

การออกแบบตัวควบคุมโดยใช้เทคนิคการเปิดตารางร่วมกับพีไอดี

DESIGN OF A COMBINED LOOKUP TABLE TECHNIQUE AND PID  
CONTROLLER

วีระศักดิ์ โคนแจ้ง

WEERASAK TOJAENG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2162-5

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบตัวควบคุมโดยใช้เทคนิคการเปิดตารางร่วมกับพีไอดี

DESIGN OF A COMBINED LOOKUP TABLE TECHNIQUE AND PID  
CONTROLLER



วีระศักดิ์ โตแจ้ง

WEERASAK TOJAENG

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 73140  
วัน,เดือน,ปี..... - 5 ป.ศ. 2550

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

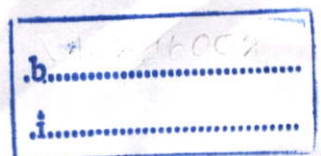
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2162-6



**DESIGN OF A COMBINED LOOKUP TABLE TECHNIQUE AND PID  
CONTROLLER**

**WEERASAK TOJAENG**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING INSTRUMENTATION ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2005**

**ISBN 974-15-2162-6**

**COPYRIGHT 2006**

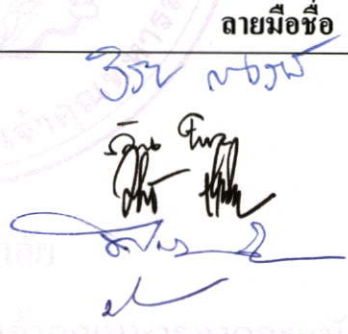
**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

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

บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบตัวควบคุมโดยใช้เทคนิคการเปิดตารางร่วมกับพีไอดี  
DESIGN OF A COMBINED LOOKUP TABLE TECHNIQUE AND PID  
CONTROLLER

นักศึกษา นายวีระศักดิ์ โตแจ้ง  
รหัสประจำตัว 45061166  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม  
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ประสิทธิ์ จุลเสรีวงศ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.วิริยะ	กองรัตน์	
ผศ.อัมพวัน	ใจกล้า	
ผศ.อาจินต์	น่วมสำราญ	
ผศ.พิทยา	ปานนิล	
รศ.ประสิทธิ์	จุลเสรีวงศ์	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 22 ธันวาคม 2548 เวลา 11.30-13.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น 4 (ห้อง E12-404)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว  
  
(ผศ.ดร.จรรุวัตร เจริญสุข)  
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....3.....เดือน.....ธันวาคม.....พ.ศ.2549.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบตัวควบคุม โดยใช้เทคนิคการเปิดตารางร่วมกับพีไอดี
นักศึกษา	นายวีระศักดิ์ โตะแจ้ง
รหัสนักศึกษา	45061166
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการวัดคุม
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. ประสิทธิ์ จุลเสวีวงศ์

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการกำหนดค่าเริ่มต้นที่เหมาะสมกับกระบวนการที่ใช้ควบคุม โดยวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบวิธีการควบคุมที่มีสองส่วนในการทำงาน โดยใช้เทคนิคการเปิดตาราง ร่วมกับการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี ที่มีความง่ายในการออกแบบและให้ผลตอบสนองที่รวดเร็วในการควบคุม โดยอาศัยหลักการนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับตัวควบคุมที่มีใช้ในท้องตลาดได้ การทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมจะทำการศึกษาคูณสมบัติต่าง ๆ ของตัวควบคุม โดยใช้ชุดทดลอง การควบคุมอุณหภูมิ การควบคุมระดับ และ การควบคุมอัตราการใช้ และผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมที่ทำการศึกษาแบบใช้ตัวควบคุมที่มีสองส่วนในการทำงานมีคุณสมบัติดีกว่าในเรื่องค่าพุงเกินที่ต่ำกว่า และผลตอบสนองที่เร็วกว่าระบบการควบคุมที่ใช้ควบคุมในส่วนการควบคุมแบบพีไอดี หรือ การควบคุมแบบพีไอเพียงอย่างเดียว

<b>Thesis Title</b>	Design of A combined Lookup Table Technique and PID Controller
<b>Student</b>	Mr. Weerasak Tojaeng
<b>Student ID</b>	45061166
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Instrumentation Engineering
<b>Year</b>	2006
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Prasit Julsereewong

### **ABSTRACT**

This thesis, a lookup table technique for properly initial of process control. Using this technique in combination with PID control algorithm, a two-mode controller is designed. The propose of the designed controller is applied to provide a simple and fast response control. The propose controller is easy and convenient to design based on a programmable commercial controller. The performances of the proposed controller, i.e. rise time, fall time and overshoot were studied by the use of liquid level plant thermal plant and fluid flow control systems as studied cases. The experimental result verified the studied system performances are better than (smaller overshoot and faster response) system using PID or PI control mode.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้คงไม่อาจสำเร็จลงได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือและความร่วมมืออย่างดีจากหลาย ๆ ฝ่ายด้วยกัน ขอขอบพระคุณ รศ.ประสิทธิ์ จุลเสรีวงศ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่มีส่วนสำคัญที่ทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมทุกท่าน ที่ช่วยให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอขอบพระคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และ น้อง ๆ ที่ได้ให้คำแนะนำและการช่วยเหลือเป็นอย่างดีต่อการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลที่สำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้าได้มีวันนี้ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่รักยิ่ง พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่ตลอดมาในทุก ๆ ด้าน อันหาที่เปรียบไม่ได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

วีระศักดิ์ โตะแจ้ง

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	VIII
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและเหตุจูงใจของการทำวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการควบคุมแบบป้อนกลับ.....</b>	<b>3</b>
2.1 กล่าวนำ.....	3
2.2 การควบคุมแบบป้อนกลับ.....	5
2.2.1 การควบคุมกระบวนการแบบ ON-OFF.....	6
2.2.2 การควบคุมแบบป้อนกลับ พีไอดี.....	7
2.2.3 การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า.....	8
2.3 วิธีการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม พีไอดี จากผลตอบสนอง ของกระบวนการที่นิยมใช้ในปัจจุบัน.....	12
2.3.1 การคำนวณจากวิธี Process Reaction Curve.....	13
2.4 ทฤษฎีวาล์วควบคุม.....	15
2.4.1 วาล์วควบคุม.....	16
2.4.2 ชนิดของวาล์วควบคุม.....	19
2.4.3 คุณสมบัติภายในของวาล์ว.....	21
2.4.4 การเลือกขนาดวาล์วควบคุม.....	22

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 3 หลักการที่นำเสนอและทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบการควบคุม.....</b>	<b>25</b>
3.1 กล่าวนำ.....	25
3.2 หลักการที่นำเสนอ.....	25
3.3 ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบ.....	26
3.3.1 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน.....	26
3.3.2 การทดลองนำเทคนิคการเปิดตารางที่ออกแบบไปทดลองใช้งาน จริง โดยการอบอาหาร.....	36
3.3.3 ทฤษฎีพลังงานสมดุล.....	40
3.3.3.1 การควบคุมระดับของของเหลว.....	40
3.3.3.2 การควบคุมอัตราการไหล.....	47
<b>บทที่ 4 การควบคุมและการประยุกต์ใช้งาน.....</b>	<b>50</b>
4.1 กล่าวนำ.....	50
4.2 หลักการคำนวณสำหรับการประยุกต์ใช้งานกับกระบวนการต่าง ๆ.....	51
4.2.1 การประยุกต์ใช้หลักการที่นำเสนอสำหรับการควบคุมอุณหภูมิ.....	51
4.2.2 การทดลองเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับตัวควบคุมแบบ พีไอดี กับ โปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์กับกระบวนการควบคุม อุณหภูมิ .....	52
4.2.3 การประยุกต์ใช้หลักการที่นำเสนอสำหรับการควบคุมระดับ.....	64
4.2.4 การใช้โปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์กับเทคนิคการเปิดตาราง ร่วมกับตัวควบคุม พีไอดี ทดลองกับกระบวนการควบคุมระดับ ของของเหลว.....	65
4.2.5 การประยุกต์ใช้หลักการที่นำเสนอสำหรับการควบคุมอัตราการไหล.....	77
4.2.6 การใช้โปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์กับเทคนิคการเปิดตาราง ร่วมกับตัวควบคุม พีไอดี ทดลองกับกระบวนการควบคุมอัตรา การไหล.....	78

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 5 ผลการทดลอง.....</b>	<b>84</b>
5.1 กล่าวนำ.....	84
5.2 การประยุกต์ใช้หลักการที่นำเสนอ โดยใช้ตัวควบคุม SLPC .....	84
5.3 การใช้งานตัวควบคุม (Controller Operation) .....	85
5.3.1 ตัวแสดงผลทางด้านหน้า .....	85
5.3.2 การแสดงผลค่าเป้าหมายและตัวแสดงผลค่าในกระบวนการ.....	85
5.3.3 การเลือกโหมด (mode)การทำงาน.....	86
5.3.4 แผงควบคุมด้านข้าง .....	87
5.3.5 การแทรกสัญญาณอินพุต.....	87
5.4 ผลการทดลองกับกระบวนการควบคุมอุณหภูมิ .....	88
5.5 ผลการทดลองกับกระบวนการควบคุมระดับของของเหลว.....	94
5.6 ผลการทดลองกับกระบวนการควบคุมอัตราการไหล.....	99
<b>บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>102</b>
6.1 บทสรุป.....	102
6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา.....	102
<b>เอกสารอ้างอิง.....</b>	<b>104</b>
<b>ภาคผนวก .....</b>	<b>105</b>
ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์.....	106
ภาคผนวก ข. โปรแกรมที่ใช้ในวิทยานิพนธ์.....	113
<b>ประวัติผู้เขียน.....</b>	<b>119</b>

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สูตรการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม พีไอดี โดยวิธี Process reaction curve.....	15
2.2 สูตรคำนวณค่า CV .....	23
2.2 (ต่อ) สูตรคำนวณค่า CV.....	24
3.1 สภาพนำความร้อนสำหรับวัสดุบางชนิดที่อุณหภูมิ 20 °C.....	27
3.1 (ต่อ) สภาพนำความร้อนสำหรับวัสดุบางชนิดที่อุณหภูมิ 20 °C.....	28
3.2 ค่าใช้งานของ $h$ และพิสัยของ $h$ สำหรับของไหลชนิดต่าง ๆ.....	30
3.3 ข้อมูลของกระบวนการทางอุณหภูมิที่ได้จากการทดลอง.....	34
3.3 (ต่อ) ข้อมูลของกระบวนการทางอุณหภูมิที่ได้จากการทดลอง.....	35
3.4 ข้อมูลของกระบวนการทางอุณหภูมิในการทดลองอบอาหาร.....	38
3.4 (ต่อ) ข้อมูลของกระบวนการทางอุณหภูมิในการทดลองอบอาหาร.....	38
3.5 ข้อมูลของกระบวนการการควบคุมระดับของของเหลวที่ใช้ในการทดลอง.....	45
3.6 ข้อมูลของกระบวนการการควบคุมอัตราการไหลที่ใช้ในการทดลอง.....	48
3.6 (ต่อ) ข้อมูลของกระบวนการการควบคุมอัตราการไหลที่ใช้ในการทดลอง.....	49

# สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	บล็อกไคอะแกรมของระบบควบคุมแบบป้อนกลับโดยทั่วไป.....5
2.2	กรียาการควบคุมแบบ ON – OFF.....6
2.3	บล็อกไคอะแกรมรวมถึงอินพุตและเอาต์พุตของตัวควบคุม พีไอดี .....8
2.4	บล็อกไคอะแกรมของระบบควบคุมแบบล่วงหน้า.....9
2.5	หม้อไอน้ำและระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า.....10
2.6	หม้อไอน้ำและระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าและป้อนกลับ.....10
2.7	บล็อกไคอะแกรมระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าพร้อมอุปกรณ์ต่าง ๆ.....11
2.8	โครงสร้างของระบบควบคุมที่ควบคุมด้วยตัวควบคุม พีไอดี.....13
2.9	ค่าพ่วงเกินที่ต้องการเมื่อใช้การปรับด้วยวิธีของ Ziegler-Nichols.....13
2.10	ผลตอบสนองรูปตัว S เมื่อใช้วิธี Process Reaction Curve .....14
2.11	บ่าวาล์วที่ใช้งานโดยส่วนใหญ่.....16
2.12	ตัวอย่างวาล์วควบคุมในงานอุตสาหกรรม.....16
2.13	โครงสร้างของวาล์วควบคุม.....18
2.14	ไคอะแกรมแสดงชนิดของวาล์วควบคุม.....19
2.15	การทำงานของวาล์วควบคุม..... 20
2.16	ตัวอย่างของปลั๊กวาล์วในการควบคุมการไหลแบบต่างๆ..... 21
2.17	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการไหลผ่านวาล์วกับตำแหน่งของวาล์ว..... 22
3.1	การนำความร้อนตามกฎความร้อนของฟูเรียร์.....26
3.2	การระบายความร้อนออกจากวัตถุโดยการพาความร้อน.....29
3.3	สมดุลพลังงานบนวัตถุที่บ่งแสงเมื่อมีรังสีความร้อนตกกระทบบนวัตถุ.....31
3.4	การแผ่รังสีความร้อนระหว่างพื้นผิว A1 กับสิ่งแวดล้อมขนาดใหญ่โดยรอบ.....32
3.5	กราฟแสดงการเปรียบเทียบพลังงานความร้อนระหว่างการคำนวณกับการวัดจริง.....36
3.6	การทดลองอบอาหาร โดยใช้เนื้อไก่รูปทรงกระบอกพื้นที่ 0.013 ตารางเมตร.....37
3.7	การเปรียบเทียบกันระหว่างค่า $P$ และ $\dot{Q}$ จากข้อมูลในตารางที่ 3.4.....39
3.8	การเปรียบเทียบระหว่างค่าของ $T_{meas}$ และ $T_{cal}$ จากข้อมูลในตารางที่ 3.4.....40
3.9	ระบบควบคุมระดับที่ใช้ในการทดลอง.....42
3.10	ลักษณะและขนาดของแท่งกึ่งที่ใช้.....43
3.11	แผนภูมิเส้นแสดงระดับอัตราการไหลออก $Q_o$ ในแต่ละระดับของค่าเป้าหมาย.....46

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.12 แผนภูมิเส้นแสดงระดับสัญญาณควบคุม $mv$ ในแต่ละระดับค่าเป้าหมาย จากค่าในตารางที่ 3.3.....	46
3.13 ชนิดของระบบการควบคุมอัตราการใช้งาน.....	47
3.14 โครงสร้างการควบคุมอัตราการใช้งาน.....	48
3.15 แผนภูมิเส้นแสดงระดับอัตราการใช้งาน $Q_0$ ในแต่ละระดับของค่าเป้าหมาย.....	49
4.1 ตัวควบคุมที่สามารถแสดงค่าและโปรแกรมได้ (SLPC) ที่ใช้ในการทดลอง.....	50
4.2 ชุดทดลองกระบวนการควบคุมอุณหภูมิ.....	51
4.3 การควบคุมอุณหภูมิแบบป้อนกลับ.....	51
4.4 โปรแกรม Simulink ในรูปบล็อกไดอะแกรมในการทดลองที่อุณหภูมิ 120 °C ด้วยการควบคุมแบบ PI ที่ $K_c = 19.93$ , $T_i = 144$ sec, $T_d = 36$ sec ความเร็ว ในการบันทึก 100 mm/h.....	54
4.5 ผลการทดลองกับโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ Simulink ที่อุณหภูมิ 120 °C ด้วยการควบคุมแบบ พีไอดี ที่ $K_c = 19.93$ , $T_i = 144$ sec, $T_d = 36$ sec ความเร็วในการบันทึก 100 mm/h.....	54
4.6 โปรแกรม Simulink ในรูปบล็อกไดอะแกรมในการทดลองที่อุณหภูมิ 120 °C ด้วยเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับการควบคุมแบบ พีไอดี ที่ $K_c = 19.93$ , $T_i = 144$ sec, $T_d = 36$ sec ความเร็วในการบันทึก 100 mm/h.....	55
4.7 ผลการทดลองกับโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ Simulink ที่อุณหภูมิ 120 °C ด้วยการควบคุมแบบเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับตัวควบคุมแบบ พีไอดี ที่ $K_c = 19.93$ , $T_i = 144$ sec, $T_d = 36$ sec ความเร็วในการบันทึก 100 mm/h.....	55
4.8 โปรแกรม Simulink ในรูปบล็อกไดอะแกรมในการทดลองที่อุณหภูมิ 150 °C ด้วยการควบคุมแบบ พีไอดี ที่ $K_c = 30.09$ , $T_i = 72$ sec, $T_d = 18$ sec ความเร็ว ในการบันทึก 100 mm/h.....	57
4.9 ผลการทดลองกับโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ Simulink ที่อุณหภูมิ 150 °C ด้วยการควบคุมแบบ พีไอดี ที่ $K_c = 30.09$ , $T_i = 72$ sec, $T_d = 18$ sec ความเร็วในการบันทึก 100 mm/h.....	57

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.10 โปรแกรม Simulink ในรูปบล็อกไดอะแกรมในการทดลองที่อุณหภูมิ 150 °C ด้วยเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับการควบคุมแบบ พีไอดี ที่ $K_c = 30.09$ , $T_i = 72$ sec, $T_d = 18$ sec ความเร็วในการบันทึก 100 mm/h.....	58
4.11 ผลการทดลองกับโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ Simulink ที่อุณหภูมิ 150 °C ด้วยการควบคุมแบบเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับตัวควบคุมแบบ พีไอดี ที่ $K_c = 30.09$ , $T_i = 72$ sec, $T_d = 18$ sec ความเร็วในการบันทึก 100 mm/h.....	58
4.12 โปรแกรม Simulink ในรูปบล็อกไดอะแกรมในการทดลองที่อุณหภูมิ 170 °C ด้วยการควบคุมแบบ พีไอดี ที่ $K_c = 19.06$ , $T_i = 72$ sec, $T_d = 18$ sec ความเร็ว ในการบันทึก 100 mm/h .....	60
4.13 ผลการทดลองกับโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ Simulink ที่อุณหภูมิ 170 °C ด้วยการควบคุมแบบ พีไอดี ที่ $K_c = 19.06$ , $T_i = 72$ sec, $T_d = 18$ sec ความเร็วในการบันทึก 100 mm/h.....	60
4.14 โปรแกรม Simulink ในรูปบล็อกไดอะแกรมในการทดลองที่อุณหภูมิ 170 °C ด้วยเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับการควบคุมแบบ พีไอดี ที่ $K_c = 19.06$ , $T_i = 72$ sec, $T_d = 18$ sec ความเร็วในการบันทึก 100 mm/h.....	61
4.15 ผลการทดลองกับโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ Simulink ที่อุณหภูมิ 170 °C ด้วยการควบคุมแบบเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับตัวควบคุมแบบ พีไอดี ที่ $K_c = 19.06$ , $T_i = 72$ sec, $T_d = 18$ sec ความเร็วในการบันทึก 100 mm/h.....	61
4.16 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของกระบวนการทางความร้อน.....	62
4.17 ขั้นตอนการทำงานของตัวควบคุม SLPC ที่ใช้กับการควบคุมกระบวนการ ทางความร้อน.....	62
4.18 ชุดทดลองกระบวนการควบคุมระดับของของเหลว.....	64
4.19 โครงสร้างการทดลองกับกระบวนการควบคุมระดับ.....	64
4.20 โปรแกรม Simulink ในรูปบล็อกไดอะแกรมในการทดลองที่ระดับเป้าหมาย 50 % ด้วยการ ควบคุมแบบพีไอดีที่ $K_c = 6.39$ , $T_i = 33.3$ sec ความบันทึก 360 mm/h.....	67

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.21 ผลการทดลองกับโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ Simulink ที่ระดับเป้าหมาย 50% ด้วยการควบคุมแบบ PI ที่ $K_c = 6.39, T_i = 33.3 \text{ sec}$ ความเร็วการบันทึก 360 mm/h.....	67
4.22 โปรแกรม Simulink ในรูปบล็อกไดอะแกรมในการทดลองที่ระดับ 50% ด้วยเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับการควบคุมแบบ พีไอดี ที่ $K_c = 6.39, T_i = 33.3 \text{ sec}$ ความเร็วในการบันทึก 360 mm/h.....	68
4.23 ผลการทดลองกับโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ Simulink ที่ระดับ เป้าหมาย 50% ด้วยการควบคุมแบบเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับ ตัวควบคุมแบบ พีไอดี ที่ $K_c = 6.39, T_i = 33.3 \text{ sec}$ ความเร็วในการบันทึก 360 mm/h.....	68
4.24 โปรแกรม Simulink ในรูปบล็อกไดอะแกรมในการทดลองที่ระดับ 70 % ด้วยการควบคุมแบบ พีไอดี ที่ $K_c = 3.52, T_i = 33.3 \text{ sec}$ ความเร็วในการบันทึก 360 mm/h.....	70
4.25 ผลการทดลองกับ โปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ Simulink ที่ระดับเป้าหมาย 70% ด้วยการควบคุมแบบ พีไอดี ที่ $K_c = 3.52, T_i = 33.3 \text{ sec}$ ความเร็วในการบันทึก 360 mm/h.....	70
4.26 โปรแกรม Simulink ในรูปบล็อกไดอะแกรมในการทดลองที่ระดับ 70% ด้วยเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับการควบคุมแบบ พีไอดี ที่ $K_c = 3.52, T_i = 33.3 \text{ sec}$ ความเร็วในการบันทึก 360 mm/h.....	71
4.27 ผลการทดลองกับโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ Simulink ที่ระดับ เป้าหมาย 70% ด้วยการควบคุมแบบเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับตัวควบคุม แบบ พีไอดี ที่ $K_c = 3.52, T_i = 33.3 \text{ sec}$ ความเร็วในการบันทึก 360 mm/h.....	71
4.28 โปรแกรม Simulink ในรูปบล็อกไดอะแกรมในการทดลองที่ระดับเป้าหมาย 80 % ด้วยการควบคุมแบบ พีไอดี ที่ $K_c = 3.02, T_i = 33.3 \text{ sec}$ ความเร็วใน การบันทึก 360 mm/h.....	73
4.29 ผลการทดลองกับ โปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ Simulink ที่ระดับเป้าหมาย 80% ด้วยการควบคุมแบบ พีไอดี ที่ $K_c = 3.02, T_i = 33.3 \text{ sec}$ ความเร็วในการบันทึก 360 mm/h.....	73

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.30 โปรแกรม Simulink ในรูปบล็อกไดอะแกรมในการทดลองที่ระดับ 80% ด้วยเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับการควบคุมแบบ พีไอดี ที่ $K_c = 3.02$ , $T_i = 33.3$ sec ความเร็วในการบันทึก 360 mm/h.....	74
4.31 ผลการทดลองกับ โปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ Simulink ที่ระดับเป้าหมาย 80% ด้วยการควบคุมแบบเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับ ตัวควบคุมแบบ พีไอดี ที่ $K_c = 3.02$ , $T_i = 33.3$ sec ความเร็วในการบันทึก 360 mm/h.....	74
4.32 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของระบบการควบคุมระดับ.....	75
4.33 ขั้นตอนการทำงานของตัวควบคุม SLPC ที่ใช้ควบคุมระดับของของเหลว.....	75
4.34 ชุดทดลองกระบวนการควบคุมอัตราการไหล.....	77
4.35 โครงสร้างการทดลองกับกระบวนการควบคุมอัตราการไหล.....	77
4.36 โปรแกรม Simulink ในรูปบล็อกไดอะแกรมในการทดลองที่อัตราการไหล ค่าเป้าหมาย 20%, 60%, 100%, 80% และ 40% ด้วยการควบคุมแบบ PI ที่ $K_c = 9$ , $T_i = 19.98$ sec ความเร็วในการบันทึก 600 mm/h.....	80
4.37 ผลการทดลองกับ โปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ Simulink ที่อัตราการไหลค่าเป้าหมาย 20%, 60%, 100%, 80% และ 40% ด้วยการควบคุม แบบ PI ที่ $K_c = 9$ , $T_i = 19.98$ sec ความเร็วในการบันทึก 600 mm/h.....	80
4.38 โปรแกรม Simulink ในรูปบล็อกไดอะแกรมในการทดลองที่อัตราการไหล ค่าเป้าหมาย 20%, 60%, 100%, 80% และ 40% ด้วยเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับ การควบคุมแบบ PI ที่ $K_c = 9$ , $T_i = 19.98$ sec ความเร็วในการบันทึก 600 mm/h.....	81
4.39 ผลการทดลองกับ โปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ Simulink ที่อัตราการไหลค่าเป้าหมาย 20%, 60%, 100%, 80% และ 40% ด้วยการควบคุม แบบเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับตัวควบคุมแบบ PI ที่ $K_c = 9$ , $T_i = 19.98$ sec ความเร็วในการบันทึก 600 mm/h.....	81
4.40 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของระบบการควบคุมอัตราการไหล.....	82
4.41 ขั้นตอนการทำงานของตัวควบคุม SLPC ที่ใช้ควบคุมอัตราการไหล.....	82
5.1 ส่วนแสดงผลทางด้านหน้า (Moving Coil Version).....	85
5.2 รุ่นที่แสดงผลแบบขดลวดเคลื่อนที่.....	86

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.3 รุ่นที่แสดงผลแบบดิจิทัล.....	86
5.4 แผงควบคุมด้านข้างของตัวควบคุม SLPC.....	87
5.5 ส่วนของ TRKF1 ในตัวควบคุม SLPC ที่ใช้ในการทดลองควบคุมอุณหภูมิและ การทดลองการควบคุมระดับของของเหลว.....	87
5.6 ส่วนของ TRKF1 ในตัวควบคุม SLPC ที่ใช้ในการทดลองควบคุมอัตราการไหล.....	88
5.7 การใช้ตัวควบคุม SLPC ควบคุมอุณหภูมิภายในตู้อบ.....	88
5.8 โครงสร้างการทดลองกับกระบวนการควบคุมอุณหภูมิ.....	89
5.9 (ก) ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่อุณหภูมิ 120 °C ด้วยการควบคุมแบบ พีไอดี ตามวิธีของ Ziegler-Nichols ( $K_c = 19.93$ , $T_i = 144$ sec และ $T_d = 36$ sec) ความเร็วในการบันทึก 100 mm/h	
(ข) ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่อุณหภูมิ 120 °C ด้วยเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับตัวควบคุมแบบ พีไอดี ที่ ( $K_c = 19.93$ , $T_i = 144$ sec และ $T_d = 36$ sec) ความเร็วในการบันทึก 100 mm/h.....	90
5.10 (ก) ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่อุณหภูมิ 150 °C ด้วยการควบคุมแบบ PI ตามวิธีของ Ziegler-Nichols ( $K_c = 30.09$ , $T_i = 72$ sec, $T_d = 18$ sec ) ความเร็วในการบันทึก 100 mm/h	
(ข) ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่อุณหภูมิ 150 °C ด้วยเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับตัวควบคุมแบบ พีไอดี ที่ ( $K_c = 30.09$ , $T_i = 72$ sec, $T_d = 18$ sec ) ความเร็วในการบันทึก 100 mm/h.....	91
5.11 (ก) ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่อุณหภูมิ 170 °C ด้วยการควบคุมแบบ พีไอดี ตามวิธีของ Ziegler-Nichols ( $K_c = 19.06$ , $T_i = 72$ sec, $T_d = 18$ sec) ความเร็วในการบันทึก 100 mm/h	
(ข) ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่อุณหภูมิ 170 °C ด้วยเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับตัวควบคุมแบบ พีไอดี ที่ ( $K_c = 19.06$ , $T_i = 72$ sec, $T_d = 18$ sec) ความเร็วในการบันทึก 100 mm/h.....	92

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.12 (ก) ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิที่ 150 °C ในตู้อบที่มีไหลค โดยใช้ตัวควบคุมแบบ พีไอดี ที่ ( $K_c = 30.09$ , $T_i = 72$ Sec และ $T_d = 18$ Sec) ความเร็วในการบันทึก 100 mm/h	
(ข) ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิที่ 150 °C ในตู้อบที่มีไหลค โดยใช้เทคนิคการเปิดตารางร่วมกับตัวควบคุมแบบ พีไอดี ที่ ( $K_c = 30.09$ , $T_i = 72$ Sec และ $T_d = 18$ Sec ) ความเร็วในการบันทึก 100 mm/h .....	93
5.13 การใช้ตัวควบคุม SLPC ควบคุมระดับของน้ำในถัง.....	94
5.14 โครงสร้างการทดลองกับกระบวนการควบคุมระดับของของเหลว.....	94
5.15 (ก) ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับของของเหลวในตู้อบที่ระดับ 50% ด้วยการควบคุมแบบ PI ตามวิธีของ Ziegler-Nichols ( $K_c = 6.39$ และ $T_i = 33.3$ Sec) ความเร็วในการบันทึก 360 mm/h	
(ข) ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับที่ 50% โดยใช้เทคนิค การเปิด ตาราง ร่วมกับตัวควบคุมแบบ PI ที่ ( $K_c = 6.39$ และ $T_i = 33.3$ Sec) ความเร็วในการบันทึก 360 mm/h.....	96
5.16 (ก) ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่ระดับ 70% ด้วยการควบคุมแบบ PI ตามวิธีของ Ziegler-Nichols ( $K_c = 3.52$ และ $T_i = 33.3$ Sec) ความเร็วในการบันทึก 360 mm/h	
(ข) ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับที่ 70% โดยใช้เทคนิค การเปิดตารางร่วมกับตัวควบคุมแบบ PI ที่ ( $K_c = 3.52$ และ $T_i = 33.3$ Sec) ความเร็วในการบันทึก 360 mm/h.....	97
5.17 (ก) ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่ระดับ 80% ด้วยการควบคุมแบบ PI ตามวิธีของ Ziegler-Nichols ( $K_c = 3.02$ และ $T_i = 33.3$ Sec) ความเร็วในการบันทึก 360 mm/h	
(ข) ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับที่ 80% โดยใช้เทคนิค การเปิดตารางร่วมกับตัวควบคุมแบบ พีไอดี ที่ ( $K_c = 3.02$ และ $T_i = 33.3$ Sec) ความเร็วในการบันทึก 360 mm/h.....	98

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.18 การใช้ตัวควบคุม SLPC ควบคุมอัตราการไหล.....	99
5.19 การใช้ตัวควบคุม SLPC ควบคุมอัตราการไหล.....	99
5.20 ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอัตราการไหลที่ค่าเป้าหมาย 20%, 60%, 100%, 80% และ 40% ด้วยการควบคุมแบบ PI ตามวิธีของ Ziegler-Nichols ( $K_c = 9$ และ $T_i = 19.98$ Sec) ความเร็วในการบันทึก 600 mm/h.....	101
5.21 ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอัตราการไหลที่ค่าเป้าหมาย 20%, 60%, 100%, 80% และ 40% ด้วยการควบคุมแบบ PI ตามวิธีของ Ziegler-Nichols ร่วมกับเทคนิคการเปิดตาราง ที่ ( $K_c = 9$ และ $T_i = 19.98$ Sec) ความเร็วในการบันทึก 600 mm/h.....	101

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและเหตุจูงใจของการวิจัย

ปัจจุบันนี้ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller) นิยมนำไปใช้ควบคุมกระบวนการต่าง ๆ ในโรงงานอุตสาหกรรม การใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีต้องมีการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานเพื่อให้ระบบเกิดเสถียรภาพและผลตอบสนองที่เร็ว จากการศึกษากระบวนการควบคุมที่ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิ การควบคุมระดับของของเหลว และการควบคุมอัตราการไหล ซึ่งเป็นการใช้การควบคุมแบบพีไอดีเพียงอย่างเดียวจะมีผลตอบสนองที่ช้า และจะมีค่าพุ่งเกิน ดังนั้นการใช้ระบบควบคุมแบบป้อนกลับจึงไม่สามารถทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำได้ ดังนั้นจึงใช้ระบบการควบคุมแบบล่วงหน้า (Feed forward Control) เข้ามาช่วยควบคุม [1]-[4] การควบคุมแบบล่วงหน้าเป็นการวัดสัญญาณรบกวนก่อนที่จะมีการประมวลผล และคำนวณค่าที่ต้องการเพื่อประมาณค่าในการควบคุมไปยังค่าอ้างอิง ถ้าการคำนวณค่ามีความแม่นยำค่าตัวแปรควบคุมจะไม่คลาดเคลื่อน การประยุกต์ใช้วิธีทางสถิติบนพื้นฐานของเทคนิคการควบคุม โดยใช้ค่าจากตาราง (Lookup Table Technique) สามารถปรับปรุงการควบคุมความแม่นยำได้ดีขึ้น [5]-[7]

จุดมุ่งหมายของบทความนี้เป็นการควบคุมที่ใช้หลักการเดียวกับหลักการที่นำเสนอในบทความ [6]-[7] แต่ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการพัฒนาแนวคิดนี้สำหรับการควบคุมอุณหภูมิ การควบคุมระดับ และการควบคุมอัตราการไหล ซึ่งสามารถทำได้ง่ายและมีผลตอบสนองของระบบที่รวดเร็ว การควบคุมใช้ตัวควบคุมเชิงพาณิชย์ ของบริษัท โยโกกาว่า อิเล็กทริก (Single Loop Programmable Control) [8] จุดประสงค์ที่นำเสนอเป็นเทคนิคการควบคุมโดยใช้เทคนิคการเปิดตารางร่วมกับตัวควบคุมแบบ พีไอดี สำหรับกระบวนการควบคุมอุณหภูมิ การควบคุมระดับของของเหลว และการควบคุมอัตราการไหล โดยการทำงานของการทำงานของการควบคุมแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรก คือ ส่วนของเทคนิคการเปิดค่าจากตารางและส่วนที่สองเป็นส่วนของตัวควบคุมแบบพีไอดี ซึ่งการควบคุมแบบล่วหน้าบนพื้นฐานของเทคนิคการเปิดค่าจากตารางได้ถูกออกแบบเพื่อทำให้ช่วงหน่วงเวลาลดลง ในขณะที่การควบคุมแบบป้อนกลับโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี ชุดสาธิตที่ใช้ในการทดลองเป็นชุดสาธิตควบคุมอุณหภูมิ และชุดสาธิตการควบคุมระดับ ของห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังเพื่อศึกษาถึงสมรรถนะของการออกแบบตัวควบคุมที่นำเสนอ ตัวอย่างเช่นในเรื่องช่วงเวลาที่เข้าสู่เป้าหมาย (Setting Time) และค่าพุ่งเกิน (Overshoot)

## 1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1.2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการใช้พลังงานและสมดุลพลังงานในกระบวนการต่าง ๆ

1.2.2 นำเทคนิคการควบคุมที่นำเสนอมาใช้ในการควบคุมกระบวนการทางความร้อนของตู้อบ ให้มีความเหมาะสมกับกระบวนการ

1.2.3 นำเทคนิคการควบคุมที่นำเสนอมาใช้ในการควบคุมระดับของของเหลวให้เหมาะสมกับกระบวนการ

1.2.4 นำเทคนิคการควบคุมที่นำเสนอมาใช้ในการควบคุมอัตราการไหลให้เหมาะสมกับกระบวนการ

## 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

ทำการศึกษาการใช้พลังงานในกระบวนการทางความร้อน ศึกษากระบวนการการควบคุมระดับ และศึกษาเรื่องกระบวนการการควบคุมอัตราการไหล แล้วนำเทคนิคที่นำเสนอขึ้นมาใช้ร่วมกับตัวควบคุมแบบ พีไอดี เพื่อให้การควบคุมนั้นได้ค่าเป้าหมายที่ต้องการได้เร็วขึ้นและลดค่าฟุ้งเกินของระบบได้ดีขึ้น

## 1.4 ขั้นตอนการศึกษา

1.4.1 ทำการศึกษาหลักการทำงานและการใช้พลังงานของกระบวนการทางความร้อน

1.4.2 ทำการศึกษาหลักการทำงานของชุดควบคุมระดับ

1.4.3 ทำการศึกษาหลักการทำงานของชุดควบคุมอัตราการไหล

1.4.4 ทำการทดลองเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับตัวควบคุม พีไอดี เปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบ พีไอดี เพียงอย่างเดียวกับ โปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์(MATLAB)

1.4.5 ออกแบบระบบควบคุมด้วยเทคนิคการเปิดตาราง

1.4.6 ทำการทดลองจริงกับกระบวนการเพื่อวัดผล

1.4.7 ทำการเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการเพิ่มเทคนิคการเปิดตาราง

1.4.8 สรุปผลและข้อเสนอแนะจากการทดลอง

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการควบคุมแบบป้อนกลับ

### 2.1 กล่าวนำ

ก่อนที่จะทำการทดลองใด ๆ เกี่ยวกับเครื่องมือวัดและการควบคุมกระบวนการต่าง ๆ ทางอุตสาหกรรม จะขอกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของกระบวนการควบคุมทางอุตสาหกรรม ให้เป็นพื้นฐานเพื่อให้เกิดการเรียนรู้และความเข้าใจได้รวดเร็วขึ้น

ในยุคอุตสาหกรรมต้น ๆ นั้น การแข่งขันทางการค้ามีน้อยมาก ดังนั้นโรงงานจึงเป็นเพียงสถานที่ที่ใช้เปลี่ยนวัตถุดิบให้เป็นสินค้า โดยอาศัยแหล่งพลังงานที่หาง่าย ๆ ตามท้องถิ่นเท่านั้น เช่น แรงงานจากมนุษย์เป็นต้น แต่ปัจจุบันการแข่งขันทางด้านอุตสาหกรรมมีมากขึ้นและนับวันยิ่งทวีความรุนแรงมากขึ้นทุกขณะ ทำให้การผลิตจำเป็นต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพและประสิทธิผลของโรงงานเป็นสำคัญ ประสิทธิภาพและประสิทธิผลสามารถแสดงได้ด้วยต้นทุนการผลิต คุณภาพ มาตรฐาน ความปลอดภัย และความสามารถในการผลิต ฯลฯ ซึ่งการที่จะบรรลุวัตถุประสงค์ดังกล่าวได้นั้นจำเป็นต้องใช้เทคนิคการควบคุมเข้ามาช่วยเป็นสำคัญ

โดยทั่วไปเป้าหมายของระบบควบคุมกระบวนการต่าง ๆ ในอุตสาหกรรม คือ การรักษาปริมาณทางฟิสิกส์ อันได้แก่อุณหภูมิ (Temperature) แรงดัน (Pressure) อัตราการไหล (Flow Rate) ค่าความเป็นกรดค่าด่าง (pH) และอื่น ๆ ให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสมที่ต้องการมากที่สุด แม้ว่าสภาพการทำงานและสภาพแวดล้อมอาจเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ซึ่งการควบคุมที่ดีย่อมเริ่มจากการเลือกแบบการควบคุมที่เหมาะสม บางโรงงานอาจจะเลือกใช้การควบคุมแบบง่าย ๆ ด้วยมือ (Manual Control) ซึ่งอาศัยพนักงาน (Operator) คอยทำหน้าที่เกี่ยวกับการตรวจวัดและปรับแต่งการควบคุมให้ผลตอบสนองเป็นไปตามต้องการ จะเห็นได้ว่าการควบคุมแบบนี้จำเป็นต้องอาศัยประสบการณ์และความชำนาญของพนักงาน ดังนั้น การควบคุมจะดีหรือไม่อย่างไรจะขึ้นอยู่กับพนักงานผู้ควบคุมเป็นหลัก แต่ในความเป็นจริงแล้วมนุษย์หรือพนักงานควบคุมไม่สามารถทำงานให้ได้ดีได้เท่ากันตลอดเวลา จึงทำให้ประสิทธิภาพของการควบคุมลดลง ปัจจุบันโรงงานที่ต้องการการควบคุมที่มีความแม่นยำ และประสิทธิภาพสูงจำเป็นต้องนำเครื่องควบคุมอัตโนมัติ (Automatic Controller) มาใช้งาน โดยเครื่องควบคุมอัตโนมัติจะทำหน้าที่หลักในการคำนวณหาสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมตามกฎเกณฑ์การควบคุม (Control Law) ที่พนักงานได้กำหนดไว้ล่วงหน้า ซึ่งระบบควบคุมแบบอัตโนมัติที่เราพบเห็นกันอยู่บ่อย ๆ ในโรงงานอุตสาหกรรม ก็คือ ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control System)

หลักการของการควบคุมแบบป้อนกลับนั้น ได้เกิดขึ้นมานานแล้ว แต่ไม่ได้ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรม จนกระทั่งเมื่อประมาณ 200 ปีที่แล้ว James Watt ได้นำหลักการดังกล่าวมาทำการสร้างเครื่องควบคุมความเร็วให้กับเครื่องจักรไอน้ำของเขา จากนั้นอุตสาหกรรมมากมายได้หันมาให้ความสนใจและนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายจนถึงปัจจุบัน ระบบควบคุมแบบป้อนกลับนี้อาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “ระบบควบคุมแบบปิด หรือ ระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ” ก็ได้ ซึ่งโดยทั่วไประบบควบคุมแบบป้อนกลับแสดง ได้ดังบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 2.1

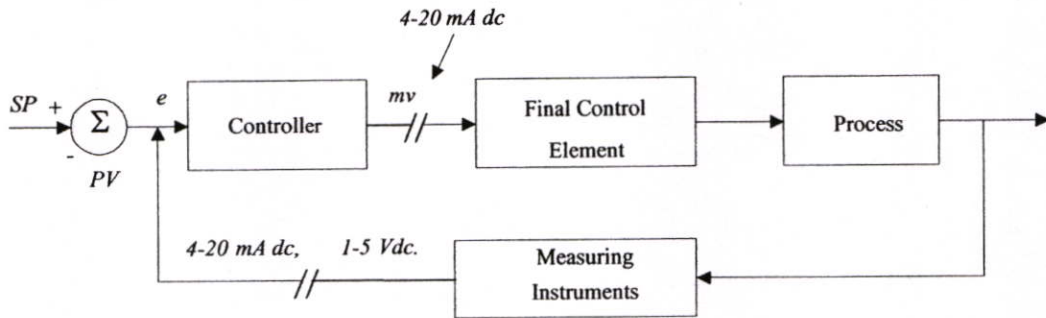
ระบบควบคุมทางอุตสาหกรรมแบบป้อนกลับ โดยทั่วไปประกอบด้วยอุปกรณ์ 4 ส่วน คือ

1. **ตัวควบคุม (Controller)** เป็นเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างสัญญาณควบคุมเพื่อทำหน้าที่ควบคุมให้ระบบหรือกระบวนการที่ต้องการควบคุมมีเอาต์พุตหรือผลตอบสนองเป็นไปตามต้องการ ตัวควบคุมจะมีหลายแบบ เช่น ตัวควบคุมแบบ ON – OFF (ตัวควบคุมแบบสองตำแหน่ง) ตัวควบคุมแบบ พี (Proportional P) ตัวควบคุมแบบ ไอ (Integral I) ตัวควบคุมแบบ ดี (Derivative D) หรือการใช้ตัวควบคุมหลาย ๆ แบบร่วมกันเช่น ตัวควบคุมแบบ พีไอ (PI) ตัวควบคุมแบบ พีดี (PD) และตัวควบคุมแบบ พีไอดี (PID) เป็นต้น ซึ่งสัญญาณที่ออกจากตัวควบคุมคือตัวแปรปรับกระบวนการ (Manipulated Variable :  $mv$ )

2. **อุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย (Final Control Element)** คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ปรับสภาพของกระบวนการด้วยการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรปรับกระบวนการ ตามคำสั่งหรือสัญญาณควบคุมที่ได้รับจากตัวควบคุม อุปกรณ์ควบคุมสุดท้ายนี้มีอยู่หลายอย่างด้วยกัน เช่น วาล์วควบคุม (Control Valve) อินเวอร์เตอร์ (Inverter) และตัวกระทำ (Actuator) เป็นต้น แต่ที่มักพบเห็นกันมากในกระบวนการทางอุตสาหกรรมได้แก่ วาล์วควบคุม

3. **กระบวนการ (Plant or Process)** หมายถึงระบบหรือกระบวนการทางฟิสิกส์ที่ต้องการควบคุมให้มีสถานะเป็นไปตามต้องการ เช่นกระบวนการเกี่ยวกับการควบคุมระดับของของเหลว กระบวนการเกี่ยวกับการควบคุมอุณหภูมิ เป็นต้น ซึ่งสถานะของกระบวนการแสดงด้วยตัวแปรกระบวนการ (Process Variable :  $pv$ )

4. **อุปกรณ์วัด (Measuring Instruments)** หมายถึง อุปกรณ์ซึ่งอาจจะได้แก่ เซนเซอร์ (Sensor) ทรานสดิวเซอร์ (Transducer) หรืออุปกรณ์แปลง (Transmitter) หรือ เครื่องวัดสัญญาณอื่น ๆ ในกระบวนการเพื่อนำสัญญาณที่ได้ไปใช้เป็นตัวแปรในการควบคุม โดยสัญญาณขาออกของอุปกรณ์วัดทั่วไปจะเป็นสัญญาณมาตรฐานทางอุตสาหกรรม เช่น สัญญาณกระแสไฟฟ้า 4–20 มิลลิแอมป์ (4 – 20 mA dc.) สัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 1– 5 โวลต์ (1-5 Vdc.) หรือ สัญญาณลมขนาด 3–15 ปอนด์ / ตารางนิ้ว (3 – 15 psi.) หรือ 0.2 – 1.0 Kg / cm<sup>2</sup>) เป็นต้น  $e$



รูปที่ 2.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบป้อนกลับโดยทั่วไป

จากรูปที่ 2.1 อุปกรณ์วัดหรือเครื่องวัดจะวัดค่าตัวแปรกระบวนการ ( $p_v$ ) เช่น อุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหล และระดับของของเหลว เป็นต้น เพื่อเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงหรือค่าเป้าหมาย (Set point :  $sp$ ) จากนั้นตัวควบคุมจะนำค่าความคลาดเคลื่อน (Error :  $e$ ) ในการควบคุม มาใช้ในการคำนวณ เพื่อหาสัญญาณที่เหมาะสมที่จะไปควบคุมกระบวนการให้เข้าสู่เป้าหมายที่ต้องการ โดยตัวควบคุมที่นิยมนำมาใช้ควบคุมกระบวนการมากที่สุดก็คือ ตัวควบคุมแบบ พีไอดี ซึ่งจะใช้เฉพาะ พี, พีไอ, พีดี หรือ พีไอดี นั้นขึ้นอยู่กับชนิดและคุณลักษณะของกระบวนการ (ซึ่งอาจจะวิเคราะห์ได้จาก การเปลี่ยนแปลงของ  $p_v$  ด้วย)

## 2.2 ทฤษฎีและหลักการการควบคุมแบบป้อนกลับ

การออกแบบระบบควบคุมนั้นจำเป็นต้องพิจารณาถึงคุณลักษณะของกระบวนการที่ต้องการควบคุมเสียก่อน ซึ่งบางครั้งอาจพิจารณาในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่รู้จักกันดีคือ ฟังก์ชันถ่ายโอน ทั้งนี้ก็เนื่องจากจะได้เลือกชนิดของการควบคุมให้เหมาะสมกับระบบ เพื่อให้การควบคุมมีเสถียรภาพ (Stability) และมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมจะเป็นไปตามลักษณะของการสร้างสัญญาณที่เรียกว่า “กริยาการควบคุม (Control Action)” โดยกริยาการควบคุมสามารถแบ่งออกเป็น 4 แบบใหญ่ ๆ คือ

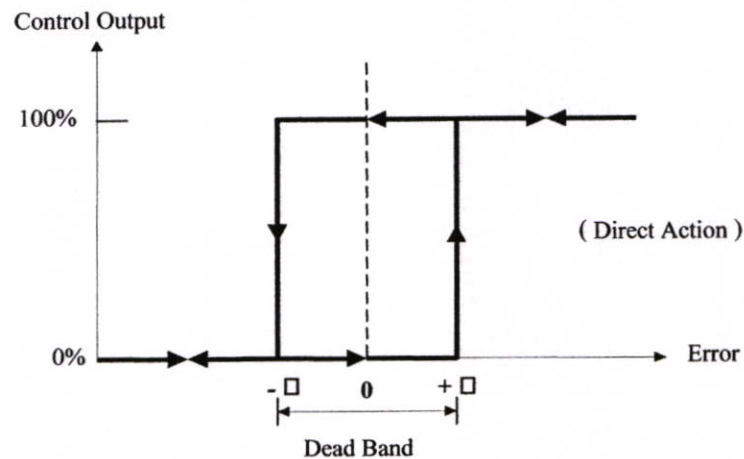
1. กริยาการควบคุมแบบ ON – OFF
2. กริยาการควบคุมแบบ พี (Proportional)
3. กริยาการควบคุมแบบ ไอ (Integral)
4. กริยาการควบคุมแบบ ดี (Derivative)

กริยาการควบคุมที่ได้กล่าวมามีข้อดี ข้อเสีย และคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ดังนั้น ในทางปฏิบัติจึงต้องนำเอากริยาการควบคุมแบบต่าง ๆ มาประยุกต์เข้าด้วยกันเพื่อให้ได้สัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งการรวมกริยาการควบคุมที่มักพบเห็นเป็นประจำ คือ

5. ฏรยการควบคุมแบบ พีไอ (Proportional – Integral)
6. ฏรยการควบคุมแบบ พีดี (Proportional – Derivative)
7. ฏรยการควบคุมแบบ พีไอดี (Proportional – Integral – Derivative)

### 2.2.1 การควบคุมกระบวนการแบบ ON – OFF

การควบคุมแบบ ON – OFF เป็นการควบคุมที่ง่ายที่สุดและราคาไม่แพง โดยตัวควบคุมจะทำงานเพียง 2 สถานะ คือเปิดกับปิด และสัญญาณเอาต์พุตที่ได้ก็จะมี 2 สถานะ เช่นกันคือ 0% หรือ 100% ฏรยการควบคุมแบบ ON – OFF แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ฏรยการควบคุมแบบ ON – OFF

จากรูปที่ 2.2 จะเห็นว่า ถ้าความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้นมากกว่าค่าวิกฤต (Critical Value) หรือ  $+\epsilon$  ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมจะเปลี่ยนจาก 0% ไปเป็น 100% ดังนั้น จะทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนลดต่ำกว่าค่าวิกฤต ( $+\epsilon$ ) ค่าเอาต์พุตจะเปลี่ยนจาก 100% ไปเป็น 0% ดังนั้น จะเห็นว่าก่อนที่ค่าเอาต์พุตจะเปลี่ยนแปลงนั้นจะเกิดจากเดธแบนด์ (Dead Band) ขึ้นรอบ ๆ ค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับศูนย์ (Zero Error) โดยในช่วงเดธแบนด์นั้น ค่าเอาต์พุตนั้นจะไม่มีเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใดซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากการเสียดทานที่ไม่ได้คาดคิดมาก่อน หรือบางครั้งก็ต้องทำให้มีช่วงเดธแบนด์ เพื่อป้องกันการเกิด ON-OFF บ่อยเกินไป อันจะทำให้อุปกรณ์ควบคุมหรือกระบวนการเกิดการเสียหายได้ แต่ช่วงเดธแบนด์นี้ก็ต้องไม่กว้างนักเพราะจะทำให้เกิดค่าความเที่ยงตรงของการควบคุมลดลง ฏรยการควบคุมแบบ ON-OFF สามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 m(t) &= 0\% \quad \text{เมื่อ} \quad e < \mathcal{E} \\
 &= 100\% \quad \text{เมื่อ} \quad e > \mathcal{E}
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

$$\begin{aligned}
 \text{เมื่อ} \quad m(t) &= \text{สัญญาณควบคุมหรือเอาต์พุตของตัวควบคุม} \\
 e(t) &= \text{ค่าความคลาดเคลื่อน} \\
 \mathcal{E} &= 1/2 \text{ ของค่าเคทแบนด์}
 \end{aligned}$$

การควบคุมแบบ ON-OFF จะนิยมใช้การควบคุมกระบวนการที่ไม่ต้องการความเที่ยงตรงสูงนัก และผลของความคลาดเคลื่อนไม่ส่งผลต่อการควบคุม เช่น การควบคุมอุณหภูมิในตู้เย็น การควบคุมระดับน้ำในถังทั่วไปตามบ้าน หรือการควบคุมอุณหภูมิในห้อง เป็นต้น นอกจากนี้ การควบคุมแบบ ON-OFF ยังนิยมใช้กับกระบวนการที่มีขนาดความจุมาก ๆ อีกด้วย เนื่องจากค่าความคลาดเคลื่อนจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดความจุ ทำให้ลดต้นทุนได้อย่างมาก

### 2.2.2 ตัวควบคุมแบบ (พีไอดี)

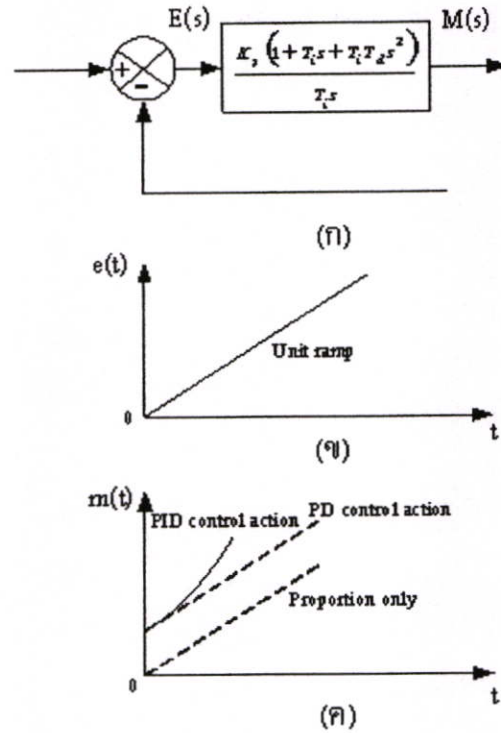
กิริยาการควบคุมแบบพีไอดี (Proportional + Integral + Derivative) หรือเรียกง่าย ๆ ว่า พีไอดี นั้น ได้จากการรวมเอาการควบคุมทั้งสามแบบเข้าด้วยกัน สามารถจะแสดงในรูปของสมการต่อไปนี้

$$m(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{d}{dt} e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt
 \tag{2.2}$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบคือ

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + T_d(s) + \frac{1}{T_i(s)} \right)
 \tag{2.3}$$

บล็อกไดอะแกรมตลอดจนอินพุตและเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ พีไอดี แสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 บล็อกไดอะแกรมรวมถึงอินพุตและเอาต์พุตของตัวควบคุม พีไอดี

- (ก) บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบ พีไอดี  
 (ข) สัญญาณอินพุต unit ramp  
 (ค) สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ พีไอดี

### 2.2.3 การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า

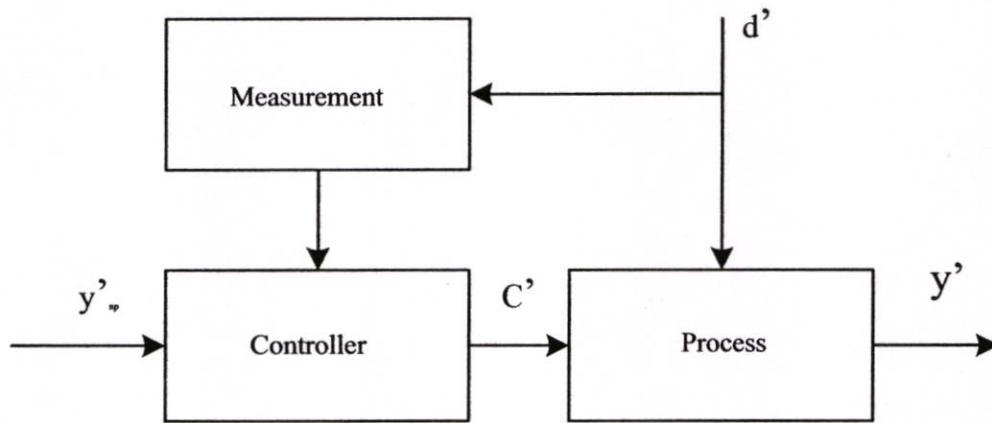
การควบคุมกระบวนการส่วนใหญ่นิยมใช้แบบป้อนกลับ อันที่จริง โครงสร้างที่นิยมใช้ในการควบคุมไม่ใช่มีเพียงการควบคุมแบบป้อนกลับเท่านั้น ยังมีโครงสร้างอื่น ๆ อีก จุดอ่อนของการควบคุมแบบป้อนกลับคือ

1. ระบบจะระงับกว่าเกิดความเบี่ยงเบนหรือความผิดพลาดในกระบวนการ จึงจะลงมือแก้ไข ดังนั้น โครงสร้างดังกล่าวจะไม่สามารถให้ผลการควบคุมที่สมบูรณ์แบบได้
2. การควบคุมแบบป้อนกลับไม่มีการคาดการณ์เพื่อการแก้ไขผลกระทบที่เกิดขึ้นจากสิ่งรบกวนระบบหรือการเปลี่ยนแปลงภายนอกล่วงหน้า
3. การตอบสนองของระบบควบคุมอาจไม่ดีพอ ในกรณีที่กระบวนการมีค่าคงที่กระบวนการ (Time Constant) หรือค่าเวลาหน่วง (Delay Time) มาก ๆ โดยเฉพาะกรณีที่สิ่งรบกวน

กระบวนการแต่ละครั้งมีขนาดใหญ่หรือกระบวนการถูกรบกวนบ่อย ๆ เพราะกระบวนการอาจจะไม่มีโอกาสปรับตัวเข้าสู่สภาวะคงตัวได้เลย

ดังนั้นกรณีที่การทำงานภายใต้โครงสร้างการควบคุมแบบป้อนกลับไม่เป็นที่น่าพอใจ การควบคุมอื่น ๆ อาจเข้ามามีส่วนช่วยในการปรับปรุงการตอบสนองของกระบวนการให้ดีขึ้น เช่น การใช้การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (Feed Forward Control) ในการใช้การควบคุมรูปแบบนี้นั้นประเด็นที่สำคัญคือจะต้องสามารถวัดค่าหรือประมาณค่าสิ่งรบกวนกระบวนการแบบล่วงหน้าได้

ระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าเริ่มนำแนวคิดดังกล่าวมาใช้ในระบบควบคุมระดับของเหลวในหม้อไอน้ำตั้งแต่ปี ค.ศ.1925 หลักการพื้นฐานของการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าคือควบคุมกระบวนการ โดยการวัดค่าตัวแปรรบกวนระบบที่มีผลกระทบที่สำคัญต่อกระบวนการและทำการปรับเปลี่ยนตัวแปรปรับค่าได้เพื่อชดเชยกับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในกระบวนการทันทีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรรบกวนระบบ (Disturbance) ดังแสดงในรูปที่ 2.4

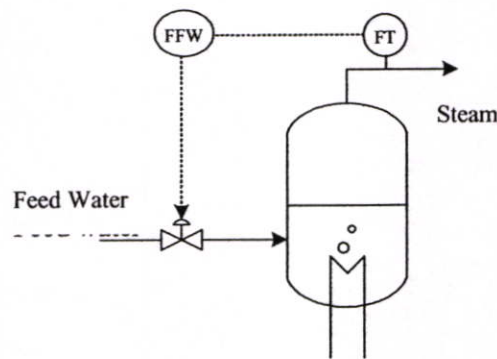


รูปที่ 2.4 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า

การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้ามีข้อจำกัดหลายประการเช่นคือ

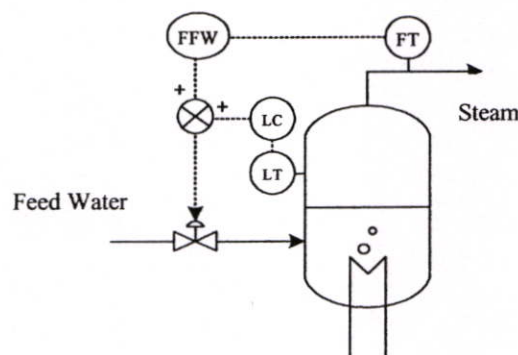
1. ต้องสามารถวัดค่าสิ่งรบกวนได้แบบออนไลน์ ซึ่งไม่สามารถทำได้ในทุกกระบวนการ
2. การใช้ระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าให้มีประสิทธิภาพ ต้องมีแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับกระบวนการ โดยคุณภาพของการควบคุมขึ้นอยู่กับคุณภาพของแบบจำลองคณิตศาสตร์ ปัจจุบันแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้พัฒนาภายใต้สมมติฐานมือโยกมา
3. สมการการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าซึ่งจะนำไปสู่การควบคุมแบบสมบูรณ์ แต่ไม่สามารถใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ โดยเฉพาะกรณีที่กระบวนการมีการหน่วงเวลา

ตัวอย่างการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าดังรูปที่ 2.5 เป็นระบบควบคุมระดับของเหลวในหม้อไอน้ำ ขั้นตอนแรกต้องพิจารณาว่าตัวแปรใดเป็นตัวแปรสำคัญที่ก่อให้เกิดความเบี่ยงเบนในกระบวนการ ในกรณีนี้คืออัตราการไหลออกของไอน้ำจากหม้อไอน้ำตัวแปร ขั้นตอนที่สอง คิดตั้งอุปกรณ์วัดค่าอัตราการไหลของไอน้ำเพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรกระบวนการ ระบบขั้นตอนที่สาม นำสัญญาณจากอุปกรณ์วัดส่งเข้ามาเครื่องควบคุมเพื่อการปรับเปลี่ยนตัวแปรปรับค่าได้ที่เหมาะสมเพื่อชดเชยกับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเพื่อรักษาระดับของเหลวภายในหม้อไอน้ำไว้ให้คงที่ ซึ่งเครื่องควบคุมจะทำการคำนวณว่าต้องปรับตัวแปรปรับค่าได้อย่างไร ในกรณีนี้ตัวแปรที่เหมาะสมได้แก่อัตราการไหลเข้าสู่หม้อไอน้ำ

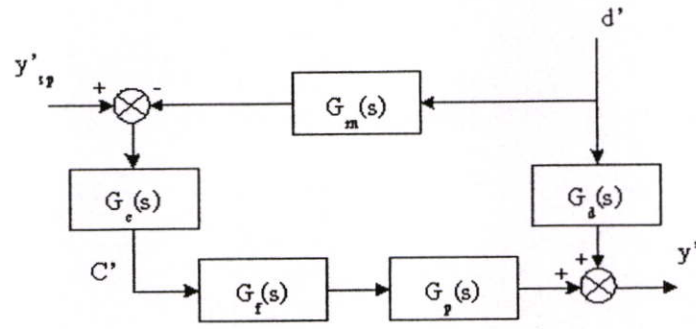


รูปที่ 2.5 หม้อไอน้ำและระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า

โดยทั่วไปจะไม่ใช้ระบบการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าเพียงระบบเดียว เพราะไม่สามารถรับประกันได้ว่าตัวแปรที่ต้องการควบคุมจะมีค่าตรงตามเป้าหมายตลอดเวลา ในที่นี้คือระดับของของเหลวในหม้อไอน้ำ โดยเฉพาะกรณีที่ระบบควบคุมไม่ได้ออกแบบไว้รองรับตัวแปรกระบวนการครบทุกตัวที่อาจเกิดขึ้นในกระบวนการ ดังนั้นการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้ามักใช้ร่วมกับการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยลักษณะการทำงานของระบบแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 หม้อไอน้ำและระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าและป้อนกลับสมการพีชคณิตสำหรับเครื่องควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า



รูปที่ 2.7 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า

พิจารณารูปที่ 2.7 สามารถเขียนสมการพีชคณิตของฟังก์ชันถ่ายโอนระบบควบคุมได้ดังนี้

$$\bar{y}'(s) = G_p(s)G_f(s)\bar{e}'(s) + G_d(s)\bar{d}'(s) \quad (2.3)$$

$$\bar{y}'(s) = G_p G_f G_c(s) [G_{sp}(s)y_{sp}(s) - G_m(s)\bar{d}'(s)] + G_d(s)\bar{d}'(s) \quad (2.4)$$

$$\bar{y}'(s) = G_p G_f G_c y_{sp}(s) - [G_p G_f G_c G_m - G_d]\bar{d}'(s) \quad (2.5)$$

จากสมการที่(2.5) นำมาใช้ในการกำหนดรูปแบบสมการเครื่องควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าได้ โดยมีจุดมุ่งหมาย 2 ประเด็นคือ การกำจัดสิ่งรบกวนของระบบ และการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย

#### การกำจัดสิ่งรบกวนของระบบ

ในกรณีนี้สมมติให้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย เพื่อให้การควบคุมเป็นไปตามความต้องการของระบบควบคุมจึงควรกำจัดสิ่งรบกวนได้อย่างสมบูรณ์ สามารถเขียนในเชิงความหมายทางคณิตศาสตร์ได้คือ  $\bar{y}'(s)/\bar{d}'(s) = 0$  จากสมการที่ (2.5) ปรับปรุงสมการให้มีความหมายตรงตามที่ต้องการได้ดังนี้

$$G_p G_f G_c G_m - G_d = 0 \quad (2.6)$$

แก้สมการที่ (2.6) เพื่อหาสมการสำหรับ  $G_c(s)$

$$G_c(s) = \frac{G_d(s)}{G_p G_f G_m(s)} \quad (2.7)$$

สมการที่ (2.7) คือสมการเครื่องควบคุมเพื่อแก้ปัญหาอันเนื่องมาจากสิ่งรบกวนภายนอกกระบวนการ

### การติดตามค่าเป้าหมาย

สำหรับกรณีนี้ถือว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับสิ่งรบกวนภายนอก ระบบ ดังนั้นเพื่อให้การควบคุมเป็นไปตามความต้องการระบบควบคุมจึงควรปรับเปลี่ยนตัวแปรปรับได้เพื่อให้ค่าตัวแปรขาออกสามารถติดตามค่าเป้าหมายได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งความหมายทางคณิตศาสตร์คือ  $\bar{y}'(s)/\bar{y}'_{sp}(s) = 0$  ดังนั้นเขียนสมการที่ (2.5) ใหม่ได้ดังนี้

$$G_p G_f G_c G_{sp}(s) = 1 \quad (2.8)$$

แก้สมการที่ (2.8) เพื่อหาสมการสำหรับ  $G_{sp}(s)$

$$G_{sp}(s) = \frac{1}{G_p G_f G_c(s)} \quad (2.9)$$

แทนค่า  $G_c(s)$  จากสมการที่ (2.7) ในสมการที่ (2.9) ได้สมการสำหรับ  $G_{sp}(s)$

$$G_{sp}(s) = \frac{1}{G_p G_f(s)} \frac{G_p G_f G_m(s)}{G_d(s)} = \frac{G_m(s)}{G_d(s)} \quad (2.10)$$

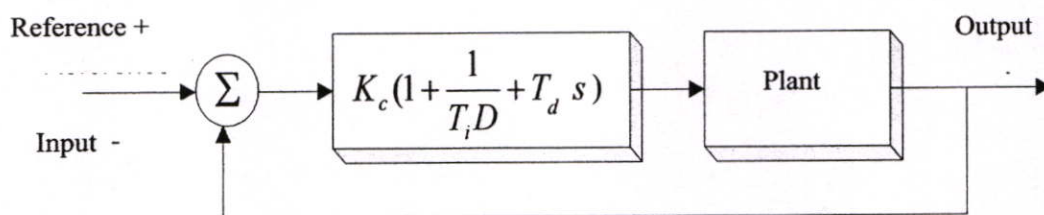
สมการที่ (2.10) คือสมการเครื่องควบคุมเพื่อแก้ปัญหาอันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย

### 2.3 วิธีการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม พีไอดี จากผลการตอบสนองของระบบ การที่นิยมใช้อยู่ในปัจจุบัน

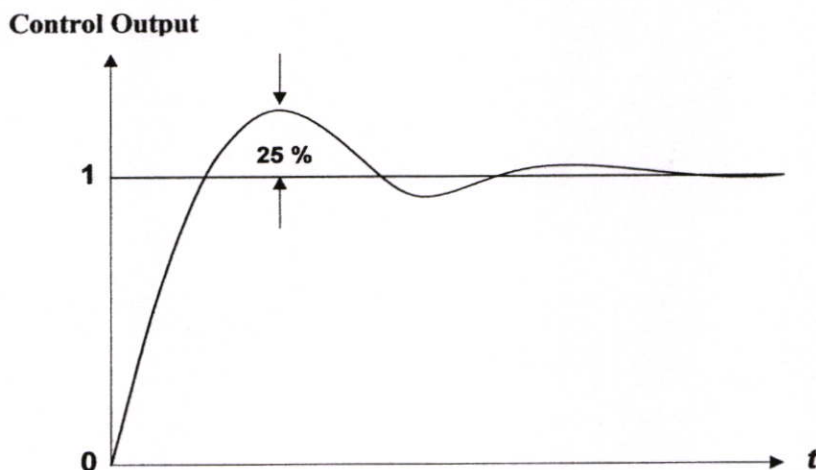
ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่า การนำตัวควบคุม พีไอดี ไปใช้ในการควบคุมกระบวนการต่าง ๆ จำเป็นต้องหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่เหมาะสมที่จะใช้ปรับให้กับตัวควบคุม พีไอดี เพื่อให้ได้การควบคุมที่ดีที่สุด ซึ่งการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม พีไอดี สามารถทำได้หลายวิธี บางวิธีจะพิจารณาจากการทดสอบกระบวนการ เช่น วิธีของ Ziegler-Nichols, วิธีของ Cohen-Coon และวิธีของ Harriott เป็นต้น อีกวิธีหนึ่งคือ วิธีอาศัยความรู้ทางคณิตศาสตร์ เช่น วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยวิธีทางเดินของราก (Root Locus Method) และโดยส่วนใหญ่จะพิจารณาจากเงื่อนไขในโดเมนเวลามากกว่าโดเมนความถี่ วิธีที่กล่าวมานั้นวิธีของ Ziegler-Nichols เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในทางปฏิบัติ อย่างไรก็ตามวิธีของ Ziegler-Nichols หลายกรณีต้องการปรับละเอียดอีกครั้งหนึ่ง โดยวิธีการลองผิดลองถูกในอันที่จะได้ผลตอบสนองของระบบที่ต้องการอย่าง

แท้จริง ในส่วนนี้จะกล่าวถึงเพียงวิธีการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม พีไอดี ของ J.G. Ziegler และ N.B. Nichols และวิธี Damped Oscillation ของ Harriott เท่านั้น

วิธีการหาค่าพารามิเตอร์  $K_c$ ,  $T_i$  และ  $T_d$  ของตัวควบคุม พีไอดี ตามวิธีของ Ziegler-Nichols จะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของผลตอบสนองชั่วคราวของระบบที่ถูกควบคุมที่ได้จากผลตอบสนองแบบลูเปิดและผลตอบสนองแบบลูปิด ซึ่งมี 2 วิธีคือ วิธี “Process Reaction Curve” และวิธี “Ultimate Method” โดยแต่ละวิธีมีจุดมุ่งหมายที่จะทำให้ผลตอบสนองเวลาของระบบต่ออินพุตแบบ Unit Step มีค่าพุ่งเกินสูงสุดไม่เกิน 25 % ดังรูปที่ (2.8)



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของระบบควบคุมที่ควบคุมด้วยตัวควบคุม พีไอดี



รูปที่ 2.9 ค่าพุ่งเกินที่ต้องการเมื่อใช้การปรับด้วยวิธีของ Ziegler-Nichols

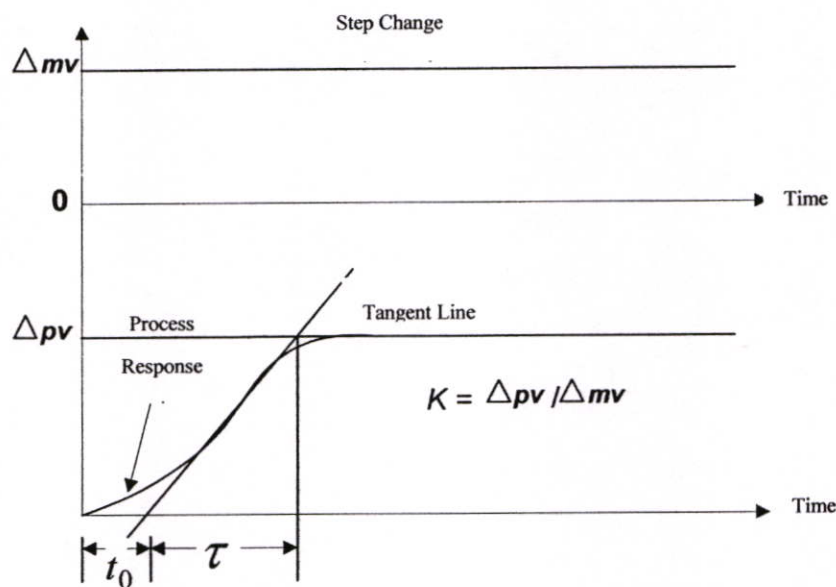
### 2.3.1 การคำนวณจากวิธี Process Reaction Curve

วิธีนี้จะหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม พีไอดี จากผลตอบสนองของเวลาของระบบหรือกระบวนการที่ถูกควบคุมแบบลูปิดต่ออินพุตแบบ Step โดยที่ระบบหรือกระบวนการ ในกรณีนี้จะไม่มีโพล (Pole) ที่จุดกำเนิด (Origin) หรือไม่มี Dominant Complex Conjugate Poles และไม่มีตัวควบคุมต่อร่วมอยู่ ดังนั้น ผลตอบสนองของเวลาจะเป็นรูปตัว s (ถ้าผลตอบสนองของเวลาไม่เป็นรูปตัว s วิธีนี้จะใช้ไม่ได้) ผลตอบสนองรูปตัว s นี้จะถูกนำมาอธิบายคุณลักษณะของ

กระบวนการ (Process Characteristic) ด้วยพารามิเตอร์ 3 ค่า คือ อัตราขยายของกระบวนการ ค่าเวลาหน่วงของกระบวนการ โดยค่าหน่วงเวลาของกระบวนการ และค่าเวลาคงที่ของกระบวนการ จะถูกประมาณโดยการลากเส้นสัมผัสกับจุดที่มีอัตราการเบี่ยงเบนสูงสุด (Maximum Slope) ดังรูปที่ 2.10 ส่วนค่าอัตราขยายของกระบวนการ ทราบได้เมื่อผลตอบสนองของกระบวนการเข้าสู่สภาวะคงที่

ดังนั้น ฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการจะประมาณได้ด้วยระบบอันดับหนึ่งแบบมีเวลาหน่วง (FOPDT) คือ

$$G(s) = \frac{C(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-t_0s}}{Ts + 1}$$



รูปที่ 2.10 ผลตอบสนองรูปตัว s เมื่อใช้วิธี Process Reaction Curve

Ziegler-Nichols ได้กำหนดค่าของ  $K_c$ ,  $T_i$ , และ  $T_d$  สำหรับตัวควบคุมแบบต่าง ๆ ที่ใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม พีไอดี ตามวิธี Process Reaction Curve ไว้ในตารางที่ 2.1

วิธี Process Reaction Curve จะพบเห็นกันบ่อยมากที่สุดในทางปฏิบัติ ซึ่งผลตอบสนองของกระบวนการที่จะนำมาประมาณค่านั้นได้มาจากการบันทึกค่าโดยเครื่องบันทึก (Recorder) ดังนั้น จะเห็นได้ว่าจะเกิดข้อผิดพลาดได้ง่าย จากการกำหนดจุดที่มีอัตราการเบี่ยงเบนสูงสุด และการลากเส้นสัมผัส ณ จุดนี้ โดยเฉพาะกับผลตอบสนองที่บันทึกด้วยความเร็วการบันทึก (Chart Speed) ต่ำ ๆ เช่น ที่ความเร็วการบันทึก 250/mm./h. หรือ  $3600/250 = 14.4 \text{ sec./1 mm.}$  ซึ่งถ้าการกำหนดจุดและลากเส้นผิดพลาดเพียง 1 มิลลิเมตร จะทำให้ค่าผิดพลาดถึง 14.4 วินาที จึงเป็นสาเหตุหนึ่งของการทำวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ตารางที่ 2.1 สูตรการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม พีไอดี โดยวิธี Process Reaction Curve

Control Type	Proportional Gain $K_c$	Integral Time $T_i$	Derivative Time $T_d$
Proportional Only	$\frac{1}{K} \left( \frac{\tau}{t_0} \right)$	-	-
Proportional+Integral	$\frac{0.9}{K} \left( \frac{\tau}{t_0} \right)$	$3.33 t_0$	-
Proportional+Integral+Derivative	$\frac{1.2}{K} \left( \frac{\tau}{t_0} \right)$	$2.0 t_0$	$0.5 t_0$

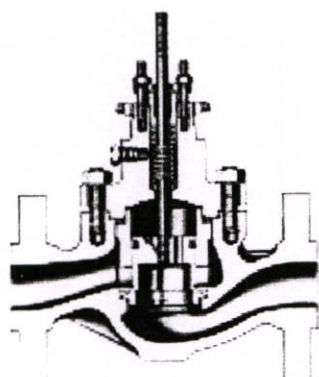
## 2.4 ทฤษฎีวาล์วควบคุม

เทคนิคการเปิดตาราง (Look-up table) เป็นเทคนิคการควบคุมที่พัฒนาจากการควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า (Feed forward control) โดยการคำนวณค่าของตัวแปรการจัดการ (Manipulate Variable) เพื่อรักษาค่าตัวแปรการควบคุม (Controlled variable) ตามค่าเป้าหมาย (Set point) โดยใช้กฎสมดุลพลังงาน (Energy Balance Law) ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์กับระบบควบคุมได้หลากหลาย เช่น การควบคุมระดับ, การควบคุมอัตราการไหล เป็นต้น

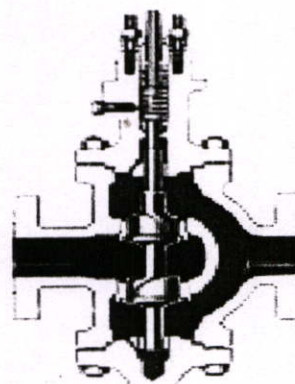
ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการกล่าวถึงการใช้เทคนิคการเปิดตารางร่วมกับการควบคุมแบบพีไอดีในระบบควบคุมอุณหภูมิสำหรับกระบวนการเครื่องฆ่าเชื้อ ซึ่งเป็นการควบคุมการเปิดตำแหน่งสูงสุดของวาล์วควบคุมในช่วงเริ่มต้นของการไล่อากาศในตำแหน่งที่เหมาะสม ซึ่งใช้การคำนวณสมดุลพลังงานจากการออกแบบระบบความร้อนดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงวาล์วควบคุมซึ่งใช้เป็นตัวกระทำ (Action) ในกระบวนการเป็นส่วนสำคัญ

### 2.4.1 วาล์วควบคุม (Control Valve)

วาล์วควบคุมมีความสำคัญมากในการควบคุมกระบวนการผลิตให้เป็นไปตามที่  
ต้องการในทางปฏิบัติวาล์วควบคุมส่วนใหญ่จะติดตั้งสำหรับการควบคุมอัตโนมัติ โดยใช้วาล์วแบบ  
โกล์บวาล์วที่มีบ่าเดี่ยว (Single Seat) หรือบ่าคู่ (Double seat) ดังรูปที่ 2.11



แบบบ่าเดี่ยว

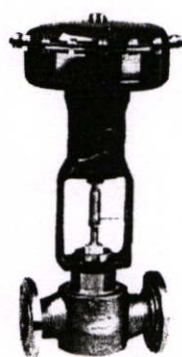


แบบบ่าคู่

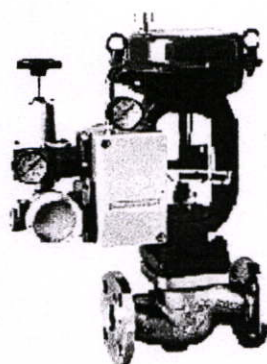
รูปที่ 2.11 บ่าวาล์วที่ใช้งานโดยส่วนใหญ่

สำหรับข้อแตกต่างระหว่างบ่าวาล์วเดี่ยวและวาล์วบ่าคู่ ถ้าต้องการปิดให้สนิทแล้วบ่าวาล์ว  
เดี่ยวจะปิดตัวได้สนิทดีกว่า แต่ถ้าต้องการให้กำลังขับของตัวขับวาล์ว (Actuator) ต่ำบ่าวาล์วคู่จะ  
ดีกว่า เนื่องจากแรงปฏิกิริยาที่มีผลมาจากความดันและการไหลน้อยกว่าจนแทบตัดทิ้งได้

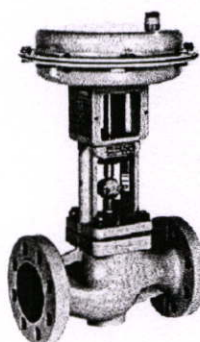
สำหรับบริษัทผู้ผลิตวาล์วควบคุมที่ใช้สำหรับกระบวนการเครื่องฆ่าเชื้ออาหารกระป๋องที่  
พบในประเทศไทยส่วนใหญ่ แสดงดังรูปที่ 2.12



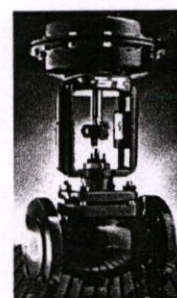
Taylor



Yamatake-Honeywell



Samson

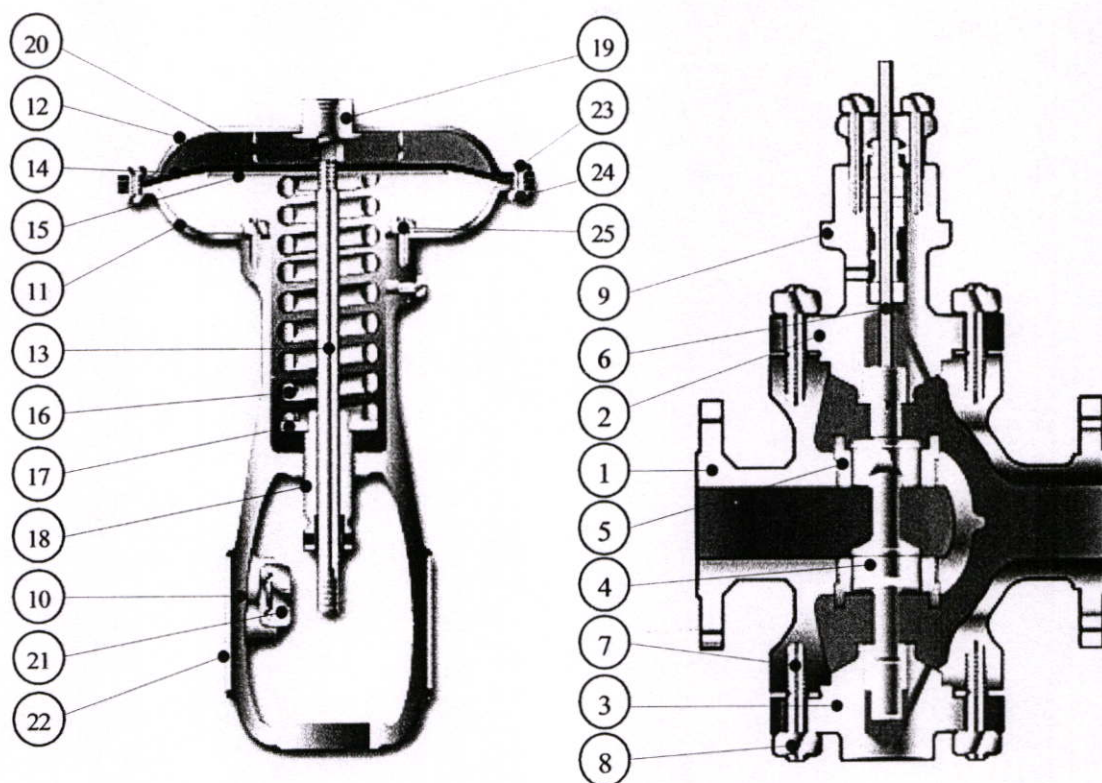


Spirax sarco

รูปที่ 2.12 ตัวอย่างวาล์วควบคุมในงานอุตสาหกรรม

ลักษณะโครงสร้างของวาล์วควบคุมโดยทั่วไปแสดงดังรูปที่ 2.13 สำหรับการพิจารณาการเลือกใช้งานวาล์วควบคุมในลักษณะโดยทั่วไป ขนาด และวัสดุของตัวเรือนวาล์ว และวัสดุทรมต้องคำนึงถึงสิ่งต่อไปนี้

- ความดันใช้งานสูงสุดของของไหล
- ธรรมชาติของของไหลได้แก่ สภาวะกักคร่อน ความเป็นพิษ และคุณสมบัติการติดไฟ
- ความเป็นไปได้ของของแข็งแขวนลอยในของไหลและการสะสมตัวของของแข็งที่เหลืออยู่
- ความเป็นไปได้ของการเกิดฟองไอ (Cavitations) ในตัวกลางของไหลที่เป็นของเหลว
- ความเป็นไปได้ของการเกิดแฟลช (Flashing) ในตัวกลางของของไหลที่เป็นของเหลว
- ชนิดของการติดตั้ง
- คุณสมบัติของของไหล เช่น สถานะของของไหล ความหนาแน่น ความหนืด และความดันไอ
- ช่วงอัตราการไหลที่ต้องการควบคุม
- ความต้องการสมรรถนะเชิงพลวัต (Dynamic performance)



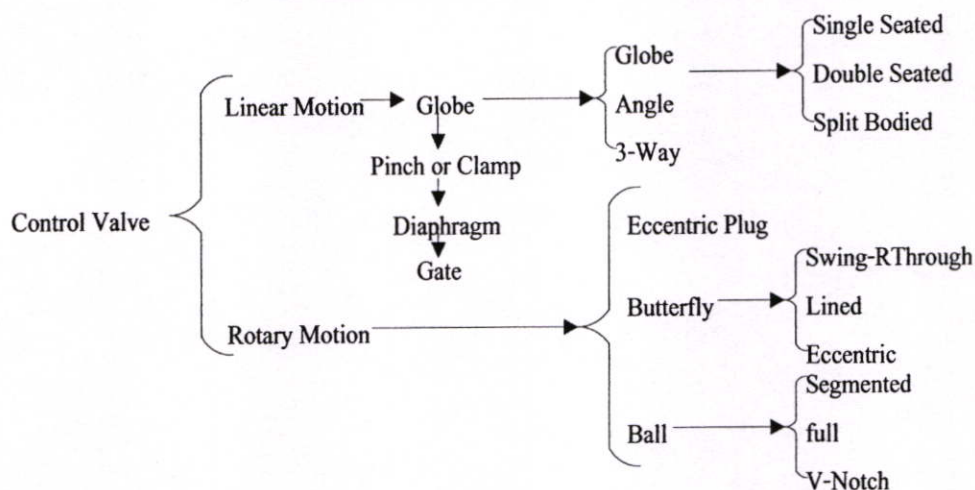
- |                    |                     |
|--------------------|---------------------|
| 1. Body            | 2. Bonnet           |
| 3. Bottom Cover    | 4. Plug Valve       |
| 5. Seat Ring       | 6. Valve Stem       |
| 7. Stud Bolts      | 8. Nuts             |
| 9. Yoke Nut        | 10. York            |
| 11. Diaphragm Case | 12. Diaphragm Cover |
| 13. Diaphragm Stem | 14. Diaphragm Plate |
| 15. Diaphragm      | 16. Spring          |
| 17. Spring Seat    | 18. Adjust Screw    |
| 19. Socket         | 20. Stopper         |
| 21. Stroke Scale   | 22. Number Plate    |
| 23. Cover Bolts    | 24. Cover Nu        |

รูปที่ 2.13 โครงสร้างของวาล์วควบคุม

## 2.4.2 ชนิดของวาล์วควบคุม (Valve types)

วาล์วควบคุมสามารถแบ่งตามการเคลื่อนที่ของการขับเคลื่อนวาล์ว สามารถแยกชนิดของวาล์วตามโคอะแกรมดังรูปที่ 2.14

- แบบเชิงเส้น (Linear motion) เป็นการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง (Rectilinear)
- หมุน (Rotary) เป็นการเคลื่อนที่เป็นแบบหมุน



รูปที่ 2.14 โคอะแกรมแสดงชนิดของวาล์วควบคุม

### ตัวขับเคลื่อนวาล์วควบคุม (Valve actuator)

ความต้องการของตัวขับเคลื่อนวาล์วขึ้นอยู่กับชนิดของวาล์วที่จะทำการควบคุม ยกตัวอย่าง โกล์วาล์วจะต้องการการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ขณะที่วาล์วปีกผีเสื้อจะต้องการการเคลื่อนที่เป็นแบบหมุน เป็นต้น

### ปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการเลือกตัวขับเคลื่อนวาล์ว

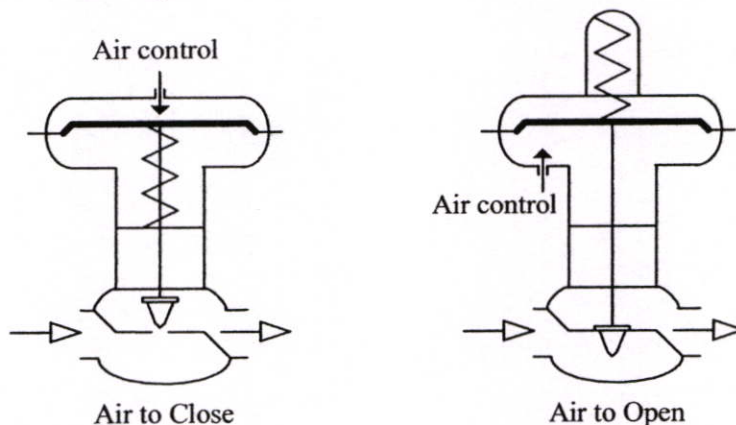
ข้อพิจารณาต่อไปนี้อาจใช้เป็นแนวทางในการเลือกตัวขับเคลื่อนวาล์ว

- ต้องเข้ากับตัวควบคุมหรือตัวกำหนดตำแหน่งวาล์ว (Valve Positioner) ซึ่งขึ้นอยู่กับว่าจะเลือกแหล่งสัญญาณอะไร
- ต้องกำเนิดแรงที่เพียงพอในการเอาชนะแรงปฏิกิริยาหรือแรงต้านที่กระทำโดยวาล์ว
- ต้องเหมาะสมกับสภาวะแวดล้อมของการทำงาน
- ช่วงชัก (Stroke) ของตัวขับเคลื่อนวาล์วต้องเข้ากันได้กับความต้องการของวาล์ว
- ต้องเป็นไปตามความเร็วที่ต้องการในการตอบสนอง
- ต้องปล่อยให้วาล์วอยู่ในสภาวะที่พึงประสงค์มากที่สุด หากแหล่งพลังงานที่จ่ายให้เกิดข้อขัดข้องในการจ่ายกำลัง

## แหล่งของแรงปฏิกิริยา

แรงปฏิกิริยาที่ตัวขับเคลื่อนต้องเอาชนะในการขับเคลื่อน ได้แก่ แรงจากสิ่งต่อไปนี้

- น้ำหนักและความเฉื่อย (Weight and Inertia) คือน้ำหนักที่ไม่สมดุลและความเฉื่อยที่เสริมเข้ามาของชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ทุกชิ้นของวาล์วและตัวขับเคลื่อน ยกเว้นวาล์วขนาดใหญ่ที่แรงเฉื่อยไม่ใช่ปัจจัยที่สำคัญมากนัก
- ความเสียดทาน (Friction) คือแรงที่เนื่องมาจากการกระทำของฝาอัดปะเก็น เพื่อกันรั่วที่ก้านวาล์ว และบางครั้งของตัวขับเคลื่อนเองด้วย
- ความดันของไหล (Fluid Pressure) คือแรงความดันของของไหลต่อปลั๊กวาล์ว (ลิ้นวาล์ว) อย่างไรก็ตามแรงนี้สามารถปรับลดลงได้ด้วยการใช้รูปแบบวาล์วคู่
- สปริงไดอะแฟรม (Diaphragm Spring) คือแรงสปริงซึ่งใช้ในการดึงวาล์วให้กลับสู่ตำแหน่งใหม่ของวาล์วเมื่อสัญญาณการขับเคลื่อนลดลง ตัวขับเคลื่อนใหญ่จะมีสปริงเป็นส่วนประกอบอยู่ด้วย



รูปที่ 2.15 การทำงานของวาล์วควบคุม

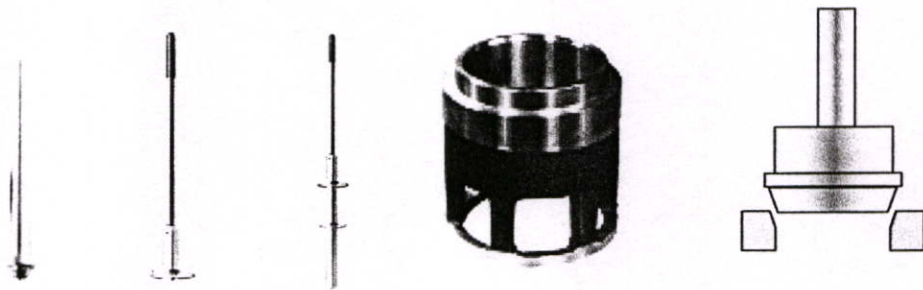
## ชนิดของตัวขับเคลื่อน

ตัวขับเคลื่อนวาล์วควบคุมอาจจำแนกได้เป็นประเภทต่าง ๆ ดังนี้

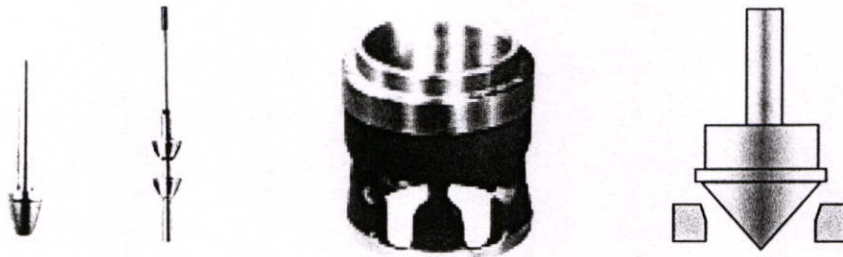
- ชนิดไดอะแฟรมทำงานด้วยนิวแมติก
- ชนิดลูกสูบทำงานด้วยนิวแมติกหรือไฮดรอลิก
- ชนิดอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิก
- ชนิดเซอร์โวสมรรถนะสูง
- ชนิดเครื่องกลไฟฟ้า
- ชนิดล้อหมุนทำงานด้วยมือ

### 2.4.3 คุณลักษณะภายในของวาล์ว (Inherent characteristic)

คือความสัมพันธ์ระหว่างการไหล ( $Q$ ) ผ่านวาล์วและตำแหน่งของวาล์ว (ระยะทางการเคลื่อนที่ของปลั๊กวาล์วหรือลิ้นวาล์ว) โดยมีความดันตกคร่อมวาล์วคงที่ เนื่องจากความดันตกคร่อมวาล์วจะไม่คงที่เมื่อวาล์วอยู่ในระหว่างใช้งาน ดังนั้นคุณลักษณะภายในต้องทำการวัดภายใต้สภาวะที่ทดสอบเฉพาะ ส่วนรูปร่างของกราฟที่ได้ขึ้นอยู่กับรูปทรงของลิ้นวาล์ว ดังรูปที่ 2.15 คือตัวอย่างของลิ้นและบ่าวาล์วบางลักษณะที่มีใช้งานโดยทั่วไปในวาล์วควบคุม ส่วนรูปที่ 2.16 แสดงรูปแบบของลักษณะภายในซึ่งได้มาจากการทดสอบวาล์วแบบต่าง ๆ



(ก) แบบเปิดเร็ว (Quick Opening)

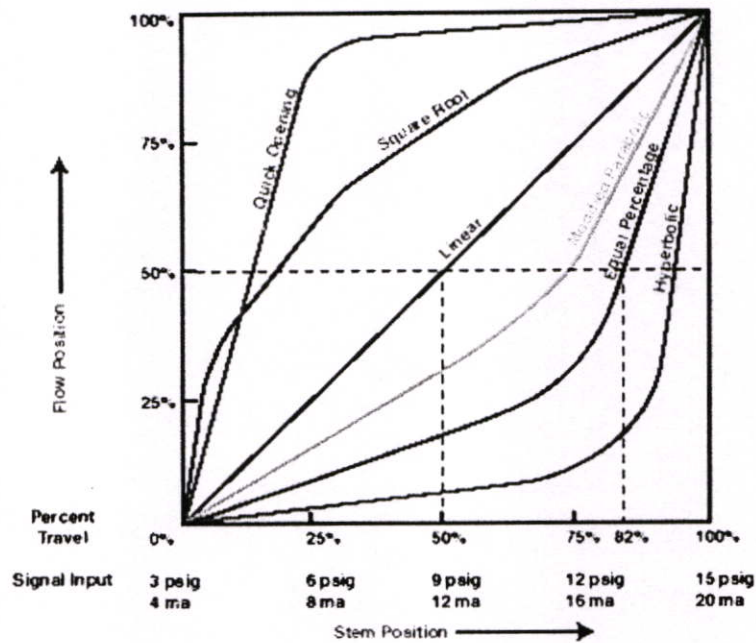


(ข) แบบการไหลคงที่ (Linear)



(ค) แบบเปอร์เซ็นต์เท่ากัน (Equal percentage)

รูปที่ 2.16 ตัวอย่างของปลั๊กวาล์วในการควบคุมการไหลแบบต่าง ๆ



รูปที่ 2.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการไหลผ่านวาล์วกับตำแหน่งของวาล์ว

คุณลักษณะการเปิดเร็ว (Quick Opening) ให้การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลที่รวดเร็วมาก ขณะที่การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของลิ้นวาล์วเพียงเล็กน้อยในช่วงแรก ใช้สำหรับเป็นวาล์วเปิด/ปิดที่ต้องการการเปิดหรือปิดวาล์วที่รวดเร็ว

คุณลักษณะแบบเชิงเส้น (Linear) หรือการไหลแบบคงที่ ให้การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลที่คงที่ขณะที่เปลี่ยนแปลงตำแหน่งของลิ้นวาล์ว ใช้ในระบบที่ต้องการให้ความดันลดของระบบส่วนมากตกคร่อมวาล์วเป็นหลัก

คุณลักษณะแบบเปอร์เซ็นต์เท่ากัน (Equal Percentage) เป็นลักษณะที่มีสัดส่วนการปรับเพิ่มหรือลดอัตราการไหลแบบเปอร์เซ็นต์คงที่ โดยทั่วไปใช้งานกับระบบที่ต้องการให้ความดันลดของระบบตกคร่อมวาล์วเพียงสัดส่วนน้อย

#### 2.4.4 การเลือกขนาดวาล์วควบคุม (Valve sizing)

การกำหนดขนาดวาล์วควบคุม ถือเป็นขั้นตอนทางวิศวกรรมในการกำหนดขนาดที่ถูกต้องของตัววาล์ว โดยทั่วไปจะระบุออกมาเป็นค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์ว (Valve flow coefficient) ใช้สัญลักษณ์  $C_v$  อย่างไรก็ตามค่าจำกัดความของ  $C_v$  อาจแปรเปลี่ยนไปในแต่ละบริษัทผู้ผลิต แต่โดยทั่วไปจะกำหนดขึ้นตามอัตราการไหลผ่านวาล์วเปิดเต็มที่ต่อความดันตกคร่อมวาล์ว ซึ่งสมการ  $C_v$  ขึ้นอยู่กับบริษัทผู้ผลิตวาล์ว โดยทั่วไปจะแบ่งตามตัวกลาง (Medium) ของของไหล

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้อ้างอิงสูตรที่ใช้หาค่า  $C_v$  ของ Nakakita ซึ่งเป็นสูตรที่ยอมรับกันโดยทั่วไปของสถาบันควบคุมของไหล (Fluid Control Institute : FCI) สามารถแบ่งสูตรในการหาค่า  $C_v$  ได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สูตรคำนวณค่า  $C_v$

Fluids	Pressure Condition	$C_v$ Formulas	Legend
Incompressible Fluids	-	$C_v = \frac{1.17\sqrt{G}}{\sqrt{\Delta p}}$	V : Max. Flow Rate (m <sup>3</sup> /h)
Air, Gas	Where $p_2 > 0.5p_1$ (or $\Delta p < 0.5p_1$ )	$C_v = \frac{Q}{289} \sqrt{\frac{G_1(t+273)}{\Delta p(p_1 + p_2)}}$	[Incompressible Fluids] W : Max. Flow Rate (kg/h)
	Where $p_2 \leq 0.5p_1$ (or $\Delta p \geq 0.5p_1$ )	$C_v = \frac{Q\sqrt{G_1(t+273)}}{250 * p_1}$	[Steam, Vapours] Q : Max. Flow Rate (m <sup>3</sup> /h)
Steam	Where $p_2 > 0.5p_1$ (or $\Delta p < 0.5p_1$ )	$C_v = \frac{W}{13.5\sqrt{\Delta p(p_1 + p_2)}} * K$	[Air, Gas] p <sub>1</sub> : Inlet Pressure (kgf/cm <sup>2</sup> abs) p <sub>2</sub> : Output Pressure (kgf/cm <sup>2</sup> abs)
	Where $p_2 \leq 0.5p_1$ (or $\Delta p \geq 0.5p_1$ )	$C_v = \frac{W}{11.7 * p_1} * K$	G : Specific Gravity t : Fluid Temperature (°C)

ตารางที่ 2.2 (ต่อ)

Fluids	Pressure Condition	$C_v$ Formulas	Legend
Vapours	Where $p_2 > 0.5p_1$ (or $\Delta p < 0.5p_1$ )	$C_v = \frac{W}{1210} \sqrt{\frac{V_1 + V_2}{\Delta p}}$	K : Correction Coefficient to Superheat $k = 1 + 0.0013 \times ^\circ\text{C of}$
	Where $p_2 \leq 0.5p_1$ (or $\Delta p \geq 0.5p_1$ )	$C_v = \frac{W}{856} \sqrt{\frac{V_1 + V_3}{\Delta p}}$	Superheat V : Specific Volume ( $\text{cm}^3/\text{g}$ )

## บทที่ 3

# หลักการที่นำเสนอและทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบการควบคุม

### 3.1 กล่าวนำ

วิทยานิพนธ์นี้เสนอการนำหลักการสมดุลของมวลพลังงานมาใช้ในการควบคุมกระบวนการต่าง ๆ ซึ่งการทำงานของเทคนิคที่จะนำเสนอจะคล้ายกับการควบคุมแบบลวงหน้า โดยทางอ้อม โดยที่เทคนิคนี้จะใช้อุปกรณ์การวัดน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการควบคุมแบบลวงหน้า ซึ่งเทคนิคนี้ใช้ตัวควบคุมเพียงตัวเดียวแต่ใช้การเขียนโปรแกรมการทำงานให้มีลักษณะการควบคุมแบบลวงหน้า ในการทดลองกับการควบคุมอุณหภูมิ การควบคุมระดับ และการควบคุมอัตราการไหลร่วมกับตัวควบคุมแบบ พีไอดี โดยในช่วงแรกของการควบคุมระดับของของเหลวและการควบคุมอัตราการไหล วาล์วควบคุมจะเปิดหรือปิดเต็มที่เมื่อค่าเป้าหมายถูกกำหนดให้เพิ่มขึ้นหรือลดลง เมื่อระดับของของเหลวเข้าใกล้ค่าเป้าหมาย ค่าความแตกต่างระหว่างพลังงานเข้าและออกซึ่งถูกคำนวณไว้ลวงหน้า จะถูกนำมาใช้กำหนดตำแหน่งของวาล์วควบคุมให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมกับอัตราการไหลออกเพื่อให้เกิดการสมดุลของพลังงานเข้าออก ตำแหน่งของวาล์วนี้ถือเป็นค่าเริ่มต้นก่อนที่จะเริ่มเข้าสู่การควบคุมแบบ พีไอดี ในขณะที่เดียวกันในการควบคุมอุณหภูมิในช่วงแรกจะป้อนแรงดันไฟฟ้าเต็มที่ให้กับขดลวดความร้อนและเมื่ออุณหภูมิเข้าใกล้อุณหภูมิเป้าหมาย ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมกับอุณหภูมินั้นจะถูกใช้เป็นค่าเริ่มต้นก่อนที่จะเริ่มต้นเข้าสู่การควบคุมแบบ พีไอดี

### 3.2 หลักการที่นำเสนอ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอหลักการพลังงานสมดุลมาใช้ร่วมกับการควบคุมแบบ พีไอดี และในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการควบคุมออกเป็น 2 โมด (mode) คือส่วนของ Energy Balancing Control โมด (mode) และ พีไอดี Control โมด (mode) เมื่อผลต่างของระดับของของเหลว หรือผลต่างของอัตราการไหล หรือผลต่างของอุณหภูมิอ้างอิงนั้นมีค่ามากกว่าค่าความคลาดเคลื่อนอ้างอิง ( $\epsilon$ ) ระบบจะทำงานในส่วนของการควบคุมแบบ พีไอดี

การทำงานของโปรแกรมในการควบคุมในส่วนของ Energy Balancing Control โมด (mode) นั้น จะสั่งให้เปิด 100 % หรือ 0 % เท่านั้น กล่าวคือ เมื่อ  $(sp - pv) > \epsilon$  Energy Balancing Controller จะสั่งให้เปิดการทำงาน 100% เพื่อเพิ่มค่าในกระบวนการจริงให้ใกล้กับค่าอ้างอิง ในทางตรงข้ามถ้า  $(sp - pv) < -\epsilon$  จะถูกสั่งให้ปิดการทำงานทั้งหมด เพื่อลดค่าในกระบวนการจริงให้เข้า

สู่ค่าอ้างอิง และเมื่อค่ากระบวนการจริงเข้าใกล้ค่ากระบวนการอ้างอิงแล้วระบบจะทำการคำนวณค่าที่เหมาะสม ณ เวลานั้น ๆ และทำการเปิดตารางค่าเริ่มต้นของค่าที่เหมาะสมกับกระบวนการ และเมื่อค่าในกระบวนการจริงมีค่าใกล้เคียงกับค่ากระบวนการอ้างอิงแล้ว ระบบจะเปลี่ยนการทำงานไปใช้ตัวควบคุมแบบ พีไอดี เพียงอย่างเดียวเพื่อรักษาค่าเป้าหมายให้อยู่ในช่วงที่ต้องการ

### 3.3 ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบ

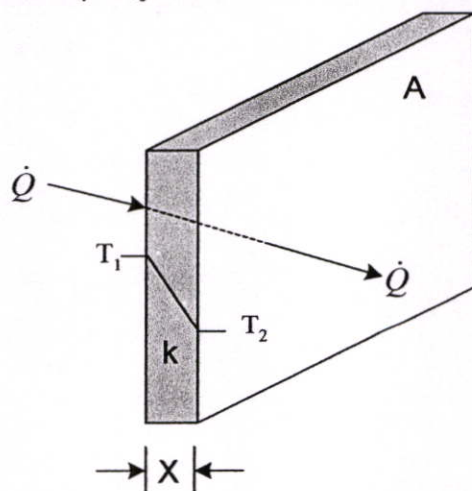
#### 3.3.1 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน

##### ทฤษฎีและหลักการการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)

เป็นที่ทราบกันดีว่าความร้อนสามารถถ่ายเทจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าได้ การถ่ายเทความร้อนมี 2 ลักษณะ คือ การถ่ายเทความร้อนที่อาศัยตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน ได้แก่ การนำความร้อนและการพาความร้อน และไม่อาศัยตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนคือ การแผ่ความร้อน

การนำความร้อน (Conduction Heat Transfer) ตามปกติน้ำย้อมไหลจากที่สูงลงไปต่ำ ความร้อนก็เช่นเดียวกันจะถ่ายเทจากที่ที่อุณหภูมิสูง ไปสู่ที่มีอุณหภูมิต่ำ กลไกการถ่ายเทความร้อนของตัวกลางใด ๆ ที่มีลักษณะเป็นการถ่ายเทพลังงานจาก โมเลกุลหนึ่ง ไปยังอีก โมเลกุลหนึ่งอย่างต่อเนื่อง โดยไม่มีการเคลื่อนที่ของมวลของตัวกลางนั้น เรียกการถ่ายเทความร้อนในลักษณะนี้ว่า การนำความร้อน อัตราการถ่ายเทความร้อนขึ้นอยู่กับสภาพการนำความร้อนของตัวกลางนั้น ๆ

การนำความร้อนของตัวกลางใด ๆ จะเป็นไปตามกฎของฟูเรียร์ (Fourier's Law of Conduction) การนำความร้อนของฟูเรียร์กล่าวว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านแผ่นตัวกลาง ( $\dot{Q}$ ) เป็นปฏิภาคโดยตรงกับพื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับทิศการไหลของความร้อน ( $A$ ) และเป็นปฏิภาคโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับระยะทางในทิศทางการไหล ( $\Delta T / \Delta X$ ) ดังที่ในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การนำความร้อนตามกฎความร้อนของฟูเรียร์

พิจารณาการนำความร้อนผ่านตัวกลางหนา  $x$  พื้นที่หน้าตัด  $A$  โดยมีความร้อนไหลผ่านผนังด้านร้อนอุณหภูมิ  $T_1$  ไปยังผนังด้านเย็น  $T_2$  แผ่นตัวกลางมีสภาพนำความร้อน (Thermal conductivity) เท่ากับ  $k$  (มีหน่วยเป็น  $W/m\cdot K$ ) ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านแผ่นตัวกลางนี้คำนวณจาก

$$\dot{Q} \propto A \left( \frac{\Delta T}{\Delta X} \right) \propto \frac{A(T_1 - T_2)}{X}$$

$$\dot{Q} \cong \frac{kA(T_1 - T_2)}{X} \quad (3.1)$$

โดยที่

$k$  คือ สภาพนำความร้อนของตัวกลาง มีหน่วยเป็น  $W/m\cdot K$  พิจารณาได้จากตาราง ที่ 3.1

$x$  คือ ความหนาแน่นของแผ่นตัวกลางในทิศทางการไหลของความร้อน มีหน่วยเป็น  $m$

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อน มีหน่วยเป็น  $m^2$

$(T_1 - T_2)$  คือ ผลต่างของอุณหภูมิสูงกับอุณหภูมิต่ำ มีหน่วยเป็น  $^{\circ}C$  หรือ  $K$

$\dot{Q}$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลาง โดยมีทิศทางการไหลจากอุณหภูมิสูง ( $T_1$ ) ไปยังอุณหภูมิต่ำ ( $T_2$ )

ตาราง 3.1 สภาพนำความร้อนสำหรับวัสดุบางชนิดที่อุณหภูมิ  $20^{\circ}C$

วัสดุ	$k$ ( $W/m\cdot K$ )
โลหะ	
เงิน	430
ทองแดง	386
อลูมิเนียม	204
เหล็ก	54
อโลหะ	
หิน	3.0
อิฐทนไฟ	1.0
คอนกรีต	1.0
แก้ว	0.78
อิฐทั่วไป	0.7

ตาราง 3.1 (ต่อ)

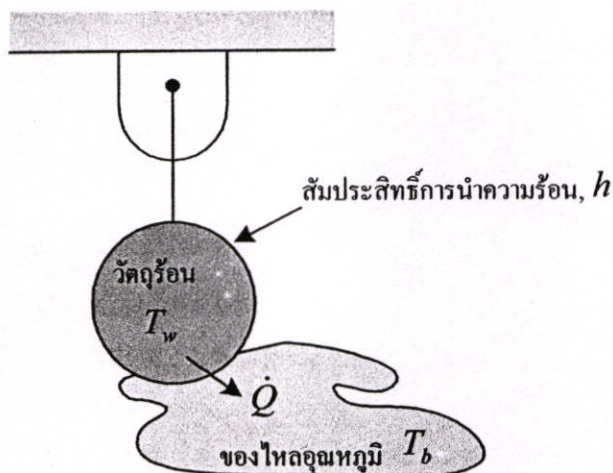
วัสดุ	k (W/m*K)
ฉนวน	
ไม้	0.17
โลหะ	
แมกนีเซียม	0.07
ไม้คอร์ก	0.04
ใยแก้ว	0.04
อากาศนิ่ง	0.02

**การพาความร้อน** กลไกการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนจะต่างกับการนำความร้อนตรงที่ว่า การพาความร้อนในขณะที่ถ่ายเทความร้อนจะมีการเคลื่อนที่ของมวลของตัวกลาง และเป็นการถ่ายเทความร้อนระหว่างตัวกลางที่เป็นของไหลกับผิวของแข็ง อัตราการถ่ายเทความร้อนขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวของของแข็ง การพาความร้อนแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

1) การพาความร้อนโดยธรรมชาติ การพาความร้อนโดยธรรมชาติจะเกิดขึ้นได้โดยมีการเคลื่อนที่ไหลของมวลตัวกลางหรือของไหล ซึ่งเป็นผลมาจากของไหลสองบริเวณที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน จึงทำให้ความหนาแน่นของของไหลทั้งสองบริเวณแตกต่างกันและเกิดแรงลอยตัวของของไหล ทำให้เกิดการไหลขึ้นในขณะที่ถ่ายเทความร้อน

2) การพาความร้อนโดยบังคับ การพาความร้อนโดยบังคับจะเกิดขึ้นได้ในกรณีที่ของไหลมีการเคลื่อนที่โดยใช้แหล่งพลังงานภายนอก เช่น เครื่องสูบลม หรือพัดลมเป่าให้ของไหลเคลื่อนที่ขณะถ่ายเทความร้อน ฯลฯ

ในปี ค.ศ. 1700 เซอร์ไอแซก นิวตัน ได้ทำการทดลอง โดยครั้งแรกนำวัตถุของแข็งไปเผาในเตาแล้วเอาออกมาปล่อยให้เย็นลงในบริเวณที่มีลมพัดผ่าน ดังในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การระบายความร้อนออกจากวัตถุโดยการพาความร้อน

ระหว่างผิววัตถุร้อนกับอากาศโดยรอบ (ของไหลโดยรอบ) นั่นคือ

$$\dot{Q} \propto (T_w - T_b) \quad (3.2)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนออกจากวัตถุจะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับพื้นที่ผิวของวัตถุซึ่งสัมผัสกับอากาศโดยรอบ (ของไหลโดยรอบ) นั่นคือ

$$\dot{Q} \propto A \quad (3.3)$$

จากความสัมพันธ์ที่ได้จะเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ว่า

$$\dot{Q} \propto A(T_w - T_b) \quad (3.4)$$

ดังนั้น

$$\dot{Q} = hA(T_w - T_b) \quad (3.5)$$

โดยที่

- $\dot{Q}$  คือ อัตราการพาความร้อนระหว่างพื้นผิววัตถุกับของไหล มีหน่วยเป็น W
- $A$  คือ พื้นที่ผิวของวัตถุสัมผัสกับของไหล มีหน่วยเป็น  $m^2$
- $T_w$  คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของวัตถุ มีหน่วยเป็น ( $^{\circ}C$  or K)
- $T_b$  คือ อุณหภูมิของของไหล มีหน่วยเป็น ( $^{\circ}C$  or K)
- $h$  คือ สัมประสิทธิ์ของการพาความร้อนที่ผิวของวัตถุ มีหน่วยเป็น  $W/m^2 \cdot K$

จากสมการที่ 3.2 นี้เรียกว่า กฎการบายความร้อนของนิวตัน (Newton's law of cooling) ซึ่งหมายถึงการระบายความร้อนออกจากผิววัตถุร้อนด้วยอากาศเย็น

ค่าของ  $h$  ขึ้นอยู่กับรูปร่างทางเรขาคณิตของพื้นที่ผิวของวัตถุ ลักษณะการไหลของของไหล และสมบัติของของไหล เป็นต้น และค่า  $h$  สำหรับการพาความร้อนโดยบังคับจะมีค่าสูงกว่าค่า  $h$  ในกรณีของการพาความร้อนโดยธรรมชาติ ค่าของ  $h$  สำหรับการพาความร้อนในของไหลชนิดต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าใช้งานของ  $h$  และพิสัยของ  $h$  สำหรับของไหลชนิดต่าง ๆ

	พิสัย $W/m^2 \cdot K$	ค่าใช้งาน $W/m^2 \cdot K$
การพาความร้อนโดยธรรมชาติ		
ในก๊าซ	5-25	7 (สำหรับอากาศ)
ในของเหลว	20-1000	500 (สำหรับน้ำ)
การพาความร้อนโดยบังคับ		
ในก๊าซ	10-250	50 (สำหรับอากาศ)
ในของเหลว	250-20000	10000 (สำหรับน้ำ)
น้ำเดือด	1000-100000	30000
ไอน้ำควบแน่น	10000-100000	50000

**การแผ่รังสีความร้อน** การแผ่รังสีความร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนจากผิวดวงกลางหนึ่งสู่อผิวดวงกลางหนึ่งที่อยู่ห่างกัน กลไกการถ่ายเทความร้อนจะขึ้นอยู่กับกฎของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สำหรับวัสดุทั้งหลายที่มีอุณหภูมิสูงกว่าศูนย์สัมบูรณ์ วัสดุเหล่านั้นจะสามารถเปล่งรังสีความร้อนออกมาได้ พลังงานความร้อนที่เปล่งออกมานั้นเป็นปฏิภาคโดยตรงกับอุณหภูมิผิวสัมบูรณ์ยกกำลังสี่ ตามกฎการแผ่รังสีของสเตฟาน-โบลต์ซมันน์ (Stefan-Boltzmann's law of radiation)

$$\dot{Q} = \epsilon \sigma A T_s^4 \quad (3.6)$$

โดยที่

$\dot{Q}$  คือ อัตราการแผ่รังสีออกจากพื้นที่ผิวจริง มีหน่วยเป็น W

$A$  คือ พื้นที่ผิวของวัสดุ มีหน่วยเป็น  $m^2$

$\sigma$  คือ ค่าคงที่สเตฟาน-โบลต์ซมันน์ มีค่าเท่ากับ  $5.67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$

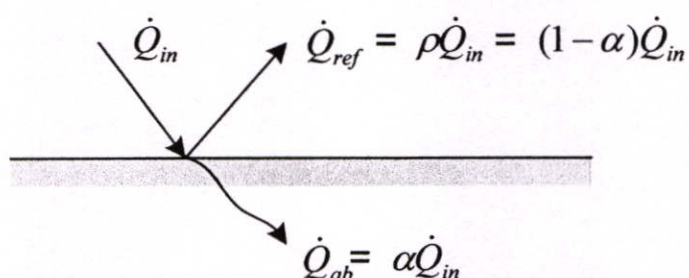
$\varepsilon$  คือ สภาพเปล่งรังสี (Emissivity) สำหรับพื้นที่ผิวจริง  $\varepsilon$  จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 กับ 1

สำหรับวัตถุดำ  $\varepsilon = 1.0$

$T_s$  คือ อุณหภูมิผิวสัมบูรณ์ มีหน่วยเป็น K

สำหรับวัตถุดำ (Black Body,  $\varepsilon = 1.0$ ) ที่อุณหภูมิสัมบูรณ์  $T_s$  หนึ่ง ๆ อัตราการแผ่รังสีมีค่าสูงสุดและคำนวณได้จาก

$$\dot{Q}_{\max} = \sigma AT_s^4 \quad (3.7)$$



รูปที่ 3.3 สมดุลพลังงานบนวัตถุทึบแสงเมื่อมีรังสีความร้อนตกกระทบบนวัตถุ

สำหรับวัตถุทึบแสง อาทิ โลหะ ไม้ และหิน ฯลฯ ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพดูดกลืนรังสี (Absorptivity,  $\alpha$ ) และสภาพสะท้อนรังสี (reflectivity,  $\rho$ ) นั้นพิจารณาจากสมดุลของพลังงานความร้อนบนวัตถุ ดังรูปที่ 3.4

$$\{\text{พลังงานความร้อนตกกระทบบนวัตถุทึบแสง}\} = \{\text{พลังงานความร้อนสะท้อนออก}\} + \{\text{พลังงานความร้อนถูกดูดกลืน}\}$$

$$\dot{Q}_{in} = \dot{Q}_{ref} + \dot{Q}_{ab}$$

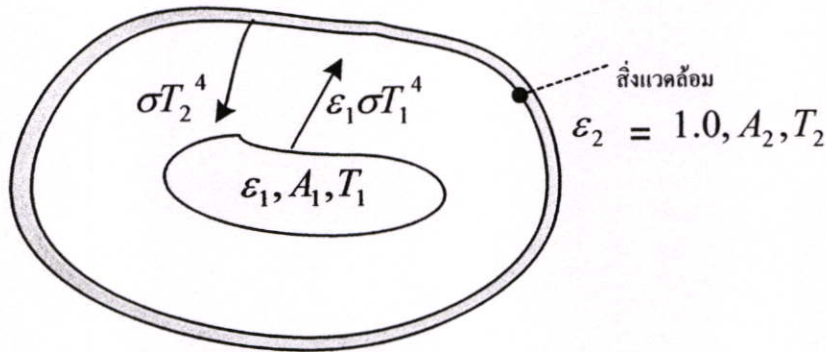
$$1 = \frac{\dot{Q}_{ref}}{\dot{Q}_{in}} + \frac{\dot{Q}_{ab}}{\dot{Q}_{in}}$$

$$\rho + \alpha = 1 \quad (3.8)$$

กฎของเคิร์ชฮอฟฟ์ (Kirchhoff's law) กล่าวว่า บนพื้นผิวหนึ่ง ๆ ที่อุณหภูมิผิว  $T$  พบว่า สภาพเปล่งรังสีเท่ากับสภาพดูดกลืนรังสีที่พิจารณาจากรังสีตกกระทบบนที่แผ่รังสีออกมาจากวัตถุดำที่มีอุณหภูมิ  $T$  เดียวกัน เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\varepsilon = \alpha \quad (3.6)$$

การแผ่รังสีระหว่างพื้นผิวจริง  $A_1$  กับสิ่งแวดล้อมโดยรอบ



รูปที่ 3.4 การแผ่รังสีความร้อนระหว่างพื้นผิว  $A_1$  กับสิ่งแวดล้อมขนาดใหญ่โดยรอบ

สำหรับพื้นผิว  $A_1$  มีสภาพเปล่งรังสี  $\varepsilon_1$  และอุณหภูมิผิวสม่ำเสมอ  $T_1$  (สัมบูรณ์) ถูกล้อมรอบด้วยสิ่งแวดล้อมขนาดใหญ่โดยรอบพื้นผิว  $A_1$  ( $A_1/A_2 \rightarrow 0$ ) และมีอุณหภูมิสัมบูรณ์  $T_2$  ดังแสดงในรูป 3.4 เมื่อพิจารณาสิ่งแวดล้อมขนาดใหญ่เป็นวัตถุดำ ดังนั้นอัตรารังสีความร้อนที่เปล่งออกมาสู่พื้นผิว  $A_1$  คือ  $\sigma T_2^4$  มีหน่วยเป็น  $W/m^2$  (รังสีความร้อนตกกระทบพื้นผิว  $A_1$ ) ถ้าพื้นผิว  $A_1$  มีสภาพดูดกลืนรังสี ( $\alpha_1$ ) ดังนั้นสภาพความร้อนที่พื้นผิว  $A_1$  ดูดกลืนไว้คำนวณจาก

$$\dot{Q}_{abs} = A_1 \alpha_1 \sigma T_2^4$$

พลังรังสีความร้อนที่พื้นผิว  $A_1$  เปล่งออกที่อุณหภูมิ  $T_1$  คำนวณจาก

$$\dot{Q}_{emit} = A_1 \varepsilon_1 \sigma T_1^4$$

อัตรากาการแผ่รังสีสุทธิออกจากพื้นผิว  $A_1$  คำนวณจาก

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{1.net} &= \dot{Q}_{emit} - \dot{Q}_{abs} \\ &= A_1 \varepsilon_1 \sigma T_1^4 - A_1 \alpha_1 \sigma T_2^4 \end{aligned}$$

จากกฎของเคิร์ชฮอฟฟ์ ( $\varepsilon_1 = \alpha_1$ ) ดังนั้น

$$\dot{Q}_{1,net} = A_1 \varepsilon_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (3.9)$$

จากการทดลองศึกษาคุณลักษณะของกระบวนการถ่ายเทความร้อน จากชุดสาริตที่ใช้ทดลองเรื่องอุณหภูมิจึงเป็นแบบการพาความร้อน โดยใช้สมการ

$$Q = h \times A (T_w - T_b) \quad (3.10)$$

- เมื่อ  $Q$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)  
 $h$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ( $W/m^2 K$ )  
 $A$  คือ พื้นที่ผิวของตัวกลาง ( $m^2$ )  
 $T_w$  คือ อุณหภูมิของส่วนที่ทำให้ร้อน ( $^{\circ}C$  or  $K$ )  
 $T_b$  คือ อุณหภูมิของของเหลว (อากาศ) ( $^{\circ}C$  or  $K$ )

ส่วนทั้งหมดของการศึกษาเครื่องทำความร้อนที่เป็นสแตนเลส ด้วยเหตุนี้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน  $h$  คือค่าประมาณ  $3.7 W/m^2 * K$  พื้นที่ผิวของตัวกลาง  $A$  ประมาณ  $3.7 m^2$  อุณหภูมิของอากาศโดยรอบ ๆ หรืออุณหภูมิสภาวะแวดล้อม คือค่าประมาณ  $27^{\circ}C$  หรือ  $300 K$  แทนค่าเหล่านี้ลงในสมการที่ (3.8) อัตราการถ่ายเทความร้อนสามารถเขียนเป็นสมการ

$$Q = 13.69(T_w - 300) \quad (3.11)$$

จากสมการที่ (3.9) อุณหภูมิที่คำนวณได้คิดเป็นเคลวิน (K) สามารถเขียนเป็นสมการ

$$T_w = \frac{Q}{13.69} + 300 \quad (3.12)$$

พลังงานที่จ่ายให้กับขดลวดความร้อนสามารถหาได้จากสมการ

$$P = i_p^2 R \quad (3.13)$$

เมื่อ  $P$  คือ กำลังไฟฟ้า (W)

$i_p$  คือ กระแสไฟฟ้าที่ผ่านเข้าตู้อบ (A)

$R$  คือ ขดลวดความร้อน ( $\Omega$ ), 23.4 ( $\Omega$ ) ที่ใช้ศึกษาจากตู้อบ

หลักของเรื่องพลังงานทางอุณหพลศาสตร์ถ้าเรามองข้ามเรื่องการสูญเสียความร้อน การสร้างความร้อนจะเท่ากับอัตราการถ่ายเทความร้อน

$$P = Q \quad (3.14)$$

แทนสมการที่ (3.12) ลงในสมการที่ (3.10) อุณหภูมิของพลังงานที่จ่ายให้ขดลวดสามารถเขียนได้ใหม่ คือ

$$T_w = \frac{P}{13.69} + 300 = \frac{i_p^2 R}{13.69} + 300 \quad (3.15)$$

จากค่าที่ได้ในตารางด้านล่าง แสดงข้อมูลสำหรับเทคนิคการควบคุมโดยใช้ค่าจากตารางข้อมูลในช่องที่ 2<sup>nd</sup> และ 5<sup>th</sup> เป็นค่าที่ได้จากการวัดในชุดสาริการควบคุมอุณหภูมิ ในขณะที่ข้อมูลในคอลัมน์ที่ 6<sup>th</sup> และ 8<sup>th</sup> เป็นค่าที่ได้จากคำนวณโดยใช้สมการที่ (3.9) – (3.12)

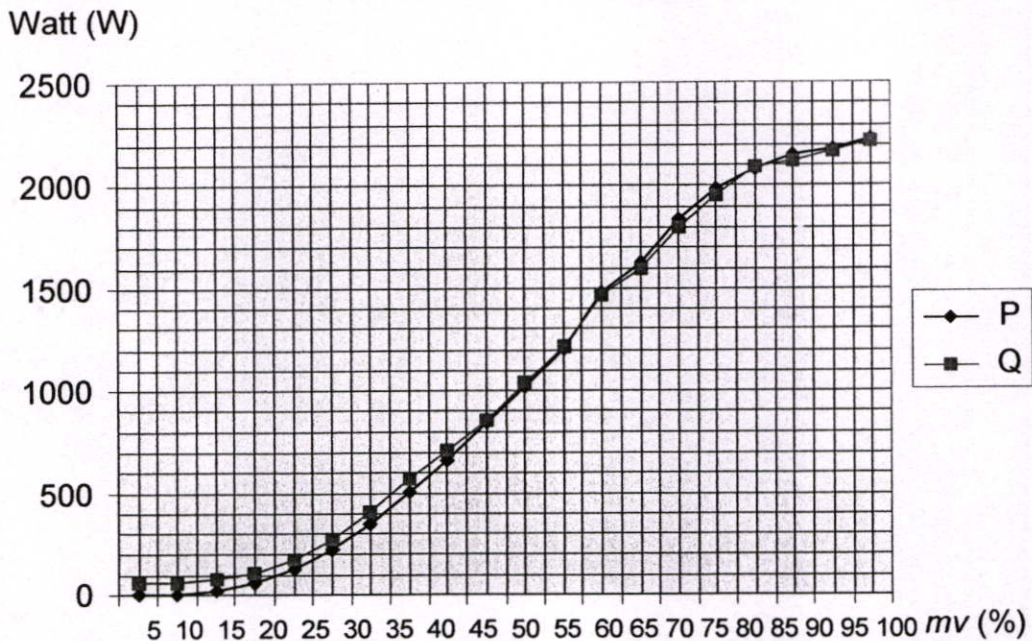
ตารางที่ 3.3 ข้อมูลของกระบวนการทางอุณหภูมิที่ได้จากการทดลอง

$mv$	การวัดแรงดัน [ $v_p$ ]	การวัดกระแส [ $i_p$ ]	การวัดอุณหภูมิ [ $T_{meas}$ ]	การวัดอุณหภูมิ [ $T_{meas}$ ]	คำนวณพลังงานความร้อน [ $P$ ]	คำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อน [ $Q$ ]	คำนวณอุณหภูมิ [ $T_{cal}$ ]
(%)	(V)	(A)	( $^{\circ}$ C)	(K)	(W)	(W)	(K)
5	0.18	0.2	31.0	304.0	0.936	54.760	300.068
10	3.63	0.3	32.1	305.1	2.106	69.819	300.153
15	20.0	0.8	33.1	306.1	14.976	83.509	301.093
20	33.6	1.5	35.1	308.1	52.650	110.889	303.845
25	50.6	2.2	39.8	312.8	113.256	175.232	308.272

ตารางที่ 3.3 (ต่อ)

$mv$	การวัด แรงดัน $[v_p]$	การวัด กระแส $[i_p]$	การวัด อุณหภูมิ $[T_{meas}]$	การวัด อุณหภูมิ $[T_{meas}]$	คำนวณพลังงาน ความร้อน $[P]$	คำนวณอัตราการ ถ่ายเทความร้อน $[Q]$	คำนวณ อุณหภูมิ $[T_{cal}]$
(%)	(V)	(A)	( $^{\circ}$ C)	(K)	(W)	(W)	(K)
30	67.9	3.0	44.4	317.4	210.600	238.206	315.383
35	85.4	3.8	54.0	327.0	337.896	369.630	324.681
40	103.1	4.6	64.3	337.3	495.144	510.637	336.168
45	120.5	5.4	74.0	347.0	682.344	643.430	349.842
50	137.3	6.2	84.2	357.2	899.496	783.068	365.704
55	153.0	6.9	98.0	371.0	1114.074	971.990	381.378
60	167.1	7.5	111.6	384.6	1316.250	1158.174	396.146
65	180.0	8.1	125.2	398.2	1535.274	1344.358	412.145
70	191.4	8.5	138.6	411.6	1690.650	1527.804	423.495
75	201.3	9.0	152.4	425.4	1895.400	1716.726	438.451
80	209.4	9.3	166.0	439.0	2023.866	1902.910	447.835
85	215.0	9.5	173.4	446.4	2111.852	2004.216	454.262
90	218.2	9.7	177.0	450.0	2201.706	2053.500	460.825
95	220.5	9.8	181.3	454.3	2247.336	2112.367	464.158
100	222.73	9.9	185.5	458.5	2293.434	2169.865	467.526

ค่าที่ได้ในตารางในคอลัมน์ที่ 6<sup>th</sup> และ 8<sup>th</sup> ที่ได้จากการทดลองจากชุดสาธิตจะถูกใช้เป็นค่าเริ่มต้นที่เหมาะสมกับอุณหภูมิขณะนั้น ก่อนที่จะเปลี่ยนการควบคุมเป็นแบบ พีไอดี ค่าที่ได้จะถูกโปรแกรมไว้ในตัวควบคุม

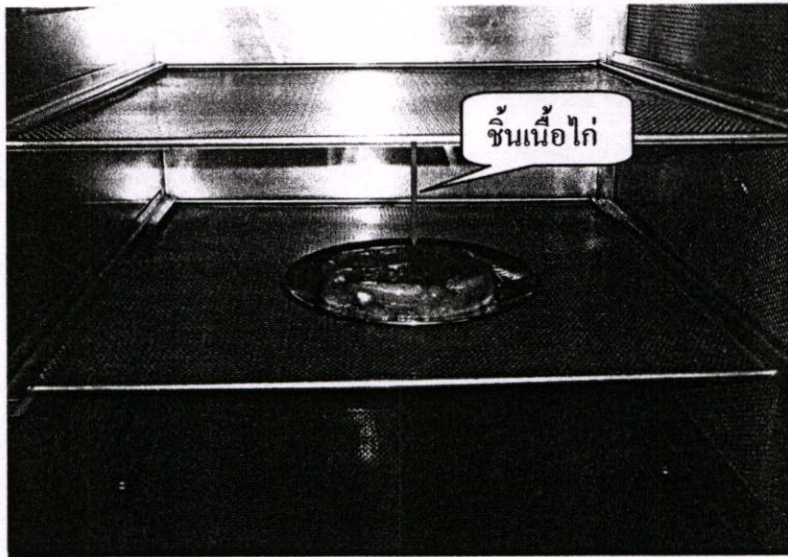


รูปที่ 3.5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบพลังงานความร้อนระหว่างการคำนวณกับการวัดจริง

จากตารางที่ 3.3 ค่าที่ได้ในตารางในคอลัมน์ที่ 6<sup>th</sup> และ 8<sup>th</sup> ที่ได้จากการทดลองจากชุดสาธิตได้นำมาเปรียบเทียบ ซึ่งเป็นค่าพลังงานความร้อนที่ได้จากการวัดนำมาเปรียบเทียบกับค่าพลังงานความร้อนที่ได้จากการคำนวณเพื่อแสดงให้เห็นว่าค่าพลังงานที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ทำเป็นเทคนิคการเปิดตารางสามารถนำไปใช้เป็นค่าเริ่มต้นที่เหมาะสมได้จากรูปที่ 3.5 แสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้ทั้งจากการวัด และการคำนวณนั้นมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย สามารถนำไปใช้เป็นค่าเริ่มต้นที่เหมาะสมกับกระบวนการในสภาวะนั้น ๆ ได้

### 3.3.2 การทดลองนำเทคนิคการเปิดตารางที่ออกแบบไปทดลองใช้งานจริงโดยการอบอาหาร

การทดลองนี้เป็นการประยุกต์ใช้เทคนิคการเปิดตาราง ที่ออกแบบกับตัวควบคุมที่แสดงผลและสามารถโปรแกรมได้ (SLPC) ไปใช้ในการทดลองเสมือนจริงโดยการอบอาหารเพื่อทำการเปรียบเทียบให้เห็นความแตกต่างระหว่างเทคนิคการเปิดตารางที่ใช้ร่วมกับ การใช้ตัวควบคุมแบบ พีไอดี กับการใช้เทคนิคการควบคุมแบบ พีไอดี เพียงอย่างเดียว โดยในการทดลองใช้เนื้อไก่รูปทรงกระบอกซึ่งมีพื้นที่ 0.013 ตารางเมตรจำนวนหนึ่งขึ้นต่อการทดลองโดยใส่ไก่ในกระบวนการจำลองการควบคุม ณ ตำแหน่งตรงกลางเพื่อให้เนื้อไก่ได้รับความร้อนเฉลี่ยเท่า ๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่งในการทดลองจะทำการอบโดยการใส่อาหารในขณะที่เตาอบมีอุณหภูมิเริ่มแรกที่อุณหภูมิห้อง และการทดสอบโดยการใส่อาหารในขณะที่เตาอบได้ตั้งอุณหภูมิเป้าหมายไว้ที่ 150°C เพื่อให้เห็นถึงประสิทธิภาพและระยะเวลาที่ตัวควบคุมใช้ในการควบคุมอุณหภูมิไปสู่ค่าเป้าหมาย



รูปที่ 3.6 การทดลองอบอาหาร โดยใช้เนื้อไก่รูปทรงระบอบพื้นที่ 0.013 ตารางเมตร

เมื่อได้ศึกษาถึงเตาอบในรูปที่ 3.6 การถ่ายเทความร้อนรวมของเตาอบส่วนใหญ่เป็นไปตามลักษณะการถ่ายเทความร้อน โดยมีการถ่ายเทความร้อนเป็นดังสมการที่ 3.14

$$\dot{Q}_{Total} = \dot{Q}_{Heater} + \dot{Q}_{Chicken} \quad (3.16)$$

จากสมการการถ่ายเทความร้อนสมการสามารถเขียนเป็นสมการที่ 3.15 ได้เป็น

$$\dot{Q}_{Total} = [h_{Stainless} \times A_{Stainless} (T_w - T_b)] + [h_{Air} \times A_{Chicken} (T_w - T_b)] \quad (3.17)$$

- เมื่อ  $\dot{Q}_{Total}$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนรวม มีหน่วยเป็น W  
 $h$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน มีหน่วยเป็น  $W/m^2.K$   
 $A$  คือ พื้นที่ผิวของตัวกลาง มีหน่วยเป็น  $m^2$   
 $T_w$  คือ อุณหภูมิของพื้นผิววัตถุ มีหน่วยเป็น K  
 $T_b$  คือ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (อากาศ) มีหน่วยเป็น K

ผนังด้านในของเตาอบที่ใช้ทดลองเป็นเหล็กปลอดสนิม ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน  $h$  ประมาณ  $3.7 W/m^2.K$  พื้นที่ผิวของสื่อกลาง  $A$  มีขนาด  $3.7 m^2$  ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยบังคับของอากาศ  $h$  ประมาณ  $25 W/m^2.K$  พื้นที่ผิวของสื่อกลางของเนื้อไก่  $A$  มีขนาด  $0.013 m^2$  อุณหภูมิของก๊าซล้อมรอบหรืออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมประมาณ  $27^\circ C$  หรือ  $300 K$  เมื่อนำไปแทนค่าในสมการที่ (3.15) สามารถเขียนเป็นสมการการถ่ายเทความร้อนได้ดังสมการ

$$\dot{Q}_{Total} = 13.69(T_w - 300) + 0.33(T_w - 300) \quad (3.18)$$

จากสมการที่ (3.16) หาอุณหภูมิของพื้นผิววัตถุในหน่วยของเคลวิน (KELVIN; K) เท่ากับ

$$\dot{T}_w = \frac{\dot{Q}_{Total}}{14.02} + 300 \quad (3.19)$$

จากหลักการถ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขดลวดความร้อนทำการผลิตความร้อนดังสมการที่ (3.8) และจากกฎการอนุรักษ์พลังงานในอุดมคติโดยไม่คำนึงถึงความสูญเสีย ณ สภาวะคงตัวจะได้พลังงานที่ผลิตความร้อน ดังนั้นสามารถเขียนสมการอุณหภูมิของพื้นผิววัตถุได้ดังสมการ

$$T_w = \frac{P}{14.02} + 300 = \frac{(i_p^2 R)}{14.02} + 300 \quad (3.20)$$

จะเห็นว่าอุณหภูมิของพื้นผิววัตถุหรืออุณหภูมิที่ต้องการ  $T_0(t)$  สามารถควบคุมได้โดยกระแสไฟฟ้า  $i_p(t)$  ที่สัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้า  $v_p(t)$  ซึ่งสามารถปรับได้โดยตรงกับการควบคุมเฟส ดังตารางที่ 3.4 แสดงข้อมูลของกระบวนการทางอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง ในข้อมูลในหลักที่ 2<sup>th</sup> ถึงหลักที่ 5<sup>th</sup> เป็นค่าที่ได้จากการวัดจากชุดทดลองในรูปแบบที่ (3.6) ในขณะที่ข้อมูลในหลักที่ 8<sup>th</sup> ได้จากการคำนวณจากสมการที่ (3.16) ถึงสมการที่ (3.18)

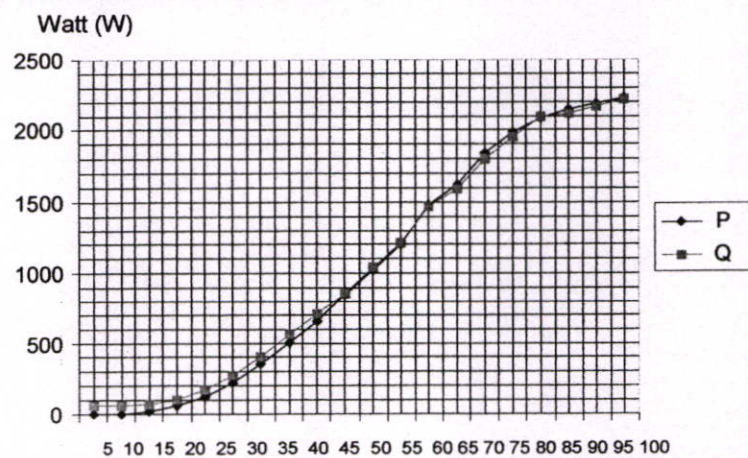
ตารางที่ 3.4 ข้อมูลของกระบวนการทางอุณหภูมิในการทดลองอบอาหาร

mv	การวัด แรงดัน [ $V_p$ ] %	การวัด กระแส [ $I_p$ ] A	การวัด อุณหภูมิ $T(mea)$ °C	การวัด อุณหภูมิ $T(mea)$ K	คำนวณพลังงาน ผลิตความร้อน $p(cal)$ W	คำนวณอัตราการ ถ่ายเทความร้อน $Q(cal)$ w	คำนวณ อุณหภูมิ $T(Cal)$ K
5	0.18	0.21	30.9	304.0	1.032	56.621	300.075
10	10.40	0.44	31.2	304.3	4.622	60.825	300.338
15	22.53	0.96	32.2	305.3	21.692	74.840	301.585
20	36.77	1.57	34.4	307.5	57.779	105.673	304.221
25	53.56	2.29	39.3	312.4	122.593	174.347	308.955
30	72.18	3.08	46.1	319.2	222.648	269.649	316.264
35	90.70	3.88	56.0	329.1	351.559	408.397	325.680
40	108.65	4.64	67.5	340.6	504.480	569.570	336.850

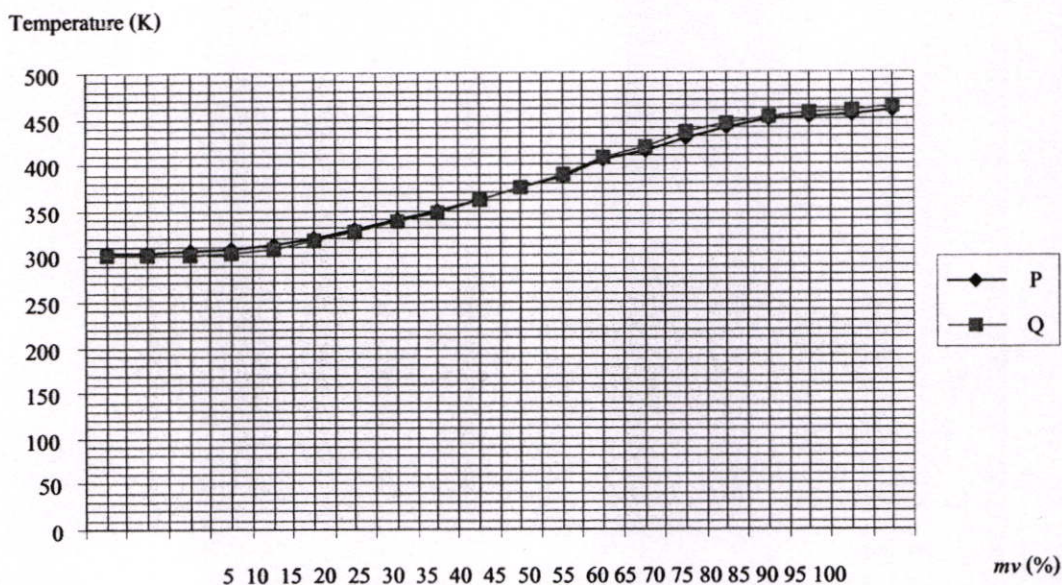
ตารางที่ 3.4 (ต่อ)

<i>mv</i>	การวัด แรงดัน $[V_p]$ %	การวัด กระแส $[I_p]$ A	การวัด อุณหภูมิ $T(mea)$ $^{\circ}C$	การวัด อุณหภูมิ $T(mea)$ K	คำนวณ พลังงานผลิต ความร้อน $p(cal)$ W	คำนวณอัตรา การถ่ายเทความร้อน $Q(cal)$ W	คำนวณ อุณหภูมิ $T(Cal)$ K
45	124.03	5.30	77.2	350.3	657.412	705.515	348.021
50	140.80	6.02	88.1	361.2	847.207	858.279	361.885
55	154.85	6.62	101.0	374.1	1024.723	1039.072	374.852
60	168.16	7.19	113.8	386.9	1208.452	1218.464	388.273
65	185.74	7.94	131.5	404.6	1474.331	1466.530	407.694
70	194.72	8.32	140.6	413.7	1620.337	1594.066	418.359
75	207.58	8.87	155.1	428.2	1841.430	1797.284	434.509
80	215.51	9.21	166.5	439.6	1984.810	1957.055	444.982
85	220.73	9.43	176.4	449.5	2082.125	2095.803	452.091
90	224.30	9.59	178.1	451.2	2150.021	2119.629	457.050
95	226.00	9.66	181.5	454.6	2182.735	2167.280	459.440
100	228.31	9.76	185.2	458.3	2227.584	2219.135	462.716

จากข้อมูลในตารางที่ 3.4 นำมาเขียนเป็นแผนภูมิเส้นแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าพลังงานผลิตความร้อน  $p$  กับอัตราการถ่ายเทความร้อน  $Q$  ดังแสดงในรูปที่ 3.7 จะเห็นได้ว่าข้อมูลที่ได้ในรูปที่นั้นมีความใกล้เคียงกันและไปในทิศทางเดียวกัน

รูปที่ 3.7 แสดงการเปรียบเทียบกันระหว่างค่า  $P$  และ  $Q$  จากข้อมูลในตารางที่ 3.4

และจากข้อมูลในตารางที่ 3.4 สามารถเขียนเป็นแผนภูมิเส้นแสดงการเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิที่ได้จากการวัด  $T_{meas}$  กับอุณหภูมิที่ได้จากการคำนวณ  $T_{cal}$  จะเห็นได้ว่าค่าของอุณหภูมิที่ได้ในรูปที่ 3.8 มีค่าใกล้เคียงกันและไปในทิศทางเดียวกันเช่นกัน



รูปที่ 3.8 การเปรียบเทียบระหว่างค่าของ  $T_{meas}$  และ  $T_{cal}$  จากข้อมูลในตารางที่ 3.4

ในการทดลองเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับการควบคุมแบบ พีไอดี จากการใช้ชุดทดลองทางความร้อนภายใต้สภาวะการควบคุมอุณหภูมิ โดยการทดลองเสมือนการใช้งานจริงโดยการอบอาหารเปรียบเทียบกับตัวควบคุมกระบวนการแบบ พีไอดี โดยตั้งค่าอุณหภูมิเป้าหมายไว้ที่ 150 °C หรือที่ 77.40% และตั้งความเร็วในการบันทึกไว้ที่ 120 mm./h. เพื่อให้เห็นประสิทธิภาพของตัวควบคุมทั้งสองแบบในการควบคุมอุณหภูมิเข้าสู่ค่าเป้าหมาย ซึ่งได้แสดงผลการตอบสนองของระบบเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ พีไอดี และแบบเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับตัวควบคุมแบบ พีไอดี ได้ในผลการทดลองในบทที่ 5

### 3.3.3 ทฤษฎีพลังงานสมดุล

#### 3.3.3.1 การควบคุมระดับของของเหลว

พลังงานกลสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ พลังงานจลน์ (Kinetic energy :  $K_E$ ) และพลังงานศักย์ (Potential energy :  $P_E$ ) [6] - [7] พลังงานจลน์เป็นพลังงานกลที่มีความสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของมวล โดยพลังงานจลน์ของวัตถุในหน่วยจูล สามารถหาได้จาก

$$K_e = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3.21)$$

เมื่อ  $m$  คือ มวลของวัตถุ (kg) ,  $v$  คือความเร็ว (m/s)

พลังงานจลน์ในของไหลจะอธิบายในเทอมของ “velocity head” โดยพลังงานจลน์ของของไหล ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนัก คือ

$$K_e = \frac{v^2}{2g} \quad (3.22)$$

เมื่อ  $g$  คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (9.81 m/s<sup>2</sup>)

สำหรับพลังงานศักย์ของของไหลขึ้นอยู่กับความสูงที่เปรียบเทียบกับระดับอ้างอิงที่สมมุติขึ้น สามารถหาได้จาก

$$P_e = mgz \quad (3.23)$$

เมื่อ

$z$  คือ ระดับอ้างอิง (เมตร)

จากสมการที่ (3.21) สามารถหาค่าพลังงานศักย์ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักหรือที่เรียกอีกอย่างว่า Elevation head หรือ Potential head ได้โดย

$$P_e = z \quad (3.24)$$

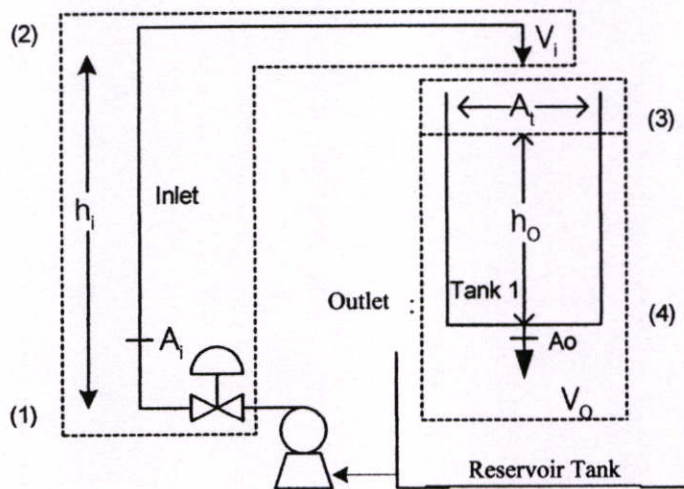
เนื่องจากในระบบพลังงานไม่มีการสูญหาย แต่สามารถเปลี่ยนจากรูปหนึ่งไปเป็นพลังงานอีกรูปหนึ่ง เมื่อพิจารณาการไหลของของไหลสามารถอธิบายด้วยทฤษฎีของ Bernoulli ในสมการของ Bernoulli จะอธิบายในหน่วยของความยาวเป็นเมตร ด้วยเหตุนี้สามเทอมของสมการจึงประกอบด้วย pressure head ( $p/\gamma$ ), velocity head ( $v^2/2g$ ) และ potential head ( $z$ ) ดังนั้นสมการ Bernoulli จึงเขียนได้เป็น

$$\frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + z = \text{constant} \quad (3.25)$$

เมื่อ  $p$  คือ ความดัน และ  $y$  คือ ค่าน้ำหนักจำเพาะของของไหล และจากสมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) เมื่อของไหลมีอัตราการไหลคงตัว

$$pVA = \text{constant} \quad (3.26)$$

เมื่อ  $p$  คือ ความหนาแน่นของของไหล ( $\text{kg/m}^3$ ) และเมื่อพิจารณาในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.9 ระบบควบคุมระดับที่ใช้ในการทดลอง

เมื่อ  $A_1$  คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อทางเข้า ( $\text{m}^2$ )

$A_0$  คือ พื้นที่หน้าตัดของแท่ง 1 ( $\text{m}^2$ )

$h_1$  คือ ความแตกต่างของระดับในส่วนที่ (1) และส่วนที่ (2) (m)

$h_0$  คือ ความแตกต่างของระดับในส่วนที่ (3) และส่วนที่ (4) (m)

$V_1$  คือ ความเร็วในการไหลเข้า (m/s)

$V_0$  คือ ความเร็วในการไหลออก (m/s)

จากรูปที่ 3 ประกอบด้วยส่วนหลักสองส่วน คือ ส่วนขาเข้าและส่วนขาออก พลังงานจลน์จากส่วนของการไหลเข้าจะเปลี่ยนเป็นพลังงานศักย์ในส่วนของขาออก และเปลี่ยนกลับจากพลังงานศักย์เป็นพลังงานจลน์อีกครั้งหนึ่ง จากหลักการของการเปลี่ยนรูปพลังงานตามทฤษฎีของ Bernoulli เมื่อพิจารณาในส่วนที่ (1) และส่วนที่ (2) จากสมการที่ (3.23) ได้เป็น

$$\frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \quad (3.27)$$

เมื่อกำหนดให้  $v_2 = v_1 = v_i$  และ  $h_i = z_2 - z_1$  สมการที่ (3.20) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$p_1 - p_2 = \gamma h_i \quad (3.28)$$

พิจารณาส่วนที่ (3) และส่วนที่ (4) จากทฤษฎีของ Bernoulli โดยที่  $P_3 = P_4$  และ  $h_o = Z_3 - Z_4$  สมการที่ (3.13) เขียนใหม่เป็น

$$V_o^2 - V_i^2 = 2gh_o \quad (3.29)$$

พิจารณาความต่อเนื่อง จากสมการที่ (3.27) จะได้

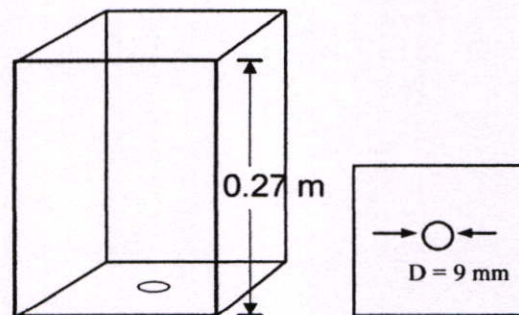
$$V_o = \sqrt{2gh_o} \quad (3.30)$$

อัตราการไหลเข้า  $Q_i$  และอัตราการไหลออก  $Q_o$  ในหน่วย  $m^3/s$  หาได้โดย

$$Q_i = V_i A_i \quad (3.31)$$

$$Q_o = V_o A_o \quad (3.32)$$

จากสมการเห็นได้อย่างชัดเจนว่าอัตราการไหลออก  $Q_o$  สามารถควบคุมได้โดยการกำหนดค่าเป้าหมาย  $h_o$  (ระดับของแท่งค้ำ 1) และสามารถควบคุมอัตราการไหลเข้าให้เท่ากับอัตราการไหลออกโดยอาศัยหลักการพลังงานสมดุล



รูปที่ 3.10 ลักษณะและขนาดของแท่งค้ำที่ใช้

รูปที่ 3.10 โครงสร้างและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแท่งค้ โดย  $d$  เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อน้ำออก จากสมการที่ (3.23) และ (3.24) ความเร็วของของไหล  $V_o$  (m/s) และ อัตราการไหลออก  $Q_o$  (m<sup>3</sup>/s) คำนวณได้จาก

$$v_o = 4.429446918\sqrt{h_o} \quad (3.33)$$

$$\begin{aligned} Q_o &= v_o \times A_o \\ &= 4.429446918\sqrt{h_o} \times \left( \frac{\pi \times 0.009^2}{4} \right) \\ &= 2.81789237 \times 10^{-4} \sqrt{h_o} \end{aligned} \quad (3.34)$$

การกำหนดขนาดของวาล์วที่เหมาะสมเป็นกระบวนการในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ขนาดของวาล์ว โดยนำค่า  $C_v$  ที่คำนวณได้มากำหนดขนาดของวาล์ว โดยสมการพื้นฐานที่ใช้ในการกำหนดขนาดของวาล์วของของเหลวหาได้จาก

$$C_v = Q \sqrt{\frac{G_f}{\Delta p}} \quad (3.35)$$

เมื่อ

$C_v$  คือ ความถ่วงจำเพาะของของเหลวที่อุณหภูมิใช้งาน (ของน้ำ = 1 ที่ 60 °F)

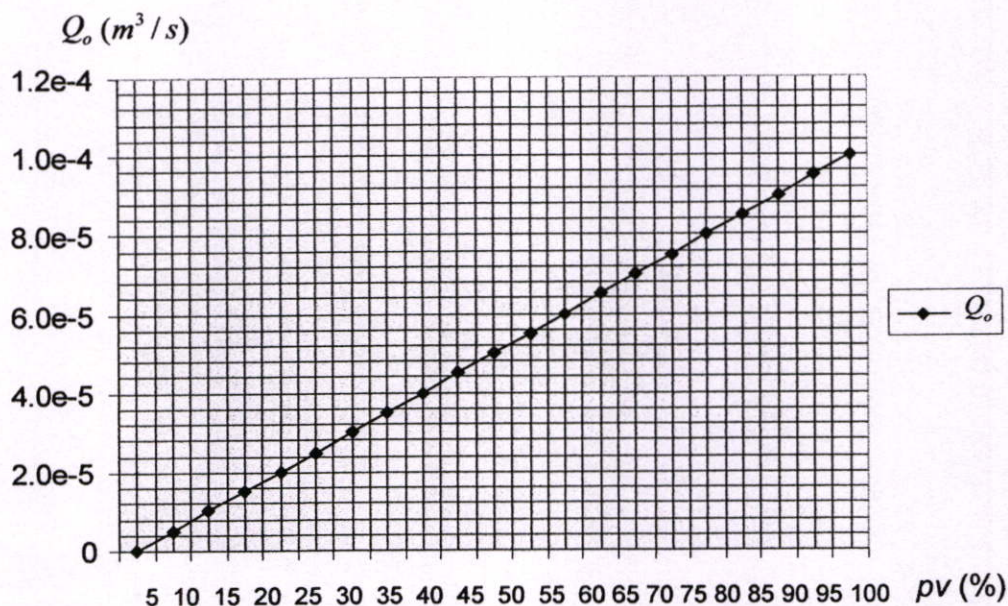
$\Delta p$  คือ แรงดันแตกต่างที่ตกคร่อมวาล์ว (psi)

ซึ่งในตารางที่ 3.5 ข้อมูลของกระบวนการควบคุมระดับของของเหลวที่ใช้ทดลองในงานวิจัย

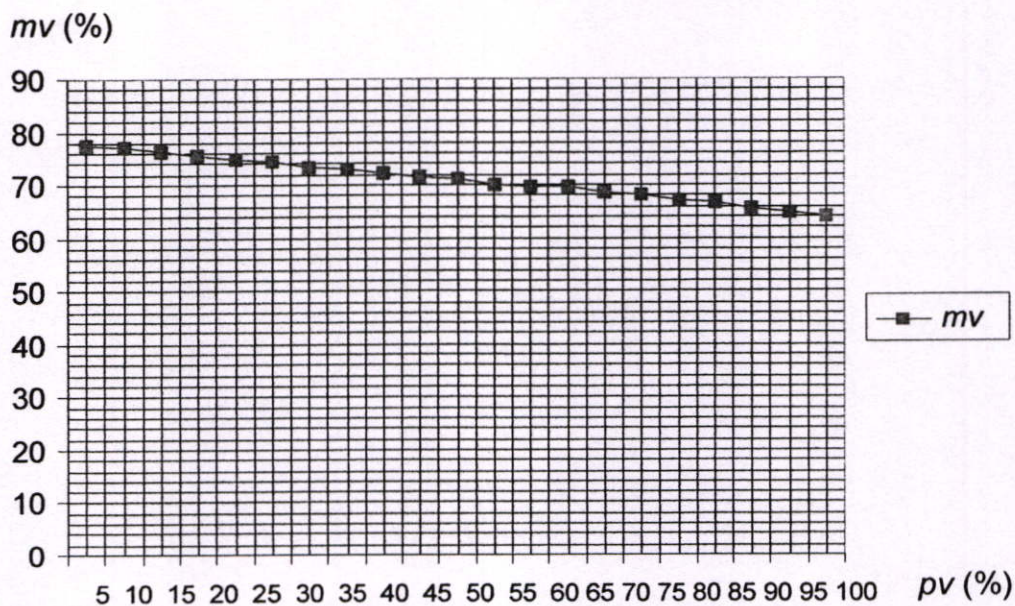
ตารางที่ 3.5 ข้อมูลของกระบวนการควบคุมระดับของของเหลวที่ใช้ในการทดลอง

ค่าเป้าหมาย	ค่าในกระบวนการ	ความสูง	เปอร์เซ็นต์เอ้าท์พุท	แรงดันเอ้าท์พุทจากการวัด	กระแสเอ้าท์พุทจากการวัด	ความเร็วในการไหลจากการคำนวณ	อัตราการไหลจากการคำนวณ
$sp$ (%)	$pv$ (Meas.) (1~5 Vdc.)	$h_o$ (m.)	$mv$ (%)	$Mv$ (Meas.) (1~5 Vdc.)	$mv$ (Meas.) (4~20 mA.)	$V_o$ (Cal.) (m/s)	$Q_o$ (Cal.) (m <sup>3</sup> /s)
0	1.00	0	77.7	4.09	16.36	0	0
5	1.19	0.012	77.1	4.07	16.25	0.48522	$0.3086 \times 10^{-4}$
10	1.40	0.025	76.6	4.04	16.16	0.70036	$0.4455 \times 10^{-4}$
15	1.59	0.038	75.8	4.01	15.99	0.86346	$0.5493 \times 10^{-4}$
20	1.79	0.051	75.1	3.98	15.86	1.00031	$0.6363 \times 10^{-4}$
25	1.99	0.063	74.4	3.94	15.75	1.11178	$0.7072 \times 10^{-4}$
30	2.20	0.076	73.3	3.90	15.72	1.22111	$0.7768 \times 10^{-4}$
35	2.38	0.089	73.2	3.88	15.50	1.32143	$0.8406 \times 10^{-4}$
40	2.59	0.102	72.4	3.87	15.42	1.41465	$0.8999 \times 10^{-4}$
45	2.80	0.114	71.5	3.84	15.35	1.49555	$0.9514 \times 10^{-4}$
50	3.00	0.127	71.0	3.82	15.26	1.57852	$1.0042 \times 10^{-4}$
55	3.18	0.140	70.2	3.79	15.10	1.65735	$1.0543 \times 10^{-4}$
60	3.41	0.153	69.7	3.77	15.05	1.73259	$1.1022 \times 10^{-4}$
65	3.60	0.165	69.5	3.75	15.00	1.79925	$1.1146 \times 10^{-4}$
70	3.79	0.178	68.6	3.70	14.86	1.86879	$1.1888 \times 10^{-4}$
75	3.99	0.191	68.0	3.65	14.60	1.93583	$1.2315 \times 10^{-4}$
80	4.19	0.204	67.0	3.64	14.56	2.00062	$1.2727 \times 10^{-4}$
85	4.38	0.216	66.5	3.62	14.45	2.05862	$1.3096 \times 10^{-4}$
90	4.58	0.229	65.6	3.59	14.31	2.11967	$1.3487 \times 10^{-4}$
95	4.78	0.242	64.8	3.56	14.22	2.17900	$1.3862 \times 10^{-4}$
100	4.98	0.255	64.1	3.53	14.10	2.23676	$1.4229 \times 10^{-4}$

จากข้อมูลในตารางที่ 3.5 นำมาเขียนเป็นแผนภูมิเส้นแสดงระดับอัตราการไหลออก  $Q_o$  ในแต่ละระดับของค่าเป้าหมาย ดังแสดงในรูปที่ 3.7 และแผนภูมิเส้นแสดงระดับสัญญาณควบคุม  $mv$  ในแต่ละระดับของของเหลวเป้าหมาย ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ตามลำดับ



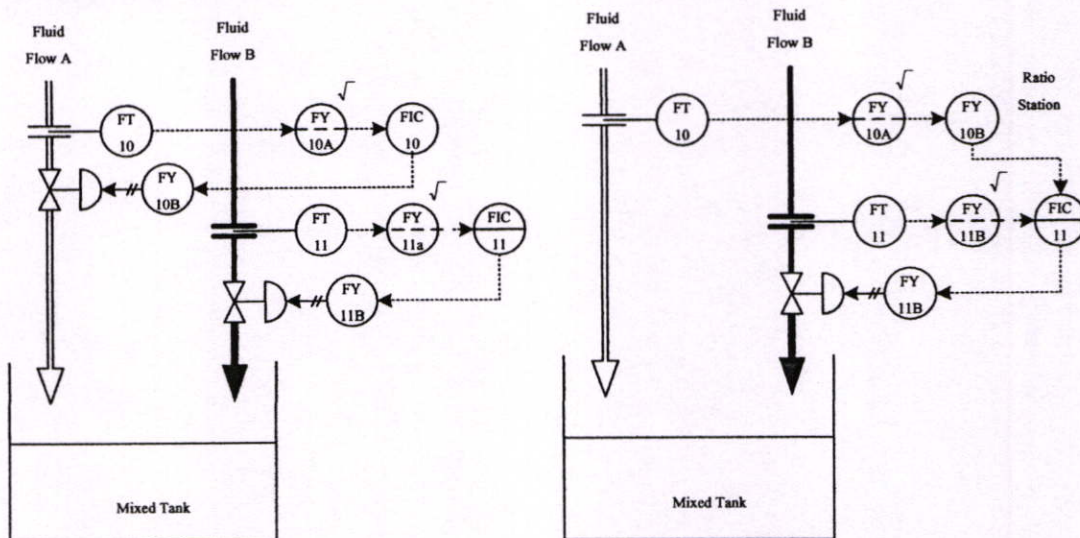
รูปที่ 3.11 แผนภูมิเส้นแสดงระดับอัตราการไหลออก  $Q_o$  ในแต่ละระดับของค่าเป้าหมาย



รูปที่ 3.12 แผนภูมิเส้นแสดงระดับสัญญาณควบคุม  $mv$  ในแต่ละระดับค่าเป้าหมายจากค่าในตารางที่ 3.3

### 3.3.3.2 การควบคุมอัตราการไหล

การควบคุมอัตราการไหลเป็นกระบวนการหนึ่งที่มีความสำคัญที่มักพบในโรงงานอุตสาหกรรม ปัจจุบันนี้ระบบควบคุมที่นิยมใช้มี 2 ชนิด คือ ระบบควบคุมแบบขนาน (series type) และแบบขนาน (parallel type) [5] ดังแสดงในรูปที่ 3.8(a) และ 3.8(b) ซึ่งระบบควบคุมทั้งสองแบบนี้ นิยมใช้ตัวควบคุมแบบ พีไอดี (โหมด (mode)ควบคุมแบบ PI) ในระบบควบคุมแบบขนานจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าเนื่องจากการไหลของของไหลเป็นไปอย่างอิสระแต่ต้องมี Ventury มาก ทำให้ระบบควบคุมแบบอนุกรมนิยมใช้มากกว่าแบบขนาน ในการทดลองนี้ใช้ระบบการควบคุมแบบอนุกรมในการทดลอง



(ก) แบบขนาน

(ข) แบบอนุกรม

รูปที่ 3.13 ชนิดของระบบการควบคุมอัตราการไหลที่นิยมใช้งาน

จากรูปที่ 3.13 (ข) เป็นการควบคุมแบบอนุกรม ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้นำมาทดลองโดยจะใช้การคำนวณจากสมการที่ 3.34 ทางด้านล่าง จากทฤษฎี สามารถเขียนได้เป็น

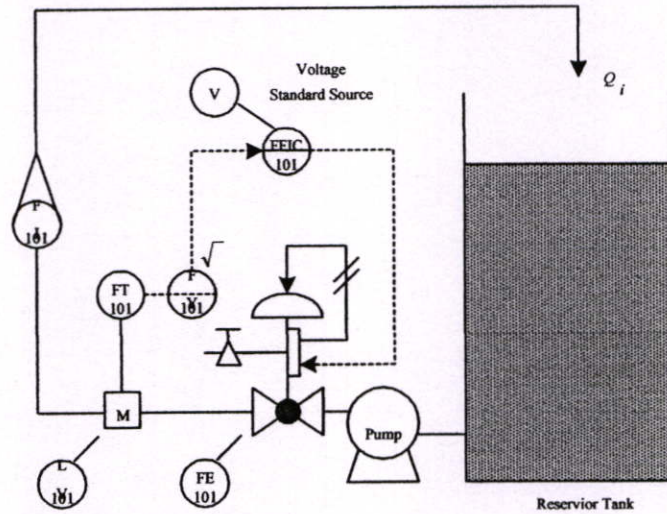
$$Q = v \times A \quad (3.36)$$

เมื่อ  $Q$  คือ อัตราการไหล มีหน่วยเป็น ( $m^3/s$ )

$v$  คือ ความเร็วในการไหล มีหน่วยเป็น ( $m/s$ )

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อน้ำ มีหน่วยเป็น ( $m^2$ )

โดยกระบวนการควบคุมอัตราการไหลในวิทยานิพนธ์นี้จะแสดงให้เห็นโครงสร้างของระบบในรูปที่ 3.14 และแสดงค่าที่ได้จากการทดลองกับกระบวนการการควบคุมอัตราการไหลในตารางที่ 3.4



รูปที่ 3.14 โครงสร้างการควบคุมอัตราการไหล

จากรูปที่ 3.14 สามารถหาค่าข้อมูลของกระบวนการที่ใช้ในการควบคุมอัตราการไหลดังที่แสดงให้เห็นในตารางที่ 3.4

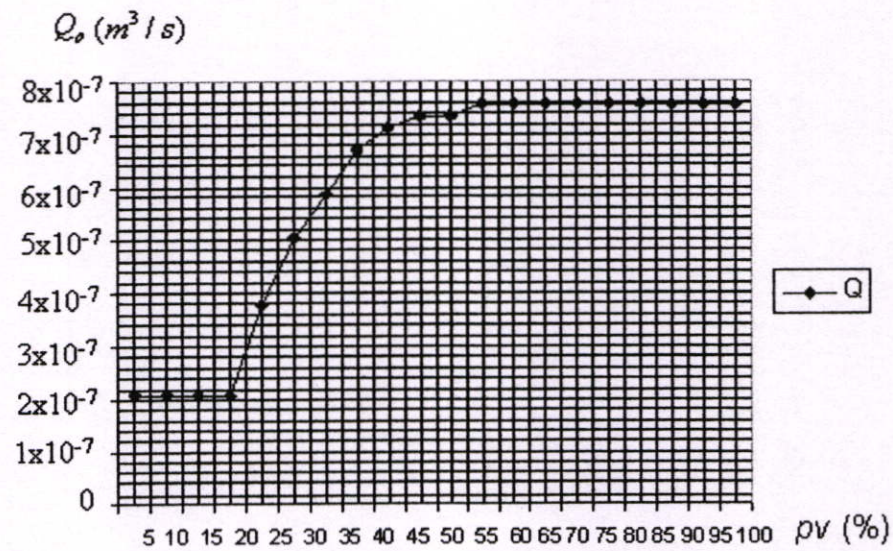
ตารางที่ 3.6 ข้อมูลของกระบวนการการควบคุมอัตราการไหลที่ใช้ในการทดลอง

$mv$	ตำแหน่งการเปิดวาล์ว Position valve	การไหล Flow Rate	อัตราการไหล จากการคำนวณ $Q_{o(cal)}$ ( $m^3/s$ )
(%)	(%)	(%)	
5	5	25	2.08602E-07
10	10	25	2.08602E-07
15	15	25	2.08602E-07
20	20	25	2.08602E-07
25	25	45	3.76991E-07
30	30	60	5.02655E-07
35	35	70	5.85593E-07
40	40	80	6.69788E-07
45	45	85	7.11257E-07
50	50	87.5	7.32619E-07

ตารางที่ 3.6 (ต่อ)

$mv$ (%)	ตำแหน่งการเปิดวาล์ว Position valve (%)	การไหล Flow Rate (%)	อัตราการไหล จากการคำนวณ $Q_{o(cal)}$ ( $m^3/s$ )
55	55	88.75	7.32619E-07
60	60	90	7.53982E-07
65	65	90	7.53982E-07
70	70	90	7.53982E-07
75	75	90	7.53982E-07
80	80	90	7.53982E-07
85	85	90	7.53982E-07
90	90	90	7.53982E-07
95	95	90	7.53982E-07
100	100	90	7.53982E-07

จากข้อมูลในตารางที่ 3.6 นำมาเขียนเป็นแผนภูมิเส้นแสดงระดับอัตราการไหลออก  $Q_o$  ในแต่ละระดับของค่าเป้าหมาย ดังแสดงในรูปที่ 3.15



$Q$  คือ ค่าอัตราการไหล

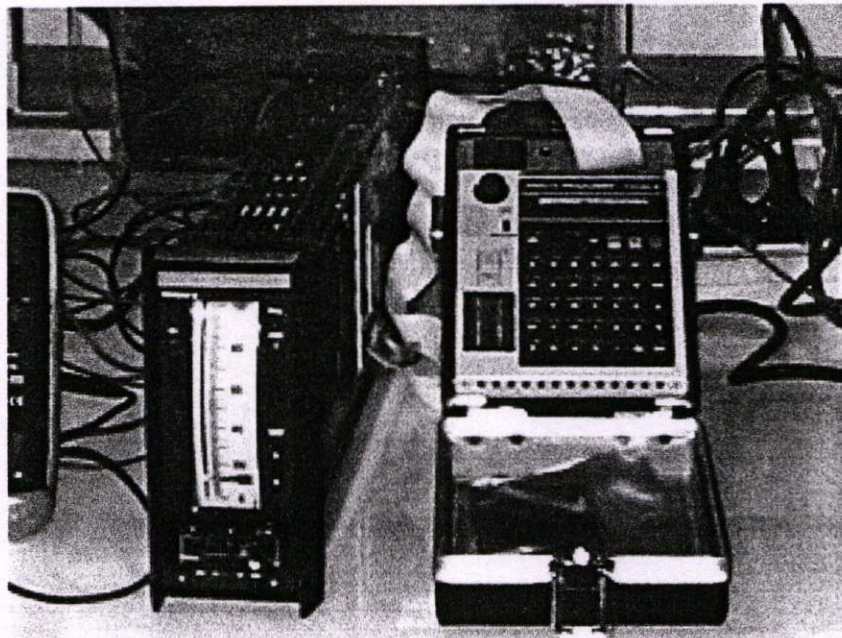
รูปที่ 3.15 แสดงแผนภูมิเส้นแสดงระดับอัตราการไหลออก  $Q_o$  ในแต่ละระดับของค่าเป้าหมาย

## บทที่ 4

# การควบคุมและการประยุกต์ใช้งาน

### 4.1 กล่าวนำ

เทคนิคการเปิดตาราง (Look-up table) เป็นเทคนิคการควบคุมที่พัฒนาจากการควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า (Feed forward control) โดยการคำนวณค่าของตัวแปรการจัดการ (Manipulate variable) เพื่อรักษาค่าตัวแปรการควบคุม (Controlled variable) ตามค่าเป้าหมาย (Set point) โดยใช้กฎสมดุลพลังงาน (Energy balance law) ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์กับระบบควบคุมได้หลากหลาย เช่น การควบคุมอุณหภูมิ การควบคุมระดับ, การควบคุมอัตราการไหล เป็นต้น ในการออกแบบเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับตัวควบคุมแบบ พีไอดี ตัวควบคุมที่ใช้ในการออกแบบและทดลองในวิทยานิพนธ์นี้ คือตัวควบคุมที่สามารถแสดงค่าและโปรแกรมได้ หรือที่เรียกว่า เอสแอลพีซี (Single Loop Programmable Controller ; SLPC) [8] ของบริษัท โยโกกาวา อิเล็กทริก (YOKOGAWA ELECTRIC) ดังแสดงในรูปที่ 4.1

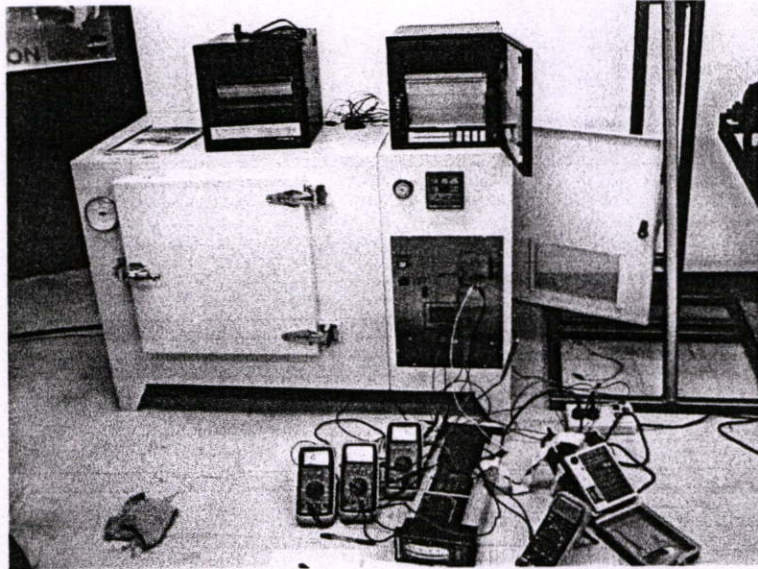


รูปที่ 4.1 ตัวควบคุมที่สามารถแสดงค่าและโปรแกรมได้ (SLPC) ที่ใช้ในการทดลอง

## 4.2 หลักการคำนวณสำหรับการประยุกต์ใช้งานกับกระบวนการต่าง ๆ

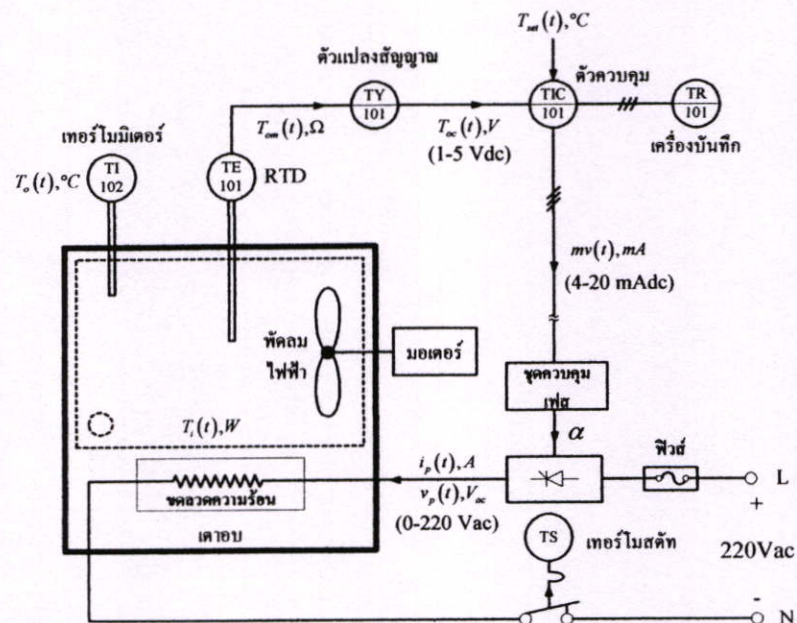
### 4.2.1 การประยุกต์ใช้หลักการที่นำเสนอสำหรับการควบคุมอุณหภูมิ

เมื่อพิจารณาชุดทดลองควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการออกแบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ชุดทดลองกระบวนการควบคุมอุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.2 สามารถเขียนหลักการควบคุมอุณหภูมิแบบป้อนกลับ ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การควบคุมอุณหภูมิแบบป้อนกลับ

หลักการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) ในชุดควบคุมอุณหภูมิที่ทดลอง ควบคุมได้โดยการนำอุณหภูมิที่ได้หรือตัวแปรที่ถูกควบคุม  $T_{om}(t)$  ที่วัดจากตัวตรวจจับ (RTD, TE101) และตัวแปลงสัญญาณ (Converter, TY101) ซึ่งผลิตสัญญาณ  $T_{oc}(t)$  ที่มีสัดส่วนเหมาะสมกับเตาอบ สัญญาณ  $T_{oc}(t)$  ส่งไปยังตัวควบคุม (Controller, TIC101) โดยใช้ตัวควบคุมที่สามารถโปรแกรมได้ (SLPC) ซึ่งตัวควบคุมจะผลิตสัญญาณ (Output Signal) หรือสัญญาณควบคุม (Manipulate Variable)  $mv(t)$  โดยใช้ค่าความผิดพลาด (error) หรือความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่วัดได้กับอุณหภูมิที่ต้องการ ซึ่งสัญญาณควบคุมนั้นเชื่อมต่อกับชุดควบคุมเฟส (Phase Control) โดยชุดควบคุมเฟสมีหน้าที่ปรับแรงดันไฟฟ้า  $v_p(t)$  ในสัดส่วนที่เหมาะสมตามสัญญาณควบคุม  $mv(t)$  จากตัวควบคุม ซึ่งแรงดันไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 220 V โดยชุดลดความร้อนจะทำการผลิตความร้อน  $T_r(t)$  ตามแรงดันไฟฟ้าที่ได้รับ

#### 4.2.2 การทดลองเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับตัวควบคุมแบบ พีไอดี กับโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์กับกระบวนการควบคุมอุณหภูมิ

การพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีต่าง ๆ เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นระบบควบคุมจึงปรากฏขึ้นในหลาย ๆ รูปแบบตั้งแต่ระบบง่ายไปจนถึงระบบที่มีความซับซ้อน คอมพิวเตอร์เข้ามามีบทบาทในระบบควบคุมโดยจะสร้างรูปแบบการวิเคราะห์และออกแบบระบบเพื่อเพิ่มขีดความสามารถของระบบควบคุมโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเป็นสำคัญ โปรแกรม MATHLAB มีฟังก์ชันที่ใช้สำหรับการออกแบบ วิเคราะห์และจำลองระบบควบคุมต่าง ๆ เพื่อให้ระบบทำงานอย่างที่ต้องการ

โปรแกรม MATHLAB สามารถจำลอง ทดสอบ และวิเคราะห์การทำงานของระบบพลศาสตร์ในเชิงเวลาได้โดยใช้ Simulink ซึ่งเป็นเครื่องมือ (Toolbox) ที่อยู่ในโปรแกรม MATHLAB โดยจะทำงานภายในหน้าต่างที่เป็นการเชื่อมต่อทางรูปภาพ (GUI) ของ Simulink การทำงานของ Simulink จะกระทำโดยนำเอาบล็อกไดอะแกรม (Block Diagram) แต่ละบล็อกในหน้าต่าง Library ของ Simulink มาเรียงต่อกันตามกระบวนการที่เราต้องการ และสามารถจำลองระบบได้ทั้งที่เป็นระบบเชิงเส้น ไม่เป็นเชิงเส้น ระบบเวลาที่ต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง การจำลองสามารถกระทำได้โดยการป้อนอินพุตให้กับระบบที่สร้างไว้แล้วผลลัพธ์ของระบบเนื่องจากอินพุตที่ป้อนเข้าไป โดยโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทดลองนั้นเป็นเวอร์ชัน 5.1

การใช้โปรแกรมการจำลองทางคณิตศาสตร์จำเป็นต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์โดยใช้ค่าอัตราการขยายของกระบวนการ ( $K$ ) ค่าเวลาคงที่ของกระบวนการ ( $\tau$ ) และค่าหน่วงเวลาของการดำเนินการ ( $t_0$ ) ในการทดลองนี้ผู้วิจัยได้เลือกค่าเป้าหมาย ( $SP$ ) ทั้งหมด 3 ค่าคือที่  $120^\circ\text{C}$ ,  $150^\circ\text{C}$  และที่  $170^\circ\text{C}$  จากการทดลองทดสอบหาค่ากระบวนการแบบรูปเปิด โดยใช้สัญญาณแบบขั้นบันได

(Step) จากค่าที่ได้ในตารางที่ 3.3 (บทที่ 3) และจากการอ่านค่าที่ได้จากกระดาษบันทึกสามารถหาค่าพารามิเตอร์เพื่อนำมาเข้าโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

ที่อุณหภูมิเป้าหมาย การทดลองทำการทดสอบกระบวนการด้วยสัญญาณ Step 63.08 % ตามวิธี Process Reaction Curve ที่อุณหภูมิเป้าหมาย 120 °C เครื่องบันทึกสัญญาณบันทึกผลตอบสนองแบบรูปเปิดของกระบวนการสามารถวัดค่าคงที่ของกระบวนการได้ 30 มิลลิเมตร ค่าหน่วยเวลา 2 มิลลิเมตร และกระบวนการเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ระดับ 57.0 % และในการทดลองปรับความเร็วการบันทึกของเครื่องบันทึกสัญญาณไว้ที่ 100 mm/h นั่นคือ 1 mm./36 sec. ดังนั้น

$$K_c = 57.0 \% / 63.08 \% = 14.95$$

$$\tau = 30 * 36 = 1080 \text{ sec.}$$

$$t_0 = 2 * 36 = 72 \text{ sec.}$$

จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของกระบวนการที่ได้ ไปคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี ตามสูตรของ Ziegler-Nichols สำหรับตัวควบคุมแบบพีไอ และการควบคุมแบบ พีไอดี ได้ดังนี้

การควบคุมแบบ PI

$$K_c = 14.95$$

$$T_i = 239.76 \text{ sec.}$$

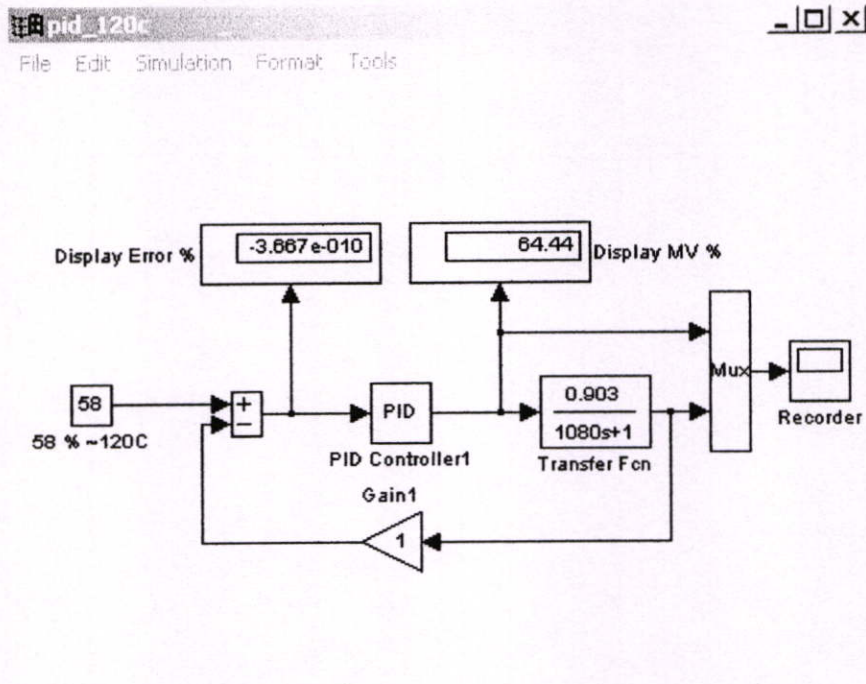
การควบคุมแบบ พีไอดี

$$K_c = 19.93$$

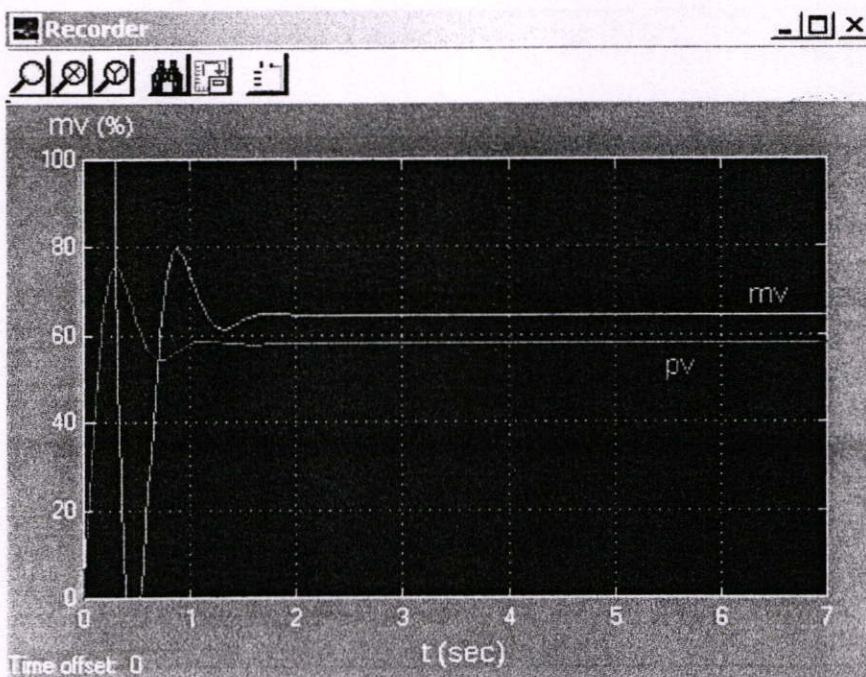
$$T_i = 144 \text{ sec}$$

$$T_d = 36 \text{ sec.}$$

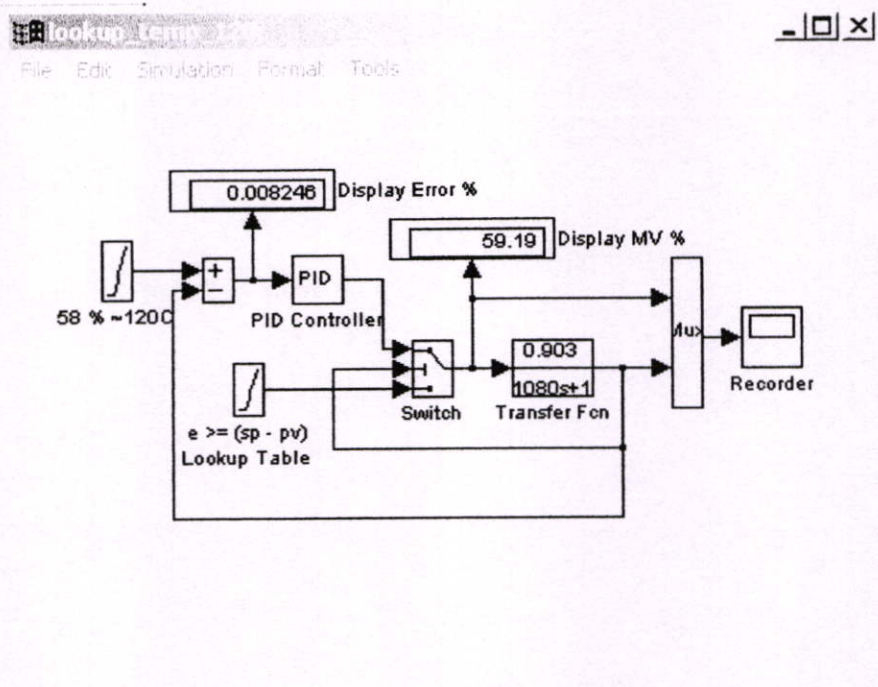
ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุม ด้วยโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์กับการควบคุมกระบวนการทางความร้อนจะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.4 – 4.7 โดยได้แสดงผลตอบสนองที่ค่าเป้าหมายอุณหภูมิ 120 °C เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นระหว่างตัวควบคุม พีไอดี เพียงอย่างเดียวกับเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับตัวควบคุมแบบพีไอดี



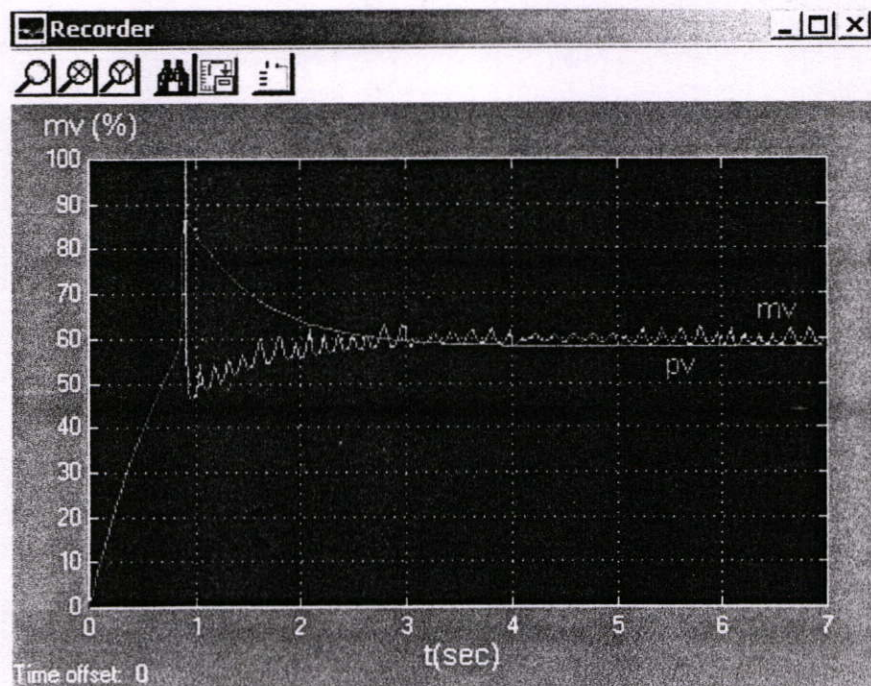
รูปที่ 4.4 โปรแกรม Simulink ในรูปบล็อกไดอะแกรมในการทดลองที่อุณหภูมิ 120 °C ด้วยการควบคุมแบบ PI ที่  $K_c = 19.93$ ,  $T_i = 144$  sec,  $T_d = 36$  sec ความเร็วในการบันทึก 100 mm/h



รูปที่ 4.5 ผลการทดลองกับโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ Simulink ที่อุณหภูมิ 120 °C ด้วยการควบคุมแบบ พีไอดี ที่  $K_c = 19.93$ ,  $T_i = 144$  sec,  $T_d = 36$  sec ความเร็วในการบันทึก 100 mm/h



รูปที่ 4.6 โปรแกรม Simulink ในรูปบล็อกไดอะแกรมในการทดลองที่อุณหภูมิ 120 °C ด้วยเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับการควบคุมแบบ พีไอดี ที่  $K_c = 19.93$ ,  $T_i = 144$  sec,  $T_d = 36$  sec ความเร็วในการบันทึก 100 mm/h



รูปที่ 4.7 ผลการทดลองกับโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ Simulink ที่อุณหภูมิ 120°C ด้วยการควบคุมแบบเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับตัวควบคุมแบบ พีไอดี ที่  $K_c = 19.93$ ,  $T_i = 144$  sec,  $T_d = 36$  sec ความเร็วในการบันทึก 100 mm/h

ที่อุณหภูมิเป้าหมาย การทดลองทำการทดสอบกระบวนการด้วยสัญญาณ Step 74.13 % ตามวิธี Process Reaction Curve ที่อุณหภูมิเป้าหมาย 150 °C เครื่องบันทึกสัญญาณบันทึกผลตอบสนองแบบรูปเปิดของกระบวนการสามารถวัดค่าคงที่ของกระบวนการได้ 26 มิลลิเมตร ค่าหน่วยเวลา 1 มิลลิเมตร และกระบวนการเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ระดับ 76.5 % และในการทดลองปรับความเร็วการบันทึกของเครื่องบันทึกสัญญาณไว้ที่ 100 mm/h นั่นคือ 1 mm./36 sec. ดังนั้น

$$K_c = 76.5 \% / 74.13 \% = 1.03$$

$$\tau = 26 * 36 = 936 \text{ sec.}$$

$$t_0 = 1 * 36 = 36 \text{ sec.}$$

จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของกระบวนการที่ได้ ไปคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม พีไอดี ตามสูตรของ Ziegler-Nichols สำหรับตัวควบคุมแบบ PI และการควบคุมแบบ พีไอดี ได้ดังนี้

การควบคุมแบบ PI

$$K_c = 22.71$$

$$T_i = 119.88 \text{ sec.}$$

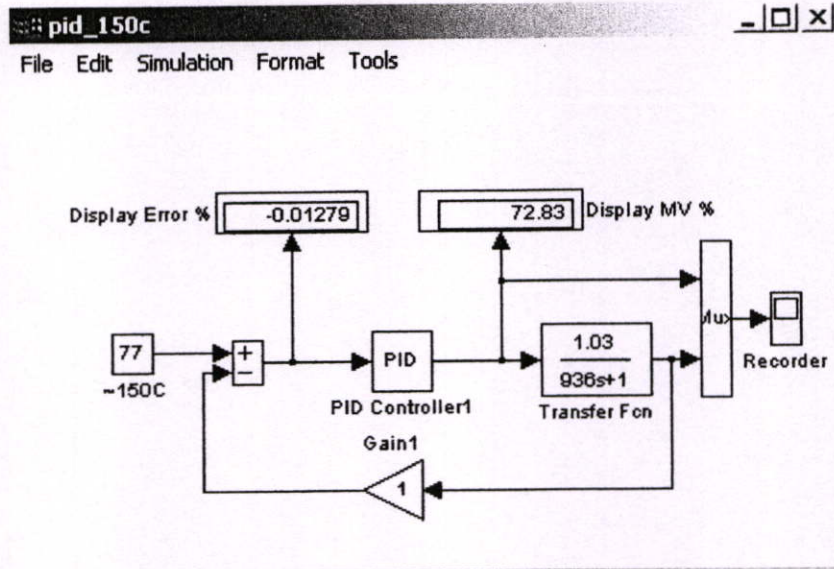
การควบคุมแบบ พีไอดี

$$K_c = 30.29$$

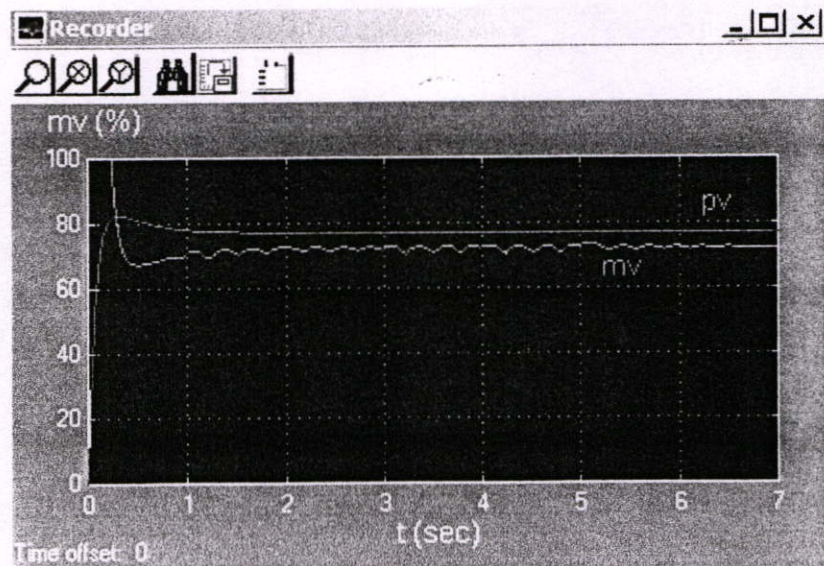
$$T_i = 72 \text{ sec.}$$

$$T_d = 18 \text{ sec.}$$

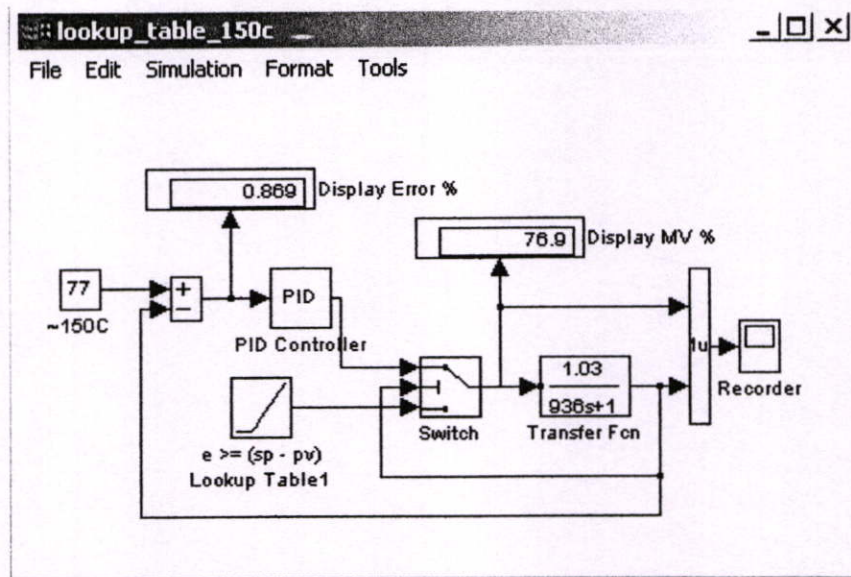
ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมด้วยโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์กับการควบคุมกระบวนการทางความร้อนจะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.8 – 4.11 โดยได้แสดงผลตอบสนองที่ค่าเป้าหมายอุณหภูมิ 150 °C เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นระหว่างตัวควบคุม พีไอดี เพียงอย่างเดียวกับเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับตัวควบคุมแบบ พีไอดี



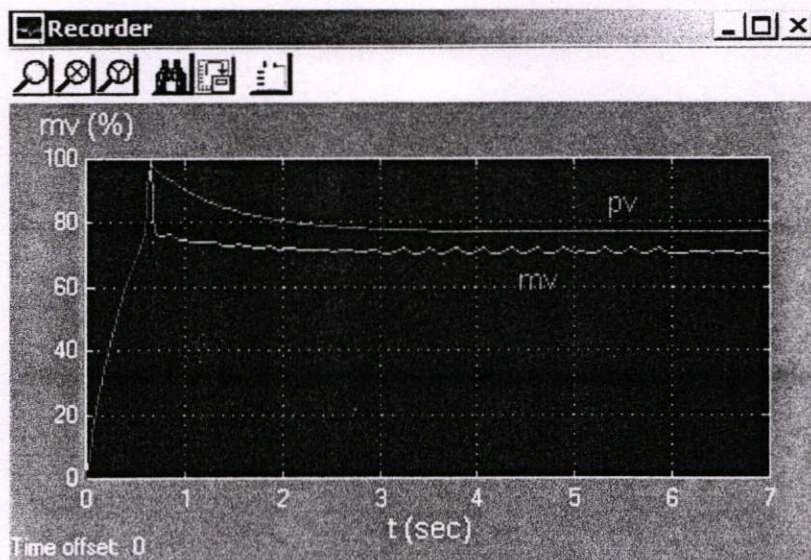
รูปที่ 4.8 โปรแกรม Simulink ในรูปแบบบล็อกไดอะแกรมในการทดลองที่อุณหภูมิ 150 °C ด้วยการควบคุมแบบ พีไอดี ที่  $K_c = 30.09$ ,  $T_i = 72 \text{ sec}$ ,  $T_d = 18 \text{ sec}$  ความเร็วในการบันทึก 100 mm/h



รูปที่ 4.9 ผลการทดลองกับโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ Simulink ที่อุณหภูมิ 150°C ด้วยการควบคุมแบบ พีไอดี ที่  $K_c = 30.09$ ,  $T_i = 72 \text{ sec}$ ,  $T_d = 18 \text{ sec}$  ความเร็วในการบันทึก 100 mm/h



รูปที่ 4.10 โปรแกรม Simulink ในรูปบล็อกไดอะแกรมในการทดลองที่อุณหภูมิ  $150^{\circ}\text{C}$  ด้วยเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับการควบคุมแบบ พีไอดีที่  $K_c = 30.09$ ,  $T_i = 72 \text{ sec}$ ,  $T_d = 18 \text{ sec}$  ความเร็วในการบันทึก 100 mm/h



รูปที่ 4.11 ผลการทดลองกับโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ Simulink ที่อุณหภูมิ  $150^{\circ}\text{C}$  ด้วยการควบคุมแบบเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับตัวควบคุมแบบ พีไอดีที่  $K_c = 30.09$ ,  $T_i = 72 \text{ sec}$ ,  $T_d = 18 \text{ sec}$  ความเร็วในการบันทึก 100 mm/h

ที่อุณหภูมิเป้าหมาย การทดลองทำการทดสอบกระบวนการด้วยสัญญาณ Step 82.70 % ตามวิธี Process Reaction Curve ที่อุณหภูมิเป้าหมาย 170 °C เครื่องบันทึกสัญญาณบันทึกผลตอบสนองแบบรูปเปิดของกระบวนการสามารถวัดค่าคงที่ของกระบวนการได้ 17 มิลลิเมตร ค่าหน่วยเวลา 1 มิลลิเมตร และกระบวนการเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ระดับ 89 % และในการทดลองปรับความเร็วการบันทึกของเครื่องบันทึกสัญญาณไว้ที่ 100 mm/h นั่นคือ 1 mm./36 sec. ดังนั้น

$$K_c = 89 \% / 82.70 \% = 1.07$$

$$\tau = 17 * 36 = 612 \text{ sec.}$$

$$t_0 = 1 * 36 = 36 \text{ sec.}$$

จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของกระบวนการที่ได้ ไปคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี ตามสูตรของ Ziegler-Nichols สำหรับตัวควบคุมแบบ PI และการควบคุมแบบ พีไอดี ได้ดังนี้

การควบคุมแบบ PI

$$K_c = 14.29$$

$$T_i = 119.88 \text{ sec.}$$

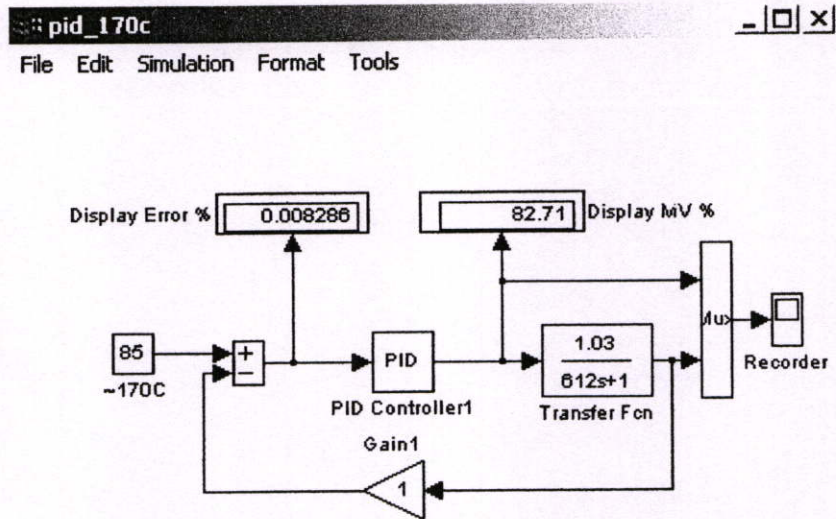
การควบคุมแบบ พีไอดี

$$K_c = 19.06$$

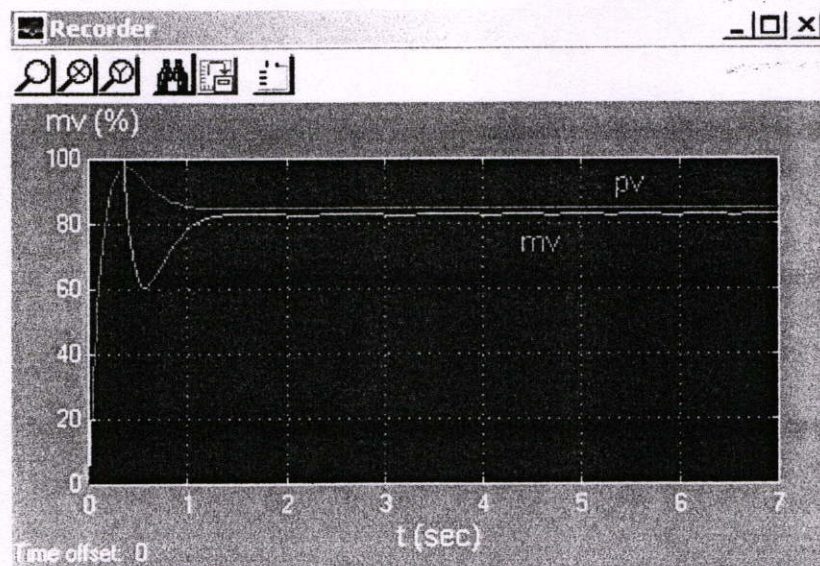
$$T_i = 72 \text{ sec}$$

$$T_d = 18 \text{ sec.}$$

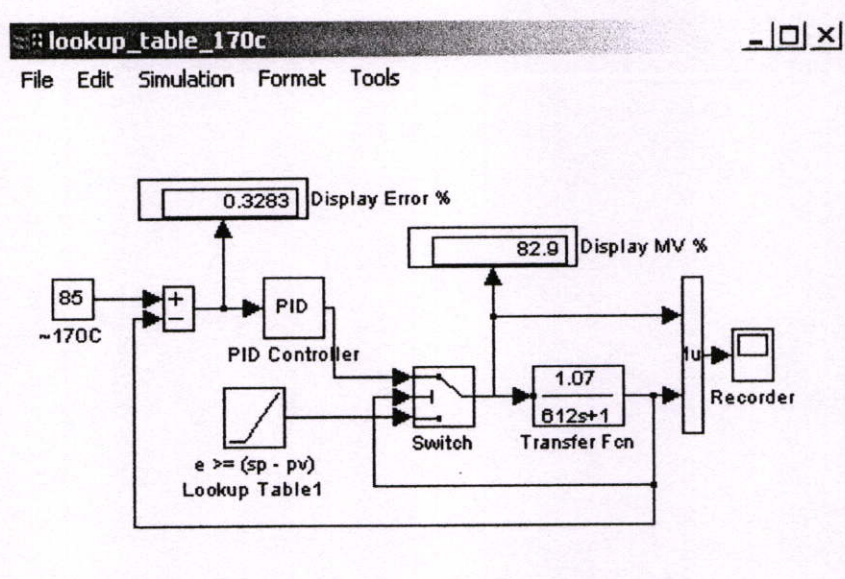
ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมด้วยโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์กับการควบคุมกระบวนการทางความร้อนจะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.12 – 4.15 โดยได้แสดงผลตอบสนองที่ค่าเป้าหมายอุณหภูมิ 170 °C เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นระหว่างตัวควบคุม พีไอดี เพียงอย่างเดียวกับเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับตัวควบคุมแบบ พีไอดี



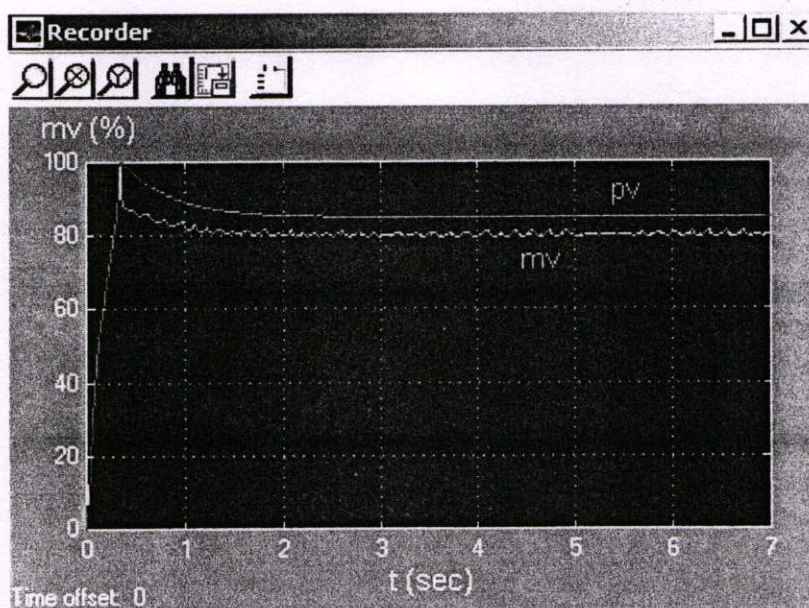
รูปที่ 4.12 โปรแกรม Simulink ในรูปแบบบล็อกโคแธแกรมในการทดลองที่อุณหภูมิ 170 °C ด้วยการควบคุมแบบ พีไอดี ที่  $K_c = 19.06$ ,  $T_i = 72$  sec,  $T_d = 18$  sec ความเร็วในการบันทึก 100 mm/h



รูปที่ 4.13 ผลการทดลองกับโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ Simulink ที่อุณหภูมิ 170 °C ด้วยการควบคุมแบบ พีไอดี ที่  $K_c = 19.06$ ,  $T_i = 72$  sec,  $T_d = 18$  sec ความเร็วในการบันทึก 100 mm/h



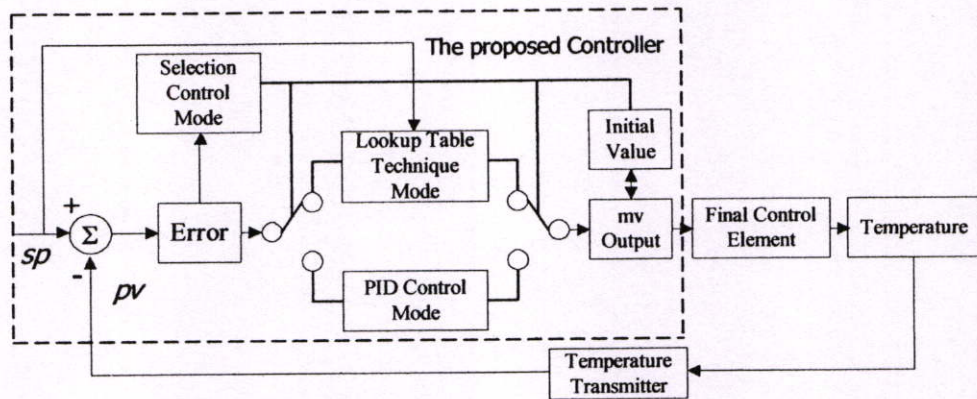
รูปที่ 4.14 โปรแกรม Simulink ในรูปบล็อกไดอะแกรมในการทดลองที่อุณหภูมิ 170 °C ด้วยเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับการควบคุมแบบ พีไอดี ที่  $K_c = 19.06$ ,  $T_i = 72$  sec,  $T_d = 18$  sec ความเร็วในการบันทึก 100 mm/h



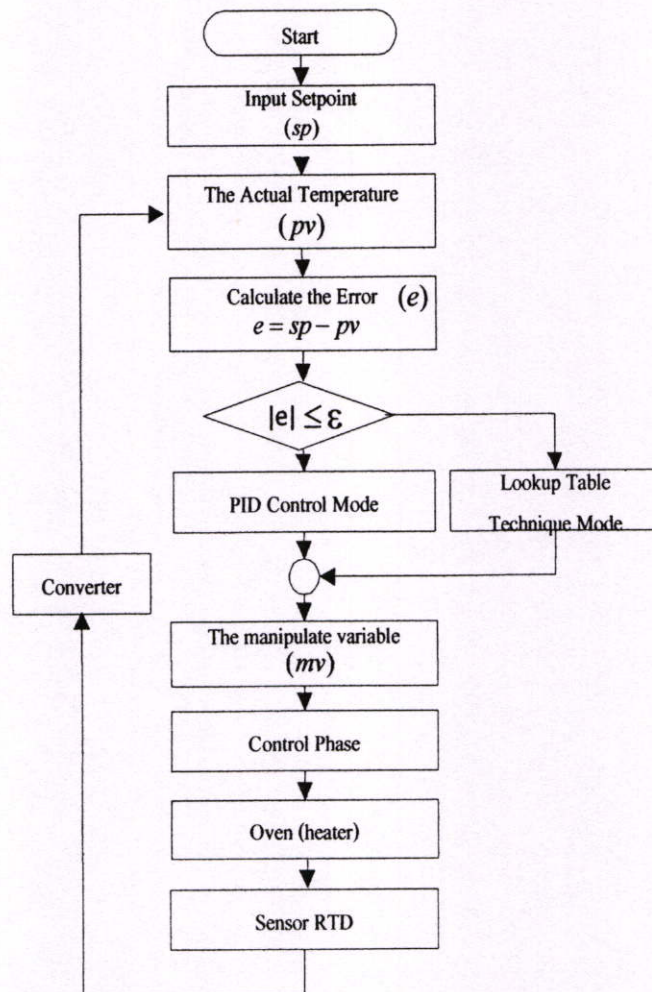
รูปที่ 4.15 ผลการทดลองกับโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ Simulink ที่อุณหภูมิ 170 °C ด้วยการควบคุมแบบเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับตัวควบคุมแบบ พีไอดี ที่  $K_c = 19.06$ ,  $T_i = 72$  sec,  $T_d = 18$  sec ความเร็วในการบันทึก 100 mm/h

### การทำงานของโปรแกรม

บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมอุณหภูมิ โดยใช้เทคนิค Lookup Table Technique ร่วมกับตัวควบคุมแบบ พีไอดี แสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของกระบวนการทางความร้อน



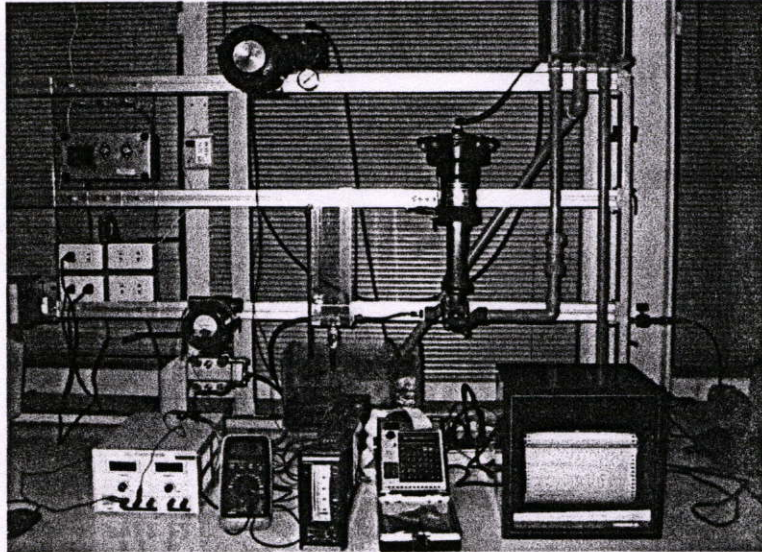
รูปที่ 4.17 ขั้นตอนการทำงานของตัวควบคุม SLPC ที่ใช้กับการควบคุมกระบวนการทางความร้อน

การควบคุมอุณหภูมิในตู้อบนี้ใช้ SLPC Controller โดยการเขียนโปรแกรม ในขั้นตอนแรก ระบบจะทำการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิอ้างอิงกับอุณหภูมิจริง (Process Variable) ในตู้อบจาก เทอร์โมคัปเปิล ถ้าค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิ ( $e$ ) ในขณะนั้นมีค่ามากกว่าค่าคลาดเคลื่อนอ้างอิง ( $\epsilon$ ) ระบบจะทำงานในส่วนของ Lookup Table Technique ในทางตรงข้าม ระบบจะทำงานภายใต้การควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ พีไอดี เท่านั้น

การทำงานของระบบ เมื่อ  $(sp - pv) > \epsilon$  โปรแกรมจะสั่งให้ปล่อยแรงดันไฟฟ้า 100% ให้ขดลวดเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้เข้าใกล้อุณหภูมิอ้างอิง ในทางตรงข้าม ถ้า  $(pv - sp) > \epsilon$  ตัวควบคุมจะสั่งให้ลดแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดความร้อน เพื่อลดอุณหภูมิให้เข้าสู่อุณหภูมิอ้างอิง และเมื่ออุณหภูมิจริงเข้าใกล้อุณหภูมิอ้างอิงแล้วโปรแกรมจะทำการคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่จ่ายให้ขดลวด เพื่อรักษาระดับอุณหภูมิปัจจุบันในตู้อบ และเมื่ออุณหภูมิปัจจุบันใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ตั้งไว้ (Set point) ระบบจะเปรียบเทียบการทำงานไปใช้การควบคุมแบบ พีไอดี เพียงอย่างเดียว สำหรับขั้นตอนการทำงานของระบบควบคุมอุณหภูมิ แสดงในรูปที่ 4.17

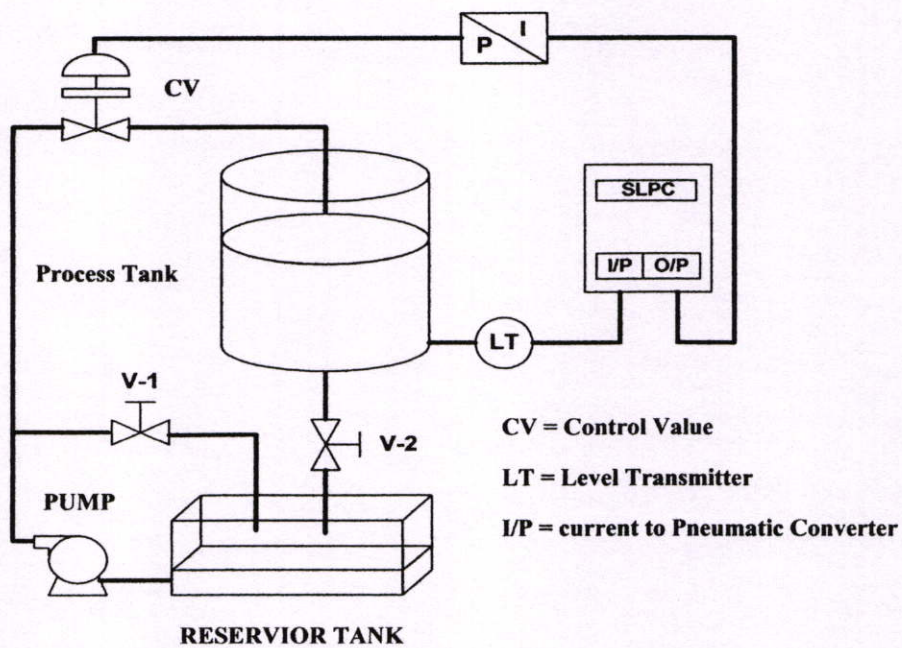
### 4.2.3 การประยุกต์ใช้หลักการที่นำเสนอสำหรับการควบคุมระดับ

เมื่อพิจารณาชุดทดลองการควบคุมระดับที่ใช้ในการออกแบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ชุดทดลองกระบวนการควบคุมระดับของของเหลว

จากรูปที่ 4.18 สามารถเขียนหลักการควบคุมระดับแบบป้อนกลับ ดังแสดงในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 โครงสร้างการทดลองกับกระบวนการควบคุมระดับ

การทำงานของการทดลอง ป้อนน้ำจะทำหน้าที่สูบน้ำจากถังเก็บน้ำ (Reservoir Tank) ขึ้นไปตามท่อตลอดระยะเวลาการทดลอง ซึ่งน้ำที่สูบจะถูกส่งไปยังถังกระบวนการ (Process Tank) ผ่านวาล์วควบคุม โดยมีวาล์วหมายเลข 1(V-1) ทำหน้าที่เป็นวาล์วบายพาส เพื่อให้ น้ำไหลย้อนกลับมาถึงถังเก็บน้ำเมื่อวาล์วควบคุมปิด และน้ำที่อยู่ในถังกระบวนการจะไหลผ่านวาล์วหมายเลข 2 (V-2) ซึ่งเปิดตลอดเวลาให้น้ำไหลกลับลงไปที่ถังเก็บ เริ่มต้นการทำงานเมื่อตั้งค่าเป้าหมายแล้วตัวควบคุม SLPC จะออกแบบการทำงานออกเป็น 2 โหมด เป็นการใช้ Lookup Table Technique ร่วมกับตัวควบคุมแบบ พีไอดี โดยเลือกใช้ SLPC Controller ของ Yokogawa ในช่วงแรกของการควบคุม เมื่อกำหนดระดับเป้าหมายที่ต้องการแล้ว ตัวควบคุมจะปล่อยกระแสไปควบคุมแรงดันเพื่อไปควบคุมวาล์ว เมื่อระดับเป้าหมายเข้าใกล้ระดับที่ตั้งไว้ ตัวควบคุมจะปล่อยกระแสให้กับตัวแปลงจากกระแสเป็นแรงดัน โดยนำค่ามาจากรางที่ได้กำหนดไว้ล่วงหน้าแล้ว ซึ่งถือเป็นค่าเริ่มต้นก่อนที่จะเริ่มเข้าสู่การควบคุมแบบ พีไอดี เพื่อให้การควบคุมระดับของของเหลวเข้าถึงเป้าหมาย เมื่อผลต่างของระดับอ้างอิงกับระดับจริง มีค่ามากกว่าระดับคลาดเคลื่อนอ้างอิง (E) ระบบจะทำงานในส่วนของเทคนิคการเปิดตาราง ถ้ระดับคลาดเคลื่อนอ้างอิงมีค่าน้อยกว่า (E) ระบบจะทำงานในส่วนของตัวควบคุมแบบ พีไอดี

#### 4.2.4 การใช้โปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์กับเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับตัวควบคุมพีไอดี ทดลองกับกระบวนการควบคุมระดับของของเหลว

การใช้โปรแกรมการจำลองทางคณิตศาสตร์จำเป็นต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์โดยใช้ค่าอัตราการขยายของกระบวนการ ( $K$ ) ค่าเวลาคงที่ของกระบวนการ ( $\tau$ ) และค่าหน่วงเวลาของการดำเนินการ ( $t_0$ ) ตามสมการที่ 2.1 (บทที่ 2) ในการทดลองนี้ผู้วิจัยได้เลือกทดลองค่าระดับเป้าหมาย ( $SP$ ) ทั้งหมด 3 ค่าคือที่ 50%, 70% และที่ 80% จากการทดลองทดสอบหาค่ากระบวนการแบบลูปเปิดโดยใช้สัญญาณแบบขั้นบันได (Step) จากค่าที่ได้ในตารางที่ 3.3 (บทที่ 3) และจากการอ่านค่าที่ได้จากกระดวยบันทึกสามารถหาค่าพารามิเตอร์เพื่อนำมาทดลองกับโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทดลองเป็นเวอร์ชัน 5.1

จากการทดลองที่ระดับเป้าหมาย 50% ได้ทำการทดสอบกับกระบวนการด้วยการป้อนสัญญาณ Step 71 % ตามวิธี Process Reaction Curve เครื่องบันทึกสัญญาณบันทึกผลตอบสนองแบบลูปเปิดของกระบวนการสามารถวัดค่าคงที่ของกระบวนการได้ 5 มิลลิเมตร ค่าหน่วงเวลา 1 มิลลิเมตร และกระบวนการเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ระดับ 50 % และในการทดลองปรับความเร็วการบันทึกของเครื่องบันทึกสัญญาณไว้ที่ 360 mm/h นั่นคือ 1 mm./10 sec. ดังนั้น

$$K_c = 50\% / 71\%$$

$$= 0.704$$

$$\tau = 5 * 10$$

$$= 50 \text{ sec.}$$

$$t_0 = 1 * 10$$

$$= 10 \text{ sec.}$$

จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของกระบวนการที่ได้ ไปคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี ตามสูตรของ Ziegler-Nichols สำหรับตัวควบคุมแบบ PI และการควบคุมแบบ พีไอดี ได้ดังนี้

#### การควบคุมแบบ PI

$$K_c = 6.39$$

$$T_i = 33.3 \text{ sec.}$$

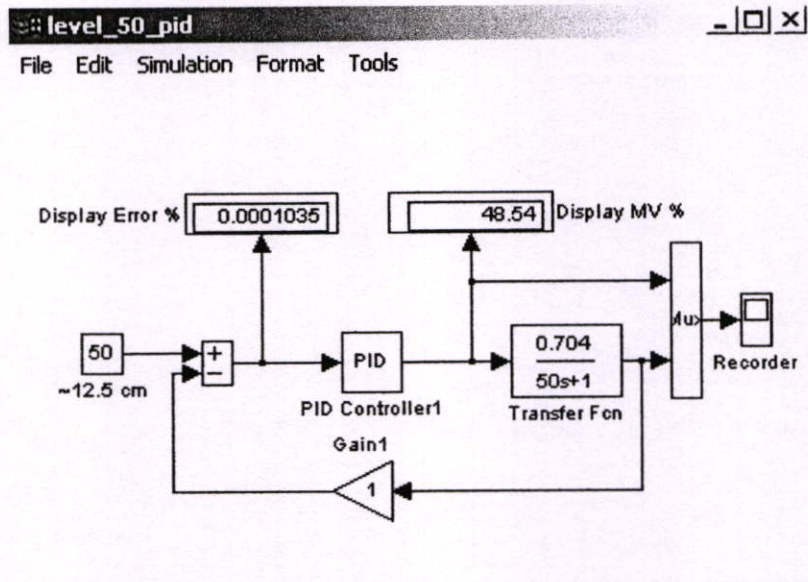
#### การควบคุมแบบ พีไอดี

$$K_c = 8.52$$

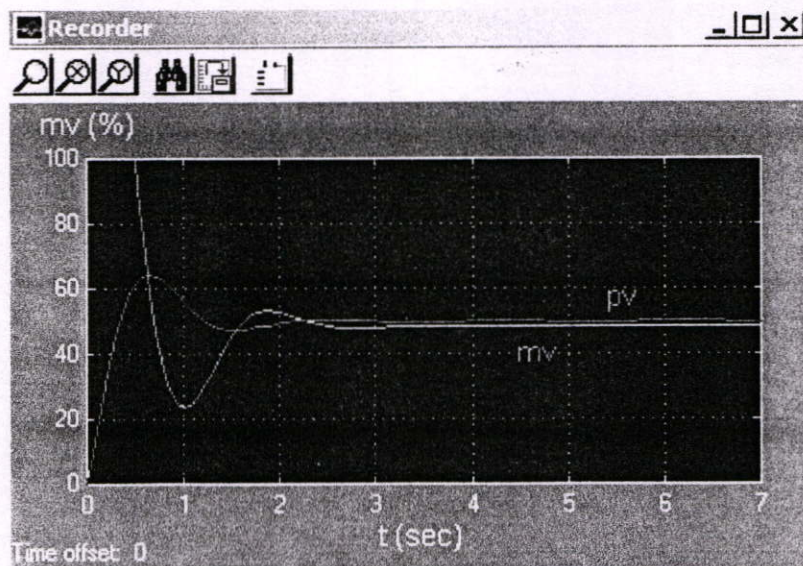
$$T_i = 20 \text{ sec}$$

$$T_d = 5 \text{ sec.}$$

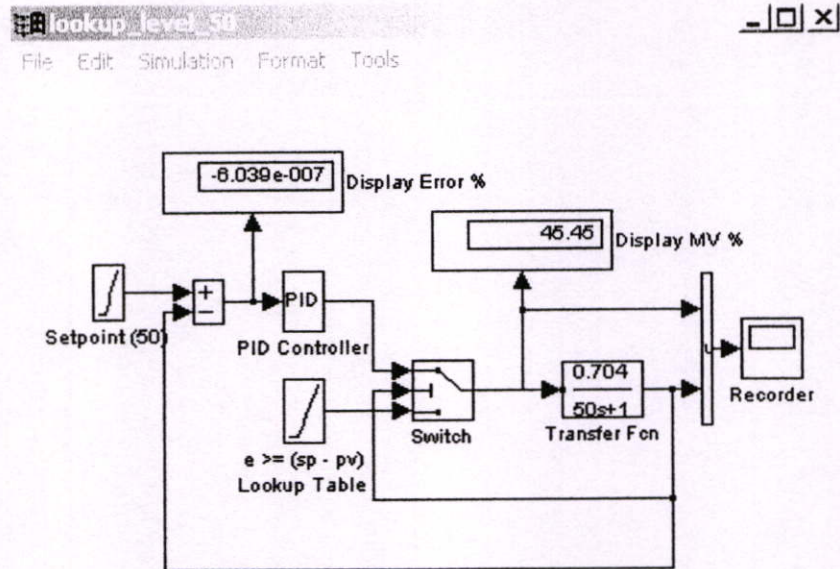
ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมจะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.20 – 4.23 โดยได้แสดงผลตอบสนองที่ค่าเป้าหมายที่ระดับ 50%, 70% และที่ 80% เปรียบเทียบกันระหว่างตัวควบคุม พีไอดี เพียงอย่างเดียวกับ เทคนิคการเปิดตารางร่วมกับ พีไอดี



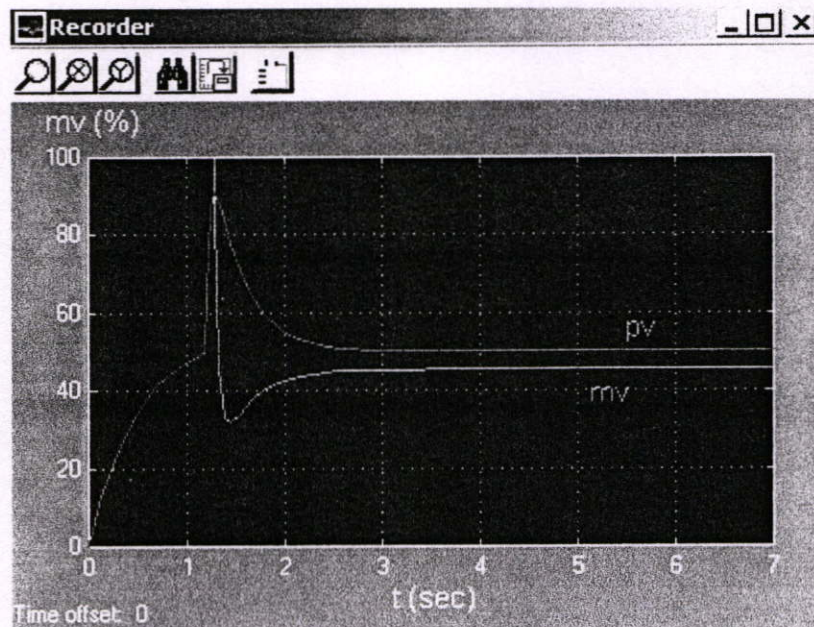
รูปที่ 4.20 โปรแกรม Simulink ในรูปบล็อกไดอะแกรมในการทดลองที่ระดับเป้าหมาย 50 % ด้วยการควบคุมแบบ พีไอดี ที่  $K_c = 6.39$ ,  $T_i = 33.3$  sec ความดันที่ 360 mm/h



รูปที่ 4.21 ผลการทดลองกับโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ Simulink ที่ระดับเป้าหมาย 50% ด้วยการควบคุมแบบ PI ที่  $K_c = 6.39$ ,  $T_i = 33.3$  sec ความเร็วการบันทึก 360 mm/h



รูปที่ 4.22 โปรแกรม Simulink ในรูปบล็อกไดอะแกรมในการทดลองที่ระดับ 50% ด้วย เทคนิคการเปิดตารางร่วมกับการควบคุมแบบ พีไอดี ที่  $K_c = 6.39$ ,  $T_i = 33.3$  sec ความเร็วในการบันทึก 360 mm/h



รูปที่ 4.23 ผลการทดลองกับโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ Simulink ที่ระดับเป้าหมาย 50% ด้วยการควบคุมแบบเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับตัวควบคุมแบบพีไอดีที่  $K_c = 6.39$ ,  $T_i = 33.3$  sec ความเร็วในการบันทึก 360 mm/h

จากการทดลองที่ระดับเป้าหมาย 70% ได้ทำการทดสอบกับกระบวนการด้วยการป้อนสัญญาณ Step 68.6 % ตามวิธี Process Reaction Curve เครื่องบันทึกสัญญาณบันทึกผลตอบสนองแบบรูปเปิดของกระบวนการสามารถวัดค่าคงที่ของกระบวนการได้ 5 มิลลิเมตร ค่าหน่วยเวลา 1 มิลลิเมตร และกระบวนการเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ระดับ 70 % และในการทดลองปรับความเร็วการบันทึกของเครื่องบันทึกสัญญาณไว้ที่ 360 mm/h นั่นคือ 1 mm./10 sec. ดังนั้น

$$K_c = 70 \% / 68.6 \%$$

$$= 1.02$$

$$\tau = 4 * 10$$

$$= 40 \text{ sec.}$$

$$t_0 = 1 * 10$$

$$= 10 \text{ sec.}$$

จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของกระบวนการที่ได้ ไปคำนวณหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี ตามสูตรของ Ziegler-Nichols สำหรับตัวควบคุมแบบ PI และการควบคุมแบบ พีไอดี ได้ดังนี้

การควบคุมแบบ PI

$$K_c = 3.52$$

$$T_i = 33.3 \text{ sec.}$$

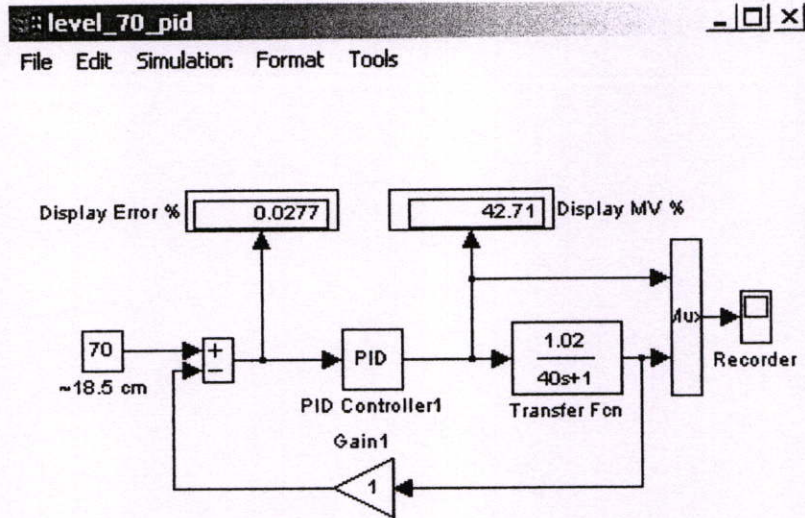
การควบคุมแบบ พีไอดี

$$K_c = 1.36$$

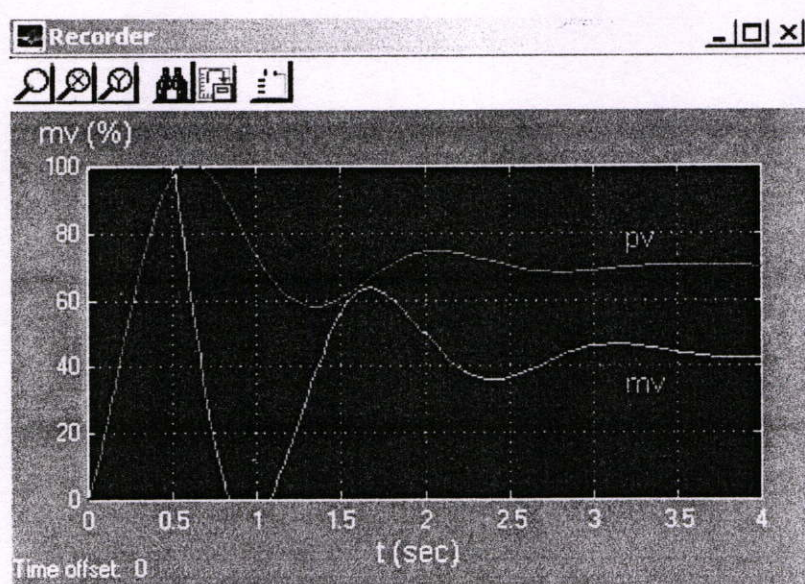
$$T_i = 20 \text{ sec}$$

$$T_d = 5 \text{ sec}$$

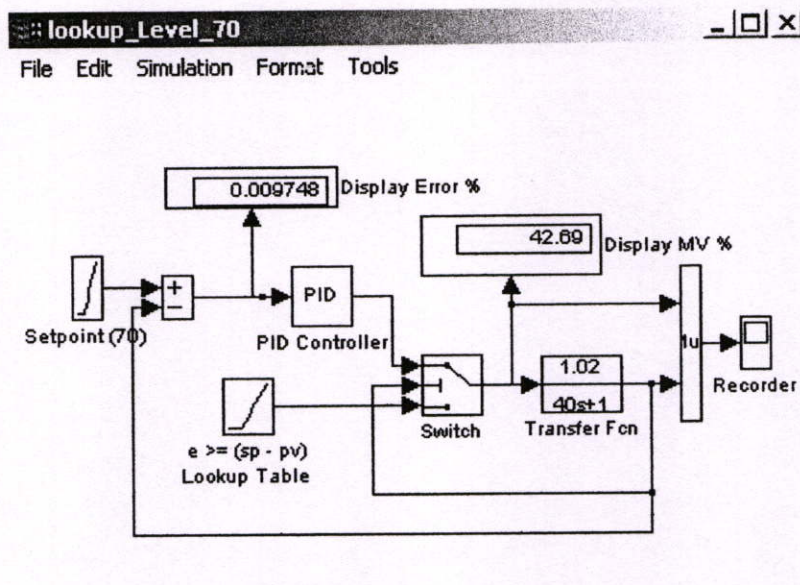
ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมจะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.24 – 4.27 โดยได้แสดงผลตอบสนองที่ค่าเป้าหมายที่ระดับ 70% เปรียบเทียบกันระหว่างตัวควบคุม พีไอดี เพียงอย่างเดียว กับ เทคนิคการเปิดตารางร่วมกับตัวควบคุมแบบ พีไอดี



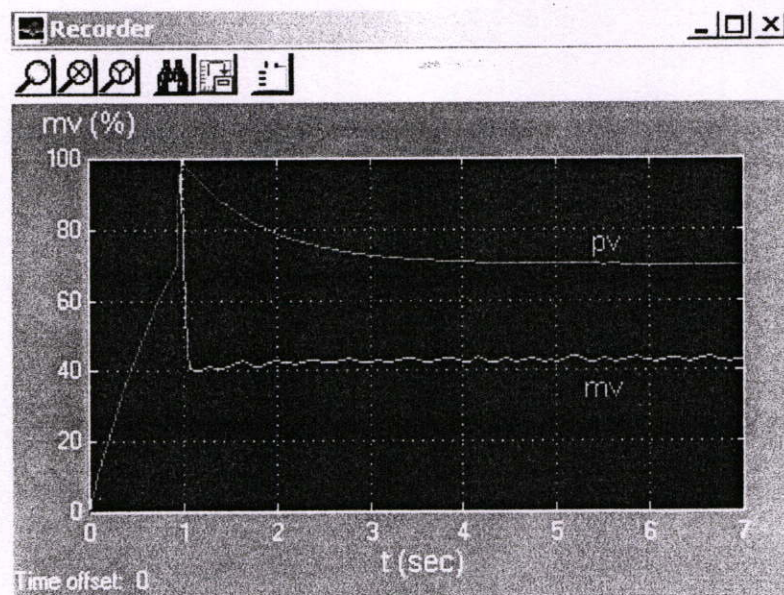
รูปที่ 4.24 โปรแกรม Simulink ในรูปบล็อกไดอะแกรมในการทดลองที่ระดับเป้าหมาย 70 % ด้วยการควบคุมแบบ พีไอดี ที่  $K_c = 3.52$ ,  $T_i = 33.3$  sec ความเร็วในการบันทึก 360 mm/h



รูปที่ 4.25 ผลการทดลองกับ โปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ Simulink ที่ระดับ เป้าหมาย 70% ด้วยการควบคุมแบบ พีไอดี ที่  $K_c = 3.52$ ,  $T_i = 33.3$  sec ความเร็วในการบันทึก 360 mm/h



รูปที่ 4.26 โปรแกรม Simulink ในรูปบล็อกไดอะแกรมในการทดลองที่ระดับ 70% ด้วย เทคนิคการเปิดตารางร่วมกับการควบคุมแบบ พีไอดี ที่  $K_c = 3.52$  ,  $T_i = 33.3$  sec ความเร็วในการบันทึก 360 mm/h



รูปที่ 4.27 ผลการทดลองกับ โปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ Simulink ที่ระดับ เป้าหมาย 70% ด้วยการควบคุมแบบเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับตัวควบคุมแบบ พีไอดีที่  $K_c = 3.52$  ,  $T_i = 33.3$  sec ความเร็วในการบันทึก 360 mm/h

จากการทดลองที่ระดับเป้าหมาย 80% ได้ทำการทดสอบกับกระบวนการด้วยการป้อนสัญญาณ Step 67.0 % ตามวิธี Process Reaction Curve เครื่องบันทึกสัญญาณบันทึกผลตอบสนองแบบรูปเปิดของกระบวนการสามารถวัดค่าคงที่ของกระบวนการได้ 4 มิลลิเมตร ค่าหน่วยเวลา 1 มิลลิเมตร และกระบวนการเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ระดับ 80 % และในการทดลองปรับความเร็วการบันทึกของเครื่องบันทึกสัญญาณไว้ที่ 360 mm/h นั่นคือ 1 mm./10 sec. ดังนั้น

$$K_c = 80 \% / 67.0 \%$$

$$= 1.19$$

$$\tau = 4 * 10$$

$$= 40 \text{ sec.}$$

$$t_0 = 1 * 10$$

$$= 10 \text{ sec.}$$

จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของกระบวนการที่ได้ ไปคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี ตามสูตรของ Ziegler-Nichols สำหรับตัวควบคุมแบบ PI และการควบคุมแบบ พีไอดี ได้ดังนี้

การควบคุมแบบ PI

$$K_c = 3.02$$

$$T_i = 33.3 \text{ sec.}$$

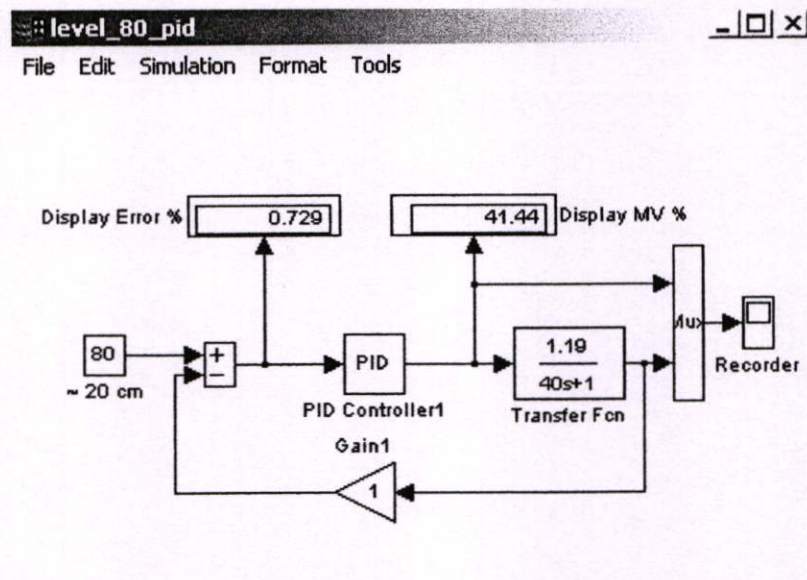
การควบคุมแบบ พีไอดี

$$K_c = 4.03$$

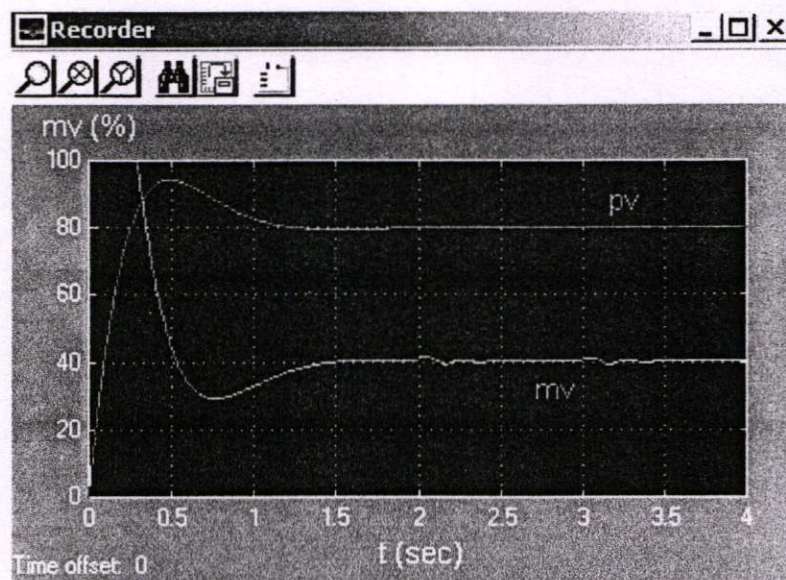
$$T_i = 20 \text{ sec}$$

$$T_d = 5 \text{ sec.}$$

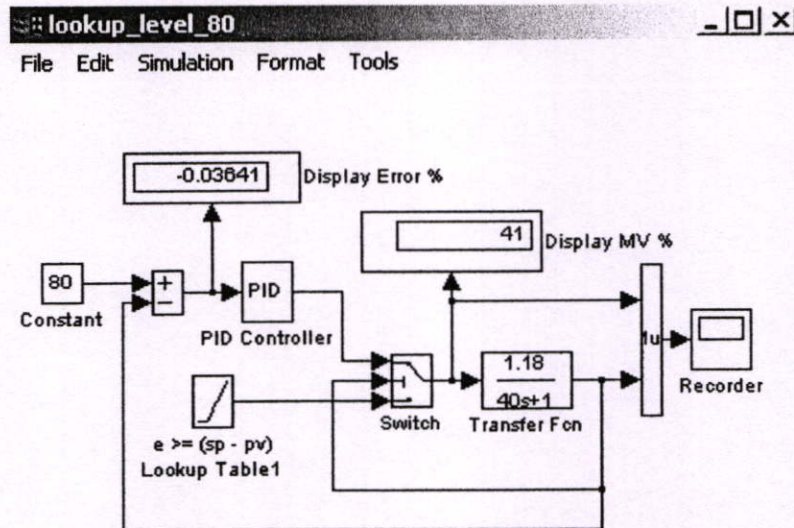
ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมจะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.28 – 4.31 โดยได้แสดงผลตอบสนองที่ค่าเป้าหมายที่ระดับ 80% เปรียบเทียบกันระหว่างตัวควบคุม พีไอดี เพียงอย่างเดียว กับ เทคนิคการเปิดตารางร่วมกับตัวควบคุมแบบ พีไอดี



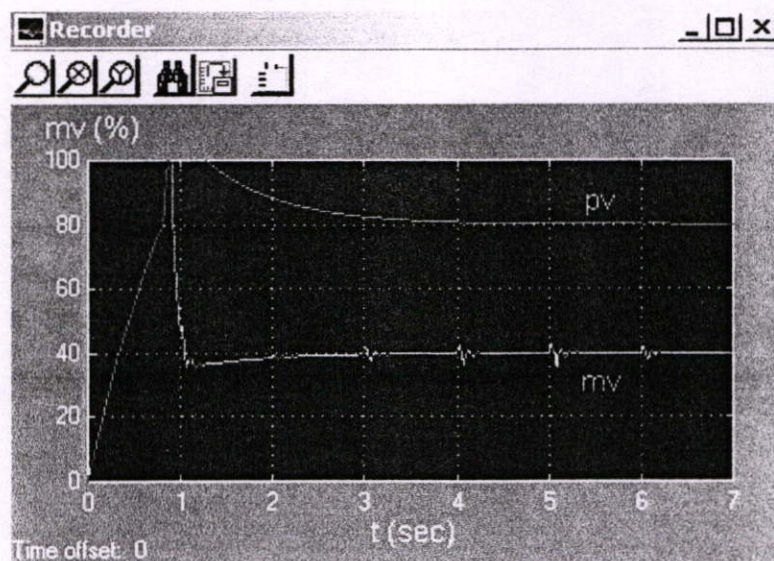
รูปที่ 4.28 โปรแกรม Simulink ในรูปบล็อกไดอะแกรมในการทดลองที่ระดับเป้าหมาย 80 % ด้วยการควบคุมแบบ พีไอดี ที่  $K_c = 3.02$ ,  $T_i = 33.3$  sec ความเร็วในการบันทึก 360 mm/h



รูปที่ 4.29 ผลการทดลองกับ โปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ Simulink ที่ระดับเป้าหมาย 80% ด้วยการควบคุมแบบ พีไอดี ที่  $K_c = 3.02$ ,  $T_i = 33.3$  sec ความเร็วในการบันทึก 360 mm/h



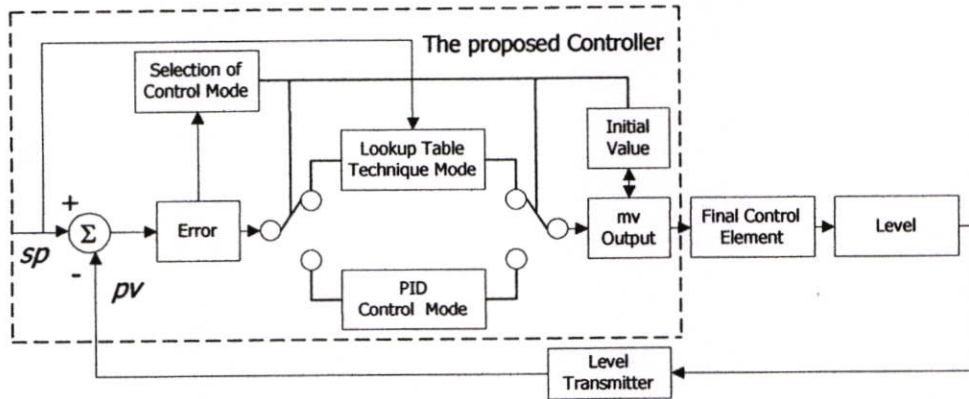
รูปที่ 4.30 โปรแกรม Simulink ในรูปบล็อกไดอะแกรมในการทดลองที่ระดับ 80% ด้วย เทคนิค การเปิดตารางร่วมกับการควบคุมแบบ พีไอดี ที่  $K_c = 3.02$ ,  $T_i = 33.3$  sec ความเร็วในการบันทึก 360 mm/h



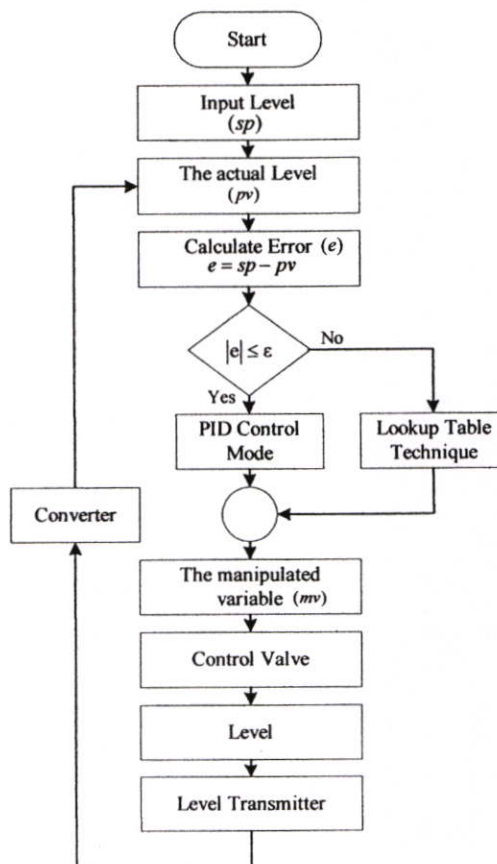
รูปที่ 4.31 ผลการทดลองกับ โปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ Simulink ที่ระดับเป้าหมาย 80% ด้วยการควบคุมแบบเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับตัวควบคุมแบบ พีไอดี ที่  $K_c = 3.02$ ,  $T_i = 33.3$  sec ความเร็วในการบันทึก 360 mm/h

### การทำงานของระบบ

บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมระดับ โดยใช้เทคนิค Lookup Table Technique ร่วมกับ ตัวควบคุมแบบ พีไอดี แสดงในรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของระบบการควบคุมระดับ



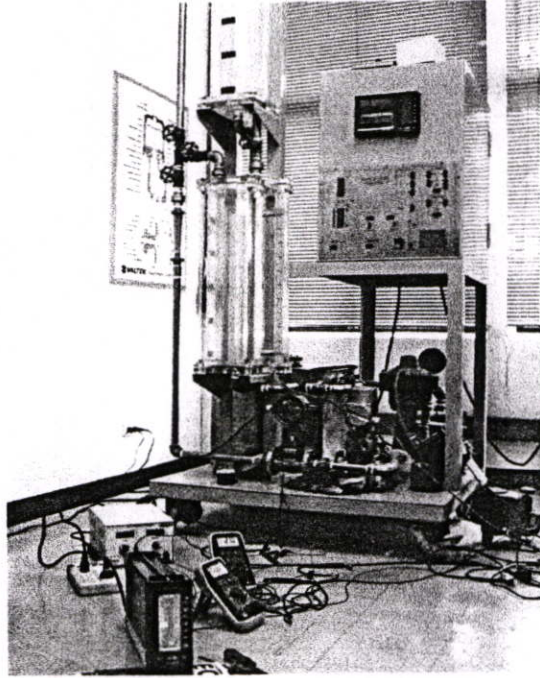
รูปที่ 4.33 ขั้นตอนการทำงานของตัวควบคุม SLPC ที่ใช้ควบคุมระดับของของเหลว

การควบคุมระดับโดยใช้ SLPC Controller โดยการเขียนโปรแกรม ในขั้นตอนแรกระบบ จะทำการเปรียบเทียบค่าระดับอ้างอิงกับระดับจริง (Process Variable) ที่รับค่ามาจากตัวแปลง สัญญาณระดับเป็นกระแสไฟฟ้ามาตรฐาน 4-20 mA ถ้าค่าความคลาดเคลื่อนของระดับ ( $e$ ) ในขณะ นั้นมีค่ามากกว่าค่าคลาดเคลื่อนอ้างอิง ( $\epsilon$ ) ระบบจะทำงานในส่วนของ Lookup Table Technique ในทางตรงข้าม ระบบจะทำงานภายใต้การควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ พีไอดี เท่านั้น

การทำงานของระบบ เมื่อ  $(sp - pv) > \epsilon$  โปรแกรมจะสั่งให้เปิดวาล์ว 100% เพื่อเพิ่มระดับ น้ำให้เข้าใกล้ระดับอ้างอิง ในทางตรงข้าม ถ้า  $(pv - sp) > \epsilon$  ตัวควบคุมจะสั่งให้ปิดวาล์ว เพื่อลด ระดับน้ำให้เข้าสู่ระดับอ้างอิง และเมื่อระดับน้ำจริงเข้าใกล้ระดับอ้างอิงแล้ว โปรแกรมจะทำการ คำนวณหาค่าเริ่มต้นที่เหมาะสมในการเปิดวาล์วจากตาราง เพื่อรักษาระดับน้ำปัจจุบันในถังและเมื่อ ระดับน้ำปัจจุบันใกล้เคียงกับระดับอ้างอิงที่ตั้งไว้ (Set point) ระบบจะเปรียบเทียบการทำงาน ไปใช้ การควบคุมแบบ พีไอดี เพียงอย่างเดียว สำหรับขั้นตอนการทำงานของ การควบคุมระดับ แสดงใน รูปที่ 4.33

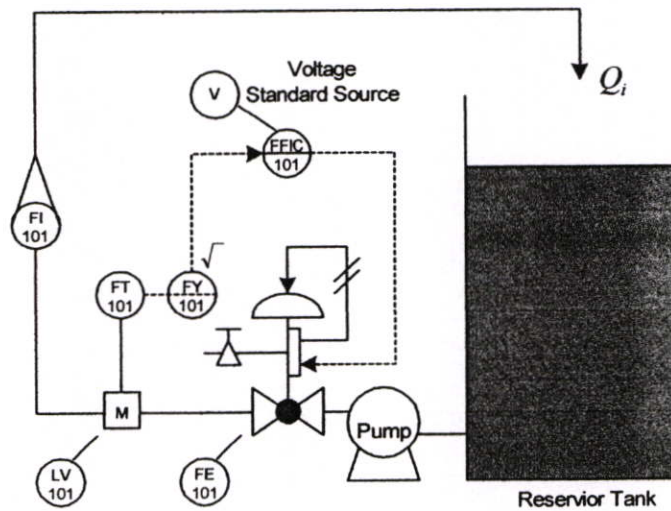
#### 4.2.5 การประยุกต์ใช้หลักการที่นำเสนอสำหรับการควบคุมอัตราการไหล

เมื่อพิจารณาชุดทดลองการควบคุมอัตราการไหลที่ใช้ในการทดลองได้ออกแบบไว้  
ดังแสดงในรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.34 ชุดทดลองกระบวนการควบคุมอัตราการไหล

จากรูปที่ 4.34 สามารถเขียนหลักการควบคุมอัตราการไหล ดังแสดงในรูปที่ 4.35



รูปที่ 4.35 โครงสร้างการทดลองกับกระบวนการควบคุมอัตราการไหล

การทำงานของกระบวนการควบคุมอัตราการไหลจากรูปโครงสร้างที่ 4.35 เมื่อป้อนน้ำทำงานของเหลวจะไหลผ่านวาล์ว โดยที่ฝั่งทางออกจะมีการวัดอัตราการไหลด้วย Flow Transmitter เพื่อส่งสัญญาณมาตรฐานไปเป็นสัญญาณอิทพุทให้กับตัวควบคุม SLPC เพื่อนำไปกำหนดค่าตำแหน่งการเปิดวาล์วที่เหมาะสมที่สุดจากค่าในตารางที่เหมาะสมให้กับอัตราการไหล ณ เวลานั้น ๆ โดยหลังจากตำแหน่งการติดตั้งของ Flow Transmitter จะมีการติดตั้งอุปกรณ์โรตารีเมตรเพื่อสังเกตอัตราการไหลได้ เมื่อผ่านตัวโรตารีเมตรแล้วจะมีการติดตั้งวาล์วเพื่อใช้ในการเพิ่มหรือลดอัตราการไหลฝั่งขาออก

#### 4.2.6 การใช้โปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์กับเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับตัวควบคุมแบบ พีไอดี ทดลองกับกระบวนการควบคุมระดับอัตราการไหล

การใช้โปรแกรมการจำลองทางคณิตศาสตร์จำเป็นต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์โดยใช้ค่าอัตราการขยายของกระบวนการ ( $K$ ) ค่าเวลาคงที่ของกระบวนการ ( $\tau$ ) และค่าหน่วงเวลาของการดำเนินการ ( $t_0$ ) ในการทดลองนี้ผู้วิจัยได้ทำการทดลองค่าอัตราการไหลออกเป็น 5 ระดับเป้าหมาย (SP) โดยมีสัญญาณอิทพุท 2 สัญญาณ ที่เป็นอัตราส่วนกันอยู่ ( $X1:X2$ ) อัตราส่วนที่ใช้ทดลองคือ 1:2 ซึ่งกำหนดให้สัญญาณแรก ( $X1$ ) มาจากแหล่งจ่ายไฟ 1-5 Vdc ซึ่งใช้แทนสัญญาณอินพุตแรก เนื่องจากชุดสาริตที่ใช้ทดลองมีตัววัดอัตราการไหลเพียงหนึ่งตัว และสัญญาณอินพุทที่ 2 ( $X2$ ) ใช้สัญญาณจริงจากตัววัดอัตราการไหล จากการทดลองทดสอบหาค่ากระบวนการแบบรูปเปิดโดยใช้สัญญาณแบบขั้นบันได (Step) จากค่าที่ได้ในตารางที่ 3.6 (บทที่ 3) และจากการอ่านค่าที่ได้จากกระดาดบันทึกสามารถหาค่าพารามิเตอร์เพื่อนำมาทดลองกับโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยที่โปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทดลองเป็นเวอร์ชัน 7.1

จากการทดลองได้กำหนดให้ผลทดลองอัตราการไหลโดยการเปิดวาล์วออกเป็น 5 ระดับ (Step change) โดยเริ่มที่ค่าเป้าหมายตั้งแต่ 20%, 60%, 100%, 80% และ 40% ได้ทำการทดสอบกับกระบวนการด้วยการป้อนสัญญาณ Step 82 % ตามวิธี Process Reaction Curve เครื่องบันทึกสัญญาณบันทึกผลตอบสนองแบบรูปเปิดของกระบวนการสามารถวัดค่าคงที่ของกระบวนการได้ 5 มิลลิเมตร ค่าหน่วงเวลา 1 มิลลิเมตร และกระบวนการเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ระดับ 41 % และในการทดลองปรับความเร็วการบันทึกของเครื่องบันทึกสัญญาณไว้ที่ 600 mm/h นั่นคือ 1 mm./6 sec.

คั้งนั้น

$$K = 41 \% / 82 \%$$

$$= 0.5$$

$$\tau = 5 * 6$$

$$= 30 \text{ sec.}$$

$$t_0 = 1 * 6$$

$$= 6 \text{ sec.}$$

จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของกระบวนการที่ได้ ไปคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม พีไอดี ตามสูตรของ Ziegler-Nichols สำหรับตัวควบคุมแบบ PI และการควบคุมแบบ พีไอดี ได้คั้งนี้

การควบคุมแบบ PI

$$K_c = 9$$

$$T_i = 19.98 \text{ sec.}$$

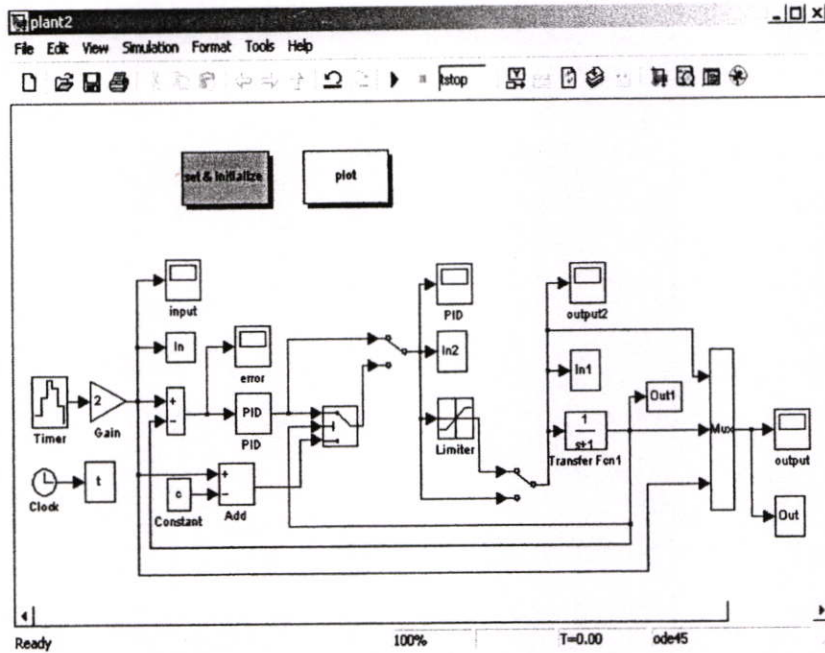
การควบคุมแบบ พีไอดี

$$K_c = 12$$

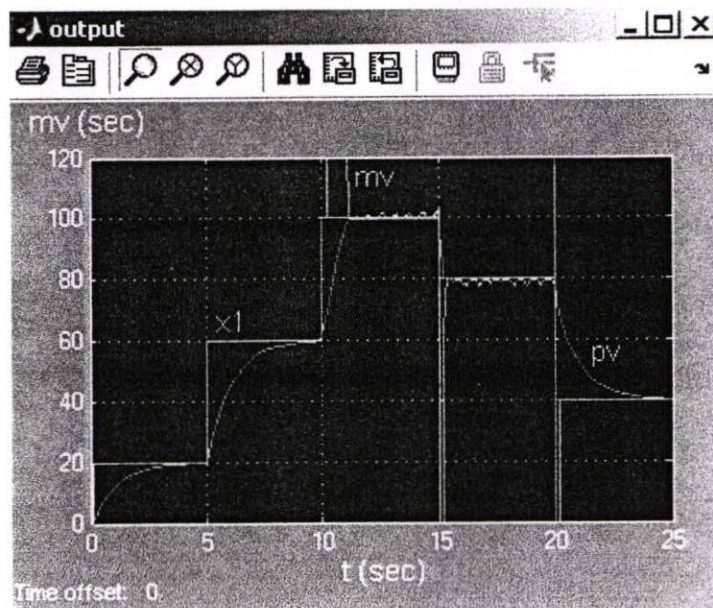
$$T_i = 12 \text{ sec}$$

$$T_d = 3 \text{ sec.}$$

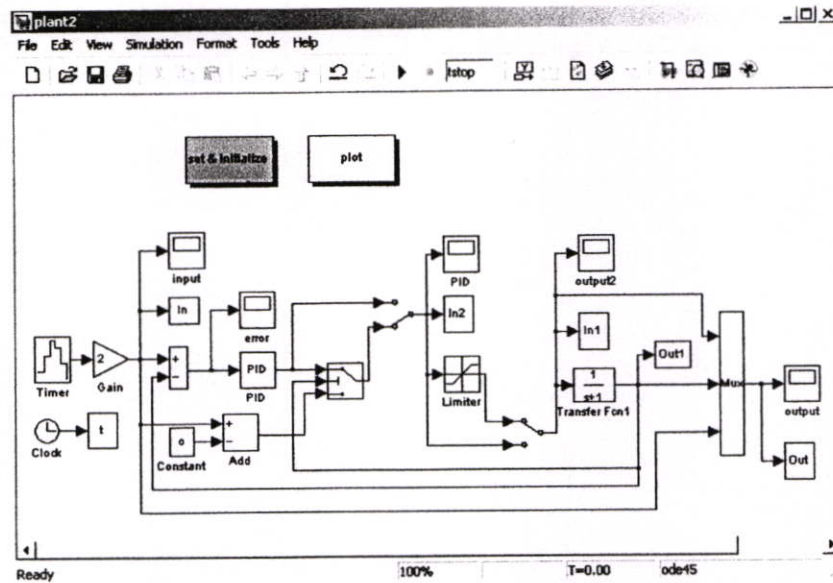
ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมจะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.36 – 4.39 โดยได้แสดงผลตอบสนองที่ค่าเป้าหมายที่ระดับออกเป็น 5 ระดับ (Step Change) โดยเริ่มตั้งแต่ 20%, 60%, 100%, 80% และ 40% เปรียบเทียบกันระหว่างตัวควบคุม พีไอดี เพียงอย่างเดียวกับ เทคนิคการเปิดตารางร่วมกับตัวควบคุมแบบ พีไอดี โดยในผลการทดลองแบบตัวควบคุมแบบ พีไอดี เพียงอย่างเดียวผู้วิจัยได้เลือกพารามิเตอร์การควบคุมแบบ PI ในการเปรียบเทียบ



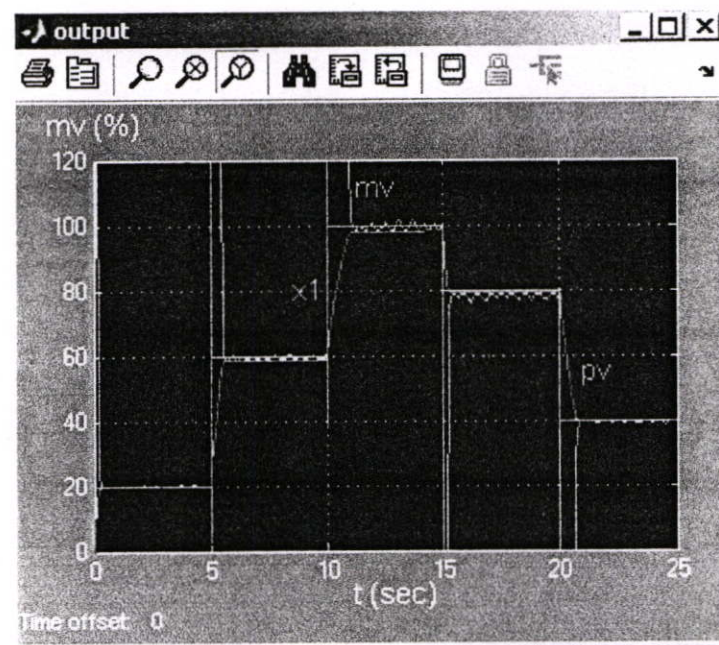
รูปที่ 4.36 โปรแกรม Simulink ในรูปบล็อกไดอะแกรมในการทดลองที่อัตราการไหลค่าเป้าหมาย 20%, 60%, 100%, 80% และ 40% ด้วยการควบคุมแบบ PI ที่  $K_c = 9$ ,  $T_i = 19.98$  sec ความเร็วในการบันทึก 600 mm/h



รูปที่ 4.37 ผลการทดลองกับโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ Simulink ที่อัตราการไหลค่าเป้าหมาย 20%, 60%, 100%, 80% และ 40% ด้วยการควบคุมแบบ PI ที่  $K_c = 9$ ,  $T_i = 19.98$  sec ความเร็วการบันทึก 600 mm/h



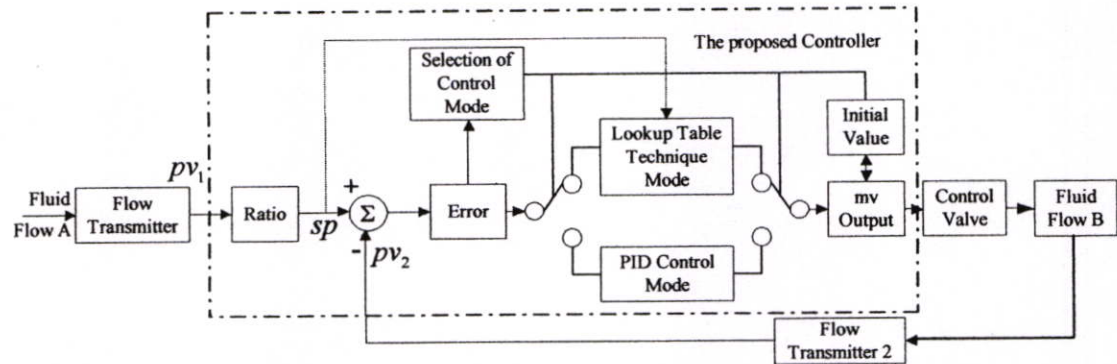
รูปที่ 4.38 โปรแกรม Simulink ในรูปบล็อกไดอะแกรมในการทดลองที่อัตราการไหลค่าเป้าหมาย 20%, 60%, 100%, 80% และ 40% ด้วยเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับการควบคุมแบบ PI ที่  $K_c = 9$ ,  $T_i = 19.98$  sec ความเร็วในการบันทึกที่ 600 mm/h



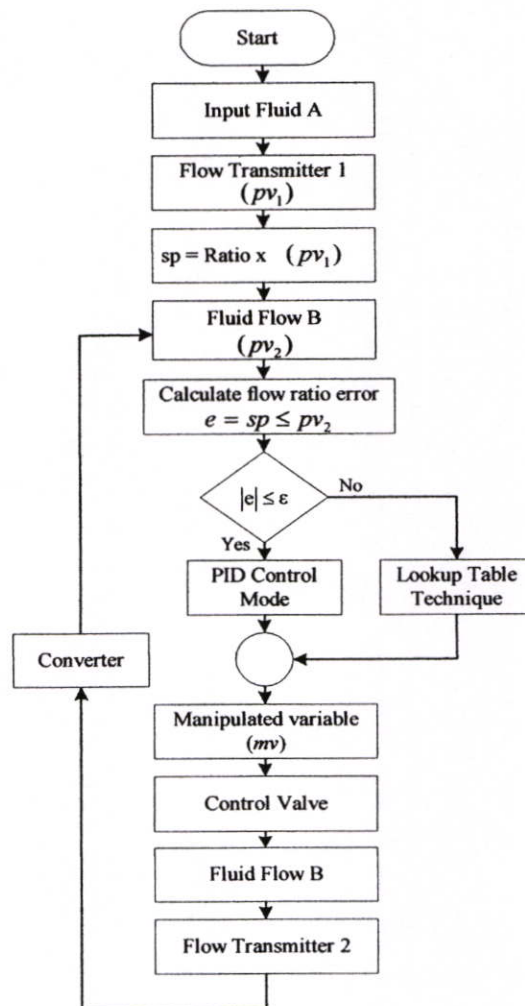
รูปที่ 4.39 ผลการทดลองกับโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ Simulink ที่อัตราการไหลค่าเป้าหมาย 20%, 60%, 100%, 80% และ 40% ด้วยการควบคุมแบบเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับตัวควบคุมแบบ PI ที่  $K_c = 9$ ,  $T_i = 19.98$  sec ความเร็วในการบันทึกที่ 600 mm/h

### การทำงานของระบบ

บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมอัตราการไหล โดยใช้เทคนิค Lookup Table Technique ร่วมกับตัวควบคุมแบบ พีไอดี แสดงในรูปที่ 4.40



รูปที่ 4.40 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของระบบการควบคุมอัตราการไหล



รูปที่ 4.41 ขั้นตอนการทำงานของตัวควบคุม SLPC ที่ใช้ควบคุมอัตราการไหล

การควบคุมอัตราการไหลโดยใช้ SLPC Controller โดยการเขียน โปรแกรม ในขั้นตอนแรก ระบบจะทำการเปรียบเทียบค่าอัตราการไหลอ้างอิงกับอัตราการไหลจริง (Process Variable) ที่รับค่ามาจากตัวแปลงสัญญาณอัตราการไหลเป็นกระแสไฟฟ้ามาตรฐาน 4-20 mA ถ้าค่าความคลาดเคลื่อนของอัตราการไหล ( $e$ ) ในขณะนั้นมีค่ามากกว่าค่าคลาดเคลื่อนอ้างอิง ( $\epsilon$ ) ระบบจะทำงานในส่วน ของเทคนิคการเปิดตาราง (Lookup Table Technique) ในทางตรงข้าม ระบบจะทำงานภายใต้การ ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ พีไอดี เท่านั้น

การทำงานของระบบ เมื่อ  $(sp - pv) > \epsilon$  โปรแกรมจะสั่งให้เปิดวาล์ว 100% เพื่อเพิ่ม อัตราการไหลของน้ำให้เข้าใกล้ระดับอัตราการไหลอ้างอิง ในทางตรงข้าม ถ้า  $(pv - sp) > \epsilon$  ตัว ควบคุมจะสั่งให้ปิดวาล์ว เพื่อลดระดับอัตราการไหลของน้ำให้เข้าสู่ค่าอัตราการไหลอ้างอิง และเมื่อ ค่าอัตราการไหลจริงของน้ำเข้าใกล้ค่าอัตราการไหลอ้างอิงแล้ว โปรแกรมจะทำการคำนวณหาค่า เริ่มต้นที่เหมาะสมในการเปิดวาล์วจากตาราง เพื่อรักษาระดับอัตราการไหลจริงและเมื่อค่าการไหล ปัจจุบันมีค่าใกล้เคียงกับอัตราการไหลอ้างอิงที่ตั้งไว้ (Set point) ระบบจะเปรียบเทียบการทำงาน ไป ใช้การควบคุมแบบ พีไอดี เพียงอย่างเดียว สำหรับขั้นตอนการทำงานของ การควบคุมอัตราการไหล แสดงในรูปที่ 4.41

จากขั้นตอนการทำงานของ การควบคุมอัตราการไหล ดังที่แสดงในรูปที่ 4.41 เพื่อแสดงให้เห็นว่า เทคนิคการเปิดตารางที่นำเสนอนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการต่าง ๆ ที่มีการ เปลี่ยนแปลงค่าระดับเป้าหมาย (SP) ได้ โดยที่ยังสามารถควบคุมกระบวนการได้ และจากการ ทดลองนี้ผู้วิจัยได้ทำการทดลองตั้งค่าอัตราการไหลออกเป็น 5 ระดับเป้าหมาย โดยมีสัญญาณอิท พุท 2 สัญญาณ ที่เป็นอัตราส่วนกันอยู่ (X1:X2) อัตราส่วนที่ใช้ทดลองคือ 1:2 ซึ่งกำหนดให้ สัญญาณแรก (X1) มาจากแหล่งจ่ายไฟ 1-5 Vdc ซึ่งใช้แทนสัญญาณอินพุตแรก เนื่องจากชุดสาริตที่ ใช้ทดลองมีตัววัดอัตราการไหลเพียงหนึ่งตัว และสัญญาณอินพุตที่ 2 (X2) ใช้สัญญาณจริงจากตัววัด อัตราการไหล และค่าที่ใช้เป็นค่าเริ่มต้นของแต่ละระดับเป้าหมาย ทางผู้วิจัยได้ทดลองหาค่า กระบวนการแบบรูปเปิดโดยใช้สัญญาณแบบขั้นบันได (Step) โดยค่าที่ได้จะแสดงอยู่ในตารางที่ 3.6 ซึ่งนำมาใช้เป็นค่าในการเริ่มต้นก่อนที่จะเปลี่ยนเป็นการควบคุมเป็นแบบพีไอดี

## บทที่ 5

### ผลการทดลอง

#### 5.1 กล่าวนำ

บทนี้เป็นการประยุกต์เทคนิคการควบคุมแบบเปิดตารางโดยใช้ตัวควบคุมที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ Single Loop Programmable Controller (SLPC) ของบริษัท Yagokawa Electric Corporation ไปใช้ทดลองกับกระบวนการจำลอง 3 กระบวนการ คือ กระบวนการจำลองการควบคุมอุณหภูมิภายในตู้อบ การควบคุมระดับของของเหลว และการควบคุมอัตราการไหล โดยจะแสดงให้เห็นผลตอบสนองที่ค่าเป้าหมายต่าง ๆ ของแต่ละกระบวนการ โดยการทดลองนี้จะเปรียบเทียบผลระหว่างตัวควบคุมแบบ พีไอดี ในการควบคุมกระบวนการเพียงอย่างเดียว กับการใช้เทคนิคการเปิดตารางร่วมกับการควบคุมแบบ พีไอดี โดยที่ค่าพารามิเตอร์ พีไอดี ของกระบวนการที่ใช้ในการทดลองเพื่อมาเปรียบเทียบกับเทคนิคการควบคุมที่นำเสนอ นั้นนำค่ามาจากการคำนวณตามวิธีของ Ziegler-Nichols

#### 5.2 การประยุกต์ใช้หลักการที่นำเสนอโดยใช้ตัวควบคุม SLPC

การใช้เทคนิคการเปิดตารางร่วมกับตัวควบคุมในเชิงพาณิชย์เพื่อกำหนดตำแหน่งค่าเข้าที่พุดในการเริ่มต้นของกระบวนการนั้น ๆ ที่เหมาะสมและสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับตัวควบคุมที่มีใช้อยู่ทั่วไปตามท้องตลาด โดยตัวควบคุมที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้คือตัวควบคุม SLPC ในตระกูล Yew Series 80 ซึ่งเป็นตัวควบคุมแบบ Single Loop Programmable (SLPC) ของบริษัท Yagokawa Electric Corporation [8] ซึ่งนำมาใช้ควบคุมอุณหภูมิ การควบคุมระดับของของเหลว และการควบคุมอัตราการไหลของของเหลว ซึ่งตัวควบคุมนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการควบคุมที่มีความซับซ้อนได้ดี ด้วยฟังก์ชันการคำนวณทางคณิตศาสตร์ในโหมด (mode) ของ พีไอดี ซึ่งตัวควบคุม SLPC เพียงหนึ่งตัวสามารถควบคุมอุปกรณ์การทำงานได้อย่างสมบูรณ์แบบ โดยที่ผู้ใช้งานสามารถสร้างโปรแกรมการควบคุมได้ด้วยตัวเอง โดยอาศัยฟังก์ชันหรือกลุ่มคำสั่งที่ตัวควบคุมมีไว้ให้เลือกใช้งานได้อย่างสะดวก ดังที่นำเสนอต่อไปนี้

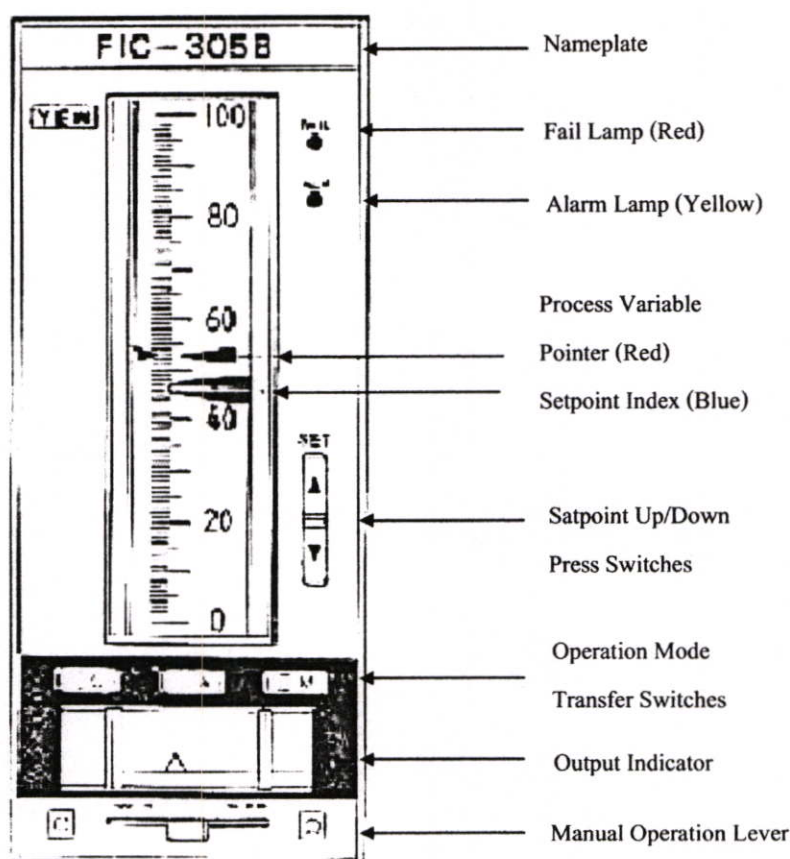
- ตัวควบคุม SLPC มีส่วนแสดงผลเป็นหน้าจอ LCD
- หัวข้อการทำงานจะเรียงลำดับตามตัวอักษร และแสดงผลในหน้าจอ
- ตัวควบคุม SLPC สามารถเลือก โหมด (mode) พีไอดี มาใช้งานได้เลย โดยไม่ต้องเขียนฟังก์ชันการคำนวณ
- ตัวควบคุม SLPC หนึ่งตัวสามารถควบคุมกระบวนการที่มี 2 อินพุต (cassade) ได้

- ตัวโปรแกรมที่เขียนจะถูกเก็บไว้ในหน่วยความจำถาวร (ROM) โดยการเขียนโปรแกรมจะใช้เครื่อง SPRG ในการเขียนโปรแกรม
- การเปลี่ยนโปรแกรมการควบคุมทำได้ง่ายโดยการเปลี่ยน (ROM) ตัวใหม่ หรือ เขียนโปรแกรมใหม่

### 5.3 การใช้งานตัวควบคุม (Controller Operation)

#### 5.3.1 ตัวแสดงผลทางด้านหน้า

ตัวแสดงผลของตัวควบคุม SLPC จะมีส่วนแสดงผลทางด้านหน้าหรือที่เรียกว่า SLCD ซึ่งหน้าปัดแสดงผลนี้ได้ถูกติดตั้งมากับตัวควบคุมเรียบร้อยแล้ว ดังที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ส่วนแสดงผลทางด้านหน้า (Moving Coil Version)

#### 5.3.2 การแสดงผลค่าเป้าหมายและตัวแสดงผลค่าในกระบวนการ

โดยที่ตัวแสดงผลจะใช้การเคลื่อนที่ของขดลวด (Moving Coil) ซึ่งจะมีอยู่ 2 แบบ คือ รุ่นที่แสดงผลโดยขดลวดเคลื่อนที่ดังแสดงให้เห็นในรูป 5.2 โดยจะมีช่วงแสดงผลการวัดอยู่ 100 มิลลิเมตร ที่ความผิดพลาด  $\pm 0.5\%$  และรุ่นที่แสดงผลแบบตัวเลขเป็นดิจิทัล ดังในรูปที่ 5.3

### 5.3.3 การเลือกโหมด (mode)การทำงาน

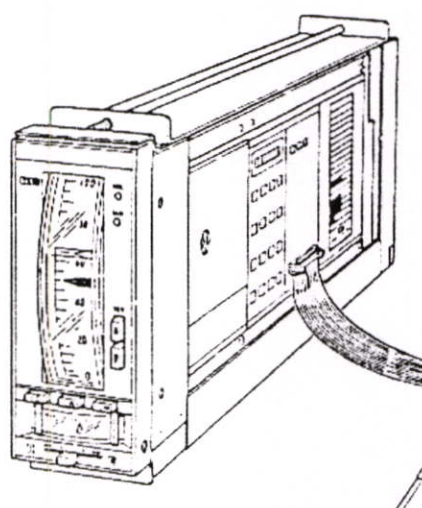
การเลือกส่วนการควบคุมของตัวควบคุมนี้ทำได้โดยการกดปุ่ม C, A และ M ในการเลือกนั้น สังเกตลักษณะการทำงานได้ โดยมีไฟแสดงผลที่ปุ่มนั้น ๆ ซึ่งแต่ละปุ่มจะมีความหมายดังนี้

C คือ สัญญาณอินพุตจากภายนอก

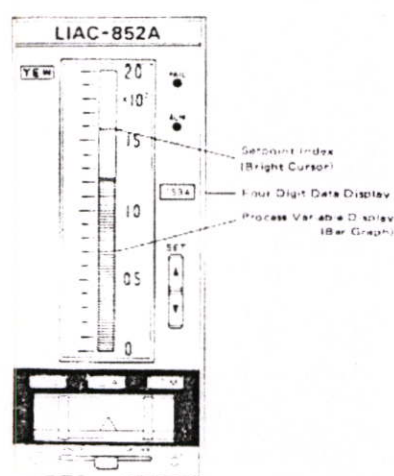
A คือ ส่วนการควบคุมแบบอัตโนมัติตามค่าพารามิเตอร์ที่ตั้งไว้แล้ว

M คือ ส่วนการควบคุมด้วยมือ

ผังรูปที่ 5.2 แสดงให้เห็นถึงแผงการควบคุมทางด้านหน้าของตัวควบคุม SLPC



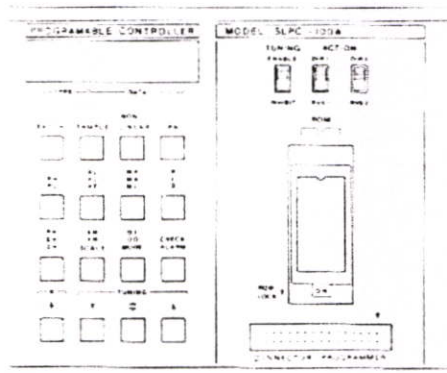
รูปที่ 5.2 รุ่นที่แสดงผลแบบขดลวดเคลื่อนที่



รูปที่ 5.3 รุ่นที่แสดงผลแบบดิจิทัล

### 5.3.4 แผงควบคุมด้านข้าง

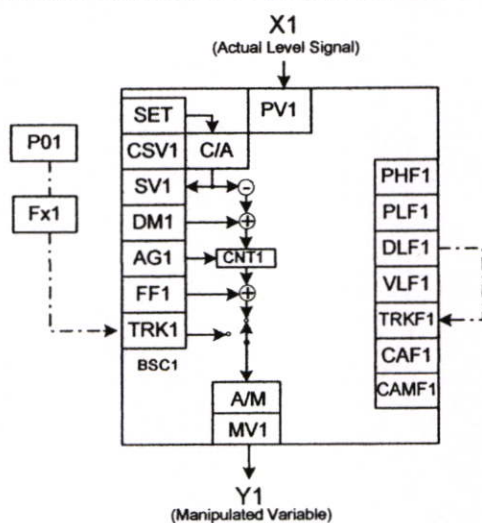
แผงควบคุมที่อยู่ด้านข้างใช้ในการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ซึ่งติดตั้งอยู่ทางด้านขวาของตัวควบคุม SLPC ซึ่งในรูปที่ 5.4 ประกอบไปด้วยปุ่มเลื่อน 3 ปุ่ม และปุ่มกดอีก 16 ปุ่ม และส่วนแสดงผลด้วยหน้าจอ LCD



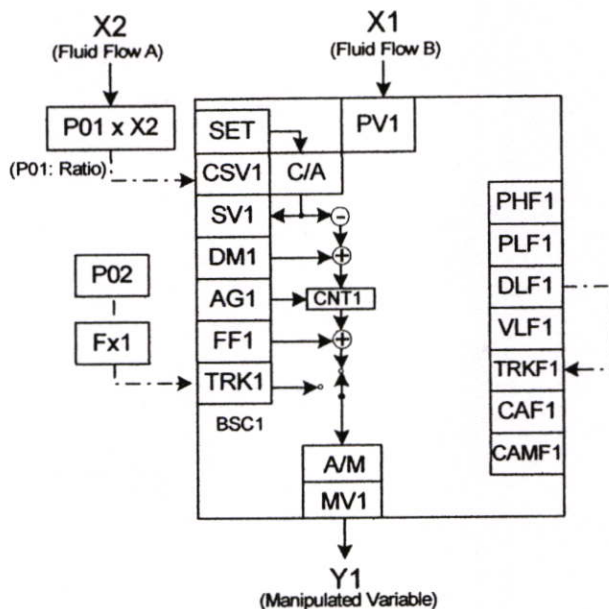
รูปที่ 5.4 แผงควบคุมด้านข้างของตัวควบคุม SLPC

### 5.3.5 การแทรกสัญญาณอินพุต

โหมด (Mode) การทำงานของตัวควบคุมจะถูกกำหนดจากค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าเป้าหมายกับค่าจริง และเมื่อค่าความคลาดเคลื่อนมีมากกว่าค่าที่กำหนดไว้ TRKF1 (tracking signal switching) จะอยู่ในสถานะปิด (OFF) และสวิทช์ไปยังส่วนของ CNT1 เพื่อใช้ตัวควบคุมแบบ พีไอดี หรือในทางตรงกันข้ามเมื่อค่าความคลาดเคลื่อนมีน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ จากนั้นส่วนของ TRKF1 จะอยู่ในสถานะเปิด (ON) และทำการสวิทช์ไปยังส่วนของ TRK1 เพื่อใช้เทคนิคการเปิดตารางที่ได้ทำการเขียนโปรแกรมไว้ บล็อกการทำงานดังที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 ส่วนของ TRKF1 ในตัวควบคุม SLPC ที่ใช้ในการทดลองควบคุมอุณหภูมิและการทดลองการควบคุมระดับของของเหลว

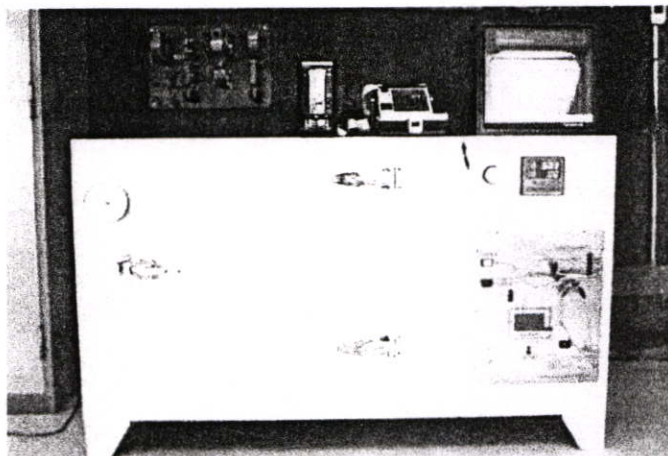


รูปที่ 5.6 ส่วนของ TRKF1 ในตัวควบคุม SLPC ที่ใช้ในการทดลองควบคุมอัตราการไหล

จากรูปที่ 5.6 ในส่วนของเทคนิคการเปิดตาราง (TRK1) สามารถเขียนโปรแกรมโดยการเขียนโปรแกรมเป็นฟังก์ชันดังที่แสดงในบล็อกฟังก์ชัน (Fx1) ที่รับค่าอินพุตมาจากค่าในบัฟเฟอร์ (P01) ที่เป็นค่าที่เหมาะสมกับการเริ่มต้นของกระบวนการนั้น ๆ และในรูปที่ 5.6 เป็นการใช้ฟังก์ชันที่มีสองอินพุตในส่วนการควบคุมแบบ Cascade ใช้ในการควบคุมอัตราการไหล

#### 5.4 ผลการทดลองกับกระบวนการควบคุมอุณหภูมิ

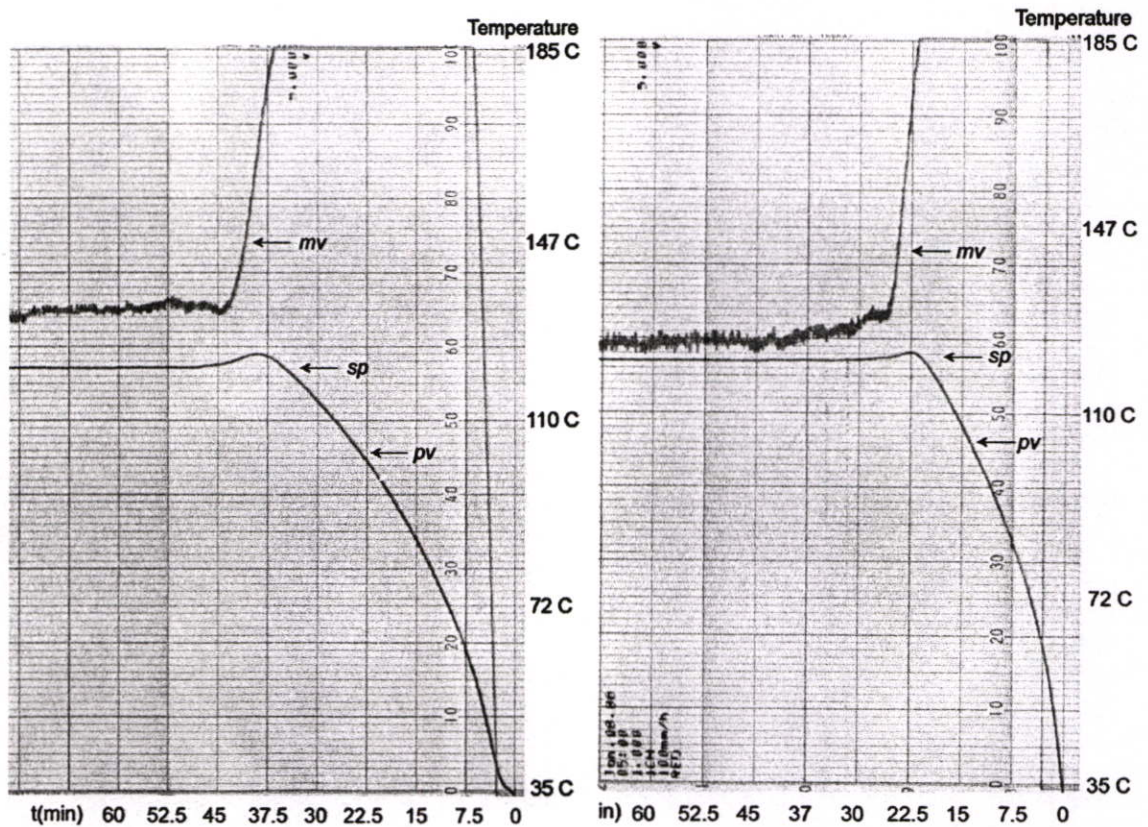
การทดลองนี้ เป็นการประยุกต์ใช้ตัวควบคุม SLPC ในการควบคุมอุณหภูมิภายในตู้อบ เปรียบเทียบกันระหว่างตัวควบคุม พีไอดี เพียงอย่างเดียวกับเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับตัวควบคุม พีไอดี ดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 การใช้ตัวควบคุม SLPC ควบคุมอุณหภูมิภายในตู้อบ



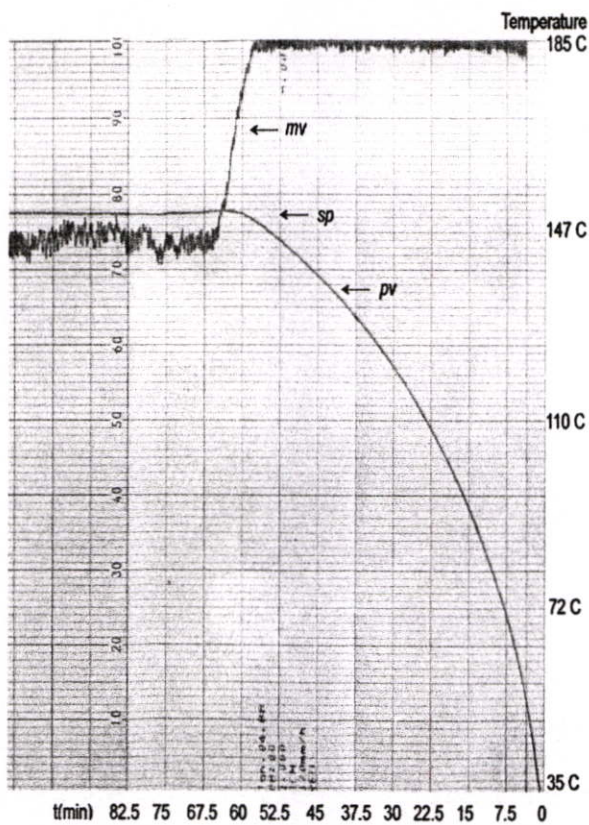
ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมจะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 5.9 – 5.12 โดยได้แสดงผลตอบสนองที่ค่าเป้าหมายอุณหภูมิ  $120^{\circ}\text{C}$ ,  $150^{\circ}\text{C}$  และ  $170^{\circ}\text{C}$  เปรียบเทียบกันระหว่างตัวควบคุมพีไอดี เพียงอย่างเดียวกับ เทคนิคการเปิดตารางร่วมกับ พีไอดี ทั้งแบบมีโหลดในตู้และไม่มีโหลด



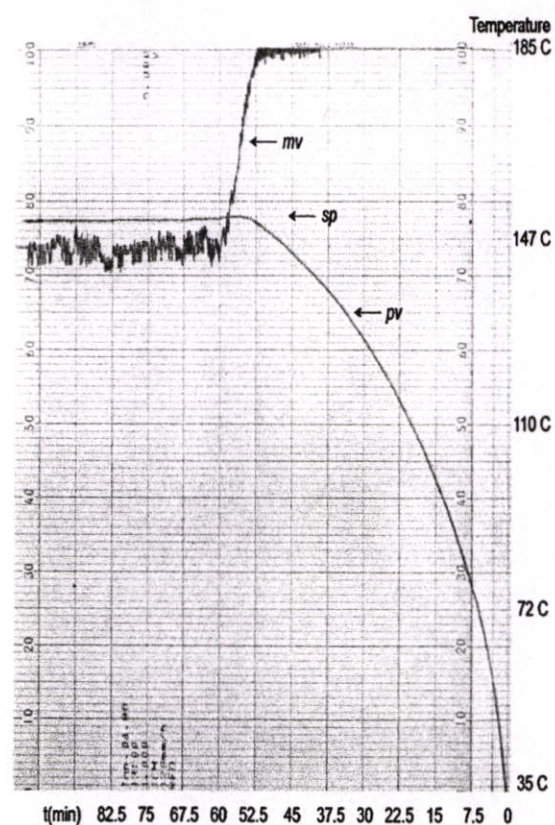
(ก)

(ข)

- รูปที่ 5.9** (ก) ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่อุณหภูมิ  $120^{\circ}\text{C}$  ด้วยการควบคุมแบบ พีไอดี ตามวิธีของ Ziegler-Nichols ( $K_c = 19.93$ ,  $T_i = 144$  sec และ  $T_d = 36$  sec) ความเร็วในการบันทึก 100 mm/h
- (ข) ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่อุณหภูมิ  $120^{\circ}\text{C}$  ด้วยเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับตัวควบคุมแบบ พีไอดี ที่ ( $K_c = 19.93$ ,  $T_i = 144$  sec และ  $T_d = 36$  sec) ความเร็วในการบันทึก 100 mm/h

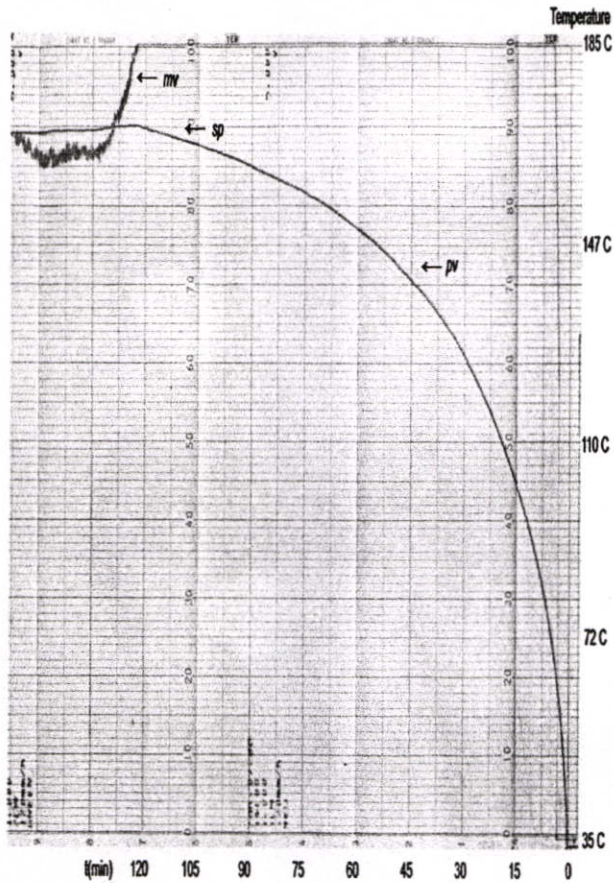


(ก)

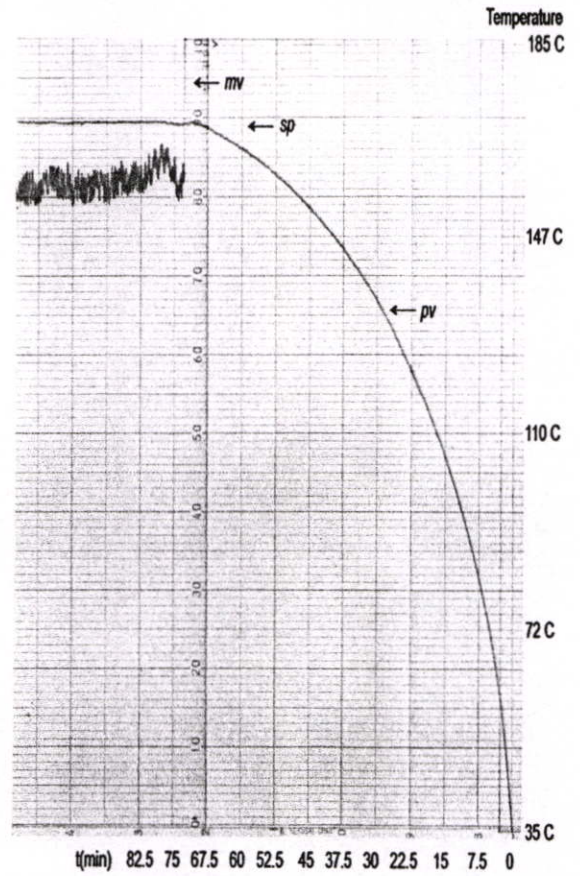


(ข)

- รูปที่ 5.10 (ก) ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่อุณหภูมิ  $150^{\circ}\text{C}$  ด้วยการควบคุมแบบ PI ตามวิธีของ Ziegler-Nichols ( $K_c = 30.09$ ,  $T_i = 72$  sec,  $T_d = 18$  sec) ความเร็วในการบันทึก  $100$  mm/h
- (ข) ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่อุณหภูมิ  $150^{\circ}\text{C}$  ด้วยเทคนิค การเปิดตารางร่วมกับตัวควบคุมแบบ พีไอดี ที่ ( $K_c = 30.09$ ,  $T_i = 72$  sec,  $T_d = 18$  sec) ความเร็วในการบันทึก  $100$  mm/h



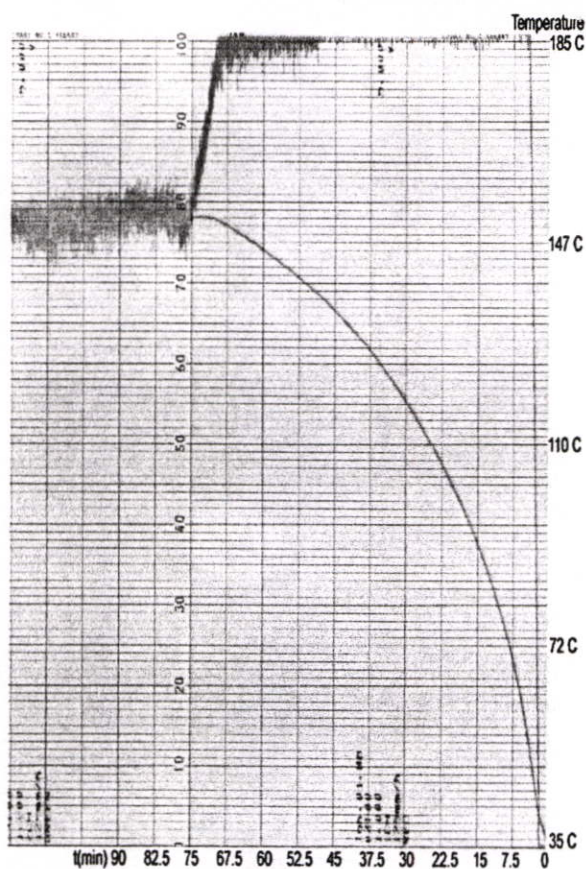
(ก)



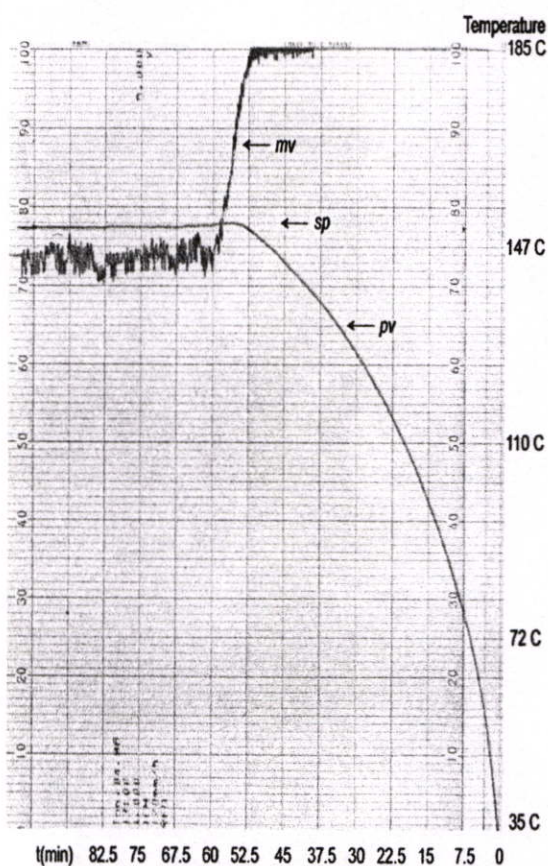
(ข)

รูปที่ 5.11 (ก) ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่อุณหภูมิ  $170^{\circ}\text{C}$  ด้วยการควบคุมแบบ พีไอดี ตามวิธีของ Ziegler-Nichols ( $K_c = 19.06$ ,  $T_i = 72 \text{ sec}$ ,  $T_d = 18 \text{ sec}$ ) ความเร็วในการบันทึก 100 mm/h

(ข) ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่อุณหภูมิ  $170^{\circ}\text{C}$  ด้วยเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับตัวควบคุมแบบ พีไอดี ที่ ( $K_c = 19.06$ ,  $T_i = 72 \text{ sec}$ ,  $T_d = 18 \text{ sec}$ ) ความเร็วในการบันทึก 100 mm/h



(ก)



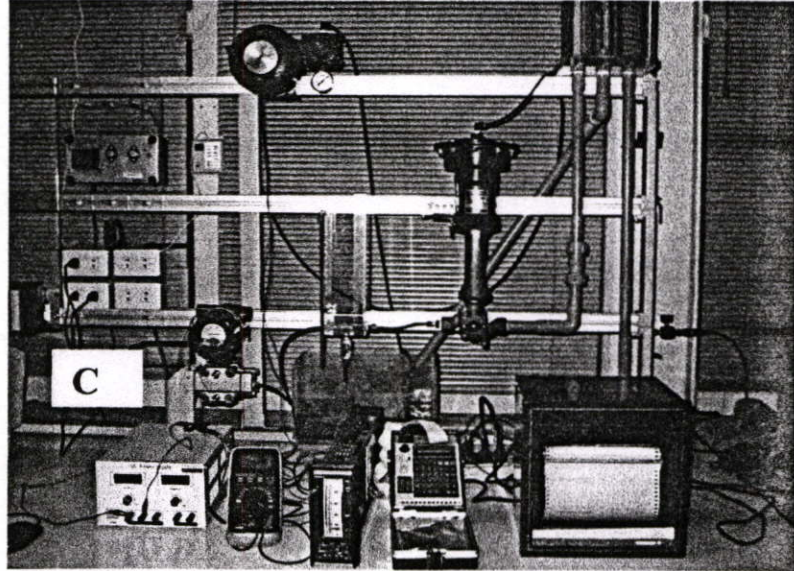
(ข)

รูปที่ 5.12 (ก) ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิที่ 150°C ในตู้อบที่มีโหลด โดยใช้ตัวควบคุมแบบ พีไอดี ที่ ( $K_c = 30.09$ ,  $T_i = 72$  Sec และ  $T_d = 18$  Sec) ความเร็วในการบันทึก 100 mm/h

(ข) ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิที่ 150 °C ในตู้อบที่มีโหลด โดยใช้เทคนิคการเปิดตารางร่วมกับตัวควบคุมแบบ พีไอดี ที่ ( $K_c = 30.09$ ,  $T_i = 72$  Sec และ  $T_d = 18$  Sec) ความเร็วในการบันทึก 100 mm/h

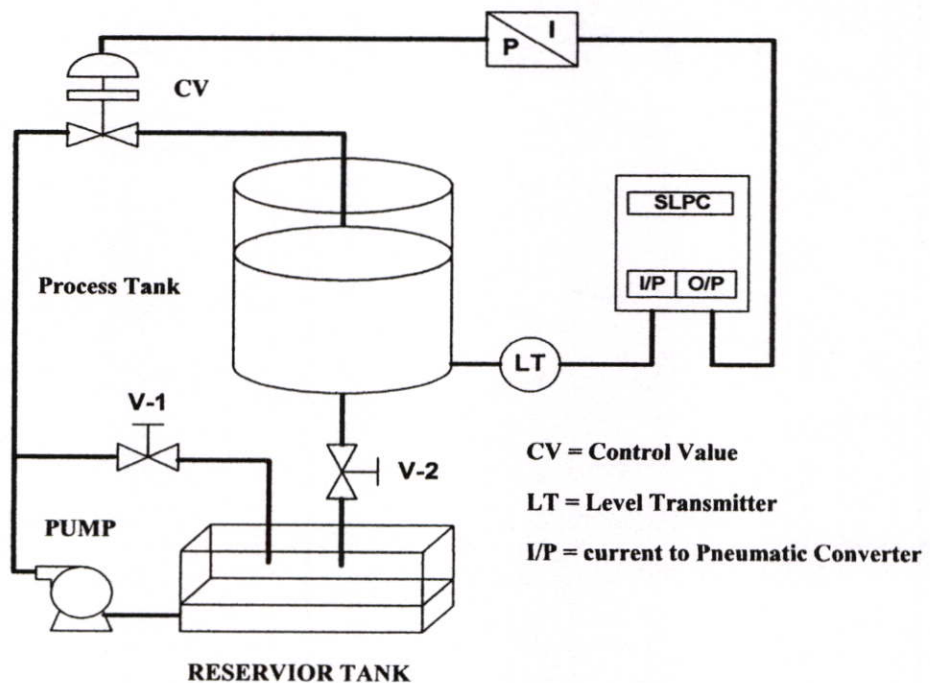
### 5.5 ผลการทดลองกับกระบวนการควบคุมระดับของของเหลว

การทดลองนี้ใช้ตัวควบคุม SLPC ในการควบคุมระดับของเหลวเปรียบเทียบกับระหว่างตัวควบคุม พีไอดี เพียงอย่างเดียวกับเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับตัวควบคุม พีไอดี ดังรูปที่ 5.13



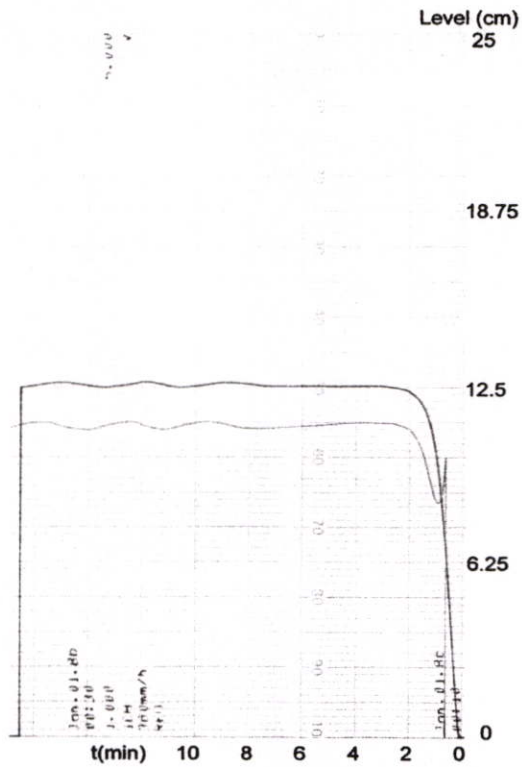
รูปที่ 5.13 การใช้ตัวควบคุม SLPC ควบคุมระดับของน้ำในถัง

จากรูปนำมาเขียนเป็น โครงสร้างการทดลองให้เห็น ได้ชัดเจนดังรูปที่ 5.14

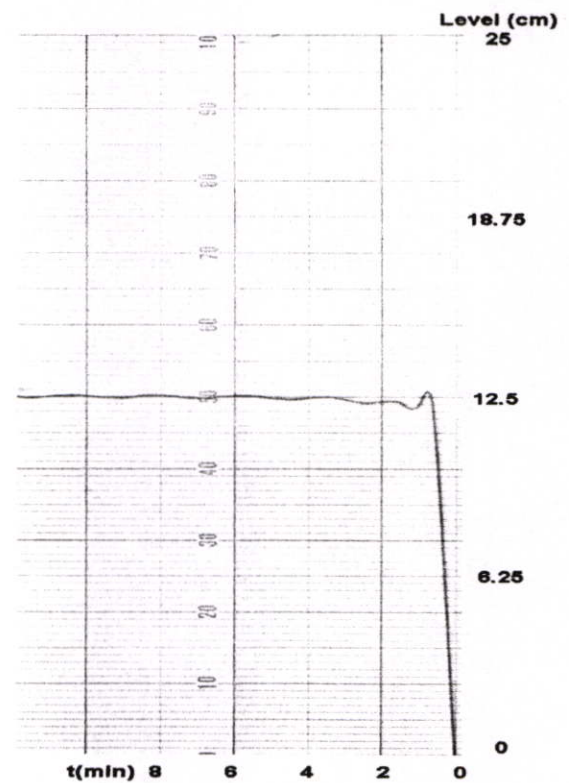


รูปที่ 5.14 โครงสร้างการทดลองกับกระบวนการควบคุมระดับของของเหลว

การทำงานของการทำงานของการทดลอง ป้อนน้ำจะทำหน้าที่สูบน้ำจากถังเก็บน้ำ (Reservior Tank) ขึ้นไป ตามท่อตลอดระยะเวลาการทดลอง ซึ่งน้ำที่สูบจะถูกส่งไปยังถังกระบวนการ (Process Tank) ผ่าน วาล์วควบคุม โดยมีวาล์วหมายเลข 1(V-1) ทำหน้าที่เป็นวาล์วบายพาส เพื่อให้ให้น้ำไหลย้อนกลับมาที่ ถังเก็บน้ำเมื่อวาล์วควบคุมปิด และน้ำที่อยู่ในถังกระบวนการจะไหลผ่านวาล์วหมายเลข 2 (V-2) ซึ่ง เปิดตลอดเวลาให้น้ำไหลกลับลงไปที่ถังเก็บ เริ่มต้นการทำงานเมื่อตั้งค่า SP แล้วตัวควบคุม SLPC จะออกแบบการทำงานออกเป็น 2 โหมด (mode) เป็นการใช้ Lookup Table Technique ร่วมกับตัว ควบคุมแบบ พีไอดี โดยเลือกใช้ SLPC Controller ของ Yokogawa ในช่วงแรกของการควบคุม เมื่อ กำหนดอุณหภูมิที่ต้องการแล้ว ตัวควบคุมจะปล่อยแรงดันไฟฟ้าอย่างเต็มที่ให้กับขดลวดความร้อน เมื่ออุณหภูมิเข้าใกล้อุณหภูมิที่ตั้งไว้ ตัวควบคุมจะนำค่าแรงดันที่จะปล่อยให้กับขดลวดความร้อนมา จากตารางที่ได้กำหนดไว้ล่วงหน้าแล้ว ซึ่งถือเป็นค่าเริ่มต้นก่อนที่จะเริ่มเข้าสู่การควบคุมแบบ พีไอดี เพื่อให้การควบคุมอุณหภูมิเข้าถึงเป้าหมาย เมื่อผลต่างของระดับอ้างอิงกับระดับจริง มีค่ามากกว่า ระดับคลาดเคลื่อนอ้างอิง (E) ระบบจะทำงานในส่วนของ Lookup Table Technique Mode ถ้าระดับ คลาดเคลื่อนอ้างอิงมีค่าน้อยกว่า (E) ระบบจะทำงานในส่วนของ พีไอดี ผลตอบสนองของ กระบวนการควบคุมจะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 5.15 – 5.17 โดยได้แสดงผลตอบสนองที่ค่าเป้าหมายที่ ระดับ 50%,70%,80% เปรียบเทียบกันระหว่างตัวควบคุม พีไอดี เพียงอย่างเดียวกับ เทคนิคการเปิด ตารางร่วมกับตัวควบคุมแบบ พีไอดี

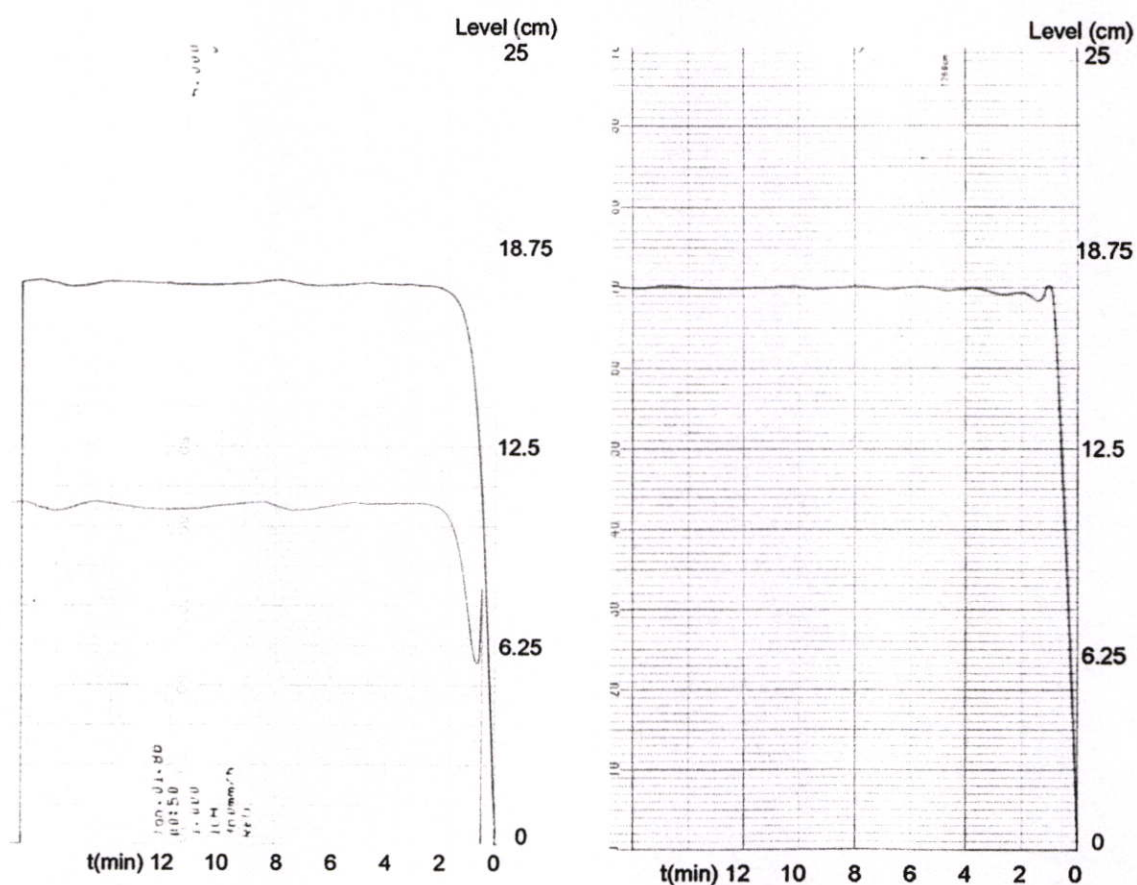


(ก)



(ข)

- รูปที่ 5.15** (ก) ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับของของเหลวในตลับที่ระดับ 50% ด้วยการควบคุมแบบ PI ตามวิธีของ Ziegler-Nichols ( $K_c = 6.39$  และ  $T_i = 33.3$  Sec) ความเร็วในการบันทึก 360 mm/h
- (ข) ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับที่ 50% โดยใช้เทคนิคการเปิด ตาราง ร่วมกับตัวควบคุมแบบ PI ที่ ( $K_c = 6.39$  และ  $T_i = 33.3$  Sec) ความเร็วในการบันทึก 360 mm/h

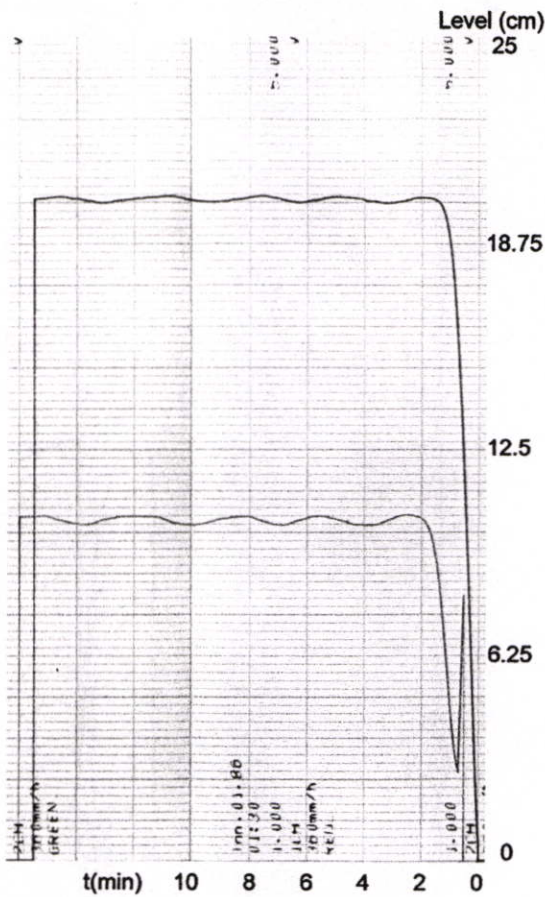


(ก)

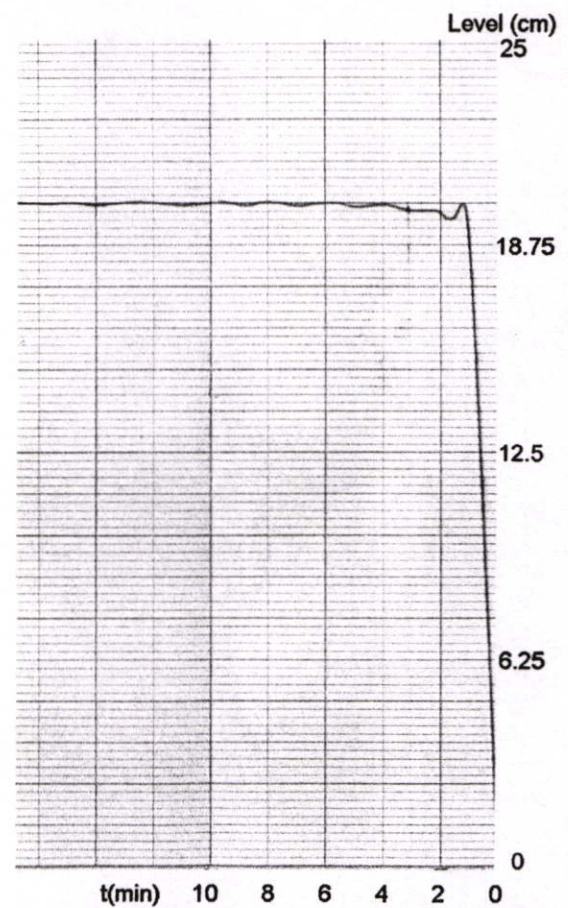
(ข)

รูปที่ 5.16 (ก) ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่ระดับ 70% ด้วย การควบคุมแบบ PI ตามวิธีของ Ziegler-Nichols ( $K_c = 3.52$  และ  $T_i = 33.3$  Sec) ความเร็วในการบันทึก 360 mm/h

(ข) ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับที่ 70% โดยใช้เทคนิคการเปิดตาราง ร่วมกับตัวควบคุมแบบ PI ที่ ( $K_c = 3.52$  และ  $T_i = 33.3$  Sec) ความเร็วในการบันทึก 360 mm/h



(ก)



(ข)

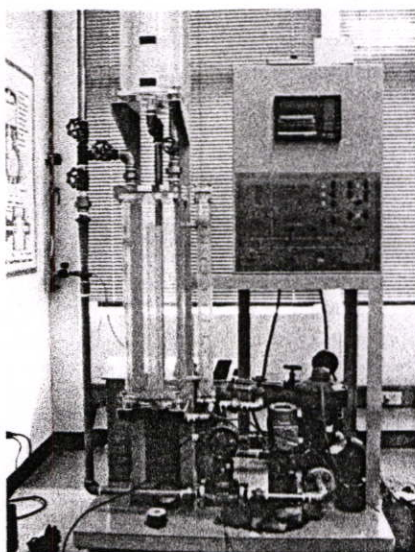
**รูปที่ 5.17** (ก) ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่ระดับ 80% ด้วยการควบคุม แบบ PI ตามวิธีของ Ziegler-Nichols ( $K_c = 3.02$  และ  $T_i = 33.3$  Sec) ความเร็วในการบันทึก 360 mm/h

(ข) ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับที่ 80% โดยใช้เทคนิคการเปิดตารางร่วมกับตัวควบคุมแบบ พีไอดี ที่ ( $K_c = 3.02$  และ  $T_i = 33.3$  Sec) ความเร็วในการบันทึก 360 mm/h

จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบแล้วจะเห็นได้ว่าการควบคุมระดับของของเหลวด้วยการควบคุมแบบ พีไอดี เพียงอย่างเดียวกับการควบคุมโดยใช้เทคนิคการเปิดตารางร่วมกับการควบคุมแบบ พีไอดี นั้นในกระบวนการควบคุมระดับน้ำนั้นเป็นกระบวนการที่เร็ว ดังนั้นช่วงเวลาที่เข้าสู่ค่าเป้าหมายนั้นค่อนข้างเร็ว ฉะนั้นผลการทดลองที่ออกมาจึงมีค่าไม่ค่อยแตกต่างกัน

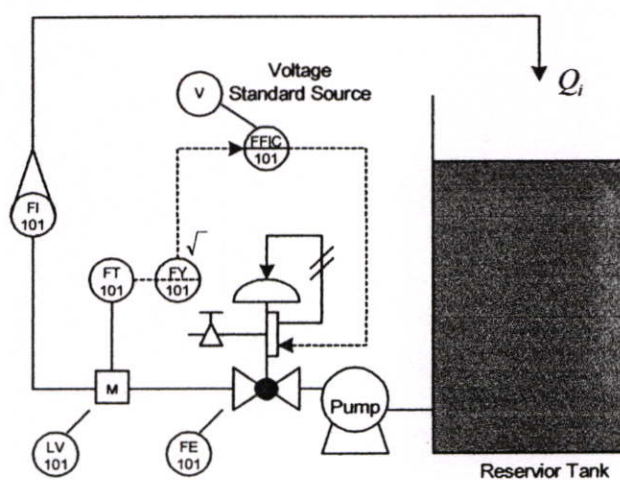
## 5.6 ผลการทดลองกับกระบวนการควบคุมอัตราการไหล

การทดลองนี้ใช้ตัวควบคุม SLPC ในการควบคุมอัตราการไหลระหว่างอินพุต (ก) และอินพุต (ข) ซึ่งอินพุตทั้งสองมีอัตราส่วนต่อกันเปรียบเทียบกันระหว่างการควบคุมอัตราการไหลด้วยตัวควบคุมแบบ พีไอดี เพียงอย่างเดียวกับการควบคุมอัตราการไหลโดยใช้เทคนิคการเปิดตารางร่วมกับตัวควบคุมแบบ พีไอดี ดังรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.18 การใช้ตัวควบคุม SLPC ควบคุมอัตราการไหล

จากรูปที่ 5.18 นำมาเขียนเป็นโครงสร้างการทดลองให้เห็น ได้ชัดเจนได้ดังรูปที่ 5.19

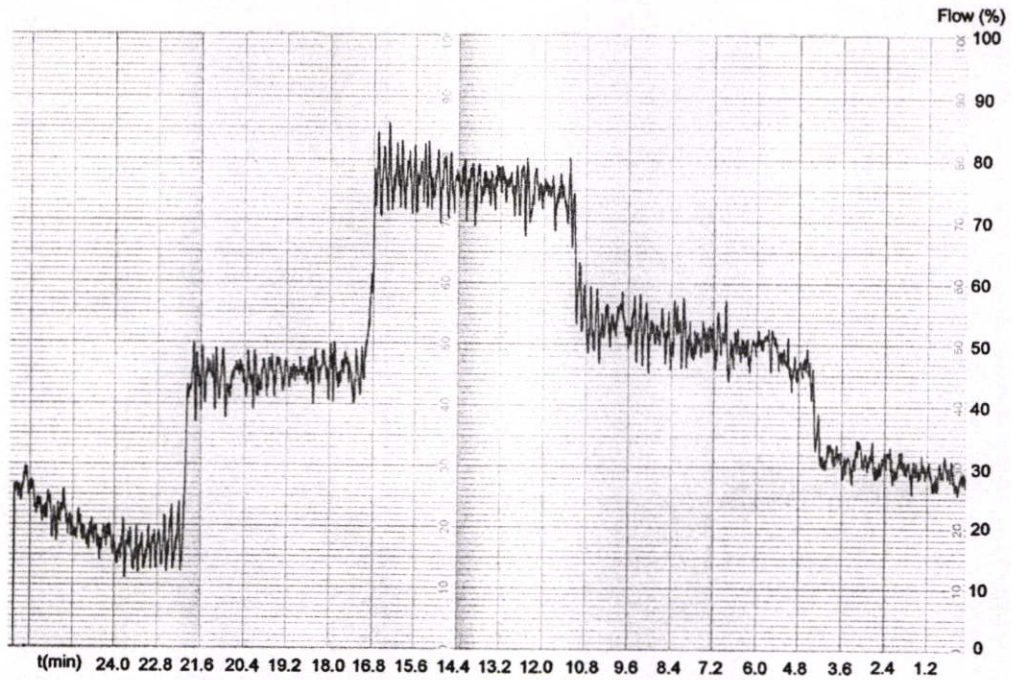


รูปที่ 5.19 การใช้ตัวควบคุม SLPC ควบคุมอัตราการไหล

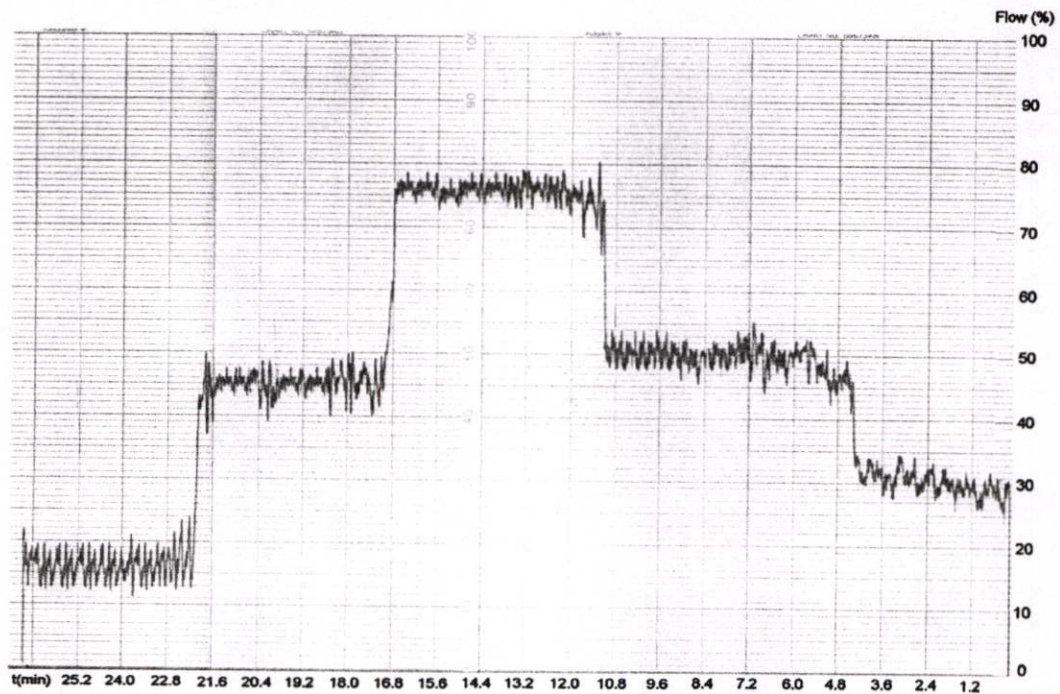
การทำงานของการควบคุมอัตราการไหลจากรูปที่ 5.19 เริ่มต้นจากปั้มน้ำสูบน้ำจากแท็งก์เก็บน้ำแล้วผ่านไปยังวาล์วควบคุมจากนั้นของเหลวจะไหลผ่านตัววัดอัตราการไหลเพื่อส่งสัญญาณเป็นสัญญาณอินพุต (X1) ไปยังตัวควบคุม SLPC เพื่อควบคุมอัตราการไหล ต่อจากตัววัดอัตราการไหลแล้วของเหลวจะไหลผ่านมิเตอร์วัดอัตราการไหล (Rota Meter) แล้วไหลผ่านไปยังถังน้ำที่อยู่ทางด้านบน จากแท็งก์น้ำทางด้านบนของเหลวก็จะไหลลงไปยังแท็งก์เก็บน้ำเหมือนเดิม

ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการนำเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับตัวควบคุมแบบ พีไอดี ในการควบคุมอัตราการไหล โดยเริ่มต้นเมื่อได้กำหนดค่าเป้าหมายแล้ว โปรแกรมจากตัวควบคุม (SLPC) จะนำค่าการเปิดวาล์วที่เหมาะสมจากตารางที่ (3.6) เป็นค่าเริ่มต้นที่เหมาะสม และเมื่อค่าอัตราการไหลจริงมีค่าใกล้เคียงกับค่าอัตราการไหลเป้าหมายแล้ว โปรแกรมจะเปลี่ยนโหมด (mode) การควบคุมไปใช้การควบคุมแบบพีไอ เพื่อรักษาระดับอัตราการไหล โดยในการทดลองการควบคุมอัตราการไหลและจากการออกแบบการทดลองการควบคุมอัตราการไหลจะต้องใช้การควบคุมที่มี 2 อินพุตจึงจำเป็นต้องมีสัญญาณอินพุตจากตัววัดอัตราการไหล 2 สัญญาณเพื่อใช้เป็นอัตราส่วนกัน แต่เนื่องจากชุดสาริตอัตราการไหลนั้นมีตัววัดอัตราการไหลเพียงตัวเดียว ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงออกแบบการทดลองให้สัญญาณอินพุตที่สองมาจากสัญญาณแรงดันไฟฟ้า (1-5 Vdc) เป็นสัญญาณอินพุตที่สอง (X2) เมื่อได้สัญญาณอินพุตที่สองแล้ว จากนั้นออกแบบการทดลองโดยให้อัตราการไหลของสัญญาณอินพุต (X1) และสัญญาณ (X2) เป็นอัตราส่วน 2:1 โดยผลการทดลองในรูปที่ 5.20 เป็นผลการทดลองการควบคุมอัตราการไหลด้วยการควบคุมแบบ PI ตามวิธีของ Ziegler-Nichols โดยออกแบบการทดลองการควบคุมให้มีการเปลี่ยนระดับค่าเป้าหมาย (Step change) เพื่อทดลองดูผลการตอบสนองการควบคุมอัตราส่วนระหว่างสัญญาณอินพุตทั้งสองสัญญาณ และผลตอบสนองการควบคุมค่าวาล์วที่เหมาะสมเพื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับตัวควบคุมแบบ พีไอดี เพื่อควบคุมอัตราการไหล ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 5.21

จากผลการทดลองในรูปที่ 5.20 คือการควบคุมแบบพีไอ และรูปที่ 5.21 คือการควบคุมด้วยเทคนิคการเปิดตารางร่วมกับการควบคุมแบบพีไอ ซึ่งจากรูปนั้น กราฟผลการทดลองจะแสดงค่ากระบวนการเพื่อเปรียบเทียบกันระหว่างเทคนิคทั้งสองแบบ ให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการควบคุมจากรูปเมื่อเปรียบเทียบแล้ว จะแสดงให้เห็นได้ว่าการควบคุมอัตราการไหลโดยใช้เทคนิคการเปิดตารางร่วมกับการควบคุมแบบพีไอนั้น สามารถรักษาค่าระดับอัตราการไหลได้ดีกว่าการควบคุมแบบพีไอเพียงอย่างเดียว และจากรูปยังแสดงให้เห็นว่าที่ค่าพุงเกินจากเทคนิคการเปิดตารางจะมีค่าน้อยกว่าการควบคุมอัตราการไหลแบบที่ใช้การควบคุมแบบพีไอเพียงอย่างเดียว โดยสามารถเปรียบเทียบได้จากรูปทั้งสองได้อย่างชัดเจนที่เวลา 25 นาที ซึ่งเป็นช่วงการเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 80% เป็น 40%



รูปที่ 5.20 ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอัตราไหลที่ค่าเป้าหมาย 20%, 60%, 100%, 80% และ 40% ด้วยการควบคุมแบบ PI ตามวิธีของ Ziegler-Nichols ( $K_c = 9$  และ  $T_i = 19.98$  Sec) ความเร็วในการบันทึก 600 mm/h



รูปที่ 5.21 ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอัตราไหลที่ค่าเป้าหมาย 20%, 60%, 100%, 80% และ 40% ด้วยการควบคุมแบบ PI ตามวิธีของ Ziegler-Nichols ร่วมกับเทคนิคการเปิดตารางที่ ( $K_c = 9$  และ  $T_i = 19.98$  Sec) ความเร็วในการบันทึก 600 mm/h

## บทที่ 6

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 6.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการประยุกต์ใช้เทคนิคในการควบคุมร่วมกับตัวควบคุมที่มีใช้อยู่ทั่วไป โดยอาศัยการการควบคุมร่วมกันระหว่างการทำงานในช่วงแรกของเทคนิคการเปิดตาราง และเมื่อกระบวนการที่ควบคุมมีค่าในกระบวนการที่ได้ตั้งค่าไว้จากตารางแบบรูปเปิดแล้ว โปรแกรมจะทำการเปลี่ยนแบบการควบคุมเป็นแบบ พีไอดี เพื่อให้กระบวนการเข้าสู่ค่าเป้าหมาย โดยที่ค่าพารามิเตอร์ของ พีไอดี นั้นค่าที่ได้นำมาจากการทดสอบสัญญาณแบบขั้นบันได (Step) ตามวิธีของ Ziegler-Nichols และค่าที่ใช้ในการเปิดตารางได้มาจากกระบวนการแบบรูปเปิด

จากผลการทดลองในบทที่ 5 ของกระบวนการควบคุมอุณหภูมินั้นแสดงให้เห็นว่าการควบคุมกระบวนการร่วมกันระหว่างเทคนิคการเปิดตารางกับตัวควบคุม พีไอดี สามารถช่วยให้ค่าในกระบวนการเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้เร็วขึ้นกว่าการควบคุมกระบวนการด้วยตัวควบคุม พีไอดี เพียงอย่างเดียว และสามารถลดค่าฟุ้งเกินได้และเกิดการแกว่งน้อยกว่า

จากผลการทดลองควบคุมกระบวนการควบคุมระดับของของเหลวจะเห็นได้ว่าการควบคุมให้ระดับเข้าสู่ค่าเป้าหมายนั้นเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างเทคนิคการเปิดตารางกับตัวควบคุม พีไอดี เพียงอย่างเดียว นั้น ผลสรุปได้ว่าเทคนิคที่นำเสนอ นั้นสามารถควบคุมระดับให้เข้าสู่เป้าหมายได้เร็วกว่าการควบคุมแบบ พีไอดี อย่างเดียวเพียงเล็กน้อยและมีค่าฟุ้งเกินมากกว่าเล็กน้อย อันเนื่องมาจากกระบวนการควบคุมระดับนั้นเป็นกระบวนการที่เร็วจึงทำให้การควบคุมทำได้ยาก แต่ก็ยังสามารถนำเทคนิคนี้ไปใช้ได้

และจากการทดลองสุดท้ายในเรื่องการควบคุมอัตราการไหลนั้นผลสรุปได้ว่าเทคนิคที่นำเสนอ นั้นสามารถควบคุมอัตราการไหลให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายได้เร็วและสามารถรักษาค่าอัตราการไหลให้อยู่ในค่าเป้าหมายได้ดีกว่าและมีค่าฟุ้งเกินน้อยเมื่อเทียบกับการควบคุมแบบ พีไอดี เพียงอย่างเดียว

### 6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

ข้อเสนอแนะและการพัฒนาสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ที่ใช้เทคนิคการควบคุมแบบการเปิดตารางร่วมกับตัวควบคุมแบบ พีไอดี เพื่อใช้ในการควบคุมกระบวนการต่าง ๆ ดังที่แสดงผลการ

ทดลองให้เห็นในบทที่ 5 นั้น ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการอื่น ๆ อีกได้ และสามารถใช้เป็นแนวทางในการปฏิบัติโดยการประยุกต์นำไปใช้กับกระบวนการที่ใช้งานอยู่จริงได้

สำหรับข้อจำกัดของการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ก็คือ หน่วยความจำของตัวควบคุมที่ใช้เขียนโปรแกรมเพื่อทดลองมีค่อนข้างน้อยไม่สามารถเขียนให้ดีเท่าที่ควร เริ่มแรกในส่วนของตัวควบคุมที่นำมาเขียนโปรแกรมนั้นต้องมีการเก็บค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ไว้ก่อนเพื่อให้กระบวนการนั้น ๆ สามารถเลือกค่าที่เหมาะสมนั้น ๆ ไปใช้ก่อนที่จะเปลี่ยนการควบคุมไปสู่การควบคุมแบบ พีไอดี และค่าพารามิเตอร์ที่ได้มานั้นมาจากกระบวนการแบบลูปเปิด ซึ่งมีข้อเสียคือถ้ากระบวนการที่ต้องการใช้เทคนิคนี้มีค่าพารามิเตอร์มาก ๆ หรือมีอินพุตที่มากกว่าหนึ่งนั้นจะต้องใช้หน่วยความจำมาก ๆ ในการเขียนโปรแกรมซึ่งก่อนที่จะใช้เทคนิคนี้ต้องคำนึงถึงเป็นอันดับต้น ๆ และอีกข้อหนึ่งก็คือโปรแกรมที่ใช้ในการคุมแต่ละกระบวนการนั้น ไม่สามารถนำไปใช้งานแทนกันได้อันเนื่องมาจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาจากกระบวนการแบบลูปเปิดมีค่าแตกต่างกันในแต่ละกระบวนการ ซึ่งแนวทางพัฒนาสามารถเลือกใช้ตัวควบคุมให้เหมาะสมและรองรับการปรับปรุงแก้ไขและการเขียนโปรแกรมให้มีความสามารถ มีความฉลาดมากขึ้นจะทำให้เทคนิคนี้มีประโยชน์อย่างมากในเรื่องความเร็วของกระบวนการที่ใช้ควบคุมและยังช่วยในเรื่องของการประหยัดพลังงานในเชิงพาณิชย์ได้อีกด้วย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] G. Thomas et al., "A combined feedforward-feedback computer system for hot strip mill", *C.R.M. Metallurgical Rep.*, Vol. 52, pp. 17-13, May 1978
- [2] Dong H. Chyung, "A Tracking Controller for a Class of Smooth Nonlinear Systems", *Proceeding of the 33<sup>rd</sup> Conference on Decision and Control*, FL, pp. 3628-3629, December 1994
- [3] Remn-Min Guo, "Modeling and Simulation of Ran-Out Table Cooling Control Using Feedforward-Feedback and Element Tracking System", *IEEE. Trans. on Industry Application*, Vol. 33, No.2, March/April, 1997
- [4] N. S. Samaras and M. A. Simaan, "Water-Cooled End-Point Boundary Temperature Control of Hot Strip via Dynamic Programming", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 34, No. 6. Nov/Dec., 1998
- [5] S-Y Jeong, M. Lee, S-Y Lee, J-M Cho, and C. H. Park, "Improving Lookup Table Control of a Hot Coil Strip Process with Online Retractable RBF Network", *IEEE. Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 47, No. 3, June 2000
- [6] P. Klaynil, P. Pannil, A. Chaikla, P. Julsereewong, and K. Tirasesth, "Application of Lookup Table Technique with ฟีดโอดี Controller for Fast Flow Ratio Response", *KACC2000 Abstract Book, 15<sup>th</sup> Korea Automatic Control Conference*, Korea, pp. 504, 2000
- [7] N. Sangjeen and P. Julsereewong, "A Design of Two-mode Controller Using PC-based Lookup Table Technique and ฟีดโอดี Control Algorithm", *Proceeding of the 2002 International Conference on Control, Automation and Systems*, Korea, pp. 412-417, 2002
- [8] Yokogawa Electric Cor., "*Technical Information: YS170 Programmable Type Programming Functions*", 1<sup>st</sup> Edition, 1992
- [9] C. A. Smith and A.B. Corripio, *Principles and Practice of Automatic Process Control*, 2<sup>nd</sup> Edition, John Wiley & Sons, Inc., 1997
- [10] Frank Kreith and Mark S. Bohn, *Principle of heat transfer*, St.Paul, MN West, c1993

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

**ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์  
และได้รับการตีพิมพ์**

International Conference on Control,  
Automation and Systems

# ICCAS 2003

October 22-25, 2003  
Gyeongju TEMF Hotel,  
Gyeongju, KOREA

- Control Theory and Applications
- Control Devices and Instruments
- Sensors and Signal Processing
- Intelligent Systems
- Information and Networking
- Manufacturing Systems and Automation
- Process Systems
- Industrial Applications
- Navigation, Guidance and Control
- Multimedia Systems
- Robotics and Applications
- Biomedical Engineering Systems

<http://www.iccas.org>

Tel +82-2-508-5801 / Fax +82-2-555-1746



Weerasak Tojang, Pittaya Pannil, Amphawan Chaikla,  
 Prasit Julsereewong, and Kitti Tirasesth

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok, Thailand  
 (Tel: +66-2-739-2406-7; E-mail: kjprasit@kmitl.ac.th)

**Abstract:** This paper presents a combined lookup table technique and PI-type controller. The purpose of the designed controller is applied to control the nonlinear system as thermal process. The proposed controller is easy and convenient to design based on a commercial controller. The performances of the proposed controller were studied using the thermal plant model under temperature control. The experimental results included demonstrate the good performance of the proposed controller.

**Keywords:** feed forward control, PI control, lookup table, temperature control

## 1. INTRODUCTION

The main purpose of a control system is basically to force the output to follow a reference input with zero steady state error while satisfying certain transient requirements such as the settling time, overshoot, and smoothness of the transient response. Usually, a step or ramp function is used as the reference input. As long as the settling time is short enough, the output can follow any reference input with sufficiently small error. In general, the nonlinear control systems such as temperature control must be investigated on a case by case basis. With the complexity of the heat transfer behavior and long transport delay, the large overshoot and the long rise time may be achieved from the feedback control based on the PID controller. Thus, the feedback control system individually cannot provide the control accuracy without an auxiliary feedforward loop [1]-[4]. The feedforward control measures the disturbances before they enter the process and calculates the required value of the manipulated variable to maintain the controlled variable at its desired value or set point. If the calculation is performed correctly, the controlled variable should remain undisturbed. An application of statistical method based on the lookup table technique can improve the control accuracy [5]-[7].

This paper aims to present the combined controller based on the same principle as in [6]-[7]. However, we develop this idea in a different way to control the temperature of the thermal process that can provide a simple and fast response control using the commercial controller, Yokogawa Electric corporation's Single Loop Programmable Controller (SLPC) [8]. The proposed controller has two modes to control the

temperature of thermal process, one is lookup table mode and the other is PI-type control mode. The feedforward control based on the lookup table technique is designed to reduce the delay time while the feedback control based on the PI-type control is applied to achieve the target temperature. The thermal plant model at Process Control Laboratory, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Thailand, is used to study the performances of the designed controller, i.e. rise time, fall time and overshoot. The experimental results verify that the proposed controller outperforms (more smoothness and faster response) the system using only the PI-type control.

## 2. TEMPERATURE CONTROL LOOP

The studied thermal plant model under temperature control and its sketched overall structure are shown in Fig. 1 and Fig. 2, respectively. The objective is to maintain the output temperature of the thermal plant model or the oven  $T_o(t)$  at its desired value or set point  $T_{set}(t)$ . The output temperature or controlled variable is monitored and recorded using a thermometer (TI102) and a recorder (TR101), respectively. The phase control is applied to adjust the electric voltage  $v_p(t)$  supplied to the oven heating element. The electric current  $i_p(t)$  related to the electric voltage passes through the oven heater thus generating heat or the input temperature  $T_i(t)$ . A thermostat in the system is used to keep the temperature lower than the preset maximum value (200°C). The electric fan is installed to circulate air throughout the oven.

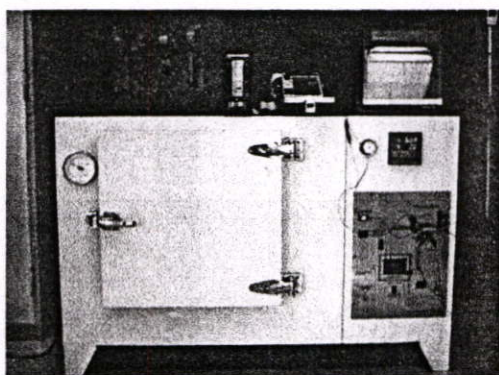


Fig. 1 The studied thermal plant model

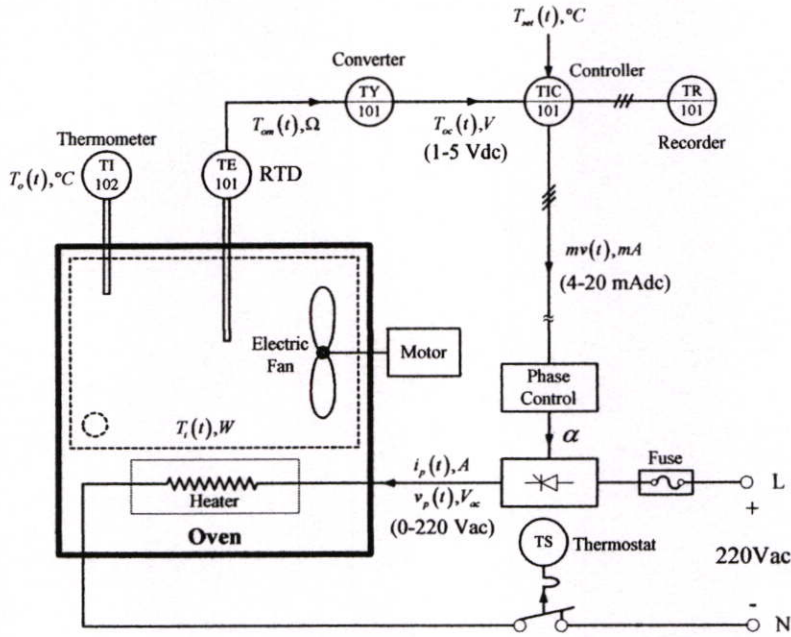


Fig. 2 Temperature feedback control loop

The feedback control scheme works as follows: the output temperature or controlled variable  $T_{om}(t)$  is measured using a sensor RTD (TE101) and a converter (TY101) to generate a signal  $T_{oc}(t)$  that is proportional to the oven temperature. The converted signal  $T_{oc}(t)$  is sent to the controller (TIC101) using the programmable commercial controller as SLPC. The function of the controller is generated an output signal or manipulated variable  $mv(t)$ , on the basis of the error or the difference between the measured value and the set point. The manipulated variable is then connected to the phase control. The function of the phase control is to adjust the electric voltage  $v_p(t)$  so that it is proportional to the controller output signal  $mv(t)$ , where the electric voltage is varied from 0 to 220V<sub>ac</sub>. Thus, the generated heat  $T_i(t)$  is a function of the supplied electric voltage  $v_p(t)$ .

The main disadvantage of feedback control systems [9] is that in order for it to compensate for entering disturbances, the controlled variable must first deviate from set point. Feedback control acts upon an error between the set point and the controlled variable. This means that once a disturbance

enters the process, it must propagate through the process and force the controlled variable to deviate from the set point before corrective action can be taken to compensate for the disturbance. Thus, perfect control, defined as no deviation of the controlled variable from the set point in spite of disturbances, cannot be achieved with feedback control.

### 3. THE PROPOSED CONTROLLER

#### 3.1 Design of the proposed controller

To develop the feedback control as shown in Fig. 2, this paper introduces the two-mode controller, which has the lookup table technique and the PI control. The lookup table technique is designed to reduce the delay time while the PI control is applied to achieve the desired temperature. Fig. 3 shows the block diagram of the proposed controller using the commercial controller SLPC. The proposed concept can be graphically displayed by the following flowchart (see Fig. 4)

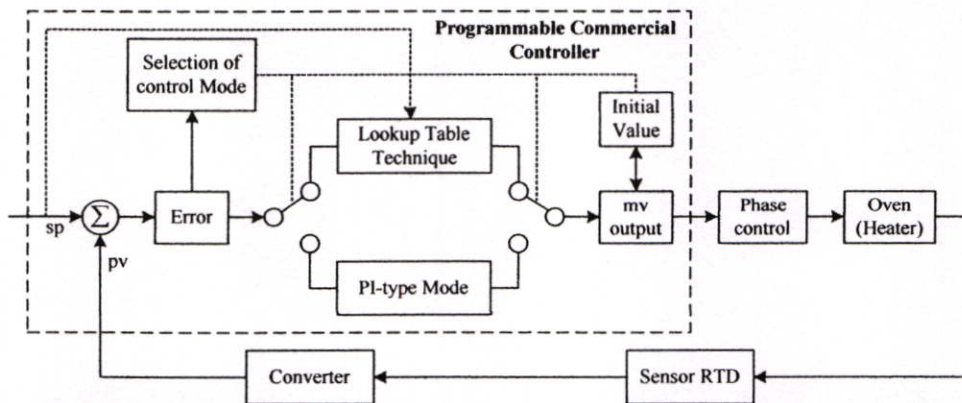


Fig. 3 Block diagram showing the proposed controller concept

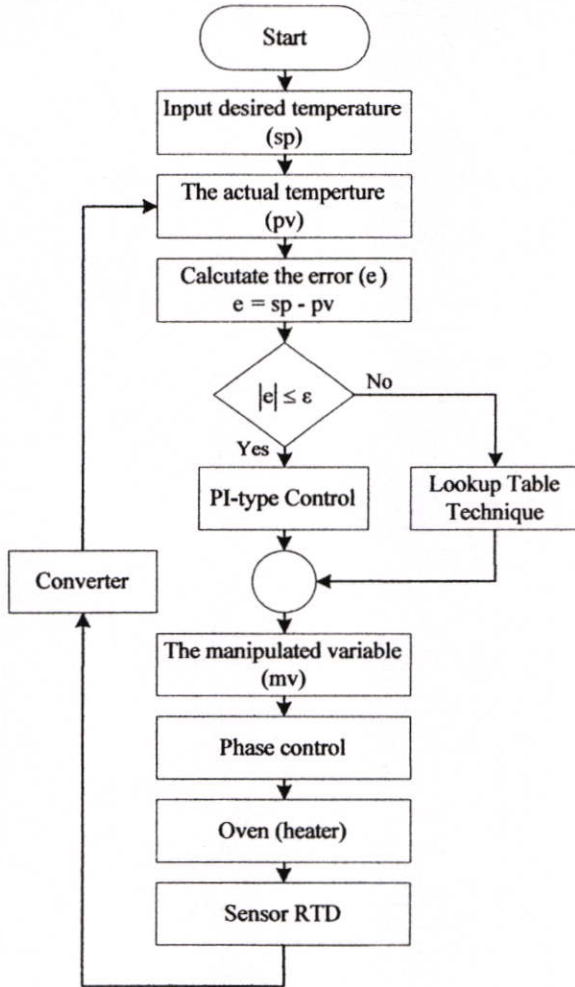


Fig. 4 Flowchart of temperature control

The magnitude of calculated temperature error signal  $|e|$  is compared with the preset value  $\varepsilon$ , which is set to  $\pm 10\%$  of full scale. If the magnitude error signal is greater than the preset value, the manipulated signal is then controlled using an appropriate value obtained from the lookup table technique. Otherwise, the PI-type controls the temperature to maintain the specified temperature based on the suitable  $K_p$  and  $T_i$  parameters.

### 3.2 Lookup Table Technique

The data of lookup table technique was determined by the thermodynamic principles of heat transfer [10]. The three modes of heat transfer are radiation, convection, and conduction. The studied oven in Fig. 1 is based on the convection, which has the heat transfer rate as

$$Q = h \times A (T_w - T_b) \quad (1)$$

Where:

$Q$  is the heat transfer rate (W)

$h$  is the heat transfer coefficient ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ )

$A$  is the surface area of the medium ( $\text{m}^2$ )

$T_w$  is the temperature of the heating element ( $^{\circ}\text{C}$  or  $\text{K}$ )

$T_b$  is the temperature of the surrounding fluid (air) ( $^{\circ}\text{C}$  or  $\text{K}$ )

The enclosure of studied heater is stainless steel, thus the heat transfer coefficient  $h$  is approximately  $3.7 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ . The surface area of the medium  $A$  assuming a free-standing enclosure is about  $3.7 \text{ m}^2$ . The temperature of the surrounding fluid or the ambient temperature is about  $27^{\circ}\text{C}$  or  $300\text{K}$ . Substituting these values into the Eq. (1), the heat transfer rate can be written as

$$Q = 13.69 (T_w - 300) \quad (2)$$

From Eq. (2), the temperature of the heating element in Kelvin (K) can be given by

$$T_w = \frac{Q}{13.69} + 300 \quad (3)$$

From section 2, the operation of the studied convection oven is based on the electric current passing through the oven heater, thus generating heat can be written as

$$P = i_p^2 R \quad (4)$$

Where:

$P$  is the generated heat (W)

$i_p$  is the supplied current passing through the oven heater (A)

$R$  is the heater resistance ( $\Omega$ ),  $23.4\Omega$  used for the studied oven.

Based on the principle of ideal energy conversion, if we neglect the heat losses, the generated heat is equal to the heat transfer rate as

$$P = Q \quad (5)$$

Substituting Eq. (5) into Eq.(3), the temperature of the heating element can be rewritten as

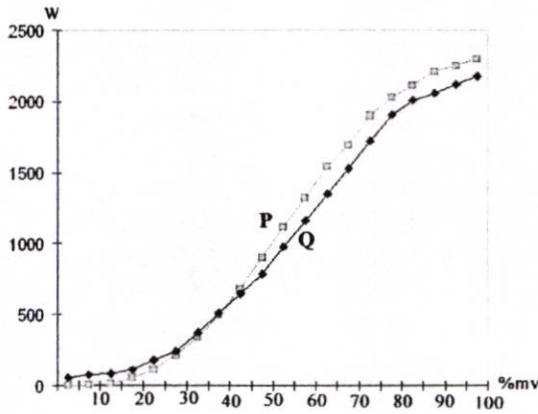
$$T_w = \frac{P}{13.69} + 300 = \frac{(i_p^2 R)}{13.69} + 300 \quad (6)$$

It is clearly seen that, the temperature of the heating element or the desired temperature  $T_w(t)$  can be controlled by the electric current  $i_p(t)$  related to the electric voltage  $v_p(t)$ , which is directly adjusted by the phase control. Table 1 shows the data for lookup table technique. The data in 2<sup>nd</sup> to 5<sup>th</sup> columns are measured values from the experimental plant model in Fig. 1, while the data in 6<sup>th</sup> to 8<sup>th</sup> columns are calculated values using the Eqs. (2)–(5).

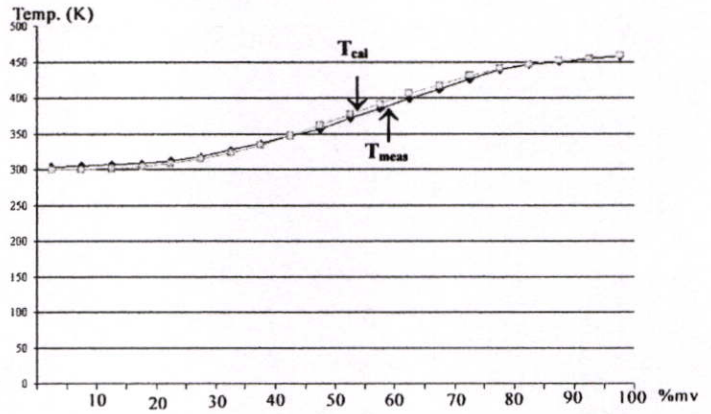
From the lookup table data in Table 1, Fig. 5(a) and Fig. 5(b) show the comparisons between the values  $P$  and  $Q$ ,  $T_{\text{meas}}$  and  $T_{\text{cal}}$ , respectively. The percentage of manipulated signal is varied from 0 to 100. It should be noted that the proposed lookup table technique can be applied to improve the control accuracy.

Table 1 Lookup table data of the proposed controller

mv (%)	Measured Voltage [v <sub>J</sub> ] (V)	Measured Current [i <sub>J</sub> ] (A)	Measured Temperature [T <sub>meas</sub> ] (C)	Measured Temperature [T <sub>meas</sub> ] (K)	Calculated Generating Heat [P] (W)	Calculated Heat Transfer Rated [Q] (W)	Calculated Temperature [T <sub>cal</sub> ] (K)
5	0.18	0.2	31	304	0.936	54.76	300.065
10	3.63	0.3	32.1	305.1	2.106	75.48	300.14625
15	20	0.8	33.1	306.1	14.976	83.509	301.04
20	33.6	1.5	35.1	308.1	52.65	110.889	303.65625
25	50.6	2.2	39.8	312.8	113.256	175.232	307.865
30	67.9	3	44.4	317.4	210.6	238.206	314.625
35	85.4	3.8	54	327	337.896	369.63	323.465
40	103.1	4.6	64	337	495.144	506.53	334.385
45	120.5	5.4	74	347	682.344	643.43	347.385
50	137.3	6.2	84	357	899.496	780.33	362.465
55	153	6.9	98	371	1114.074	971.99	377.36625
60	167.1	7.5	111.6	384.6	1316.25	1158.174	391.40625
65	180	8.1	125.2	398.2	1535.274	1344.358	406.61625
70	191.4	8.5	138.6	411.6	1690.65	1527.804	417.40625
75	201.3	9	152.4	425.4	1895.4	1716.726	431.625
80	209.4	9.3	166	439	2023.866	1902.91	440.54625
85	215	9.5	173.4	446.4	2111.85	2004.216	446.65625
90	218	9.7	177	450	2201.706	2053.5	452.89625
95	220.5	9.8	181.3	454.3	2247.336	2112.367	456.065
100	222.73	9.9	185.5	458.5	2293.434	2169.865	459.26625



(a)



(b)

Fig. 5 The comparison of Lookup table data as shown in Table 1  
 (a) the comparison between the values of P and Q  
 (b) the comparison between the values of T<sub>meas</sub> and T<sub>cal</sub> (K)

4. EXPERIMENTAL RESULTS

The performances of the proposed combined controller were observed using the thermal plant model under the temperature control as shown in Fig. 1. The desired temperature is set to 150°C. Using the programmable SLPC based on the proposed technique, the parameters K<sub>p</sub> and T<sub>i</sub>

are set to 5.5 and 420sec, respectively. Fig. 6(a) and Fig. 6(b) show the step responses as the results using only the PI-type control and the proposed technique, respectively.

From the experimental result comparison, it is clearly seen that the response obtained from using the proposed technique outperforms that using only PI-type control. That is, the

response is smoother during the initial state and the time to enter the steady state is shorter.

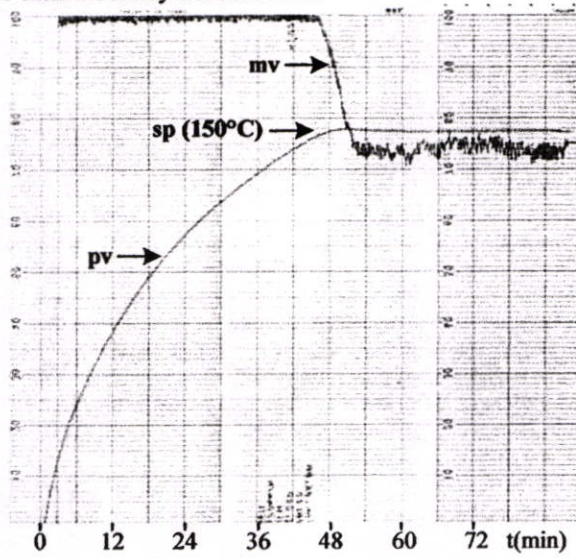


Fig. 5 Experimental result using only PI-type control

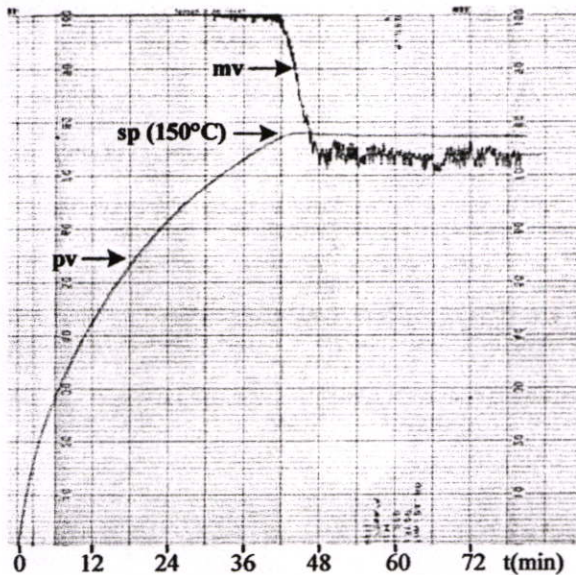


Fig. 6 Experimental result using the proposed technique

## 5. CONCLUSION

This paper has introduced the temperature control technique, which combines the feedforward-based lookup table and feedback-based PI controls. The proposed technique controls the temperature to maintain the target temperature with fast and smooth response. The experimental results demonstrate that the proposed control technique has sufficient performances for nonlinear system as thermal process.

## REFERENCE

- [1] G. Thomas et al., "A combined feedforward-feedback computer system for hot strip mill", *C.R.M. Metallurgical Rep.*, Vol. 52, pp. 17-13, May 1978
- [2] Dong H. Chyung, "A Tracking Controller for a Class of Smooth Nonlinear Systems", *Proceeding of the 33<sup>rd</sup> Conference on Decision and Control*, FL, pp. 3628-3629, December 1994
- [3] Remn-Min Guo, "Modeling and Simulation of Ran-Out Table Cooling Control Using Feedforward-Feedback and Element Tracking System", *IEEE Trans. on Industry Application*, Vol. 33, No.2, March/April, 1997
- [4] N. S. Samaras and M. A. Simaan, "Water-Cooled End-Point Boundary Temperature Control of Hot Strip via Dynamic Programming", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 34, No. 6. Nov/Dec., 1998
- [5] S-Y Jeong, M. Lee, S-Y Lee, J-M Cho, and C. H. Park, "Improving Lookup Table Control of a Hot Coil Strip Process with Online Retractable RBF Network", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 47, No. 3, June 2000
- [6] P. Klaynil, P. Pannil, A. Chaikla, P. Julsereewong, and K. Tirasesth, "Application of Lookup Table Technique with PID Controller for Fast Flow Ratio Response", *KACC2000 Abstract Book, 15<sup>th</sup> Korea Automatic Control Conference*, Korea, pp. 504, 2000
- [7] N. Sangjeen and P. Julsereewong, "A Design of Two-mode Controller Using PC-based Lookup Table Technique and PID Control Algorithm", *Proceeding of the 2002 International Conference on Control, Automation and Systems*, Korea, pp. 412-417, 2002
- [8] Yokogawa Electric Cor., "Technical Information: YS170 Programmable Type Programming Functions", 1<sup>st</sup> Edition, 1992
- [9] C. A. Smith and A.B. Corripio, *Principles and Practice of Automatic Process Control*, 2<sup>nd</sup> Edition, John Wiley & Sons, Inc., 1997
- [10] Frank Kreith and Mark S. Bohn, *Principle of heat transfer*, St.Paul, MN West, c1993

ภาคผนวก ข.

**โปรแกรมที่ใช้ในการวิจัย**

Temperature Control (PID + Lookup Table)				
Step	Command	Register	Value	Description
1	LD	A15		Process Variable (S2)
2	LD	A12		Mainipulate Variable (S1)
3	LD	P1		
4	-			
5	CMP			
6	GIF	14		
7	LD	DO1		
8	GIF	17		
9	LD	K1	1.000	
10	ST	A9		
11	LD	K1	1.000	ON
12	ST	FL9		Switch Tracking
13	GO	21		
14	LD	DO1		
15	NOT			
16	GIF	25		
17	LD	K2	0.000	OFF
18	ST	FL9		
19	LD	K1	1.000	Mainipulate Variable
20	ST	DO1		
21	LD	X1		
22	BSC			
23	ST	Y1		
24	END			
25	LD	K7	0.019	MV HI Line 1
26	LD	A12		
27	CMP			
28	NOT			
29	GIF	33		
30	LD	K3	0.075	MV Line 1
31	ST	A9		
32	GO	75		
33	LD	K8	0.090	MV HI Line 2
34	LD	A12		
35	CMP			
36	NOT			
37	GIF	41		
38	LD	K4	0.225	MV Line 2
39	ST	A9		
40	GO	75		Return
41	LD	K9	0.348	MV HI Line 3
42	LD	A12		
43	CMP			
44	NOT			
45	GIF	53		

46	LD	A12		
47	LD	K13	0.778	
48	*			
49	LD	K14	0.230	Mainipulate Variable
50	+			
51	ST	A9		
52	GO	75		Return
53	LD	K10	0.878	MV HI Line 4
54	LD	A12		
55	CMP			
56	NOT			
57	GIF	65		
58	LD	A12		
59	LD	K15	0.567	Mainipulate Variable
60	*			
61	LD	K16	0.303	Mainipulate Variable
62	+			
63	ST	A9		
64	GO	75		
65	LD	K11	0.923	MV HI Line 5
66	LD	A12		
67	CMP			
68	NOT			
69	GIF	73		
70	LD	K5	0.825	MV Line 5
71	ST	A9		
72	GO	75		Return
73	LD	K6	0.925	MV Line 6
74	ST	A9		
75	LD	K1	1.000	Mainipulate Variable
76	ST	FL9		
77	GO	19		

Level Control (PID + Lookup Table)				
Step	Command	Register	Value	Description
1	LD	A15		; pv
2	LD	A16		; sp
3	LD	P01		; gap
4	-			; sp-gap
5	CMP			; pv>=sp-gap?
6	GIF	13		; go to line 13 if result is 1
7	LD	K04		; load 0 flag
8	ST	DO02		; store to A/M flag
9	ST	FL11		; manual mode active
10	LD	K02		
11	ST	A14		; A/M Flag = 1
12	GO	33		
13	LD	K03		
14	ST	DO02		
15	LD	DO01		
16	NOT			
17	GIF	24		
18	LD	A15		; Read PV
19	F(x)			; Function
20	ST	A09		; Out INPUT Tracking
21	LD	K03		; Flag = 1
22	ST	FL09		; Flag SW On
23	GO	26		
24	LD	K4		; Tracking SW Off
25	ST	FL09		
26	LD	DO02		
27	ST	FL11		
28	LD	X1		
29	BSC			
30	ST	Y1		
31	LD	K04		
32	ST	DO01		
33	END			

K02	1
K03	1
K04	0
DO01	1
DO02	0

Flow Control (PID + Lookup Table)				
Step	Command	Register	Value	Description
1	LD	A15		; pv
2	LD	A16		; sp
3	LD	P01		; gap
4	-			; sp-gap
5	CMP			; pv>=sp-gap?
6	GIF		13	; go to line 13 if result is 1
7	LD	K02		; load 0 flag
8	ST	D02		; store to A/M flag
9	ST	FL11		; manual mode active
10	LD	K01		; load 1 flag
11	ST	A14		; store to mv (100%)
12	GO		50	; go to end line
13	LD	K01		; load 1 flag
14	ST	D02		; store to A/M flag
15	LD	D01		; 1 time flag
16	NOT			; Invert D01
17	GIF		41	; go to standard pid if result is 1
18	LD	K10		; read curve comparison point1
19	LD	A12		; read sp2
20	CMP			
21	NOT			
22	GIF		32	
23	LD	A12		
24	LD	K11		; slope m1
25	*			; multiple
26	LD	K01		; offset c1 (1.00)
27	-			; minus
28	LD	K12		; offset c1
29	-			
30	ST	A9		; store in tracking register
31	GO		38	; jump to set tracking sw
32	LD	A12		; read sp2
33	LD	K13		; slope m2
34	*			; multiple
35	LD	K14		; offset c2
36	-			; minus
37	ST	A9		; store in tracking register
38	LD	K01		; load 1 flag
39	ST	FL9		; track switch on
40	GO		43	; go to PID if result is 1
41	LD	K02		; load 0 flag (Standard Pid)
42	ST	FL9		; track switch off
43	LD	D02		; load A/M flag (Pid)
44	ST	FL11		; Auto mode active
45	LD	X01		; load input1

46	BSC			; PID block
47	ST	Y01		; out mv to output 1
48	LD	K02		; load 0 flag
49	ST	D01		; clear i time flag
50	END			; end of program

### Flow Control Plant

#### Initial Value

K01	Set	flag	1.000
K02	Clear	flag	0.000
K10	Line Check Point 0.307		
K11	Slope1		0.062
K12	Offset1		0.230
K13	Slope2		0.036
K14	Offset2		0.589
DO1	1 time	flag	1.000
DO2	A/M	flag	0.000

## ประวัติผู้เขียน

นายวีระศักดิ์ โตแจ้ง เกิดเมื่อวันที่ 16 มีนาคม 2521 กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับ  
ปฐมนศึกษาในปี พ.ศ. 2533 จากโรงเรียนมหาสวัสดี จ.นนทบุรี, ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย พ.ศ.  
2538 จากโรงเรียนสุวรรณารามวิทยาคม กรุงเทพมหานคร , ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูงใน  
ปี พ.ศ. 2542, สาขาเทคนิคคอมพิวเตอร์ จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตนนทบุรี และ  
สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ สาขา  
เทคโนโลยีเครื่องมือวัดและการควบคุม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม และเข้าศึกษาต่อระดับ  
ปริญญาโทสาขาวิศวกรรมการวัดคุม คณะบัณฑิตวิทยาลัยในปี พ.ศ.2546 มีผลงานทางวิชาการ  
ที่ได้รับการตีพิมพ์ ณ ประเทศเกาหลี

ปัจจุบันทำงานอยู่บริษัทเอกชน ตำแหน่งวิศวกร ส่วนระบบอัตโนมัติและเครื่องมือวัด ฝ่าย  
วิศวกรรม