

การออกแบบการควบคุม PIDmn โดย WIO เทอร์มินัล
สำหรับตู้อบต้นไม้ขนาดเล็ก
DESIGN OF PIDmn CONTROL BASED ON WIO TERMINAL
FOR MINIATURE TREE INCUBATOR



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มี

อ.ชัชฎาภรณ์
ธฤต บุญเจริญ
ธมด ๒๕๖๕

การออกแบบการควบคุม PIDmn โดย WIO เทอร์มินัล
สำหรับตู้อบต้นไม้ขนาดเล็ก
DESIGN OF PIDmn CONTROL BASED ON WIO TERMINAL
FOR MINIATURE TREE INCUBATOR



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN OF PID_mn CONTROL BASED ON WIO TERMINAL
FOR MINIATURE TREE INCUBATOR



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LARDKRABANG

ACADEMIC YEAR 2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2565
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

.....

หัวข้อปริญญาานิพนธ์ การออกแบบการควบคุม PIDmn โดย WIO เทอร์มินัลสำหรับตู้อบต้นไม้ขนาดเล็ก

DESIGN OF PIDmn CONTROL BASED ON WIO TERMINAL FOR MINIATURE TREE INCUBATOR

นักศึกษาผู้จัดทำ นายชิษณุพงศ์ ศิลสังวรรณ รหัสนักศึกษา 63015041

นายธฤต บุญเจริญ รหัสนักศึกษา 63015076

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม

ปีการศึกษา 2565

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ดร. อาจินต์ นวมสำราญ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การออกแบบการควบคุม PID _{mn} โดย WIO เทอร์มินัลสำหรับตู้อบต้นไม้ขนาดเล็ก		
	DESIGN OF PID _{mn} CONTROL BASED ON WIO TERMINAL FOR MINIATURE TREE INCUBATOR		
นักศึกษาผู้จัดทำ	นายชิษณุพงศ์	ศิลสังวรรณ	รหัสนักศึกษา 63015041
	นายธฤต	บุญเจริญ	รหัสนักศึกษา 63015076
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. อาจินต์	น่วมสำราญ	
ปีการศึกษา	2565		

บทคัดย่อ

โครงการนี้นำเสนอการออกแบบการควบคุม PID_{mn} โดย WIO เทอร์มินัลสำหรับตู้อบต้นไม้ขนาดเล็ก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการออกแบบตัวควบคุม PID_{mn} ให้สามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสำหรับการอบต้นไม้ขนาดเล็กภายในสภาพแวดล้อมที่ถูกควบคุม ซึ่งส่งผลให้ต้นไม้ขนาดเล็กมีสุขภาพดีและความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น โครงการนี้ประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ WIO เทอร์มินัล ตู้อบต้นไม้ขนาดเล็ก และการออกแบบการควบคุม PID_{mn} โดย WIO เทอร์มินัล คือ บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ 32 บิต ARM Cortex-M4F ที่มี Floating-Point Unit ทำให้สามารถคำนวณตัวเลขที่มีหลักทศนิยมได้ อีกทั้งยังมีฟังก์ชันต่าง ๆ อีกมากมาย ในส่วนของตู้อบต้นไม้ขนาดเล็กภายในประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดและควบคุมอุณหภูมิและความชื้น และในส่วนของการออกแบบการควบคุม PID_{mn} เป็นการออกแบบการควบคุม PID_{mn} ให้สามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นภายในตู้อบต้นไม้ขนาดเล็กได้ ซึ่งในการดำเนินการศึกษามีวิธีการศึกษาประกอบด้วย การศึกษาตัวควบคุม PID_{mn}, กระบวนการควบคุมอุณหภูมิ, กระบวนการควบคุมความชื้น, ข้อมูลจำเพาะของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ WIO เทอร์มินัล, การเขียนโปรแกรมบนไมโครคอนโทรลเลอร์ WIO เทอร์มินัล, การเขียนโปรแกรม GUI และการแสดงผล GUI ตลอดจนการแสดงผล และการบันทึกข้อมูลผ่าน IoT platform โดยจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าในการออกแบบการควบคุม PID_{mn} สามารถบรรลุพฤติกรรมของผลตอบสนองทางเอาต์พุตของอุณหภูมิ และความชื้นภายในตู้อบต้นไม้ขนาดเล็กได้ตามเงื่อนไขที่ได้กำหนด รวมทั้งสามารถแสดงผล Graphical user interface บนหน้าจอ WIO เทอร์มินัลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Thesis Title	DESIGN OF PIDmn CONTROL BASED ON WIO TERMINAL FOR MINIATURE TREE INCUBATOR
Authors	Mr. Chitsanupong Silsangwon Mr. Tharit Boonjarean
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Arjin Numsomran
Year	2022

ABSTRACT

This project introduces the design of PIDmn control based on WIO terminal for miniature tree incubators with the aim of studying a design of PIDmn controller to control temperature and humidity for miniature tree. By the controlled environment condition, the miniature tree will be kept healthy and strong. The project consists of three main parts, the WIO terminal, a miniature incubator and the design of PIDmn control. The WIO Terminal is a 32-bit ARM Cortex-M4F microcontroller board with Floating-Point Unit, enabling numerical calculations with decimal. It also has many other functions. The miniature incubator consists of devices used to measure and control temperature and humidity. In the part of the PIDmn control is a PIDmn controller design which can control the temperature and humidity inside the miniature tree incubator. In this study, there are many methodologies consisting of a study on PIDmn controller, temperature process control, humidity process control, specification of WIO terminal microcontroller board, WIO terminal microcontroller programming, GUI programming and display, as well as display and data recording through the IoT platform. The experimental results showed that the design of PIDmn control can achieve the output response behavior of temperature and humidity inside the miniature incubator followed the required setpoint condition as well as It's capable to display the graphical user interface on WIO terminal screen effectively.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความเมตตาจากรองศาสตราจารย์ ดร. อาจินต์ น่วมสำราญ ที่ให้ความอนุเคราะห์เป็นอาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์นี้ และได้ให้คำแนะนำในด้านเทคนิคในการควบคุมต่าง ๆ ตลอดจนคำปรึกษา และแนะนำในด้านต่าง ๆ รวมไปถึงสอนทักษะการคิดและบริหารในด้านการทำงาน ทำให้ทางคณะผู้จัดทำได้มีการฝึกและพัฒนาตนเองไปในทางที่ดียิ่งขึ้น

อีกทั้งขอขอบคุณคณะกรรมการสอบปริญญาานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำและแนวทางในการปรับปรุงปริญญาานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น รวมไปถึงจนถึงคณะอาจารย์และรุ่นพี่ในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ได้สั่งสอนและถ่ายทอดวิชาความรู้ ประสบการณ์ และเทคนิคต่าง ๆ ทำให้ทางคณะผู้จัดทำสามารถนำความรู้เหล่านั้นมาใช้ในการทำวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปริญญานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์	1
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 เกริ่นนำ	3
2.2 Thermal system.....	3
2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	3
2.4 System identification.....	4
2.4.1 ข้อมูลในการใช้ระบบ.....	5
2.4.1.1 อินพุตและเอาต์พุตของระบบ (Input/Output)	5
2.4.1.2 เลือกโครงสร้างสำหรับระบบ (Model Structure).....	5
2.4.1.3 ประมาณค่าตัวแปรที่ปรับค่าได้ (Estimate adjustable value).....	6
2.4.1.4 ประเมินแบบจำลอง (Evaluate).....	6
2.4.2 การระบุระบบเชิงเส้นลำดับที่หนึ่งพร้อมช่วงเวลาไร้ผลตอบสนอง	6
2.4.2.1 อัตราขยายของกระบวนการ (K_p).....	6
2.4.2.2 ค่าคงตัวเวลาของกระบวนการ (τ_p).....	7
2.4.2.3 ช่วงเวลาไร้ผลตอบสนองของกระบวนการ (θ_p).....	7
2.5 ระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์	8
2.5.1 ผลของสัดส่วน.....	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5.2 ผลของปริพันธ์.....	9
2.5.3 ผลของอนุพันธ์	9
2.6 ตัวควบคุม PID_n^m	10
2.7 Graphical User Interface (GUI).....	11
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	13
3.1 เกริ่นนำ.....	13
3.2 ภาพรวมขององค์ประกอบหลักของระบบ.....	13
3.3 การออกแบบระบบสำหรับใช้ในการควบคุมกระบวนการ.....	14
3.4 การ Modeling ระบบสำหรับใช้ในการออกแบบการควบคุม PID_n^m	17
3.4.1 การ Modeling ระบบสำหรับใช้ในการออกแบบการควบคุมอุณหภูมิ	17
ในระบบวงปิด	
3.4.2 การ Modeling ระบบสำหรับใช้ในการออกแบบการควบคุมอุณหภูมิ	21
ในระบบวงปิด	
3.5 การออกแบบการควบคุม PID_n^m ที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการ.....	24
3.5.1 การออกแบบการควบคุม PID_n^m สำหรับการควบคุมอุณหภูมิ.....	26
ในระบบวงปิด	
3.5.2 การออกแบบการควบคุม PID_n^m สำหรับการควบคุมความชื้น	29
ในระบบวงปิด	
3.6 การออกแบบโปรแกรมการทำงานของ WIO เทอร์มินัล	31
บทที่ 4 ผลการทดลอง	37
4.1 เกริ่นนำ	37
4.2 การทดลองการควบคุมอุณหภูมิภายในระบบด้วย PID_n^m	37
4.3 การทดลองการควบคุมความชื้นภายในระบบด้วย PID_n^m	41
4.4 การทดลองการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นภายในระบบด้วย PID_n^m	44
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	48
5.1 สรุปผล.....	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาดเห็นาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	48
บรรณานุกรม.....	50
ภาคผนวก.....	53
ประวัติผู้เขียน.....	80



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 เงื่อนไขของกระบวนการ (อุณหภูมิ).....	17
3.2 เงื่อนไขของกระบวนการ (ความชื้น).....	21
3.3 วิธีการปรับจูน PID (Ziegler-Nichols Methods).....	27
4.1 ผลการทดลองการควบคุมอุณหภูมิในระบบ.....	40
4.2 ผลการทดลองการควบคุมความชื้นในระบบ.....	44
4.3 ผลการทดลองการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในระบบพร้อมกัน (อุณหภูมิ).....	47
4.4 ผลการทดลองการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในระบบพร้อมกัน (ความชื้น).....	47



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 Graphical User Interface	12
3.1 แผนผังภาพรวมการทำงานของการออกแบบการควบคุม PID ^m โดย WIO เทอร์มินัล สำหรับตู้อบต้นไม้นขนาดเล็ก	14
3.2 การออกแบบโครงสร้างเบื้องต้นของระบบสำหรับใช้ในการควบคุมกระบวนการ.....	15
3.3 โครงสร้างของระบบที่ออกแบบและวาดใหม่ผ่านโปรแกรม AutoCAD.....	15
3.4 โครงสร้างของระบบที่ประกอบทุกส่วนเข้าด้วยกันในโปรแกรม AutoCAD.....	16
3.5 โครงสร้างของระบบหลังนำขึ้นขึ้นส่วนต่าง ๆ มาประกอบเข้าด้วยกันและติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติม.....	16
3.6 โปรแกรมบน MATLAB Simulink สำหรับใช้ Modeling ระบบอุณหภูมิ	18
3.7 กราฟผลตอบสนองของอุณหภูมิแบบระบบควบคุมวงเปิด.....	19
3.8 โปรแกรม MATLAB Simulink สำหรับประเมินกราฟผลตอบสนอง ฟังก์ชันถ่ายโอน (อุณหภูมิ)	20
3.9 กราฟผลตอบสนองของอุณหภูมิจากฟังก์ชันถ่ายโอนที่ประมาณค่ามาได้.....	20
3.10 โปรแกรมบน MATLAB Simulink สำหรับใช้ Modeling ระบบความชื้น	22
3.11 กราฟผลตอบสนองของความชื้นแบบระบบควบคุมวงเปิด	22
3.12 โปรแกรม MATLAB Simulink สำหรับประเมินกราฟผลตอบสนอง ฟังก์ชันถ่ายโอน (ความชื้น)	24
3.13 กราฟผลตอบสนองของความชื้นจากฟังก์ชันถ่ายโอนที่ประมาณค่ามาได้	24
3.14 สมการการปรับจูน FOPDT อุณหภูมิด้วยวิธีการปรับจูน PID ^m บน Script.....	27
3.15 สมการการปรับจูน PID ด้วยการปรับจูนทั้ง 2 วิธีการที่เขียนบน Script (อุณหภูมิ)	28
3.16 โปรแกรมจำลองการควบคุมอุณหภูมิด้วยวิธีการปรับจูน PID ทั้งสองวิธี.....	28
3.17 กราฟผลตอบสนองของการจำลองการควบคุมอุณหภูมิด้วยวิธีการปรับจูน PID ทั้งสองวิธี	29
3.18 สมการการปรับจูน FOPDT ความชื้นด้วยวิธีการปรับจูน PID ^m บน Script	30
3.19 สมการการปรับจูน PID ด้วยการปรับจูนทั้ง 2 วิธีการที่เขียนบน Script (ความชื้น)	30
3.20 โปรแกรมจำลองการควบคุมความชื้นด้วยวิธีการปรับจูน PID ทั้งสองวิธี	31
3.21 กราฟผลตอบสนองของการจำลองการควบคุมความชื้นด้วยวิธีการปรับจูน PID ทั้งสองวิธี.....	31
3.22 Graphical User Interface รูปแบบจอแสดงผลหลัก (โหมดการทำงาน Manual).....	32
3.23 Graphical User Interface รูปแบบจอแสดงผลหลัก (โหมดการทำงานอัตโนมัติ).....	32
3.24 Graphical User Interface รูปแบบจอสำหรับปรับแต่งค่าตัวแปร.....	33
3.25 Graphical User Interface รูปแบบจอแสดงผลกราฟผลตอบสนอง (อุณหภูมิ).....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.26 Graphical User Interface รูปแบบจอแสดงผลกราฟฟลตอบสนอง (ความชื้น).....	34
3.27 Flowchart แสดงการทำงานของโปรแกรมวน (1).....	35
3.28 Flowchart แสดงการทำงานของโปรแกรมวน (2).....	36
4.1 โปรแกรม Hardware in the loop เพื่อทดลองการควบคุมอุณหภูมิ (PID ^m).....	37
4.2 กราฟแสดงผลการควบคุมอุณหภูมิ(y)ในระบบด้วย PID ^m	38
4.3 กราฟแสดงผลการควบคุมอุณหภูมิ(u)ในระบบด้วย PID ^m	38
4.4 โปรแกรม Hardware in the loop เพื่อทดลองการควบคุมอุณหภูมิ	39
(Ziegler–Nichols method)	
4.5 กราฟแสดงผลการควบคุมอุณหภูมิ(y)ในระบบด้วย PI (Ziegler–Nichols Method)	39
4.6 กราฟแสดงผลการควบคุมอุณหภูมิ(u)ในระบบด้วย PI (Ziegler–Nichols Method).....	40
4.7 โปรแกรม Hardware in the loop เพื่อทดลองการควบคุมความชื้น (PID ^m)	41
4.8 กราฟแสดงผลการควบคุมความชื้น(y)ในระบบด้วย PID ^m	41
4.9 กราฟแสดงผลการควบคุมความชื้น(u)ในระบบด้วย PID ^m	42
4.10 โปรแกรม Hardware in the loop เพื่อทดลองการควบคุมความชื้น.....	42
(Ziegler–Nichols method)	
4.11 กราฟแสดงผลการควบคุมความชื้น(y)ในระบบด้วย PI (Ziegler–Nichols Method).....	43
4.12 กราฟแสดงผลการควบคุมความชื้น(u)ในระบบด้วย PI (Ziegler–Nichols Method)	43
4.13 กราฟแสดงผลการควบคุมอุณหภูมิและความชื้น(y temperature)ในระบบด้วย PID ^m	44
4.14 กราฟแสดงผลการควบคุมอุณหภูมิและความชื้น(y humidity)ในระบบด้วย PID ^m	45
4.15 กราฟแสดงผลการควบคุมอุณหภูมิและความชื้น(u)ในระบบด้วย PID ^m	45
4.16 กราฟแสดงผลการควบคุมอุณหภูมิและความชื้น(y temperature)ในระบบด้วย	46
PI (Ziegler–Nichols Method)	
4.17 กราฟแสดงผลการควบคุมอุณหภูมิและความชื้น(y humidity)ในระบบด้วย	46
PI (Ziegler–Nichols Method)	
4.18 กราฟแสดงผลการควบคุมอุณหภูมิและความชื้น(u)ในระบบด้วย	47
PI (Ziegler–Nichols Method)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปริญญานิพนธ์

เนื่องจากปัญหาโลกร้อนในยุคปัจจุบันที่ทำให้อุณหภูมิโลกสูงขึ้นเรื่อย ๆ ในแต่ละวัน โดยมีผลมาจากหลากหลายปัจจัย ยกตัวอย่างเช่น การพัฒนาทางอุตสาหกรรม และการพัฒนาคุณภาพชีวิตของผู้คนให้ได้อย่างสุขสบายแต่แลกมากับการปล่อยมลพิษที่ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก นอกเหนือจากการปล่อยมลพิษดังกล่าว หรือที่เรียกอีกอย่างว่าก๊าซเรือนกระจก นั้นก็ยังรวมไปถึงการตัดไม้ทำลายป่าเพื่อนำพื้นที่มาใช้สอยเพื่อผลประโยชน์ต่าง ๆ เมื่อพื้นที่ป่าไม้ลดลงทำให้การดูดซับก๊าซเรือนกระจกจากบรรยากาศจึงลดลงตามไปด้วย

จากผลการศึกษาพบว่าแม้การปลูกต้นไม้คืนสู่ผืนป่า หรือการอนุรักษ์ป่าไม้เพียงอย่างเดียวนั้นไม่ใช่วิธีการแก้ปัญหาโลกร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดแต่ยังคงเป็นทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับใช้ในการชะลอไม่ให้เกิดภาวะโลกร้อน ซึ่งการปลูกต้นไม้คืนสู่ป่าอาจมีเพียงน้อยต้นที่สามารถคงอยู่และเติบโตเป็นต้นไม้ใหญ่ได้ โดยปัญหานี้ขึ้นอยู่กับต้นไม้นั้นขนาดเล็กไม่สามารถแย่งสารอาหารจากต้นไม้ใหญ่ต้นอื่นได้ รวมทั้งยังมีความแข็งแรงน้อยในการอยู่ในสภาพแวดล้อมที่ควบคุมไม่ได้ และเนื่องด้วยผลกระทบจากการแพร่ระบาดของไวรัสโควิด-19 ในช่วงปีที่ผ่านมาทำให้คนส่วนใหญ่เริ่มหันมาให้ความสนใจในการหาต้นไม้มาตกแต่งที่พักอาศัยมากขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ราคาของต้นไม้เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว

จากปัญหาข้างต้นนี้ ทางผู้จัดทำจึงเกิดแนวคิดในการดูแล หรืออนุบาลต้นไม้ทำให้เริ่มจัดทำโครงการการออกแบบการควบคุม PID^m โดย WIO เทอร์มินัลเพื่ออบต้นไม้ขนาดเล็ก ซึ่งเป็นการช่วยให้รากสามารถชอนไชลงไปในดินได้ดีขึ้น และลดการผลัดใบของต้นไม้ หรือเป็นการเสริมความแข็งแรงให้กับต้นไม้ และจากการออกแบบการควบคุม PID^m ดังกล่าว สามารถนำไปประยุกต์ใช้ควบคุมพารามิเตอร์ของ Plant อื่น ๆ ได้อย่างหลากหลาย

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

1. เพื่อศึกษา เรียนรู้ ทฤษฎีของตัวควบคุม PID^m เพื่อนำมาใช้ในการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นภายในตู้อบต้นไม้ขนาดเล็ก
2. เพื่อศึกษาการเขียนอัลกอริทึมของตัวควบคุม PID^m บนไมโครคอนโทรลเลอร์ WIO เทอร์มินัล
3. เพื่อศึกษา เรียนรู้ และสร้างตู้อบต้นไม้ขนาดเล็ก
4. เพื่อศึกษาการออกแบบ และเขียนโปรแกรม Graphical User Interface ให้แสดงผลบนหน้าจอ LCD สีของ WIO เทอร์มินัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของปริญญาโท

1. สามารถสร้างตู้อบต้นไม้นขนาดเล็กพร้อมวัดและควบคุมอุณหภูมิภายในตู้อบ
2. สร้างตู้อบต้นไม้นขนาดเล็กโดยใช้ห้องปฏิบัติการ Control System และพาร์ทเมนท์
3. ออกแบบ และเขียนอัลกอริทึมการควบคุม PID^m บน WIO เทอร์มินัล ให้สามารถควบคุมหรือชดเชยอุณหภูมิให้อยู่ในค่าที่คงที่ กำหนดค่า Overshoot และลดค่าความผิดพลาดให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม
4. สร้างโปรแกรม Graphical User Interface บน WIO เทอร์มินัล โดยใช้โปรแกรม PlatformIO

1.4 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาทฤษฎีของตัวควบคุม PID^m ที่ใช้ในกระบวนการการควบคุมอุณหภูมิ
2. ศึกษากระบวนการการควบคุมอุณหภูมิ
3. ศึกษาข้อมูลจำเพาะ การเขียนโปรแกรม ไมโครคอนโทรลเลอร์ WIO เทอร์มินัล
4. ศึกษาการเขียนโปรแกรม GUI ให้แสดงผลบนหน้าจอ WIO เทอร์มินัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 เกริ่นนำ

ในการออกแบบการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID^m สำหรับตู้อบต้นไม้ขนาดเล็กจำเป็นต้องศึกษาทฤษฎีและหลักการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมอุณหภูมิภายในระบบปิด และด้วยการเลือกใช้งานบอร์ด WIO เทอร์มินัลเป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ทำให้ต้องศึกษาการแสดงผลและเก็บข้อมูลเพิ่มเติม โดยในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการดังกล่าว ได้แก่ Thermal system, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ System identification, ระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์, ตัวควบคุม PID^m , Data logging, และ Graphical User Interface

2.2 Thermal system

Thermal system หรือเรียกอีกอย่างว่าระบบเกี่ยวกับความร้อน เป็นระบบที่เกี่ยวกับการกักเก็บและการถ่ายเทพลังงานความร้อนภายในระบบ โดยยังมีความร้อนที่สะสมอยู่ในระบบมาก จึงส่งผลให้อุณหภูมิที่มีภายในระบบเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งความสำคัญในการควบคุมอุณหภูมินั้นเนื่องจากสินค้าหรือผลิตภัณฑ์บางส่วนต้องมีการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมและยอมรับได้ โดยจะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับชนิดหรือประเภทของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ ทำให้ระบบที่เกี่ยวกับการควบคุมความร้อนหรืออุณหภูมิเป็นสิ่งสำคัญที่สามารถพบเห็นได้อย่างแพร่หลายทั้งในทางอุตสาหกรรม รวมถึงอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่สามารถพบเห็นได้บ่อยในชีวิตประจำวันการควบคุมอุณหภูมินั้นสามารถทำได้ทั้งแบบปรับการควบคุมด้วยตนเองและปรับการควบคุมแบบอัตโนมัติ [17]

2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ หรือโมเดลทางคณิตศาสตร์เปรียบเสมือนการใช้คณิตศาสตร์แทนการใช้ภาษาการอธิบาย โดยอธิบายพฤติกรรมของข้อมูลในรูปแบบของการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลต่าง ๆ ที่สามารถพิสูจน์ผลได้เป็นกฎหรือพิสูจน์ได้ในเชิงทฤษฎีเพื่อนำไปใช้ในการจำลองระบบ ดังนั้นการจำลองระบบจึงใช้สัญลักษณ์หรือตัวเลขในการแทนนามธรรมเพื่อใช้จำลองสิ่งที่เป็จริงให้อยู่ในตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์อธิบายผลแล้วจึงนำมาประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์จริง ทำให้สามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอนโดยสรุปได้ทั้งหมด 4 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้ [1], [4]

ขั้นตอนที่ 1 คือ วิเคราะห์ (Determine) การวิเคราะห์เป็นขั้นตอนเริ่มแรกก่อนการลงมือในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยต้องมีการวิเคราะห์เพื่อทำความเข้าใจและทราบถึงปัญหาหรือสิ่งที่เกี่ยวข้องกับปัญหา รวมไปถึงจนถึงการสืบค้นข้อมูลที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้จึงจำเป็นต้องจำแนกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบของปัญหาที่เกี่ยวข้องออกมา เพื่อให้สามารถนิยามรวมถึงกำหนดขอบเขตให้กระชับ ชัดเจน และตรงตามวัตถุประสงค์มากที่สุด

ขั้นตอนที่ 2 คือ การระบุแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Identification) การระบุแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ภายหลังจากการให้นิยามและกำหนดขอบเขตเพื่อให้เข้าถึงเป้าหมายนั้น ถัดมาคือการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องที่ได้จากการวิเคราะห์ เริ่มจากการทดลองสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อนน้อยที่สุดรวมทั้งระบุรายการปัจจัยต่าง ๆ ที่มีส่วนเกี่ยวข้อง เมื่อระบุแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้จึงทดสอบรายละเอียดพฤติกรรมของตัวแปร โดยมีการแสดงตัวแปรด้วยสัญลักษณ์รวมถึงหน่วยที่มีความเหมาะสมในรูปของความสัมพันธ์ และสมการของตัวแปรในโจทย์ รวมทั้งต้องรวบรวมข้อมูลเพิ่มเติมหากข้อมูลที่มีอยู่ไม่เพียงพอ ซึ่งจากที่กล่าวไปทั้งหมดนี้ต้องใช้ความรู้ และทักษะทางคณิตศาสตร์เข้าช่วยในการวิเคราะห์การกำหนดข้อสมมุติให้ตรงตามวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ตรงต่อความต้องการ

ขั้นตอนที่ 3 การหาผลลัพธ์ของตัวแบบ (Solve) หลังเสร็จสิ้นการระบุแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้ว จึงจำเป็นต้องหาผลลัพธ์หรือคำตอบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าว ซึ่งมีหลากหลายวิธีในการหาผลลัพธ์ เช่น การดำเนินการพีชคณิต การใช้แคลคูลัส การใช้กราฟ หรือการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เป็นอาทิ เพื่อหาค่าของตัวแปรที่ต้องการ

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบผลลัพธ์ (Inspect) เมื่อสามารถหาผลลัพธ์ของตัวแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ ต้องมีการตรวจสอบผลลัพธ์ดังกล่าว โดยการตรวจสอบนั้นต้องเปรียบเทียบกับข้อมูลจริง เพื่อประเมินว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ผ่านการระบุนั้น มีการระบุปัจจัยต่าง ๆ ครบตามวัตถุประสงค์ หรือสามารถปรับปรุงแบบจำลองเพิ่มเติมเพื่อให้ผลลัพธ์ส่งผลไปในทางที่ดีกว่าเดิมได้หรือไม่ หรือผลลัพธ์เชิงคณิตศาสตร์มีความหมายหรือไม่ เป็นต้น เพื่อชี้ให้เห็นว่าควรต้องมีการคำนวณหาตัวแปรต่าง ๆ ใหม่เพื่อเพิ่มความแม่นยำให้แก่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือไม่ หากมีความประสงค์ที่จะปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำเป็นต้องเริ่มทำขั้นตอนต่าง ๆ ใหม่โดยเริ่มตั้งแต่ขั้นตอนแรก

2.4 System identification

การระบุระบบ หรือ System identification นั้นเป็นวิธีการหนึ่งจากหลากหลายวิธีที่สามารถเลือกใช้ในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้งานได้ง่ายกว่าการใช้กฎต่าง ๆ ในการระบุระบบ หากระบบนั้นยังมีความซับซ้อนมาก อาจทำให้ไม่สามารถหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบได้จากการใช้กฎทางคณิตศาสตร์ โดยการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการนั้นมีความจำเป็นอย่างมากในการใช้งานออกแบบอัลกอริธึมในการควบคุม และเมื่ออัลกอริธึมการควบคุมนั้นเป็นแบบสัดส่วนบวกปริพันธ์ (PI) หรือสัดส่วนบวกปริพันธ์บวกอนุพันธ์ (PID) ทำให้สามารถสันนิษฐานรูปแบบของกระบวนการได้ว่าเป็นระบบเชิงเส้นลำดับที่หนึ่งพร้อมช่วงเวลาไร้

ผลตอบสนอง (FOPDT) เนื่องจากผลตอบสนองของระบบ (FOPDT) นั้นมีการประมาณที่ดีในการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการเผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่ายในการที่ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอบสนองของระบบและระบบย่อยหลายอย่างที่สามารถพบได้อย่างแพร่หลายในแอปพลิเคชันการควบคุมในกระบวนการทางอุตสาหกรรม [5], [16]

2.4.1 ข้อมูลในการใช้ระบบ

การระบุระบบนั้นเป็นสิ่งสำคัญในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบระบบ จึงส่งผลให้การระบุระบบต้องการข้อมูลจำพวกหนึ่งในการระบุระบบนั้น ออกเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อออกแบบให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้มีความใกล้เคียงกับสภาพแวดล้อมจริงของกระบวนการมากที่สุด โดยข้อมูลดังกล่าวมีทั้งหมด 4 อย่างประกอบไปด้วย

2.4.1.1 อินพุตและเอาต์พุตของระบบ (Input/Output)

การระบุระบบนั้นต้องใช้ สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของระบบ โดยทำการวัดค่าของอินพุตและเอาต์พุตของระบบเพื่อให้รู้ จึงจะทำให้สามารถประมาณค่าของตัวแปรที่สามารถปรับค่าได้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งสามารถระบุได้ไม่ว่าจะเป็นทั้งนั้นโดเมนความถี่หรือโดเมนเวลา และความแม่นยำในการจำลองแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นขึ้นอยู่กับคุณภาพของข้อมูลที่วัดได้ ทำให้การออกแบบการทดลองเพื่อวัดค่าอินพุตและเอาต์พุตนั้นมีความสำคัญเป็นอย่างมาก สำหรับข้อมูลที่มีคุณภาพนั้น จะช่วยทำให้การระบุระบบมีความแม่นยำมากขึ้นนั้นจะประกอบไปด้วยข้อกำหนดเหล่านี้

ข้อกำหนดที่ 1 มีการใช้อินพุตในการกระตุ้นระบบที่เพียงพอ

ข้อกำหนดที่ 2 ข้อมูลที่วัดได้นั้น มีช่วงมากพอที่จะจับใช้ช่วงของคาบเวลาที่มีความสำคัญ

ข้อกำหนดที่ 3 มีการตั้งค่าระบบการรับข้อมูล ซึ่งมีอัตราส่วนของสัญญาณและสัญญาณรบกวนที่ดี

ข้อกำหนดที่ 4 การวัดข้อมูล ต้องวัดในช่วงของการสุ่มตัวอย่างที่เหมาะสม และมีความละเอียด

2.4.1.2 เลือกโครงสร้างสำหรับระบบ (Model Structure)

โครงสร้างสำหรับระบบนั้น เป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตที่ประกอบไปด้วยตัวแปรที่ไม่ทราบค่า หรือไม่รู้จัก ซึ่งตัวอย่างของโครงสร้างระบบได้แก่ ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) สมการการจำลองเชิงปริภูมิสถานะ (State-space representation) หรือฟังก์ชันที่มีตัวแปรแบบไม่เป็นเชิงเส้น เป็นต้น โดยสามารถแยกแยะลักษณะของโครงสร้างระบบได้จากสมการคุณลักษณะของตัวระบบเอง ในข้อมูลส่วนนี้เป็นการกำหนดให้เลือกโครงสร้างสำหรับระบบและประเมินเพื่อกำหนดค่าของตัวแปรในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1.3 ประมาณค่าตัวแปรที่ปรับค่าได้ (Estimate adjustable value)

สำหรับการประมาณค่าตัวแปรที่ปรับค่าได้นั้น เมื่อเก็บข้อมูลและเลือกโครงสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้กับกระบวนการเสร็จสิ้นแล้ว ในขั้นตอนนี้คือการนำข้อมูลที่ได้เก็บจากกระบวนการมาใช้ร่วมกับสมการทางคณิตศาสตร์ของโครงสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยเป็นการแทนค่าตัวแปรให้กับโครงสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามข้อมูลที่ได้ จากการเก็บค่าข้อมูลของกระบวนการ

2.4.1.4 ประเมินแบบจำลอง (Evaluate)

เมื่อเสร็จสิ้นการประมาณค่าตัวแปรที่ปรับค่าได้แล้ว ข้อมูลสุดท้ายที่ต้องทำการประเมินแบบจำลองดังกล่าวที่ได้ เพื่อทำการประมาณค่าตัวแปรไปซึ่งหากสามารถประมาณค่าตัวแปรได้ใกล้เคียงกับระบบจริงมากเท่าใดข้อมูลนั้นก็ยิ่งมีความน่านำมาใช้งานต่อ นั้นรวมไปถึงว่าตัวโครงสร้างของระบบนั้นมีคุณสมบัติครบตามวัตถุประสงค์หรือไม่อีกด้วย

2.4.2 การระบุระบบเชิงเส้นลำดับที่หนึ่งพร้อมช่วงเวลาไร้ผลตอบสนอง

เมื่อสันนิษฐานได้ว่าเป็นระบบเชิงเส้นลำดับที่หนึ่งที่มีช่วงเวลาไร้ผลตอบสนอง ซึ่งระบบเชิงเส้นลำดับที่หนึ่งที่มีช่วงเวลาไร้ผลตอบสนอง เป็นการวิธีการประมาณค่าอย่างง่ายที่ใช้สำหรับผลตอบสนองเชิงพลวัตของตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการ โดยโมเดลของระบบเชิงเส้นลำดับที่หนึ่งที่มีช่วงเวลาไร้ผลตอบสนองนั้นสามารถประมาณค่าตัวแปรต่าง ๆ จากพฤติกรรมของกระบวนการทำให้การประมาณค่านี้มีความสมเหตุสมผลในตัวเอง จึงส่งผลให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเชิงเส้นลำดับที่หนึ่งที่มีช่วงเวลาไร้ผลตอบสนองนี้สามารถใช้ในเชิงปฏิบัติได้เนื่องจากมีความสมจริงในด้านต่าง ๆ ทั้งนี้สามารถอ้างอิงจากสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบเชิงเส้นลำดับที่หนึ่งที่มีช่วงเวลาไร้ผลตอบสนอง ดังแสดงในสมการที่ 2.1

$$\tau_p \frac{dy(t)}{dt} = -y(t) + K_p u(t - \theta_p) \quad (2.1)$$

โดยที่ K_p เป็นอัตราขยายของกระบวนการ

τ_p เป็นค่าคงตัวเวลาของกระบวนการ

θ_p เป็นช่วงเวลาไร้ผลตอบสนองของกระบวนการ

2.4.2.1 อัตราขยายของกระบวนการ (K_p)

อัตราขยายของกระบวนการหรือ K_p คือตัวแปรที่เป็นอัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงของเอาต์พุตหรือ y ต่อการเปลี่ยนแปลงของอินพุตหรือ u โดยอัตราขยายของกระบวนการนี้สามารถหาค่าตัวแปรนี้ได้จากการเปลี่ยนแปลงใน y หรือ Δy หารกับการเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใน u หรือ Δu ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้เกิดขึ้นระหว่างช่วงสภาวะคงที่ในตอนเริ่มต้นและตอนสิ้นสุด สามารถเขียนสมการของอัตราขยายของกระบวนการได้ดังนี้

$$K_p = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{y_2 - y_1}{u_2 - u_1} \quad (2.2)$$

2.4.2.2 ค่าคงตัวเวลาของกระบวนการ (τ_p)

ค่าคงตัวเวลาของกระบวนการหรือ τ_p นั้นแสดงถึงช่วงเวลาที่ผ่านมาซึ่งจำเป็นสำหรับการเก็บค่าข้อมูลที่ได้จากผลตอบสนองของระบบ ซึ่งค่าคงตัวเวลาของกระบวนการนั้นมีความสำคัญต้องใช้เมื่อมีการอ่านค่าใด ๆ สองครั้ง และการเปลี่ยนแปลงของค่าคงตัวเวลาจะส่งผลต่อความเร็วของผลตอบสนอง โดยในการหาค่าคงตัวเวลาของกระบวนการสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$y(t) = (e^{-t/\tau_p})y(0) + (1 - e^{-t/\tau_p})K_p \Delta u \quad (2.3)$$

การเก็บข้อมูลของค่าคงตัวเวลา เป็นการเก็บข้อมูลในช่วงเวลาที่ผลตอบสนองทางเอาต์พุตเพิ่มขึ้น 63.2% จากการเปลี่ยนแปลงของเอาต์พุตที่ได้จากการวัด เนื่องจากที่ 63.2% ของการเปลี่ยนแปลงของเอาต์พุตในการวัดนั้น มีความใกล้เคียงกับอุณหภูมิจริงเสมอ ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการที่ 2.3 ซึ่งเป็นสมการของค่าคงตัวเวลาในอีกรูปแบบได้ดังสมการที่ 2.4 นี้

$$y(\tau_p) = 0.632K_p \Delta u \quad (2.4)$$

2.4.2.3 ช่วงเวลาไร้ผลตอบสนองของกระบวนการ (θ_p)

ช่วงเวลาไร้ผลตอบสนองของกระบวนการ หรือเรียกอีกอย่างว่าช่วงหน่วงเวลาของกระบวนการ เป็นการหน่วงเวลาที่เกิดในระหว่างที่สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมถูกส่งออกไปจนถึงเวลาเมื่อตัวแปรกระบวนการ (y) เริ่มการถูกวัดค่าได้และเริ่มการตอบสนอง กระบวนการใด ๆ ยังมีช่วงเวลาไร้ผลตอบสนองที่นานมากขึ้นเท่าไร ความยากในการควบคุมก็ยากเพิ่มขึ้นไป เนื่องจากการควบคุมให้มีประสิทธิภาพและรัดสามารถทำได้ยากขึ้นเมื่อเกิดช่วงเวลาไร้ผลตอบสนอง จึงสามารถเขียนสมการของค่าคงตัวเวลาเมื่อมีช่วงเวลาไร้ผลตอบสนองได้ดังสมการต่อไปนี้

$$y(t \geq \theta_p) = (e^{-(t-\theta_p)/\tau_p})y(0) + (1 - e^{-(t-\theta_p)/\tau_p})K_p \Delta u \quad (2.5)$$

2.5 ระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์

ระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ เป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (feedback) ที่ใช้ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ และอนุพันธ์ โดยสามารถพบเห็นได้แพร่หลายในระบบควบคุมต่าง ๆ รวมไปถึงสิ่งต่าง ๆ ที่พบเห็นได้ในชีวิตประจำวันส่วนมากมักใช้การควบคุมด้วยอัลกอริทึมนี้ เนื่องจากเมื่อระบบเพิ่มการควบคุมแบบสัดส่วน การควบคุมแบบปริพันธ์ และการควบคุมแบบอนุพันธ์เข้าไปแล้วส่งผลให้สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบได้ อีกทั้งยังสามารถใช้งานได้หลากหลาย และครอบคลุม ซึ่งสามารถอธิบายตัวควบคุมได้ดังสมการต่อไปนี้ [3]

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^{\infty} e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.6)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่ามีตัวแปรต่าง ๆ โดยมี u คือสัญญาณเอาต์พุตของระบบ และ e คือค่าความผิดพลาดในการควบคุม ทำให้สามารถหาค่าความผิดพลาดนี้ได้จากการลบค่าที่วัดจากกระบวนการออกจากค่าเป้าหมาย ($e = SV - PV$ หรือ $e = r - y$) ส่วนที่เหลือของตัวควบคุมนี้จึงเหลือในส่วนของแต่ละเทอมของสัดส่วน เทอมของปริพันธ์ และเทอมของอนุพันธ์ ซึ่งในทั้งสามเทอมก็มีตัวแปรที่แตกต่างกันออกไป เทอมของสัดส่วนเป็นอัตราขยาย (k_p) เทอมของปริพันธ์เป็นสัดส่วนของขนาดและระยะเวลาของความผิดพลาด (k_i) และเทอมของอนุพันธ์เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาด (k_d) และตัวแปรเหล่านี้ก็สามารถปรับแต่งค่าได้แก่เช่นเดียวกัน เมื่อแปลงลาปลาซสมการที่ (2.7) จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$U(s) = K_p E(s) + \frac{K_i}{s} E(s) + K_d s E(s) \quad (2.7)$$

2.5.1 ผลของสัดส่วน

ผลของสัดส่วนหรืออัตราขยายเป็นการตอบสนองของทางเอาต์พุต โดยมีการเปลี่ยนแปลงจากการคูณค่าความผิดพลาดด้วยค่าคงที่ K_p ส่งผลให้ตัวของระบบมีค่าความคลาดเคลื่อนเชิงสถิติลดลงเมื่อ K_p เพิ่มมากขึ้นแต่ตัวระบบจะมีความผันผวนมากขึ้น โดยผลของสัดส่วนนั้นสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังต่อไปนี้

$$u(t) = k_p e(t) \quad (2.8)$$

จากสมการที่ (2.8) แสดงให้เห็นว่าถ้าค่าความคลาดเคลื่อนหรืออัตราขยายสัดส่วนมีค่าเพิ่มมากขึ้นค่าของผลตอบสนองทางเอาต์พุตก็เพิ่มมากขึ้น และในกรณีที่ค่าของความคลาดเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Error) หรืออัตราขยายสัดส่วนมีค่าน้อยลงค่าของผลตอบสนองที่เอาต์พุตก็จะมีค่าลดลงไปด้วยในทำนองเดียวกัน

2.5.2 ผลของปริพันธ์

เทอมปริพันธ์ หรือเทอมรีเซ็ต (reset) มีผลการควบคุมในลักษณะที่เป็นสัดส่วนต่อขนาดและระยะเวลาของค่าความผิดพลาด ซึ่งเป็นผลรวมของค่าความผิดพลาดทั้งหมดในคาบเวลาสามารถเรียกว่าปริพันธ์ของค่าความผิดพลาด โดยเทอมปริพันธ์นี้มักใช้ควบคู่ไปกับเทอมของสัดส่วน เนื่องจากช่วยลด หรือขจัดค่าออฟเซตที่สามารถเกิดขึ้นเมื่อเทอมของสัดส่วนนั้นทำให้เกิดการแกว่งที่ผลตอบสนองทางเอาต์พุตสามารถเขียนเทอมของปริพันธ์เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังต่อไปนี้

$$u(t) = k_i \int_0^{\infty} e(t) dt \quad (2.9)$$

จากสมการที่ (2.9) จะเห็นได้ว่าการควบคุมในเทอมของปริพันธ์ จะพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนของกระบวนการที่เกิดขึ้นทั้งหมด โดยสามารถหาค่าความคลาดเคลื่อนโดยใช้การหาค่าพื้นที่ทั้งหมดภายใต้กราฟของค่าความผิดพลาดต่อหน่วยเวลาจะได้เป็นค่าความผิดพลาดสะสม แล้วจึงคูณด้วยอัตราขยายปริพันธ์เข้าไป ซึ่งขนาดของผลตอบสนองในเทอมปริพันธ์จะแปรผันตามอัตราขยายปริพันธ์ (K_i)

2.5.3 ผลของอนุพันธ์

เทอมของอนุพันธ์เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดจากกระบวนการโดยมีการคำนวณหาค่าความผิดพลาดจากความชันของความผิดพลาดทั้งหมดในคาบเวลา แล้วนำมาคูณด้วยอัตราขยายอนุพันธ์ (K_d) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือการควบคุมในเทอมของอนุพันธ์นั้นให้สัญญาณผลตอบสนองทางเอาต์พุต โดยขึ้นกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความคลาดเคลื่อนต่อเวลา (Time Rate of Change of Error) ซึ่งค่าความผิดพลาดดังกล่าวสามารถมีค่าเป็นศูนย์ได้ ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ในเทอมของอนุพันธ์เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังต่อไปนี้

$$u(t) = k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.10)$$

จากสมการที่ (2.10) เห็นได้ว่าการควบคุมในเทอมของอนุพันธ์นั้น สามารถแก้ไขค่าความผิดพลาดได้โดยกระทำล่วงหน้าก่อน จึงส่งผลให้ผลตอบสนองของกระบวนการนั้นเร็วขึ้น แต่ลักษณะของการควบคุมในเทอมนี้มีความไวต่อการรบกวนสูง ทำให้เหมาะกับกระบวนการซึ่งมีการหน่วงเวลา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดขึ้นในกระบวนการ การใช้เทอมของอนุพันธ์ร่วมกับเทอมของสัดส่วนและปริพันธ์มีส่วนช่วยในการส่งเสริมเสถียรภาพของระบบควบคุม

2.6 ตัวควบคุม PID_n^m

ตัวควบคุม PID_n^m คือระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ ซึ่งมีเทอมของอนุพันธ์ที่เพิ่มมากขึ้น เรียกอีกอย่างว่าเทอม m โดยสามารถกำหนดจำนวนเทอมของอนุพันธ์ได้ แต่การเพิ่มเทอมของอนุพันธ์ให้มากขึ้นนั้นตามมาด้วยข้อเสียคือส่งผลต่อความไวของผลตอบสนองต่อการรบกวนมากยิ่งขึ้น ทำให้ใช้งานจริงไม่ได้ แต่การเพิ่มเทอมของ n หรือตัวกรองแบบทวินาม (Binomial filter) เข้าไปจะช่วยให้สามารถลดให้สัญญาณรบกวนนั้นลดน้อยลงไป โดย PID_n^m นั้นสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้ [7]

$$C^m(s) = K_c + \frac{K_i}{s} + K_{d_1}s + K_{d_2}s^2 + \dots + K_{d_m}s^m \quad (2.11)$$

โดยที่ m สามารถมีค่าได้ตั้งแต่ 0, 1, 2 ไปจนถึง m จำนวน ยกตัวอย่างเช่นเมื่อ m มีค่าเป็น 0 หรือไม่มีเทอมของอนุพันธ์ ทำให้เหลือแค่การควบคุมแบบสัดส่วน และปริพันธ์ สามารถเขียนสมการได้ว่า

$$C^0(s) = K_c + \frac{K_i}{s} \quad (2.12)$$

เมื่อ m มีค่าเป็น 1 เป็นการเพิ่มเทอมของอนุพันธ์เข้าไปในสมการที่ (2.12) เป็นจำนวนหนึ่งเทอม ทำให้การควบคุมนี้เป็นการควบคุมแบบสัดส่วน ปริพันธ์ และอนุพันธ์ สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$C^1(s) = K_c + \frac{K_i}{s} + K_{d_1}s \quad (2.13)$$

เมื่อ m มีค่าเป็น 2 เป็นการเพิ่มเทอมของอนุพันธ์เข้าไปในสมการ (2.13) เป็นจำนวนหนึ่งเทอม ทำให้การควบคุมนี้เป็นการควบคุมแบบสัดส่วน ปริพันธ์ และอนุพันธ์อีก 2 เทอม สามารถเขียนสมการได้ดังต่อไปนี้

$$C^2(s) = K_c + \frac{K_i}{s} + K_{d_1}s + K_{d_2}s^2 \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเพิ่มค่าของเทอม m แล้วจึงต้องเพิ่มค่าของเทอมตัวกรองแบบทวินามเข้าไปโดยสมการของตัวกรองแบบทวินามนั้นสามารถเขียนในสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$Q_n(s) = \frac{1}{(T_{fs} + 1)^n} \quad (2.15)$$

โดยที่เทอมของ n สามารถมีจำนวนเทอมได้ตั้งแต่ 1, 2 ไปจนถึง n จำนวน และมีเงื่อนไขว่าจำนวนเทอมของ n นั้นต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับจำนวนของเทอม m ทำให้สามารถเขียนสมการของตัวควบคุม PID_n^m เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$C_n^m(s) = PID^m(s) * Q_n(s) \quad (2.16)$$

ยกตัวอย่างเช่นหากให้เทอมของ m มีจำนวน 0 เทอม และเทอมของ n มีจำนวน 1 เทอม จะสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$C_1^0(s) = \left(K_c + \frac{K_i}{s}\right) \left(\frac{1}{(T_{fs} + 1)^n}\right) \quad (2.17)$$

นอกเหนือจากเพิ่มตัวกรองแบบทวินามเข้าไปแล้วนั้น ยังต้องเพิ่มอีกตัวกรองอีกตัวเข้าไป โดยตัวกรองนี้เรียกว่าตัวกรองข้างต้น ซึ่งตัวกรองนี้จะช่วยในเรื่องของการลด Overshoot ที่เกิดขึ้นขณะทำการปรับแต่งค่าตัวแปรต่าง ๆ ในการออกแบบตัวควบคุมให้กับระบบ โดยตัวกรองข้างต้นนี้ สามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังต่อไปนี้

$$F_p(s) = \frac{b_{m+1} T_i T_{D_m} s^{m+1} + \dots + b_2 T_i T_{D_1} s^2 + b_1 T_i s + 1}{T_i T_{D_m} s^{m+1} + \dots + T_i T_{D_1} s^2 + T_i s + 1} \quad (2.18)$$

ทำให้เห็นได้ว่าตัวควบคุม PID_n^m นั้นแตกต่างออกไปจากระบบควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ และอนุพันธ์ ในจุดที่มีจำนวนตัวแปรให้ปรับค่าได้ทั้งหมด 5 ตัวแปร ได้แก่ K_p , K_i , K_d , m และ n

2.7 Graphical User Interface (GUI)

Graphical User Interface (GUI อ่านว่า จียูไอ หรือ กูย) เป็นการติดต่อกับผู้ใช้โดยใช้การสื่อสารผ่านสัญลักษณ์หรือรูปภาพ โดยการออกแบบในเรื่องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้นจะต้องมีการโต้ตอบกับผู้ใช้ด้วย ทั้งนี้ก็เพื่อแทนลักษณะต่าง ๆ ของโปรแกรม ซึ่งจะมีการใช้ Graphical User เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Interface แทนที่การพิมพ์คำสั่งในการทำงาน ทำให้สามารถใช้งานได้ง่ายและรวดเร็ว รวมถึงทำให้ผู้ที่ไม่เข้าใจในตัว of โปรแกรมมากนักก็สามารถใช้งานได้เช่นกัน [14]



รูปที่ 2.1 Graphical User Interface

ที่มา : <https://www.mindphp.com/คู่มือ/73-คืออะไร/2079-gui-คืออะไร.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 เกริ่นนำ

ในการออกแบบการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID^m สำหรับตู้อบต้นไม้ขนาดเล็กจำเป็นต้องศึกษาทฤษฎีและหลักการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมอุณหภูมิภายในระบบปิด และด้วยการเลือกใช้งานบอร์ด WIO เทอร์มินัลเป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ทำให้ต้องศึกษาการแสดงผลและเก็บข้อมูลเพิ่มเติม โดยในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการดังกล่าว ได้แก่ Thermal system, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ System identification, ระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์, ตัวควบคุม PID^m , Data logging, และ Graphical User Interface

2.2 Thermal system

Thermal system หรือเรียกอีกอย่างว่าระบบเกี่ยวกับความร้อน เป็นระบบที่เกี่ยวกับการกักเก็บและการถ่ายเทพลังงานความร้อนภายในระบบ โดยยังมีความร้อนที่สะสมอยู่ในระบบมาก จึงส่งผลให้อุณหภูมิที่มีภายในระบบเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งความสำคัญในการควบคุมอุณหภูมินั้นเนื่องจากสินค้าหรือผลิตภัณฑ์บางส่วนต้องมีการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมและยอมรับได้ โดยจะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับชนิดหรือประเภทของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ ทำให้ระบบที่เกี่ยวกับการควบคุมความร้อนหรืออุณหภูมิเป็นสิ่งสำคัญที่สามารถพบเห็นได้อย่างแพร่หลายทั้งในทางอุตสาหกรรม รวมถึงอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่สามารถพบเห็นได้บ่อยในชีวิตประจำวันการควบคุมอุณหภูมินั้นสามารถทำได้ทั้งแบบปรับการควบคุมด้วยตนเองและปรับการควบคุมแบบอัตโนมัติ [17]

2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ หรือโมเดลทางคณิตศาสตร์เปรียบเสมือนการใช้คณิตศาสตร์แทนการใช้ภาษาการอธิบาย โดยอธิบายพฤติกรรมของข้อมูลในรูปแบบของการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลต่าง ๆ ที่สามารถพิสูจน์ผลได้เป็นกฎหรือพิสูจน์ได้ในเชิงทฤษฎีเพื่อนำไปใช้ในการจำลองระบบ ดังนั้นการจำลองระบบจึงใช้สัญลักษณ์หรือตัวเลขในการแทนนามธรรมเพื่อใช้จำลองสิ่งที่เป็จริงให้อยู่ในตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์อธิบายผลแล้วจึงนำมาประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์จริง ทำให้สามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอนโดยสรุปได้ทั้งหมด 4 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้ [1], [4]

ขั้นตอนที่ 1 คือ วิเคราะห์ (Determine) การวิเคราะห์เป็นขั้นตอนเริ่มแรกก่อนการลงมือในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยต้องมีการวิเคราะห์เพื่อทำความเข้าใจและทราบถึงปัญหาหรือสิ่งที่เกี่ยวข้องกับปัญหา รวมไปถึงจนถึงการสืบค้นข้อมูลที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้จึงจำเป็นต้องจำแนกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบของปัญหาที่เกี่ยวข้องออกมา เพื่อให้สามารถนิยามรวมถึงกำหนดขอบเขตให้กระชับ ชัดเจน และตรงตามวัตถุประสงค์มากที่สุด

ขั้นตอนที่ 2 คือ การระบุแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Identification) การระบุแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ภายหลังจากการให้นิยามและกำหนดขอบเขตเพื่อให้เข้าถึงเป้าหมายนั้น ถัดมาคือการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องที่ได้จากการวิเคราะห์ เริ่มจากการทดลองสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อนน้อยที่สุดรวมทั้งระบุรายการปัจจัยต่าง ๆ ที่มีส่วนเกี่ยวข้อง เมื่อระบุแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้จึงทดสอบรายละเอียดพฤติกรรมของตัวแปร โดยมีการแสดงตัวแปรด้วยสัญลักษณ์รวมถึงหน่วยที่มีความเหมาะสมในรูปของความสัมพันธ์ และสมการของตัวแปรในโจทย์ รวมทั้งต้องรวบรวมข้อมูลเพิ่มเติมหากข้อมูลที่มีอยู่ไม่เพียงพอ ซึ่งจากที่กล่าวไปทั้งหมดนี้ต้องใช้ความรู้ และทักษะทางคณิตศาสตร์เข้าช่วยในการวิเคราะห์การกำหนดข้อสมมุติให้ตรงตามวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ตรงต่อความต้องการ

ขั้นตอนที่ 3 การหาผลลัพธ์ของตัวแบบ (Solve) หลังเสร็จสิ้นการระบุแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้ว จึงจำเป็นต้องหาผลลัพธ์หรือคำตอบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าว ซึ่งมีหลากหลายวิธีในการหาผลลัพธ์ เช่น การดำเนินการพีชคณิต การใช้แคลคูลัส การใช้กราฟ หรือการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เป็นอาทิ เพื่อหาค่าของตัวแปรที่ต้องการ

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบผลลัพธ์ (Inspect) เมื่อสามารถหาผลลัพธ์ของตัวแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ ต้องมีการตรวจสอบผลลัพธ์ดังกล่าว โดยการตรวจสอบนั้นต้องเปรียบเทียบกับข้อมูลจริง เพื่อประเมินว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ผ่านการระบุนั้น มีการระบุปัจจัยต่าง ๆ ครบตามวัตถุประสงค์ หรือสามารถปรับปรุงแบบจำลองเพิ่มเติมเพื่อให้ผลลัพธ์ส่งผลไปในทางที่ดีกว่าเดิมได้หรือไม่ หรือผลลัพธ์เชิงคณิตศาสตร์มีความหมายหรือไม่ เป็นต้น เพื่อชี้ให้เห็นว่าควรต้องมีการคำนวณหาตัวแปรต่าง ๆ ใหม่เพื่อเพิ่มความแม่นยำให้แก่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือไม่ หากมีความประสงค์ที่จะปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำเป็นต้องเริ่มทำขั้นตอนต่าง ๆ ใหม่โดยเริ่มตั้งแต่ขั้นตอนแรก

2.4 System identification

การระบุระบบ หรือ System identification นั้นเป็นวิธีการหนึ่งจากหลากหลายวิธีที่สามารถเลือกใช้ในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้งานได้ง่ายกว่าการใช้กฎต่าง ๆ ในการระบุระบบ หากระบบนั้นยังมีความซับซ้อนมาก อาจทำให้ไม่สามารถหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบได้จากการใช้กฎทางคณิตศาสตร์ โดยการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการนั้นมีความจำเป็นอย่างมากในการใช้งานออกแบบอัลกอริธึมในการควบคุม และเมื่ออัลกอริธึมการควบคุมนั้นเป็นแบบสัดส่วนบวกปริพันธ์ (PI) หรือสัดส่วนบวกปริพันธ์บวกอนุพันธ์ (PID) ทำให้สามารถสันนิษฐานรูปแบบของกระบวนการได้ว่าเป็นระบบเชิงเส้นลำดับที่หนึ่งพร้อมช่วงเวลาไร้

ผลตอบสนอง (FOPDT) เนื่องจากผลตอบสนองของระบบ (FOPDT) นั้นมีการประมาณที่ดีในการ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการเรียนการสอน เมื่อผู้ใดเห็นเอกสารนี้โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอบสนองของระบบและระบบย่อยหลายอย่างที่สามารถพบได้อย่างแพร่หลายในแอปพลิเคชันการควบคุมในกระบวนการทางอุตสาหกรรม [5], [16]

2.4.1 ข้อมูลในการใช้ระบบ

การระบุระบบนั้นเป็นสิ่งสำคัญในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบระบบ จึงส่งผลให้การระบุระบบต้องการข้อมูลจำพวกหนึ่งในการระบุระบบนั้น ออกเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อออกแบบให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้มีความใกล้เคียงกับสภาพแวดล้อมจริงของกระบวนการมากที่สุด โดยข้อมูลดังกล่าวมีทั้งหมด 4 อย่างประกอบไปด้วย

2.4.1.1 อินพุตและเอาต์พุตของระบบ (Input/Output)

การระบุระบบนั้นต้องใช้ สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของระบบ โดยทำการวัดค่าของอินพุตและเอาต์พุตของระบบเพื่อให้รู้ จึงจะทำให้สามารถประมาณค่าของตัวแปรที่สามารถปรับค่าได้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งสามารถระบุได้ไม่ว่าจะเป็นทั้งนั้นโดเมนความถี่หรือโดเมนเวลา และความแม่นยำในการจำลองแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นขึ้นอยู่กับคุณภาพของข้อมูลที่วัดได้ ทำให้การออกแบบการทดลองเพื่อวัดค่าอินพุตและเอาต์พุตนั้นมีความสำคัญเป็นอย่างมาก สำหรับข้อมูลที่มีคุณภาพนั้น จะช่วยทำให้การระบุระบบมีความแม่นยำมากขึ้นนั้นจะประกอบไปด้วยข้อกำหนดเหล่านี้

ข้อกำหนดที่ 1 มีการใช้อินพุตในการกระตุ้นระบบที่เพียงพอ

ข้อกำหนดที่ 2 ข้อมูลที่วัดได้นั้น มีช่วงมากพอที่จะจับใช้ช่วงของคาบเวลาที่มีความสำคัญ

ข้อกำหนดที่ 3 มีการตั้งค่าระบบการรับข้อมูล ซึ่งมีอัตราส่วนของสัญญาณและสัญญาณรบกวนที่ดี

ข้อกำหนดที่ 4 การวัดข้อมูล ต้องวัดในช่วงของการสุ่มตัวอย่างที่เหมาะสม และมีความละเอียด

2.4.1.2 เลือกโครงสร้างสำหรับระบบ (Model Structure)

โครงสร้างสำหรับระบบนั้น เป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตที่ประกอบไปด้วยตัวแปรที่ไม่ทราบค่า หรือไม่รู้จัก ซึ่งตัวอย่างของโครงสร้างระบบได้แก่ ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) สมการการจำลองเชิงปริภูมิสถานะ (State-space representation) หรือฟังก์ชันที่มีตัวแปรแบบไม่เป็นเชิงเส้น เป็นต้น โดยสามารถแยกแยะลักษณะของโครงสร้างระบบได้จากสมการคุณลักษณะของตัวระบบเอง ในข้อมูลส่วนนี้เป็นการกำหนดให้เลือกโครงสร้างสำหรับระบบและประเมินเพื่อกำหนดค่าของตัวแปรในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1.3 ประมาณค่าตัวแปรที่ปรับค่าได้ (Estimate adjustable value)

สำหรับการประมาณค่าตัวแปรที่ปรับค่าได้นั้น เมื่อเก็บข้อมูลและเลือกโครงสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้กับกระบวนการเสร็จสิ้นแล้ว ในขั้นตอนนี้คือการนำข้อมูลที่ได้เก็บจากกระบวนการมาใช้ร่วมกับสมการทางคณิตศาสตร์ของโครงสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยเป็นการแทนค่าตัวแปรให้กับโครงสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามข้อมูลที่ได้ จากการเก็บค่าข้อมูลของกระบวนการ

2.4.1.4 ประเมินแบบจำลอง (Evaluate)

เมื่อเสร็จสิ้นการประมาณค่าตัวแปรที่ปรับค่าได้แล้ว ข้อมูลสุดท้ายที่ต้องทำการประเมินแบบจำลองดังกล่าวที่ได้ เพื่อทำการประมาณค่าตัวแปรไปซึ่งหากสามารถประมาณค่าตัวแปรได้ใกล้เคียงกับระบบจริงมากเท่าใดข้อมูลนั้นก็ยิ่งมีความน่านำมาใช้งานต่อ นั้นรวมไปถึงว่าตัวโครงสร้างของระบบนั้นมีคุณสมบัติครบตามวัตถุประสงค์หรือไม่อีกด้วย

2.4.2 การระบุระบบเชิงเส้นลำดับที่หนึ่งพร้อมช่วงเวลาไร้ผลตอบสนอง

เมื่อสันนิษฐานได้ว่าเป็นระบบเชิงเส้นลำดับที่หนึ่งที่มีช่วงเวลาไร้ผลตอบสนอง ซึ่งระบบเชิงเส้นลำดับที่หนึ่งที่มีช่วงเวลาไร้ผลตอบสนอง เป็นการวิธีการประมาณค่าอย่างง่ายที่ใช้สำหรับผลตอบสนองเชิงพลวัตของตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการ โดยโมเดลของระบบเชิงเส้นลำดับที่หนึ่งที่มีช่วงเวลาไร้ผลตอบสนองนั้นสามารถประมาณค่าตัวแปรต่าง ๆ จากพฤติกรรมของกระบวนการทำให้การประมาณค่านี้มีความสมเหตุสมผลในตัวเอง จึงส่งผลให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเชิงเส้นลำดับที่หนึ่งที่มีช่วงเวลาไร้ผลตอบสนองนี้สามารถใช้ในเชิงปฏิบัติได้เนื่องจากมีความสมจริงในด้านต่าง ๆ ทั้งนี้สามารถอ้างอิงจากสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบเชิงเส้นลำดับที่หนึ่งที่มีช่วงเวลาไร้ผลตอบสนอง ดังแสดงในสมการที่ 2.1

$$\tau_p \frac{dy(t)}{dt} = -y(t) + K_p u(t - \theta_p) \quad (2.1)$$

โดยที่ K_p เป็นอัตราขยายของกระบวนการ

τ_p เป็นค่าคงตัวเวลาของกระบวนการ

θ_p เป็นช่วงเวลาไร้ผลตอบสนองของกระบวนการ

2.4.2.1 อัตราขยายของกระบวนการ (K_p)

อัตราขยายของกระบวนการหรือ K_p คือตัวแปรที่เป็นอัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงของเอาต์พุตหรือ y ต่อการเปลี่ยนแปลงของอินพุตหรือ u โดยอัตราขยายของกระบวนการนี้สามารถหาค่าตัวแปรนี้ได้จากการเปลี่ยนแปลงใน y หรือ Δy หารกับการเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใน u หรือ Δu ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้เกิดขึ้นระหว่างช่วงสภาวะคงที่ในตอนเริ่มต้นและตอนสิ้นสุด สามารถเขียนสมการของอัตราขยายของกระบวนการได้ดังนี้

$$K_p = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{y_2 - y_1}{u_2 - u_1} \quad (2.2)$$

2.4.2.2 ค่าคงตัวเวลาของกระบวนการ (τ_p)

ค่าคงตัวเวลาของกระบวนการหรือ τ_p นั้นแสดงถึงช่วงเวลาที่ผ่านมาซึ่งจำเป็นสำหรับการเก็บค่าข้อมูลที่ได้จากผลตอบสนองของระบบ ซึ่งค่าคงตัวเวลาของกระบวนการนั้นมีความสำคัญต้องใช้เมื่อมีการอ่านค่าใด ๆ สองครั้ง และการเปลี่ยนแปลงของค่าคงตัวเวลาจะส่งผลต่อความเร็วของผลตอบสนอง โดยในการหาค่าคงตัวเวลาของกระบวนการสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$y(t) = (e^{-t/\tau_p})y(0) + (1 - e^{-t/\tau_p})K_p \Delta u \quad (2.3)$$

การเก็บข้อมูลของค่าคงตัวเวลา เป็นการเก็บข้อมูลในช่วงเวลาที่ผลตอบสนองทางเอาต์พุตเพิ่มขึ้น 63.2% จากการเปลี่ยนแปลงของเอาต์พุตที่ได้จากการวัด เนื่องจากที่ 63.2% ของการเปลี่ยนแปลงของเอาต์พุตในการวัดนั้น มีความใกล้เคียงกับอุณหภูมิจริงเสมอ ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการที่ 2.3 ซึ่งเป็นสมการของค่าคงตัวเวลาในอีกรูปแบบได้ดังสมการที่ 2.4 นี้

$$y(\tau_p) = 0.632K_p \Delta u \quad (2.4)$$

2.4.2.3 ช่วงเวลาไร้ผลตอบสนองของกระบวนการ (θ_p)

ช่วงเวลาไร้ผลตอบสนองของกระบวนการ หรือเรียกอีกอย่างว่าช่วงหน่วงเวลาของกระบวนการ เป็นการหน่วงเวลาที่เกิดในระหว่างที่สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมถูกส่งออกไปจนถึงเวลาเมื่อตัวแปรกระบวนการ (y) เริ่มการถูกวัดค่าได้และเริ่มการตอบสนอง กระบวนการใด ๆ ยังมีช่วงเวลาไร้ผลตอบสนองที่นานมากขึ้นเท่าไร ความยากในการควบคุมก็ยากเพิ่มขึ้นไป เนื่องจากการควบคุมให้มีประสิทธิภาพและรัดสามารถทำได้ยากขึ้นเมื่อเกิดช่วงเวลาไร้ผลตอบสนอง จึงสามารถเขียนสมการของค่าคงตัวเวลาเมื่อมีช่วงเวลาไร้ผลตอบสนองได้ดังสมการต่อไปนี้

$$y(t \geq \theta_p) = (e^{-(t-\theta_p)/\tau_p})y(0) + (1 - e^{-(t-\theta_p)/\tau_p})K_p \Delta u \quad (2.5)$$

2.5 ระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์

ระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ เป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (feedback) ที่ใช้ตัวควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ และอนุพันธ์ โดยสามารถพบเห็นได้แพร่หลายในระบบควบคุมต่าง ๆ รวมไปถึงสิ่งต่าง ๆ ที่พบเห็นได้ในชีวิตประจำวันส่วนมากมักใช้การควบคุมด้วยอัลกอริทึมนี้ เนื่องจากเมื่อระบบเพิ่มการควบคุมแบบสัดส่วน การควบคุมแบบปริพันธ์ และการควบคุมแบบอนุพันธ์เข้าไปแล้วส่งผลให้สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบได้ อีกทั้งยังสามารถใช้งานได้หลากหลาย และครอบคลุม ซึ่งสามารถอธิบายตัวควบคุมได้ดังสมการต่อไปนี้ [3]

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^{\infty} e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.6)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่ามีตัวแปรต่าง ๆ โดยมี u คือสัญญาณเอาต์พุตของระบบ และ e คือค่าความผิดพลาดในการควบคุม ทำให้สามารถหาค่าความผิดพลาดนี้ได้จากการลบค่าที่วัดจากกระบวนการออกจากค่าเป้าหมาย ($e = SV - PV$ หรือ $e = r - y$) ส่วนที่เหลือของตัวควบคุมนี้จึงเหลือในส่วนของเทอมของสัดส่วน เทอมของปริพันธ์ และเทอมของอนุพันธ์ ซึ่งในทั้งสามเทอมก็มีตัวแปรที่แตกต่างกันออกไป เทอมของสัดส่วนเป็นอัตราขยาย (k_p) เทอมของปริพันธ์เป็นสัดส่วนของขนาดและระยะเวลาของความผิดพลาด (k_i) และเทอมของอนุพันธ์เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาด (k_d) และตัวแปรเหล่านี้ก็สามารถปรับแต่งค่าได้แก่เช่นเดียวกัน เมื่อแปลงลาปลาซสมการที่ (2.1) จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$U(s) = K_p E(s) + \frac{K_i}{s} E(s) + K_d s E(s) \quad (2.7)$$

2.5.1 ผลของสัดส่วน

ผลของสัดส่วนหรืออัตราขยายเป็นการตอบสนองของทางเอาต์พุต โดยมีการเปลี่ยนแปลงจากการคูณค่าความผิดพลาดด้วยค่าคงที่ K_p ส่งผลให้ตัวของระบบมีค่าความคลาดเคลื่อนเชิงสถิติลดลงเมื่อ K_p เพิ่มมากขึ้นแต่ตัวระบบจะมีความผันผวนมากขึ้น โดยผลของสัดส่วนนั้นสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังต่อไปนี้

$$u(t) = k_p e(t) \quad (2.8)$$

จากสมการที่ (2.3) แสดงให้เห็นว่าถ้าค่าความคลาดเคลื่อนหรืออัตราขยายสัดส่วนมีค่าเพิ่มมากขึ้นค่าของผลตอบสนองทางเอาต์พุตก็เพิ่มมากขึ้น และในกรณีที่ค่าของความคลาดเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Error) หรืออัตราขยายสัดส่วนมีค่าน้อยลงค่าของผลตอบสนองที่เอาต์พุตก็จะมีค่าลดลงไปด้วยในทำนองเดียวกัน

2.5.2 ผลของปริพันธ์

เทอมปริพันธ์ หรือเทอมรีเซ็ต (reset) มีผลการควบคุมในลักษณะที่เป็นสัดส่วนต่อขนาดและระยะเวลาของค่าความผิดพลาด ซึ่งเป็นผลรวมของค่าความผิดพลาดทั้งหมดในคาบเวลาสามารถเรียกว่าปริพันธ์ของค่าความผิดพลาด โดยเทอมปริพันธ์นี้มักใช้ควบคู่ไปกับเทอมของสัดส่วน เนื่องจากช่วยลด หรือขจัดค่าออฟเซตที่สามารถเกิดขึ้นเมื่อเทอมของสัดส่วนนั้นทำให้เกิดการแกว่งที่ผลตอบสนองทางเอาต์พุตสามารถเขียนเทอมของปริพันธ์เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังต่อไปนี้

$$u(t) = k_i \int_0^{\infty} e(t) dt \quad (2.9)$$

จากสมการที่ (2.4) จะเห็นได้ว่าการควบคุมในเทอมของปริพันธ์ จะพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนของกระบวนการที่เกิดขึ้นทั้งหมด โดยสามารถหาค่าความคลาดเคลื่อนโดยใช้การหาค่าพื้นที่ทั้งหมดภายใต้กราฟของค่าความผิดพลาดต่อหน่วยเวลาจะได้เป็นค่าความผิดพลาดสะสม แล้วจึงคูณด้วยอัตราขยายปริพันธ์เข้าไป ซึ่งขนาดของผลตอบสนองในเทอมปริพันธ์จะแปรผันตามอัตราขยายปริพันธ์ (K_i)

2.5.3 ผลของอนุพันธ์

เทอมของอนุพันธ์เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดจากกระบวนการโดยมีการคำนวณหาค่าความผิดพลาดจากความชันของความผิดพลาดทั้งหมดในคาบเวลา แล้วนำมาคูณด้วยอัตราขยายอนุพันธ์ (K_d) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือการควบคุมในเทอมของอนุพันธ์นั้นให้สัญญาณผลตอบสนองทางเอาต์พุต โดยขึ้นกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความคลาดเคลื่อนต่อเวลา (Time Rate of Change of Error) ซึ่งค่าความผิดพลาดดังกล่าวสามารถมีค่าเป็นศูนย์ได้ ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ในเทอมของอนุพันธ์เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังต่อไปนี้

$$u(t) = k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.10)$$

จากสมการที่ (2.5) เห็นได้ว่าการควบคุมในเทอมของอนุพันธ์นั้น สามารถแก้ไขค่าความผิดพลาดได้โดยกระทำล่วงหน้าก่อน จึงส่งผลให้ผลตอบสนองของกระบวนการนั้นเร็วขึ้น แต่ลักษณะของการควบคุมในเทอมนี้มีความไวต่อการรบกวนสูง ทำให้เหมาะกับกระบวนการซึ่งมีการหน่วงเวลา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดขึ้นในกระบวนการ การใช้เทอมของอนุพันธ์ร่วมกับเทอมของสัดส่วนและปริพันธ์มีส่วนช่วยในการส่งเสริมเสถียรภาพของระบบควบคุม

2.6 ตัวควบคุม PID_n^m

ตัวควบคุม PID_n^m คือระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ ซึ่งมีเทอมของอนุพันธ์ที่เพิ่มมากขึ้น เรียกอีกอย่างว่าเทอม m โดยสามารถกำหนดจำนวนเทอมของอนุพันธ์ได้ แต่การเพิ่มเทอมของอนุพันธ์ให้มากขึ้นนั้นตามมาด้วยข้อเสียคือส่งผลต่อความไวของผลตอบสนองต่อการรบกวนมากยิ่งขึ้น ทำให้ใช้งานจริงไม่ได้ แต่การเพิ่มเทอมของ n หรือตัวกรองแบบทวินาม (Binomial filter) เข้าไปจะช่วยให้สามารถลดให้สัญญาณรบกวนนั้นลดน้อยลงได้ โดย PID_n^m นั้นสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้ [7]

$$C^m(s) = K_c + \frac{K_i}{s} + K_{d_1}s + K_{d_2}s^2 + \dots + K_{d_m}s^m \quad (2.11)$$

โดยที่ m สามารถมีค่าได้ตั้งแต่ 0, 1, 2 ไปจนถึง m จำนวน ยกตัวอย่างเช่นเมื่อ m มีค่าเป็น 0 หรือไม่มีเทอมของอนุพันธ์ ทำให้เหลือแค่การควบคุมแบบสัดส่วน และปริพันธ์ สามารถเขียนสมการได้ว่า

$$C^0(s) = K_c + \frac{K_i}{s} \quad (2.12)$$

เมื่อ m มีค่าเป็น 1 เป็นการเพิ่มเทอมของอนุพันธ์เข้าไปในสมการที่ (2.7) เป็นจำนวนหนึ่งเทอม ทำให้การควบคุมนี้เป็นการควบคุมแบบสัดส่วน ปริพันธ์ และอนุพันธ์ สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$C^1(s) = K_c + \frac{K_i}{s} + K_{d_1}s \quad (2.13)$$

เมื่อ m มีค่าเป็น 2 เป็นการเพิ่มเทอมของอนุพันธ์เข้าไปในสมการ (2.8) เป็นจำนวนหนึ่งเทอมทำให้การควบคุมนี้เป็นการควบคุมแบบสัดส่วน ปริพันธ์ และอนุพันธ์อีก 2 เทอม สามารถเขียนสมการได้ดังต่อไปนี้

$$C^2(s) = K_c + \frac{K_i}{s} + K_{d_1}s + K_{d_2}s^2 \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเพิ่มค่าของเทอม m แล้วจึงต้องเพิ่มค่าของเทอมตัวกรองแบบทวินามเข้าไปโดยสมการของตัวกรองแบบทวินามนั้นสามารถเขียนในสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$Q_n(s) = \frac{1}{(T_{fs} + 1)^n} \quad (2.15)$$

โดยที่เทอมของ n สามารถมีจำนวนเทอมได้ตั้งแต่ 1, 2 ไปจนถึง n จำนวน และมีเงื่อนไขว่าจำนวนเทอมของ n นั้นต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับจำนวนของเทอม m ทำให้สามารถเขียนสมการของตัวควบคุม PID_n^m เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$C_n^m(s) = PID^m(s) * Q_n(s) \quad (2.16)$$

ยกตัวอย่างเช่นหากให้เทอมของ m มีจำนวน 0 เทอม และเทอมของ n มีจำนวน 1 เทอม จะสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$C_1^0(s) = \left(K_c + \frac{K_i}{s}\right) \left(\frac{1}{(T_{fs} + 1)^n}\right) \quad (2.17)$$

นอกเหนือจากเพิ่มตัวกรองแบบทวินามเข้าไปแล้วนั้นยังต้องเพิ่มอีกตัวกรองอีกตัวเข้าไป โดยตัวกรองนี้เรียกว่าตัวกรองข้างต้น ซึ่งตัวกรองนี้จะช่วยในเรื่องของการลด Overshoot ที่เกิดขึ้นขณะทำการปรับแต่งค่าตัวแปรต่าง ๆ ในการออกแบบตัวควบคุมให้กับระบบ โดยตัวกรองข้างต้นนี้ สามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังต่อไปนี้

$$F_p(s) = \frac{b_{m+1} T_i T_{D_m} s^{m+1} + \dots + b_2 T_i T_{D_1} s^2 + b_1 T_i s + 1}{T_i T_{D_m} s^{m+1} + \dots + T_i T_{D_1} s^2 + T_i s + 1} \quad (2.18)$$

ทำให้เห็นได้ว่าตัวควบคุม PID_n^m นั้นแตกต่างออกไปจากระบบควบคุมสัดส่วน ปริพันธ์ และอนุพันธ์ ในจุดที่มีจำนวนตัวแปรให้ปรับค่าได้ทั้งหมด 5 ตัวแปร ได้แก่ K_p , K_i , K_d , m และ n

2.7 Graphical User Interface (GUI)

Graphical User Interface (GUI อ่านว่า จียูไอ หรือ กูย) เป็นการติดต่อกับผู้ใช้โดยใช้การสื่อสารผ่านสัญลักษณ์หรือรูปภาพ โดยการออกแบบในเรื่องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้นจะต้องมีการโต้ตอบกับผู้ใช้ด้วย ทั้งนี้ก็เพื่อแทนลักษณะต่าง ๆ ของโปรแกรม ซึ่งจะมีการใช้ Graphical User เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Interface แทนที่การพิมพ์คำสั่งในการทำงาน ทำให้สามารถใช้งานได้ง่ายและรวดเร็ว รวมถึงทำให้ผู้ที่ไม่เข้าใจในตัวโปรแกรมมากนักก็สามารถใช้งานได้เช่นกัน [14]



รูปที่ 2.1 Graphical User Interface

ที่มา : <https://www.mindphp.com/คู่มือ/73-คืออะไร/2079-gui-คืออะไร.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 เกริ่นนำ

เนื้อหาภายในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการในการดำเนินงานของการจัดทำารออกแบบการควบคุม PID^m โดย WIO เทอร์มินัลสำหรับตู้อบต้นไม้นขนาดเล็ก ซึ่งในการออกแบบการควบคุมนี้ได้ออกแบบการควบคุมสำหรับควบคุมทั้งอุณหภูมิและความชื้นภายในตู้อบต้นไม้นขนาดเล็กให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ได้กำหนดไว้ สามารถจำแนกหัวข้อของขั้นตอนในการดำเนินงานได้ ดังต่อไปนี้

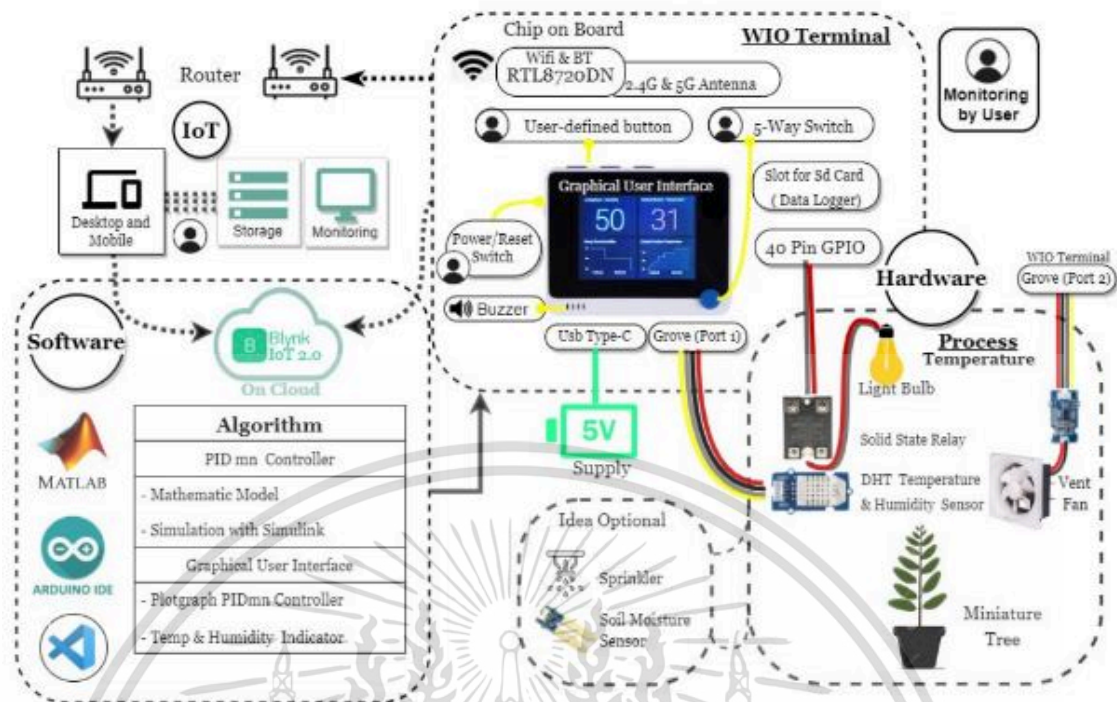
- 3.2 ภาพรวมขององค์ประกอบหลักของระบบ
- 3.3 การออกแบบระบบสำหรับใช้ในการควบคุมกระบวนการ
- 3.4 การ Modeling ระบบสำหรับใช้ในการออกแบบการควบคุม PID^m
- 3.5 การออกแบบการควบคุม PID^m ที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการ
- 3.6 การออกแบบโปรแกรมการทำงานของ WIO เทอร์มินัล

3.2 ภาพรวมขององค์ประกอบหลักของระบบ

ในการออกแบบการทำงานของระบบการออกแบบการควบคุม PID^m โดย WIO เทอร์มินัลสำหรับตู้อบต้นไม้นขนาดเล็ก เพื่อใช้ในการวัด วิเคราะห์ และควบคุมอุณหภูมิและความชื้นภายในตู้อบต้นไม้นขนาดเล็กดังรูปที่ 3.1 โดยประกอบไปด้วย

- 1) ฮาร์ดแวร์ เป็นส่วนแรกของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิและความชื้น ซึ่งทางผู้จัดทำได้มีการเลือกใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เป็น WIO เทอร์มินัล และใช้ AHT20 I2C เป็นเซนเซอร์ในการวัดค่าอุณหภูมิและความชื้น ในส่วนของการเพิ่มอุณหภูมิในระบบใช้เป็นหลอดไส้ 220VAC 100W และใช้เครื่องพ่นหมอกในการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ในระบบ
- 2) ซอฟต์แวร์ เป็นส่วนของอัลกอริทึมในการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในระบบซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของระบบซึ่งใช้โปรแกรม Visual Studio Code ในการพัฒนาอัลกอริทึมนี้เป็นหลัก โดยนำค่าข้อมูลของอุณหภูมิและความชื้นที่วัดด้วย AHT20 I2C มาใช้ในการควบคุมรูปแบบป้อนกลับร่วมกับการควบคุม PID^m รวมถึงแสดงค่าที่วัดได้มาผ่าน Graphical User Interface บนหน้าจอของ WIO เทอร์มินัล และส่งข้อมูลดังกล่าวไปแสดงผลบน IoT platform
- 3) IoT เป็นส่วนที่นำข้อมูลที่ได้จากการวัดมาเก็บไว้ในฐานข้อมูล โดยสามารถแสดงข้อมูลของอุณหภูมิและความชื้นที่วัดได้ในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งสามารถเข้าถึงข้อมูลดังกล่าวได้แบบ Real-time และสามารถสร้างรายงานการเก็บข้อมูลได้อัตโนมัติ

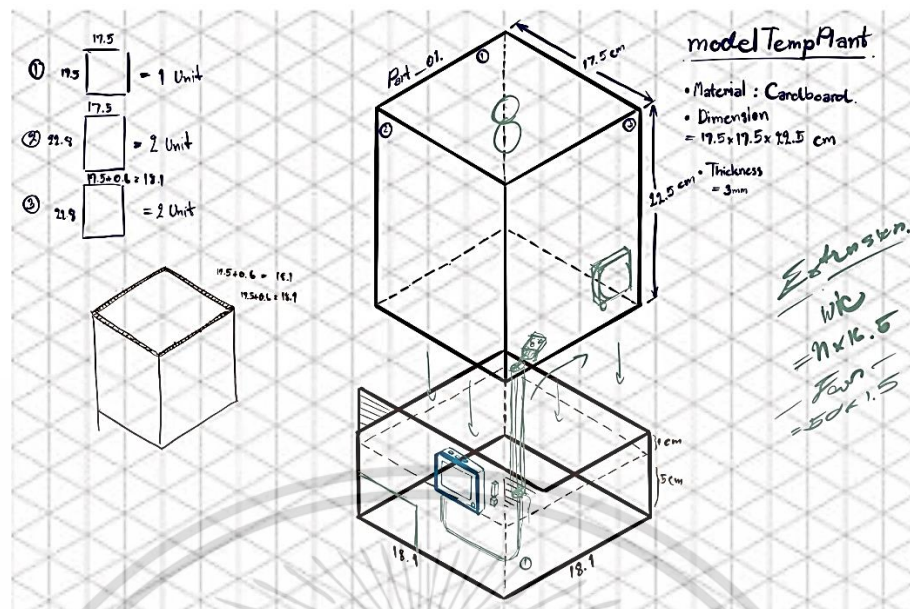
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แผนผังภาพรวมการทำงานของการออกแบบการควบคุม PID^m โดย WIO เทอร์มินัล สำหรับตู้อบต้นไม้ขนาดเล็ก

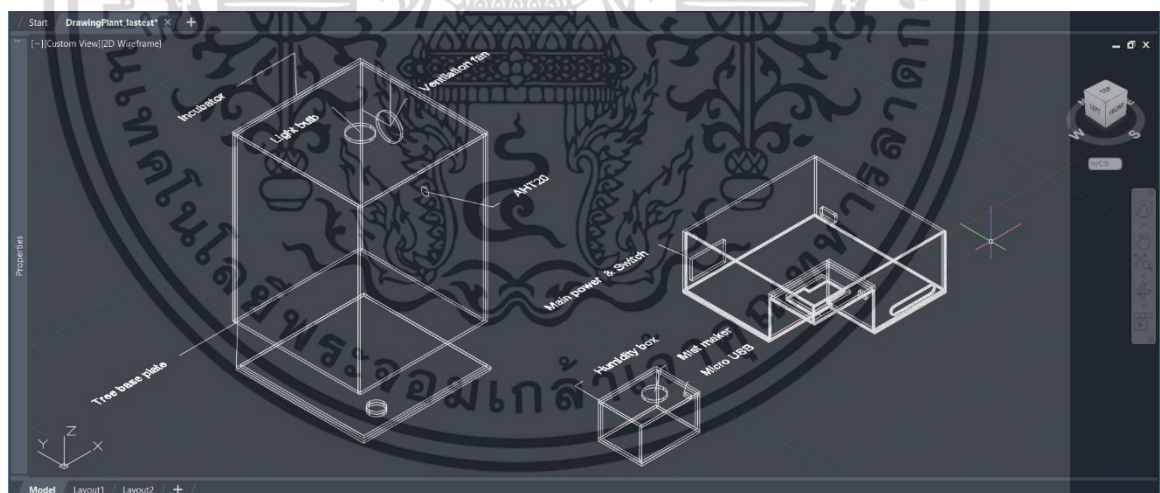
3.3 การออกแบบระบบสำหรับการใช้ในการควบคุมกระบวนการ

สำหรับการออกแบบระบบที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการในขั้นแรกได้ทำการออกแบบโครงสร้างของระบบที่จะใช้ให้มีรูปแบบเป็นตู้อบต้นไม้ขนาดเล็ก โดยมีแนวคิดในการแบ่งส่วนของโครงสร้างระบบออกเป็น 4 ส่วนใหญ่ ๆ ได้แก่ ส่วนฝาครอบ ส่วนฐานรอง ส่วนกล่องสำหรับใส่ฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในโครงการ และส่วนกล่องสำหรับใส่ตัวพ่นหมอก ซึ่งตัวของโครงสร้างของระบบทั้ง 4 ส่วนที่แบ่งออกมานั้นสามารถทำการประกอบเข้าด้วยกันและถอดออกจากกันได้ตลอดเวลา เพื่อทำให้ง่ายต่อการดูแลและบำรุงรักษาตู้อบต้นไม้ขนาดเล็ก



รูปที่ 3.2 การออกแบบโครงสร้างเบื้องต้นของระบบสำหรับการควบคุมกระบวนการ

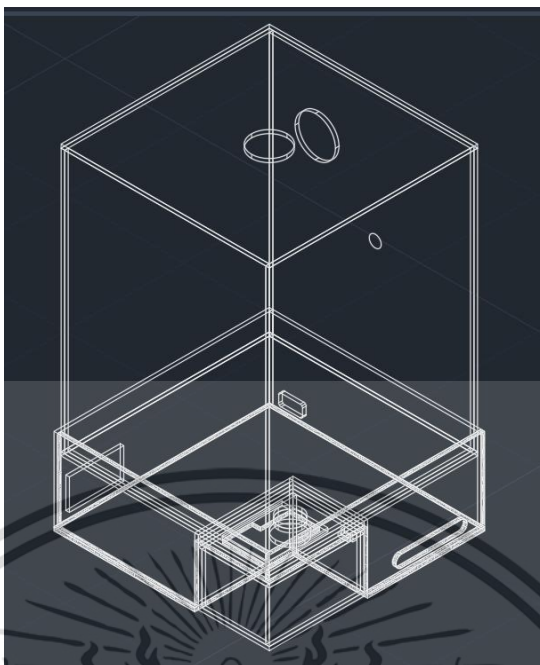
เมื่อได้ออกแบบโครงสร้างเบื้องต้นของระบบสำหรับการควบคุมกระบวนการเสร็จสิ้นแล้ว ต่อมาจึงได้นำแบบโครงสร้างดังกล่าวมาออกแบบและวาดใหม่โดยมีการใส่รายละเอียดต่าง ๆ เพิ่มเติมลงในโปรแกรม AutoCAD ได้ดังที่แสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 โครงสร้างของระบบที่ออกแบบและวาดใหม่ผ่านโปรแกรม AutoCAD

หากนำโครงสร้างของระบบที่ได้ออกแบบไว้บนโปรแกรม AutoCAD ซึ่งถูกวาดแยกส่วนออกเป็น 4 ส่วนมาประกอบรวมเข้าด้วยกันแล้ว จึงได้ภาพรวมของโครงสร้างที่ออกแบบไว้ดังแสดงในรูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 โครงสร้างของระบบที่ประกอบทุกส่วนเข้าด้วยกันในโปรแกรม AutoCAD

เมื่อได้ตัวแบบในโปรแกรม AutoCAD เสร็จสมบูรณ์แล้ว จึงได้นำตัวแบบโครงสร้างของระบบดังกล่าวไปตัดอะคริลิกออกเป็นชิ้นส่วนต่างๆ ก่อนนำมาประกอบเข้าด้วยกันจึงได้โครงสร้างของระบบสำหรับการควบคุมกระบวนการออกมาดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 โครงสร้างของระบบหลังนำชิ้นส่วนต่าง ๆ มาประกอบเข้าร่วมกันและติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การ Modeling ระบบสำหรับใช้ในการออกแบบการควบคุม PID^m

ก่อนที่จะเริ่มขั้นตอนในการออกแบบการควบคุม PID^m สำหรับใช้ในการควบคุมกระบวนการ จำเป็นต้องมีการ Modeling ระบบสำหรับใช้ในการออกแบบเสียก่อน โดยในขั้นตอนเริ่มแรกของการ Modeling ระบบสำหรับใช้ในการออกแบบนั้น เริ่มต้นจากการกำหนดเงื่อนไขของกระบวนการ (Process Condition) ออกมาก่อน ซึ่งในการ Modeling ระบบสำหรับใช้ในการออกแบบการควบคุม PID^m ต้องทำการ Modeling ระบบทั้งในส่วนของคุณภูมิและความชื้น เนื่องจากในการออกแบบการควบคุม PID^m ต้องทำการควบคุมทั้งอุณหภูมิในระบบวงปิด (Closed loop temperature control) และความชื้นในระบบวงปิด (Closed loop humidity control) จึงสามารถแบ่งการ Modeling ระบบได้ดังต่อไปนี้

3.4.1 การ Modeling ระบบสำหรับใช้ในการออกแบบการควบคุมอุณหภูมิในระบบวงปิด

จากที่กล่าวไปในข้างต้นนั้น ขั้นตอนแรกเริ่มสำหรับการ Modeling ระบบสำหรับใช้ในการออกแบบการควบคุม PID^m จำเป็นที่จะต้องกำหนดเงื่อนไขของกระบวนการก่อน ซึ่งในขั้นตอนการ Modeling ระบบสำหรับใช้ในการออกแบบการควบคุม PID^m ได้มีการกำหนดเงื่อนไขของกระบวนการไว้ดังแสดงในตารางที่ 3.1

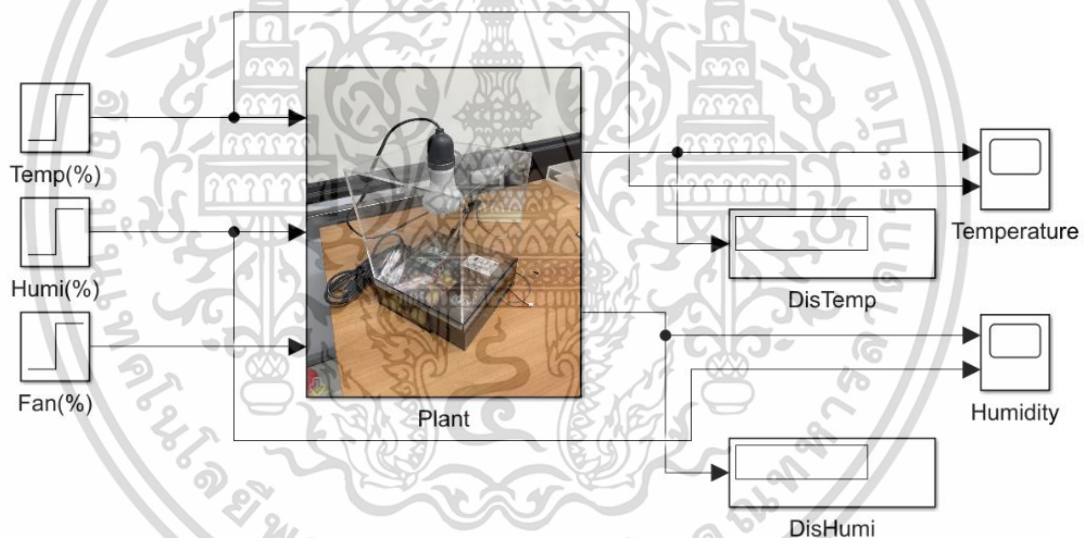
ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขของกระบวนการ (อุณหภูมิ)

ขนาดของโครงสร้างระบบ	17 x 17 x 22 เซนติเมตร
บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์	WIO เทอร์มินัล
เซนเซอร์	AHT20 I2C
Drive	Carlo Gavazzi RM1E23AA25 Solid state relay
Final Control Element (FCE)	หลอดไส้ 220Vac 100W
Load	พัดลมระบายอากาศ 5Vdc
Operating Temperature	30 – 35 องศาเซลเซียส

เมื่อกำหนดเงื่อนไขของกระบวนการสำหรับการ Modeling ระบบสำหรับใช้ในการออกแบบการควบคุมอุณหภูมิภายในระบบวงปิดเสร็จสิ้นเป็นที่เรียบร้อยแล้วในขั้นตอนต่อมาจึงเริ่มทำการ Modeling โดยเริ่มต้นจากการเขียนโปรแกรมใน Visual Studio Code ซึ่งได้กำหนดให้มีการอ่านค่าที่อ่านได้จากเซนเซอร์รวมไปถึงการแปลงข้อมูลที่ได้รับมาจากตัวบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วยการแปลงข้อมูลชนิดข้อความ (string) ให้เปลี่ยนเป็นชนิดของข้อมูลในรูปแบบของข้อมูลชนิดตัวเลขทศนิยม (float) สำหรับใช้ในการส่งสัญญาณควบคุม PWM หรือ Pulse Width Modulation โดยส่งสัญญาณดังกล่าวออกไปเพื่อทำการสั่งการอุปกรณ์ Drive หรือก็คือ Carlo Gavazzi RM1E23AA25 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

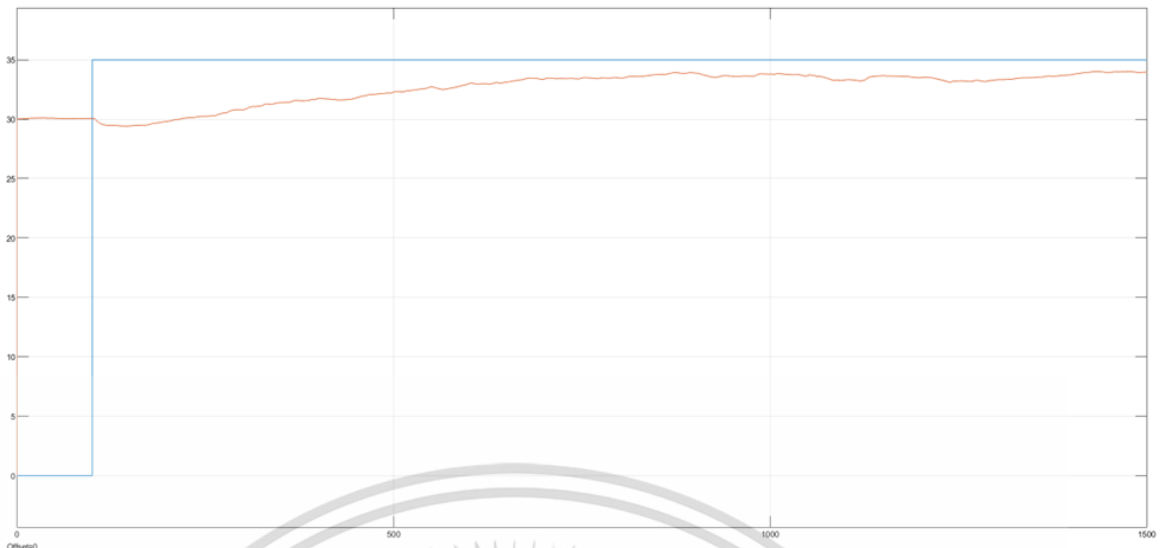
Solid state relay ให้ทำการเพิ่มหรือลดเพื่อทำการควบคุม Final Control Element (FCE) ที่เป็นหลอดไส้ในการควบคุมอุณหภูมิภายในกระบวนการ

ในส่วนถัดมาหลังจากอัปเดตโปรแกรมที่เขียนไว้บน Visual Studio Code ลงบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นที่เรียบร้อยแล้วนั้น ขั้นตอนถัดมาเป็นการเขียนโปรแกรมสำหรับใช้งานร่วมกันกับโปรแกรมบน Visual Studio Code ไว้บน MATLAB Simulink ซึ่งได้ใช้ Simulink Desktop Real-time แบบ Run in Kernel Mode ในการเขียนโปรแกรมโดยได้เขียนโปรแกรมไว้ในรูปแบบของการควบคุมระบบเป็นระบบควบคุมวงเปิด โดยมีการใช้บล็อก Stream Output ที่ป้อนอินพุตเป็นข้อมูลในรูปแบบของ float และ string เพื่อให้สอดคล้องกับโปรแกรมที่ได้เขียนไว้บน Visual Studio Code ในการส่งค่าออกไปสั่งอุปกรณ์ Drive รวมถึงได้มีการใช้งานบล็อก Stream Input เพื่อรับค่าที่อ่านได้จากเซนเซอร์ตามโปรแกรมที่ได้เขียนไว้ใน Visual Studio Code โดยได้มีการนำค่าดังกล่าวมาแสดงผ่าน Scope บน MATLAB Simulink ซึ่งแสดงโปรแกรมที่เขียนไว้บน MATLAB Simulink ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 โปรแกรมบน MATLAB Simulink สำหรับใช้ Modeling ระบบอุณหภูมิ

เมื่อเขียนโปรแกรมดังกล่าวเสร็จเรียบร้อยแล้ว ต่อมาจึง Run in Real Time ทำให้โปรแกรมทำงานร่วมกับอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ได้ต่อไว้ในช่วงระยะเวลาหนึ่งเพื่อเป็นการเก็บข้อมูล โดยในช่วงแรกได้ปรับค่าของ u ไว้ที่ 0% เพื่อทำให้อุณหภูมิเข้าสู่ Operating Point แล้วจึงค่อยเพิ่มค่าของ u ขึ้นไปที่ 35% เพื่อทำการเก็บข้อมูลไว้สำหรับทำการวิเคราะห์และออกแบบการควบคุมในขั้นตอนที่จะกล่าวถึงในส่วนถัดไป ซึ่งจากการ Run in Real Time ได้กราฟผลตอบสนองดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 กราฟผลตอบสนองของอนุกรมแบบระบบควบคุมวงเปิด

หลังจากได้กราฟผลตอบสนองของอนุกรมแบบระบบควบคุมวงเปิดเป็นที่เรียบร้อยแล้วในขั้นตอนถัดมาจึงเป็นการวิเคราะห์กราฟผลตอบสนองดังกล่าว ซึ่งจากกราฟผลตอบสนองสามารถประมาณระบบนี้เป็นระบบเชิงเส้นลำดับที่หนึ่งพร้อมช่วงเวลาไร้ผลตอบสนอง หรือ FOPDT ทำให้สามารถประมาณค่าตัวแปรโดยอ้างอิงจากสมการของระบบเชิงเส้นลำดับที่หนึ่งพร้อมช่วงเวลาไร้ผลตอบสนองเมื่อแทนค่าตัวแปรจึงได้สมการดังต่อไปนี้

$$K_p = 0.11285714 = \frac{3.95}{35} = \frac{33.95 - 30}{35 - 0} \quad (3.1)$$

$$y(\tau_p) = 0.632 \times 0.11285714 \times 35 = 2.4964 \quad (3.2)$$

$$\tau_p = 530.2 - 102.95 = 427.25 \quad (3.3)$$

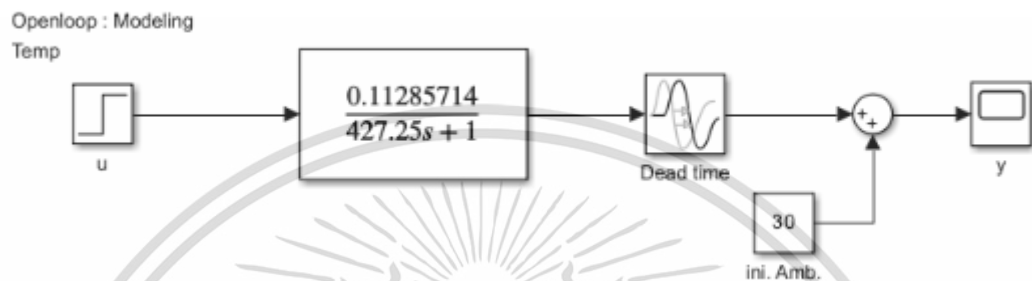
$$\theta_p = 102.95 - 100 = 2.95 \quad (3.4)$$

เมื่อได้ค่าตัวแปรอัตราขยายของกระบวนการ ค่าคงตัวเวลาของกระบวนการ และช่วงเวลาไร้ผลตอบสนองครบทั้ง 3 ตัวแปรแล้วจึงสามารถแทนค่าตัวแปรเหล่านี้ลงในสมการของระบบเชิงเส้นลำดับที่หนึ่งพร้อมช่วงเวลาไร้ผลตอบสนองได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_p e^{-\theta_p s}}{\tau s + 1} = \frac{0.11285714 e^{-2.95s}}{427.25s + 1} \quad (3.5)$$

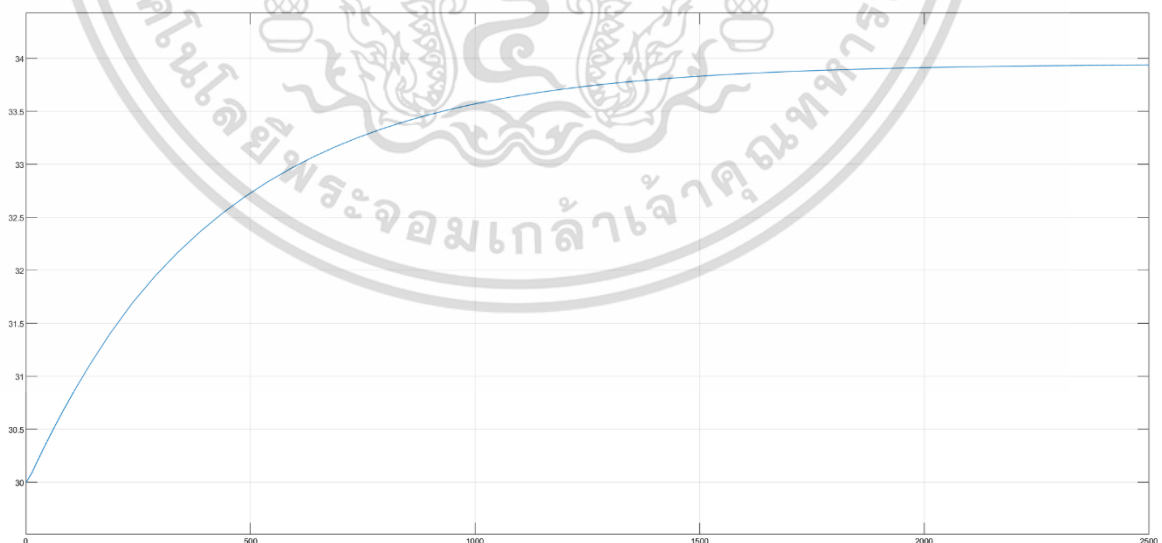
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากการประมาณค่าฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบออกมาได้แล้วจำเป็นต้องมีการประเมินฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้ทำการประมาณค่ามาโดยใช้ MATLAB Simulink เขียนโปรแกรมขึ้นมา โดยใส่ฟังก์ชันถ่ายโอนดังกล่าว ซึ่งเขียนโปรแกรมไว้ในรูปแบบของการควบคุมระบบเป็นระบบควบคุมวงเปิดดั้งเดิม และมีการใช้บล็อก Transport Delay เพื่อเป็นการแทนการประมาณค่าช่วงเวลาไว้ผลตอบสนอง โดยโปรแกรมดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 โปรแกรม MATLAB Simulink สำหรับประเมินกราฟผลตอบสนองฟังก์ชันถ่ายโอน (อุณหภูมิ)

เมื่อเขียนโปรแกรมดังกล่าวบน MATLAB Simulink เสร็จเรียบร้อยแล้ว ต่อมาจึง Run และดูบล็อก Scope เพื่อประเมินกราฟผลตอบสนองของฟังก์ชันถ่ายโอนที่ประมาณค่ามาได้ และเป็นการเสร็จสิ้นขั้นตอนในการ Modeling ระบบสำหรับควบคุมอุณหภูมิในระบบวงปิด ซึ่งได้กราฟผลตอบสนองของอุณหภูมิจากฟังก์ชันถ่ายโอนที่ประมาณค่ามาได้ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 กราฟผลตอบสนองของอุณหภูมิจากฟังก์ชันถ่ายโอนที่ประมาณค่ามาได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากที่ได้ทำการ Modeling ระบบสำหรับใช้ในการออกแบบการควบคุม PID^m เพื่อควบคุมอุณหภูมิเสร็จสิ้นตามขั้นตอนที่ได้แสดงถึงในข้างต้นเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ในขั้นตอนถัดไปจึงเป็นการเริ่มต้นการ Modeling ระบบสำหรับใช้ในการออกแบบการควบคุม PID^m เพื่อควบคุมความชื้น

3.4.2 การ Modeling ระบบสำหรับใช้ในการออกแบบการควบคุมความชื้นในระบบวงปิด

สำหรับการ Modeling ระบบสำหรับใช้ในการออกแบบการควบคุม PID^m เพื่อควบคุมความชื้น มีขั้นตอนในการดำเนินงานเหมือนกันเดียวกับ Modeling ระบบสำหรับใช้ในการออกแบบการควบคุม PID^m เพื่อควบคุมอุณหภูมิ โดยขั้นตอนแรกสำหรับการ Modeling ระบบสำหรับใช้ในการออกแบบการควบคุม PID^m เพื่อควบคุมความชื้นก็คือกำหนดเงื่อนไขของกระบวนการ โดยมีการกำหนดเงื่อนไขของกระบวนการไว้ดังตารางที่ 3.2

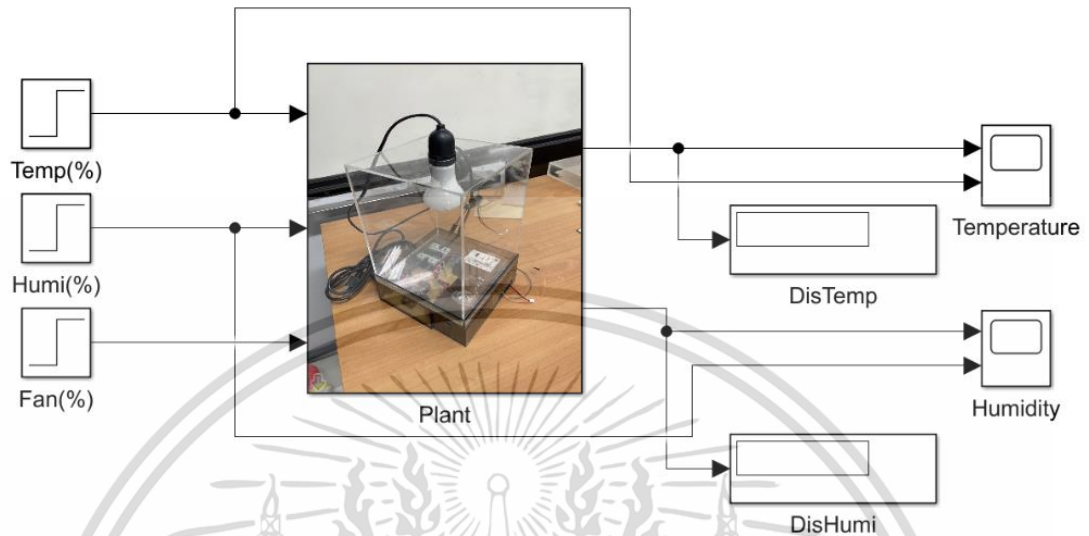
ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขของกระบวนการ (ความชื้น)

ขนาดของโครงสร้างระบบ	17 x 17 x 22 เซนติเมตร
บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์	WIO เทอร์มินัล
เซนเซอร์	AHT20 I2C
Drive	Mist Maker Driver Circuit Board Fogger
Final Control Element (FCE)	เครื่องพ่นหมอก 5Vdc
Load	พัดลมระบายอากาศ 5Vdc
Operating Humidity	50 – 69 %RH

เมื่อกำหนดเงื่อนไขของกระบวนการสำหรับการ Modeling ระบบสำหรับใช้ในการออกแบบการควบคุมความชื้นภายในระบบวงปิดเสร็จสิ้นเป็นที่เรียบร้อยแล้วในขั้นตอนต่อมาจึงเริ่มทำการ Modeling ระบบ ซึ่งเริ่มต้นจากการเขียนโปรแกรมใน Visual Studio Code ซึ่งได้กำหนดให้มีการอ่านค่าที่อ่านได้จากเซนเซอร์รวมไปถึงการแปลงข้อมูลสำหรับใช้ในการส่งสัญญาณควบคุม PWM เช่นเดียวกับการ Modeling ระบบสำหรับใช้ในการออกแบบการควบคุมความชื้นภายในระบบวงปิด โดยสำหรับการ Modeling ระบบสำหรับใช้ในการออกแบบการควบคุมความชื้นภายในระบบวงปิดนั้นจะส่งสัญญาณดังกล่าวออกไปเพื่อทำการสั่งการอุปกรณ์ Drive ที่เป็น Mist Maker Driver Circuit Board Fogger แทน ซึ่งสัญญาณ PWM ที่ส่งออกไปจะสั่งการให้เพิ่มหรือลดเพื่อทำการควบคุม Final Control Element (FCE) ที่เป็นเครื่องพ่นหมอกในการควบคุมความชื้นภายในกระบวนการ

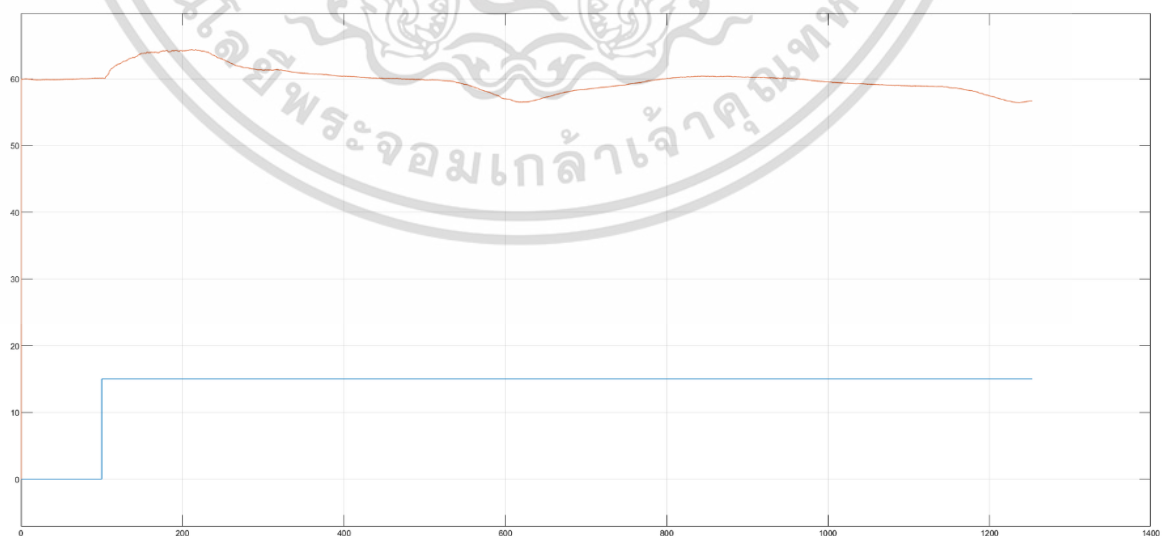
หลังจากอัปโหลดโปรแกรมลงบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์แล้วต่อมาจึงต้องเขียนโปรแกรมบน MATLAB Simulink เช่นเดียวกันกับการ Modeling ระบบของอุณหภูมิ ซึ่งได้มีการนำ

ค่าดังกล่าวมาแสดงผ่าน Scope บน MATLAB Simulink ซึ่งแสดงโปรแกรมที่เขียนไว้บน MATLAB Simulink ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 โปรแกรมบน MATLAB Simulink สำหรับใช้ Modeling ระบบความชื้น

เมื่อได้โปรแกรมห้แสดงไปในข้างต้นแล้วจึง Run in Real Time ส่งผลให้โปรแกรมทำงานร่วมกับอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ได้ต่อไว้ในช่วงระยะเวลาหนึ่งเพื่อเป็นการเก็บข้อมูล โดยในช่วงแรกได้ปรับค่าของ u ไว้ที่ 83% เพื่อทำให้ความชื้นเข้าสู่ Operating Point แล้วจึงค่อยเพิ่มค่าของ u ขึ้นไปที่ 87% เพื่อทำการเก็บข้อมูลไว้สำหรับทำการวิเคราะห์และออกแบบการควบคุม ซึ่งจากการ Run in Real Time ได้กราฟผลตอบสนองดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 กราฟผลตอบสนองของความชื้นแบบระบบควบคุมวงปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากได้กราฟผลตอบสนองของความถี่แบบระบบควบคุมวงเปิดเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ต่อมาจึงเป็นการวิเคราะห์กราฟผลตอบสนองดังกล่าว ซึ่งจากกราฟผลตอบสนองสามารถประมาณระบบนี้เป็นระบบเชิงเส้นลำดับที่หนึ่งพร้อมช่วงเวลาไร้ผลตอบสนอง หรือ FOPDT เช่นเดียวกับ อุดมภูมิทำให้สามารถประมาณค่าตัวแปรโดยอ้างอิงจากสมการของระบบเชิงเส้นลำดับที่หนึ่งพร้อมช่วงเวลาไร้ผลตอบสนองเมื่อแทนค่าตัวแปรจึงได้สมการดังต่อไปนี้

$$K_p = 0.032 = \frac{0.48}{15} = \frac{60.39 - 59.91}{15 - 0} \quad (3.6)$$

$$y(\tau_p) = 0.632 \times 0.032 \times 15 = 0.30336 \quad (3.7)$$

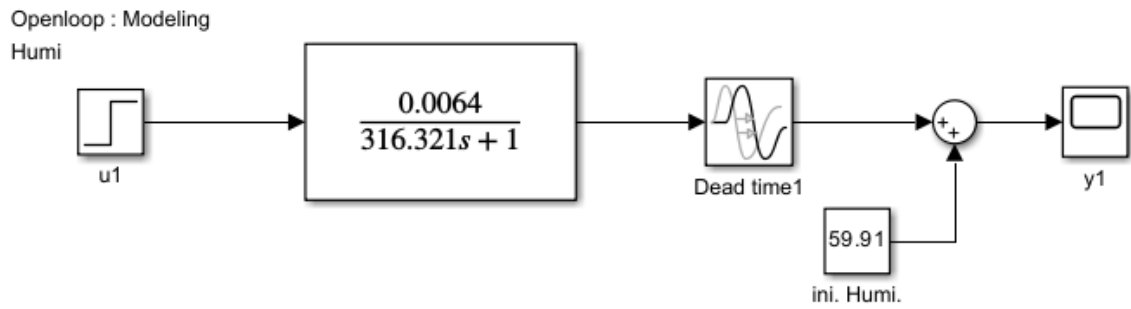
$$\tau_p = 420.774 - 104.453 = 316.321 \quad (3.8)$$

$$\theta_p = 104.453 - 100 = 4.453 \quad (3.9)$$

เมื่อได้ค่าตัวแปรอัตราขยายของกระบวนการ ค่าคงตัวของกระบวนการ และช่วงเวลาไร้ผลตอบสนองครบทั้ง 3 ตัวแปรสำหรับการประมาณค่าฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบความถี่ขึ้นแล้วจึงสามารถแทนค่าตัวแปรเหล่านี้ลงในสมการของระบบเชิงเส้นลำดับที่หนึ่งพร้อมช่วงเวลาไร้ผลตอบสนองได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_p e^{-\theta_p s}}{\tau s + 1} = \frac{0.032 e^{-4.453s}}{316.321s + 1} \quad (3.10)$$

หลังจากการประมาณค่าฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบความถี่ได้แล้วต่อมาเป็นขั้นตอนของการประเมินฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้ทำการประมาณค่ามาโดยใช้ MATLAB Simulink เขียนโปรแกรมขึ้นมาโดยใส่ฟังก์ชันถ่ายโอนดังกล่าวในการจำลองฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบความถี่เช่นเดียวกับการจำลองฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบอุดมภูมิ โดยโปรแกรมดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 โปรแกรม MATLAB Simulink สำหรับประเมินกราฟผลตอบสนองฟังก์ชันถ่ายโอน (ความชื้น)

เมื่อ Run โปรแกรมดังกล่าวบน MATLAB Simulink เสร็จเรียบร้อยแล้ว และคูบล็อก Scope เพื่อประเมินกราฟผลตอบสนองของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบความชื้นที่ประมาณค่ามาได้ และเป็นอันเสร็จสิ้นขั้นตอนในการ Modeling ระบบสำหรับควบคุมความชื้นในระบบวงปิด ซึ่งได้กราฟผลตอบสนองของความชื้นจากฟังก์ชันถ่ายโอนที่ประมาณค่ามาได้ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 กราฟผลตอบสนองของความชื้นจากฟังก์ชันถ่ายโอนที่ประมาณค่ามาได้

3.5 การออกแบบการควบคุม PID^m ที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการ

จากการศึกษาพบว่าผลของอนุพันธ์ในระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ สามารถก่อให้เกิดการสะท้อน และการขยายของสัญญาณรบกวน (noise) หรือค่าผิดพลาดแบบสุ่ม (random error) ในการวัดค่า y ซึ่งส่งผลต่อการส่งสัญญาณเอาต์พุตออกไปสู่การ Final Control Element (FCE) ทำให้ Final Control Element มีการสีกหรือที่เพิ่มขึ้น และต้องมีการบำรุงรักษาเพิ่มมากขึ้นนั่นเอง โดยสิ่งสำคัญสำหรับการลดหรือขจัดสัญญาณสัญญาณรบกวน หรือค่าผิดพลาดแบบสุ่มดังกล่าวนั้นสามารถใช้ตัวกรองสัญญาณ (Filter) ในการรับสัญญาณรบกวนแล้วกรองสัญญาณดังกล่าว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อลดความแปรปรวนลงได้ ซึ่งการกรองสัญญาณที่ดีนั้นสามารถช่วยรักษาให้สัญญาณต้นฉบับคงอยู่ได้มากขึ้น และสำหรับการออกแบบการควบคุม PID_m ที่เป็นหัวใจสำคัญในโครงการนี้ เป็นการควบคุมด้วยระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ ที่สามารถปรับแต่งได้ด้วยการเพิ่มเทอมของอนุพันธ์ และการเพิ่มจำนวนชั้นของตัวกรองสัญญาณความถี่ โดยการออกแบบการควบคุม PID_m นั้น มีวิธีการในการปรับจูนระบบเชิงเส้นลำดับที่หนึ่งพร้อมช่วงเวลาไรผลตอบสนอง ประกอบไปด้วยสมการดังต่อไปนี้ [7]

$$S(s) = \frac{Y(S)}{U(S)} = \frac{K_m e^{-T_{dm}s}}{T_m s + 1} \quad (3.11)$$

$$T_m = \frac{1}{a_m} \quad (3.12)$$

$$K_m = \frac{K_{sm}}{a_m} \quad (3.13)$$

$$S(s) = \frac{Y(S)}{U(S)} = \frac{K_{sm} e^{-T_{dm}s}}{s + a_m} \quad (3.14)$$

$$A = a_m \times T_{dm} \quad (3.15)$$

$$S = \sqrt{(A^2 + 8)} \quad (3.16)$$

$$s_o = -\frac{A+4-S}{2T_{dm}} \quad (3.17)$$

$$K_o = (S-2)e^{\frac{(S-A-4)}{2}} \quad (3.18)$$

$$K_{co} = \frac{K_o}{K_s T_{dm}} \quad (3.19)$$

$$\tau_{io} = \frac{2(2-S)}{A^2 + 2A + 28 - (A+10)S} \quad (3.20)$$

$$T_{io} = \tau_{io} \times T_d \quad (3.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$b1 = -\frac{1}{\tau_{io} \times T_{dm} \times s_o} \quad (3.22)$$

$$T_f = T_e \frac{A+(n+1)(4-S) - \sqrt{n[A^2+4(n+1)(3-S)]}}{(1+n)[A^2+4A+6 \cdot (n+2)-(A+2n+4)S]} \quad (3.23)$$

จากสมการการปรับจูนระบบเชิงเส้นลำดับที่หนึ่งพร้อมช่วงเวลาไร้ผลตอบสนองด้วยวิธีการปรับจูน PID_n^m ที่แสดงให้เห็นในข้างต้นนี้ ทำให้สามารถนำค่าตัวแปรที่ได้มาสำหรับการประมาณค่าฟังก์ชันถ่ายโอนมาแทนค่าลงในสมการต่าง ๆ เพื่อออกแบบการควบคุม PID_n^m ได้ โดยสามารถแบ่งเป็นการออกแบบการควบคุม PID_n^m สำหรับการควบคุมอุณหภูมิ และความชื้นในระบบวงปิด ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.5.1 การออกแบบการควบคุม PID_n^m สำหรับการควบคุมอุณหภูมิในระบบวงปิด

ในการออกแบบการควบคุม PID_n^m สำหรับใช้ในการควบคุมอุณหภูมิในระบบวงปิด อ้างอิงจากสมการในการปรับจูนระบบเชิงเส้นลำดับที่หนึ่งพร้อมช่วงเวลาไร้ผลตอบสนองด้วยวิธีการปรับจูน PID_n^m สามารถแทนค่าลงในสมการได้ดังนี้

$$S(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{0.11285714e^{-2.95s}}{427.25s + 1} \quad (3.24)$$

$$a_m = \frac{1}{T_m} = \frac{1}{427.25} = 0.00234 \quad (3.25)$$

$$K_{sm} = \frac{0.11285714}{427.25} = 0.00026415 \quad (3.26)$$

$$S(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{0.00026415e^{-2.95s}}{s + 0.00234} \quad (3.27)$$

เมื่อได้ค่าตัวแปรในสมการข้างต้นครบหมดแล้ว จึงนำค่าตัวแปรต่าง ๆ รวมไปถึงสมการอื่น ๆ ในการปรับจูนระบบเชิงเส้นลำดับที่หนึ่งพร้อมช่วงเวลาไร้ผลตอบสนองด้วยวิธีการปรับจูน PID_n^m ไปเขียนลง MATLAB Script บนโปรแกรม MATLAB ได้ดังแสดงในรูปที่ 3.14

```

%PIDmn Tuning
%Temp
Ks=0.00026415;
am=0.00234;
Tdm=2.95;

A=am*Tdm;
S=((A^2)+8)^(1/2);
So=-(A+4-S)/(2*Tdm);

Ko=(S-2)*exp((S-A-4)/2);
Kco=Ko/(Ks*Tdm);

Tauio= 2*(2-S)/((A^2)+(2*A)+28-((A+10)*S));
Tio=Tdm*Tauio;

b1=-1/(Tauio*Tdm*So);

Te=.1;
n=4;
Tf=Te*(A+(n+1)*(4-S)-(n*(n*(A^2)+4*(n+1)*(3-S)))^(1/2))/((1+n)*((A^2)+(4*A)+6*(n+2)-(A+2*n+4)*S));

```

รูปที่ 3.14 สมการการปรับจูน FOPDT อุณหภูมิด้วยวิธีการปรับจูน PID_m^n บน Script [7]

ในลำดับถัดมาได้มีการยกวิธีการปรับจูน PID โดยเป็นวิธีการปรับจูนของ Ziegler-Nichols (Ziegler-Nichols Methods) นำมาเปรียบเทียบกับวิธีการปรับจูน PID_m^n ซึ่งวิธีการปรับจูนของ Ziegler-Nichols สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 วิธีการปรับจูน PID (Ziegler-Nichols Methods)

Controller Type	Kp	Ti	Td
P	1/a		
PI	0.9/a	3L	
PID	1.2/a	2L	L/2

เมื่อนำวิธีการปรับจูน PID ด้วยวิธีการปรับจูนของ Ziegler-Nichols มาแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ลงไปในวิธีการปรับจูนและนำวิธีการปรับจูนมาเขียนลง MATLAB Script บน MATLAB เพิ่มเติมจากเดิมจึงได้เป็น MATLAB Script ที่มีวิธีการปรับจูน PID ทั้ง 2 วิธีการดังแสดงในรูปที่ 3.15

```

%PIDm Tuning
%Temp
Ks=0.00026415;
am=0.00234;
Tdm=2.95;

A=am*Tdm;
S=((A^2)+8)^(1/2);
So=-(A+4-S)/(2*Tdm);

Ko=(S-2)*exp((S-A-4)/2);
Kco=Ko/(Ks*Tdm);

Tauio= 2*(2-S)/((A^2)+(2*A)+28-((A+10)*S));
Tio=Tdm*Tauio;

b1=-1/(Tauio*Tdm*So);

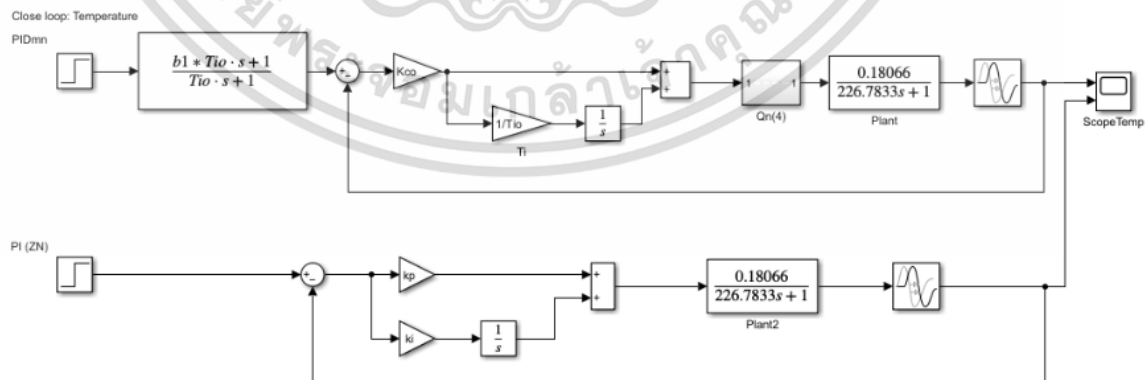
Te=.1;
n=4;
Tf=Te*(A+(n+1)*(4-S)-(n*(n*(A^2)+4*(n+1)*(3-S)))^(1/2))/((1+n)*((A^2)+(4*A)+6*(n+2)-(A+2*n+4)*S));
%PID ZN Tuning
%Temp
K=0.11285714;
L=2.95;
T=427.25;
a=K*(L/T);

kp=0.9/a;
ti=3*L;
ki=kp/ti;
kd=0;

```

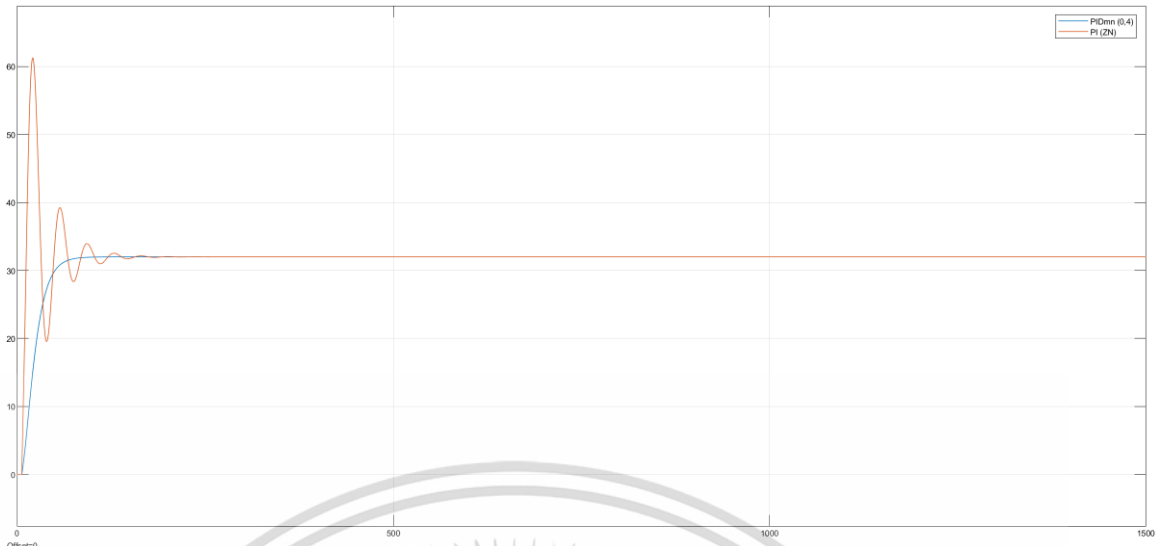
รูปที่ 3.15 สมการการปรับจูน PID ด้วยการปรับจูนทั้ง 2 วิธีการที่เขียนบน Script (อุณหภูมิ)

เมื่อทำการ Run Script ที่ได้เขียนสมการการปรับจูนเสร็จเรียบร้อยแล้วในขั้นตอนต่อไปที่จำเป็นต้องทำคือการเขียนโปรแกรมบน MATLAB Simulink โดยเขียนในรูปแบบของระบบควบคุมวงปิด และใส่บล็อกต่าง ๆ ที่มีค่าของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับตัวแปรจากสมการวิธีการปรับจูน เพื่อทำการจำลองการควบคุมอุณหภูมิที่ได้ทำการออกแบบไว้ แล้วจึงดูกราฟผลตอบสนองจากบล็อก Scope



รูปที่ 3.16 โปรแกรมจำลองการควบคุมอุณหภูมิด้วยวิธีการปรับจูน PID ทั้งสองวิธี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 กราฟผลตอบสนองของการจำลองการควบคุมอุณหภูมิด้วยวิธีการปรับจูน PID ทั้งสองวิธี

3.5.2 การออกแบบการควบคุม PID_n^m สำหรับการควบคุมความชื้นในระบบวงปิด

ในการออกแบบการควบคุม PID_n^m สำหรับใช้ในการควบคุมความชื้นในระบบวงปิด อ้างอิงจากสมการในการปรับจูนระบบเชิงเส้นลำดับที่หนึ่งพร้อมช่วงเวลาไร้ผลตอบสนองด้วยวิธีการปรับจูน PID_n^m สามารถแทนค่าลงสมการได้ดังนี้

$$S(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{0.032e^{-4.453s}}{316.321s + 1} \quad (3.28)$$

$$a_m = \frac{1}{T_m} = \frac{1}{316.321} = 0.00316135 \quad (3.29)$$

$$K_{sm} = \frac{0.032}{316.321} = 0.00010116 \quad (3.30)$$

$$S(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{0.00010116e^{-4.453s}}{s + 0.00316135} \quad (3.31)$$

เมื่อได้ค่าตัวแปรในสมการข้างต้นครบหมดแล้ว จึงนำค่าตัวแปรต่าง ๆ รวมไปถึงสมการอื่น ๆ ในการปรับจูนระบบเชิงเส้นลำดับที่หนึ่งพร้อมช่วงเวลาไร้ผลตอบสนองด้วยวิธีการปรับจูน PID_n^m ไปเขียนลง MATLAB Script บนโปรแกรม MATLAB ได้ดังแสดงในรูปที่ 3.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

%PIDmn Tuning
%Humi
Ks1=0.00010116;
am1=0.00316135;
Tdm1=4.453;

A1=am1*Tdm1;
S1=((A1^2)+8)^(1/2);
So1=-(A1+4-S)/(2*Tdm1);

Ko1=(S1-2)*exp((S1-A1-4)/2);
Kco1=Ko1/(Ks1*Tdm1);

Tauio1= 2*(2-S1)/((A1^2)+(2*A1)+28-((A1+10)*S1));
Tio1=Tdm1*Tauio1;

b12=-1/(Tauio1*Tdm1*So1);

Te1=.05;
n1=4;
Tf1=Te1*(A1+(n1+1)*(4-S1)-(n1*(n1*(A1^2)+4*(n1+1)*(3-S1)))^(1/2))/((1+n1)*((A1^2)+(4*A1)+6*(n1+2)-(A1+2*n1+4)*S1));

```

รูปที่ 3.18 สมการการปรับจูน FOPDT ความชื้นด้วยวิธีการปรับจูน PID^m บน Script [7]

เมื่อนำวิธีการปรับจูน PID ด้วยวิธีการปรับจูนของ Ziegler-Nichols มาแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ลงไปในวิธีการปรับจูนและนำวิธีการปรับจูนมาเขียนลง MATLAB Script บน MATLAB เพิ่มเติมจากเดิมจึงได้เป็น MATLAB Script ที่มีวิธีการปรับจูน PID ทั้ง 2 วิธีการดังแสดงในรูปที่ 3.19

```

%PID ZN Tuning
%Humi
K1=0.032;
L1=4.453;
T1=316.321;
a1=K1*(L1/T1);

kp1=0.9/a1;
ti1=3*L1;
ki1=kp1/ti1;
kd1=0;

%PIDmn Tuning
%Humi
Ks1=0.00010116;
am1=0.00316135;
Tdm1=4.453;

A1=am1*Tdm1;
S1=((A1^2)+8)^(1/2);
So1=-(A1+4-S)/(2*Tdm1);

Ko1=(S1-2)*exp((S1-A1-4)/2);
Kco1=Ko1/(Ks1*Tdm1);

Tauio1= 2*(2-S1)/((A1^2)+(2*A1)+28-((A1+10)*S1));
Tio1=Tdm1*Tauio1;

b12=-1/(Tauio1*Tdm1*So1);

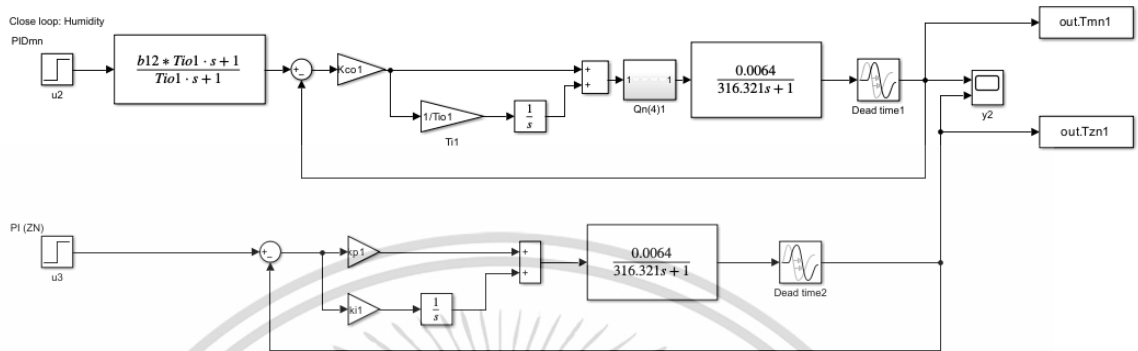
Te1=.05;
n1=4;
Tf1=Te1*(A1+(n1+1)*(4-S1)-(n1*(n1*(A1^2)+4*(n1+1)*(3-S1)))^(1/2))/((1+n1)*((A1^2)+(4*A1)+6*(n1+2)-(A1+2*n1+4)*S1));

```

รูปที่ 3.19 สมการการปรับจูน PID ด้วยการปรับจูนทั้ง 2 วิธีการที่เขียนบน Script (ความชื้น)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการ Run Script สมการการปรับจูนเสร็จสิ้นแล้ว ส่วนถัดมาคือการเขียนโปรแกรมเพื่อทำการจำลองการควบคุมความชื้นที่ได้ทำการออกแบบไว้ แล้วจึงดูกราฟผลตอบสนองจากบล็อกScope



รูปที่ 3.20 โปรแกรมจำลองการควบคุมความชื้นด้วยวิธีการปรับจูน PID ทั้งสองวิธี

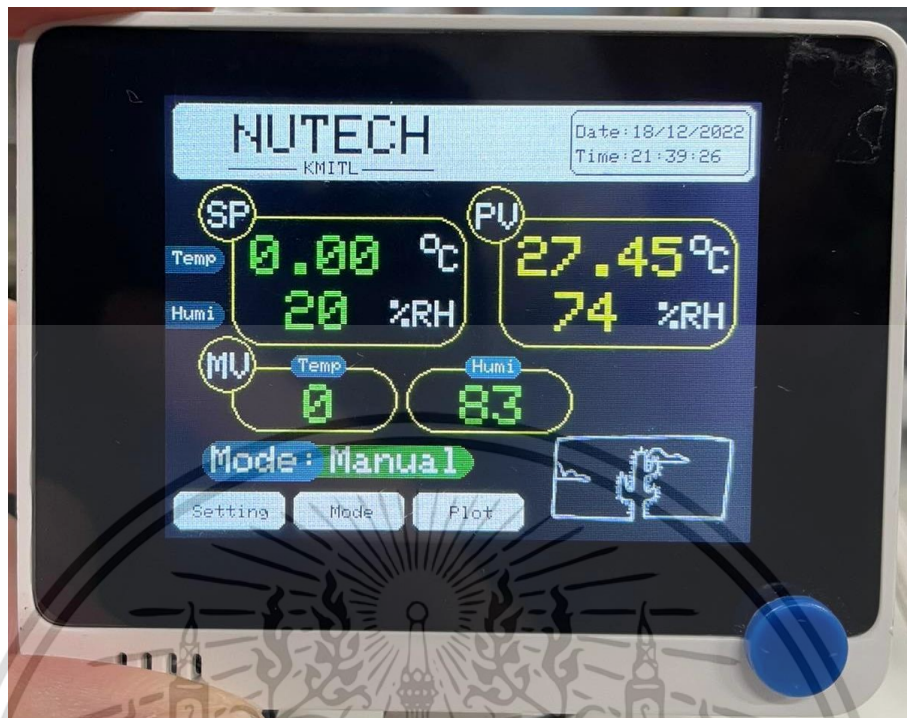


รูปที่ 3.21 กราฟผลตอบสนองของการจำลองการควบคุมความชื้นด้วยวิธีการปรับจูน PID ทั้งสองวิธี

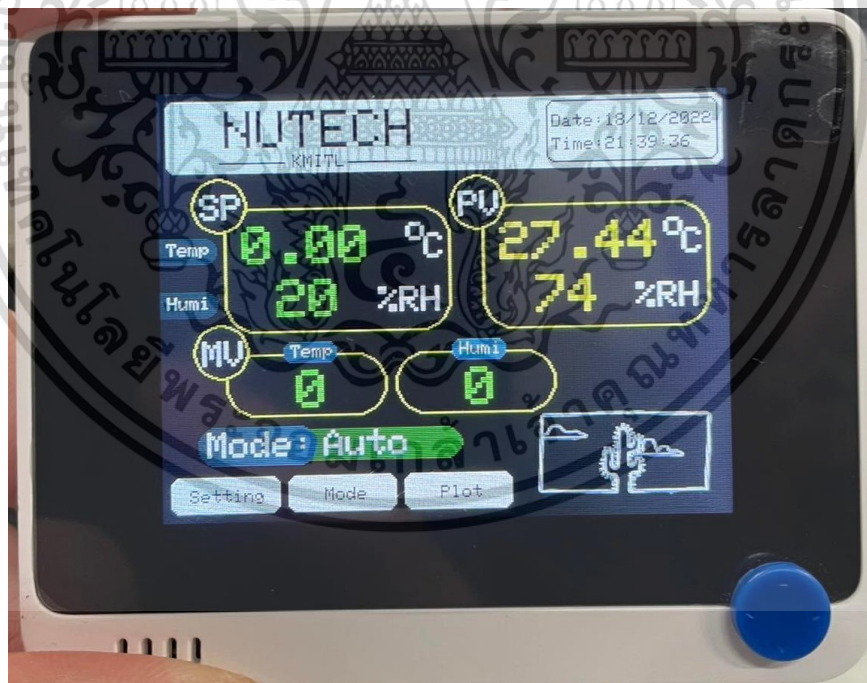
3.6 การออกแบบโปรแกรมการทำงานของ WIO เทอร์มินัล

ในการออกแบบโปรแกรมการทำงานของ WIO เทอร์มินัล ได้มีการวางแผนในการออกแบบในส่วนของการทำงานให้มีรูปแบบการทำงานเป็นโปรแกรมวน เนื่องจากตัวบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ WIO เทอร์มินัลที่ใช้งานอยู่มีสวิตช์ให้เลือกกด และเลือกใช้งานได้ค่อนข้างหลากหลาย จึงได้มีการออกแบบให้การแสดงผลบน Graphical User Interface หรือ GUI สามารถแสดงผลออกมาได้เป็น 3 รูปแบบขึ้นอยู่กับการกดสวิตช์ โดยแบ่งการแสดงผลทั้ง 3 รูปแบบซึ่งสามารถแยกออกเป็นรูปแบบจอแสดงผลหลัก รูปแบบจอสำหรับปรับแต่งค่าตัวแปร และรูปแบบจอสำหรับแสดงกราฟผลตอบสนอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

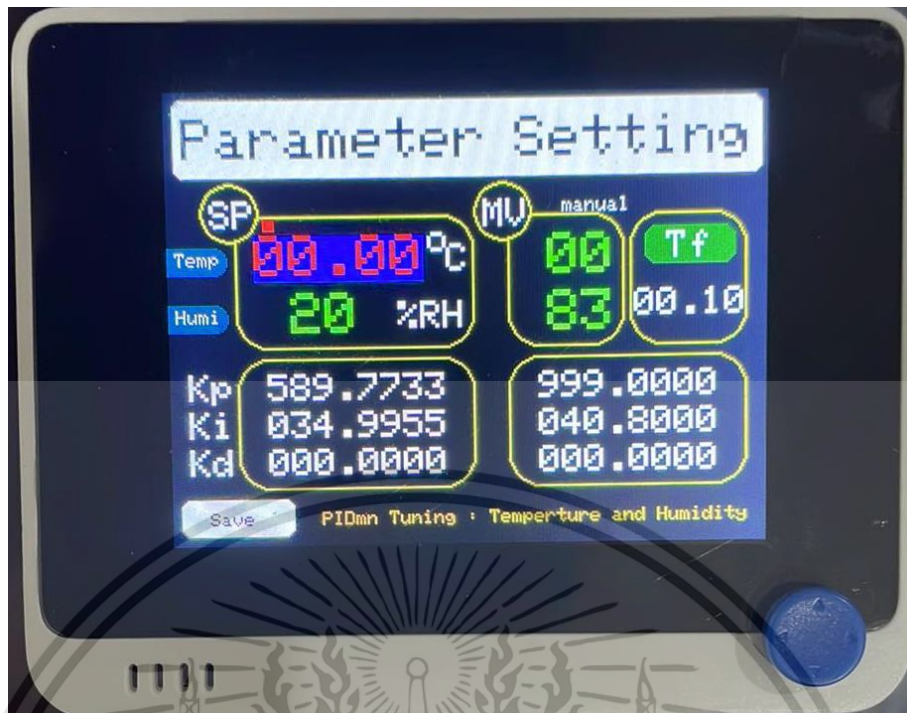


รูปที่ 3.22 Graphical User Interface รูปแบบจอแสดงผลหลัก (โหมดการทำงาน Manual)



รูปที่ 3.23 Graphical User Interface รูปแบบจอแสดงผลหลัก (โหมดการทำงานอัตโนมัติ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

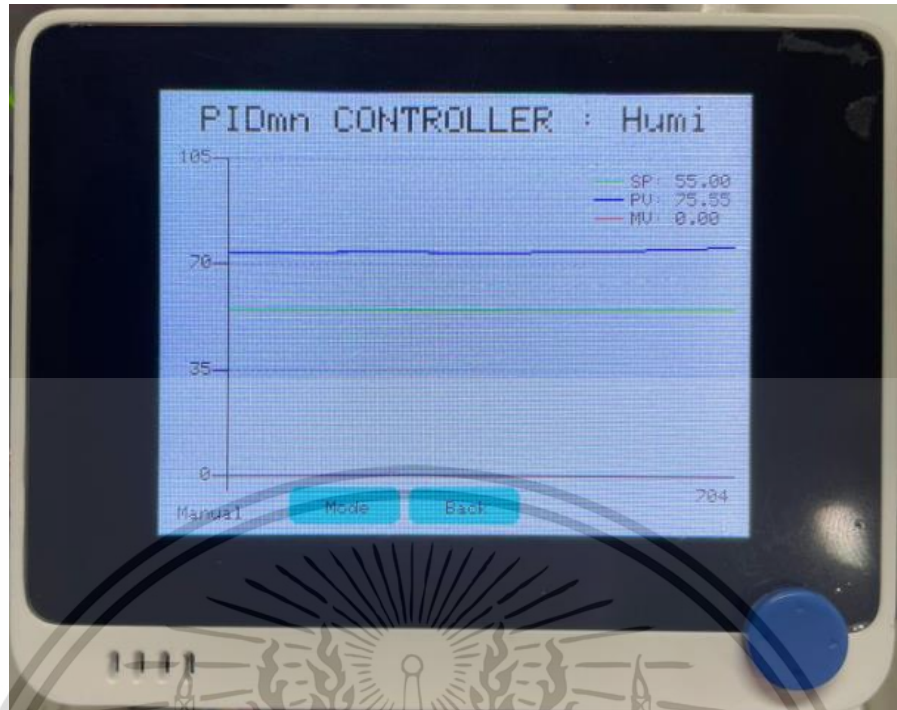


รูปที่ 3.24 Graphical User Interface รูปแบบจอสำหรับปรับแต่งค่าตัวแปร



รูปที่ 3.25 Graphical User Interface รูปแบบจอแสดงผลกราฟผลตอบสนอง (อุณหภูมิ)

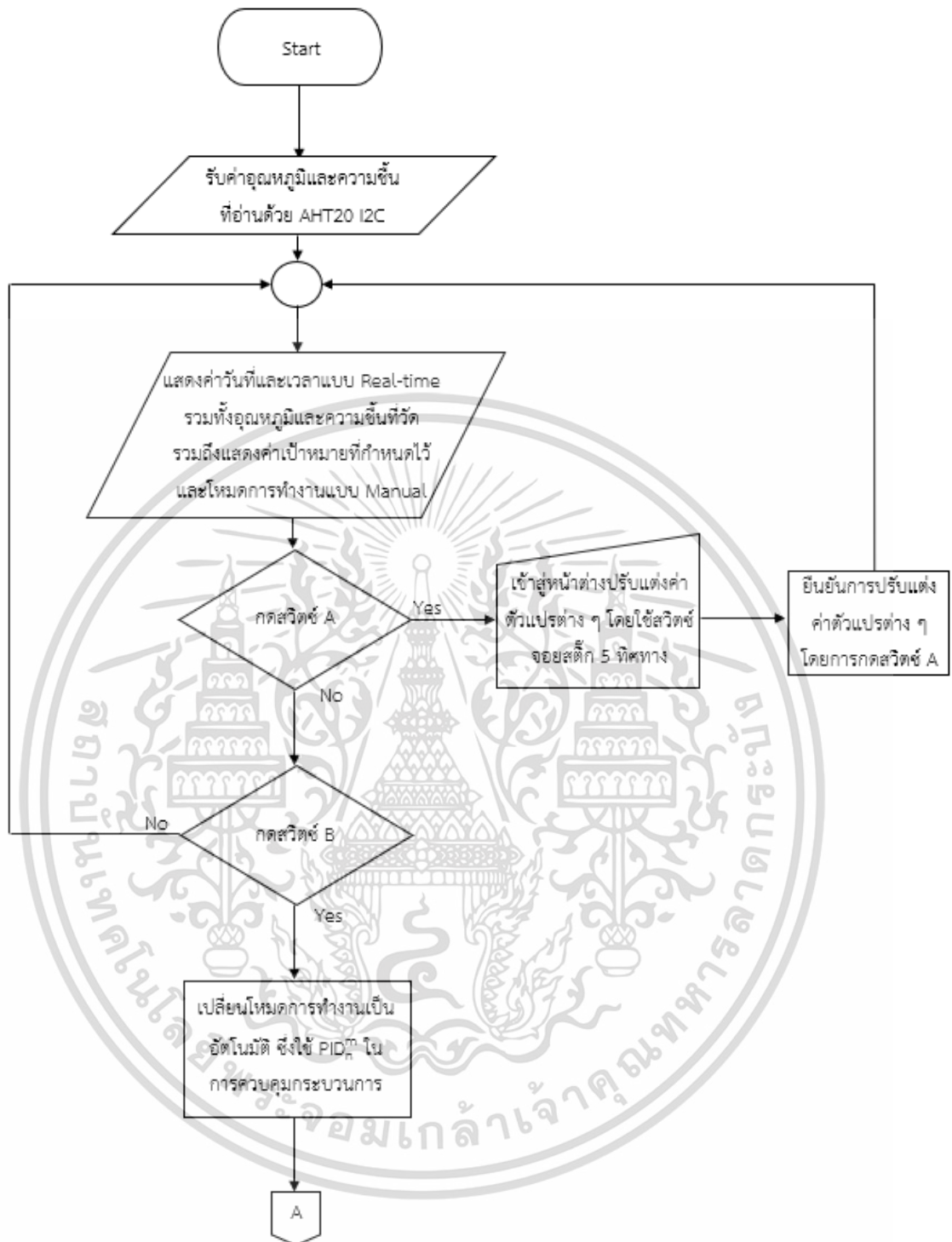
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.26 Graphical User Interface รูปแบบจอแสดงผลกราฟผลตอบสนอง (ความชื้น)

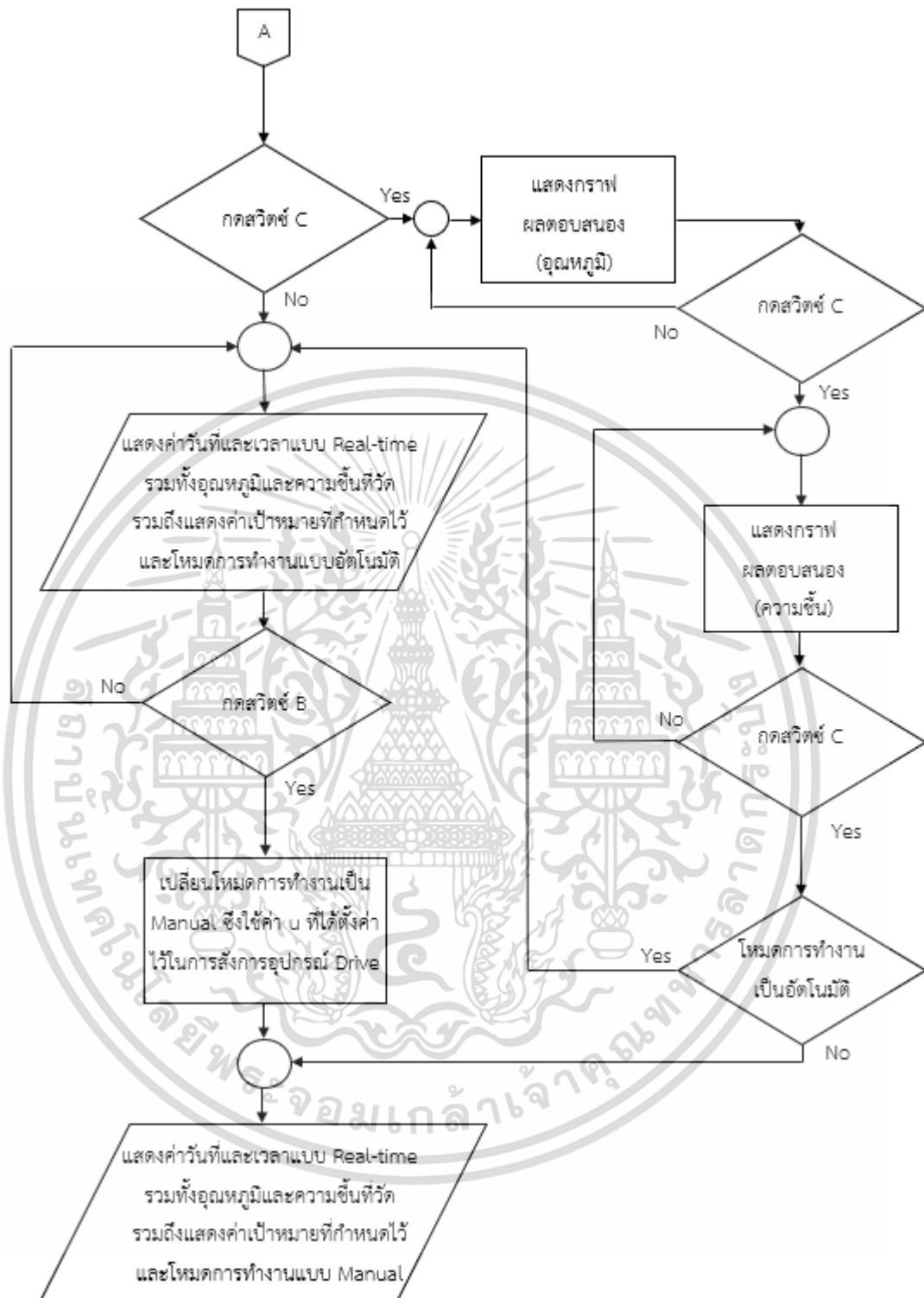
สำหรับการใช้งานโปรแกรมที่ได้ทำการเขียนขึ้นดังกล่าว ในขั้นตอนแรกเริ่มจากการทำการป้อนแหล่งจ่ายให้กับตัวบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ WIO เทอร์มินัล และแสดงผล Graphical User Interface เป็นรูปแบบจอการแสดงผลหลักโดยเป็นโหมดการทำงานแบบ Manual เมื่อกดสวิตช์ A จะเปลี่ยนเข้าสู่การแสดงผล Graphical User Interface ในรูปแบบจอสำหรับปรับแต่งค่าตัวแปรซึ่งสามารถปรับแต่งค่าตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ค่า r , u , T_e , K_p , K_i , และ K_d โดยแยกตัวแปรดังกล่าวออกเป็น ตัวแปรสำหรับการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในระบบวงปิด ซึ่งในการปรับค่าตัวแปรนั้นมีการใช้งานสวิตช์จอยสติ๊ก 5 ทิศทาง โดยสามารถเลื่อนสวิตช์จอยสติ๊กในการปรับแต่งค่า เลื่อนหลักของค่าตัวแปรที่ต้องการปรับแต่งค่า และเลื่อนเพื่อเปลี่ยนตัวแปรที่จะปรับแต่งค่า เมื่อปรับค่าตัวแปรต่าง ๆ ตรงตามความต้องการแล้วจึงกดสวิตช์ A อีกครั้ง เพื่อบันทึกการตั้งค่าตัวแปรต่าง ๆ ในส่วนถัดมาเป็นการใช้สวิตช์ B การใช้งานสวิตช์ B นั้นใช้สำหรับการปรับเปลี่ยนโหมดการทำงานโดยสลับกันระหว่างโหมดการทำงานแบบ Manual และโหมดการทำงานแบบอัตโนมัติ ในโหมดการทำงานแบบ Manual จะใช้ค่าจากตัวแปร u ที่ได้ตั้งค่าไว้มาใช้ในการส่งสัญญาณเอาต์พุตออกไปสั่งการอุปกรณ์ แต่ในโหมดการทำงานแบบอัตโนมัตินั้นมีการเปลี่ยนไปใช้การควบคุมด้วย PID^n ในการควบคุมกระบวนการให้เข้าสู่ค่า r ที่ตั้งไว้แทน และในส่วนสุดท้ายสวิตช์ C เมื่อกดสวิตช์แล้วจะเปลี่ยนการแสดงผล Graphical User Interface เป็นรูปแบบจอแสดงผลกราฟผลตอบสนองอุณหภูมิและเมื่อกดสวิตช์ C ซ้ำอีกครั้ง จะเปลี่ยนเป็นรูปแบบจอแสดงผลกราฟผลตอบสนองความชื้นแทน ทั้งนี้สามารถกดสวิตช์ C ซ้ำอีกครั้งหนึ่งเพื่อกลับไปสู่หน้าจอแสดงผลเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.27 Flowchart แสดงการทำงานของโปรแกรมวน (1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.28 Flowchart แสดงการทำงานของโปรแกรมวน (2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 เกริ่นนำ

เนื้อหาในบทนี้จะเป็นผลการทดลอง ซึ่งบันทึกจากการทดลอง และการหาประสิทธิภาพในการควบคุมของ PID_n^m โดย WIO เทอร์มินัลสำหรับตู้บตันไม้ขนาดเล็ก ให้สามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นได้ตามเป้าหมายที่กำหนด ซึ่งสามารถแบ่งผลการทดลองออกได้เป็นหัวข้อต่าง ๆ ดังนี้

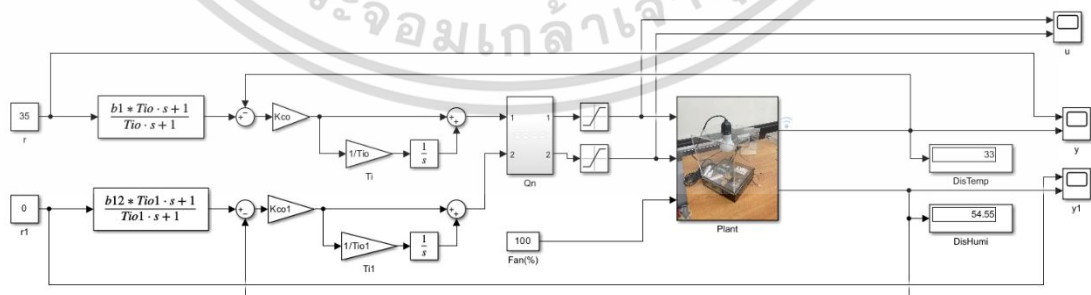
4.2 การทดลองการควบคุมอุณหภูมิภายในระบบด้วย PID_n^m

4.3 การทดลองการควบคุมความชื้นภายในระบบด้วย PID_n^m

4.4 การทดลองการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นภายในระบบด้วย PID_n^m

4.2 การทดลองการควบคุมอุณหภูมิภายในระบบด้วย PID_n^m

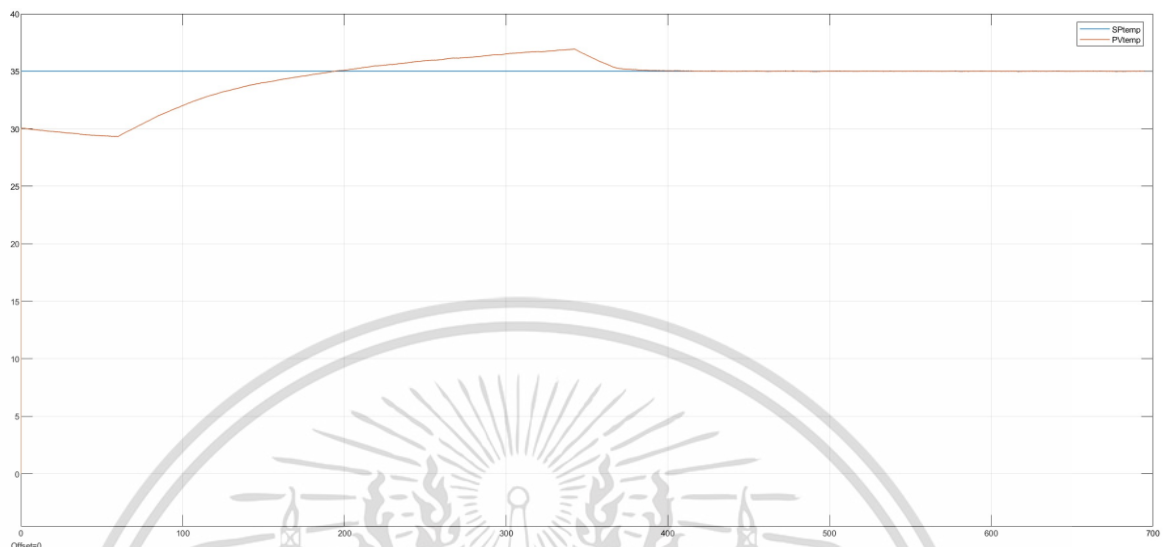
เพื่อให้ได้มาซึ่งผลลัพธ์จากการทดลอง ในการวิเคราะห์เพื่อหาประสิทธิภาพในการควบคุมอุณหภูมิภายในระบบของตัวควบคุม PID_n^m ในขั้นตอนแรกหลังจากได้ทำการออกแบบการควบคุม PID_n^m หรือ PID_4^0 เสร็จสิ้นเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ในขั้นตอนนี้เริ่มต้นจากการเขียนโปรแกรมบน MATLAB Simulink ซึ่งใช้ Hardware in the loop ในการทดลองร่วมกับระบบจริง โดยมีการสร้างบล็อกที่เป็น Pre-filter ซึ่งใช้บล็อกฟังก์ชันถ่ายโอนในการสร้าง และมีบล็อกที่เป็น Low-pass filter จำนวน 4 ชั้น ตามจำนวนของ n ที่ได้ทำการออกแบบ PID_4^0 เพิ่มเติมมาจากระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ ซึ่งเหตุผลที่ไม่มีเทอมของอนุพันธ์ เนื่องมาจากจำนวนของ m มีค่าเป็น 0 โดยโปรแกรมดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 4.1



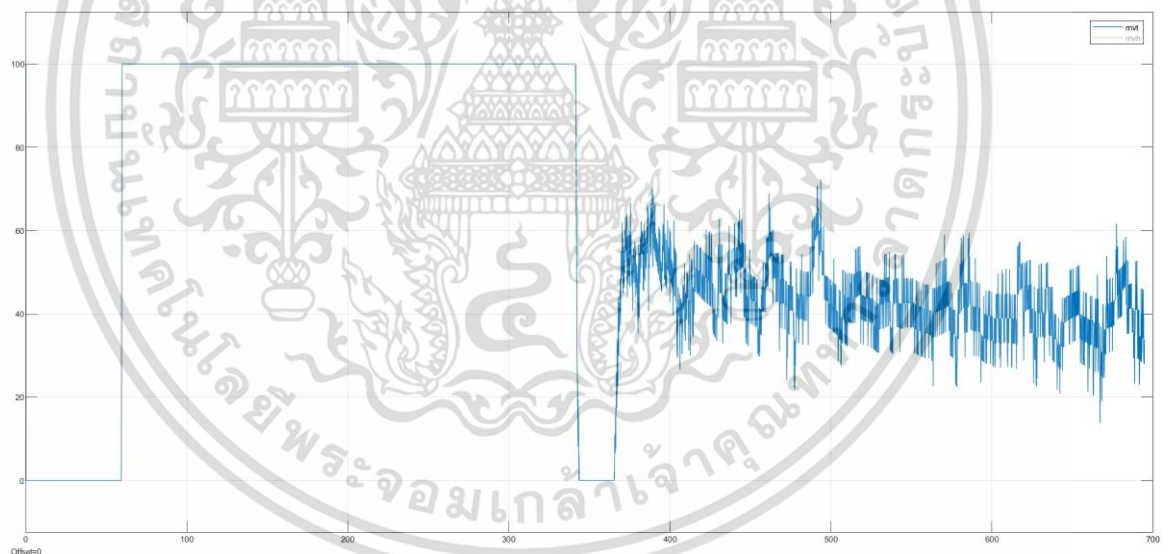
รูปที่ 4.1 โปรแกรม Hardware in the loop เพื่อทดลองการควบคุมอุณหภูมิ (PID_n^m)

ในการทดลองเพื่อเก็บผลลัพธ์ และหาประสิทธิภาพในการควบคุมได้มีการตั้งค่าเป้าหมาย (r) ไว้ที่ 35 องศาเซลเซียส ต่อมาทำการ Run in Real Time โปรแกรมที่ได้เขียนไปในข้างต้นแล้ว จึงเปิดดูเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บล็อก Scope เพื่อตรวจดูกราฟแสดงผลการควบคุมอุณหภูมิด้วย PID_n^m ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลการควบคุมอุณหภูมิ(y)ในระบบด้วย PID_n^m

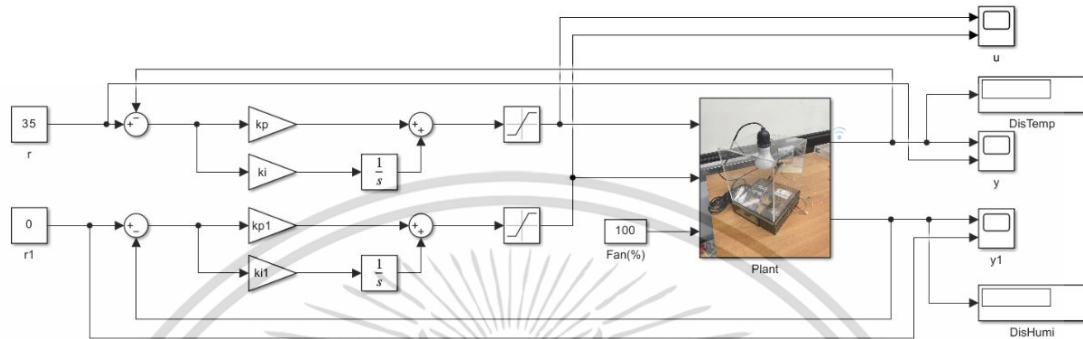


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงผลการควบคุมอุณหภูมิ(u)ในระบบด้วย PID_n^m

จากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าการควบคุมอุณหภูมิภายในระบบจริงด้วยตัวควบคุม PID_n^m นั้นค่าตัวแปรกระบวนการ (y) สามารถเข้าสู่ค่าเป้าหมาย (r) ได้ซึ่งมีการเกิด overshoot ขึ้นเล็กน้อย โดยสามารถคิด overshoot percentage ได้เป็น 5.028 % และมีเวลา Settling time อยู่ที่เวลา 383.64 วินาที

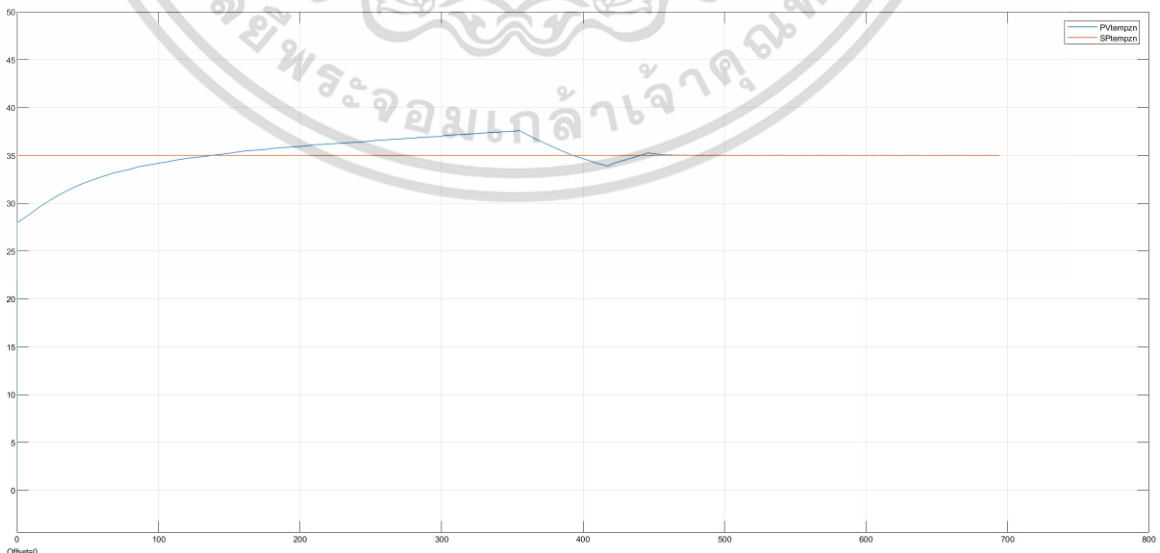
เมื่อทดลองการควบคุมอุณหภูมิภายในระบบจริงด้วยตัวควบคุม PID_n^m เสร็จสิ้นเป็นที่เรียบร้อยแล้วในส่วนถัดมาเป็นการทดลองการควบคุมอุณหภูมิภายในระบบจริงด้วยระบบควบคุมแบบสัดส่วน-เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริพันธ์ที่ใช้วิธีการปรับค่าด้วยวิธีของ Ziegler–Nichols (Ziegler–Nichols method) ซึ่งจะมีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการควบคุมอุณหภูมิภายในระบบจริงระหว่างการควบคุมทั้งสองวิธีในส่วนถัดไป โดยสามารถเขียนโปรแกรมระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์ที่ใช้วิธีการปรับค่าของ Ziegler–Nichols ในรูปแบบ Hardware in the loop บน MATLAB Simulink ดังแสดงในรูปที่ 4.4



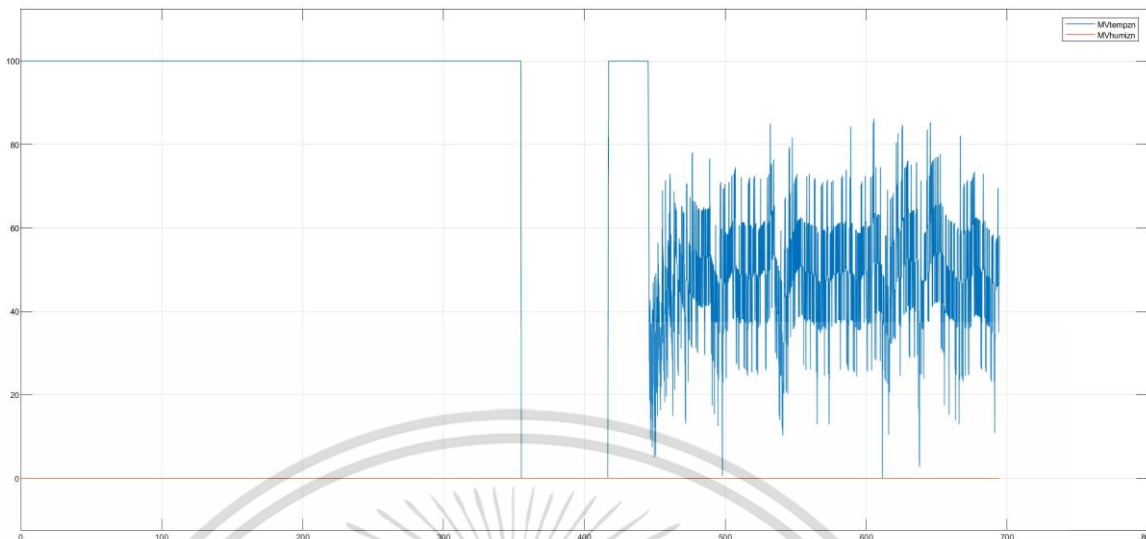
รูปที่ 4.4 โปรแกรม Hardware in the loop เพื่อทดสอบการควบคุมอุณหภูมิ (Ziegler–Nichols method)

ในการทดสอบการควบคุมอุณหภูมิภายในระบบจริงด้วยการควบคุมสัดส่วน-ปริพันธ์ที่ใช้วิธีการปรับค่าของ Ziegler–Nichols ได้มีการตั้งค่าเป้าหมาย (r) ไว้ที่ 35 องศาเซลเซียสเช่นเดียวกับการทดสอบการควบคุมอุณหภูมิภายในระบบจริงด้วยตัวควบคุม PID_n^m ต่อมาทำการ Run in Real Time โปรแกรมที่ได้เขียนไปในข้างต้นแล้ว จึงเปิดดูบล็อก Scope เพื่อตรวจสอบกราฟแสดงผลการควบคุมอุณหภูมิด้วยวิธีการปรับค่าการควบคุมสัดส่วน-ปริพันธ์ของ Ziegler–Nichols ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลการควบคุมอุณหภูมิ(y)ในระบบด้วย PI (Ziegler–Nichols Method)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลการควบคุมอุณหภูมิ(u)ในระบบด้วย PI (Ziegler–Nichols Method)

จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าการควบคุมอุณหภูมิภายในระบบจริงด้วยตัวควบคุม PI (Ziegler–Nichols Method) นั้นค่าตัวแปรกระบวนการ (y) สามารถลู่เข้าสู่ค่าเป้าหมาย (r) ได้ซึ่งมีการเกิด overshoot ขึ้น โดยสามารถคิด overshoot percentage ได้เป็น 7.3428 % และมี Settling time อยู่ที่เวลา 455.72 วินาที โดยสามารถเปรียบเทียบผลในการควบคุมอุณหภูมิในระบบด้วยการควบคุมทั้งสองวิธีได้ดังแสดงในตารางที่ 4.1

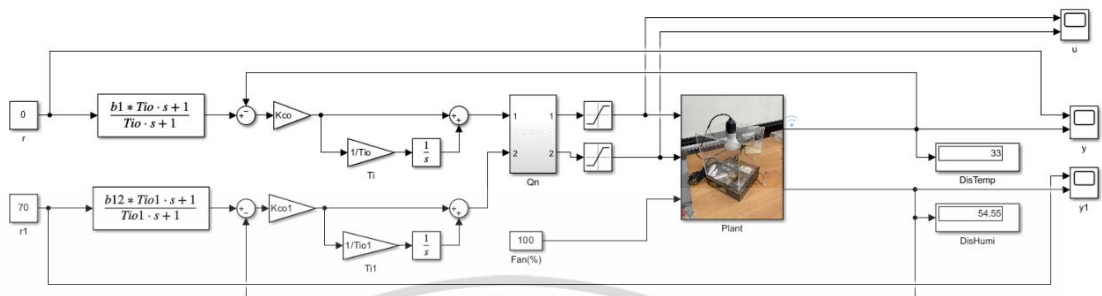
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองการควบคุมอุณหภูมิในระบบ

Tuning method	PID ₄ ⁰ (PID _n ^m tuning method)	PI (Ziegler–Nichols method)
Overshoot percentage	5.028 %	7.3428 %
Settling time	383.64 seconds	455.72 seconds
Kp	589.7733	1155
Ki	34.9955675	130.5059
Tf	0.0104	-

4.3 การทดลองการควบคุมความชื้นภายในระบบด้วย PID_n^m

เมื่อทดลองการควบคุมความชื้นภายในระบบเสร็จ ในส่วนถัดมาจึงเป็นการวิเคราะห์เพื่อหาประสิทธิภาพในการควบคุมความชื้นภายในระบบของตัวควบคุม PID_n^m ในขั้นตอนนี้เริ่มต้นจากการเขียนโปรแกรมบน MATLAB Simulink ซึ่งใช้ Hardware in the loop ในการทดลองร่วมกับระบบ

จริง เหมือนกับการทดลองการควบคุมอุณหภูมิภายในระบบ โดยโปรแกรมดังกล่าวที่เขียนขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 4.7



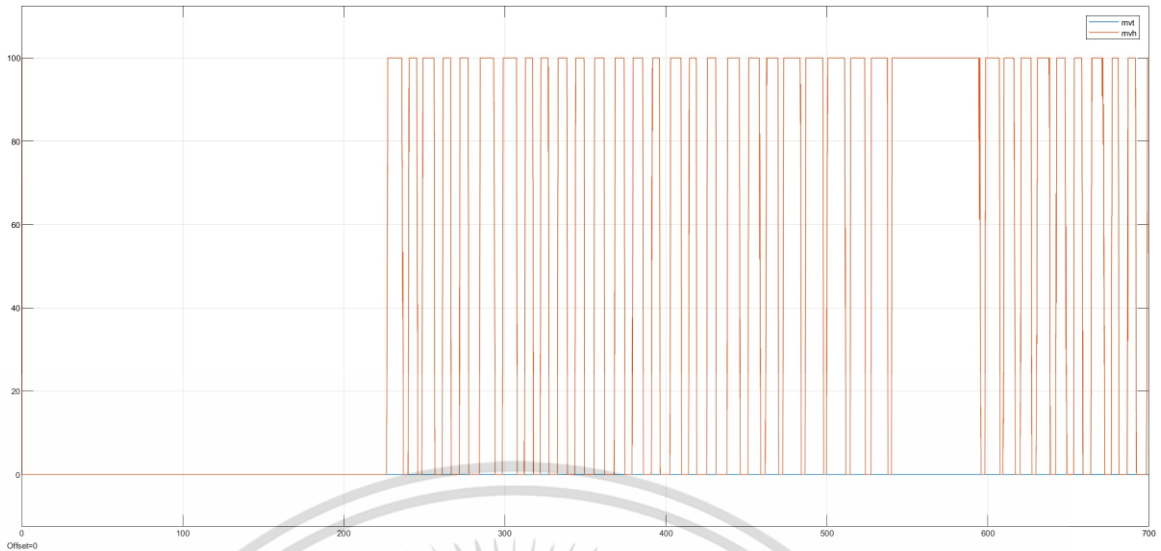
รูปที่ 4.7 โปรแกรม Hardware in the loop เพื่อทดลองการควบคุมความชื้น (PID_n^m)

ในการทดลองเพื่อเก็บผลลัพธ์ และหาประสิทธิภาพในการควบคุมได้มีการตั้งค่าเป้าหมาย (r) ไว้ที่ 70 %RH ต่อมาทำการ Run in Real Time โปรแกรมที่ได้เขียนไปในข้างต้นแล้ว จึงเปิดดูบล็อก Scope เพื่อตรวจสอบกราฟแสดงผลการควบคุมอุณหภูมิด้วย PID_n^m ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงผลการควบคุมความชื้น(y)ในระบบด้วย PID_n^m

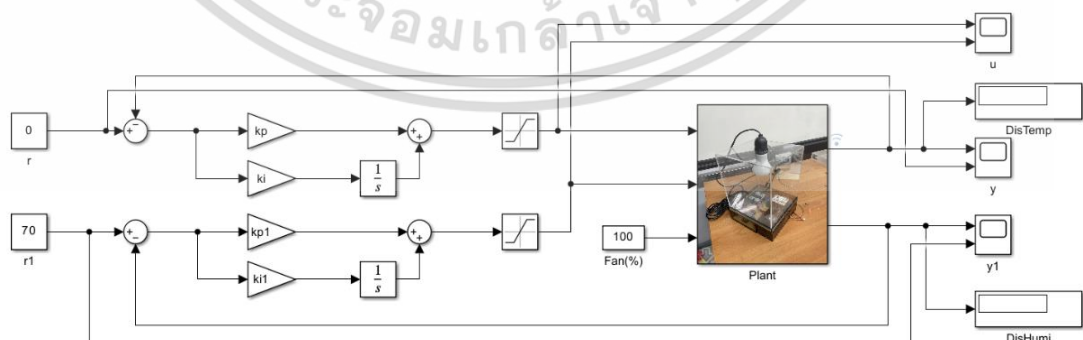
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงผลการควบคุมความชื้น(u)ในระบบด้วย PID_n^m

จากรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าการควบคุมความชื้นภายในระบบจริงด้วยตัวควบคุม PID_n^m นั้นค่าตัวแปรกระบวนการ (y) สามารถเข้าสู่ค่าเป้าหมาย (r) ได้ อีกทั้งยังสามารถเลี่ยงค่าสัญญาณโดยไม่เกิด overshoot ขึ้น และมี Settling time อยู่ที่เวลา 281.64 วินาที

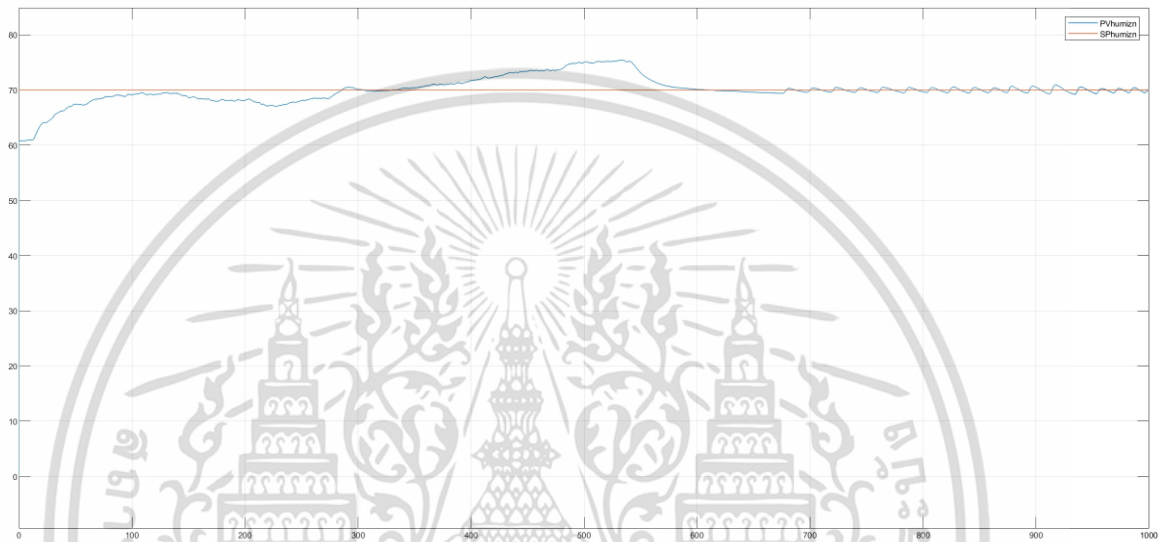
เมื่อทดลองการควบคุมความชื้นภายในระบบจริงด้วยตัวควบคุม PID_n^m เสร็จสิ้นเป็นที่เรียบร้อยแล้วในส่วนถัดมาเป็นการทดลองการควบคุมความชื้นภายในระบบจริงด้วยระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์ที่ใช้วิธีการปรับค่าด้วยวิธีของ Ziegler–Nichols (Ziegler–Nichols method) ซึ่งจะมีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการควบคุมความชื้นภายในระบบจริงระหว่างการควบคุมทั้งสองวิธีในส่วนถัดไป โดยสามารถเขียนโปรแกรมระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์ที่ใช้วิธีการปรับค่าของ Ziegler–Nichols ในรูปแบบ Hardware in the loop บน MATLAB Simulink ดังแสดงในรูปที่ 4.10



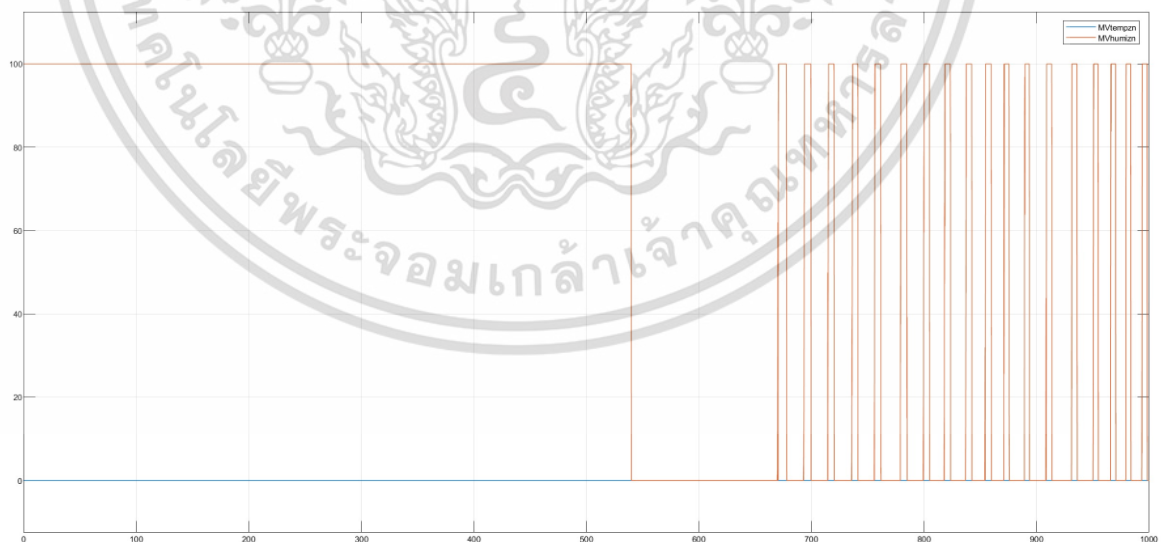
รูปที่ 4.10 โปรแกรม Hardware in the loop เพื่อทดลองการควบคุมความชื้น (Ziegler–Nichols method)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดลองการควบคุมความชื้นภายในระบบจริงด้วยการควบคุมสัดส่วน-ปริพันธ์ที่ใช้วิธีการปรับค่าของ Ziegler–Nichols ได้มีการตั้งค่าเป้าหมาย (r) ไว้ที่ 70 %RH เช่นเดียวกันกับการทดลองการควบคุมอุณหภูมิภายในระบบจริงด้วยตัวควบคุม PID_n^m ต่อมาทำการ Run in Real Time โปรแกรมที่ได้เขียนไปในข้างต้นแล้ว จึงเปิดดูบล็อก Scope เพื่อตรวจดูกราฟแสดงผลการควบคุมความชื้นด้วยวิธีการปรับค่าการควบคุมสัดส่วน-ปริพันธ์ของ Ziegler–Nichols ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงผลการควบคุมความชื้น(y)ในระบบด้วย PI (Ziegler–Nichols Method)



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงผลการควบคุมความชื้น(u)ในระบบด้วย PI (Ziegler–Nichols Method)

จากรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าการควบคุมความชื้นภายในระบบจริงด้วยตัวควบคุม PI (Ziegler–Nichols Method) นั้นค่าตัวแปรกระบวนการ (y) สามารถลู่เข้าสู่ค่าเป้าหมาย (r) ได้ซึ่งมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

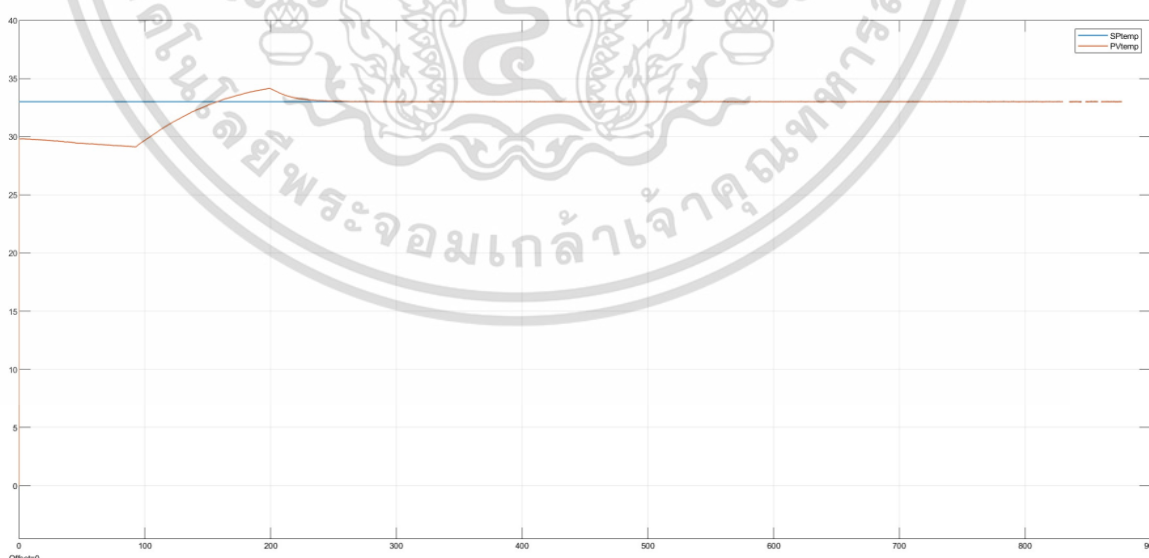
การเกิด overshoot ขึ้นเล็กน้อย โดยสามารถคิด overshoot percentage ได้เป็น 7.3428 % และมีเวลา Settling time อยู่ที่เวลา 597.79 วินาที โดยสามารถเปรียบเทียบผลในการควบคุมอุณหภูมิในระบบด้วยการควบคุมทั้งสองวิธีได้ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองการควบคุมความชื้นในระบบ

Tuning method	PID ₄ ⁰ (PID _n ^m tuning method)	PI (Ziegler–Nichols method)
Overshoot percentage	-	7.3428 %
Settling time	281.64 seconds	597.79 seconds
Kp	1016.6	1997.9
Ki	40.7955248	149.5526
Tf	0.0104	-

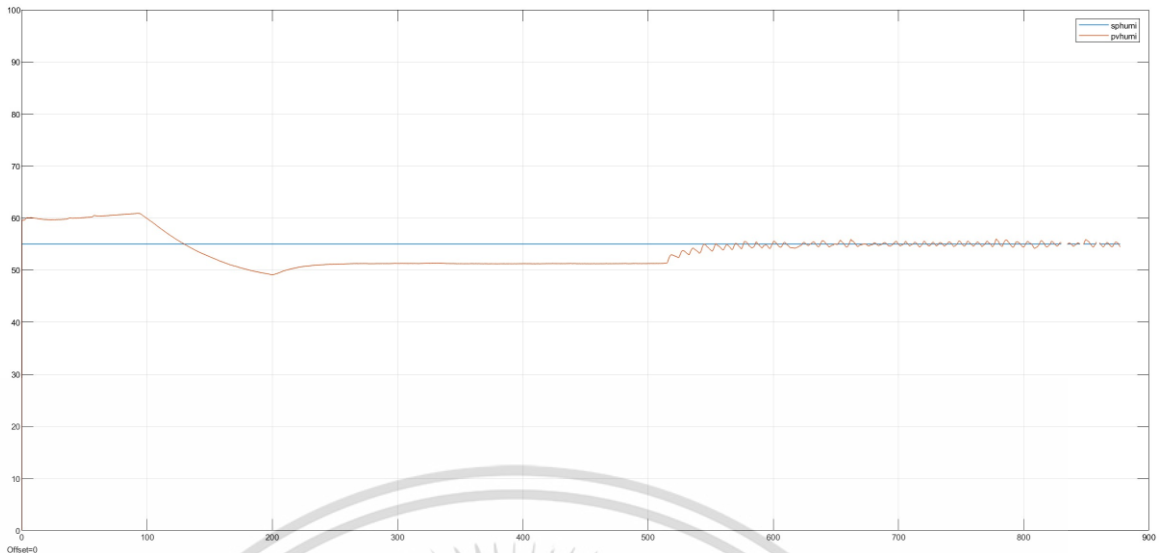
4.4 การทดลองการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นภายในระบบด้วย PID_n^m

เมื่อทดลองการควบคุมอุณหภูมิภายในระบบและความชื้นภายในระบบด้วย PID_n^m เสร็จแล้วในขั้นตอนต่อไปนี้จึงเป็นการทดลองการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นภายในระบบพร้อมกันด้วยการควบคุม PID_n^m โดยมีการตั้งค่าเป้าหมาย (r) ของอุณหภูมิ และความชื้นไว้ที่ 33 องศาเซลเซียส และ 55 %RH ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการทดลองการควบคุมแล้วจึงได้กราฟแสดงผลการควบคุมดังรูปที่ 4.13 - 4.15

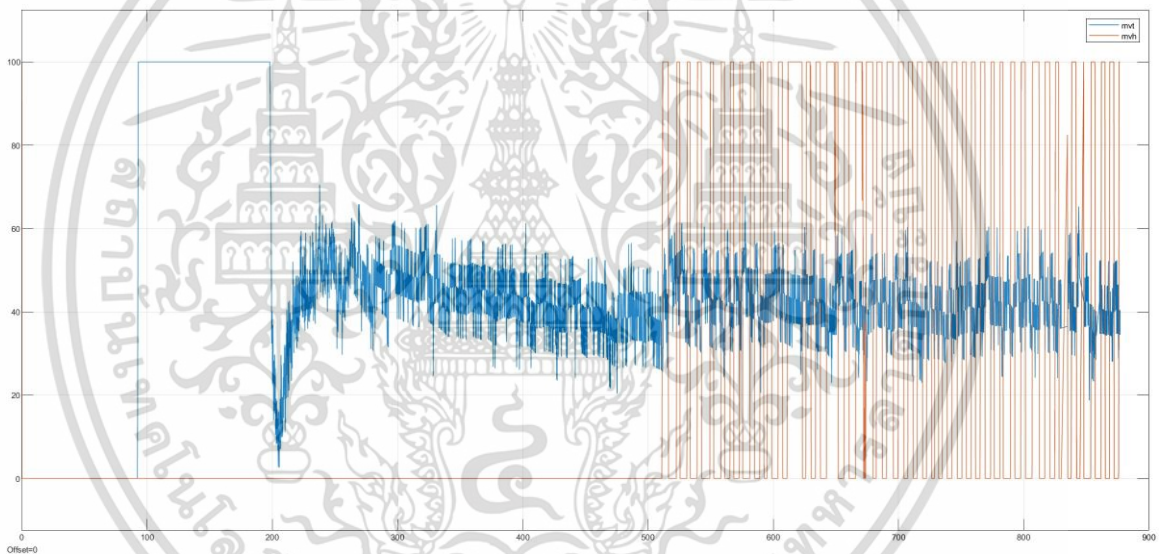


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงผลการควบคุมอุณหภูมิและความชื้น(y temperature)ในระบบด้วย PID_n^m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



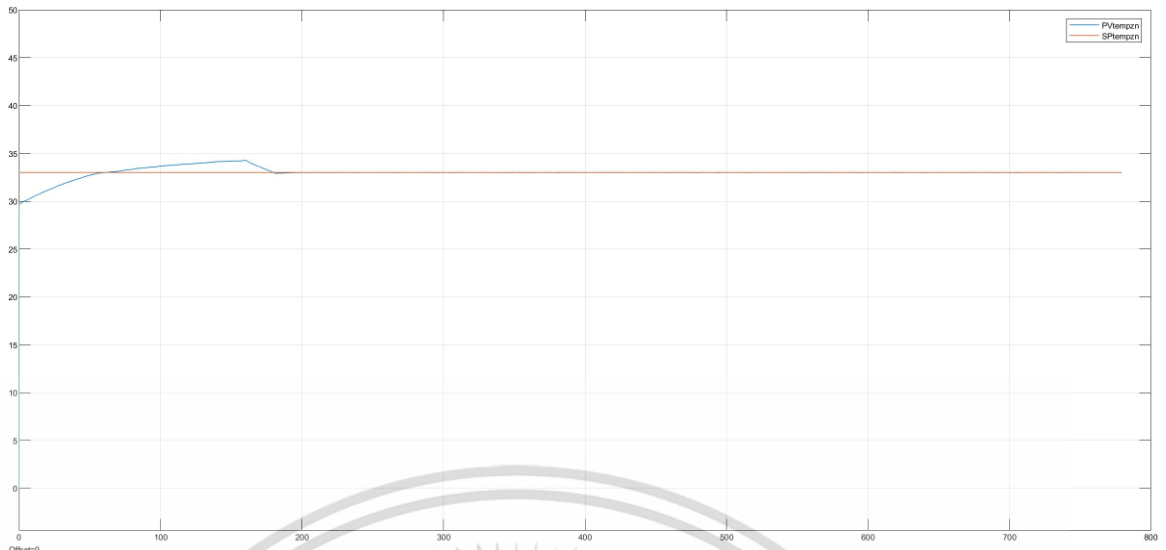
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงผลการควบคุมอุณหภูมิและความชื้น(y humidity)ในระบบด้วย PID_n^m



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงผลการควบคุมอุณหภูมิและความชื้น(u)ในระบบด้วย PID_n^m

เมื่อเสร็จสิ้นการทดลองการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นภายในระบบพร้อมกันด้วย PID_n^m เสร็จแล้วในขั้นตอนต่อไปจึงเป็นการทดลองการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นภายในระบบพร้อมกันด้วยการควบคุม PI (Ziegler–Nichols Method) โดยมีการตั้งค่าเป้าหมาย (r) ของอุณหภูมิ และความชื้นไว้ที่ 33 องศาเซลเซียส และ 55 %RH ตามลำดับ ซึ่งเหมือนกับค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้ใน การทดลองการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นภายในระบบพร้อมกันด้วย PID_n^m เพื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้ เมื่อควบคุมด้วย PI (Ziegler–Nichols Method) แล้วจึงได้กราฟแสดงผลการควบคุมดังรูปที่ 4.16 - 4.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

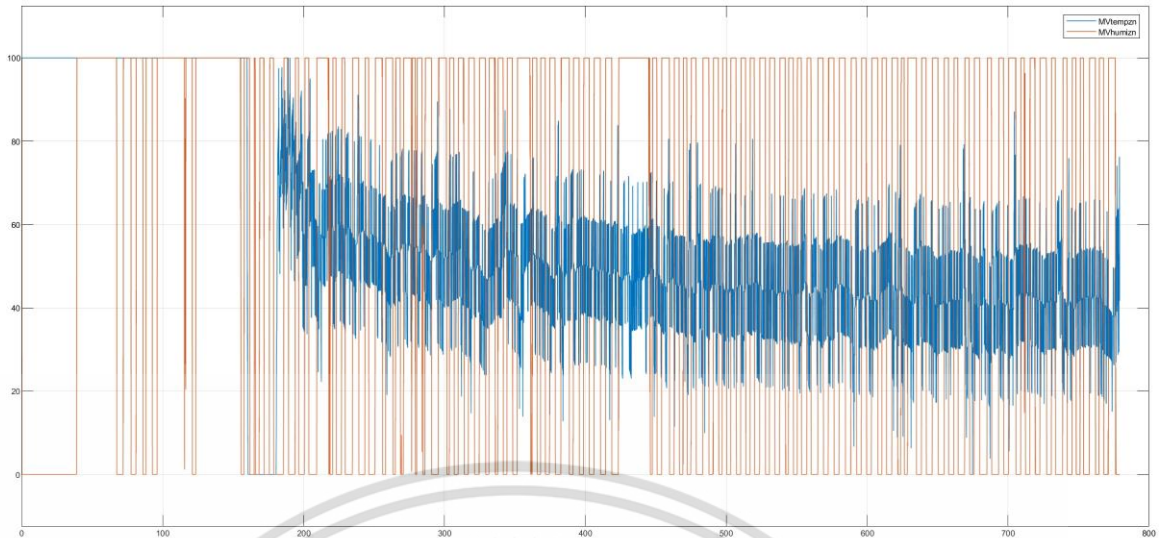


รูปที่ 4.16 กราฟแสดงผลการควบคุมอุณหภูมิและความชื้น(y temperature)ในระบบด้วย PI (Ziegler–Nichols Method)



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงผลการควบคุมอุณหภูมิและความชื้น(y humidity)ในระบบด้วย PI (Ziegler–Nichols Method)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงผลการควบคุมอุณหภูมิและความชื้น(n)ในระบบด้วย PI (Ziegler–Nichols Method)

จากกราฟแสดงผลการควบคุมสามารถเปรียบเทียบผลในการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในระบบพร้อมกันด้วยการควบคุมทั้งสองวิธีได้ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในระบบพร้อมกัน (อุณหภูมิ)

Tuning method	PID ₄ ⁰ (PID _n ^m tuning method)	PI (Ziegler–Nichols method)
Overshoot percentage	3.4545 %	3.818 %
Settling time	227.52 seconds	176.471 seconds
Kp	1016.6	1997.9
Ki	40.7955248	149.5526

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในระบบพร้อมกัน (ความชื้น)

Tuning method	PID ₄ ⁰ (PID _n ^m tuning method)	PI (Ziegler–Nichols method)
Overshoot percentage	- 10.6727 %	- 5.85457 %
Settling time	546.27 seconds	120 seconds
Kp	1016.6	1997.9
Ki	40.7955248	149.5526

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีจุดประสงค์เพื่อออกแบบการควบคุม PID^m สำหรับควบคุมกระบวนการ เพื่อให้สามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นภายในตู้อบต้นไม้ขนาดเล็ก โดยเริ่มต้นจากการออกแบบและประกอบอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องสำหรับใช้ในการควบคุมกระบวนการเข้าด้วยกัน แล้วจึงหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเพื่อจำลองระบบในการหาค่าตัวแปรต่าง ๆ สำหรับการควบคุมระบบด้วย PID^m และทำให้สามารถนำค่าตัวแปรของระบบมาประยุกต์ใช้ในระบบจริงซึ่งเป็นตัวอบต้นไม้ขนาดเล็กได้

ในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจะเก็บข้อมูลจากการเปิดหลอดไฟไส้ พัดลม และเครื่องพ่นหมอก แล้ววัดค่าอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ภายในกระบวนการ ทำให้ได้มาซึ่งค่าตัวแปรที่ใช้สำหรับการควบคุมระบบด้วย PID^m ผลที่ได้สำหรับระบบอุณหภูมิคือค่า Kp มีค่าเท่ากับ 589.7733 ค่า Ki มีค่าเท่ากับ 34.9955675 และค่า Tf มีค่าเท่ากับ 0.0104 ซึ่งในส่วนของผลที่ได้สำหรับระบบความชื้นคือค่า Kp มีค่าเท่ากับ 1016.6 ค่า Ki มีค่าเท่ากับ 40.7955248 และค่า Tf มีค่าเท่ากับ 0.0104

จากผลการทดลองพบว่าในการออกแบบการควบคุม PID^m สำหรับควบคุมระบบอุณหภูมินั้นสามารถทำการควบคุมอุณหภูมิได้ ซึ่งมีการเกิด overshoot ขึ้นเพียงเล็กน้อยในการควบคุม และในส่วนของ การควบคุมระบบความชื้นนั้นก็สามารถทำการควบคุมความชื้นได้เช่นเดียวกัน รวมไปถึงไม่มีการเกิด overshoot ขึ้น แต่เมื่อนำค่าตัวแปรที่ได้ของทั้งสองระบบมาใช้ในการทดลองการควบคุมทั้งอุณหภูมิและความชื้นพร้อม ๆ กัน แล้วจึงพบว่าสามารถทำการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นได้ โดยมี overshoot เกิดขึ้นเล็กน้อย แต่ในส่วนของ การควบคุมความชื้นพร้อมกับควบคุมอุณหภูมิไปด้วยนั้น มีย่านการวัด หรือช่วงของค่าเป้าหมายที่ลดลง โดยสามารถพิจารณาได้ว่าเป็นผลลัพธ์สามารถยอมรับได้

จากการศึกษาพบว่าการออกแบบระบบนี้ยังมีส่วนที่ไม่เหมาะสมเพียงพอในการกำหนดค่าตัวแปรในการควบคุมกระบวนการพร้อมกันทั้งสองระบบ เนื่องจากระบบมีสิ่งรบกวนซึ่งอาจเกิดได้จากทั้งสภาพแวดล้อม ปัจจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งยังไม่เพียงพอในระบบ หรืออาจมีผลที่อุปกรณ์ ทำให้ส่งผลกระทบต่อ การทดลองในการออกแบบการควบคุม PID^m ทั้งสองระบบให้เข้าสู่ค่าเป้าหมาย

5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับแนวทางการพัฒนาต่อไปในอนาคต เนื่องจากการออกแบบการควบคุม PID^m ในการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นพร้อมกันภายในตู้อบต้นไม้ขนาดเล็กที่ได้ทดลองไปนั้น เป็นการออกแบบการ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควบคุม PID^m ของทั้งสองระบบแยกกัน แต่นำมาใช้ในการควบคุมร่วมกัน หากมีความประสงค์ในการพัฒนาต่อยอดจำเป็นต้องมีการออกแบบการควบคุม PID^m เพิ่มเติม รวมไปถึงการออกแบบระบบเพิ่มเติม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมให้ดียิ่งขึ้น และได้มาซึ่งผลลัพธ์ที่ตอบสนองตรงต่อความต้องการมากยิ่งขึ้น

ในส่วนของการพัฒนาโปรแกรมบน Visual Studio Code ให้สามารถทำการแสดงผล หรือเก็บข้อมูล IoT platform ได้นั้น จำเป็นต้องมีการศึกษาค้นคว้าในส่วนของ Library เพิ่มเติม เพื่อให้สามารถทำการแสดงผล และเก็บข้อมูลบน IoT platform โดยไม่ขัดการแสดงผลบน Graphical User Interface บนจอของ WIO เทอร์มินัล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] Close, C.M., Frederick, D.K., and Newell, J.C., “Modeling and Analysis of Dynamic Systems”, Wiley, 2001.
- [2] Cannon and R.H., “Dynamics of Physical Systems”, McGraw-Hill, 1967.
- [3] Kiam Heong Ang, Gregory Chong, and Yun Li, “PID Control System Analysis, Design, and Technology”, Glasgow, Glasgow ePrints Service, 2007
- [4] Ljung, Lennart, and Torkel Glad, “Modeling of Dynamic Systems”, Prentice Hall Information and System Sciences Series, Englewood Cliffs, NJ: PTR Prentice Hall, 1994.
- [5] Ljung, Lennart, “System Identification: Theory for the User. Second edition”, Prentice Hall Information and System Sciences Series, Upper Saddle River, NJ: PTR Prentice Hall, 1999.
- [6] Ogata, K., “System Dynamics”, Prentice-Hall, 2004.
- [7] P. Bisták and M. Huba, "Analysis of Higher Derivative Degree PID Controllers via Virtual Laboratory," 2019 27th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), 2019, pp. 256-261, doi: 10.1109/MED.2019.8798527.
- [8] Robert W. Wood, “Note on the Theory of the Greenhouse”, Philos. Mag, 1909
- [9] Stephen H. Schneider, “in Geosphere-biosphere Interactions and Climate”, Lennart O. Bengtsson and Claus U. Hammer, eds., Cambridge University Press, ISBN 0-521-78238-4, pp. 90-91, 2001
- [10] “Control System”, 2559. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา : http://www.intech.crru.ac.th/research_ind/doc/52_dissemin_%E0%B8%95%E0%B8%B3%E0%B8%A3%E0%B8%B2%20%E0%B8%9C%E0%B8%A8%20%E0%B8%A7%E0%B8%B4%E0%B8%A0%E0%B8%9E.Pdf (20 สิงหาคม 2565)
- [12] “First Order Plus Dead Time (FOPDT)”, 2017. [Online] Available : <https://apmonitor.com/pdc/index.php/Main/FirstOrderSystems> (4 กันยายน 2565)
- [13] “Get Started with Wio Terminal”, 2020. [Online] Available : <https://wiki.seeedstudio.com/Wio-Terminal-Getting-Started/> (Feb 10, 2022)

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [14] “GUI คืออะไร”, 2560. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา : <https://www.mindphp.com/%E0%B8%84%E0%B8%B9%E0%B9%88%E0%B8%A1%E0%B8%B7%E0%B8%AD/73-%E0%B8%84%E0%B8%B7%E0%B8%AD%E0%B8%AD%E0%B8%B0%E0%B9%84%E0%B8%A3/2079-gui%E0%B8%84%E0%B8%B7%E0%B8%AD%E0%B8%AD%E0%B8%B0%E0%B9%84%E0%B8%A3.html> (18 สิงหาคม 2565)
- [15] “How to Avoid Common Tuning Mistakes with PID Controllers”, 2010 [Online] Available : <https://blog.isa.org/avoid-common-tuning-mistakes-pid> (Sep 24, 2022)
- [16] “System Identification Overview”, 1994. [Online] Available : <https://www.mathworks.com/help/ident/gs/about-system-identification.html> (Oct 15, 2022)
- [17] “What Is A Temperature Control System?”, 2014. [Online] Available : <https://www.west-cs.com/news/what-is-a-temperature-control-system/> (6 กันยายน 2565)
- [18] “การควบคุมความชื้นโดยการปรับอัตราการไหลของอากาศสำหรับเครื่องปรับอากาศแบบอินเวอร์เตอร์”, 2554 [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา : <https://www.thaiscience.info/journals/Article/NUJ/10896651.pdf> (24 ตุลาคม 2565)
- [19] “พฤติกรรมใหม่ เมื่อการ “ปลุกต้นไม้” กลายเป็นกิจกรรมยอดฮิตช่วง WFH”, 2563 [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา : https://www.marketingoops.com/reports/plants-work-from-home/?fbclid=IwAR1Y_s9TMY64yyGjgz77Ez6EvctbRXJ0jsLw10djGJDtTngSzXG6xr7mNls (10 กุมภาพันธ์ 2565)
- [20] “รู้ไว้ก่อนใช้งาน High Pass และ Low Pass Filter”, 2565 [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา : https://www.proplugin.com/proplugin_th/article/post/hpf-and-lpf-filter-article

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [21] “รู้หรือไม่ว่า ความชื้นในดินมีความสำคัญกับพืชมาก”, 2563 [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา : <https://www.spsmartplants.com/blog/detail/%E0%B8%A3%E0%B8%B9%E0%B9%89%E0%B8%AB%E0%B8%A3%E0%B8%B7%E0%B8%AD%E0%B9%84%E0%B8%A1%E0%B9%88-%E0%B8%84%E0%B8%A7%E0%B8%B2%E0%B8%A1%E0%B8%8A%E0%B8%B7%E0%B9%89%E0%B8%99%E0%B9%83%E0%B8%99%E0%B8%9%E0%B8%B4%E0%B8%99%E0%B8%A1%E0%B8%B5%E0%B8%84%E0%B8%A7%E0%B8%B2%E0%B8%A1%E0%B8%AA%E0%B8%B3%E0%B8%84%E0%B8%B1%E0%B8%8D%E0%B8%81%E0%B8%B1%E0%B8%9A%E0%B8%9E%E0%B8%B7%E0%B8%8A%E0%B8%A1%E0%B8%B2%E0%B8%81/5#:~:text=3.%E0%B8%84%E0%B8%A7%E0%B8%B2%E0%B8%A1%E0%B8%8A%E0%B8%B7%E0%B9%89%E0%B8%99%2050%25%20-69,%E0%B9%81%E0%B8%A5%E0%B8%B0%E0%B9%80%E0%B8%AB%E0%B8%B5%E0%B9%88%E0%B8%A2%E0%B8%A7%E0%B9%80%E0%B8%89%E0%B8%B2%E0%B8%95%E0%B8%B2%E0%B8%A2%E0%B9%84%E0%B8%94%E0%B9%89> (14 สิงหาคม 2565)
- [22] “อุณหภูมิที่เหมาะสมกับการปลูกพืช”, 2562 [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา : <https://legatool.com/wp/10911/> (10 กุมภาพันธ์ 2565)
- [23] “อบต้นไม้ อบต้นไม้อินทรีย์ พลาสติก แบบนี้รอดแน่นอน !”, 2564. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา : <https://www.naena.com/agriculture/1234345567?fbclid=IwAR2WrMBoD93PfeQIC0SKfAZllQuYxg2cS5Mj1qDSqlfJzYRluAwSnpPiuBM> (10 กุมภาพันธ์ 2565)



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก
คู่มือการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

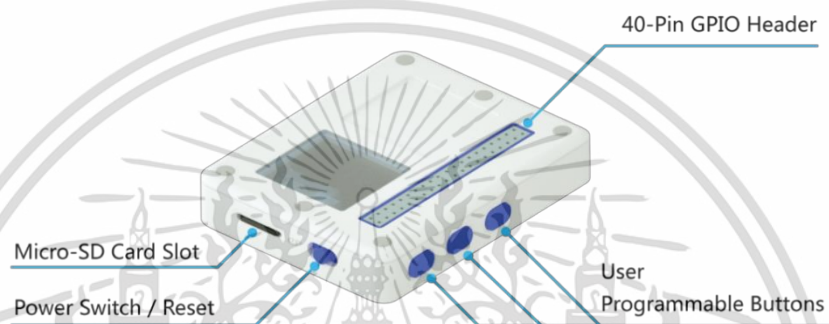
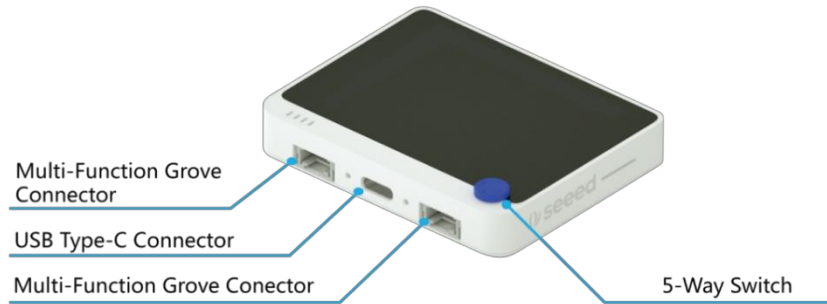


รูปที่ ก.1 คู่มือการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

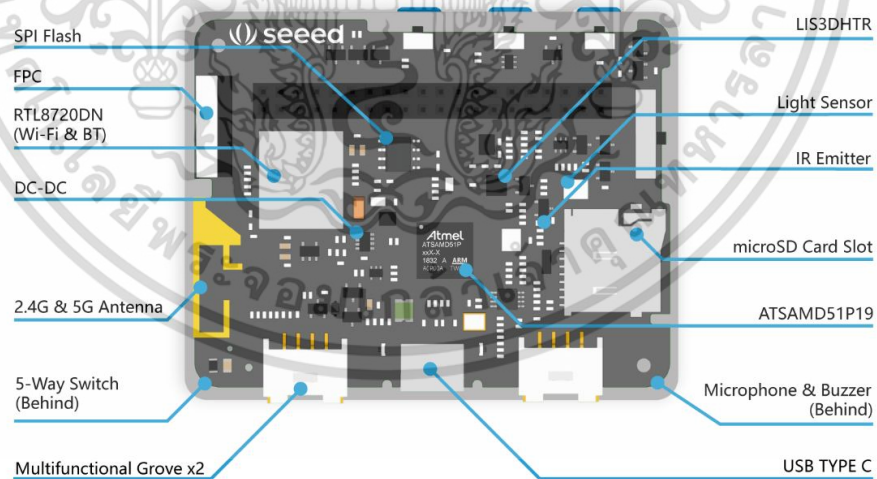


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.1 ภาพรวมของฮาร์ดแวร์ WIO เทอร์มินัล (1)

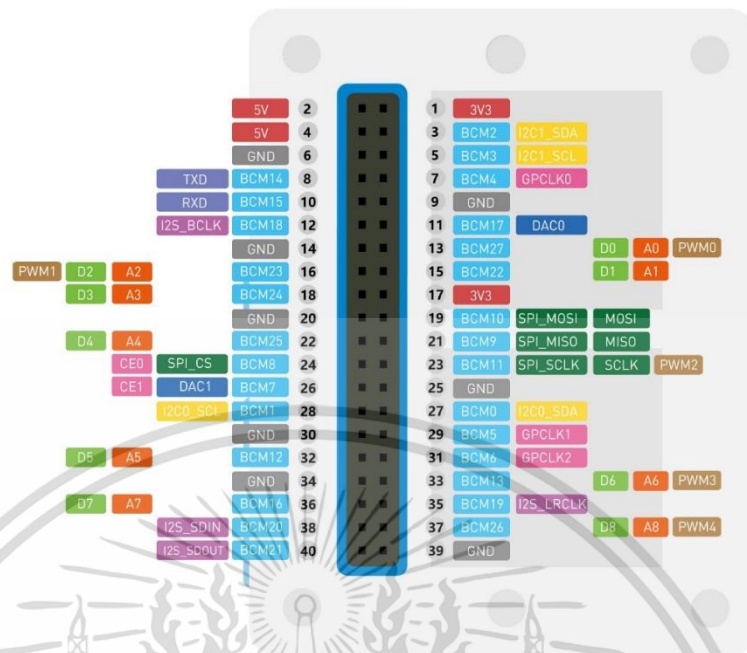
ที่มา : <https://wiki.seeedstudio.com/Wio-Terminal-Getting-Started/>



รูปที่ ข.2 ภาพรวมของฮาร์ดแวร์ WIO เทอร์มินัล (2)

ที่มา : <https://wiki.seeedstudio.com/Wio-Terminal-Getting-Started/>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.3 ภาพรวมขาเอาต์พุตของ WIO เทอร์มินัล

ที่มา : <https://wiki.seeedstudio.com/Wio-Terminal-Getting-Started/>

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลจำเพาะของ WIO เทอร์มินัล

Main Chip	Manufacturer Part Number	ATSAMD51P19
	Core Processor	ARM® Cortex®-M4F running at 120MHz
	Memory	4 MB External Flash, 192 KB RAM
	Maximum Speed	200MHz
	External Flash	4MBytes
	Operating Temperature	-40°C ~ 85°C (TA)
LCD Screen	Resolution	320x240

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	Display Size	2.4inch
	Drive IC	ILI9341
Wireless Connectivity	Manufacturer Part Number	RTL8720DN
	KM4 CPU	ARM® Cortex®-M4F @ 200MHz
	KM0 CPU	ARM® Cortex®-M0
	Wi-Fi	802.11 a/b/g/n 1x1, Dual Band 2.4GHz & 5GHz
	Bluetooth	Support BLE5.0
Built-in Modules	Accelerometer	LIS3DHTR
	Microphone	1.0V-10V -42dB
	Speaker	≥78dB @10cm 4000Hz
	Light Sensor	400-1050nm
	Infrared Emitter	940nm
	MicroSD Card Slot	Maximum 16GB
Interface	GPIO	40-PIN (Raspberry Pi Compatible)
	Supported Protocol	SPI, I2C, I2S, ADC, DAC, PWM, UART(Serial)
	Grove	2 (Multifunction), for Digital, Analog, I2C, and PWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	FPC	20-Pins
	USB Type-C	Power & USB-OTG
Operation Interface	5-Way Switch	
	Power/Reset Switch	
	User-defined button *3	
Enclosure	Mounting	Built-in magnets and two mounting holes
	Dimension	72mm*57mm*12mm
	Materials	ABS+PC
Software Support	Arduino	
	MicroPython	
	ArduPy	
	AT Firmware	
	Visual Studio Code	
	CircuitPython	

ที่มา : <https://wiki.seeedstudio.com/Wio-Terminal-Getting-Started/>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AHT20 Product manuals

ASAIR®

Temperature and Humidity sensor

- Full calibration
- Digital output, I²C interface
- Excellent long-term stability
- SMD package suitable for reflow soldering
- Quick response and strong anti-jamming capability



Product Overview

AHT20, as a new generation of temperature and humidity sensors, has established a new standard in size and intelligence. It is embedded in a double row flat no-lead package suitable for reflow soldering, with a bottom of 3 x 3 mm and a height of 1.0 mm. The sensor outputs calibrated digital signals in standard I²C format. AHT20 is equipped with a newly designed ASIC chip, an improved MEMS semiconductor capacitive humidity sensing element and a standard on-chip temperature sensing element.

As a result, the performance of the new generation of temperature and humidity sensors has greatly improved or even exceeded that of the previous ones with more stability in harsh environments. Each sensor is calibrated and tested, with product batch number printed on the surface of the product. Due to the improvement and miniaturization of the sensor, its cost-effective ratio is higher, and finally all equipment will benefit from the cutting-edge energy-saving operation mode.

Application Scope

HVAC system, dehumidifier, test and inspection equipment, consumer goods, automobiles, automatic control, data recorder, weather station, household appliances, humidity regulation, medical and other related temperature and humidity detection and control.

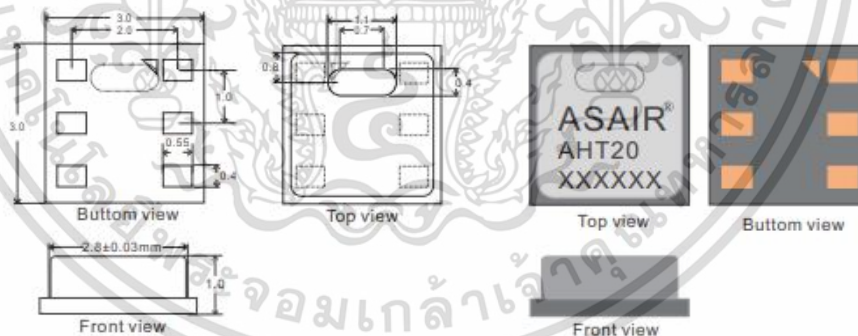


Figure 1: AHT20 Sensor Package Diagram (Unit: mm Tolerance: ±0.1 mm)

รูปที่ ข.4 ข้อมูลจำเพาะ AHT20 I2C (1)

ที่มา : https://files.seeedstudio.com/wiki/Grove-AHT20_I2C_Industrial_Grade_Temperature_and_Humidity_Sensor/AHT20-datasheet-2020-4-16.pdf

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sensor Performance

Relative Humidity

Parameter	Condition	Min	Typical	Max	Unit
resolution ratio	Typical		0.024		%RH
accuracy error ¹	Typical		±2		%RH
	Max	Figure 2			%RH
Repeatability			±0.1		%RH
Hysteresis			±1		%RH
Nonlinear			<0.1		%RH
Response time ²	t 63%		8		S
Scope of work	extended ³	0		100	%RH
Long time drift ⁴	Normal		<0.5		%RH/yr

Table 1 Humidity Characteristic

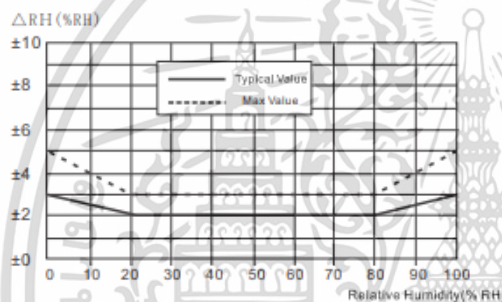


Figure 2 The maximum error of relative humidity at 25°C

Temperature

Parameter	Condition	Min	Typical	Max	Unit
resolution ratio	Typical		0.01		°C
accuracy error ¹	Typical		±0.3		°C
	Max	Figure 3			°C
Repeatability			±0.1		°C
Hysteresis			±0.1		°C
Response time ²	t 63%	5		30	S
Scope of work	extended ³	-40		85	°C
Long time drift ⁴			<0.04		°C/yr

Table 3 Temperature Characteristic

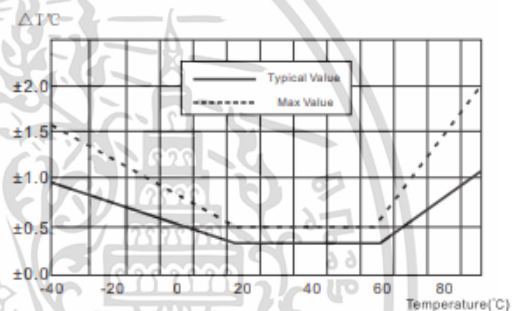


Figure 3 Typical error and maximum error of temperature

Electric Specification

Parameter	Condition	Min	Typical	Max	Unit
Voltage	Typical	2.0	3.3	5.5	V
Current, I _{DD} ¹	Dormant	-		0.25	μA
	Measure		23		μA
Power consumption ¹	Dormant	-		0.9	μW
	Measure		0.07		mW
	Average	-	3.3	-	μW
Communication	Two-line digital interface, standard I ² C protocol				

Table 2 Electric Specification

Package Information

Sensor Model	Package	Quantity
AHT20	Tape package	5000PCS/Roll(MAX)

Table 4 Package

¹This precision is the best precision of the sensor with 3.3V voltage at 25°C excluding hysteresis and nonlinearity, and only suitable for non-condensation conditions.

²The time required to reach 63% of the first-order response under the conditions of 25°C and 1 m/s air flow.

³Normal working scope: 0-90% RH. Sensor reading will be deviated if beyond this range, (drift < 3% RH after 200 hours at 90% RH humidity). The working scope is further limited to -40-80°C.

⁴If the sensor is surrounded by volatile solvents, irritating tapes, adhesives and packaging materials, the reading may be higher. For more information, please refer to the relevant documents.

⁵The minimum and maximum of supply current and power consumption are based on the conditions of VDD = 3.3 V and T < 60 °C. The average value is value measured every two seconds.

⁶The response time depends on the thermal conductivity of the sensor substrate.

รูปที่ ข.5 ข้อมูลจำเพาะ AHT20 I2C (2)

ที่มา : https://files.seeedstudio.com/wiki/Grove-AHT20_I2C_Industrial_Grade_Temperature_and_Humidity_Sensor/AHT20-datasheet-2020-4-16.pdf

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AHT20 User Guide

1 Expansion of performance

1.1 Working Conditions

The sensor performance is stable in the suggested working scope, as shown in Figure 4. Long-term exposure to abnormal scope, especially when humidity > 80%, may lead to temporary signal drift (drift + 3% RH after 60 hours). When the sensor is restored to normal working conditions, it will slowly restore itself to the correct state. Refer to Recovery Processing in Section 2.3 to speed up the recovery process. Long-term use under abnormal conditions will accelerate the aging of products.

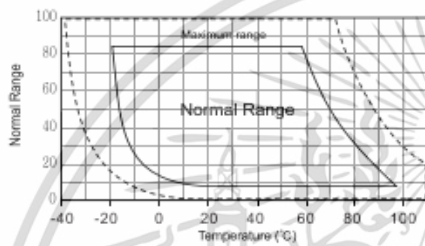


Figure 4 Working Conditions

1.2 RH Accuracy at Different Temperatures

The RH accuracy at 25°C is defined in Fig. 2, and the maximum humidity error at other temperatures is shown in Fig. 5.

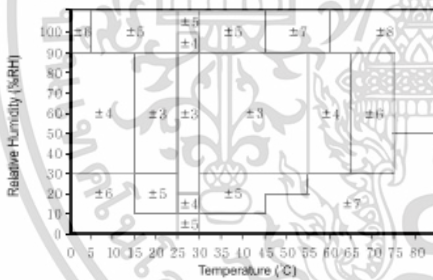


Figure 5 Maximum humidity error between 0-80 °C, unit: (% RH)

Note: Above errors are the tested maximum errors (excluding hysteresis) with the high precision dew-point instrument as reference instrument. The typical error is ± 2 % RH with the range of maximum error. In other scopes, the typical error is 1/2 of the maximum error.

1.3 Electric Specification

The power consumption given in Table 1 is related to temperature and supply voltage VDD. Estimated power consumption, see Figures 6 and 7. Note that the curves in Figures 6 and 7 are typical natural characteristics and may have deviations.

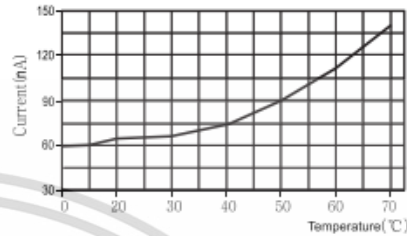


Figure 6 When VDD = 3.3V, the typical relationship between supply current and temperature (dormancy mode). Please note that there is a deviation of about ± 25% with the display value.

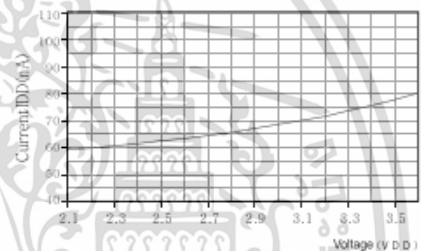


Figure 7 shows the typical relationship between supply current and voltage (dormancy mode) at 25 °C. Please be noted that the deviation between these data and the display value may reach ± 50 % of the display value. At 60 °C, the coefficient is about 16. (Compared with Table 2).

รูปที่ ข.6 ข้อมูลจำเพาะ AHT20 I2C (3)

ที่มา : https://files.seeedstudio.com/wiki/Grove-AHT20_I2C_Industrial_Grade_Temperature_and_Humidity_Sensor/AHT20-datasheet-2020-4-16.pdf

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2 Application Information

2.1 Welding Specification

The I/O pads of SMD are made of copper pin frame planar substrates, which are exposed to the outside for mechanical and electrical connections. When used, I/O pads and bare pads need to be welded on PCB. In order to prevent oxidation and optimize welding, the welding joints at the bottom of the sensor are plated with Ni/Au. On PCB, the length of I/O contact surface should be 0.2 mm longer than that of the I/O package pad of AHT20. The inner part should match the shape of the I/O package pad. The ratio of pin width to SMD package pad width is 1:1. See figure 8.

For screen and solder layer design, it is suggested to use copper foil definition solder (SMD) with the solder layer opening larger than the metal solder plate.

For SMD pads, if the gap between the copper foil pad and the soldering layer is 60m-75m, the opening size of the soldering layer shall be greater than the size of the soldering plate (120 m-150 m).

The circular part of the sealing pad shall match the corresponding circular solder layer opening to ensure that there is enough solder layer area (especially at the corner) to prevent solder from joining.

Each pad shall have its own soldering layer opening, forming a soldering layer network around the adjacent pads.

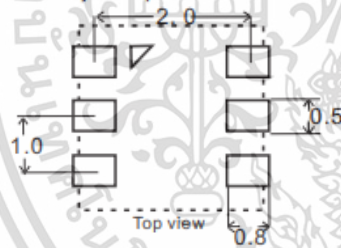


Figure 8 Recommended design size of AHT20 PCB (mm) and the outer part with dotted line is the outer dimension of SMD package.

For solder printing, laser cutting stainless steel mesh with electronic polishing trapezoidal wall is recommended, with recommended thickness of 0.125 mm. The steel mesh size of the pad should be 0.1 mm longer than PCB pad and placed 0.1 mm away from the packaging center. Steel mesh with bare pads must cover 70% - 90% of the pad area - that is, the central position of the heat dissipation area reaches 1.4 mm x 2.3 mm.

*Contact surface refers to the metal layer on PCB where SMD pads are welded.
 **The solder mask layer refers to the insulating layer covering the connecting line at the top of the PCB.

Due to the low SMD mounting, it is recommended to use no-cleaning type 3 solders fin and to purify it with nitrogen during reflux.

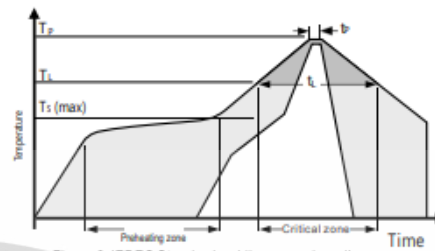


Figure 9 JEDEC Standard welding procedure diagram.
 T_p < 260°C, t_p < 30 sec, lead-free welding, T_L < 220°C,
 t_L < 150 sec; The rate of temperature rise and fall during welding shall be < 5°C/sec.

AHT20 can be welded through standard reflow furnace. The sensor fully meets the IPC/JEDEC J-STD-020D welding standard. The contact time should be less than 30 seconds at the highest 260°C (see Fig. 9) and the ultimate welding temperature that the sensor can withstand is 260°C, so it is recommended to use low temperature 180°C when reflow soldering.

Note: After reflow welding, the sensor should be stored in the environment of > 75% RH for at least 12 hours to ensure the re-hydration of the polymer. Otherwise, it will cause sensor reading drift. The sensor can also be placed in a natural environment (> 40% RH) for more than five days to re-hydrate. Hydration time can be reduced by using low temperature reflow welding (e.g. 180°C).

Don't wash the circuit boards is allowed after welding. Therefore, it is suggested that customers use "wash-free" solder paste. If the sensor is applied to corrosive gases, condensate water may be produced (e.g. in high humidity environment), both pin pads and PCB need to be sealed (e.g. using conformal coating) to avoid poor contact or short circuit.

2.2 Storage conditions and instructions

The humidity sensitivity level (MSL) is 1, according to IPC/JEDEC J-STD-020 standard. Therefore, it is recommended to use it within one year after delivery.

Humidity sensor is not an ordinary electronic component, and it needs careful protection, which users must pay attention to. Long-term exposure to high concentration of chemical vapor will cause the sensor reading to drift.

*The type of solder is related to the size of particles in solder. Type 3 powder in size range of 25-45 μm.

รูปที่ ข.7 ข้อมูลจำเพาะ AHT20 I2C (4)

ที่มา : https://files.seeedstudio.com/wiki/Grove-AHT20_I2C_Industrial_Grade_Temperature_and_Humidity_Sensor/AHT20-datasheet-2020-4-16.pdf

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Therefore, it is recommended that the sensor be stored in the original package including sealed ESD bag, and meet the following conditions: temperature range 10~50°C (0~85°C in a limited time), humidity 20~60% RH(no ESD packaged sensor). For sensors that they be stored in antistatic bags made of metal PET/AL/CPE.

During production and transportation, sensors should avoid exposure to high concentration of chemical solvents and prolonged exposure. Avoid exposure to volatile glue, adhesive tape, stickers or volatile packaging materials, such as foamed foil, foam material, etc. The production area should be well ventilated.

2.3 Recovery processing

As mentioned above, if the sensor is exposed to extreme working conditions or chemical vapor, the reading will drift. It can be restored to the calibration state by processing as follows. Drying: Keep for 10 hours at 80~85°C with the humidity of more than 75% RH.

Rehydration: Keep for 12 hours at 20~30°C with the humidity of more than 75% RH.

2.4 Temperature influence

The relative humidity of gases depends largely on temperature. Therefore, when measuring humidity, all sensors measuring the same humidity should work at the same temperature as possible. When testing, it is necessary to ensure that the same temperature, and then compare the humidity readings.

If the sensor and the heating-prone electronic components are placed on the same printing circuit board, measures should be taken to minimize the effect of heat transfer as far as possible in the design of the circuit.

For example, to maintain good ventilation of the shell, the copper coating of AHT20 and other parts of the printed circuit board should be as smallest as possible, or leave a gap between them. (See Fig. 10)



Figure 10 AHT20 top view of printing circuit board. The design of milling slit can minimize heat transfer.

Moreover, when the measurement frequency is too high, the temperature of the sensor itself will rise, which will affect the measurement accuracy. In order to make its temperature rise below 0.1, the activation time of AHT20 should not exceed 10% of the measurement time - it is recommended to measure data every 2 seconds.

*75% RH can be easily generated from saturated NaCl.

2.5 Product application scenario design

In product design, the sensor has following characteristics:

- 1) Sensor is in full contact with the outside air

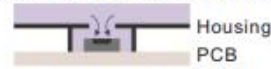


Figure 10: Suitable windows on the enclosure provide good access to environmental measurements and allow for greater air exchange.

- 2) The sensor is completely isolated from the air inside the housing

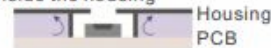


Figure 12: The sensor is isolated from the air inside the housing, which minimizes the impact of the air inside the housing on the sensor.

- 3) Small measurement dead zone around the sensor



Figure 13: Small measurement dead zone helps the sensor to quickly and comprehensively detect environmental changes.

- 4) The sensor is isolated from the heat



Figure 14: The sensor is isolated from the internal heat source to minimize the effect of internal heat on sensor.

- 5) The sensor power supply can be controlled

In order to improve the stability of the system, the following two solutions for controlling power supply are provided:



Figure 15-1 Typical application circuit ①, the pull-up voltage and VDD of SCL and SDA are powered by the MCU.

Note: 1. The host MCU supplies AHT20 with a voltage range of 2.0 ~ 5.5V.

2. When the AHT20 is just powered on, the MCU gives priority to the VDD power supply, which can be set after 5ms SCL and SDA are high.

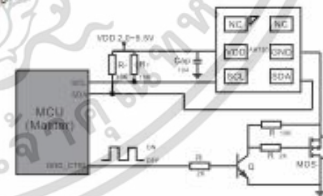


Figure 15-2 Typical application circuit ②, AHT20 operation is controlled by whether GND is grounded.

Note: The user can indirectly control the GND and ground by controlling the switch module composed of transistors, so that the AHT20 is powered off.

รูปที่ ข.8 ข้อมูลจำเพาะ AHT20 I2C (5)

ที่มา : https://files.seeedstudio.com/wiki/Grove-AHT20_I2C_Industrial_Grade_Temperature_and_Humidity_Sensor/AHT20-datasheet-2020-4-16.pdf

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 Material used for sealing and encapsulation 3.2 Serial clock SCL

Many materials absorb moisture and act as buffer, which will increase response time and hysteresis. Therefore, the material around the sensor should be carefully selected. Recommended materials are: Metal materials, LCP, POM (Delrin), PTFE (Teflon), PE, PEEK, PP, PB, PPS, PSU, PVDF, and PVF. Material for sealing and bonding (conservative recommendation): It is recommended to use method of filling epoxy resin or silicone resin for packaging electronic components. Gases released from these materials may also contaminate AHT20 (see 2.2). Therefore, the sensor should be finally assembled and placed in a well-ventilated place, or dried for 24 hours in an environment of > 50°C, in order to release the contaminated gas before packaging.

2.7 Wiring rules and signal integrity

If the SCL and SDA signal lines are parallel and very close to each other, it may cause signal crosstalk and communication failure. The solution is to place VDD and / or GND between the two signal lines, separate the signal lines, and use shielded cables. In addition, reducing the SCL frequency may also improve the integrity of signal transmission. A 100nF decoupling capacitor must be added between the power supply pins (VDD, GND) for filtering. This capacitor should be as close as possible to the sensor. See the next chapter.

SCL is used to synchronize the communication between microprocessor and AHT20. Because the interface contains complete static logic, there is no minimum SCL frequency.

3.3 Serial data SDA

SDA pins are used for data input and output of sensors. When sending commands to sensors, SDA is valid at the rising edge of serial clock (SCL), and SDA must remain stable when SCL is high level. After the descending edge of SCL, the SDA value can be changed. To ensure communication safety, the effective time of SDA should be extended to TSU and THO respectively before SCL rising edge and after SCL falling edge-refer to Fig 17. When the data is read from the sensor, SDA is valid (TV) after the SCL decreases and maintains the descent edge of the next SCL.

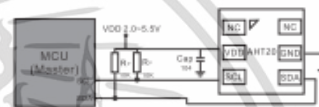


Figure 15 Typical application circuit

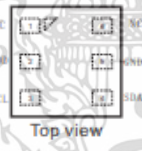
- Note: 1. The pull-up voltage of SCL and SDA must be powered by VDD, and the power supply voltage range is 2.0 ~ 5.5V;
- 2. Add 100nF decoupling capacitor between VDD and GND;
- 3. AHT20 can share I2C bus with other I2C devices.

To avoid signal collision, MCU must only drive SDA and SCL at low levels. An external pull-up resistor (e.g. 10kΩ) is needed to lift the signal to a high level. The pull-up resistance may have been included in the MCU's I/O circuit. Detailed information about sensor input/output characteristics can be obtained by referring to tables 7 and 8.

3 Interface Definition

Pin	Name	Definition
1	NC	Remain suspended
2	VDD	Power supply voltage
3	SCL	Serial clock
4	SDA	Serial data, bidirectional
5	GND	Power ground
6	NC	Remain suspended

Table 5 AHT20 Distribution of pins (Top View)



4 Electric Specification

4.1 Absolute Maximum Rating

The electric specifications of AHT20 are defined in Table 2. The absolute maximum ratings given in Table 6 are only stress ratings and to provide more information. Under such conditions, it is not advisable for the device to perform functional operation. Exposure to absolute maximum rating or a long time may affect the reliability of the sensor.

Parameters	Min	Max	Unit
VDD to GND	-0.3	5.5	V
Digital I/O pin (SDA, SCL) to GND	-0.3	VDD + 0.3	V
Input current for each pin	-10	10	mA

Table 6 Absolute maximum electric rating

รูปที่ ข.9 ข้อมูลจำเพาะ AHT20 I2C (6)

ที่มา : https://files.seeedstudio.com/wiki/Grove-AHT20_I2C_Industrial_Grade_Temperature_and_Humidity_Sensor/AHT20-datasheet-2020-4-16.pdf

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ESD electrostatic discharge conforms to JEDEC JESD22-A114 standard (human body mode ±4kV) and JEDEC JESD22-A115 (machine mode ±200V) If the test condition exceeds the nominal limit, the sensor needs additional protection circuit.

4.2 Input/output characteristics

Electric specifications include power consumption, high and low voltage of input and output, voltage of power supply. In order to make the sensor communication smooth, it is important to ensure that the signal design is strictly limited to the range given in tables 7, 8 and 17.

Parameter	Condition	Min	Typic	Max	Unit
Output low voltage VOL	VDD = 3.3 V, -4 mA < IOL < 0mA	0	-	0.4	V
Output high voltage VOH		70% VDD	-	VDD	V
Output sink current IOL		-	-	-4	mA
Input low voltage VIL		0	-	30% VDD	V
Input high voltage VIH		70% VDD	-	VDD	V
Input current	VDD = 5.5V, VIN = 0V to 5.5V	-	-	±1	uA

Table 7 Direct current characteristics of I/O pads, if without special declaration, VDD = 2.0V to 5.5V, T = -40 °C to 85 °C.

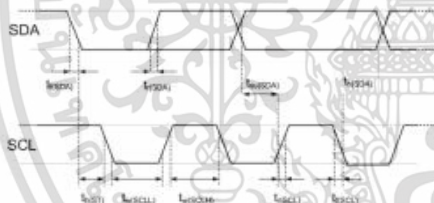


Figure 12 The sequence diagrams and abbreviations of digital input/output are explained in Table 8. Thicker SDA lines are controlled by sensors, and ordinary SDA lines are controlled by single chip computer. Please be noted that the effective read time of SDA is triggered by the drop edge of the previous conversion.

Parameter	Mark	I ² C Typical Mode		I ² C High speed mode		Unit
		MIN	MAX	MIN	MAX	
I ² C clock frequency fSCL		0	100	0	400	KHz
Initial signal time tHDSTA						μs
SCL Clock High Level Width tHIGH		4.7		1.3		μs
SCL Clock Low Level Width tLOW		4.0		0.6		μs
Data setup time relative to SCL SDA edge tHDDAT		0.09	3.45	0.02	0.9	μs
Data Setting Time Relative to SCL SDA Edge tSUDAT		250		100		μs

Note: Both pins are measured from 0.2 VDD and 0.8 VDD. Note: The above I²C time serial is determined by the following internal delays: (1) The internal SDA input pins are delayed relative to SCK pins with a typical value of 10ns. (2) The internal SDA output pins is delayed relative to SCK falling edge with a typical value of 202 ns.

Table 8. I²C Sequence Characteristics of Digital Input/output in fast Mode. The specific meaning is shown in Figure 12. Unless otherwise indicated.

5 Sensor Communication

AHT20 adopts standard I²C protocol to communicate. For information on the I²C protocol except the following chapters, please refer to the following website: www.aosong.com for sample reference.

5.1 Start Sensor

Step 1: Make the sensor power on with selected voltage of VDD power supply voltage (ranging from 2.0V to 5.5V). When the sensor is powered on, it takes 20 milliseconds at most (the SCL is high level) to enter idle state, that is, to be ready to receive commands sent by MCU.

5.2 Timing sequence of start/stop

Each transport sequence starts with the Start state and ends with the Stop state, as shown in Figures 18 and 19.



Figure 18 Start Transmit State (S) - When SCL is at high level, SDA is converted from high level to low level. The start state is a special bus state controlled by the main engine, indicating the start of slave machine transit (after Start, BUS is generally considered to be in a busy state).

รูปที่ ข.10 ข้อมูลจำเพาะ AHT20 I2C (7)

ที่มา : https://files.seeedstudio.com/wiki/Grove-AHT20_I2C_Industrial_Grade_Temperature_and_Humidity_Sensor/AHT20-datasheet-2020-4-16.pdf

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

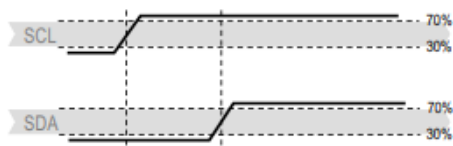


Figure 19 Stop Transmit State (P) - When the SCL is at high level, the SDA line is converted from low level to high level. Stop state is a special bus state controlled by the main engine, indicating the end of slave machine transmit (after Stop, BUS is generally considered to be in idle state).

5.3 Send Command

After the transmission is initiated, the first byte of the subsequent I2C transmission includes the 7-bit I2C device address 0x38 and a SDA direction bit x (read R: '1', write W: '0'). After the falling edge of the 8th SCL clock, the SDA pin (ACK) is pulled low to indicate that the sensor data reception is normal. After issuing the initialization command 0xBE and the measurement command 0xAC, the MCU must wait until the measurement is completed. The basic commands are summarized in Table 9. Table 10 shows the status bits returned from the slave.



Command	Definition	Code
Initialization	Keep main engine	10111110
Trigger Measurement	Keep main engine	10101100
Soft reset		10111010

Table 9 Basic Commands

Bit	Definition	Description
Bit[7]	(Busy indication)	1 - Busy in measurement 0 - Free in dormant state
Bit[6:5]	Remained	Remained
Bit[4]	Remained	Remained
Bit[3]	CAL Enable	1--calibrated 0--uncalibrated
Bit[2:0]	Remained	Remained

Table 10 State bit description.

5.4 Sensor reading process

1. Wait 40ms after power-on. Before reading the temperature and humidity values, first check whether the calibration enable bit Bit [3] of the status word is 1 (you can get a byte of status word by sending 0x71). If not 1, need to send 0xbe command (for initialization), this command parameter has two bytes, the first byte is 0x08, the second byte is 0x00, and then wait for 10ms.

2. Send the 0xAC command directly (trigger measurement). The parameter of this command has two bytes, the first byte is 0x33 and the second byte is 0x00.

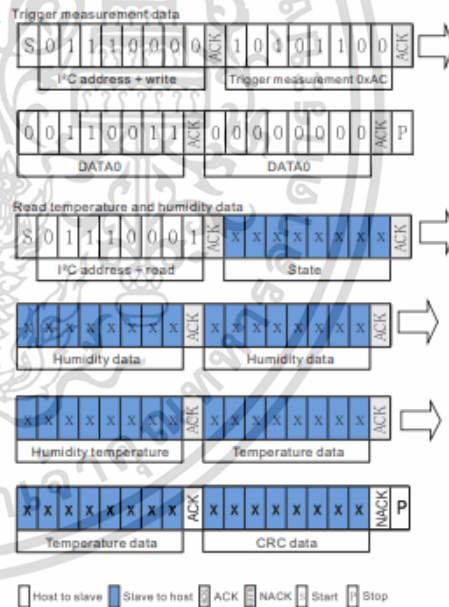
3. Wait for 80ms to wait for the measurement to be completed. If the read status word Bit [7] is 0, it indicates that the measurement is completed, and then six bytes can be read in a row; otherwise, continue to wait.

4. After receiving six bytes, the next byte is the CRC check data, the user can read it as needed, if the receiving end needs CRC check, then send it after receiving the sixth byte ACK response, otherwise NACK is sent out, CRC initial value is 0xFF, CRC8 check polynomial is:

$$CRC[T;0]=1+x^4 + x^5 + x^8$$

5. Calculate the temperature and humidity values.

Note: The calibration status check in the first step only needs to be checked at power-on. No operation is required during the normal acquisition process.



รูปที่ ข.11 ข้อมูลจำเพาะ AHT20 I2C (8)

ที่มา : https://files.seeedstudio.com/wiki/Grove-AHT20_I2C_Industrial_Grade_Temperature_and_Humidity_Sensor/AHT20-datasheet-2020-4-16.pdf

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Note: The sensor takes time to collect data. After the host sends out the measurement command (0 x AC), it delays more than 75 milliseconds to read the converted data and judge whether the returned status bits are normal. If the state bit [Bit 7] is 0, the data can be read normally, and 1 represents that the sensor is busy, the host needs to wait for data processing to complete.

5.5 Soft Reset

This command (see Table 11) is used to restart the sensor system without turning the power off and on again. After receiving this command, the sensor system begins to re-initialize and restore the default setting state, and the time required for soft reset does not exceed 20 ms.



Table 11 Soft Reset—The grey part is controlled by AHT20.

8 Package

AHT20 provides SMD packaging (similar to QFN), which represents a bilateral flat and pin-free package. The sensor chip is made of a copper lead frame coated with Ni/Au. The weight of the sensor is about 19 mg.

8.1 Trace Information

All AHT20 sensors have laser labels on their surfaces. See Figure 20.



Figure 20: Sensor laser label

6 Signal Transformation

6.1 Relative humidity transformation

Relative humidity RH can be calculated according to the relative humidity signal SRH output from SDA by the following equation. (The result is expressed in% RH)

$$RH[\%] = \left(\frac{S_{RH}}{2^{20}} \right) \cdot 100\%$$

6.2 Temperature transformation

Temperature T can be calculated by substituting the temperature output signal ST into the following formula. (The results are expressed as temperature °C T)

$$T(^{\circ}C) = \left(\frac{S_T}{2^{20}} \right) \cdot 200 - 50$$

A label is also attached to the tape, as shown in Figure 21, and other trace information is provided.



Figure 21: Label on the tape

8.2 Transport Package

AHT20 is packed in coiled tape and sealed in antistatic ESD bags. The standard packing size is 5000 pieces per roll. For AHT20 packaging, the last 440 mm (55 sensor capacity) and first 200 mm (30 sensor capacity) of each roll are empty packaging.

The package diagram with sensor positioning is shown in Figure 20. The reel is placed in the antistatic pocket.

7 Environmental stability

If the sensor is used in equipment or machinery, please make sure that it is the same temperature and humidity that the sensor used for measurement and the sensor used for reference that have sensed. If the sensor is placed in the equipment, the reaction time will be prolonged, so it is necessary to ensure that sufficient measurement time is reserved in the programming. The AHT20 sensor is tested according to the enterprise standard of Aosong temperature and humidity sensor. The performance of sensors under other test conditions is not guaranteed and cannot be regarded as a part of sensor performance. Especially for the specific occasions required by users, we do not make any commitments.

รูปที่ ข.12 ข้อมูลจำเพาะ AHT20 I2C (9)

ที่มา : https://files.seeedstudio.com/wiki/Grove-AHT20_I2C_Industrial_Grade_Temperature_and_Humidity_Sensor/AHT20-datasheet-2020-4-16.pdf

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Universal isolate transducer MODEL TW-4M-1-N, TW-4M-4-N



Input Specification

Input	Input resistance	Input allowable range
0 to 5 VDC	More than 1 MΩ	-50 to +150% F.S
0 to 10 VDC		
0 to 60 mVDC		
1 to 5 VDC		
-5 to 5 VDC		
-10 to 10 VDC	250 Ω	
0 to 20 mADC		
4 to 20 mADC		

Output Specification

Output	Load resistance
0 to 5 VDC	More than 2 KΩ
1 to 5 VDC	
-5 to 5 VDC	More than 4 KΩ
0 to -10 VDC	
-10 to 10 VDC	Less than 550 Ω
0 to 20 mADC	
4 to 20 mADC	

General Specifications

- Range settings before shipment: Input, 1 to 5 VDC, output; 4 to 20 mADC
Accuracy of range settings before shipment: Within ±0.25% F.S
- Error caused by input range setting change: Within ±1% F.S
Error caused by output range setting change: Within ±1% F.S
- Temperature characteristic: ±0.02% F.S/°C
- Response time: Less than 50ms (Time required for arriving at 90% of rated output)
- Insulation resistance: Between input and output or power supply, More than 100 MΩ (At 500 VDC)
- Dielectric strength: Between input and output or power supply, For 1 min. (At 2000 VAC)
- Power supply voltage: 100 to 240 VAC ±10% or 24 VDC ±10%
Consuming current: Less than 50mA (At 100 VAC), Less than 80mA (At 24 VDC)
- Operating ambient temperature: -5 to +50°C
- Operating humidity: Less than 90% RH (No dew-condensing)
- Storage temperature: -10 to +70°C
- Storage humidity: Less than 60% RH (No dew-condensing)
- Case material: Black PBT 94-V0
- Weight: Approx. 130g

About solderless terminal to connect with the screw type terminal block

- Screw size: M3.5×7L
- Recommendation solderless terminal: Ring tongue (R type) M3.5
Spade tongue (A type) M3.5
Applicable Wire AWG# 26 to 22
- Quality of material: Screw Iron, nickel plating
Connection board
Yellow copper, tin plating

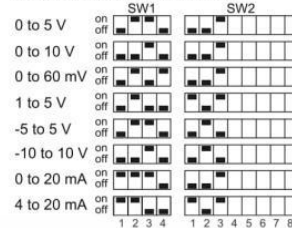
Setting or changing input/output range

Always set or change the input/output range with the power turned off.

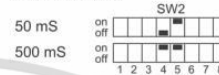
The input/output range can be set or changed by dip switches SW1 and SW2, SW3 on top of the transducer. After finishing the setting, stick the attached seal to the window for dip switch operation. Prior to factory shipment, the input is set 1 to 5 V and the output, 4 to 20 mA.



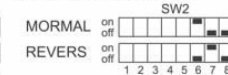
1. Setting or changing input range



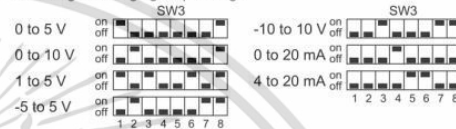
2. Setting Speed



3. Setting Revers (Output)



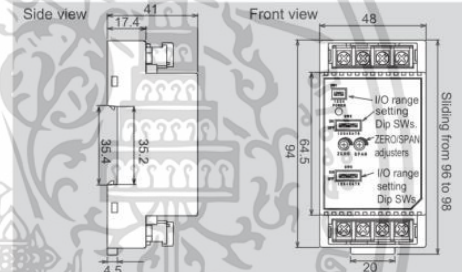
4. Setting or changing output range



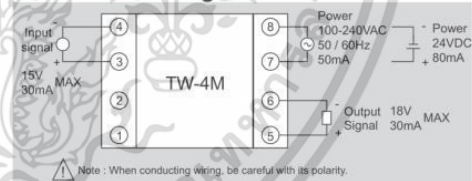
Ordering Code

TW-4M-□-N
Code to [1: 100 to 240 VAC ±10% specify power] [4: 24 VDC ±10%]

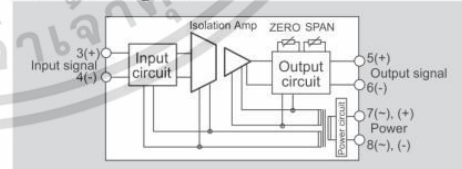
Dimensions



Connection Diagram



Block Diagram



Watanabe Electric Industry Co.,Ltd

รูปที่ ข.13 ข้อมูลจำเพาะ TW-4M-1-N Universal Isolate transducer

ที่มา : <https://www.nanasupplier.com/KpbGroup/p-223855>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Solid State Relays Industrial, 1-Phase Analog Switching Type RM1E

CARLO GAVAZZI



- AC Solid State Relay
- Analog switching (phase-angle control) for resistive and slightly inductive load applications
- 4 - 20 mA or 0 - 10 V control input
- Rated operational current: 25, 50, 75, 100 and 125 AACrms
- Rated operational voltage: Up to 600 VACrms
- Variable intensity LED-indication according to input current
- Integral snubber network
- Polarized lockable control connector for safe connection for voltage controlled version



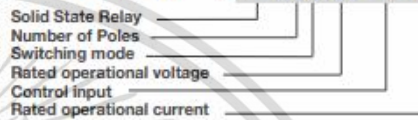
Product Description

The analog switching relay works in accordance with the phase angle control principle, i.e., the output switching point in the AC sine wave depends on the control input which can be either 4-20 mA or 0-10 VDC. 4 mA or 0 VDC correspond to

zero output power whilst 20 mA or 10 VDC correspond to full output power (near linear power response). The relay switches off every time the output current crosses zero, and switches ON in accordance with the applied control input.

Ordering Key

RM 1E 60 AA 50



Type Selection

Switching mode	Rated operational voltage	Rated operational current	Control input
E: Analog switching	23: 230 VACrms* 40: 400 VACrms 48: 480 VACrms 60: 600 VACrms	25: 25 AACrms 50: 50 AACrms 75: 75 AACrms 100: 100 AACrms 125: 125 AACrms	AA: 4 - 20 mA DC V: 0-10 VDC**

* For nominal operational voltage of 110 VACrms, use RM1E23...
** RM1E..V.. require an external supply voltage.

Selection Guide

Rated op. voltage	Blocking voltage	Control input	Rated operational current				
			25 A	50 A	75 A	100 A	125 A
230 VAC	650 V _e	4 - 20 mA 0-10 VDC	RM1E23AA25 RM1E23V25	RM1E23AA50 RM1E23V50		RM1E23AA100 RM1E23V100	RM1E23AA125 RM1E23V125
400 VAC	850 V _e	4 - 20 mA	RM1E40AA25	RM1E40AA50		RM1E40AA100	
480 VAC	1200 V _e	4 - 20 mA 0-10 VDC	RM1E48AA25 RM1E48V25	RM1E48AA50 RM1E48V50	RM1E48AA75	RM1E48AA100 RM1E48V100	RM1E48AA125 RM1E48V125
600 VAC	1400 V _e	4 - 20 mA 0-10 VDC	RM1E60AA25 RM1E60V25	RM1E60AA50 RM1E60V50		RM1E60AA100 RM1E60V100	

General Specifications

	RM 1E 23 ...	RM 1E 40 ...	RM 1E 48 ...	RM 1E 60 ...
Operational voltage range RM1E..AA.. RM1E..V..	90 to 280 VAC 90 to 285 VAC	340 to 460 VAC	200 to 550 VAC 200 to 550 VAC	410 to 660 VAC 410 to 660 VAC
Blocking voltage	650 V _e	850 V _e	1200 V _e	1400 V _e
Operational frequency range	45 to 65 Hz	45 to 65 Hz	45 to 65 Hz	45 to 65 Hz
Power factor	> 0.75	> 0.75	> 0.75	> 0.75
Approvals	UR, cUR, CSA, EAC	UR, cUR, CSA, EAC	UR, cUR, CSA, EAC	UR, cUR, CSA, EAC
CE-marking	Yes	Yes	Yes	Yes*
UKCA-marking	Yes	Yes	Yes	Yes*

* Heatsink must be connected to ground for 600 V types
Specifications are subject to change without notice (23.08.2021)

รูปที่ ข.14 ข้อมูลจำเพาะ Carlo Gavazzi Solid state relay (1)

ที่มา : <https://www.elfadistelec.no/en/solid-state-relay-rm23-spst-no-25a-265v-screw-terminal-carlo-gavazzi-rm1a23d25/p/13745030>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RM1E

CARLO GAVAZZI

Output Specifications

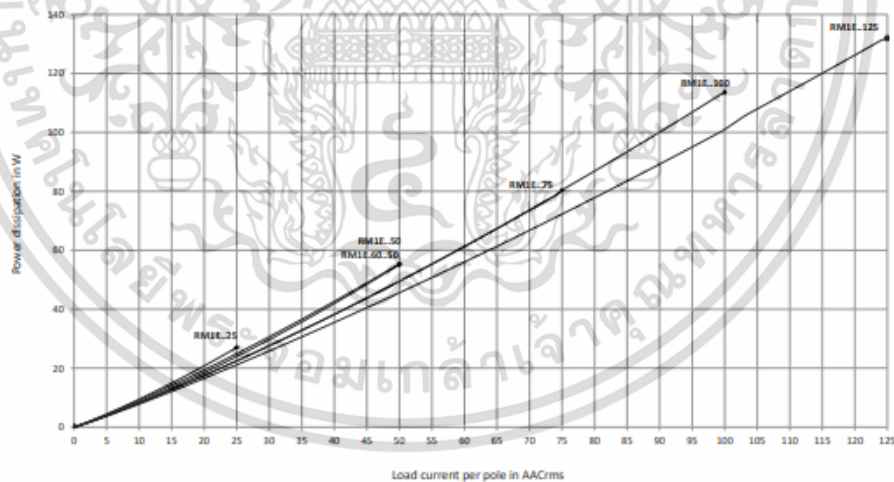
	RM1E...25	RM1E...50	RM1E...75	RM1E...100	RM1E...125
Rated operational current AC51 Ta=25 °C AC53a Ta=25 °C	25 AACrms 5 AACrms	50 AACrms 15 AACrms	75 AACrms 20 AACrms	100 AACrms 20 AACrms	125 AACrms 30 AACrms
Minimum operational current	150 mA	250 mA	400 mA	400 mA	500 mA
Rep. overload current t = 1 s	55 AACrms	125 AACrms	150 AACrms	150 AACrms	200 AACrms
Non-rep. surge current t = 10 ms	325 A _s	600 A _s	1150 A _s	1150 A _s	1900 A _s
Off-state leakage current	< 3 mA	< 3 mA	< 3 mA	< 3 mA	< 3 mA
I ² t for fusing t = 10 ms	525 A ² s	1800 A ² s	6600 A ² s	6600 A ² s	18000 A ² s
Critical dV/dt off-state min.	1000 V/μs	1000 V/μs	1000 V/μs	1000 V/μs	1000 V/μs

Input Specifications

	RM1E..AA..	RM1E..V..
Current controlled input		
Control current range (A1-A2)	4-20 mADC	
Pick up current	4.2 mADC	
Drop out current	4.1 mADC	
Response time (input to output)	≤ 20 ms	
Voltage drop	< 10 VDC @ 20 mA	
Dynamic impedance	≥ 330 Ω	
Max. allowable input current	50 mA	
Reverse polarity protected	Yes	
Voltage controlled input		
Supply voltage, V _{ss} (A3-A2)		24 VDC ±20%
Max. supply current		15 mA @ 19.2 VDC 20 mA @ 30 VDC
Control voltage, V _{cc} (A1-A2)		0-10 VDC
Pick up voltage		0.2 VDC
Drop out voltage		0.1 VDC
Control input current		0.15 mA @ 10 VDC
Response time (input to output)		≤ 20 ms
Supply reverse protected		Yes

Note: The use of twisted pair cable for the control input is recommended

Output Power Dissipation



2

Specifications are subject to change without notice (23.08.2021)

รูปที่ ข.15 ข้อมูลจำเพาะ Carlo Gavazzi Solid state relay (2)

ที่มา : <https://www.elfadistelec.no/en/solid-state-relay-rm23-spst-no-25a-265v-screw-terminal-carlo-gavazzi-rm1a23d25/p/13745030>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RM1E



Electromagnetic Compatibility

Immunity	EN60947-4-3	Radiated Radio Frequency Immunity	IEC/EN 61000-4-3
Electrostatic Discharge (ESD) Immunity	IEC/EN 61000-4-2	10 V/m, 80 - 1000 MHz	Performance Criteria 1
Air discharge, 8 kV	Performance Criteria 2	10 V/m, 1.4 - 2.0 GHz	Performance Criteria 1
Contact, 4 kV	Performance Criteria 2	3 V/m, 2.0 - 2.7 GHz	Performance Criteria 1
Electrical Fast Transient (Burst) Immunity	IEC/EN 61000-4-4	Conducted Radio Frequency Immunity	IEC/EN 61000-4-6
Output, 2 kV, 5 kHz	Performance Criteria 1	10 V/m, 0.15 - 80 MHz	Performance Criteria 1
Input, 1 kV, 5 kHz	Performance Criteria 1	Voltage Dips Immunity	IEC/EN 61000-4-11
Electrical Surge Immunity	IEC/EN 61000-4-5	0% for 0.5 , 1 cycle	Performance Criteria 2
Output, line to line, 1 kV	Performance Criteria 2	40% for 10 cycles	Performance Criteria 2
Output, line to earth, 1 kV	Performance Criteria 2	70% for 25 cycles	Performance Criteria 2
Output, line to earth, 2 kV	Performance Criteria 2	80% for 250 cycles	Performance Criteria 2
with external varistor	Performance Criteria 2	Voltage Interruptions Immunity	IEC/EN 61000-4-11
Input, line to line, 1 kV	Performance Criteria 2	0% for 5000 ms	Performance Criteria 2
Input, line to earth, 2 kV	Performance Criteria 2		
EMC Emission	EN60947-4-3	Radio Interference Field Emission (Radiated)	IEC/EN 55011
Radio Interference Voltage Emission (Conducted)	IEC/EN 55011	30 - 1000 MHz	Class B
0.15 - 30 MHz	Class A (industrial) with filters		

Notes:

- Use of AC solid state relays may, according to the application and the load current, cause conducted radio interferences. Use of mains filters may be necessary for cases where the user must meet E.M.C requirements. The capacitor values given inside the filtering specification tables should be taken only as indications, the filter attenuation will depend on the final application.
- The manufacturer has set the maximum allowable deviation under the influence of RF to +/- 1.0% PSD or +/- 1 step in distributed modes.
- Control input lines must be installed together to maintain products' susceptibility to Radio Frequency interference.
- Performance Criteria 1: No degradation of performance or loss of function is allowed when the product is operated as intended.
- Performance Criteria 2: During the test, degradation of performance or partial loss of function is allowed. However, when the test is complete the product should return operating as intended by itself.
- Performance Criteria 3: Temporary loss of function is allowed, provided the function can be restored by manual operation of the controls.

Specifications are subject to change without notice (23.08.2021)

3

รูปที่ ข.16 ข้อมูลจำเพาะ Carlo Gavazzi Solid state relay (3)

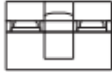
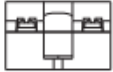
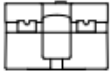




ที่มา : <https://www.elfadistelec.no/en/solid-state-relay-rm23-spst-no-25a-265v-screw-terminal-carlo-gavazzi-rm1a23d25/p/13745030>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RM1E

CARLO GAVAZZI

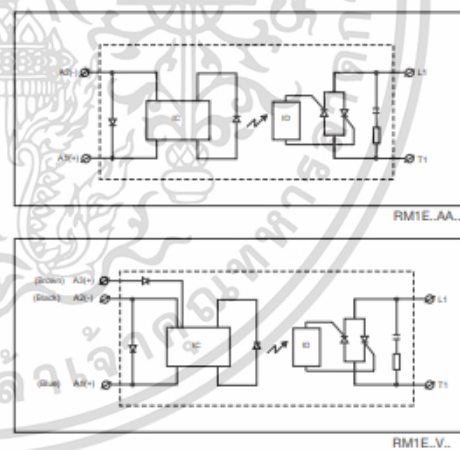
Connection Specifications

Connection terminals	L1, T1	A1, A2	A1, A2, A3
			
Stripping length (X)	12 mm	8 mm	
Connection Type	M5 screw with captivated washer	RM1E..AA.: M3 screw with captivated washer	RM1E..V.: 3 pins, pitch 2.54 mm square pin 0.64' Accessory: RCS3-100-1 terminated cable
Rigid (solid & stranded) UR rated data	 1x 2.5 - 6.0 mm ² 1x 14 - 10 AWG	2x 2.5 - 6.0 mm ² 2x 14 - 10 AWG	1x 0.5 - 2.5 mm ² 1x 18 - 12 AWG
Flexible with end sleeve	 1x 1.0 - 4.0 mm ² 1x 18 - 12 AWG	2x 1.0 - 2.5 mm ² 2x 2.5 - 4.0 mm ² 2x 18 - 14 AWG 2x 14 - 12 AWG	1x 0.5 - 2.5 mm ² 1x 18 - 12 AWG
Flexible without end sleeve	 1x 1.0 - 6.0 mm ² 1x 18 - 10 AWG	2x 1.0 - 2.5 mm ² 2x 2.5 - 6.0 mm ² 2x 18 - 14 AWG 2x 14 - 10 AWG	
Torque specification	 Pozidrive 2 2.4 Nm (21.2 lb-in)	Pozidrive 1 0.5 Nm (4.4 lb-in)	
Aperture for termination lug	12 mm	7.5 mm	

Housing Specifications

Weight	Approx. 60 g
25 A, 50 A	Approx. 100 g
75 A, 100 A, 125 A	
Housing material	Noryl, black
Baseplate	Aluminium
25 A, 50 A	Copper, nickel-plated
75 A, 100 A, 125 A	
Relay	
Mounting screws	M5
Mounting torque	1.5-2.0 Nm

Functional Diagram



4

Specifications are subject to change without notice (23.08.2021)

รูปที่ ข.17 ข้อมูลจำเพาะ Carlo Gavazzi Solid state relay (4)

ที่มา : <https://www.elfadistelec.no/en/solid-state-relay-rm23-spst-no-25a-265v-screw-terminal-carlo-gavazzi-rm1a23d25/p/13745030>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RM1E



Thermal Specifications

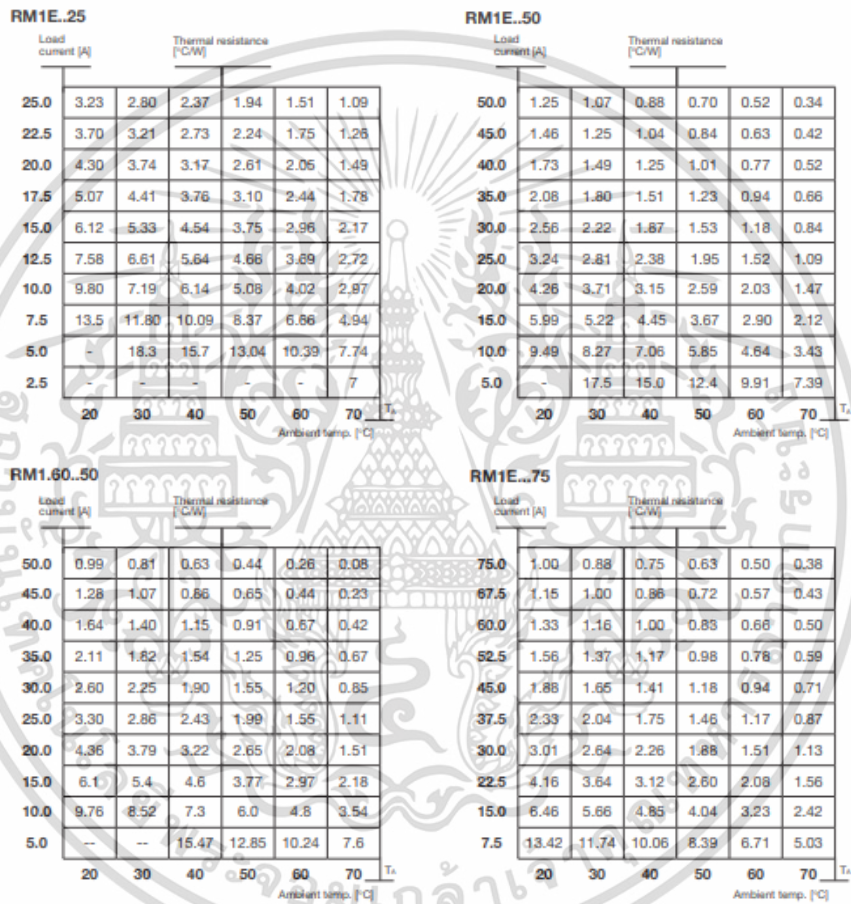
Operating temperature	-20° to +70°C (4° to +158 °F)
Storage temperature	-20° to +100°C (-4° to +212 °F)
Junction temperature	≤125°C (257 °F)

Isolation

Rated isolation voltage	≥ 4000 Vrms
Input to output	≥ 4000 Vrms
Output to case	≥ 4000 Vrms

Heatsink Dimensions (load current versus ambient temperature)

With the output fully ON (360° conduction angle)



Specifications are subject to change without notice (23.08.2021)

5

รูปที่ ข.18 ข้อมูลจำเพาะ Carlo Gavazzi Solid state relay (5)

ที่มา : <https://www.elfadistelec.no/en/solid-state-relay-rm23-spst-no-25a-265v-screw-terminal-carlo-gavazzi-rm1a23d25/p/13745030>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RM1E



Heatsink Dimensions (load current versus ambient temperature)

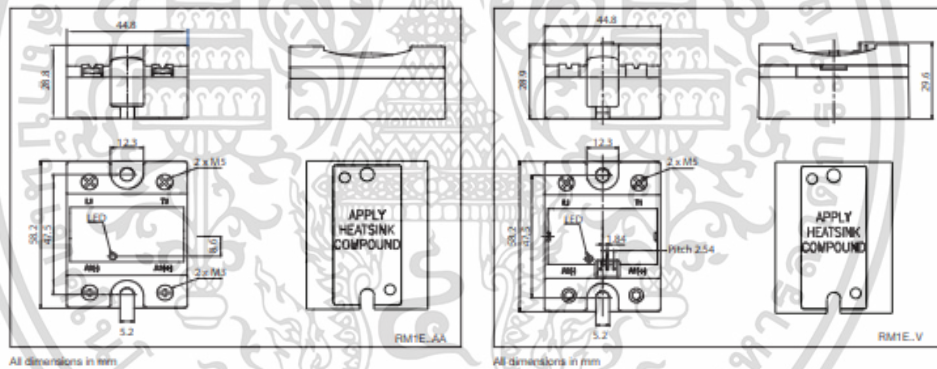
RM1E..100

Load current [A]	Thermal resistance [°C/W]					
	20	30	40	50	60	70
100.0	0.60	0.52	0.43	0.34	0.26	0.17
90.0	0.74	0.64	0.54	0.44	0.34	0.24
80.0	0.91	0.79	0.68	0.56	0.45	0.33
70.0	1.09	0.96	0.82	0.68	0.55	0.41
60.0	1.33	1.16	1.00	0.83	0.66	0.50
50.0	1.66	1.45	1.24	1.04	0.83	0.62
40.0	2.16	1.89	1.62	1.35	1.08	0.81
30.0	3.01	2.64	2.26	1.88	1.51	1.13
20.0	4.73	4.14	3.55	2.96	2.37	1.78
10.0	9.94	8.70	7.45	6.21	4.97	3.73

RM1E..125

Load current [A]	Thermal resistance [°C/W]					
	20	30	40	50	60	70
125.0	0.63	0.55	0.47	0.40	0.32	0.24
112.5	0.73	0.64	0.54	0.45	0.36	0.27
100.0	0.84	0.74	0.63	0.52	0.42	0.32
87.5	0.99	0.87	0.74	0.62	0.50	0.37
75.0	1.20	1.05	0.90	0.75	0.60	0.45
62.5	1.48	1.30	1.11	0.93	0.74	0.56
50.0	1.92	1.68	1.44	1.20	0.96	0.72
37.5	2.65	2.32	1.98	1.65	1.32	0.99
25.0	4.12	3.60	3.09	2.57	2.06	1.54
12.5	8.55	7.48	6.41	5.34	4.27	3.21

Dimensions



รูปที่ ข.19 ข้อมูลจำเพาะ Carlo Gavazzi Solid state relay (6)

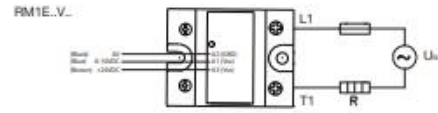
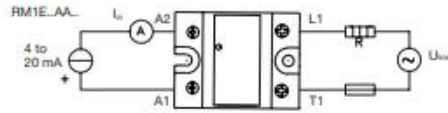
ที่มา : <https://www.elfadistelec.no/en/solid-state-relay-rm23-spst-no-25a-265v-screw-terminal-carlo-gavazzi-rm1a23d25/p/13745030>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RM1E



Applications



Transfer Characteristics
Output power as a function of control output

Control current (mA)	Control voltage (VDC)	Output power
4	0	0
8	2.5	25
12	5	50
16	7.5	75
20	10	99

This relay is suitable for control of heaters, lighting and slightly inductive loads such as small fans. The relay can also be used for soft turn-on of high-power incandescent lamps.

Heatsink Selection



Heatsink Range Overview:
https://gavazziautomation.com/images/PIM/DATASHEET/ENG/SSR_Accessories.pdf

Heatsink Selector Tool:
https://gavazziautomation.com/nsc/HQ/EN/solid_state_relays

Ordering Key

RHS..

- Heatsinks and fans
- 5.40°C/W to 0.12°C/W thermal resistance
- DIN, panel or thru wall mounting
- Single or multiple SSR mounting

Specifications are subject to change without notice (23.08.2021)

7

รูปที่ ข.20 ข้อมูลจำเพาะ Carlo Gavazzi Solid state relay (7)

ที่มา : <https://www.elfadistelec.no/en/solid-state-relay-rm23-spst-no-25a-265v-screw-terminal-carlo-gavazzi-rm1a23d25/p/13745030>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RM1E



Short Circuit Protection

Protection Co-ordination, Type 1 vs. Type 2:

Type 1 protection implies that after a short circuit, the device under test will no longer be in a functioning state. In type 2 co-ordination the device under test will still be functional after the short circuit. In both cases, however, the short circuit has to be interrupted. The fuse between enclosure and supply shall not open. The door or cover of the enclosure shall not be blown open. There shall be no damage to conductors of terminals and the conductors shall not separate from terminals. There shall be no breakage or cracking of insulating bases to the extent that the integrity of the mounting of live parts is impaired. Discharge of parts or any risk of fire shall not occur.

The product variants listed in the table hereunder are suitable for use on a circuit capable of delivering not more than 65,000 Arms Symmetrical Amperes, 600 Volts maximum when protected by fuses. Tests at 65,000 A were performed with Class J, fast acting; please refer to the table below for maximum allowed ampere rating of the fuse. Use fuses only.

Co-ordination Type 1 (UL508)

Part No.	Prospective short circuit current [kArms]	Max. fuse size [A]	Class	Voltage [VAC]
RM1E..25..	65	30	J / CC	600
RM1E..50..	65	30	J	600
		20	HSJ20 (Mersen*)	600
RM1E..75..	65	100	J	600
RM1E..100..	65	80	J	600
		60	HSJ60 (Mersen*)	600
RM1E..125..	65	125	J	600
		60	HSJ60 (Mersen*)	600

Co-ordination Type 2 (IEC/EN60947-4-3)

Part No.	Prospective short circuit current [kArms]	Max. fuse size [A]	Brand	Model	Size
RM1E.xx.25.. (xx = 23,40,48)	10	25	Mersen*	6.9gRB 10-25	10,3 x 38
RM1E.60.25..	10	20	Mersen*	6.9gRB 10-20	10,3 x 38
RM1E.xx.50.. (xx = 23,40)	10	50	Mersen*	6.9zz CP gRC 14x51/50	14 x 51
RM1E.xx.50.. (xx = 48,60)	10	50	Mersen*	6.9zz CP gRC 22x58/50	22 x 58
RM1E.xx.75.. (xx = 23,40,48,60)	10	63	Mersen*	6.9zz CP gRC 22x58/63	22 x 58
RM1E.xx.100.. (xx = 23,40,48)	10	100	Mersen*	6.9zz CP gRC 22x58/100	22 x 58
RM1E.xx.100.. (xx = 23,40,48)	10	80	Mersen*	6.9zz CP gRC 22x58/80	22 x 58
RM1E.xx.125.. (xx = 23 or 48)	10	125	Mersen*	6.921 CP URGD 27x60/125	27 x 60

zz = 00, without fuse trip indication

zz = 21, with fuse trip indication

* Formerly Ferraz Shawmut

รูปที่ ข.21 ข้อมูลจำเพาะ Carlo Gavazzi Solid state relay (8)

ที่มา : <https://www.elfadistelec.no/en/solid-state-relay-rm23-spst-no-25a-265v-screw-terminal-carlo-gavazzi-rm1a23d25/p/13745030>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RM1E



Type 2 Protection with Miniature Circuit Breakers (M.C.B.s)

Solid State Relay type	ABB Model no. for Z - type M. C. B. (rated current)	ABB Model no. for B - type M. C. B. (rated current)	Wire cross sectional area [mm ²]	Minimum length of Cu wire conductor [m]*	
RM1E...25..	1-pole				
	S201-Z4 (4 A)	S201-B2 (2 A)	1.0	21.0	
	S201-Z6 UC (6 A)	S201-B2 (2 A)	1.0 1.5	21.0 31.5	
RM1E...50..	1-pole				
	S201-Z10 (10 A)	S201-B4 (4 A)	1.0 1.5 2.5	7.6 11.4 19.0	
	S201-Z16 (16 A)	S201-B6 (6 A)	1.0 1.5 2.5 4.0	5.2 7.6 13.0 20.8	
	S201-Z20 (20 A)	S201-B10 (10 A)	1.5 2.5	12.6 21.0	
	S201-Z25 (25 A)	S201-B13 (13 A)	2.5 4.0	25.0 40.0	
	2-poles				
	S202-Z25 (25 A)	S202-B13 (13 A)	2.5 4.0	19.0 30.4	
	RM1E...75.. RM1E...100..	1-pole			
		S201-Z20 (20 A)	S201-B10 (10 A)	1.5 2.5 4.0	4.2 7.0 11.2
		S201-Z32 (32 A)	S201-B16 (16 A)	2.5 4.0 6.0	13.0 20.8 31.2
		2-poles			
		S202-Z20 (20 A)	S202-B10 (10 A)	1.5 2.5 4.0	1.8 3.0 4.8
S202-Z32 (32 A)		S202-B16 (16 A)	2.5 4.0 6.0 10.0	5.0 8.0 12.0 20.0	
S202-Z50 (50 A)		S202-B25 (25 A)	4.0 6.0 10.0	14.8 22.2 37.0	
RM1E...125..		1-pole			
		S201-Z50 (50 A)	S201-B25 (25 A)	4.0 6.0 10.0 16.0	4.8 7.2 12.0 19.2
		S201-Z63 (63 A)	S201-B32 (32 A)	6.0 10.0 16.0	7.2 12.0 19.2

* Between MCB and Load (including return path which goes back to the mains).
 Note: A prospective current of 6 kA and a 230/400 V power supply system is assumed for the above suggested specifications. For cables with different cross section than those mentioned above please consult Carlo Gavazzi's Technical Support Group.
 Specifications are subject to change without notice (23.08.2021)

รูปที่ ข.22 ข้อมูลจำเพาะ Carlo Gavazzi Solid state relay (9)

ที่มา : <https://www.elfadistelec.no/en/solid-state-relay-rm23-spst-no-25a-265v-screw-terminal-carlo-gavazzi-rm1a23d25/p/13745030>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



Chitsanupong Silsangwon received the High Vocational Certificate in Instrumentation Technician from Thai Austrian Technical College (TATC) in 2020, the Grade 12 in Rayongwittayakom school (RYW) in 2018. He is currently a student for the Degree of Bachelor of Instrumentation Engineering, School of Engineering, KMIT'L, Bangkok.



Tharit Boonjaroen received the High Vocational Certificate in Electrical Control SCG from Hatyai Technical College in 2020, the Vocational Certificate in Electrical Power from Hatyai Technical College in 2018. He is currently a student for the Degree of Bachelor of Instrumentation Engineering, School of Engineering, KMIT'L, Bangkok

My Advisor

(Approved Profiles@ Jan 1,2023)



Arjin Numsomran
arjin.nu@kmitl.ac.th

Assoc. Prof. Dr. Arjin Numsomran received the D.Eng. degree in Electrical Engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMIT'L) in 2018, the M.Eng. degree in Electrical Engineering from KMIT'L in 2001, and the B.Eng. degree in Instrumentation Engineering from KMIT'L in 1998. He is currently an Associate Professor with the Department of Instrumentation and Control Engineering, School of Engineering, KMIT'L, Bangkok. His research interests include Control System (CS) Analysis and Design, Embedded Control System (ECS), Instrumentation and Measurement System (IMS), Artificial Intelligence Internet of Things (AIoT), and Safety Instrumented System (SiS).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้