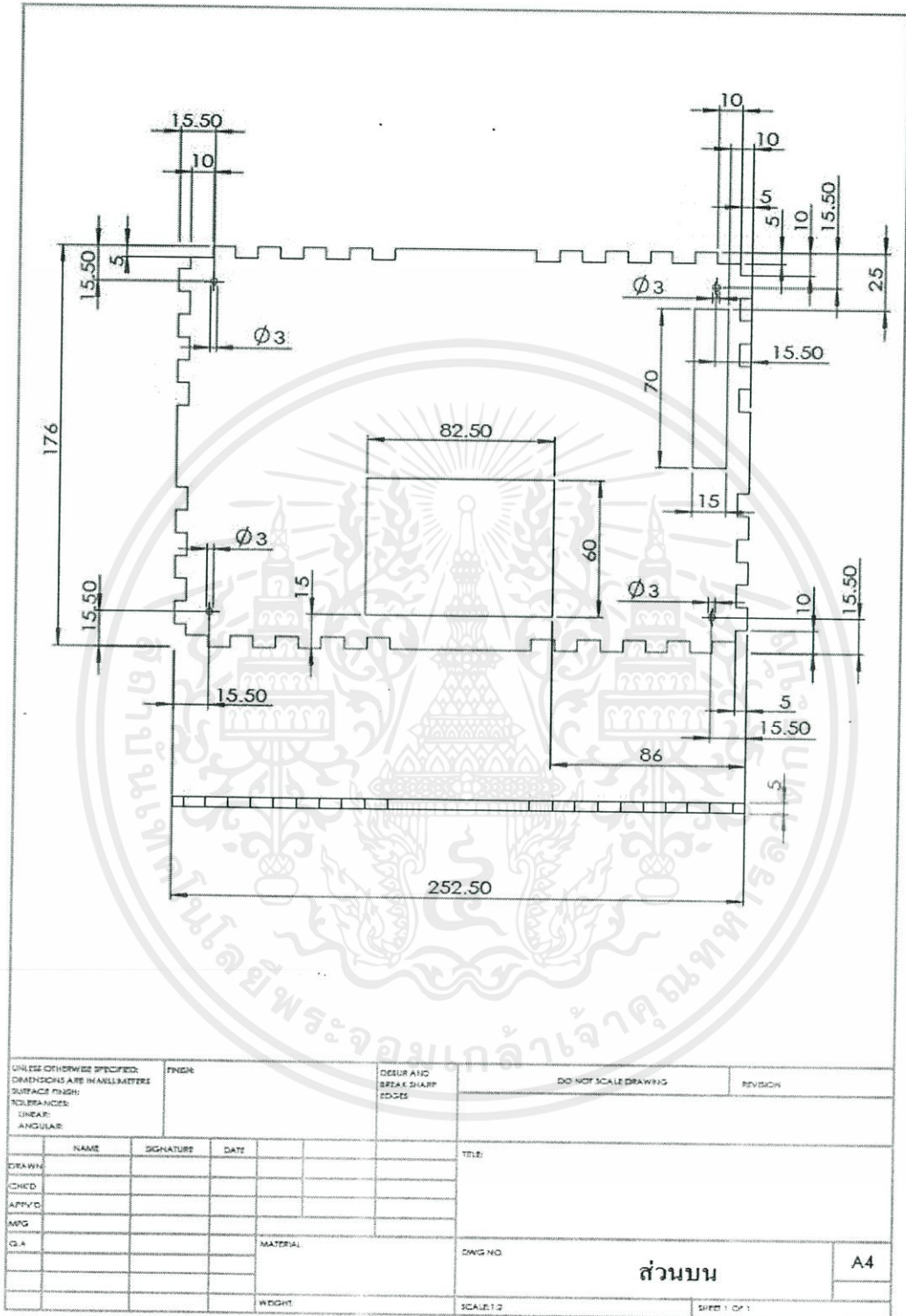
ข.1 โครงสร้างของกล่องควบคุม



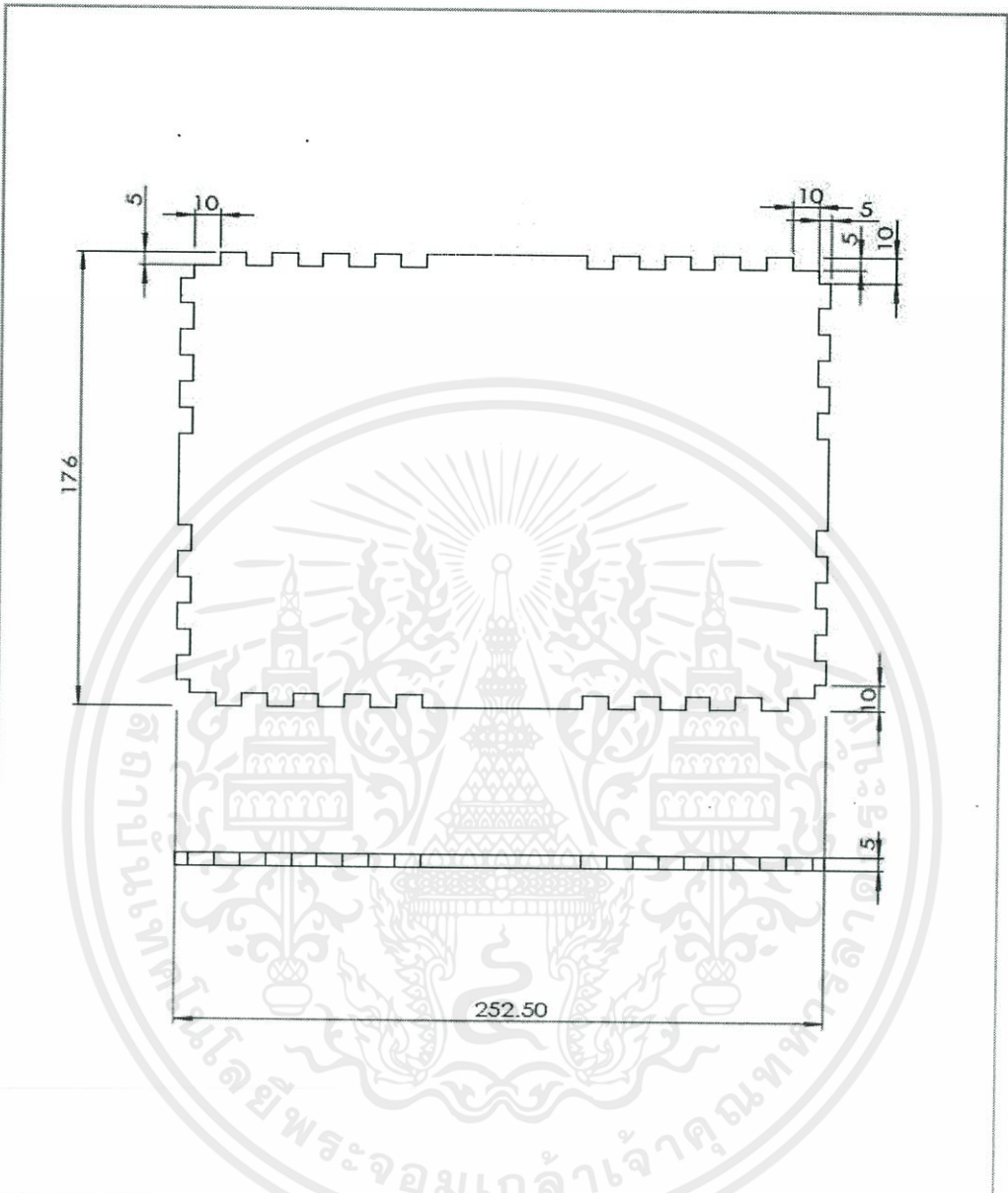
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น "ตัวกล่อง" ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:	DESURE AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
NAME	SIGNATURE	DATE		TITLE	
DRAWN					
CHECKED					
APPROVED					
DATE					
C.O.A.			MATERIAL:	DWG NO.	ภาพฉาย
			WEIGHT:	SCALE: 1:1	A4
					SHEET 1 OF 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

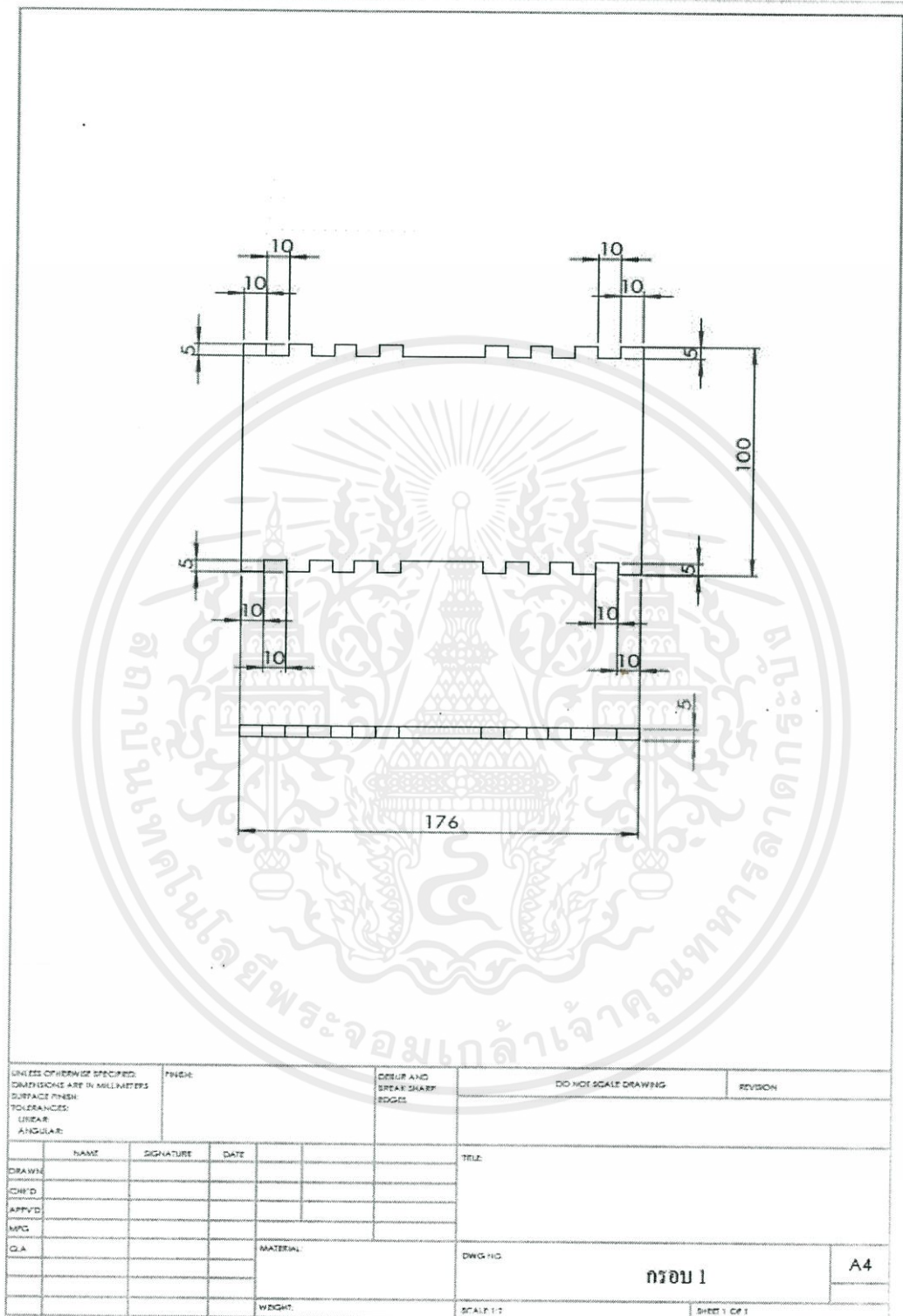


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

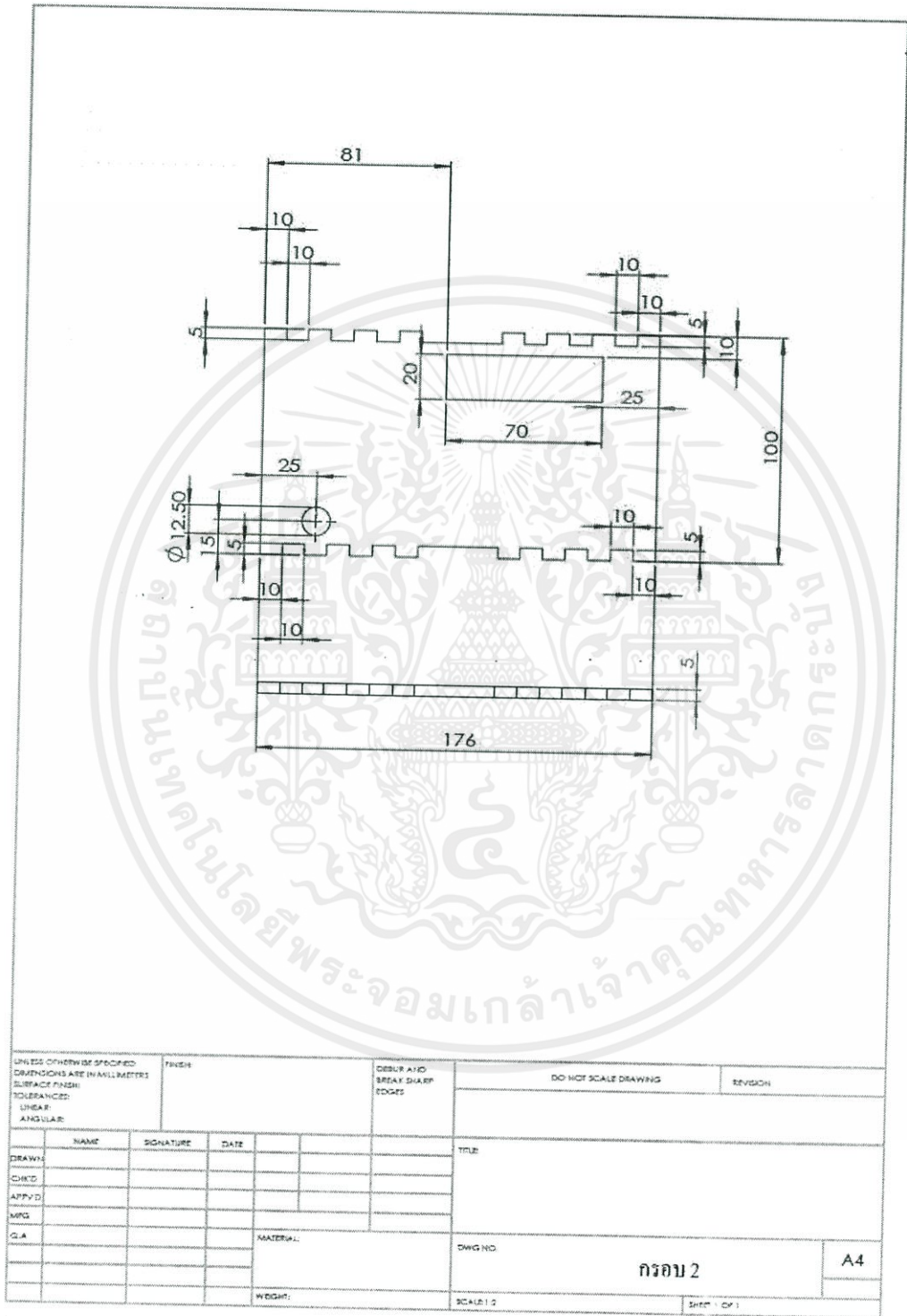


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:		DRESS AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:									
TOLERANCES:									
LINEAR:									
ANGULAR:									
DRAWN		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
CHECKED									
APPROVED									
MFG									
Q.A				MATERIAL		DWG NO.		A4	
						ฐาน			
				WEIGHT:		SCALE: 1:1		SHEET 1 OF 1	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

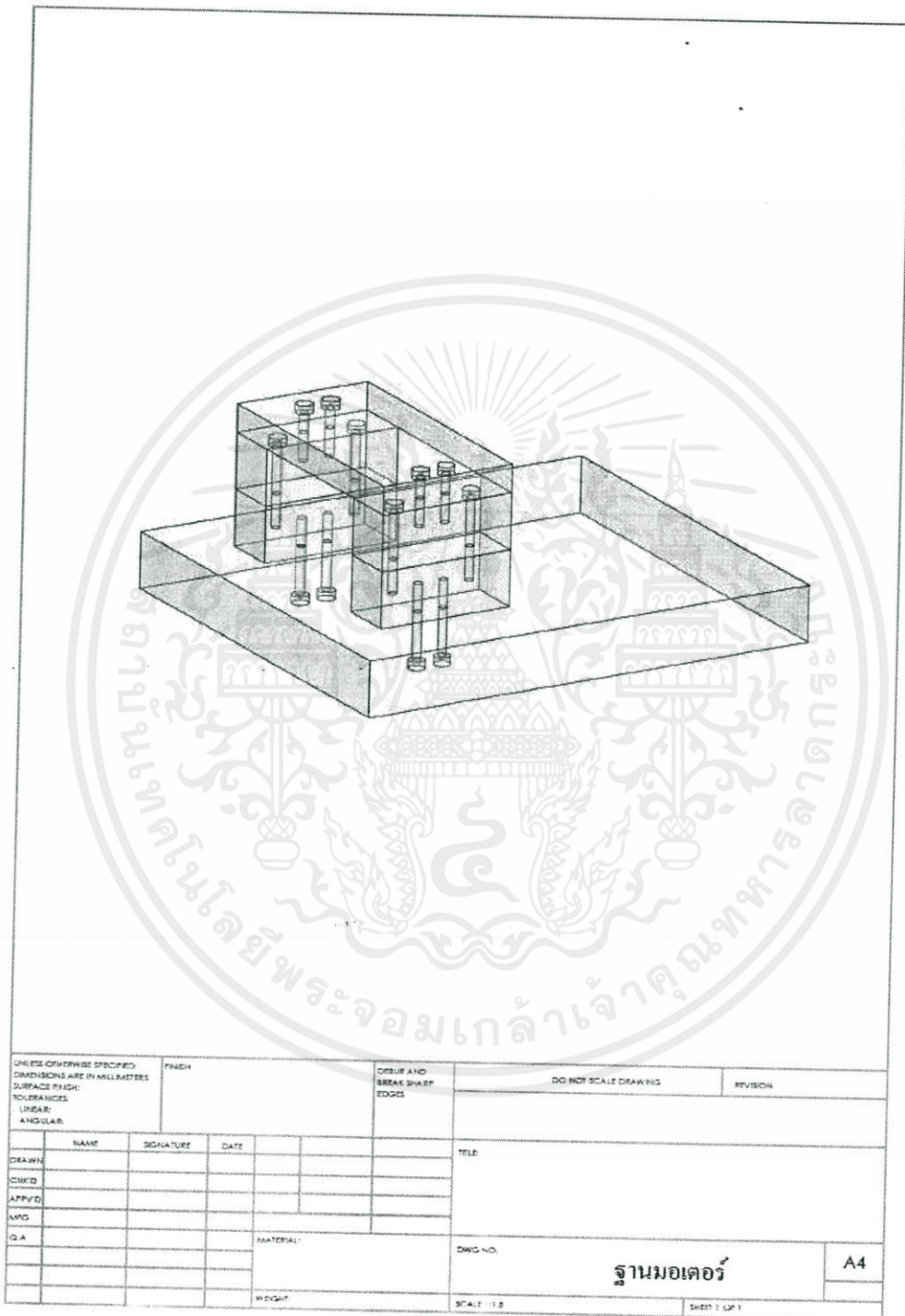


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.2 โครงสร้างของอุปกรณ์ยึดมอเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The drawing shows a mechanical part with the following dimensions and features:

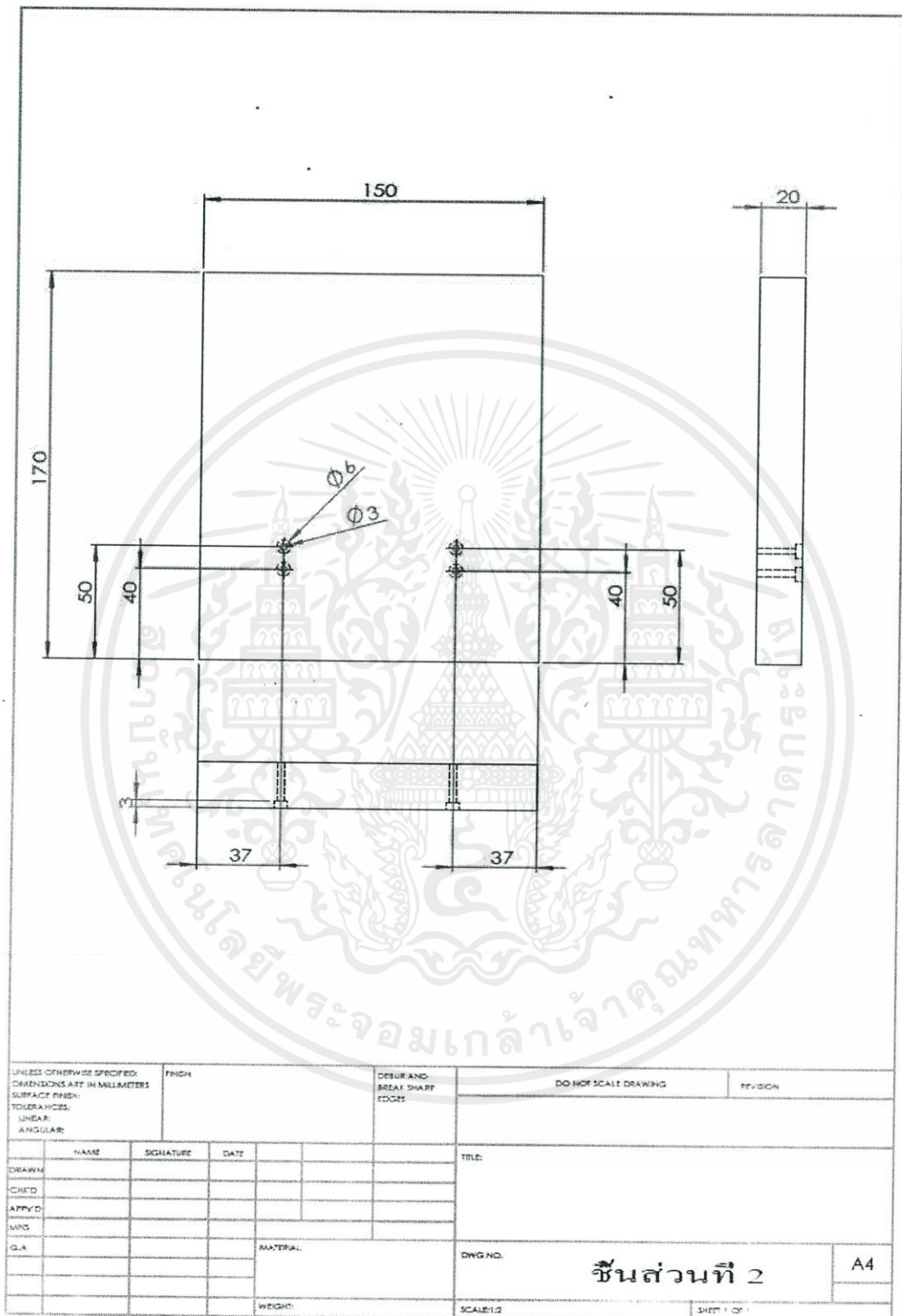
- Overall width: 50
- Overall height: 20
- Top section height: 12
- Bottom section height: 10
- Two circular holes, each with a diameter of $\phi 3$.
- Two vertical slots, each with a width of 10.
- Two vertical holes, each with a diameter of $\phi 3$.

The title block contains the following information:

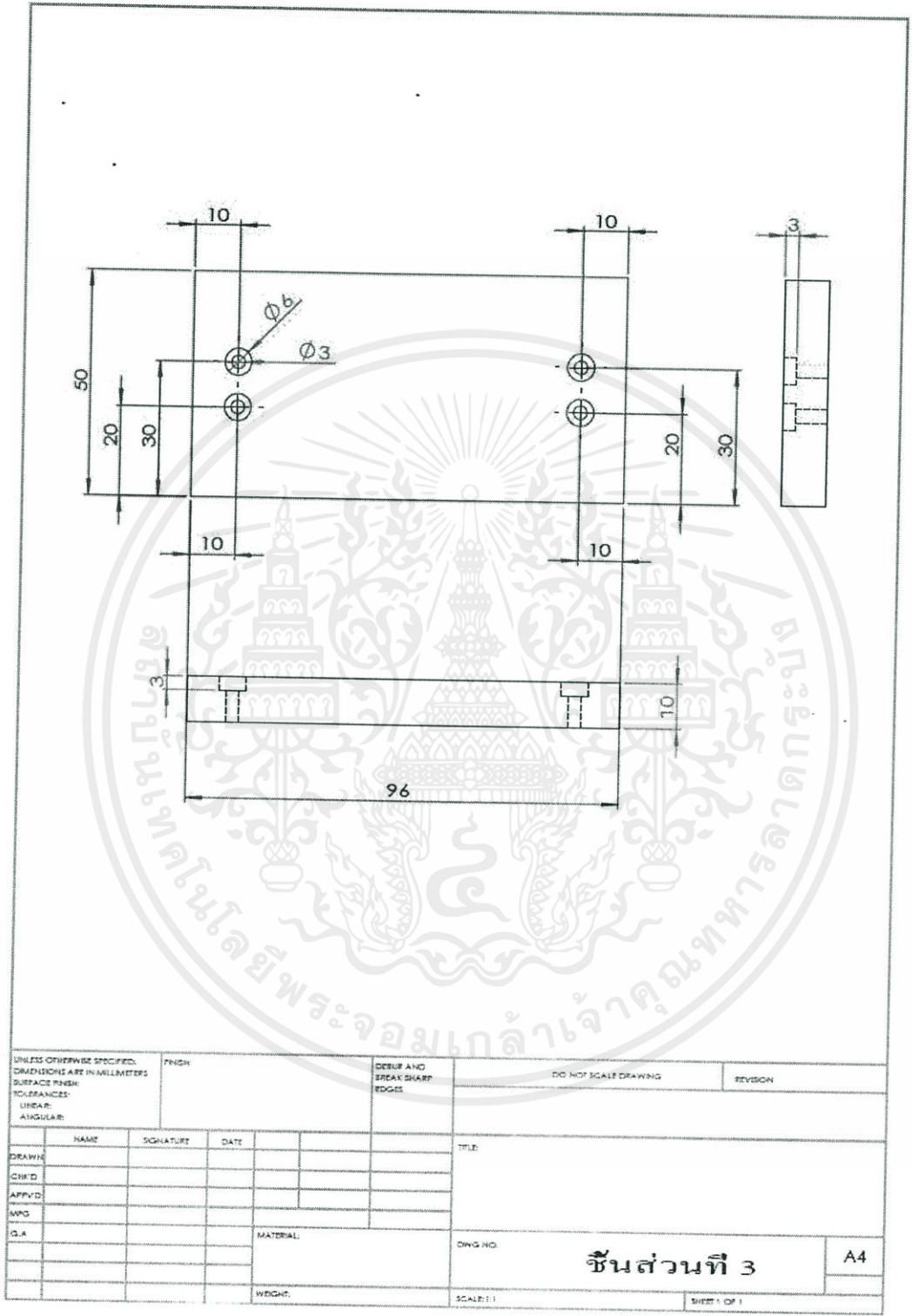
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH		CLEAR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:									
TOLERANCES:									
LINEAR:									
ANGULAR:									
NAME	SIGNATURE	DATE				TITLE			
DRAWN									
CHECKED									
APPROVED									
DATE									
				MATERIAL:		DWG NO.		A4	
				WEIGHT:		SCALE: 1:0.5		SHEET 1 OF 1	

ชิ้นส่วนที่ 1 (2ชั้น)

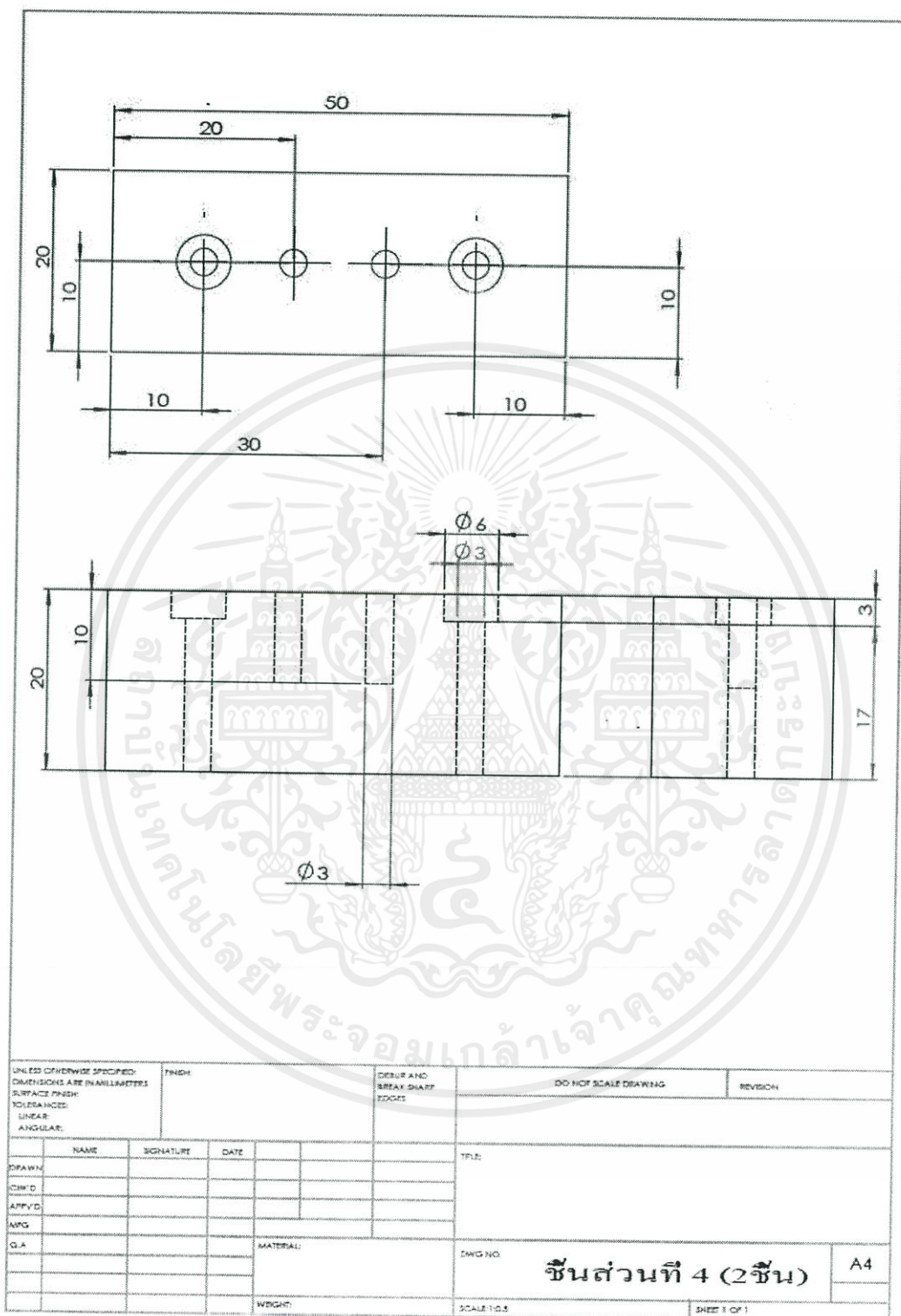
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์. เซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). กรุงเทพฯ. 2556.
- [2] Newcastle University. “Discretised PID Controllers.” [Online]. Available : <http://lorien.ncl.ac.uk/ming/digicont/digimath/dpid1.htm>. 1998.
- [3] Wikipedia. “Integral Windup.” [Online]. Available : http://en.wikipedia.org/wiki/Integral_windup. 2015.
- [4] Controlguru. “Integral (Reset) Windup.” [Online]. Available : <http://www.controlguru.com/2008/021008.html>. 2008.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้