

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

การออกแบบและสร้างชุดทดลองการควบคุมอุณหภูมิ

**DESIGN OF TEMPERATURE PROCESS CONTROL LABORATORY**



นายยุทธนา ลักษณิทธิ  
นายสุชาติ สุขวดี

วันที่  
ส่ง  
2549

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....  
วัน,เดือน,ปี..... 18 ส.ค. 2549

11625430

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม  
ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# DESIGN OF TEMPERATURE PROCESS CONTROL LABORATORY



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF INSTRUMENTATION ENGINEERING  
DEPARTMENT OF INSTRUMENTATION ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING

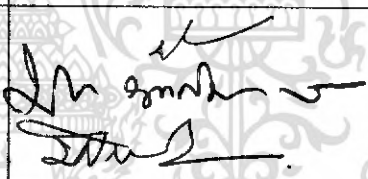
**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2005**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองปริญญาโท

หัวข้อปริญญาโท การออกแบบและสร้างชุดทดลองการควบคุมอุณหภูมิ  
DESIGN OF TEMPERATURE PROCESS CONTROL LABORATORY  
นักศึกษาผู้จัดทำ นายยุทธนา ลักษมีริติ รหัสประจำตัว 46015454  
นายสุชาติ สุขวดี รหัสประจำตัว 46015471  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม  
ปีการศึกษา 2548

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท	ลายมือชื่อ
รศ. ประสิทธิ์ จุลเสรีวงศ์	
รศ. ประภาส อุดคคกิมพันธ์	
ผศ. พิทยา ปานนิล	

ภาควิชารับรองแล้ว



(รศ.ประสิทธิ์ จุลเสรีวงศ์)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การออกแบบและสร้างชุดทดลองการควบคุมอุณหภูมิ DESIGN OF TEMPERATURE PROCESS CONTROL LABORATORY		
นักศึกษาผู้จัดทำ	นายยุทธนา	ลักษณะิทธิ	รหัสประจำตัว 46015454
	นายสุชาติ	สุขวดี	รหัสประจำตัว 46015471
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. ประสิทธิ์	จูลเสรีวงศ์	
	รศ. ประภาส	อุกคกิมพันธ์	
	ผศ. พิทยา	ปานนิล	
ปีการศึกษา	2548		

### บทคัดย่อ

ในการควบคุมกระบวนการทางอุตสาหกรรมต่าง ๆ จะต้องใช้บุคลากรที่มีความรู้ความสามารถ ตลอดจนความเข้าใจเกี่ยวกับอุปกรณ์การวัดและการควบคุมชนิดต่าง ๆ เป็นอย่างมาก การพัฒนาบุคลากรให้สามารถเข้าใจเกี่ยวกับเทคนิควิธีการวัดและควบคุมชนิดต่าง ๆ ในระบบควบคุมกระบวนการทางอุตสาหกรรมในทางด้านปฏิบัติจึงมีความจำเป็น ปริญญานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอการออกแบบและสร้างชุดทดลองการควบคุมอุณหภูมิ เพื่อใช้เป็นชุดทดลองเพื่อเสริมสร้างความเข้าใจและทักษะในการควบคุมกระบวนการดังกล่าว ตลอดจนเป็นการลดการซื้ออุปกรณ์วัดและควบคุมที่มีราคาแพงมาประกอบการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	Design of Temperature Process Control Laboratory	
<b>Authors</b>	Mr. Yuthana	Luksametiti
	Mr. Suchart	Sukawadee
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof. Prasit	Julsereewong
	Assoc.Prof. Prapart	Ukakimapran
	Asst.Prof. Pittaya	Pannil
<b>Year</b>	2005	

### ABSTRACT

The control of industrial method must have the professionalism and the knowledge about measuring and controlling material. In the operation, that is the important things to develop the officer. So this thesis presents about design of temperature process control laboratory to used to increase the knowledge and skill in the controllable process and reduce to buy the expensive material for test.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับความเมตตาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พิทยา ปานนิล ที่ได้ให้คำแนะนำแก่ผู้วิจัยตลอดมา อีกทั้งยังเอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำปริญญาบัตรฉบับนี้ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้ง และขอกราบขอบพระคุณ เป็นอย่างสูง ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ประภาส อุกคติกมาพันธุ์ ที่ได้ให้คำแนะนำที่ดี ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เชื้อ นกอยู่ ที่คอยให้คำแนะนำที่ดี ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมทุกท่าน ที่ได้คำปรึกษาแนะนำและความช่วยเหลือ อันเป็นประโยชน์ ต่อการทำปริญญาบัตรฉบับนี้ ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ ทุก ๆ คนที่ให้คำแนะนำ ดิชมความช่วยเหลือ และกำลังใจให้ผู้วิจัยโดยตลอด ขอขอบคุณ นันทนา เปรมปรีดี และ เมษรา วสินบรรเจิด ที่คอย เป็นกำลังใจให้กับผู้วิจัยเสมอมา และที่ลืมมิได้คือ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อและ คุณแม่ อันเป็นที่รักยิ่ง ที่คอยสนับสนุนในทุก ๆ ด้าน และเป็นแรงบันดาลใจ ในการทำปริญญาบัตร ฉบับนี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญาบัตรฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบแต่ผู้ที่มีพระคุณ  
ทุกท่าน

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII

บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและแรงจูงใจในการทำปริญญานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์.....	2
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	3
2.1 กล่าวนำ.....	3
2.1.1 ตัวควบคุม (Controller).....	4
2.1.2 อุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย (Final Control Element).....	4
2.1.3 กระบวนการ (Plant or Process).....	4
2.1.4 อุปกรณ์การวัด (Measurement).....	4
2.2 การควบคุมแบบป้อนกลับ โดยใช้ตัวควบคุมแบบ PID.....	5
2.2.1 กริยาการควบคุมแบบ ON-OFF.....	6
2.2.2 กริยาการควบคุมแบบ Proportional (P).....	7
2.2.3 กริยาการควบคุมแบบ Integral (I).....	8
2.2.4 กริยาการควบคุมแบบ Derivative (D).....	9
2.2.5 กริยาการควบคุมแบบ Proportional-Integral (PI).....	10
2.2.6 กริยาการควบคุมแบบ Proportional-Derivative (PD).....	11
2.2.7 กริยาการควบคุมแบบ Proportional-Integral-Derivative (PID).....	11
2.3 สมการ PID สำหรับการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์.....	13
2.4 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมPIDจากผลตอบสนองของกระบวนการ.....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.4.1 การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ด้วยวิธี ของ Ziegler-Nichols.....	14
2.4.1.1 การปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Process Reaction Curve.....	15
2.4.1.2 การปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Ultimate Method.....	17
2.4.1.3 การปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Damped Oscillation.....	19
2.5 กระบวนการ (Plant or Process).....	20
2.5.1 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน.....	20
2.5.1.1 การนำความร้อน.....	20
2.5.1.2 การพาความร้อน.....	20
2.5.1.2.1 การพาความร้อนตามธรรมชาติ (Natural Convection).....	21
2.5.1.2.2 การพาความร้อนโดยบังคับ (Force Convection).....	21
2.5.1.3 การแผ่รังสีความร้อน.....	23
2.5.2 ทฤษฎีการอนุรักษ์พลังงาน.....	23
2.5.3 ระบบความร้อน.....	25
<b>บทที่ 3 การออกแบบและสร้างชุดทดลอง.....</b>	<b>28</b>
3.1 กล่าวนำ.....	28
3.2 โครงสร้างโดยรวม.....	32
3.3 การทำงานของกระบวนการ.....	30
3.3.1 ส่วนอินพุทที่เข้าสู่กระบวนการ.....	30
3.3.2 ส่วนเอาต์พุทที่ออกจากกระบวนการ.....	34
3.3.3 ส่วนภาระของระบบ.....	40
3.3.4 ชุดอินเตอร์เฟซ.....	42
3.3.4.1 ส่วนอินพุท.....	43
3.3.4.2 ส่วนรับ-ส่ง ข้อมูล ไปยังคอมพิวเตอร์.....	44
3.3.4.3 ส่วนเอาต์พุท.....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3.5 ส่วนของ Software.....	47
<b>บทที่ 4 การทดลอง.....</b>	<b>49</b>
4.1 กล่าวนำ.....	49
4.2 การทดลองส่วนของกระบวนการ.....	49
4.2.1 ผลการทดลองเมื่อใช้ตัวควบคุมของบริษัท โยโกกาวาอิอิเล็กทรอนิกส์.....	50
4.2.2 ผลการทดลองเมื่อใช้ตัวควบคุมที่ได้สร้างขึ้น.....	52
4.3 การทดลองส่วนอุปกรณ์.....	54
4.4 สรุปผลการทดลอง.....	55
<b>บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>56</b>
5.1 สรุปผล.....	56
5.2 ปัญหา.....	56
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	56
<b>บรรณานุกรม.....</b>	<b>57</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจากการคำนวณด้วยวิธี Process Reaction Curve.....	16
2.2 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจากการคำนวณด้วยวิธีแบบ Ultimate Method.....	18
4.1 แสดงค่ากำลังงาน ที่จ่ายให้กับชุดทำความร้อน.....	54



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบป้อนกลับโดยทั่วไป.....	3
2.2 แสดงกราฟการควบคุมแบบ ON-OFF.....	6
2.3 แสดงคุณสมบัติของกราฟการควบคุมแบบ Proportional.....	7
2.4 แสดงผลตอบสนองของกราฟการควบคุมแบบ Integral.....	8
2.5 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของกราฟการควบคุมแบบ Derivative.....	9
2.6 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของกราฟการควบคุมแบบ PI (Direct action).....	10
2.7 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของกราฟการควบคุมแบบ PD.....	11
2.8 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของกราฟการควบคุมแบบ PID (Direct action).....	12
2.9 แสดงโครงสร้างของระบบควบคุมแบบ PID.....	15
2.10 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการเมื่อมีการปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Ziegler-Nichols.....	15
2.11 แสดงวิธีการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Process Reaction Curve.....	16
2.12 การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Process Reaction Curve.....	16
2.13 แสดงบล็อกไดอะแกรมการหาค่าพารามิเตอร์แบบ Ultimate Method.....	17
2.14 แสดงวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยวิธี Ultimate Method.....	18
2.15 แสดง ผลตอบสนองของกระบวนการแบบวงปิดที่มีอัตราเสื่อม $\frac{1}{4}$ .....	19
2.16 แสดงลักษณะการกระจายความเร็วและอุณหภูมิของของไหลและขณะเกิดการพา ความร้อนบริเวณใกล้ผิวให้ความร้อน.....	20
2.17 แสดงลักษณะการพาความร้อนตามธรรมชาติ.....	21
2.18 แสดงลักษณะการพาความร้อนแบบบังคับ.....	21
2.19 แสดงลักษณะการพาความร้อนในชั้นขีดผิวความร้อนและชั้นขีดผิวความเร็ว.....	22
2.20 แสดงหลักการพลังงานสมดุลในสภาวะคงตัว.....	24
2.21 แสดงระบบความร้อน.....	25
2.22 แสดง Block diagram ของระบบความร้อน.....	27
3.1 แสดงโครงสร้างโดยรวมของกระบวนการที่ออกแบบไว้.....	28
3.2 แสดงโครงสร้างโดยรวมของกระบวนการที่สร้างขึ้นจริง.....	29
3.3 แสดงระบบควบคุมอุณหภูมิที่สร้างขึ้น.....	29
3.4 แสดงอุปกรณ์ทำความร้อนที่ใช้ในกระบวนการ.....	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นใบแจ้งเบาะแสหรือข้อผิดพลาด  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 แสดงจุดที่ติดตั้งอุปกรณ์ทำความร้อน.....	31
3.6 แสดงวงจรควบคุมมุมจุดชนวนเกิดที่ควบคุมด้วยสัญญาณอนาลอก.....	32
3.7 แสดงชุดวงจรควบคุมเฟสที่สร้างขึ้น.....	33
3.8 แสดงไอซีเบอร์ LM33.....	34
3.9 แสดงจุดที่ติดตั้งไอซีเบอร์ LM335.....	34
3.10 ลักษณะรูปร่างและการต่อขาของ LM 335Z.....	35
3.11 แสดงวงจรพื้นฐานการใช้งานของ LM 335.....	36
3.12 แสดงการปรับแต่งความถูกต้องอย่างง่าย ๆ โดยใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้เพียงตัวเดียว.....	37
3.13 แสดงการตอบสนองของ LM 335 ต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในอากาศ.....	37
3.14 แสดงวงจรที่สามารถทำงานกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าได้ในย่านกว้าง.....	38
3.15 แสดงวงจรวัดอุณหภูมิที่ออกแบบไว้.....	39
3.16 แสดงวงจรวัดอุณหภูมิที่สร้างขึ้น.....	39
3.17 แสดงด้านหน้าของชุดระบายความร้อน.....	40
3.18 แสดงด้านหลังของชุดระบายความร้อน.....	40
3.19 แสดงวงจรควบคุมความเร็วรอบของพัดลม.....	41
3.20 แสดงชุดควบคุมความเร็วรอบของพัดลมที่สร้างขึ้น.....	41
3.21 แสดงสวิตช์ปรับความเร็วของพัดลมระบายอากาศ.....	42
3.22 แสดงโครงสร้างโดยรวมในส่วนอินเตอร์เฟส.....	43
3.23 แสดงช่องรับสัญญาณมาตรฐาน 1-5 โวลต์ทั้ง 4 ช่องสัญญาณ.....	43
3.24 แสดงการเชื่อมต่อระหว่าง PCF 8591 กับ AT89C51.....	44
3.25 แสดงการต่อวงจรใช้งาน MAX 232.....	45
3.26 แสดงวงจร V to I ที่ใช้ในส่วนอินเตอร์เฟส.....	45
3.27 แสดงชุดอินเตอร์เฟสที่สร้างขึ้น.....	46
3.28 แสดงโพลีชาร์ตการทำงานของ PID ดิจิตอลบนคอมพิวเตอร์.....	47
3.29 แสดงหน้าจอ PID Parameter.....	48
3.30 แสดงหน้าจอกราฟ.....	48
4.1 แสดง Process Reaction Curve ที่ได้.....	49
4.2 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการ ที่ SP = 40 %.....	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการ ที่ SP = 50 %.....	51
4.4 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการ ที่ SP = 60 %.....	52
4.5 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการ ที่ SP = 40 %.....	52
4.6 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการ ที่ SP = 50 %.....	53
4.7 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการ ที่ SP = 60 %.....	53



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและแรงจูงใจในการทำปริญญาโท

ในการควบคุมกระบวนการทางอุตสาหกรรมต่าง ๆ จะต้องใช้บุคลากร ที่มีความรู้ ความสามารถ ตลอดจนความเข้าใจเกี่ยวกับอุปกรณ์การวัดและการควบคุมชนิดต่าง ๆ เป็นอย่างมาก ในปัจจุบันเทคโนโลยีการวัดและควบคุม ได้พัฒนาไปอย่างมากและรวดเร็ว เพื่อให้เกิดผลผลิตที่มี คุณภาพสูงและต้นทุนการผลิตที่ต่ำ เทคโนโลยีที่ใช้จะถูกนำเข้าจากต่างประเทศทั้งสิ้น เป็นผลให้ การพัฒนาเทคโนโลยีขึ้นในประเทศ เพื่อการทดแทนถูกละเลย นักศึกษาตลอดจนบุคลากรใน ภาควิศวกรรมจะเป็นเพียงผู้ตามและ ผู้บริโภค เทคโนโลยีนำเข้าจากต่างประเทศ การวิจัยและ พัฒนาเทคโนโลยีทางการวัดและควบคุม จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมากที่จะเสริมสร้างและกระตุ้น ให้เกิดการพึ่งพาตนเอง การพัฒนาบุคลากรให้สามารถเข้าใจในด้านทฤษฎีและปฏิบัติ เพื่อสร้าง เทคโนโลยีขึ้นเองได้นั้น จะต้องอาศัยความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับเทคนิควิธีการวัดและควบคุมชนิด ต่าง ๆ ในระบบควบคุมกระบวนการทางอุตสาหกรรม การเสริมสร้างความทางด้านทฤษฎีนั้น ทางภาควิศวกรรมการวัดควมมีความพร้อมอยู่มาก เนื่องจากมีบุคลากรที่มีความรู้ความสามารถ พร้อม ในทางตรงกันข้ามการศึกษาทางด้านปฏิบัติจะมีข้อจำกัดอยู่มาก อันเนื่องมาจากเครื่องมือที่ ใช้มีราคาที่สูงมาก ตลอดจนเทคโนโลยีที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว และเป็นการนำเข้า จากต่างประเทศ เป็นผลให้เครื่องมือที่มีอยู่ใช้งานได้อย่างไม่มีประสิทธิภาพ ในการรองรับการ เปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นปัญหาหลักในการพัฒนาบุคลากรและเป็นปัญหาใหญ่ ของระบบการเรียนการสอนในสาขานี้ในทุกหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ในการศึกษาทางด้านปฏิบัติจึง จำเป็นที่จะต้องมุ่งปฏิบัติการณ์ที่มีความคล่องตัวและเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบต่าง ๆ ที่สามารถ รองรับและเสริมสร้างเทคโนโลยีใหม่ ๆ ได้ ทางภาควิศวกรรมการวัดควมจึง ได้ดำเนินการวิจัย และพัฒนาชุดปฏิบัติการการควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งการควบคุมอุณหภูมิจะเป็นกระบวนการหลัก กระบวนการหนึ่งที่มีความสำคัญมากในระบบอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมกลั่นน้ำมัน อุตสาหกรรมน้ำตาล อุตสาหกรรมยาง อุตสาหกรรมเครื่องดื่มและ อุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น เพื่อใช้เป็นชุดปฏิบัติการเสริมสร้างความรู้และความเข้าใจ ตลอดจน ก่อให้เกิดแนวความคิด ทั้งทางด้านทฤษฎีและเทคโนโลยีการวัดควมใหม่ ๆ ขึ้น และเป็นการลด การนำเข้าชุดปฏิบัติการและเทคโนโลยีราคาแพงจากต่างประเทศ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

1. ศึกษาการทำงานของกระบวนการ
2. ศึกษาการทำงานของเครื่องควบคุม
3. ศึกษาการทำงานของ PID บนคอมพิวเตอร์
4. เพื่อสร้างชุดทดลองการควบคุมอุณหภูมิ

## 1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

1. ศึกษาการทำงาน และออกแบบกระบวนการควบคุมอุณหภูมิ
2. ศึกษาฟังก์ชันการทำงาน และการใช้งานของเครื่องควบคุมที่มีใช้ในปัจจุบัน
3. ศึกษาการทำงาน และออกแบบส่วนของวงจรรินเตอร์เฟส
4. ศึกษาการทำงานและเขียนโปรแกรมของ PID ดิจิตอล โดยใช้โปรแกรม Visual Basic
5. ออกแบบกระบวนการ โดยมีรายละเอียดดังนี้
  - ถังน้ำขนาดเล็ก
  - ชุดควบคุมเฟส เป็นการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับชุดทำความร้อน
  - ใช้ IC Temp. เป็นตัววัดอุณหภูมิ
6. ออกแบบเครื่องควบคุมโดยใช้โปรแกรม Visual Basic เป็นตัวประมวลผล โดยมีรายละเอียดดังนี้
  - เครื่องควบคุมสามารถเลือก Auto , Manual ได้
  - สัญญาณอินพุต 1-5 VDC จำนวน 1 ช่องสัญญาณ
  - สัญญาณเอาต์พุต 4-20 mA จำนวน 1 ช่องสัญญาณ
7. สร้างเครื่องต้นแบบ
8. ทดสอบสมรรถภาพของกระบวนการและตัวควบคุม

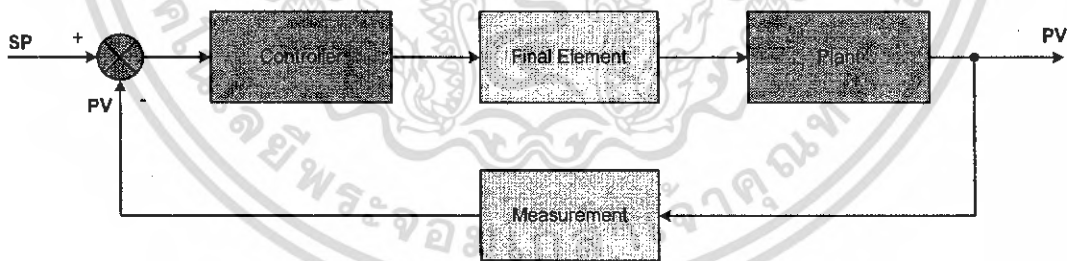
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและหลักการ

### 2.1 กล่าวนำ

โดยทั่วไปเป้าหมายของระบบควบคุมกระบวนการต่าง ๆ ในอุตสาหกรรม คือ การรักษาปริมาณทางฟิสิกส์ อันได้แก่อุณหภูมิ (Temperature) แรงดัน (Pressure) ระดับ (Level) และอื่น ๆ ให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการมากที่สุด ซึ่งการควบคุมที่ดีย่อมเริ่มจากการเลือกแบบควบคุมที่เหมาะสม บางโรงงานอาจใช้การควบคุมแบบง่าย ๆ ด้วยมือ (Manual Control) ซึ่งอาศัยพนักงาน (Operator) คอยทำหน้าที่เกี่ยวกับการตรวจวัดและปรับแต่งการควบคุมให้ผลตอบสนองเป็นไปตามต้องการ จะเห็นได้ว่าการควบคุมแบบนี้จำเป็นต้องอาศัยประสบการณ์ และความชำนาญของพนักงานเป็นหลัก แต่ในความเป็นจริงแล้วมนุษย์หรือพนักงานไม่สามารถทำงานให้ได้ดีเท่ากันตลอดเวลา จึงทำให้ประสิทธิภาพของการควบคุมลดลง ปัจจุบันโรงงานที่ต้องการการควบคุมที่มีความแม่นยำและประสิทธิภาพสูง จำเป็นต้องนำเครื่องควบคุมอัตโนมัติ (Automatic Control) มาใช้งาน โดยเครื่องควบคุมอัตโนมัติจะทำหน้าที่หลักในการคำนวณหาสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมตามกฎเกณฑ์การควบคุม (Control Law) ที่พนักงานได้กำหนดไว้ล่วงหน้า ซึ่งระบบควบคุมอัตโนมัติที่เราพบเห็นกันอยู่บ่อย ๆ ในโรงงานอุตสาหกรรม ก็คือ ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control System) ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ โดยทั่วไป แสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบป้อนกลับโดยทั่วไป

ระบบควบคุมทางอุตสาหกรรมแบบป้อนกลับโดยทั่วไปประกอบไปด้วยอุปกรณ์ 4 ส่วน คือ

**2.1.1 ตัวควบคุม (Controller)** เป็นเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างสัญญาณควบคุมเพื่อทำหน้าที่ควบคุมให้ระบบหรือกระบวนการที่ต้องการควบคุมมีเอาต์พุต หรือผลตอบสนองเป็นไปตามต้องการ ตัวควบคุมมีหลายแบบ เช่นตัวควบคุมแบบ ON-OFF (ตัวควบคุมแบบสองตำแหน่ง) ตัวควบคุมแบบ Proportional (P) ตัวควบคุมแบบ Integral (I) ตัวควบคุมแบบ Derivative (D)หรือการใช้ตัวควบคุมหลาย ๆ แบบร่วมกัน เช่นตัวควบคุมแบบ PI ตัวควบคุมแบบ PD และตัวควบคุมแบบ PID เป็นต้น ซึ่งสัญญาณที่ออกจากตัวควบคุมคือตัวแปรปรับกระบวนการ

**2.1.2 อุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย (Final Control Element)** คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ปรับสถานะของกระบวนการ ด้วยการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรปรับกระบวนการ ตามคำสั่งหรือสัญญาณควบคุมที่ได้รับจากตัวควบคุม อุปกรณ์ควบคุมสุดท้ายนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายอย่างด้วยกัน เช่น วาล์วควบคุม (Control Valve) อินเวอร์เตอร์ (Inverter) และ ตัวกระทำ (Actuator) เป็นต้น แต่ที่มักพบเห็นกันมากคือ วาล์วควบคุม

**2.1.3 กระบวนการ (Plant or Process)** หมายถึง ระบบหรือกระบวนการทางฟิสิกส์ที่ต้องการควบคุมให้มีสถานะเป็นไปตามต้องการ เช่น การควบคุมระดับของเหลว กระบวนการเกี่ยวกับการควบคุมอุณหภูมิ เป็นต้น ซึ่งสถานะของกระบวนการ แสดงด้วยตัวแปรกระบวนการ (Process Variable :pv)

**2.1.4 อุปกรณ์การวัด (Measurement)** หมายถึง อุปกรณ์ซึ่งอาจได้แก่ เซนเซอร์ (Sensor) ทรานสดิวเซอร์ (Transducer) , หรืออุปกรณ์แปลง (Transmitter) หรือเครื่องวัดสัญญาณอื่น ๆ ในกระบวนการเพื่อนำสัญญาณที่ได้ไปใช้เป็นตัวแปรการควบคุม โดยสัญญาณขาออกของอุปกรณ์วัด โดยทั่วไปจะเป็นสัญญาณมาตรฐานทางอุตสาหกรรม เช่นสัญญาณกระแสไฟฟ้า 4-20 มิลลิแอมป์ (4-20 mA dc.) สัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 1-5 โวลต์ (1-5V dc.) หรือสัญญาณลมขนาด 3-15 ปอนด์/ตารางนิ้ว (3-15 psi หรือ 0.2-1.0kg/cm<sup>2</sup>) เป็นต้น

## 2.2 การควบคุมแบบป้อนกลับโดยใช้ตัวควบคุมแบบ PID

ตัวควบคุมแบบ PID ถูกนำมาควบคุมกระบวนการการผลิตอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมมากกว่า 50 ปี ในปัจจุบันตัวควบคุม PID ก็ยังได้รับความนิยมอยู่เนื่องจาก รูปแบบของตัวควบคุมสามารถควบคุมกระบวนการได้อย่างกว้างขวาง ไม่ว่ากระบวนการนั้นจะมีผลตอบสนองต่อความถี่ต่ำ ความถี่กลาง ความถี่สูง ตัวควบคุมก็สามารถควบคุมกระบวนการได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตัวควบคุม PID ประกอบไปด้วยตัวควบคุมแบบ P (Proportional) ตัวควบคุมแบบ I (Integral) ตัวควบคุมแบบ D (Derivative) ซึ่งมีฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ดังนี้

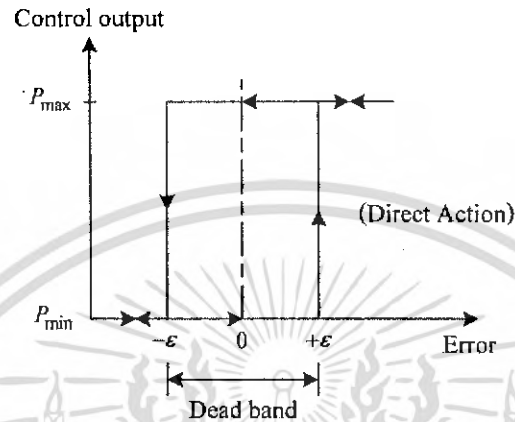
$$m(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.1)$$

โดยที่  $K_p$  = ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบ P (Proportional Gain)  
 $T_i$  = ค่าเวลา Integral (Integral Time)  
 $T_d$  = ค่าเวลา Derivative (Derivative Time)

จากรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าสัญญาณควบคุมหรือตัวแปรปรับกระบวนการ ( $mv$ ) ที่ได้จากตัวควบคุม PID จะถูกกำหนดด้วยความสัมพันธ์ ระหว่างสัญญาณขาเข้าตัวควบคุมกับตัวแปรกระบวนการ ( $pv$ ) กับสัญญาณอ้างอิงหรือค่าเป้าหมาย ( $sp$ ) โดยที่ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับกฎเกณฑ์การควบคุมที่ผู้ควบคุมปรับแต่งไว้ล่วงหน้า (ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID) ซึ่งสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมจะเป็นไปตามกฏการควบคุมแบบต่าง ๆ ดังที่จะกล่าวต่อไป

### 2.2.1 ฏริยาการควบคุมแบบ ON-OFF

การควบคุมแบบ ON-OFF เป็นการควบคุมที่ง่ายที่สุด และนิยมใช้ในการควบคุม กระบวนการที่ไม่ต้องการความเที่ยงตรงสูง โดยการควบคุมจะทำงานเพียง 2 สถานะ คือ เปิด (100%) กับปิด (0%) ฏริยาการควบคุมแบบ ON-OFF ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงฏริยาการควบคุมแบบ ON-OFF

จากรูปที่ 2.2 จะเห็นว่าถ้าค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่าค่าวิกฤต ( $+\varepsilon$ ) ค่าเอาต์พุทของ ตัวควบคุมจะเปลี่ยนจาก 0% เป็น 100% เมื่อค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าค่าวิกฤต ( $-\varepsilon$ ) ค่าเอาต์พุทของตัวควบคุม จะเปลี่ยนจาก 100% เป็น 0% ค่าเอาต์พุทที่อยู่ในช่วงเดธแบนด์ (Dead - Band) จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากการเสียดทานที่ไม่ได้คาดไว้ก่อน หรือบางครั้งก็จำเป็นต้องทำให้เกิดช่วงเดธแบนด์ขึ้น เพื่อป้องกันการ ON-OFF บ่อยเกินไปอันจะทำให้ อุปกรณ์ควบคุมหรือกระบวนการ ได้รับความเสียหาย แต่ช่วงเดธแบนด์นี้ต้องไม่กว้างนักเพราะ จะทำให้ค่าความเที่ยงตรงของการควบคุมลดลง ฏริยาการควบคุมแบบ ON-OFF สามารถเขียนเป็น สมการได้ดังนี้

$$m(t) = \begin{cases} 0\% & , e < -\varepsilon \\ 100\% & , e > +\varepsilon \end{cases} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $m(t)$  = สัญญาณควบคุมหรือเอาต์พุทของตัวควบคุม  
 $e(t)$  = ค่าความคลาดเคลื่อน  
 $\varepsilon$  =  $\frac{1}{2}$  ของค่าเดธแบนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.2 ฏรยการควบคุมแบบ Proportional (P)

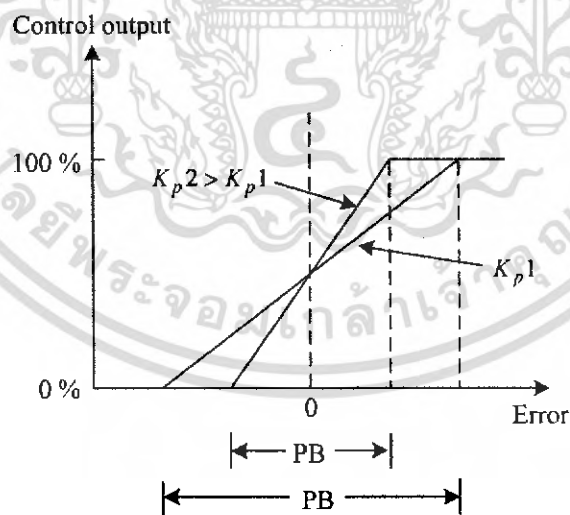
ฏรยการควบคุมแบบ P นั้น ค่าเอาต์พุทของตัวควบคุมจะแปรผันตรงกับค่าความคลาดเคลื่อน กล่าวคือ ถ้าค่าความคลาดเคลื่อนมีค่ามากขึ้น ค่าเอาต์พุทของตัวควบคุมก็จะมีค่ามากขึ้นตาม และถ้าค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อยลง ค่าเอาต์พุทของตัวควบคุมก็จะมีค่าน้อยลงตาม ฏรยการควบคุมแบบ P สามารถเป็นเขียนสมการได้ดังนี้

$$m_p(t) = K_p e(t) + \bar{m} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $m_p(t)$  = ค่าเอาต์พุทของตัวควบคุมแบบ Proportional  
 $K_p$  = อัตราขยายของตัวควบคุมแบบ Proportional  
 $\bar{m}$  = ค่าเอาต์พุทของตัวควบคุมที่ค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับศูนย์

ตัวควบคุมแบบ P บางตัวอาจจะใช้ค่า Proportional Band (PB) แทนการใช้ค่า  $K_p$  ซึ่ง PB คือ ช่วงของค่าความคลาดเคลื่อน ระหว่างที่เอาต์พุทของตัวควบคุมมีค่า 0-100% ดังสมการ (2.4)

$$PB = \frac{100\%}{K_p} \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติของฏรยการควบคุมแบบ Proportional

ข้อเสียของฏรยการควบคุมแบบ Proportional คือ ไม่สามารถกำจัดค่าออฟเซตได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

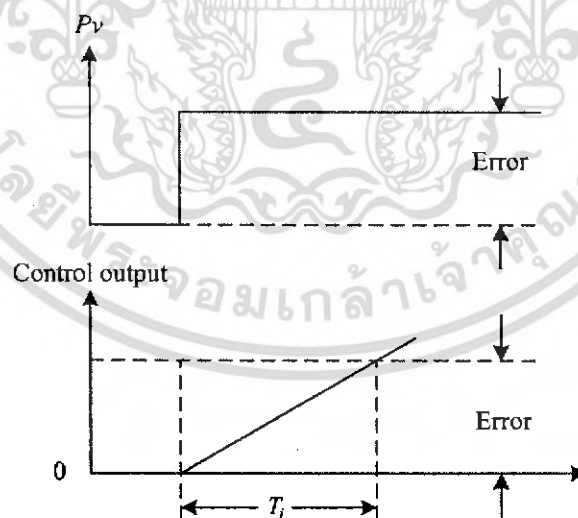
### 2.2.3 กริยาการควบคุมแบบ Integral (I)

กริยาการควบคุมแบบ I หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การควบคุมแบบรีเซ็ต (Reset Control) โดยค่าเอาต์พุตของตัวควบคุม หาได้จากค่าพื้นที่ทั้งหมดภายใต้กราฟของค่าความคลาดเคลื่อนต่อเวลาคูณกับค่าคงที่ ที่เรียกว่า อัตราขยายของตัวควบคุมแบบ I (Integral Gain) ดังสมการต่อไปนี้

$$m_I(t) = K_I \int_0^t e(t) dt + \bar{m}_I(0) \quad (2.5)$$

เมื่อ  $m_I(t)$  = ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ Integral  
 $K_I$  = อัตราขยายของตัวควบคุมแบบ Integral  
 $\int_0^t e(t) dt$  = พื้นที่ทั้งหมดของค่าความคลาดเคลื่อน  
 $\bar{m}_I(0)$  = ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมที่เวลา  $t$  เท่ากับศูนย์

ผลของกริยาการควบคุมแบบ I นี้จะทำให้ไม่เกิดออฟเซ็ทขึ้นในระบบและลดค่าพุ่งเกิน (Overshoot) ของระบบลงได้ แต่ถ้ากริยาการควบคุมมีค่าสูงเกินไปจะทำให้ผลตอบสนองของกระบวนการช้าลง ผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบ I แสดงดังรูปที่ 2.3



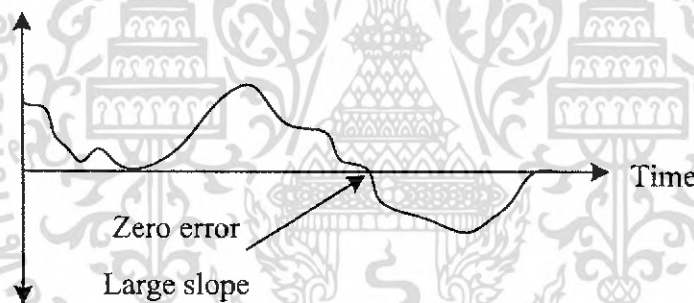
รูปที่ 2.4 แสดงผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบ Integral

### 2.2.4 กริยาการควบคุมแบบ Derivative (D)

กริยาการควบคุมแบบ D เรียกอีกชื่อหนึ่งว่าการควบคุมแบบอัตราส่วน (Rate Action) โดยสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมจะขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความคลาดเคลื่อนต่อเวลา จะเห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนนี้มีโอกาสเป็นศูนย์ได้ และค่าเอาต์พุตก็สามารถเปลี่ยนแปลงให้มีค่าสูงขึ้น เมื่อความคลาดเคลื่อนเปลี่ยนแปลง ซึ่งเรียกการกระทำดังกล่าวว่า อัตราการกระทำ (Rate Action) ดังสมการต่อไปนี้

$$m_D(t) = K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $m_D(t)$  = ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ Derivative  
 $K_D$  = อัตราขยายของตัวควบคุมแบบ Derivative  
 $\frac{de(t)}{dt}$  = ค่าความคลาดเคลื่อนที่เวลา  $t$



รูปที่ 2.5 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบ Derivative

### 2.2.5 ฏริยการควบคุมแบบ Proportional-Integral (PI)

ตามทีกล่าวมาแล้วว่าฏริยการควบคุมแบบ P นั้น จะมีออฟเซ็ทเกิดขึ้น ซึ่งการกำจัดค่าออฟเซ็ทนี้สามารถทำได้โดยการเพิ่มฏริยการควบคุมแบบ I เข้าไป ดังนั้นสมการเอาท์พุทของตัวควบคุมแบบ PI นี้ ดังสมการ

$$m_{PI}(t) = \bar{m} + K_P e(t) + K_P K_I \int_0^t e(t) dt \quad (2.7)$$

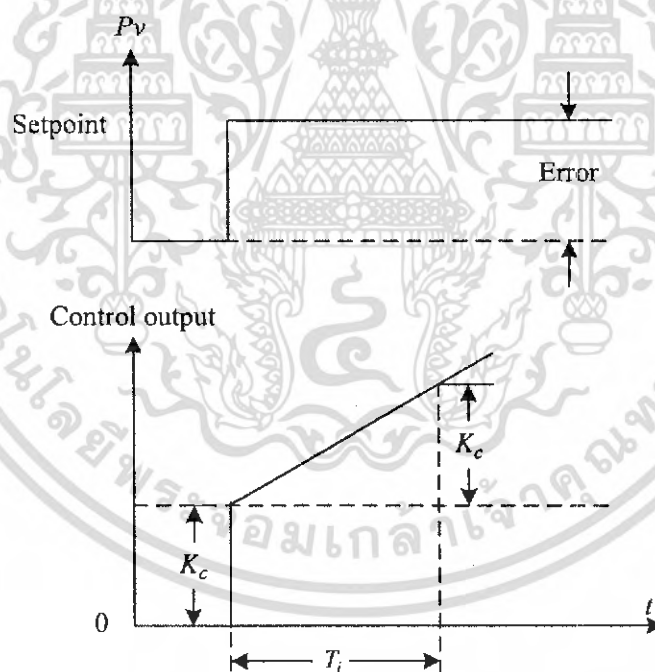
หรือ

$$m_{PI}(t) = \bar{m} + K_c e(t) + \frac{K_c}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (2.8)$$

เมื่อ

$$K_c = K_p \quad \text{และ} \quad K_I = 1/T_i$$

$T_i$  = ค่าเวลา Integral



รูปที่ 2.6 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของฏริยการควบคุมแบบ PI (Direct action)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.6 ฏริยาการควบคุมแบบ Proportional-Derivative (PD)

การประกบยุดค้ใช้ฏริยาการควบคุมแบบ P ร่วมกับฏริยาการควบคุมแบบ D เพื่อทำให้ผลตอบสนองของระบบรวดเร็วขึ้น แต่จะไม่มีผลโดยตรงต่อผลตอบสนองของระบบที่สภาวะคงที่ ซึ่งสมการเอาท์พุทของฏริยาการควบคุมแบบ PD แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$m_{PD}(t) = \bar{m} + K_p e(t) + K_p K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.9)$$

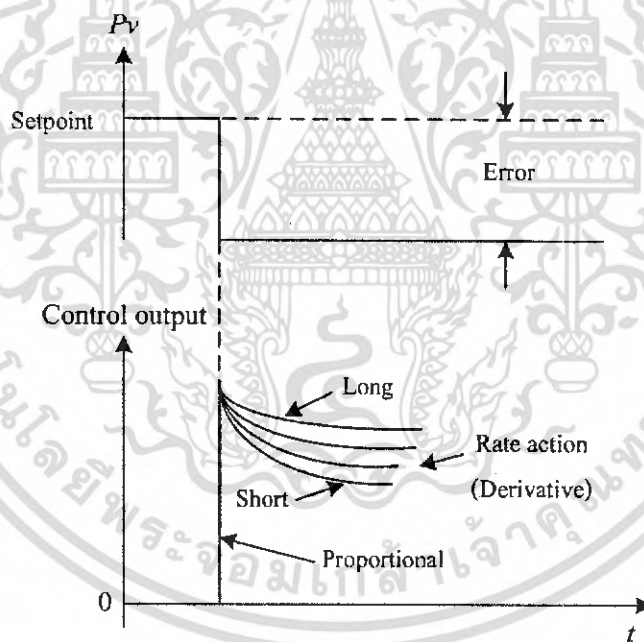
หรือ

$$m_{PD}(t) = \bar{m} + K_c e(t) + K_c T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.10)$$

เมื่อ

$$K_D = T_d$$

$T_d$  = ค่าเวลา Derivative



รูปที่ 2.7 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของฏริยาการควบคุมแบบ PD

### 2.2.7 ฏริยาการควบคุมแบบ Proportional-Integral-Derivative (PID)

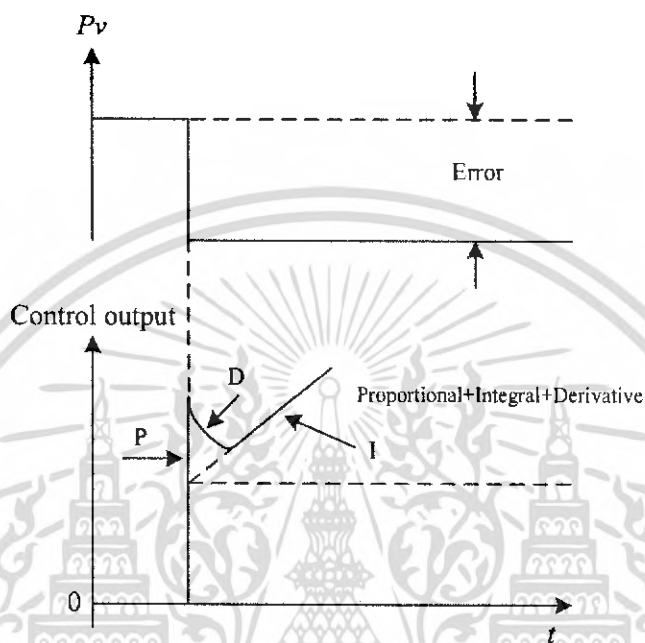
จากที่ได้กล่าวมาแล้ว เพื่อให้ผลตอบสนองของระบบควบคุม มีสมรรถนะเป็นไปตามต้องการจึงใช้ฏริยาการควบคุมทั้ง 3 แบบร่วมกัน ซึ่งจะทำให้ได้ฏริยาการควบคุมแบบ PID ที่มีสมการดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$m_{PID}(t) = \bar{m} + K_p e(t) + K_p K_I \int_0^t e(t) dt + K_p K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.11)$$

หรือ

$$m_{PID}(t) = \bar{m} + K_c e(t) + \frac{K_c}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_c T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.12)$$



รูปที่ 2.8 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของกรียาการควบคุมแบบ PID (Direct action)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3 สมการ PID สำหรับการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์

จากสมการที่ 2.12 คอมพิวเตอร์ไม่สามารถนำสมการนี้ไปใช้ในการประมวลผลได้โดยตรง จึงต้องทำการแปลงเป็นสมการดิฟเฟอเรนเชียลต่อเนื่องแบบย่อย (Discrete Differential Equation) เพื่อให้คอมพิวเตอร์ประมวลผลได้ดังนี้

สมการพื้นฐานของ PID คือ

$$m(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.13)$$

จากสมการ (3.3) ได้อนุพันธ์อันดับหนึ่งคือ

$$\begin{aligned} \frac{dm(t)}{dt} &= K_p \left[ \frac{de(t)}{dt} + \frac{1}{T_i} \frac{d}{dt} \int e(t) dt + T_d \frac{d}{dt} \left[ \frac{de(t)}{dt} \right] \right] \\ &= K_p \left[ \frac{de(t)}{dt} + \frac{1}{T_i} e(t) + T_d \frac{d^2 e(t)}{dt^2} \right] \end{aligned} \quad (2.14)$$

กำหนดให้

$$e(t) = e_n$$

$$\frac{dm(t)}{dt} = \frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{m_n - m_{n-1}}{\Delta t}$$

$$\frac{de(t)}{dt} = \frac{\Delta e}{\Delta t} = \frac{e_n - e_{n-1}}{\Delta t}$$

ดังนั้น

$$\frac{m_n - m_{n-1}}{\Delta t} = K_p \left[ \frac{e_n - e_{n-1}}{\Delta t} + \frac{1}{T_i} e_n + T_d \frac{d}{dt} \left( \frac{e_n - e_{n-1}}{\Delta t} \right) \right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= K_p \left[ \frac{e_n - e_{n-1}}{\Delta t} + \frac{1}{T_i} e_n + T_d \frac{(e_n - e_{n-1}) - (e_{n-1} - e_{n-2}))}{\Delta t^2} \right]$$

$$m_n - m_{n-1} = K_p \left[ (e_n - e_{n-1}) + \frac{1}{T_i} e_n \Delta t + T_d \frac{(e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2}))}{\Delta t} \right]$$

$$m_n = m_{n-1} + K_p \left[ (e_n - e_{n-1}) + \frac{\Delta t}{T_i} e_n + \frac{T_d}{\Delta t} (e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2}) \right] \quad (2.15)$$

เมื่อ  $m(t)$  คือ ค่าตัวแปรปรับกระบวนการ (Manipulate Variable)

$\Delta t$  คือ Sampling Time

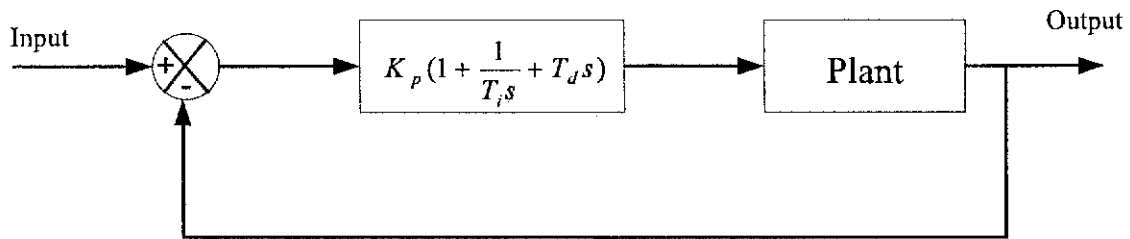
## 2.4 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID จากผลตอบสนองของกระบวนการ

ค่าพารามิเตอร์ที่นำมาปรับใช้ จะขึ้นอยู่กับผลตอบสนองที่ต้องการและคุณสมบัติทางพลศาสตร์ หรือคุณลักษณะของอุปกรณ์อื่น ๆ ในวงรอบการควบคุมของแต่ละกระบวนการหากกระบวนการไม่เป็นเชิงเส้น คุณลักษณะของกระบวนการก็จะแตกต่างกันไปในแต่ละสภาวะการทำงานซึ่งหมายถึงการปรับค่าพารามิเตอร์ จะให้ผลตอบสนองที่เหมาะสมในสภาวะใดสภาวะหนึ่งของการทำงานเท่านั้น แต่ตัวควบคุมป้อนกลับแบบมาตรฐานเป็นอุปกรณ์เชิงเส้นพื้นฐาน ซึ่งเมื่ออยู่ในช่วงของสภาวะการทำงานการปรับค่าพารามิเตอร์ก็สามารถทำได้ โดยผลตอบสนองจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ เมื่อปรับใช้ค่าใดค่าหนึ่งของช่วงและจะเกิดการแกว่งเมื่อปรับใช้ค่าอื่น ๆ การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID เป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้ได้การควบคุมที่ดีที่สุดซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี บางวิธีจะพิจารณาจากผลตอบสนองของระบบและอาศัยประสบการณ์ บางวิธีจะใช้ทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ แต่ส่วนใหญ่จะพิจารณาจากเงื่อนไขในโดเมนเวลามากกว่าในโดเมนความถี่ ถึงแม้ว่าวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อนำมาปรับใช้ในตัวควบคุมมีด้วยกันหลายวิธี แต่ไม่สามารถสรุปได้ว่าวิธีการใดเป็นวิธีการที่ดีที่สุด เนื่องจากต้องขึ้นอยู่กับกระบวนการที่จะนำไปใช้และผลตอบสนองที่ต้องการด้วยเช่นกัน

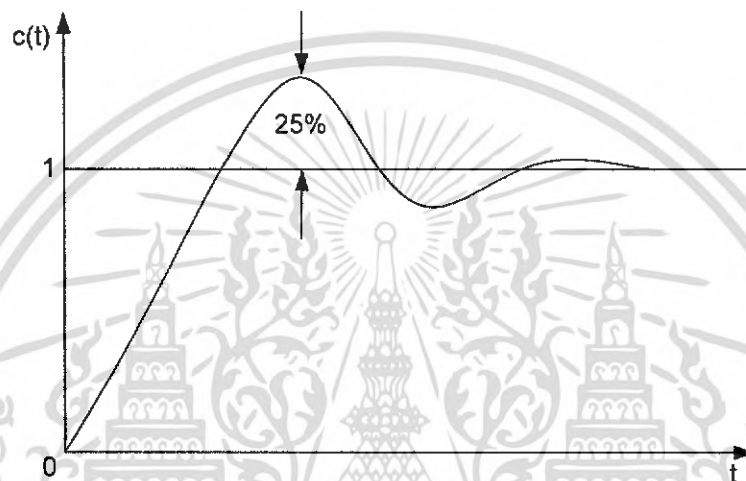
### 2.4.1 การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ด้วยวิธี ของ Ziegler-Nichols

ในปัจจุบันวิธีของ Ziegler-Nichols เป็นวิธีการที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยการหาค่า  $K_p, T_i, T_d$  จะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของผลตอบสนองชั่วครู่ของระบบที่ถูกควบคุม ซึ่งมีอยู่ 2 วิธี แต่ละวิธีมีจุดมุ่งหมายที่จะให้ผลตอบสนองของกระบวนการต่ออินพุทแบบขั้นบันได มีค่าพุงเกินสูงสุดไม่เกิน 25 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างของระบบควบคุมแบบ PID



รูปที่ 2.10 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการเมื่อมีการปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Ziegler-Nichols

#### 2.4.1.1 การปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Process Reaction Curve

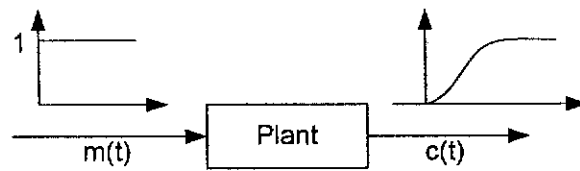
วิธีการนี้จะหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID จากผลตอบสนองของกระบวนการเมื่อมีการป้อนอินพุตแบบขั้นบันได โดยที่ระบบไม่ได้ต่อร่วมกับตัวควบคุมและมีผลตอบสนองในลักษณะตัว S ซึ่งไม่สามารถใช้วิธีการนี้กับกระบวนการที่ไม่มีการตอบสนองในลักษณะตัว S ได้

วิธีการนี้จะแยกพิจารณาค่าคงที่ 2 ค่า คือ ค่าเวลาหน่วง (Delay time)  $t_0$  และค่าเวลาคงที่ (Time Constant)  $\tau$  โดยการลากเส้นสัมผัสสุดที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุด เส้นนี้จะตัดกับแกนเวลาและเส้นตรงของเอ๊าท์พุท  $c(t)$  ที่  $c(t) = K$

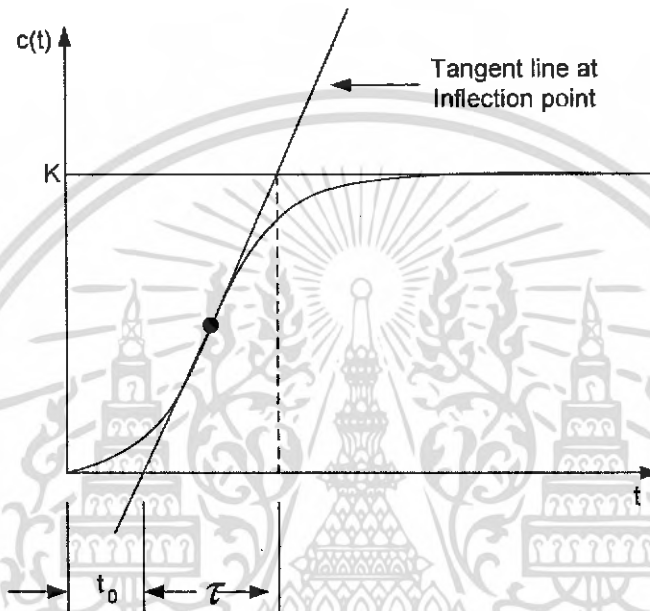
ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนจะประมาณได้ด้วยระบบอันดับหนึ่งที่มีการหน่วงเวลา คือ

$$\frac{C(s)}{M(s)} = \frac{Ke^{-t_0 s}}{\tau s + 1} \quad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 แสดงวิธีการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Process Reaction Curve



รูปที่ 2.12 การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Process Reaction Curve

ตารางที่ 2.1 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจากการคำนวณด้วยวิธี Process Reaction Curve

ชนิดของตัวควบคุม	$K_P$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{\tau}{t_0}$	-	-
PI	$0.9 \frac{\tau}{t_0}$	$\frac{t_0}{0.3}$	-
PID	$1.2 \frac{\tau}{t_0}$	$2t_0$	$0.5t_0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดีของการใช้ Process Reaction Curve

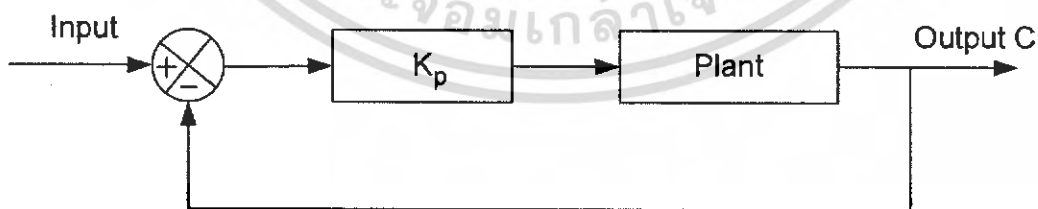
1. ทำการทดสอบเพียงครั้งเดียวเท่านั้น
2. ไม่จำเป็นต้องใช้การลองผิดลองถูก
3. การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์สามารถทำได้ง่าย

แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ก็มีข้อเสียด้วยกันหลายข้อคือ

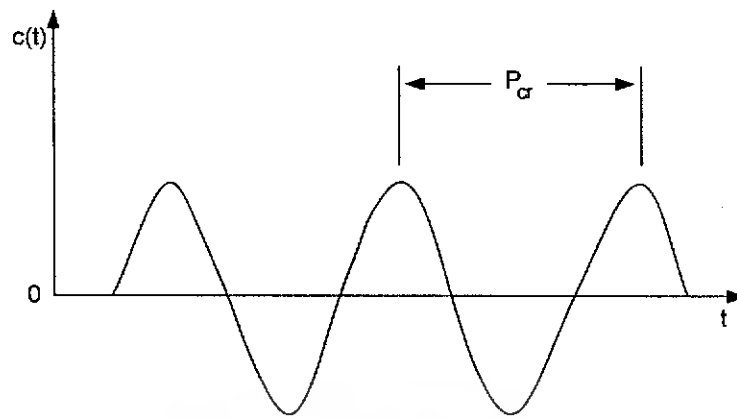
1. การทดสอบจะกระทำภายใต้สภาวะวงเปิด (Open-loop) ดังนั้นหากโพลด์มีการเปลี่ยนแปลงขณะทำการทดสอบ ผลการทดสอบที่ได้ก็จะเกิดความผิดพลาด
2. ในการทดสอบ หากเครื่องมือวัดมีสัญญาณรบกวนหรือกราฟที่ได้จากการทดสอบมีขนาดเล็ก ดังนั้นการหาค่าความชันที่ถูกต้องจึงทำได้ยาก
3. วิธีการนี้มีแนวโน้มที่ไวต่อความผิดพลาดจากการสอบเทียบของตัวควบคุม
4. การใช้ค่าพารามิเตอร์ในตารางมีแนวโน้มที่จะทำให้ผลตอบสนองเกิดการแกว่ง
5. วิธีการนี้ไม่เหมาะสมกับกระบวนการที่มีผลตอบสนองแบบแกว่งในวงเปิด เนื่องจากค่าที่ได้จากการทดลองจะเกิดความผิดพลาด

#### 2.4.1.2 การปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Ultimate Method

วิธีการนี้จะหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID จากผลตอบสนองของกระบวนการที่ถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ P ต่ออินพุตแบบขั้นบันได โดยจะทำการปรับค่าของ  $K_p$  จนกระทั่งผลตอบสนองเกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง (Sustained Oscillations) ซึ่งวิธีการนี้จะไม่สามารถทำได้หากกระบวนการไม่เกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 2.13 แสดงบล็อกไดอะแกรมการหาค่าพารามิเตอร์แบบ Ultimate Method



รูปที่ 2.14 แสดงวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยวิธี Ultimate Method

ตารางที่ 2.2 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจากการคำนวณด้วยวิธีแบบ Ultimate Method

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

เมื่อ  $K_{cr}$  คืออัตราขยายที่ทำให้ผลตอบสนองเกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง (Critical Gain)

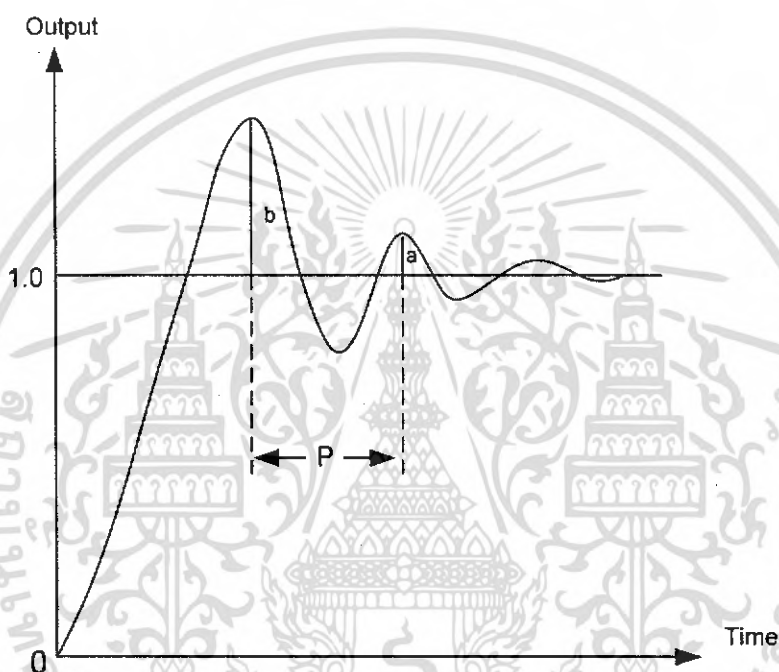
$P_{cr}$  คือคาบเวลาของการแกว่งอย่างต่อเนื่อง (Oscillation Period)

วิธีการนี้ไม่เป็นที่นิยมมากนัก เนื่องจากระบบต้องทำงานใกล้กับความไม่มีเสถียรภาพและใช้เวลาค่อนข้างนาน โดยเฉพาะกับกระบวนการที่มีค่าเวลาหน่วงมากๆ เช่นกระบวนการควบคุมอุณหภูมิ เป็นต้น การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ด้วยวิธีของ Ziegler-Nichols นั้นค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไม่สามารถนำไปใช้งานได้ทันที เนื่องจากเป็นค่าที่ใกล้เคียงเท่านั้นและผลตอบสนองมีค่าพุ่งเกินสูงสุดถึง 25% จึงจำเป็นต้องทำการ ปรับละเอียดค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ อีกครั้งหนึ่ง

### 2.4.1.3 การปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Damped Oscillation

Harriott ได้ปรับปรุงวิธีการนี้มาจากวิธี Ultimate Method เพื่อนำมาใช้ในกรณีที่  
ไม่ต้องการให้ผลตอบสนองเกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่องเมื่อทำการปรับค่า  $K_p$

วิธีการนี้จะทำการปรับค่า  $K_p$  ไปจนกระทั่งผลตอบสนอง ของกระบวนการ  
ในแบบวงปิดมีอัตราการเสื่อม  $\frac{1}{4}$  ดังแสดงในรูปที่ 2.15 จากนั้นจะทำการวัดค่าของ  $P$  และใช้  
ค่าของ  $\frac{1}{4}K_p$  คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่เหมาะสมต่อไป



รูปที่ 2.15 แสดง ผลตอบสนองของกระบวนการแบบวงปิดที่มีอัตราเสื่อม  $\frac{1}{4}$

ค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการนี้คือ

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

## 2.5 กระบวนการ (Plant or Process)

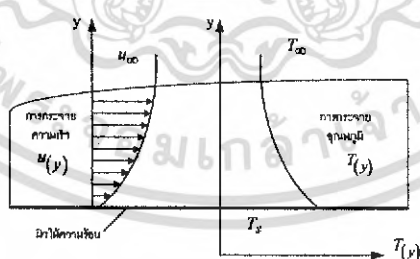
### 2.5.1 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน

พลังงานจะไม่มี การสูญหายแต่จะเปลี่ยนจากรูปแบบหนึ่งไปเป็นอีกรูปแบบหนึ่ง เราไม่สามารถวัดพลังงานความร้อนได้โดยตรง แต่จะสามารถพิจารณาได้จากวิธีทางฟิสิกส์ เพราะว่า ความร้อนเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่วัดได้ เมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิเกิดขึ้น ในระบบ ความร้อนก็จะมีการถ่ายเทจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง ไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า

การถ่ายเทความร้อนมีอยู่ 3 วิธีด้วยกันคือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน

**2.5.1.1 การนำความร้อน** หมายถึง การส่งถ่ายพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นใน ตัวกลางโดยมีอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลาง จากด้านที่มีอุณหภูมิสูง ไปสู่ด้านที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยส่งถ่ายความร้อนจากโมเลกุลหนึ่งไปสู่อีกโมเลกุลหนึ่งอย่างต่อเนื่อง การนำความร้อนสามารถเกิดขึ้นได้ในตัวกลางที่เป็นของแข็ง ของเหลว ก๊าซ

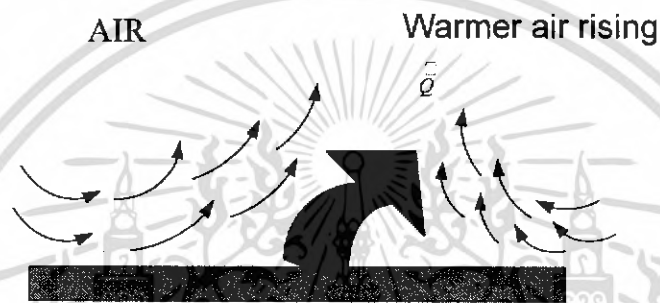
**2.5.1.2 การพาความร้อน** หมายถึง การถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวของแข็งกับ ของไหล ผลของการเคลื่อนไหวยของของไหลส่งผลให้เกิดการถ่ายเทโมเมนตัม ซึ่งมีผลต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวของแข็งนั้น  $(h, W/m^2 \cdot K)$  พลังงานความร้อนที่ถูกโอนถ่ายเป็นผลมาจากการแพร่ (Diffusion) ของโมเลกุล และจากการเคลื่อนไหวยไปทั้งปริมาตรของ ของไหล



รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะการกระจายความเร็วและอุณหภูมิของของไหล และขณะเกิดการพาความร้อนบริเวณใกล้ผิวให้ความร้อน

การพาความร้อนแยกออกเป็น 2 ประเภท คือ

**2.5.1.2.1 การพาความร้อนตามธรรมชาติ (Natural Convection)** คือ การเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยไม่มีกลไกใด ๆ ที่ทำให้ของไหลเคลื่อนที่ แต่ของไหลที่อยู่ใกล้กับผิวของของแข็งก็อาจเคลื่อนที่ได้โดยแรงลอยตัวของของไหลเอง แรงลอยตัวนี้เกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นของของไหล เมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิในชั้นของของไหลขึ้น เช่น ปล่อยแผ่นวัตถุร้อนที่วางในบรรยากาศให้เย็น



รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะการพาความร้อนตามธรรมชาติ

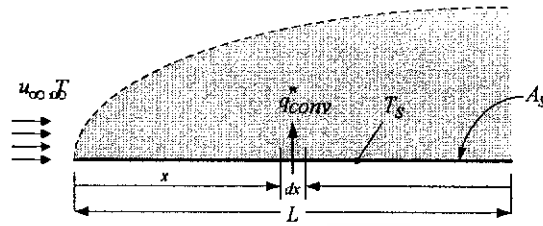
**2.5.1.2.2 การพาความร้อนโดยบังคับ (Force Convection)** การเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็ง และของไหล โดยที่ของไหลถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวของของแข็ง โดยกลไกภายนอกเช่น เครื่องสูบลม เครื่องเป่าลม (Blower) เป็นต้น



รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะการพาความร้อนแบบบังคับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะการพาความร้อนในชั้นซิดผิวความร้อนและชั้นซิดผิวความเร็วดังแสดงในรูป



รูปที่ 2.19 แสดงลักษณะการพาความร้อนในชั้นซิดผิวความร้อนและชั้นซิดผิวความเร็ว

ในรูปที่ 2.19 พิจารณาการพาความร้อนจากผิวของแข็งพื้นที่  $A_s$  อุณหภูมิ  $T_s$  ขณะของไหลไหลผ่านด้วยความเร็ว  $u_\infty$  และอุณหภูมิ  $T_\infty$  คงที่ ฟลักซ์ความร้อนเฉพาะ ที่เป็นไปตามกฎการทำให้เย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) ดังสมการ

$$q_{conv}'' = h(T_s - T_\infty) \quad (2.17)$$

เมื่อ  $q_{conv}''$  คือ ค่าฟลักซ์ความร้อนเฉพาะ ที่มีหน่วยเป็น  $W/m^2$   
 $h$  คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะที่มีหน่วยเป็น  $W/m^2$

ดังนั้นจะคำนวณอัตราการพาความร้อนทั้งหมด ( $Q_{convection}''$ ) บนพื้นผิว  $A_s$  จาก

$$\begin{aligned} Q_{convection}'' &= \int_{A_s} q_{conv}'' dA_s \\ &= (T_s - T_\infty) \int h dA_s \end{aligned} \quad (2.18)$$

การคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพานั้นเป็นสิ่งที่ยุ่งยาก เมื่อพิจารณาแล้วมีหลายสิ่งหลายอย่างที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของความร้อนแบบการพา นี้ เป็นต้นว่า คุณสมบัติของของไหลความหนาแน่น ความร้อนจำเพาะ ความหนืด ความเร็วของของไหล ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของพื้นผิวของของแข็งและของไหล เป็นต้น นิวตัน (Newton) ได้ตัดปัญหาความยุ่งยากเหล่านี้ โดยเสนอสมการสำหรับคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อน โดยการพาดังนี้คือ

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_s - T_\infty) \quad (2.19)$$

- เมื่อ  $\dot{Q}_{conv}$  คืออัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพา มีหน่วยเป็น  $W/m^2 \cdot K$   
 $h$  คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อน มีหน่วยเป็น  $W/m^2 \cdot K$   
 $A$  คือ พื้นที่หน้าตัด มีหน่วยเป็น  $m^2$   
 $T_s$  คือ อุณหภูมิที่ร้อน มีหน่วยเป็น  $K$  หรือ  $c^\circ$   
 $T_\infty$  คือ อุณหภูมิที่เย็น มีหน่วยเป็น  $K$  หรือ  $c^\circ$

**2.5.1.3 การแผ่รังสีความร้อน** หมายถึง การถ่ายเทความร้อน ของผิวตัวกลาง หนึ่งไปสู่ผิวของอีกตัวกลางหนึ่งซึ่งมีอุณหภูมิแตกต่างกัน พลังงานของการแผ่รังสีถูกส่งถ่ายในรูป ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือ โฟตอนโดยไม่ต้องมีตัวกลาง จึงสามารถเกิดขึ้นในสุญญากาศได้

### 2.5.2 ทฤษฎีการอนุรักษ์พลังงาน

จากการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนเพื่อเปลี่ยนค่าอุณหภูมิตาม ให้อุปกรณ์ที่ ต้องการ โดยอุณหภูมิคงตัวของวัตถุเกิดขึ้นเมื่ออัตราพลังงานความร้อนให้อุปกรณ์มีค่าเท่ากับอัตรา สูญเสียรวมทั้งหมด ถ้าอัตราพลังงานความร้อนจ่ายเข้ามากกว่าพลังงานความร้อนสูญเสีย วัตถุ จะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ถ้าอัตราพลังงานความร้อนจ่ายเข้าน้อยกว่าพลังงานความร้อนสูญเสีย วัตถุจะมีอุณหภูมิลดลง ซึ่งเป็นไปตามหลักการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation Of Energy Principle) หรือหลักพลังงานสมดุล (Energy Balance) ในกฎข้อที่หนึ่งของหลักการถ่ายเทความร้อน (Thermodynamic) ที่กล่าวว่า การเปลี่ยนแปลงพลังงานรวมทั้งหมดของระบบในกระบวนการทำความ ความแตกต่างระหว่างพลังงานรวมทั้งหมด ที่เข้าสู่ระบบ และพลังงานรวมทั้งหมด ที่ออกจากระบบ ในกระบวนการ

$$\left( \begin{array}{c} \text{Total energy} \\ \text{entering the} \\ \text{system} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{Total energy} \\ \text{leaving the} \\ \text{system} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{Change in the} \\ \text{total energy of} \\ \text{the system} \end{array} \right)$$

พลังงานที่เข้าและออกจากระบบ สามารถถ่ายเทในรูปแบบของความร้อน (Heat) งาน (Work) และปริมาณการไหล (Mass Flow) และพลังงานรวมทั้งหมดที่ได้ภายในของระบบ ประกอบด้วยพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) พลังงานศักย์ (Potential Energy) ซึ่งหลักการพลังงาน สมดุลสำหรับทุก ๆ ระบบในทุก ๆ กระบวนการ สามารถเขียนได้ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E_{system} \quad (2.20)$$

เมื่อ  $E_{in}, E_{out}$  คือพลังงานรวมสุทธิที่ถ่ายเทในลักษณะรูปแบบความร้อน งาน และ ปริมาณการไหล

$\Delta E_{system}$  คือการเปลี่ยนแปลงภายในรูปแบบพลังงานจลน์ พลังงานศักย์ ฯลฯ หรือ คิดเป็น อัตราตั้งสมการ

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = \frac{dE_{system}}{dt} \quad (2.21)$$

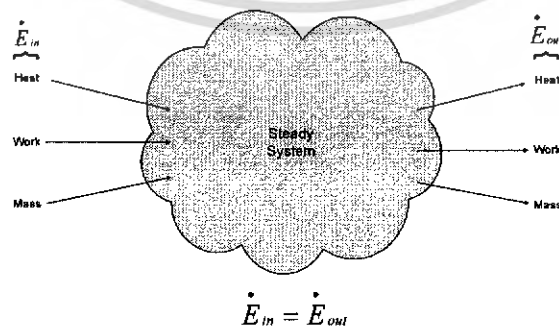
เมื่อ  $\dot{E}_{in}, \dot{E}_{out}$  คือ อัตราพลังงานรวมที่ถ่ายเทในลักษณะรูปแบบความร้อน งาน และ ปริมาณการไหล

$\frac{dE_{system}}{dt}$  คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงภายใน รูปแบบพลังงานจลน์ พลังงานศักย์ ฯลฯ

การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในระบบจะเป็นศูนย์ ( $\Delta E_{system} = 0$ ) ถ้าสภาพของระบบ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงภายในกระบวนการ นั่นคือกระบวนการอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady) หลักการพลังงานสมดุลในกรณีนี้สามารถเขียนได้ ดังสมการ

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out} \quad (2.22)$$

ลักษณะการถ่ายเทพลังงานสู่ระบบเท่ากับอัตราการถ่ายเทพลังงานออกจากระบบในสภาวะคงตัว ดังแสดงในรูป

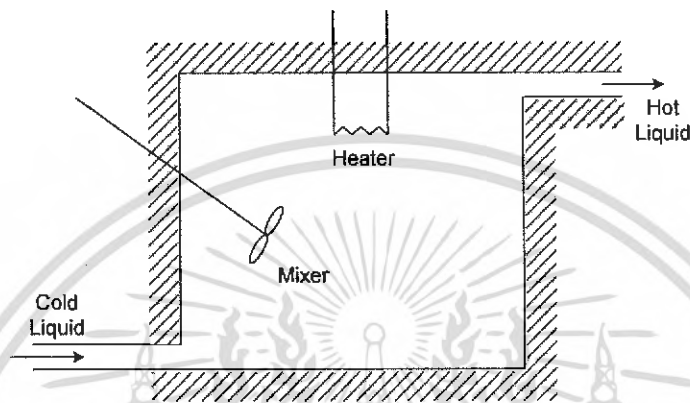


**รูปที่ 2.20** แสดงหลักการพลังงานสมดุลในสภาวะคงตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.3 ระบบความร้อน

พิจารณาความร้อนในรูปที่ 2.21 โดยสมมติให้ภาชนะบรรจุ ถูกหุ้มไว้เพื่อป้องกันไม่ให้ความร้อนสูญหายไป และสมมติว่าฉนวนที่ห่อหุ้มภาชนะบรรจุนั้นไม่มีความร้อนสะสมอยู่ ส่วนของเหลวที่อยู่ในภาชนะก็ถูกผสมกันอย่างสมบูรณ์จนมีอุณหภูมิเดียวกันตลอด ดังนั้นอุณหภูมิของของเหลวในภาชนะจึงมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของของเหลวที่ไหลออกจากภาชนะ



รูปที่ 2.21 แสดงระบบความร้อน

กำหนดให้

- $\bar{\theta}_i$  = อุณหภูมิที่ภาวะคงที่ของของเหลวที่ไหลเข้าภาชนะ  $^{\circ}F$
- $\bar{\theta}_o$  = อุณหภูมิที่ภาวะคงที่ของของเหลวที่ไหลออกจากภาชนะ  $^{\circ}F$
- $G$  = อัตราการไหลของของเหลวที่ภาวะคงที่ ( $lb/sec$ )
- $M$  = มวลของของเหลวในภาชนะ ( $lb$ )
- $c$  = ความร้อนจำเพาะของของเหลว ( $Btu/lb^{\circ}F$ )
- $R$  = ค่าความต้านทานความร้อน ( $^{\circ}F sec/Btu$ )
- $C$  = ค่าความจุความร้อน ( $Btu/^{\circ}F$ )
- $H$  = ความร้อนทางด้านอินพุทของ heater ที่ภาวะคงที่ ( $Btu/sec$ )

สมมติว่าอุณหภูมิของของเหลวที่ไหลเข้านั้นมีค่าคงที่ และให้ความร้อนทางด้านอินพุทของ heater เปลี่ยนไปทันทีจาก  $\bar{H}$  เป็น  $\bar{H} + h_i$  โดยที่  $h_i$  เป็นค่าความร้อนที่เปลี่ยนไปเล็กน้อย ดังนั้นความร้อนที่ออกจาก heater ก็จะค่อย ๆ เปลี่ยนจาก  $\bar{H}$  ไปเป็น  $\bar{H} + h_o$  อุณหภูมิของของเหลวที่ไหลออกจึงเปลี่ยนจาก  $\bar{\theta}_o$  เป็น  $\bar{\theta}_o + \theta$  ด้วย ในกรณีจะสามารถหาค่าของ  $h_o, C$  และ  $R$  ได้ตามลำดับดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$h_o = Gc\theta \quad (2.23)$$

$$C = Mc \quad (2.24)$$

$$R = \frac{\theta}{h_o} = \frac{1}{Gc} \quad (2.25)$$

สมการดิฟเฟอเรนเชียลของระบบนี้คือ

$$C \frac{d\theta}{dt} = h_i - h_o \quad (2.26)$$

แทนค่า  $h_o$  จากสมการ 2.25 ลงในสมการ 2.26 จะได้ว่า

$$C \frac{d\theta}{dt} + \theta = Rh_i \quad (2.27)$$

ค่า time constant ของระบบนี้คือ  $RC$  หรือมีค่าเท่ากับ  $M/G$  วินาที และ transfer function เมื่อ  $\theta$  เป็นเอาต์พุต และ  $h_i$  เป็นอินพุตของระบบคือ

$$\frac{\theta(s)}{H_i(s)} = \frac{R}{RCs + 1} \quad (2.28)$$

ในทางปฏิบัติแล้ว อุณหภูมิของของเหลวที่ไหลเข้า อาจจะเปลี่ยนแปลงขึ้น ๆ ลง ๆ ได้ จึงอาจจะถือได้ว่าเป็น load disturbance ในกรณีที่ต้องการควบคุมอุณหภูมิของของเหลวที่ไหลออกให้คงที่นั้น จำเป็นจะต้องมีตัวควบคุมอัตโนมัติ ติดตั้งไว้สำหรับปรับความร้อนทางด้านอินพุตของ heater เพื่อชดเชยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของเหลวที่ไหลเข้า) ในกรณีที่อุณหภูมิของของเหลวที่ไหลเข้าเปลี่ยนไปทันทีจาก  $\theta_1$  เป็น  $\theta_1 + \theta$  โดยที่ความร้อนทางด้านอินพุตของ heater  $\bar{H}$  และอัตราการไหลของของเหลว  $G$  ยังมีค่าคงที่อยู่นั้น ความร้อนที่ออกจาก heater ก็จะเปลี่ยนจาก  $\bar{H}$  เป็น  $\bar{H} + h_o$  และอุณหภูมิของของเหลวที่ไหลออกก็จะเปลี่ยนไปจาก  $\theta_o$  เป็น  $\theta_o + \theta$  ด้วย สมการดิฟเฟอเรนเชียลในกรณีนี้จึงเขียนได้ว่า

$$C \frac{d\theta}{dt} = Gc\theta_1 - h_o \quad (2.29)$$

หรือ

$$RC \frac{d\theta}{dt} + \theta = \theta_1 \quad (2.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น transfer function ระหว่าง  $\theta$  และ  $\theta_i$  คือ

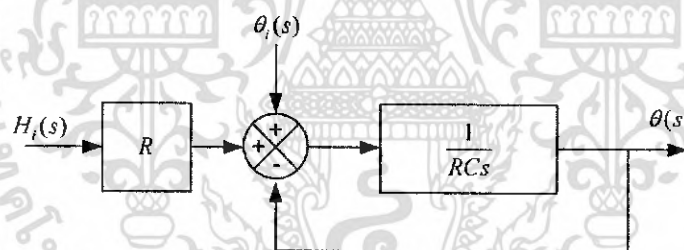
$$\frac{\theta(s)}{\theta_i(s)} = \frac{1}{RCs + 1} \quad (2.31)$$

ถ้าระบบที่กล่าวมาเปลี่ยนแปลงทั้งสองอย่าง คือทั้งความร้อนด้านอินพุทของ heater และ อุณหภูมิของของเหลว ที่ไหลเข้าเปลี่ยนไป การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของของเหลวที่ไหลออก ( $\theta$ ) จะสามารถกำหนดได้จากสมการต่อไปนี้

$$RC \frac{d\theta}{dt} + \theta = \theta_i + Rh_i \quad (2.32)$$

โดยที่อัตราการไหลของของเหลวมีค่าคงที่

รูปที่ 2.22 แสดงถึง block diagram ของระบบ ในกรณีของสมการ 2.32 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ระบบนี้มีอินพุทสองอินพุท การวิเคราะห์หาเอาต์พุตต่ออินพุทแต่ละตัวสามารถทำได้โดยใช้ ทฤษฎีของ superposition



รูปที่ 2.22 แสดง Block diagram ของระบบความร้อน

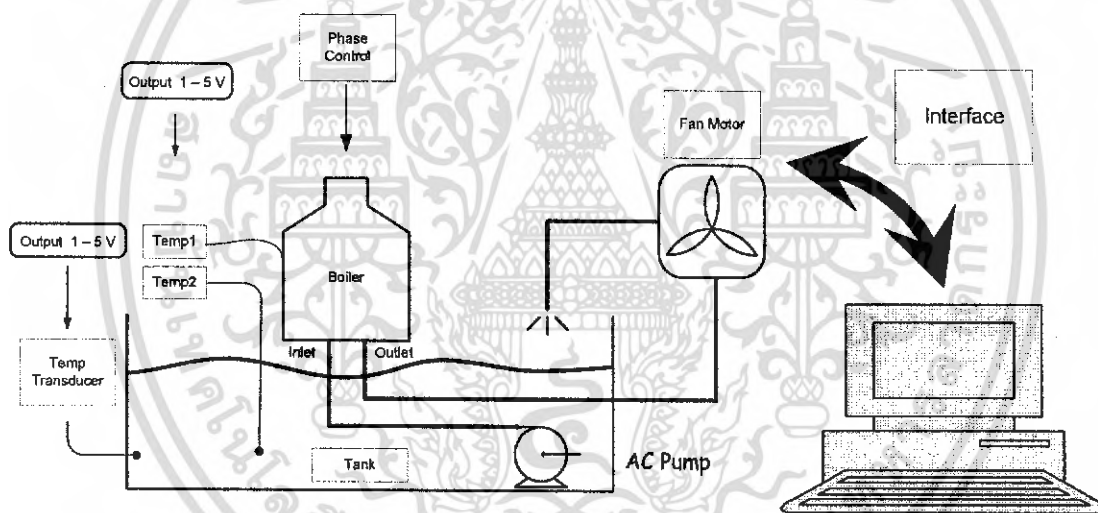
## บทที่ 3

### การออกแบบและสร้างชุดทดลอง

#### 3.1 กล่าวนำ

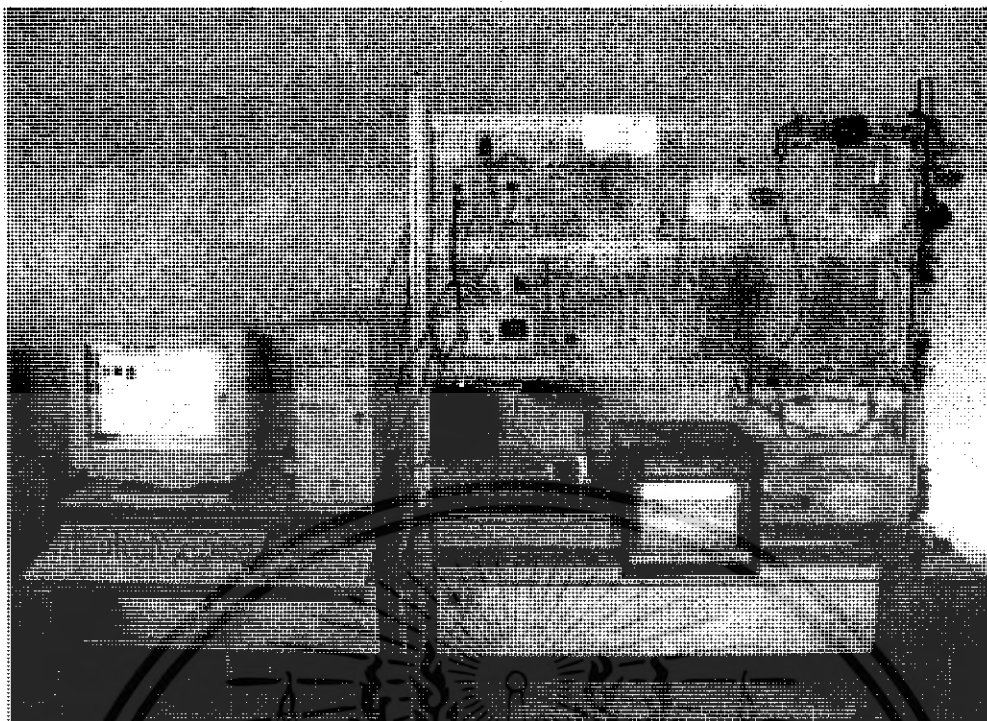
ในบทนี้จะกล่าวถึงการทำงานโดยรวมของชุดทดลองทุกส่วนประกอบ เช่น สัญญาณอินพุตที่เข้าสู่กระบวนการ สัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากกระบวนการ ชุดภาระของกระบวนการ การอินเตอร์เฟสระหว่างกระบวนการและตัวควบคุมที่เป็นคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC) ฟังก์ชันการทำงานของ Software

#### 3.2 โครงสร้างโดยรวม

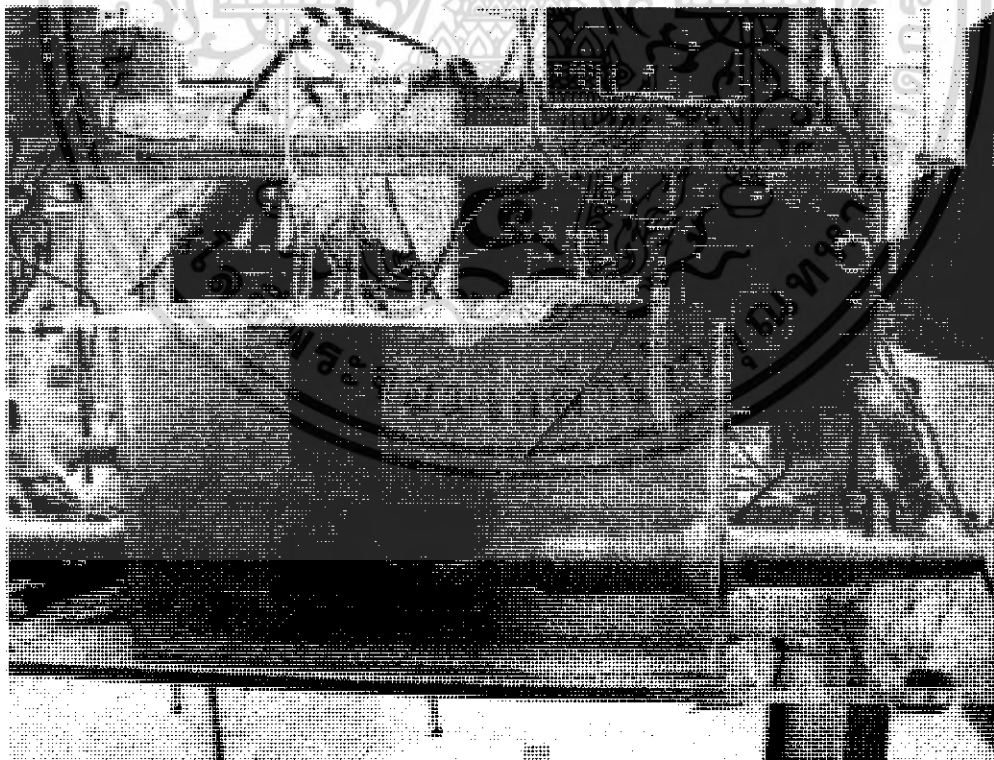


รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างโดยรวมของกระบวนการที่ออกแบบไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงโครงสร้างโดยรวมของกระบวนกรที่สร้างขึ้นจริง



รูปที่ 3.3 แสดงระบบควบคุมอุณหภูมิที่สร้างขึ้น

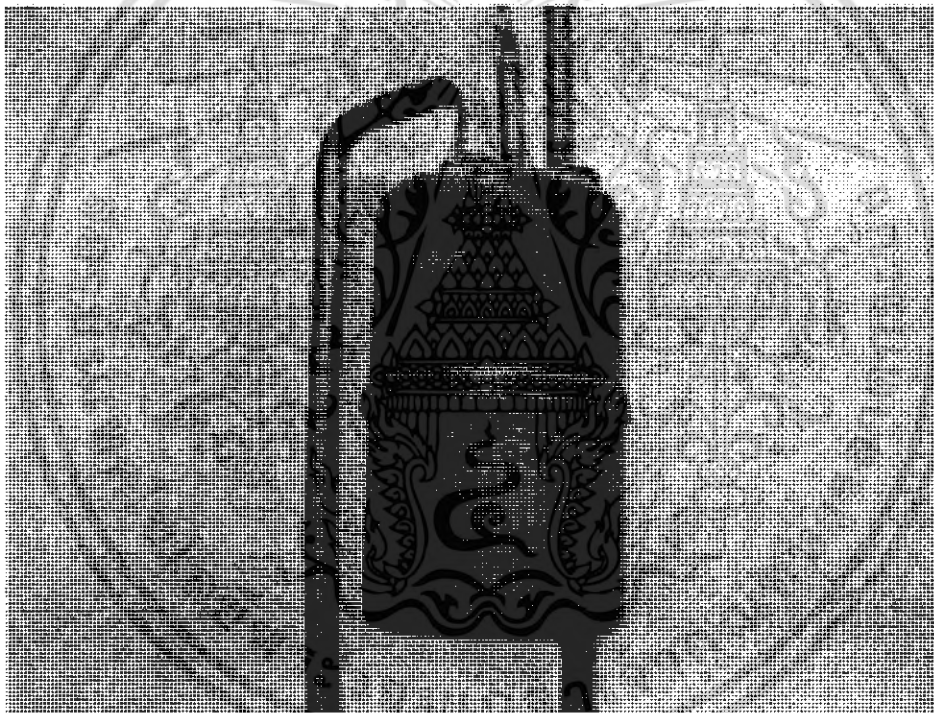
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การทำงานของกระบวนการ

กระบวนการนี้มีส่วนย่อยในการทำงานอยู่ 3 ส่วนหลัก ๆ คือ

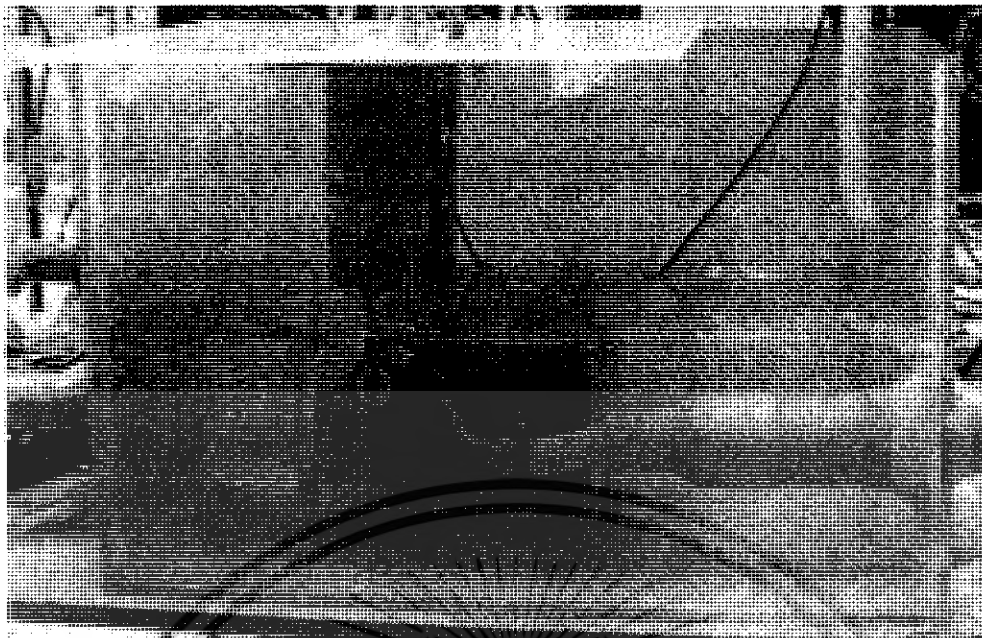
#### 3.3.1 ส่วนอินพุทที่เข้าสู่กระบวนการ

ส่วนอินพุทที่เข้าสู่กระบวนการจะส่งมายังอุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย (Final Control Element) ซึ่งจะรับสัญญาณ Manipulate Variable ( $mv$ ) ในกระบวนการนี้ อุปกรณ์ควบคุมสุดท้ายเป็น Heater ซึ่ง Heater ที่ใช้ตัดแปลงมาจากชุดทำความร้อนของเครื่องทำน้ำอุ่นขนาด 3.3 kw การควบคุมอุณหภูมิของ Heater ใช้หลักการแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับที่ควบคุมจากชุดควบคุมเฟส ซึ่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ คือ ไตรแอก โดยจะรับสัญญาณ 4-20 mA เพื่อทำการทริกที่มุมทริกต่าง ๆ



รูปที่ 3.4 แสดงอุปกรณ์ทำความร้อนที่ใช้ในกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แสดงจุดที่ติดตั้งอุปกรณ์ทำความร้อน

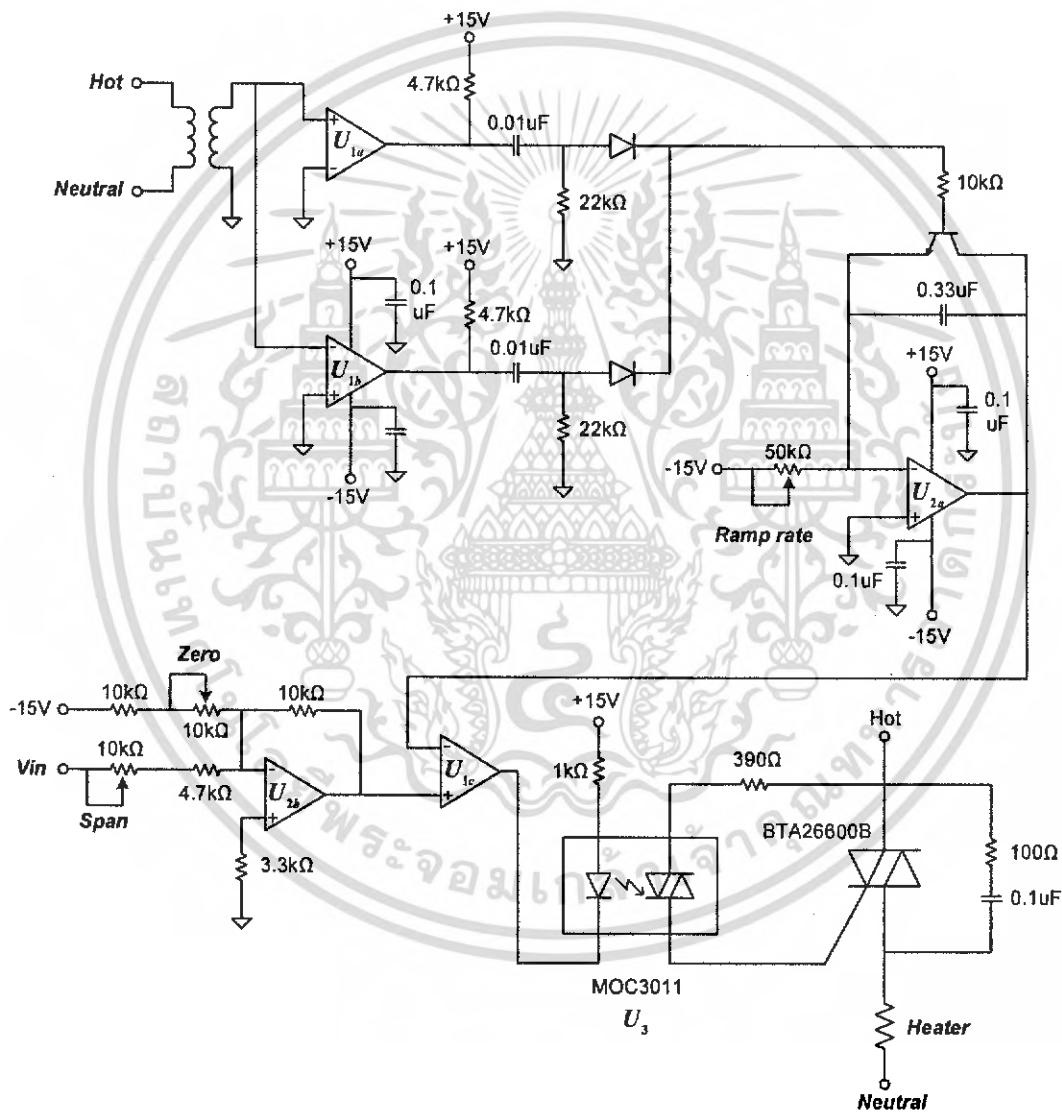
โดยทั่ว ๆ ไปในระบบควบคุมของกระบวนการใด จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ควบคุมทำหน้าที่ต่าง ๆ ตั้งแต่ Primary Element จนกระทั่งถึง Final Control Element ซึ่งที่จะกล่าวถึงคือ ชุดเฟสคอนโทรล

จากรูปที่ 3.6 เป็นวงจรควบคุมมุมจุดชนวนเกต ที่ถูกควบคุมด้วยสัญญาณอนาลอก ซึ่งสามารถแบ่งวงจรนี้ออกเป็น 4 ชุดด้วยกัน คือ

1. ชุด Zero-crossing and pulse generator ( $U_{1a}$  และ  $U_{1b}$ )
2. ชุด Synchronized ramp generator ( $U_{2a}$ )
3. ชุด Zero and span signal conditioner ( $U_{2b}$ )
4. ชุด Comparator with trigger ( $U_{1c}$  และ  $U_3$ )

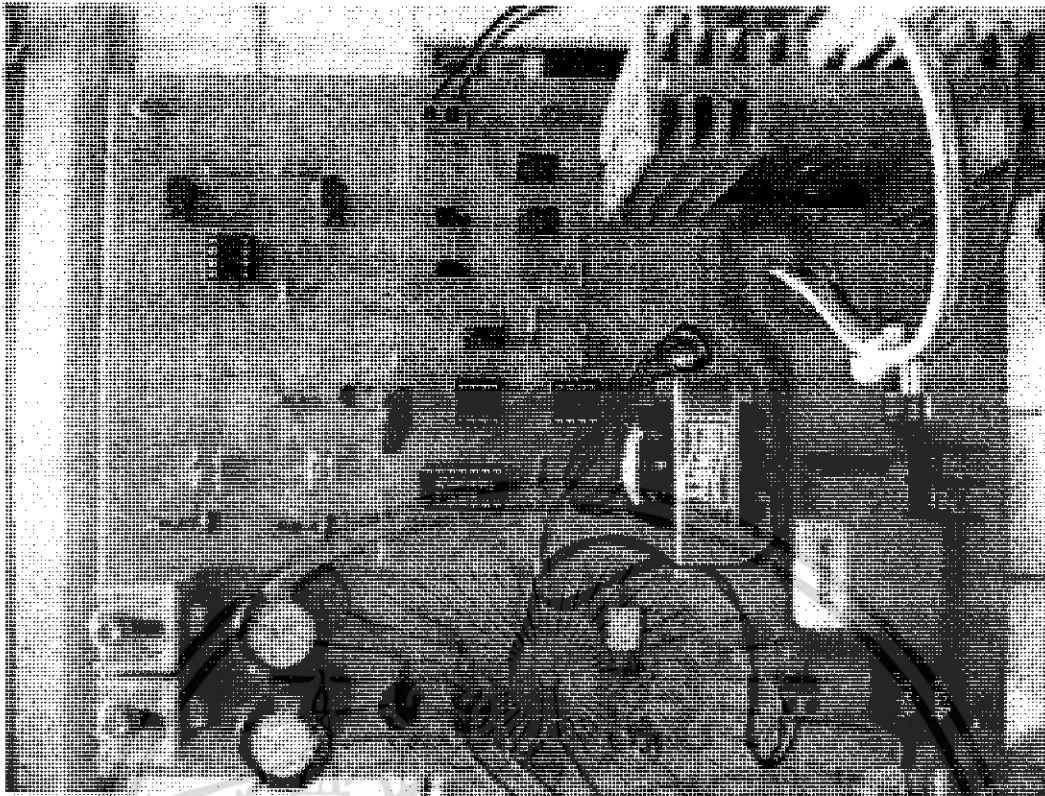
การทำงานของวงจรควบคุมการทริกแบบอนาลอก จะต้องเป็นไปพร้อมกับจังหวะของสัญญาณไฟกระแสสลับของชุด Zero-crossing ชุดของ  $U_{1a}$  และ  $U_{1b}$  จะสร้างสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมขนาด  $30 V_{pp}$  โดยที่ตัวหนึ่งจะถูกต่อในวงจรเป็นแบบ inverting ส่วนอีกตัวหนึ่งจะถูกต่อในวงจรเป็นแบบ noninverting ซึ่งออปแอมป์ทั้งสองตัวนี้จะสร้างสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีชั่วตรงข้ามกันในส่วนของ RC ที่ต่อจากชุดเปรียบเทียบ ก็จะทำหน้าที่สร้างสัญญาณอิมพัลส์ที่มีความกว้างประมาณ  $100 \mu s$  ส่วนของไดโอดทั้งสองตัวก็จะทำหน้าที่ให้สัญญาณในด้านซิกบวคผ่านได้เท่านั้น  $U_{2a}$  จะสร้างสัญญาณแรมพ์ด้วยตัวเก็บประจุที่ต่อให้ป้อนกลับและแรงดันที่เป็นลบ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งปรับค่าด้วยโพเทนติโอมิเตอร์ไว้โดยทำหน้าที่เป็นกราวด์เสมือนของวงจรในชุด Synchronized ramp generator ทำการปรับ ramp rate ได้ค่า 0-5 V คาบเวลาเท่ากับ 10 ms แล้วนำสัญญาณที่ได้ไปเข้าสู่ชุด Comparator with trigger ( $U_{1c}$  และ  $U_{1b}$ ) ซึ่งจะนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณที่รับมาจากชุด Zero and span signal conditioner ( $U_{2B}$ ) ซึ่งชุด Zero and span signal conditioner นี้จะทำการปรับค่าแรงดัน  $V_{in}$  ที่รับมาจากสัญญาณ Manipulate Variable ของชุด Controller ให้ได้ระดับแรงดัน 0-5V เพื่อทำเป็นสัญญาณควบคุมมุมเฟสของการทริก โดยจะทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณที่รับมาจาก  $U_{2A}$



รูปที่ 3.6 แสดงวงจรควบคุมมุมจุดชนวนเกิดที่ควบคุมด้วยสัญญาณอนาล็อก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 แสดงชุดวงจรควบคุมเฟสที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

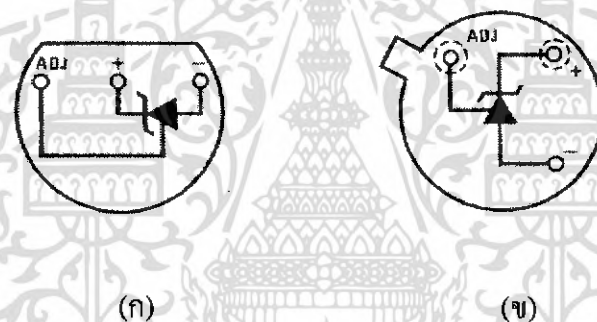


สำหรับกระบวนการนี้เป็นกระบวนการวัดอุณหภูมิ ดังนั้นอุปกรณ์ตรวจวัดที่ใช้จึงเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ

การวัดอุณหภูมินั้นต้องใช้ตัวตรวจจับที่เหมาะสม มีความเที่ยงตรงสูง ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันเอาต์พุตเป็นเชิงเส้นใช้งานง่ายและมีราคาถูก

มีวิธีการอยู่หลายวิธีในการวัดอุณหภูมิ เช่น การใช้เทอร์โมมิเตอร์แบบปรอท แต่ก็มีข้อเสียอยู่คือ อ่านค่าอุณหภูมิได้ยาก และใช้วัดอุณหภูมิที่จุดห่างออกไปไม่ได้ หรือเทอร์โมมิเตอร์แบบหน้าปิดกลม ที่ใช้หลักการขยายตัวของโลหะต่างชนิดกันมาจัดให้เป็นรูปก้นหอยนั้น สามารถใช้ได้สะดวก เหมาะสำหรับแขวนตามฝาผนัง แต่ก็มีข้อจำกัดทางด้านความเที่ยงตรงอยู่มาก ส่วนเทอร์โมมิเตอร์แบบอิเล็กทรอนิกส์นั้น จะแสดงค่าอุณหภูมิออกมาเป็นตัวเลขอย่างเที่ยงตรง ถึงแม้จะทำการปรับค่าแล้วแต่ก็ยังมีราคาสูงพอสมควร

LM 335 มีความสามารถในการวัดอุณหภูมิได้อย่างเที่ยงตรง สัญญาณเอาต์พุตเป็นแรงดันสามารถป้อนเข้าสู่ดิจิตอลโวลท์มิเตอร์ เพื่อที่จะได้แสดงค่าอุณหภูมิออกมาเป็นตัวเลขได้



รูปที่ 3.10 (ก) ลักษณะรูปร่างและการต่อขาของ LM 335Z ในตัวถังพลาสติกแบบ TO-92 และรูป (ข) เป็นของ LM 335H ในตัวถังแบบโลหะแบบ TO-46 เมื่อมองจากด้านล่าง

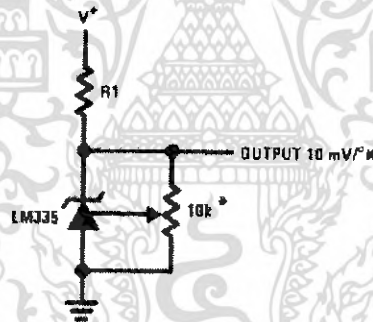
ไอซีเบอร์ LM 335 เป็นวงจรรีเฟอเรนซ์เซอร์คิตซึ่งใช้ทำเป็นตัวตรวจจับอุณหภูมิ สำหรับใช้ในย่านอุณหภูมิตั้งแต่  $0^{\circ}\text{C}$  จนถึง  $+100^{\circ}\text{C}$  โดยได้ผลผลิตออกมาอยู่ในตัวถังพลาสติกสีดำ ซึ่งมีลักษณะการต่อขาตามรูปที่ 3.10 ก. และในตัวถังโลหะแบบ TO-46 ซึ่งมีลักษณะการต่อขาตามรูปที่ 3.10 ข

LM 335 เป็นอุปกรณ์ที่มีราคาถูก เช่นเดียวกับไอซีเบอร์ LM 235 ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ออกแบบมาใช้งานอย่างเดียวกันในย่านอุณหภูมิตั้งแต่  $-25^{\circ}\text{C}$  จนถึง  $+100^{\circ}\text{C}$  ส่วนเบอร์ LM 135 ออกแบบมาสำหรับใช้ในทางทหาร โดยใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่  $-53^{\circ}\text{C}$  จนถึง  $+150^{\circ}\text{C}$  โดยที่ไอซี 2 เบอร์หลังนี้มีค่าความคลาดเคลื่อนจากรายละเอียดทางเทคนิคน้อยกว่าเบอร์ LM 335 ส่วนตัวห้อยท้าย “A” ตามหลัง เช่น LM 335 A หมายความว่าทำการผลิตโดยมีคุณสมบัติใกล้เคียงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

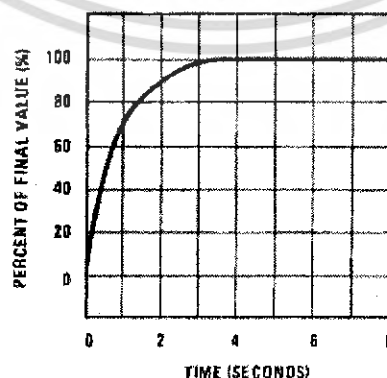


เอาท์พุทที่เป็นเชิงเส้นประโยชน์ที่สำคัญของไอซี LM 335 นี้ก็คือ จะให้อาท์พุทที่เป็นเชิงเส้น ซึ่งไม่เหมือนกับเอาท์พุทที่ได้จากตัวตรวจจับอุณหภูมิส่วนใหญ่ ซึ่งเอาท์พุทจะไม่เป็นเชิงเส้นกับอุณหภูมิ ซึ่งที่จริงแล้วถ้าเรานำเอาค่าแรงดันเอาท์พุทมาเขียนเป็นกราฟระหว่างค่าแรงดันกับอุณหภูมิตลอดย่านการทำงานของไอซีตัวนี้ เมื่อลากเส้นกราฟไปตัดแกนอุณหภูมิที่ศูนย์องศาสัมบูรณ์ ค่าแรงดันเอาท์พุทที่อ่านได้จากกราฟจะเป็นศูนย์โวลต์เลยทีเดียว

แม้ว่าเอาท์พุทของ LM 335 จากวงจรในรูปที่ 3.11 จะอยู่ในข้อจำกัดที่กำหนดมา เราก็ควรจะมีการต่อขาสำหรับปรับแต่งความถูกต้อง ซึ่งมีอยู่ด้วย โดยการต่อตัวต้านทานปรับค่าได้เพียงตัวเดียวคร่อม LM 335 ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ในการใช้งานให้ปรับ VR, ให้เอาท์พุทเท่ากับ 2.982 โวลต์ เมื่ออยู่ที่อุณหภูมิ 25 °C เพื่อที่จะให้เกิดความถูกต้องของอุณหภูมิเพียงครั้งเดียว จะให้ความถูกต้องตลอดย่านอุณหภูมิที่ใช้งานนั้น ก็เนื่องมาจากเอาท์พุท จะแปรผันโดยตรงอย่างเที่ยงตรงกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ โดยเอาท์พุทจะลดลงเป็นศูนย์โวลต์ที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ดังนั้นการปรับค่าความลาดชัน ที่อุณหภูมิค่าหนึ่งให้ถูกต้องจะทำให้เกิดความถูกต้องตลอดย่านอุณหภูมิ ซึ่งการปรับค่าความถูกต้อง จะทำได้ง่ายกว่าพวกอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังเช่นเทอร์โมคัปเปิล เป็นต้น



รูปที่ 3.12 แสดงการปรับแต่งความถูกต้องอย่างง่าย ๆ โดยใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้เพียงตัวเดียว

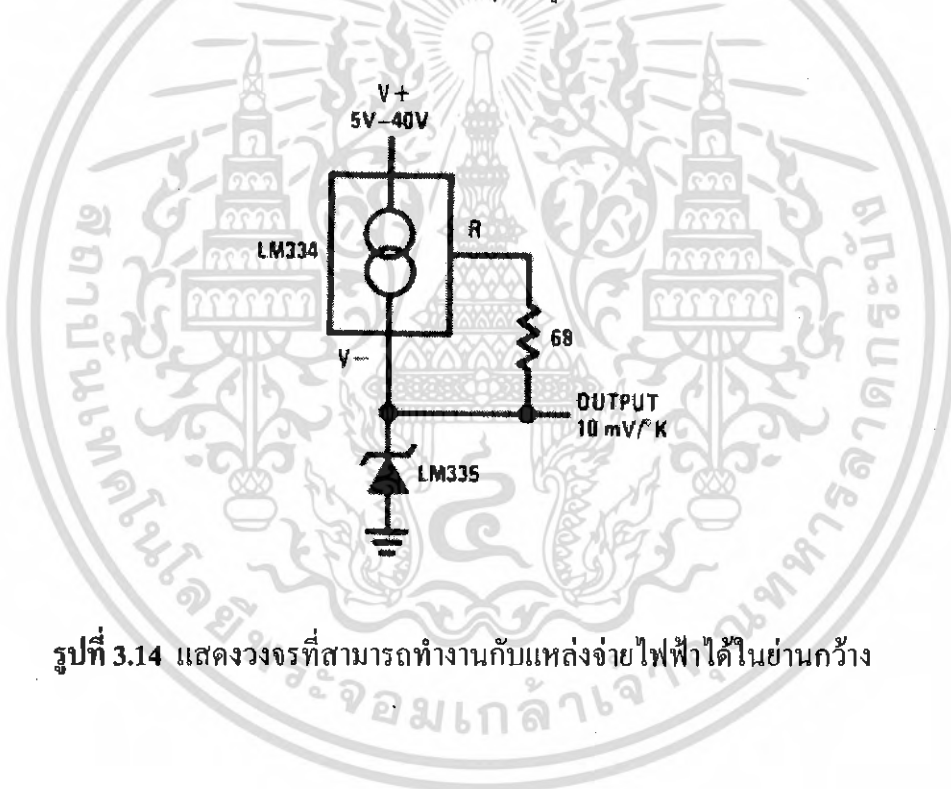


รูปที่ 3.13 แสดงการตอบสนองของ LM 335 ต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในอากาศ

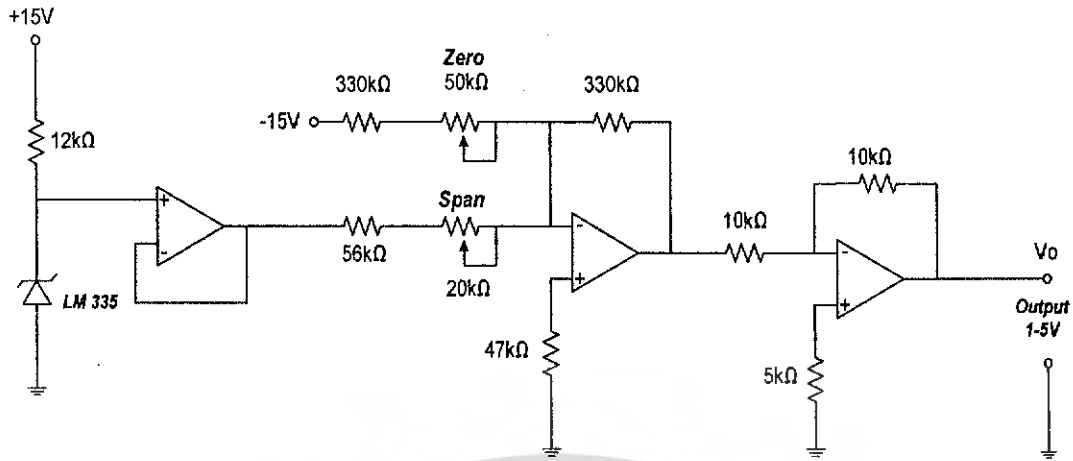
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ใดนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อนที่เกิดขึ้นในตัวเซ็นเซอร์เกี่ยวกับระบบตรวจจับอุณหภูมิใด ๆ ที่เกิดขึ้นจากกระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์ที่ตรวจจับ จะมีผลต่อค่าอุณหภูมิของตัวมัน ตลอดจนค่าแรงดันเอาต์พุตที่เกิดขึ้นสำหรับ LM 335 นั้นควรจะให้ทำงานที่กระแสต่ำสุด ซึ่งเพียงพอที่จะขับให้วงจรภายในไอซีทำงานได้เมื่อคำนวณค่าของ  $R_1$  จะยอมให้กระแสไหลผ่านตัวต้านทานปรับค่าได้ ที่ต่อขนานกับไอซี สำหรับที่กระแสเอาต์พุตใด ๆ โดยกระแสประมาณ 400 ไมโครแอมป์ จะเป็นกระแสต่ำสุดที่ไอซีนีจะทำงานได้เป็นปกติ

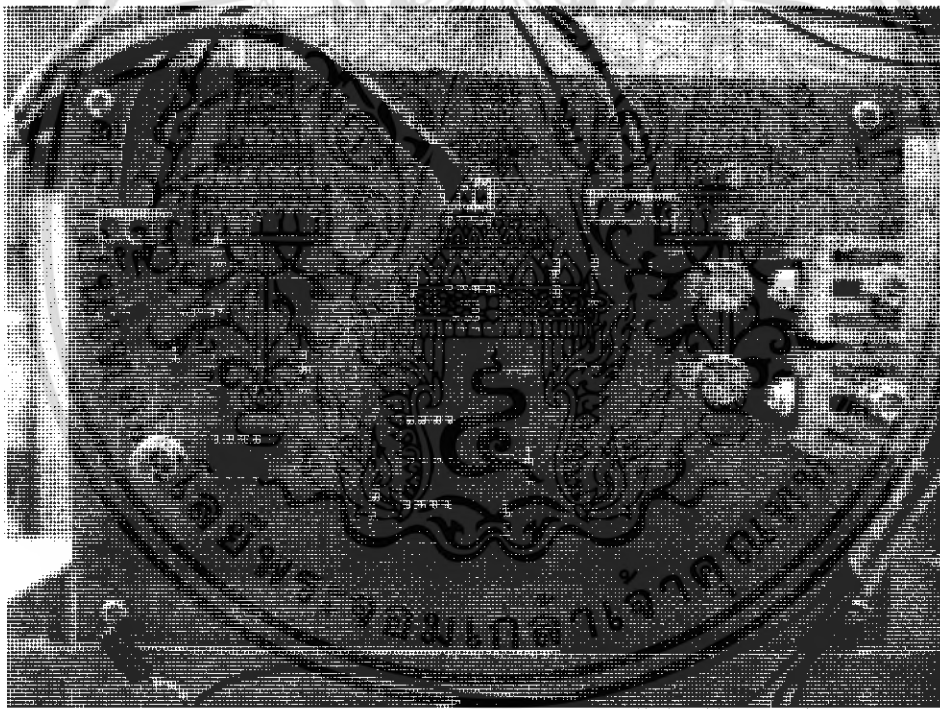
ถ้าตัวตรวจจับถูกใช้ในสถานที่ ซึ่งค่าความต้านทานทางอุณหภูมิต่อสิ่งแวดล้อมเท่านั้น มีค่าคงที่ ค่าความผิดพลาดจากความร้อนที่เกิดขึ้นในตัวเองสามารถที่จะปรับให้ถูกต้องได้ซึ่งจะทำให้อุปกรณ์นั้น ทำงานด้วยกระแสคงที่ โดยไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิความร้อนเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ จะแปรผันโดยตรงกับแรงดันซีเนอร์และอุณหภูมิสัมบูรณ์ ดังนั้นค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากความร้อนในตัวเอง และความเป็นเชิงเส้นของสเกลอุณหภูมิที่รักษาไว้



รูปที่ 3.14 แสดงวงจรที่สามารถทำงานกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าได้ในย่านกว้าง



รูปที่ 3.15 แสดงวงจรวัดอุณหภูมิที่ออกแบบไว้

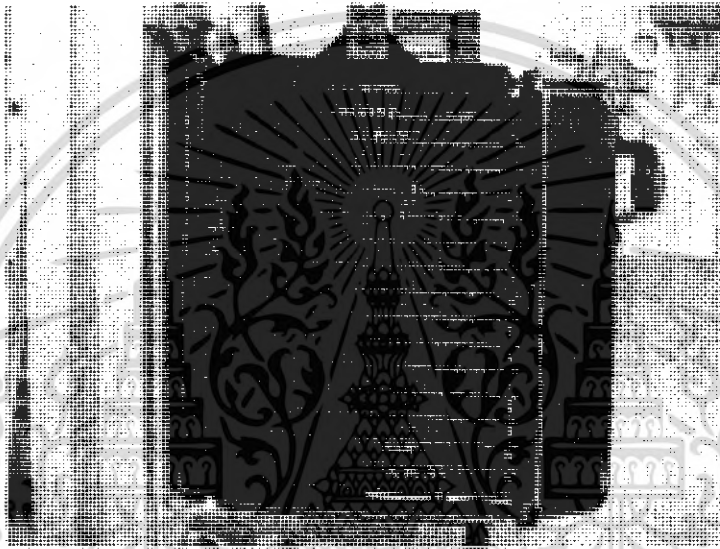


รูปที่ 3.16 แสดงวงจรวัดอุณหภูมิที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3 ส่วนภาระของระบบ

ในส่วนภาระของระบบ (Load) ของกระบวนการนี้คือ ชุดระบายความร้อน ซึ่งประกอบด้วยหม้อน้ำระบายความร้อน และพัดลมซึ่งติดอยู่กับหม้อน้ำระบายความร้อน โดยที่หม้อน้ำระบายความร้อนนั้น ได้ดัดแปลงนำหม้อน้ำระบายความร้อนของรถมอเตอร์ไซด์มาใช้ โดยน้ำที่อยู่ในถังจะถูกปั๊มผ่านหม้อน้ำระบายความร้อน ซึ่งเมื่อน้ำผ่านมาที่ชุดระบายความร้อนนี้ ความร้อนส่วนหนึ่งก็จะถูกระบายออกจากระบบ ส่วนของพัดลมที่ติดอยู่กับหม้อน้ำระบายความร้อนนั้นสามารถปรับความเร็วรอบ เพื่อเปลี่ยนระดับภาระของกระบวนการ

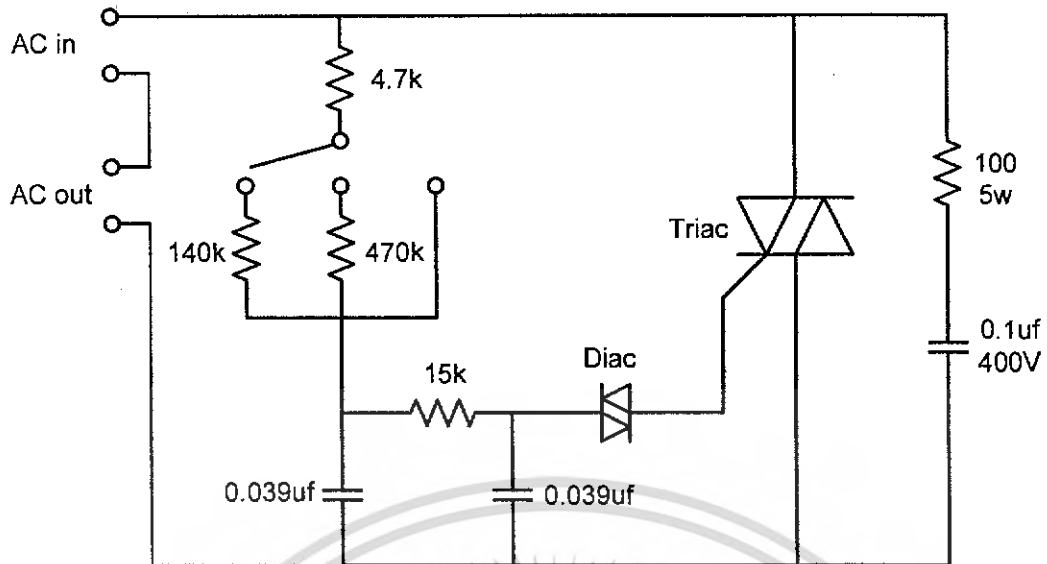


รูปที่ 3.17 แสดงด้านหน้าของชุดระบายความร้อน

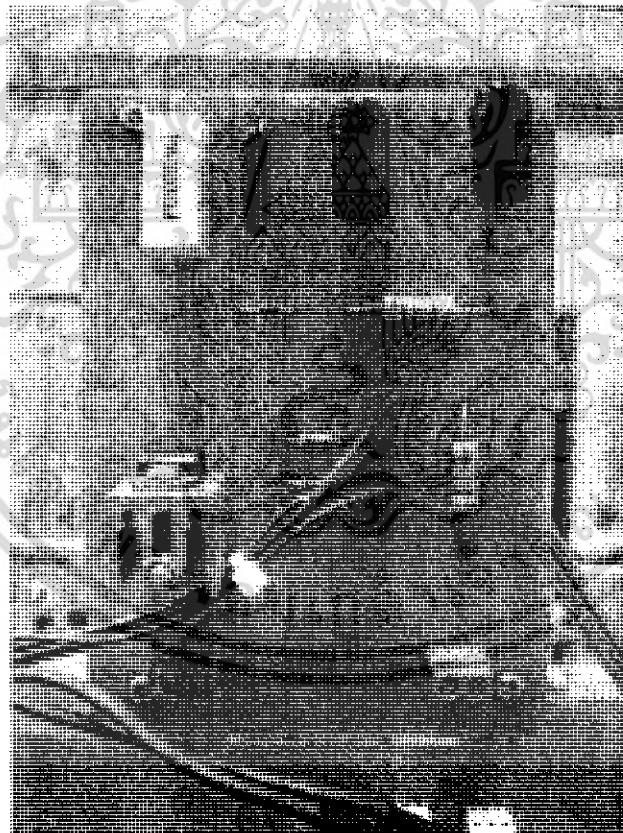


รูปที่ 3.18 แสดงด้านหลังของชุดระบายความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

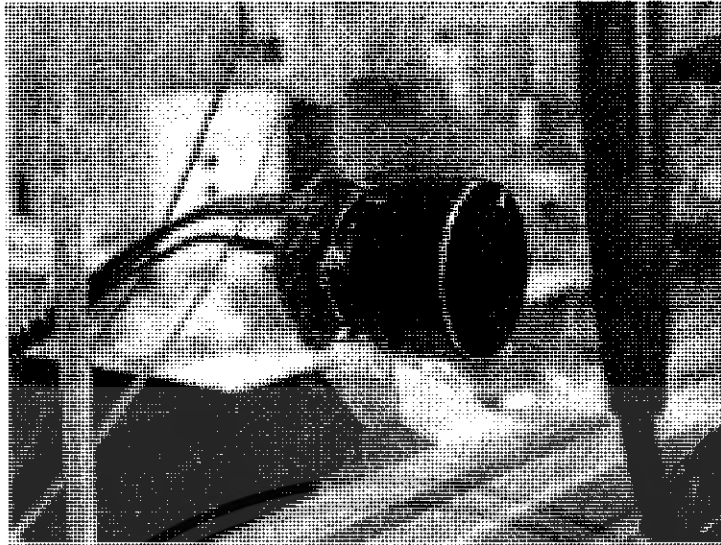


รูปที่ 3.19 แสดงวงจรควบคุมความเร็วรอบของพัดลม



รูปที่ 3.20 แสดงชุดควบคุมความเร็วรอบของพัดลมที่สร้างขึ้น

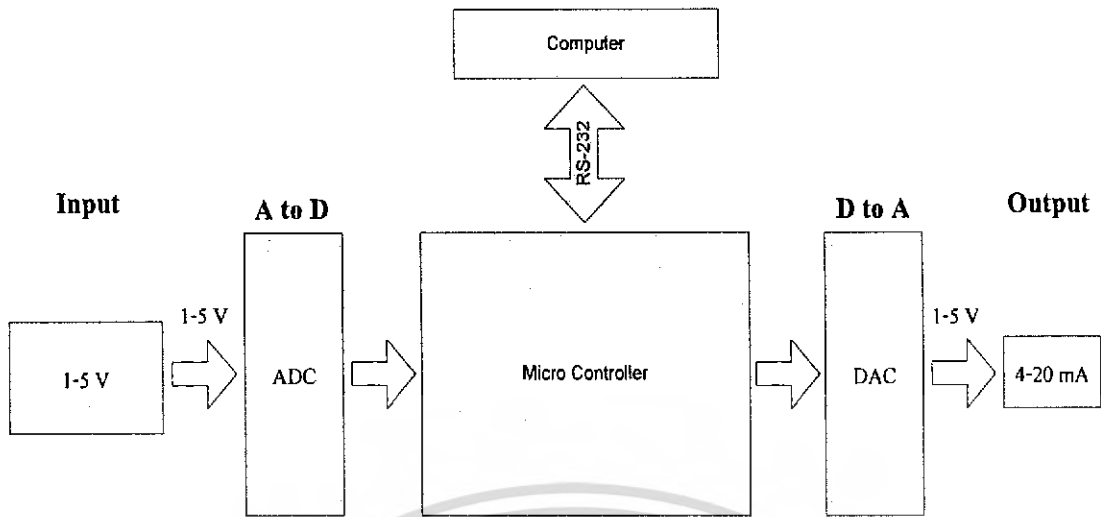
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 แสดงสวิตช์ปรับความเร็วของพัลสมระบายอากาศ

### 3.3.4 ชุดอินเทอร์เฟซ

ชุดอินเทอร์เฟซที่สร้างขึ้นจะเป็นการควบคุมการรับ-ส่งข้อมูล ซึ่งการรับ-ส่งข้อมูลจากกระบวนการคู่ตัวควบคุมที่เป็นคอมพิวเตอร์ จะต้องมีการแปลงสัญญาณจากอนาล็อกสู่ดิจิทัลและดิจิทัลสู่อนาล็อก ในโครงการนี้จะใช้ไอซี PCF8591 ซึ่งเป็นไอซีที่มีวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกสู่ดิจิทัล 4 ช่องสัญญาณ และมีวงจรแปลงสัญญาณจากดิจิทัลสู่อนาล็อก 1 ช่องสัญญาณ โดยทั้ง 2 วงจรมีความแยกชัด 8 บิต และใช้โปรโตคอลในการคิดแบบ  $I^2C$  ซึ่งใช้สายสัญญาณเพียง 2 เส้น ทำให้สะดวกในการใช้งานมาก ชุดอินเทอร์เฟซนี้จะรับค่าจากกระบวนการเป็นแรงดันมาตรฐาน 1-5 โวลต์ ทั้ง 1 ช่องสัญญาณ และ ส่งสัญญาณออกเป็นกระแสไฟฟ้ามาตรฐาน 4-20 mA แต่สัญญาณที่ได้จากวงจรดิจิทัลสู่อนาล็อกจะเป็นแรงดันไฟฟ้า 1-5 โวลต์ จึงต้องผ่านวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นกระแสไฟฟ้าอีกครั้งหนึ่ง โดยที่หัวใจหลักอยู่ที่ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ AT89C51 ของบริษัท Atmel ซึ่งจะทำหน้าที่ ติดต่อกับไอซี PCF 8591 ในการแปลงสัญญาณและรับ-ส่งสัญญาณที่ได้ไปสู่คอมพิวเตอร์โดยใช้การส่งข้อมูลแบบอนุกรมแบบ RS-232



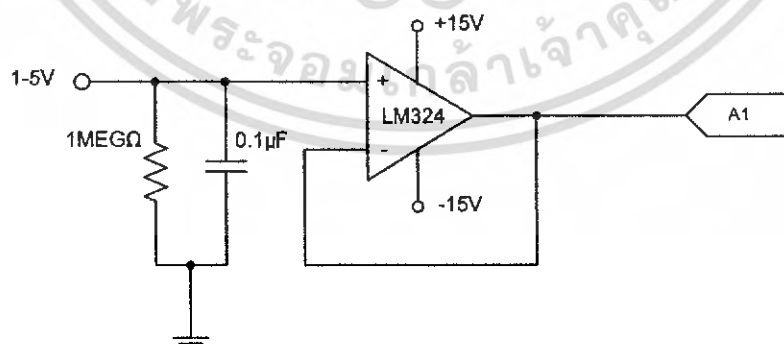
รูปที่ 3.22 แสดงโครงสร้างโดยรวมในส่วนอินเตอร์เฟส

ในส่วนของชุดอินเตอร์เฟสสามารถแยกได้เป็น 3 ส่วนคือ

1. ส่วนอินพุต
2. ส่วนรับ-ส่ง ข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์
3. ส่วนเอาต์พุต

#### 3.3.4.1 ส่วนอินพุต

ส่วนอินพุตจะมี 1 ช่องสัญญาณ โดยจะเป็นช่องรับสัญญาณแรงดันมาตรฐาน 1-5 V จำนวน 1 ช่องสัญญาณ ก่อนสัญญาณจะแรงดันที่เข้ามาทางด้านอินพุตจะผ่าน Buffer ซึ่งมี R, C วัสดุสัญญาณรบกวน ก่อนที่จะส่งไปยังไอซี PCF 8591 ดังรูปที่ 3.23

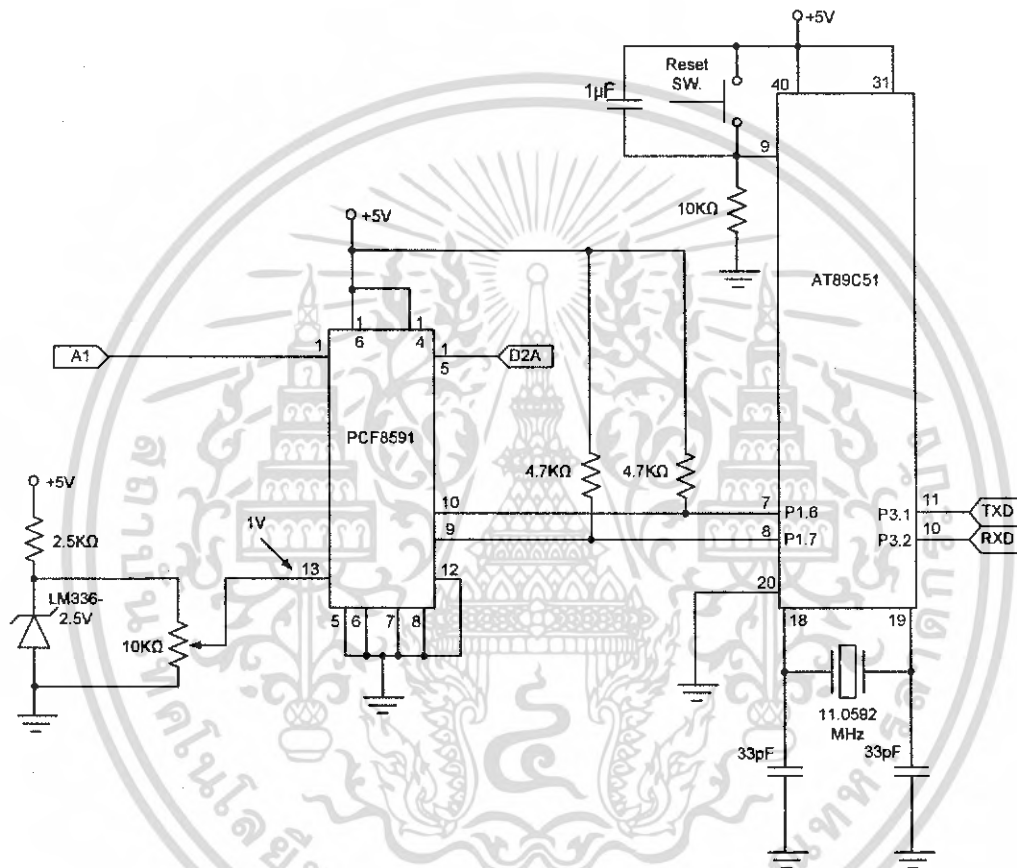


รูปที่ 3.23 แสดงช่องรับสัญญาณมาตรฐาน 1-5 โวลต์ทั้ง 4 ช่องสัญญาณ

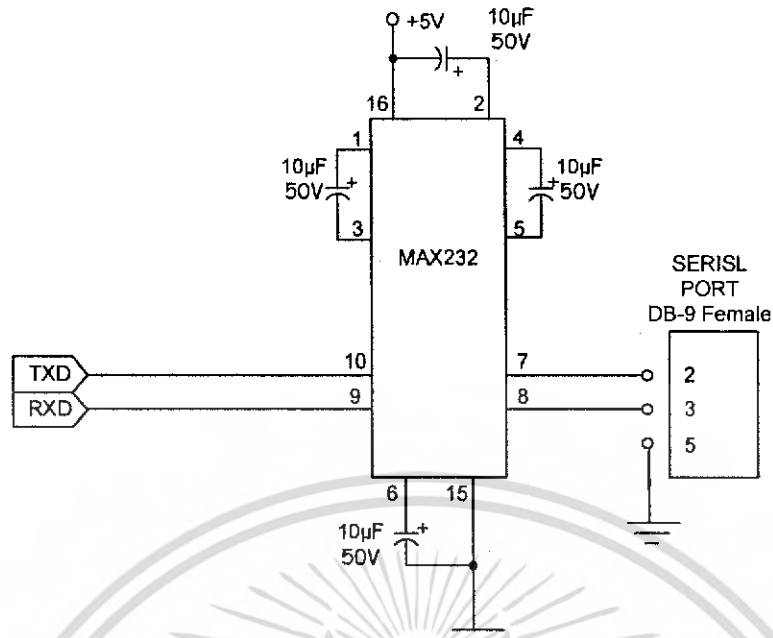
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.4.2 ส่วนรับ-ส่ง ข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์

ส่วนรับ-ส่ง ข้อมูลจะมีหน้าที่รับค่าดิจิตอลจากส่วนอินพุท ในแต่ละช่องสัญญาณ แล้วนำมาส่งข้อมูลให้คอมพิวเตอร์ และรับค่าที่ได้จากการประมวลผลของคอมพิวเตอร์ ส่งไปยังส่วนเอาต์พุท ซึ่งหน้าที่ในการจัดการรับและส่งข้อมูล จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 เบอร์ AT89C51 ของบริษัท Atmel โดยจะรับ-ส่งข้อมูลแบบอนุกรมโดยใช้ไอซี MAX323 ช่วย ในการรับ-ส่งข้อมูล



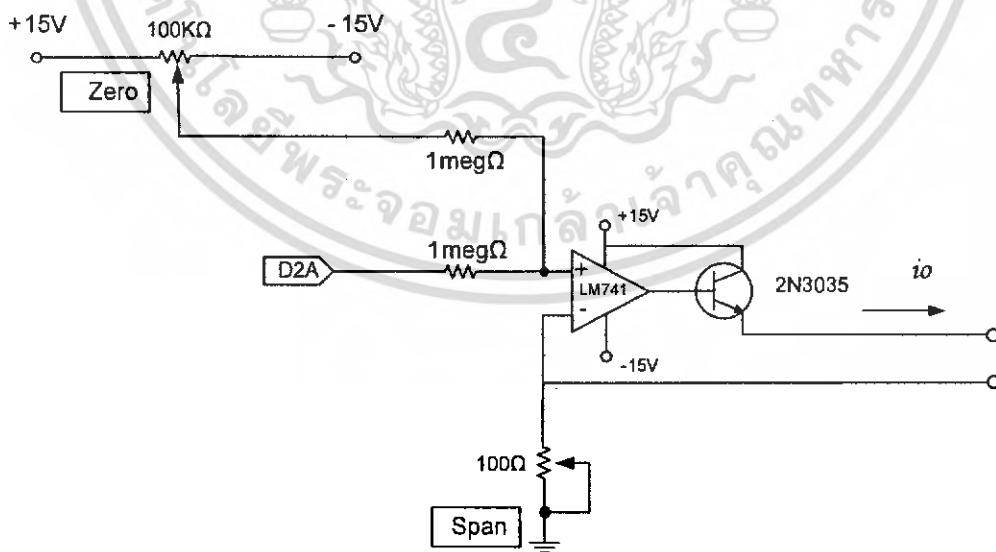
รูปที่ 3.24 แสดงการเชื่อมต่อระหว่างPCF 8591 กับ AT89C51



รูปที่ 3.25 แสดงการต่อวงจรใช้งาน MAX 232

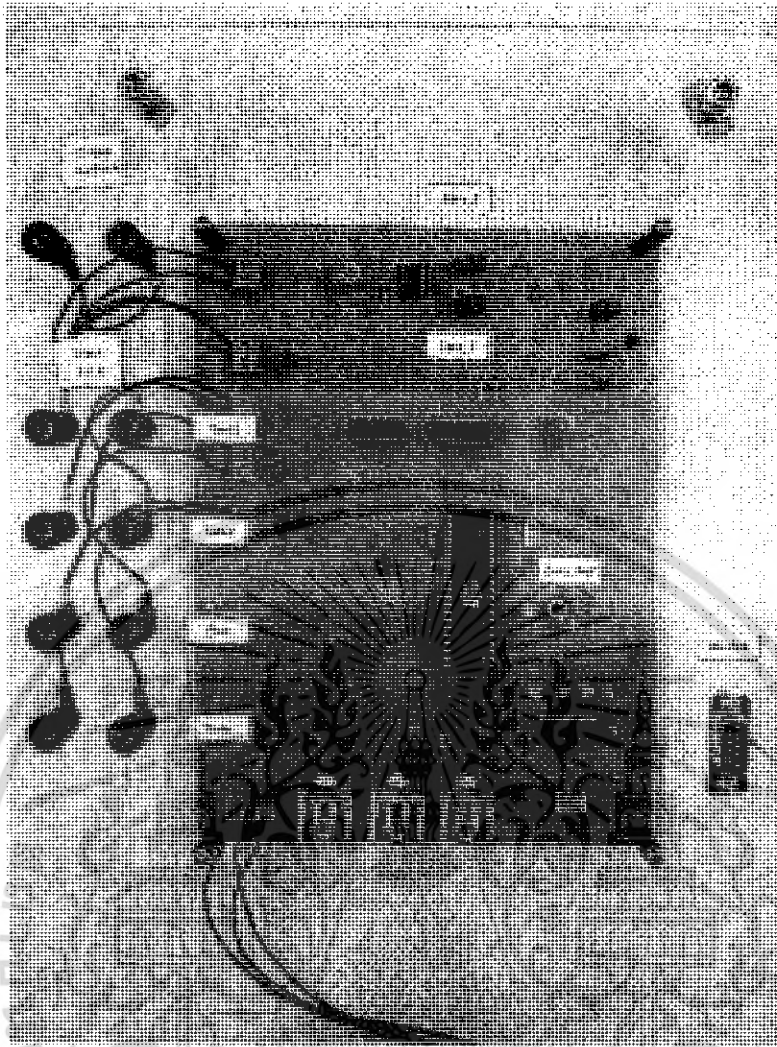
### 3.3.4.3 ส่วนเอาต์พุต

ในส่วนของเอาต์พุตจะรับค่าดิจิตอลจากไมโครคอนโทรลเลอร์แล้วนำมาแปลงเป็นสัญญาณอนาล็อก 1-5 V โดยมีความละเอียดในการแปลงสัญญาณ 8 บิต แรงดันที่ได้จะถูกแปลงเป็นสัญญาณ กระแส 4-20 mA เพื่อส่งไปควบคุมกระบวนการที่ต้องการ



รูปที่ 3.26 แสดงวงจร V to I ที่ใช้ในอินเตอร์เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

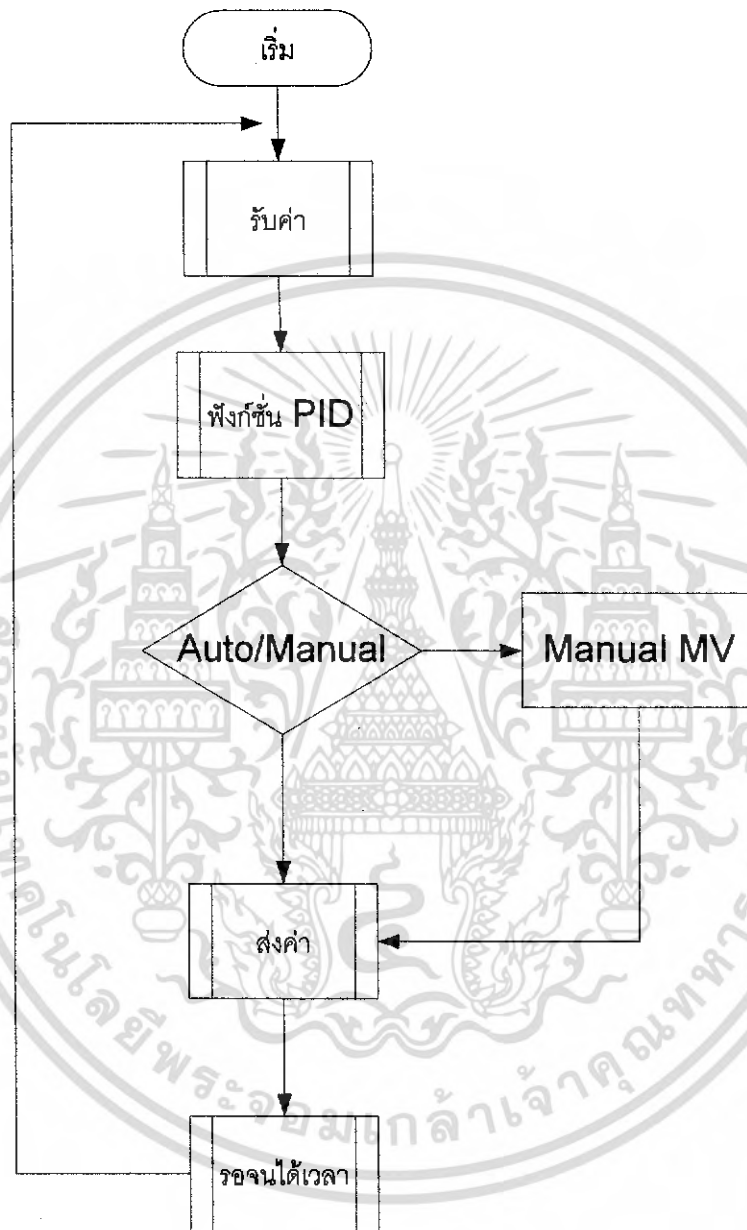


รูปที่ 3.27 แสดงชุดอินเตอร์เฟสที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

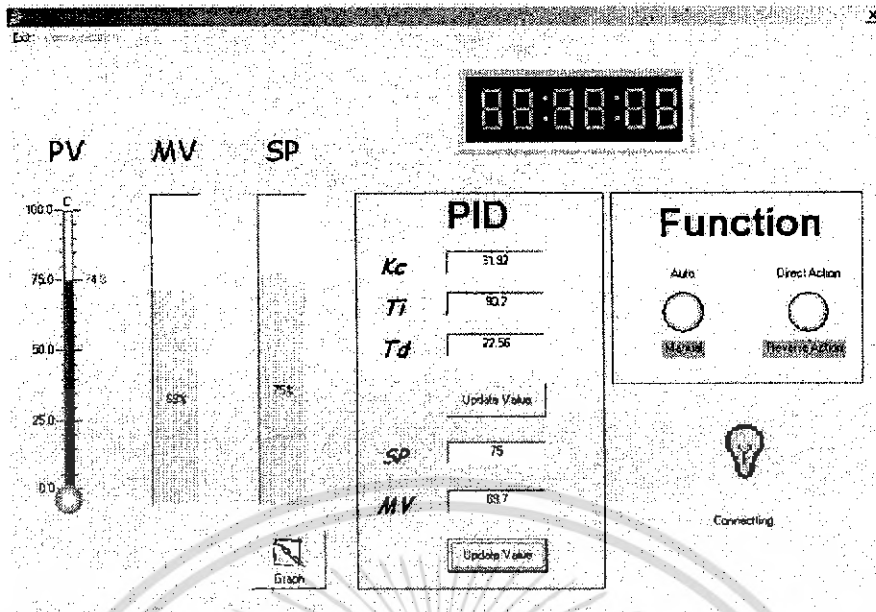
### 3.3.5 ส่วนของ Software

ในส่วนของ Software จะใช้โปรแกรม Visual Basic ในการสร้างตัวควบคุมดิจิทัลบนคอมพิวเตอร์ซึ่งจะแสดงการทำงานของโปรแกรมโดยโฟลว์ชาร์ตรูปที่ 3.28

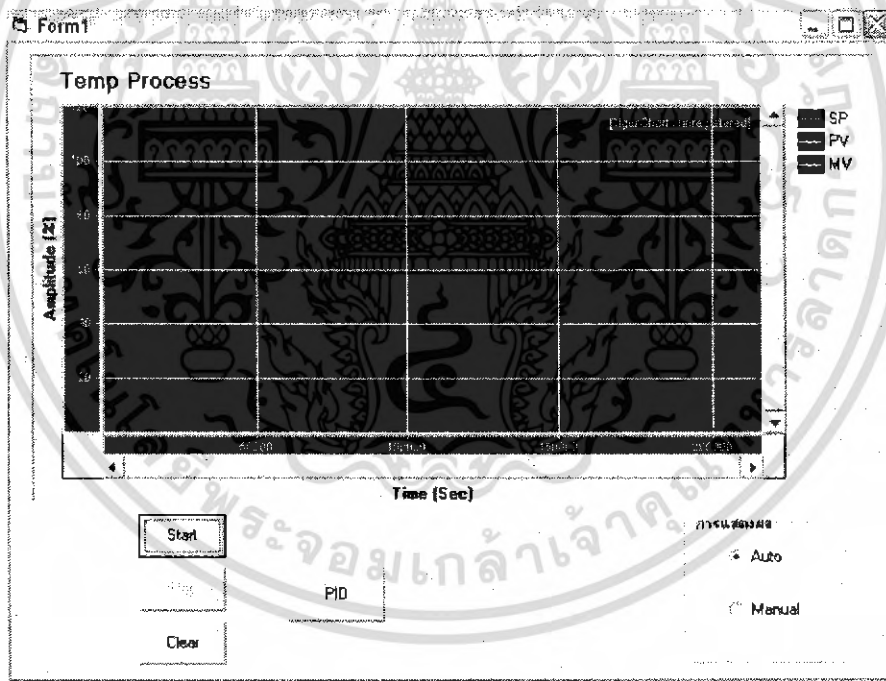


รูปที่ 3.28 แสดงโฟลว์ชาร์ตการทำงานของ PID ดิจิตอลบนคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 แสดงหน้าจอ PID Parameter



รูปที่ 4.30 แสดงหน้าจอกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การทดลอง

#### 4.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะเป็นการทดสอบการควบคุมอุณหภูมิ โดยทำการหาผลตอบสนองของกระบวนการแบบรูปเปิด โดยใช้วิธีของ Ziegler - Nichols ซึ่งใช้วิธีการหา Process Reaction Curve แล้วทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม จากนั้น นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จาก Process Reaction Curve ไปใช้ทดสอบการควบคุมแบบรูปปิด โดยเปรียบเทียบผลระหว่าง ตัวควบคุมของบริษัทโยโกกาว่าอิเล็กทริก (Yokogawa Electric) กับตัวควบคุมที่ได้สร้างขึ้น จากการทดลอง ได้ Process Reaction Curve ดังรูป

#### 4.2 การทดลองส่วนของกระบวนการ



รูปที่ 4.1 แสดง Process Reaction Curve ที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก Process Reaction Curve ได้

$$K = \frac{\Delta PV}{\Delta MV} = \frac{45\%}{35\%} = 1.1428$$

$$t_o = 45.126 \text{ sec}$$

$$\tau = 1714.8 \text{ sec}$$

คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม

$$K_c = \frac{1.2}{K} \left( \frac{\tau}{t_o} \right) = \frac{1.2}{1.1428} \left( \frac{1714.8}{45.126} \right) = 31.918$$

$$T_i = 2t_o = 2 \times 45.126 = 90.2$$

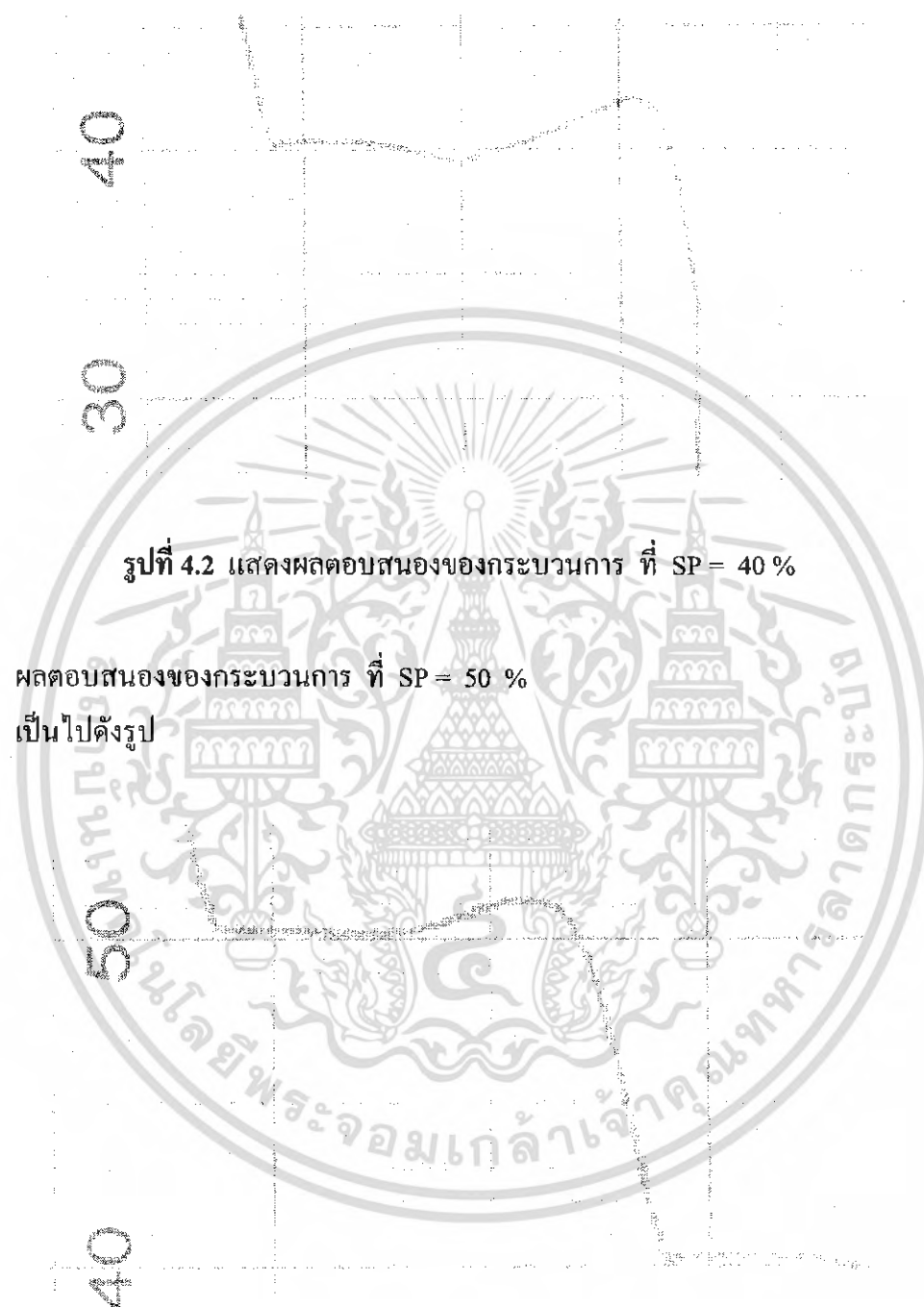
$$T_d = \frac{1}{2} t_o = \frac{1}{2} \times 45.126 = 22.563$$

นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จาก Process Reaction Curve ไปใช้ทดสอบการควบคุมแบบลูบปิด โดยเปรียบเทียบผลระหว่างตัวควบคุมของบริษัทโยโกกาวาอิเล็กทริก (Yokogawa Electric) กับตัวควบคุมที่ได้สร้างขึ้น

#### 4.2.1 ผลการทดลองเมื่อใช้ตัวควบคุมของบริษัทโยโกกาวาอิเล็กทริก (Yokogawa Electric)

ได้ผลดังต่อไปนี้

ผลตอบสนองของกระบวนการ ที่ SP = 40 %  
เป็นไปดังรูป



รูปที่ 4.3 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการ ที่ SP = 50 %

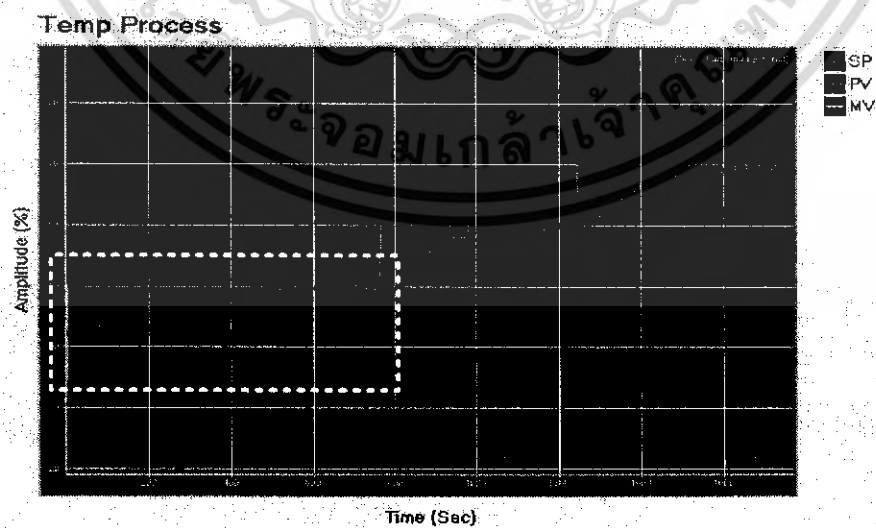
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลตอบสนองของกระบวนการ ที่  $SP = 60\%$   
เป็นไปดังรูป

รูปที่ 4.4 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการ ที่  $SP = 60\%$

4.2.2 ผลการทดลองเมื่อใช้ตัวควบคุมที่ได้สร้างขึ้น

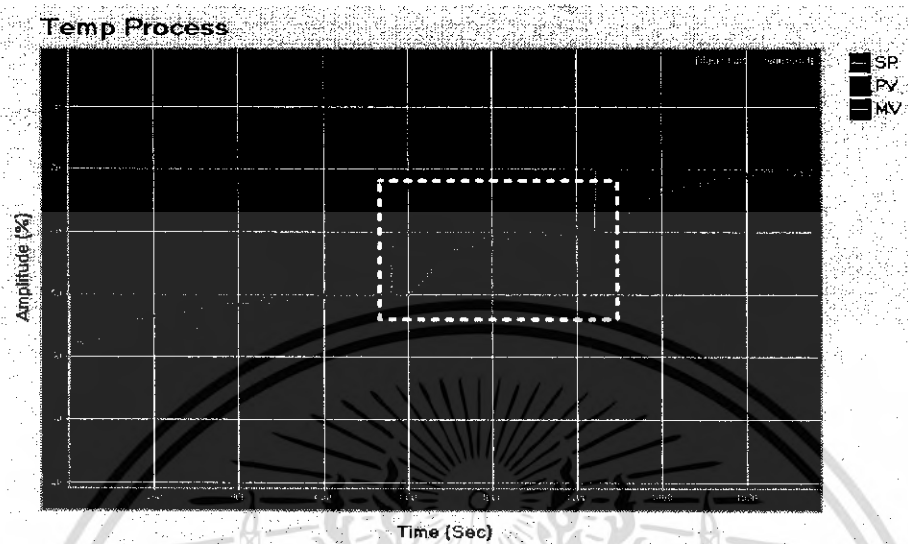
ผลตอบสนองของกระบวนการ ที่  $SP = 40\%$   
เป็นไปดังรูป



รูปที่ 4.5 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการ ที่  $SP = 40\%$

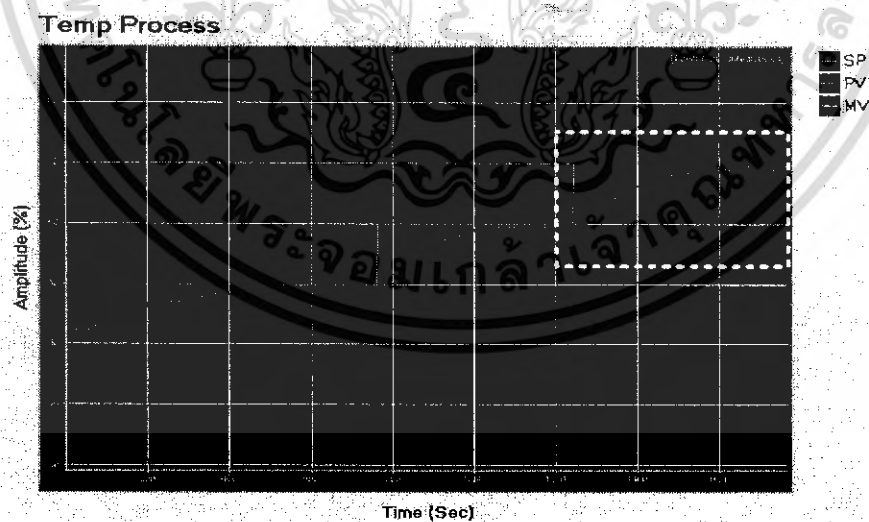
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลตอบสนองของกระบวนการ ที่  $SP = 50\%$   
เป็นไปดังรูป



รูปที่ 4.6 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการ ที่  $SP = 50\%$

ผลตอบสนองของกระบวนการ ที่  $SP = 60\%$   
เป็นไปดังรูป



รูปที่ 4.7 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการ ที่  $SP = 60\%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากำลังงานที่จ่ายให้กับชุดทำความร้อน โดยวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านขดลวดของชุดทำความร้อน และคิดค่ากำลังงานจากสมการ  $P = I^2 \times R$

### 4.3 การทดลองส่วนอุปกรณ์

ตารางที่ 4.1 แสดงค่ากำลังงาน ที่จ่ายให้กับชุดทำความร้อน

mv (%)	I/P Current(A)	O/P Current(A)	O/P Voltage(V)	O/P Power(w)
0	4.00	0	0.088	0
5	4.80	0	0.18	0
10	5.60	0.3	12.19	1.17
15	6.40	0.8	25.63	8.32
20	7.20	1.6	42.6	33.28
25	8.00	2.5	60.7	81.25
30	8.80	3.6	79.2	168.48
35	9.60	4.7	97.9	287.17
40	10.40	5.9	113.9	452.53
45	11.20	7.2	113.9	673.92
50	12.00	8.4	149.8	917.28
55	12.80	9.5	163.6	1173.25
60	13.60	10.6	175.7	1460.68
65	14.40	11.6	186.5	1749.28
70	15.20	12.5	195.5	2031.25
75	16.00	13.3	202.5	2299.57
80	16.80	13.9	207.4	2511.73
85	17.60	15.2	213.4	3003.52
90	18.40	15.2	213.4	3003.52
95	19.20	15.2	213.5	3003.52
100	20.00	15.2	213.5	3003.52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลอง เมื่อนำค่าของพารามิเตอร์ที่หาได้จากการทำ Process Reaction Curve มาทดสอบโดยการควบคุมแบบลูปิด โดยตั้ง Set Point ไว้ที่ค่าต่าง ๆ แล้วสังเกตผลตอบสนองของกระบวนการเปรียบเทียบกับระหว่างตัวควบคุมของบริษัทโยโกกาว่าอิเล็คทริก (YOKOGAWA-ELECTRIC) กับตัวควบคุมที่ได้สร้างขึ้น พบว่าสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ตามค่าเป้าหมายที่ต้องการได้ แต่ถ้าปรับแต่งค่าพารามิเตอร์เพิ่มเติมอีก ก็จะทำให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายที่เร็วขึ้นได้



## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

โครงการนี้เป็นการสร้างชุดทดลองการควบคุมอุณหภูมิ ที่จะป้อนให้กับภาระของระบบ โดยได้ทำการออกแบบกระบวนการซึ่งมีส่วนประกอบหลายส่วนด้วยกัน ทั้งส่วนที่เป็นชุดทำความร้อน ส่วนที่เป็นภาระของระบบ (Load) การออกแบบโปรแกรมควบคุม และส่วนของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ซึ่งจากผลการทดลองนั้น สามารถควบคุมอุณหภูมิ ให้เข้าสู่ค่าที่ต้องการได้อย่างถูกต้อง

#### 5.2 ปัญหา

1. พบว่ามีการร่วซึมที่ถังพักน้ำ สาเหตุนั้นเนื่องจาก เมื่อทำการเดินระบบไปถึงจุด ที่มีอุณหภูมิค่อนข้างสูง โครงสร้างของถังไม่สามารถทนทานต่ออุณหภูมิที่สูงนี้ได้ ทำให้เกิดการร่วซึมบริเวณขอบที่เป็นรอยต่อของถัง แต่ได้ทำการทาสีฉนวนบริเวณที่เป็นรอยต่อให้แน่นหนาขึ้นแล้ว

2. ผลตอบสนองที่เกิดจากการเปลี่ยนขนาดของสัญญาณรบกวน หรือการเปลี่ยนความเร็วรอบของพัดลมระบายความร้อนนั้น มีค่าแตกต่างกันค่อนข้างน้อย ซึ่งอันที่จริงแล้วควรให้ผลที่เกิดจากการทดลองตรงส่วนนี้เห็นผลแตกต่างกันให้ชัดเจน

#### 5.3 ข้อเสนอแนะ

1. การร่วซึมของถังอาจเกิดขึ้นได้อีก ดังนั้นควรมีการตรวจบริเวณที่เป็นรอยต่อของถังเป็นประจำก่อนที่จะทำการใช้งาน และขณะที่มีการเดินระบบถึงจุดที่มีอุณหภูมิค่อนข้างสูง เพราะอาจเป็นอันตรายต่อผู้ที่กำลังทำการทดสอบได้

2. การเห็นผลตอบสนองที่ใกล้เคียงกัน อันเนื่องมาจาก ความเร็วรอบของพัดลมที่ทำให้แรงลมใกล้เคียงกัน ควรหาพัดลมที่มีความเร็วรอบสูงกว่านี้มาใช้ เพราะจะสามารถเลือกค่าของความแรงที่แตกต่างกันให้เห็น ได้อย่างชัดเจนขึ้น

## บรรณานุกรม

1. “ **Industrial control electronics : applications and design** ” J. Michael Jacob  
London : Prentice-Hall International, c1989
2. “ **ปฏิบัติการวิศวกรรมการวัดคุม 1** ” ผศ.วิสรุต ศรีรัตนะ อ.อัมพวัน ใจกล้า อ.พิทยา ปานนิล.  
ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า  
คุณทหารลาดกระบัง
3. “ **หลักการและการใช้งาน เครื่องมือวัดอุตสาหกรรม** ” สมศักดิ์ กীরติวุฒิเศรษฐ์ กรุงเทพฯ: ส.ส.ท.  
,2545
4. “ **คู่มือเรียน Visual Basic 6(ฉบับปรับปรุง)**” ฉัททวุฒิ พิษผล พิชิต สันติกุลานนท์ พร้อมเลิศ หล่อ  
วิจิตร กรุงเทพฯ: โปรวิชั่น, 2547
5. “ **คู่มือการเขียนโปรแกรมและใช้งาน Visual Basic 6.0**” สัจจะ รุ่งรวีว กรุงเทพฯ : อินโฟเพรส ,  
2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้