

การออกแบบตัวควบคุมแบบสองสถานะหลายระดับ สำหรับการควบคุมอุณหภูมิ

DESIGN OF AN N-STEP ON-OFF CONTROLLER FOR TEMPERATURE CONTROL



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2548

ISBN 974-15-1902-8

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบตัวควบคุมแบบสองสภาวะหลายระดับ สำหรับการควบคุมอุณหภูมิ

DESIGN OF AN N-STEP ON-OFF CONTROLLER FOR TEMPERATURE CONTROL



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 60518
วัน,เดือน,ปี - ๑ พ.ศ. 2549

b.....
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ ISBN 974-15-1902-8 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN OF AN N-STEP ON-OFF CONTROLLER FOR TEMPERATURE CONTROL



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

2005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2005

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG ตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบตัวควบคุมแบบสองสภาวะหลายระดับ สำหรับ การควบคุมอุณหภูมิ
นักศึกษา	นายทรงวุฒิ ชวัญใจ
รหัสนักศึกษา	45061161
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการวัดคุม
พ.ศ.	2548
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. ประสิทธิ์ จุลเสวีวงศ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นการพัฒนาและออกแบบตัวควบคุมที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้เข้าสู่เป้าหมายได้เร็วที่สุด และสามารถลดขนาดการแกว่งของอุณหภูมิของกระบวนการทางความร้อน วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้เป็นการนำเสนอเทคนิคการควบคุมแบบสองสภาวะหลายระดับ สำหรับการควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งสามารถนำไปออกแบบใช้งานกับตัวควบคุมเชิงพาณิชย์ที่สามารถแสดงค่าและโปรแกรมได้ ได้โดยง่ายและสะดวกยิ่งขึ้น การศึกษาครั้งนี้ได้ทดสอบสมรรถนะของเทคนิคการควบคุมแบบสองสภาวะหลายระดับ โดยการนำไปทดลองกับชุดทดลองการควบคุมอุณหภูมิ ผลการทดลองแสดงว่า เทคนิคการควบคุมอุณหภูมิแบบสองสภาวะหลายระดับ สามารถควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการทางความร้อนให้เข้าสู่เป้าหมายได้เร็วขึ้น และสามารถลดขนาดการแกว่งของอุณหภูมิลงได้

Thesis Title	Design of An n-step On-Off Controller for Temperature Control
Student	Mr. Songwut Khwanjai
Student ID.	45061161
Degree	Master of Engineering
Programme	Instrumentation Engineering
Year	2005
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Prasit Julsereewong

ABSTRACT

The present study is a design and development of the temperature controller that are able to achieve the desired temperature in shorter time and effectively decrease the oscillation of temperature in the thermal process. The objective of this study is to present and demonstrate the use of a more simple and convenient n-step On-Off controller that can be applied with the programmable commercial controller. The thermal plant model was experimental to observe the performance of the proposed controller. The experimental results demonstrate that the n-step On-Off controller can achieve the desired temperature in a shorter time as well as effectively decrease the oscillation of the temperature.

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.5 การทดลองนำเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิที่ออกแบบไปใช้ทดลองเสมือนการใช้ งานจริงโดยการอบอาหาร.....	94
5.6 การออกแบบเทคนิคการควบคุมแบบสองสภาวะหลายระดับกับระบบควบคุม ระดับของของเหลวและผลการทดลอง.....	106
5.7 สรุปผลการทดลอง.....	137
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	138
6.1 บทสรุปและวิจารณ์.....	138
6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา.....	139
เอกสารอ้างอิง.....	140
ภาคผนวก.....	142
ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์.....	143
ภาคผนวก ข. ตัวควบคุมที่ใช้ในการออกแบบเทคนิคการควบคุม.....	150
ภาคผนวก ค. โปรแกรมที่ใช้ในการวิจัย.....	155
ประวัติผู้เขียน.....	164

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 แสดงผลตอบสนองของรูปตัว S เมื่อใช้วิธี Process Reaction Curve.....	67
5.2 แผนภูมิเส้นแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงในแต่ละระดับการดำเนินการ ณ อุณหภูมิเป้าหมายที่ 90 °C ของจำนวน n เท่ากับ 5 ระดับ.....	69
5.3 แผนภูมิแท่งแสดงระดับสัญญาณควบคุมในแต่ละระดับการดำเนินการ ณ อุณหภูมิ เป้าหมายที่ 90 °C เมื่อมีจำนวนของระดับดำเนินการ n เท่ากับ 5 ระดับ.....	70
5.4 แสดงโปรแกรมคำสั่งของ Block เทคนิคการควบคุมที่นำเสนอ ณ อุณหภูมิเป้าหมาย 38.7% หรือที่อุณหภูมิ 90 °C.....	71
5.5 แสดงโปรแกรมจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ Simulink ที่อุณหภูมิ เป้าหมาย 38.7% หรือที่อุณหภูมิ 90 °C.....	71
5.6 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการจากการจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์ ณ อุณหภูมิเป้าหมาย 38.70% หรือที่อุณหภูมิ 90 °C.....	72
5.7 แสดงแผนผังการทดลองของหลักการควบคุมอุณหภูมิที่เป้าหมาย 90 °C.....	73
5.8 แผนภูมิเส้นแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงในแต่ละระดับการดำเนินการ ณ อุณหภูมิเป้าหมายที่ 120 °C ของจำนวน n เท่ากับ 5 ระดับ.....	74
5.9 แผนภูมิแท่งแสดงระดับสัญญาณควบคุมในแต่ละระดับการดำเนินการ ณ อุณหภูมิ เป้าหมาย 120 °C เมื่อมีจำนวนของระดับดำเนินการ n เท่ากับ 5 ระดับ.....	75
5.10 แสดงโปรแกรมคำสั่งของ Block เทคนิคการควบคุมที่นำเสนอ ณ อุณหภูมิเป้าหมาย 58.05% หรือที่อุณหภูมิ 120 °C.....	76
5.11 แสดงโปรแกรมจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ Simulink ที่อุณหภูมิ เป้าหมาย 58.05% หรือที่อุณหภูมิ 120 °C.....	76
5.12 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการจากการจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์ ณ อุณหภูมิเป้าหมาย 58.05% หรือที่อุณหภูมิ 120 °C.....	77
5.13 แสดงแผนผังการทดลองของหลักการควบคุมอุณหภูมิที่เป้าหมาย 120 °C.....	78
5.14 แผนภูมิเส้นแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงในแต่ละระดับการดำเนินการ ณ อุณหภูมิเป้าหมายที่ 150 °C ของจำนวน n เท่ากับ 5 ระดับ.....	79
5.15 แผนภูมิแท่งแสดงระดับสัญญาณควบคุมในแต่ละระดับการดำเนินการ ณ อุณหภูมิ เป้าหมายที่ 150 °C เมื่อมีจำนวนของระดับดำเนินการ n เท่ากับ 5 ระดับ.....	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.29 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่เป้าหมาย 58.05% หรือที่ 120 °C ที่ความเร็วในการบันทึก 125 mm./h. เมื่อใช้เทคนิคการควบคุมที่ออกแบบ.....	91
5.30 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่เป้าหมาย 77.40% หรือที่ 150 °C ที่ความเร็วในการบันทึก 125 mm./h. เมื่อใช้การควบคุมแบบ On-Off ทั่วไป.....	92
5.31 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่เป้าหมาย 77.40% หรือที่ 150 °C ที่ความเร็วในการบันทึก 125 mm./h. เมื่อใช้การควบคุมแบบ Proportional ด้วยค่าพารามิเตอร์ $K_p=10$	92
5.32 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่เป้าหมาย 77.40% หรือที่ 150 °C ที่ความเร็วในการบันทึก 125 mm./h. เมื่อใช้การควบคุมแบบ PID ตามวิธีของ Ziegler-Nichols ด้วยค่าพารามิเตอร์ $K_c=10$, $T_i=120$ sec. และ $T_d=5$ sec.	93
5.33 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่เป้าหมาย 77.40% หรือที่ 150 °C ที่ความเร็วในการบันทึก 125 mm./h. เมื่อใช้เทคนิคการควบคุมที่ออกแบบ.....	93
5.34 แสดงการทดลองอบอาหารโดยใช้เนื้อไก่รูปทรงกระบอกพื้นที่ 0.013 ตารางเมตร.....	94
5.35 แสดงการควบคุมอุณหภูมิแบบป้อนกลับในสภาวะการทดลองอบอาหาร.....	95
5.36 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าของ P และ \dot{Q} จากข้อมูลในตารางที่ 5.1.....	98
5.37 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าของ T_{meas} และ T_{cal} จากข้อมูลในตารางที่ 5.1.....	99
5.38 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่เป้าหมาย 77.4% หรือที่ 150 °C ที่ความเร็วในการบันทึก 125 mm./h. เมื่อใช้การควบคุมแบบ PID ตามวิธีของ Ziegler-Nichols ด้วยค่าพารามิเตอร์ $K_c=10$, $T_i=120$ sec. และ $T_d=5$ sec. โดยการใส่อาหารในขณะเตาอบมีอุณหภูมิเริ่มแรก.....	100
5.39 แสดงผลของการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่เป้าหมาย 77.4% หรือที่ 150 °C เมื่อใช้การควบคุมแบบ PID โดยการใส่อาหารในขณะเตาอบมีอุณหภูมิเริ่มแรก.....	100
5.40 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่เป้าหมาย 77.4% หรือที่ 150 °C ที่ความเร็วในการบันทึก 125 mm./h. เมื่อใช้การควบคุมแบบ PID ตามวิธีของ Ziegler-Nichols ด้วยค่าพารามิเตอร์ $K_c=10$, $T_i=120$ sec. และ $T_d=5$ sec. โดยการใส่อาหารในขณะเตาอบมีอุณหภูมิ 150 °C.....	101
5.41 แสดงผลของการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่เป้าหมาย 77.4% หรือที่ 150 °C เมื่อใช้การควบคุมแบบ PID โดยการใส่อาหารในขณะเตาอบมีอุณหภูมิ 150 °C.....	101

เอกสารนี้เป็นความลับ การเปิดเผยโดยไม่ได้รับอนุญาตจะถือว่าผิดกฎหมาย ผู้ที่ฝ่าฝืนจะถูกลงโทษตามกฎหมายที่เกี่ยวข้อง

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.42 แผนภูมิแท่งแสดงระดับสัญญาณควบคุมในการทดลองอบอาหาร ณ อุณหภูมิเป้าหมายที่ 150 °C เมื่อมีจำนวนของระดับดำเนินการ n เท่ากับ 5 ระดับ.....	102
5.43 แสดงแผนผังการทดลองของหลักการควบคุมอุณหภูมิที่เป้าหมาย 150 °C.....	103
5.44 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่เป้าหมาย 77.4% หรือที่ 150 °C ที่ความเร็วในการบันทึก 125 mm./h. เมื่อใช้เทคนิคการควบคุมที่ออกแบบโดยการใส่อาหารในขณะที่เตาอบมีอุณหภูมิเริ่มแรก.....	104
5.45 แสดงผลของการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่เป้าหมาย 77.4% หรือที่ 150 °C เมื่อใช้เทคนิคการควบคุมที่ออกแบบ โดยการใส่อาหารในขณะที่เตาอบมีอุณหภูมิเริ่มแรก.....	104
5.46 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่เป้าหมาย 77.4% หรือที่ 150 °C ที่ความเร็วในการบันทึก 125 mm./h. เมื่อใช้เทคนิคการควบคุมที่ออกแบบโดยการใส่อาหารในขณะที่เตาอบมีอุณหภูมิ 150 °C.....	105
5.47 แสดงผลของการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่เป้าหมาย 77.4% หรือ 150 °C เมื่อใช้เทคนิคการควบคุมที่ออกแบบ โดยการใส่อาหารในขณะที่เตาอบมีอุณหภูมิ 150 °C.....	105
5.48 แสดงการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมที่ใช้ในการออกแบบกับกระบวนการควบคุมระดับของของเหลวที่ไหลทดลอง.....	106
5.49 แสดงโครงสร้างการทดลองกับกระบวนการควบคุมระดับของของเหลว.....	107
5.50 แสดงระบบควบคุมระดับของของเหลวในการทดลอง.....	108
5.51 แสดงลักษณะและขนาดของถังกระบวนการที่ใช้ในการทดลอง.....	110
5.52 แผนภูมิเส้นแสดงระดับอัตราการไหลออก Q_o ในแต่ละระดับของของเหลวเป้าหมาย จากตัวอย่างข้อมูลในตารางที่ 5.2.....	113
5.53 แผนภูมิเส้นแสดงระดับสัญญาณควบคุม mv ในแต่ละระดับของของเหลวเป้าหมาย จากตัวอย่างข้อมูลในตารางที่ 5.2.....	113
5.54 แสดงแผนภูมิเส้นของค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงในแต่ละระดับการดำเนินการที่ออกแบบ.....	116
5.55 แผนภูมิแท่งแสดงระดับสัญญาณควบคุมในแต่ละระดับการดำเนินการ ณ ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 30% หรือที่ระดับความสูง 7.6 cm. (วาล์วควบคุมชนิดปกติเปิด)....	117
5.56 แสดงโปรแกรมคำสั่งของ Block เทคนิคการควบคุมที่นำเสนอ ณ ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 30% หรือที่ระดับความสูง 7.6 cm.	118

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.57 แสดงโปรแกรมจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์โดยการใช้ Simulink ที่ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 30%.....	118
5.58 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการจากการจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์ ณ ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 30% หรือที่ระดับความสูง 7.6 cm.	119
5.59 แสดงแผนผังการทดลองของหลักการควบคุม ณ ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 30%....	120
5.60 แสดงแผนภูมิเส้นของค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงในแต่ละระดับการดำเนินการที่ออกแบบที่เป้าหมาย 50%.....	121
5.61 แผนภูมิแท่งแสดงระดับสัญญาณควบคุมในแต่ละระดับการดำเนินการ ณ ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 50% หรือที่ระดับความสูง 12.7 cm.	122
5.62 แสดงโปรแกรมคำสั่งของ Block เทคนิคการควบคุมที่นำเสนอ ณ ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 50% หรือที่ระดับความสูง 12.7 cm.	123
5.63 แสดงโปรแกรมจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์โดยการใช้ Simulink ที่ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 50%.....	123
5.64 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการจากการจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์ ณ ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 50% หรือที่ระดับความสูง 12.7 cm.	124
5.65 แสดงแผนผังการทดลองของหลักการควบคุม ณ ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 50%....	125
5.66 แสดงแผนภูมิเส้นของค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงในแต่ละระดับการดำเนินการที่ออกแบบที่เป้าหมาย 70%.....	126
5.67 แผนภูมิแท่งแสดงระดับสัญญาณควบคุมในแต่ละระดับการดำเนินการ ณ ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 70% หรือที่ระดับความสูง 17.8 cm.	127
5.68 แสดงโปรแกรมคำสั่งของ Block เทคนิคการควบคุมที่นำเสนอ ณ ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 70% หรือที่ระดับความสูง 17.8 cm.	128
5.69 แสดงโปรแกรมจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์โดยการใช้ Simulink ที่ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 50%.....	128
5.70 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการจากการจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์ ณ ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 70% หรือที่ระดับความสูง 17.8 cm.	129
5.71 แสดงแผนผังการทดลองของหลักการควบคุม ณ ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 70%....	130

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.72 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับของของเหลวที่เป้าหมาย 30% หรือที่ 7.6 cm. ที่ความเร็วในการบันทึก 360 mm./h. เมื่อใช้การควบคุมแบบ On-Off ทั่วไป.....	131
5.73 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับของของเหลวที่เป้าหมาย 30% หรือที่ 7.6 cm. ที่ความเร็วในการบันทึก 360 mm./h. เมื่อใช้การควบคุมแบบ PI ตามวิธีของ Ziegler-Nichols ด้วยค่าพารามิเตอร์ $K_c = 1.57$ และ $T_i = 40$ sec.	132
5.74 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับของของเหลวที่เป้าหมาย 30% หรือที่ 7.6 cm. ที่ความเร็วในการบันทึก 360 mm./h. เมื่อใช้เทคนิคการควบคุมที่ออกแบบ.....	132
5.75 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับของของเหลวที่เป้าหมาย 50% หรือที่ 12.7 cm. ที่ความเร็วในการบันทึก 360 mm./h. เมื่อใช้การควบคุมแบบ On-Off ทั่วไป...	133
5.76 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับของของเหลวที่เป้าหมาย 50% หรือที่ 12.7 cm. ที่ความเร็วในการบันทึก 360 mm./h. เมื่อใช้การควบคุมแบบ PI ตามวิธีของ Ziegler-Nichols ด้วยค่าพารามิเตอร์ $K_c = 1.57$ และ $T_i = 40$ sec.	134
5.77 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับของของเหลวที่เป้าหมาย 50% หรือที่ 12.7 cm. ที่ความเร็วในการบันทึก 360 mm./h. เมื่อใช้เทคนิคการควบคุมที่ออกแบบ....	134
5.78 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับของของเหลวที่เป้าหมาย 70% หรือที่ 17.8 cm. ที่ความเร็วในการบันทึก 360 mm./h. เมื่อใช้การควบคุมแบบ On-Off ทั่วไป...	135
5.79 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับของของเหลวที่เป้าหมาย 70% หรือที่ 17.8 cm. ที่ความเร็วในการบันทึก 360 mm./h. เมื่อใช้การควบคุมแบบ PI ตามวิธีของ Ziegler-Nichols ด้วยค่าพารามิเตอร์ $K_c = 1.57$ และ $T_i = 40$ sec.	136
5.80 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับของของเหลวที่เป้าหมาย 70% หรือที่ 17.8 cm. ที่ความเร็วในการบันทึก 360 mm./h. เมื่อใช้เทคนิคการควบคุมที่ออกแบบ....	136

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในระบบควบคุมทางอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ การควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการทางความร้อนเป็นส่วนหนึ่งที่สำคัญ ซึ่งวิธีการควบคุมอุณหภูมิเพื่อให้ได้ผลของการควบคุมที่ดี โดยทั่วไปมี 3 แบบที่ใช้กันมากที่สุดคือ แบบสองสถานะ (On-Off) แบบ Proportional และแบบ PID [1]-[2] โดยการควบคุมแบบ PID เหมาะกับระบบควบคุมความร้อนที่มีปริมาณขนาดเล็กหรือมีขนาดความจุต่ำ เนื่องจากการควบคุมแบบ PID ให้ความแม่นยำที่สูงและสามารถควบคุมให้เข้าสู่สถานะที่คงตัวได้ อย่างไรก็ตามการควบคุมแบบนี้ให้ผลตอบสนองที่ช้าเมื่อใช้กับระบบควบคุมความร้อนที่มีขนาดใหญ่หรือมีค่าเวลาหน่วง (Time Lag) ที่มาก ขณะที่การควบคุมแบบ On-Off และการควบคุมแบบ Proportional เป็นวิธีการควบคุมที่ใช้กันมากกับระบบควบคุมความร้อนที่มีขนาดความจุมาก ๆ ซึ่งอุณหภูมิของระบบที่ใช้การควบคุมแบบนี้จะเป็นในลักษณะที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างช้า ๆ ซึ่งผลจากการควบคุมแบบ On-Off จะเป็นการควบคุมอุณหภูมิในช่วงค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดตามที่ตั้งค่าไว้ ตัวควบคุมจะทำงานเพียง 2 สถานะคือ เปิดกับปิด และสัญญาณควบคุมที่ได้ก็จะมี 2 สถานะเช่นกันคือ 100% หรือ 0% ดังนั้นจะทำให้ระบบเข้าสู่อุณหภูมิเป้าหมายได้เร็ว แต่อุณหภูมิที่ได้จะไม่คงที่และทำให้เกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง (Oscillation) ในขณะที่การควบคุมแบบ Proportional ค่าสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมจะเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความคลาดเคลื่อน ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัวนี้คือ อัตราขยายของตัวควบคุมแบบ P (K_p) ช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างที่สัญญาณควบคุมมีค่าจาก 0% ถึง 100% คือ Proportion Band (PB) โดยค่า PB มีผลต่ออัตราขยายของตัวควบคุมคือ เมื่อ PB สูงขึ้นค่าอัตราขยายของตัวควบคุมจะลดลงเนื่องจาก $K_p = 100/PB$ ซึ่งการควบคุมแบบ Proportional จะเกิดออฟเซต (Offset) ขึ้นเมื่อใช้อัตราการขยายในการควบคุมที่ต่ำหรือทำให้เกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่องสูง และเกิดค่าพุ่งเกิน (Overshoot) ขึ้น เมื่อใช้อัตราการขยายในการควบคุมที่มากขึ้นเพื่อลดขนาดของออฟเซตที่เกิดจากสถานะ Proportioning ภายใน Proportional Band (PB) รอบอุณหภูมิที่ต้องการ [3] ซึ่งผู้ดูแลต้องทำการปรับแต่งในระยะแรกเพื่อที่จะนำอุณหภูมิของระบบให้เข้าสู่ระดับที่ใกล้เคียงค่าเป้าหมายที่สุด

การใช้พลังงานจำนวนไม่น้อยของประเทศอยู่ในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม ซึ่งในปัจจุบันได้มีการรณรงค์เกี่ยวกับการประหยัดพลังงานทางด้านนี้เป็นอย่างมากเนื่องด้วยกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมมีเกิดขึ้นเป็นจำนวนที่มากขึ้น และถ้าหากสามารถลดการใช้

พลังงานในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมในแต่ละส่วนลงถึงแม้ว่าจะเล็กน้อยแต่ถ้าหากสามารถลดการใช้พลังงานได้เป็นจำนวนหลายๆ ส่วนรวมกันก็จะเป็นประโยชน์โดยรวมที่ดีต่อประเทศในการลดการใช้พลังงาน โดยในระบบควบคุมอุณหภูมิส่วนใหญ่ที่ใช้การควบคุมแบบ On-Off และการควบคุมแบบ Proportional นั้นมีการใช้พลังงานค่อนข้างสูงเพราะใช้กับระบบควบคุมความร้อนที่มีขนาดใหญ่และมีค่าเวลาหน่วงที่มาก ดังนั้นผู้ประกอบการจึงเลือกใช้การควบคุมที่สามารถนำอุณหภูมิของกระบวนการให้เข้าสู่เป้าหมายที่ต้องการได้เร็ว โดยยอมให้เกิดการพุ่งเกินและการแกว่งขึ้น ดังนั้นถ้าหากสามารถควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการที่มีขนาดความจุมาๆ ให้เข้าสู่เป้าหมายที่ต้องการได้เร็วและลดขนาดของการเกิดค่าพุ่งเกินและการแกว่งจนได้อุณหภูมิที่ใกล้เคียงตามเป้าหมายมากขึ้นก็จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อผู้ประกอบการและเป็นการลดการใช้พลังงานที่ต้องสูญเสียในส่วนที่เป็นค่าพุ่งเกินและการแกว่งของอุณหภูมิ

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

งานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้พัฒนาและออกแบบตัวควบคุมแบบสองสภาวะหลายระดับ สำหรับการควบคุมอุณหภูมิ (Design of An n-step On-Off Controller for Temperature Control) เพื่อใช้เป็นตัวควบคุมอุณหภูมิที่เหมาะสมกับระบบควบคุมความร้อนที่มีขนาดใหญ่และมีค่าเวลาหน่วงที่มากให้เข้าสู่เป้าหมายที่ต้องการได้เร็วและลดขนาดของการเกิดค่าพุ่งเกินและการแกว่งของอุณหภูมิ เพื่อเป็นทางเลือกใหม่แทนการควบคุมแบบ On-Off ทั่วไปและการควบคุมแบบ Proportional ที่มีใช้ในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมในปัจจุบัน นอกจากนั้นในตอนท้ายของงานวิจัยยังนำเทคนิคการควบคุมที่นำเสนอไปออกแบบและประยุกต์ใช้กับกระบวนการชนิดอื่นๆ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาการใช้งานของเทคนิคการควบคุมดังกล่าวต่อไป

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

ในระบบควบคุมความร้อนที่มีขนาดใหญ่หรือมีค่าเวลาหน่วงที่มากมักจะเลือกใช้เทคนิคการควบคุมที่สามารถนำอุณหภูมิของกระบวนการให้เข้าสู่เป้าหมายให้เร็วที่สุดเพื่อเป็นการลดต้นทุนทางพลังงานด้วยการควบคุมแบบเต็มๆ 100% และ 0% วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเป็นการนำเสนอเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิโดยการแบ่งระดับการ On-Off ของสัญญาณควบคุมออกเป็นหลายระดับ เพื่อเป็นการลดขนาดการเกิดค่าพุ่งเกินและการแกว่งของอุณหภูมิจากการ On-Off ที่ 100% และ 0% พร้อมทั้งสามารถควบคุมอุณหภูมิของระบบให้เข้าสู่เป้าหมายที่ต้องการได้โดยเร็ว โดยการนำค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างอุณหภูมิเป้าหมายกับอุณหภูมิของกระบวนการมาใช้ในการกำหนดระดับของสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมก่อนจ่ายให้กับตัวกำเนิดความร้อน (Heater) ของกระบวนการ โดยผลการทดลองพบว่าเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิที่นำเสนอนี้ช่วยให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบมีผลการตอบสนองที่เรียบและมีการแกว่ง ณ สภาวะคงตัวที่ต่ำกว่าการควบคุมแบบ On-Off และแบบ Proportional ทั่วไป

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิโดยการแบ่งระดับการ On-Off ของสัญญาณควบคุมออกเป็นหลายระดับ โดยการนำค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างอุณหภูมิเป้าหมายกับอุณหภูมิของกระบวนการมาใช้ในการกำหนดระดับของสัญญาณควบคุมที่เหมาะสม เมื่อสัญญาณความคลาดเคลื่อนออกห่างจากค่าศูนย์หรือค่าอุณหภูมิที่ต้องการ สัญญาณควบคุมจะมีอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์ On-Off ที่สูง ในทางตรงกันข้ามถ้าหากสัญญาณความคลาดเคลื่อนมีค่าใกล้กับค่าศูนย์ สัญญาณควบคุมจะมีอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์ On-Off ที่ต่ำ โดยการกำหนดค่าของระดับสัญญาณควบคุมตามหลักการพลังงานสมดุล (Energy Balance) ณ อุณหภูมิเป้าหมายจากการคำนวณไว้ล่วงหน้าตามหลักความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนกับพลังงานไฟฟ้าของการถ่ายเทความร้อน (Thermodynamic) [4] ของกระบวนการ

1.5 ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์เล่มนี้จะกล่าวถึงการพัฒนาและออกแบบตัวควบคุมสำหรับการควบคุมอุณหภูมิ เพื่อเป็นการออกแบบเทคนิคการควบคุมให้สามารถควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการให้เข้าสู่เป้าหมายได้เร็วที่สุด และมีความใกล้เคียงอุณหภูมิเป้าหมายมากกว่าการควบคุมแบบ On-Off และแบบ Proportional ทั่วไป โดยอาศัยชุดทดลองกระบวนการจำลองการควบคุมอุณหภูมิภายในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นชุดทดลองกระบวนการจำลองการควบคุมอุณหภูมิที่ใช้หลักพลังงานไฟฟ้าในการผลิตความร้อนในการออกแบบและทดลอง โดยการเขียนโปรแกรมออกแบบเทคนิคการควบคุมให้กับตัวควบคุมที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ ซึ่งเป็นตัวควบคุมชนิดที่สามารถแสดงค่าและโปรแกรมได้ (SLPC) ของบริษัทโยโกกาว่า อิเล็กทริก (YOKOGAWA ELECTRIC) โดยแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของเทคนิคการควบคุมที่นำเสนอในการทดลองกับชุดทดลองกระบวนการจำลองการควบคุมและโปรแกรมจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

การทำโครงการวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีขั้นตอนการศึกษาเริ่มจากการศึกษาหลักการควบคุมอุณหภูมิของเทคนิคการควบคุมกระบวนการทางความร้อนที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน เช่น แบบสองสภาวะ (On-Off) แบบ Proportional แบบ PID ฯลฯ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการทำวิจัย จากนั้นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นการศึกษาถึงหลักการทำงานของเตาไฟฟ้าอุตสาหกรรม โดยใช้หลักความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนกับพลังงานไฟฟ้าของการถ่ายเทความร้อนของกระบวนการเพื่อใช้ในการออกแบบเทคนิคการควบคุมที่เหมาะสมจากการกำหนดค่าของระดับสัญญาณควบคุมจากการคำนวณตามหลักการพลังงานสมดุล ณ อุณหภูมิเป้าหมาย ต่อไปเป็นการออกแบบตัวควบคุมแบบสองสถานะหลายระดับ สำหรับการควบคุมอุณหภูมิ โดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการควบคุมอุณหภูมิแบบสองสถานะหลายระดับกับตัวควบคุมที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ (SLPC) โดยในเบื้องต้นได้ทำการทดลองกับโปรแกรมจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์ (MATLAB) เพื่อดูผลตอบสนองของกระบวนการจากการออกแบบ และนำเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิที่ออกแบบไปทดลองกับกระบวนการจำลองการควบคุมอุณหภูมิที่มีอยู่ในห้องทดลองของภาควิชา โดยทดลองให้เห็นผลตอบสนองของการควบคุมของกระบวนการที่ใช้ตัวควบคุมที่ต่างชนิดกัน เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นความแตกต่างจากผลตอบสนองของการควบคุมด้วยเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิที่นำเสนอกับเทคนิคการควบคุมชนิดอื่นที่มีใช้ในปัจจุบัน นอกจากนี้ยังนำเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิที่ออกแบบไปใช้ทดลองเสมือนการใช้งานจริงโดยการอบอาหาร และในตอนท้ายได้นำเทคนิคการควบคุมแบบสองสถานะหลายระดับไปออกแบบและประยุกต์ใช้ในการทดลองกับกระบวนการจำลองการควบคุมระดับของของเหลวเพื่อยืนยันถึงประสิทธิภาพของเทคนิคการควบคุมดังกล่าว

บทที่ 2

กระบวนการทางความร้อนในอุตสาหกรรม

2.1 กล่าวนำ

กระบวนการทางความร้อนเป็นกระบวนการหนึ่งที่พบเห็นกันบ่อยมากในอุตสาหกรรมต่างๆ และโดยส่วนใหญ่เป็นกระบวนการทางความร้อนแบบเตาไฟฟ้าอุตสาหกรรม [4] ในปัจจุบันการใช้ตัวควบคุมอุณหภูมิที่มีความแม่นยำสูงกับเตาไฟฟ้าจะช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้เป็นอย่างมาก ถ้าหากว่าทำการควบคุมอุณหภูมิเตาไฟฟ้าโดยใช้ตัวควบคุมอุณหภูมิ เครื่องมือวัดอุณหภูมิหรือเครื่องตรวจเทียบอุณหภูมิควบคุมให้ชิ้นงานหรือโลหะเหลวให้เป็นไปตามที่กำหนดได้ ทั้งนี้เพราะว่าถ้าควบคุมอุณหภูมิได้ต่ำกว่าที่กำหนดชิ้นงานอาจเสีย หรือถ้าได้อุณหภูมิสูงกว่าที่กำหนดไว้จะต้องสูญเสียค่าพลังงานไฟฟ้าส่วนที่สมนัยกับค่าที่เกินกว่าค่าอุณหภูมิที่กำหนด หรือในบางกรณีอาจทำให้ชิ้นงานเสียได้ เป็นการสูญเสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์ ซึ่งซูจิโมโต ไค (Sugimoto Kei) [5] วิศวกรชาวญี่ปุ่นได้ให้ความหมายของการประหยัดพลังงานไว้ดังนี้ “การประหยัดพลังงานคือ การลดปริมาณหรือราคาพลังงานต่อหนึ่งหน่วยผลผลิตให้น้อยที่สุด” ดังนั้นการควบคุมกระบวนการทางความร้อนในอุตสาหกรรมให้ได้อุณหภูมิเป็นไปตามที่กำหนดจึงเป็นเรื่องที่สำคัญต่อการประหยัดพลังงานไฟฟ้าในปัจจุบัน

2.2 หลักการทำงานของเตาไฟฟ้าอุตสาหกรรม

หน้าที่หลักของเตาไฟฟ้าอุตสาหกรรม คือการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อนเพื่อเปลี่ยนค่าอุณหภูมิให้กับวัสดุที่ต้องการ พลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบเตาไฟฟ้าทั้งหมดนี้ได้ถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อน แต่มีบางส่วนสูญเสียไปในระบบเตาไฟฟ้า ส่วนที่เหลือจะเป็นความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับวัสดุกับสูญเสียไปโดยไร้ประโยชน์ทั้งโดยตั้งใจและไม่ตั้งใจ ค่าการสูญเสียในเตาไฟฟ้าขึ้นอยู่กับชนิดของเตาไฟฟ้า สภาพการใช้งานการบำรุงรักษา วัสดุ ฉนวน ความร้อนที่บุผนังเตา การเข้าใจถึงสัดส่วนของพลังงานความร้อนที่ถูกนำไปใช้ในส่วนต่างๆ จะช่วยให้การพิจารณาเรื่องการประหยัดพลังงานทำได้ง่ายขึ้น เตาไฟฟ้าอุตสาหกรรมแบ่งแยกได้เป็น 3 แบบ คือ เตาความต้านทาน เตาอาร์ค และเตาไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แต่ละแบบมีหลักการทำงานแตกต่างกันดังนี้

2.2.1 เตาความต้านทาน

เตาความต้านทานอาศัยหลักการทางไฟฟ้า คือ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านลวดความต้านทาน จะมีกำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นตามสมการที่ (2.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P = I^2 R = V^2 / R \quad (2.1)$$

- เมื่อ P คือ กำลังไฟฟ้า มีหน่วยเป็นวัตต์ (W)
 I คือ กระแสไฟฟ้าผ่านความต้านทาน มีหน่วยเป็นแอมแปร์ (A)
 R คือ ความต้านทานของตัวนำ มีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω)
 V คือ แรงดันไฟฟ้าที่ความต้านทาน มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนไปเป็นค่าความร้อนโดยคำนวณได้จากสมการที่ (2.2)

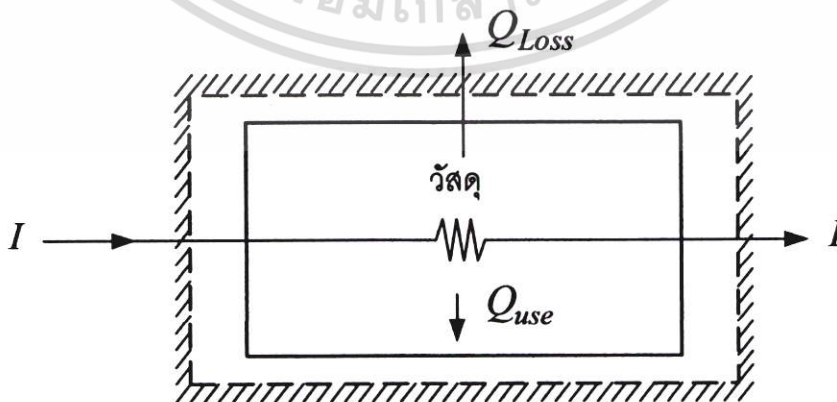
$$Q = 0.24Pt \quad (2.2)$$

- เมื่อ Q คือ ค่าความร้อนที่เกิดขึ้น มีหน่วยเป็นแคลอรี (Cal)
 P คือ กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้น มีหน่วยเป็นวัตต์ (W)
 t คือ เวลาที่ใช้งาน มีหน่วยเป็นวินาที (Sec)

จากการที่เตาแบบนี้ใช้ความต้านทานเป็นตัวกำเนิดความร้อน ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor) มีค่าเป็นหนึ่ง (Unity) อย่างไรก็ตามเตาความต้านทานยังแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ

2.2.1.1 เตาความต้านทานแบบโดยตรง

เตาแบบนี้ใช้หลักการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในวัสดุซึ่งเป็นตัวนำที่ต้องการให้ความร้อนโดยตรง ความร้อนที่เกิดขึ้นถูกนำไปใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุโดยตรง และมีส่วหนึ่งซึ่งต้องสูญเสียไป ดังแสดงในรูปที่ 2.1

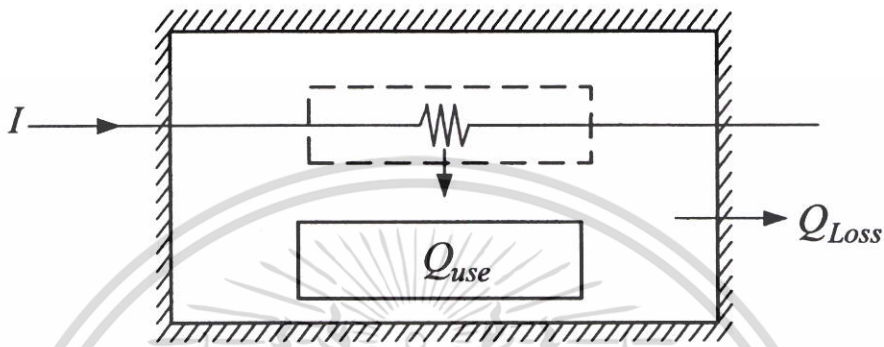


รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะของเตาความต้านทานแบบโดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.2 เตาความต้านทานแบบโดยอ้อม

เตาแบบนี้ใช้หลักการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในตัวกำเนิดความร้อนซึ่งเป็นตัวความต้านทาน ความร้อนที่เกิดขึ้นถูกใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับตัวกำเนิดความร้อนเอง แล้วถ่ายเทให้กับวัตถุที่ต้องการเพิ่มอุณหภูมิโดยการพา การนำ และการแผ่รังสี มีความร้อนส่วนหนึ่งสูญเสียไปโดยมิได้ประโยชน์ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะของเตาความต้านทานแบบโดยอ้อม

2.2.2 เตาอาร์ค

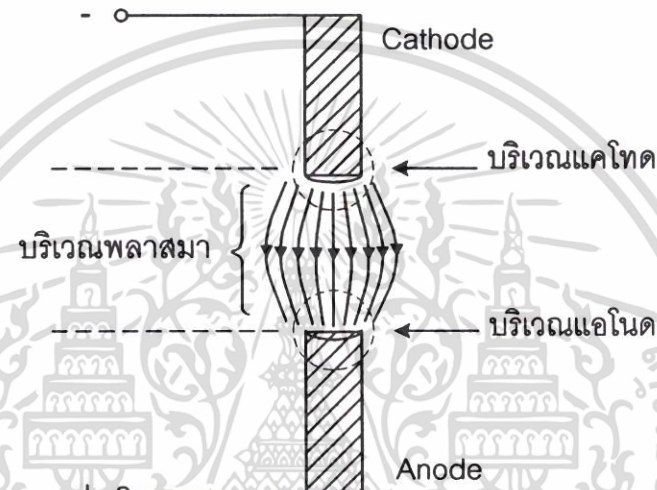
เตาอาร์คใช้หลักการทำงานทางไฟฟ้าที่ว่า การนำไฟฟ้าสามารถเกิดขึ้นได้ใน Ionised gas ความต้านทานของลำแสงอาร์ค (Arc Beam) และการปลดปล่อยพลังงานของอิเล็กตรอน (Electron) ที่ป้อนเข้าหาแอโนด (Anode) ทำให้เกิดความร้อนขึ้นแล้วถูกถ่ายให้กับวัตถุที่ต้องการเพิ่มอุณหภูมิพร้อมกับมีการสูญเสียความร้อนที่เกิดขึ้น พฤติกรรมของการอาร์คเป็นดังนี้คือ

เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับแท่งอิเล็กโทรด 2 แท่งซึ่งสัมผัสกัน (ในตอนแรก) แท่งที่ต่อกับแรงดันไฟฟ้าบวกเรียกว่าแอโนด (Anode) แท่งที่ต่อกับแรงดันไฟฟ้าลบเรียกว่าแคโทด (Cathode) จะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ความต้านทานของจุดสัมผัสทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าและถูกเปลี่ยนไปเป็นความร้อน ซึ่งปริมาณความร้อนขึ้นอยู่กับค่ากระแสตรงจรและความต้านทานของจุดสัมผัส เมื่ออุณหภูมิของจุดสัมผัสมากพอจะมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา ถ้าดึงแท่งอิเล็กโทรดให้แยกห่างจากกัน อิเล็กตรอนที่แท่งแคโทดถูกสนามไฟฟ้าบังคับให้วิ่งเข้าหาแท่งแอโนดทำให้เกิดกระแสอาร์คขึ้น กระแสอาร์คในอากาศบริเวณใกล้ๆ กับแท่งแคโทดมีความหนาแน่นของกระแสสูงทำให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างมากมาย ทำให้ปริมาณของอิเล็กตรอนเพิ่มมากขึ้น การอาร์คสามารถบังคับให้เกิดขึ้นได้อย่างสม่ำเสมอโดยการควบคุมระยะระหว่างแท่งอิเล็กโทรดและการเพิ่มอุปกรณ์ควบคุมกระแสอาร์ค นอกเหนือไปจากกระแสอาร์คที่ไหลผ่านแท่งแอโนดซึ่งทำให้เกิดความร้อนขึ้นแล้ว การที่อิเล็กตรอนจากแท่งแคโทดชนกับแท่งแอโนดแล้วถ่ายพลังงานให้กับแท่งแอโนด จะทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้อะโนดมีอุณหภูมิสูงกว่าแคโทด อิเล็กตรอนบางตัวจากแคโทด เมื่อชนกับอะตอมของก๊าซในบริเวณลำอาร์ค ไม่สามารถทำให้อะตอมของก๊าซเกิดการแตกตัวได้ แต่จะทำให้อะตอมของก๊าซอยู่ในภาวะ Excite State กล่าวคืออิเล็กตรอนในชั้นวงโคจรที่ต่ำกว่ากระโดดสู่ชั้นวงโคจรที่มีพลังงานสูงกว่า เนื่องจากได้รับพลังงานเพิ่ม หลังจากนั้นอิเล็กตรอนจะตกกลับเข้าสู่วงโคจรเดิม ในกรณีนี้ อิเล็กตรอนจะคายพลังงานออกมาในรูปแสงและความร้อน

กระแสอาร์คทำให้เกิดลำแสงอาร์ค ซึ่งแบ่งแยกได้เป็น 3 บริเวณด้วยกัน คือ บริเวณแคโทด บริเวณพลาสมา และบริเวณแอโนด ดังแสดงในรูปที่ 2.3



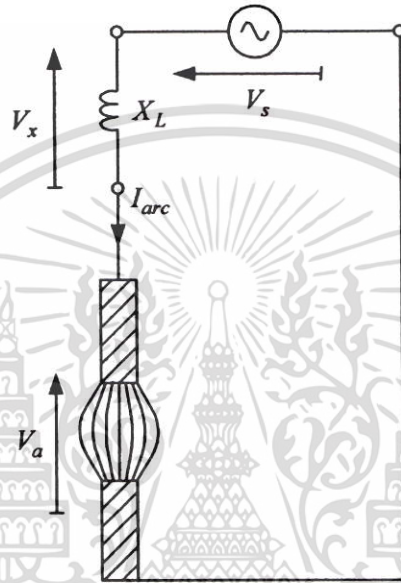
รูปที่ 2.3 แสดงการแบ่งบริเวณของลำแสงอาร์ค

1. **บริเวณแคโทด (Cathode Zone)** ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าบริเวณนี้สูง จึงทำให้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูง ความร้อนจึงสูง ในกรณีของเตาอาร์คแท่งแคโทดเป็นคาร์บอนซึ่งมีจุดหลอมเหลวสูง จึงไม่สามารถหลอมแท่งแคโทดได้ เป็นแต่เพียงทำให้มันเกิดการฟุ้งร้อน (ไหม้หลุดเป็นเขม่า) ความยาวของบริเวณนี้จะสั้นเป็นบริเวณจ่ายอิเล็กตรอนที่ทำให้เกิดการนำไฟฟ้าได้ ปริมาณอิเล็กตรอนขึ้นอยู่กับชนิดของแท่งแคโทด อุณหภูมิ แรงดันไฟฟ้าอาร์ค และความดันของบรรยากาศในการอาร์ค
2. **บริเวณแอโนด (Anode Zone)** ความร้อนที่เกิดขึ้นที่จุดซึ่งเกิดการอาร์คจะถ่ายเทความร้อนให้กับวัสดุรอบด้าน แต่อัตราการถ่ายเทความร้อนน้อยกว่าอัตราการเพิ่มความร้อน อุณหภูมิที่จุดอาร์คจึงเพิ่มขึ้นจนถึงขั้นหลอมเหลว (แอโนดทำด้วยวัสดุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ) แล้วบริเวณที่หลอมละลายจะค่อยๆ แผ่กระจายเป็นวงกว้างออกไปจนหมดทั่วทั้งเบ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. บริเวณพลาสมา (Plasma Zone) เป็นบริเวณในลำแสงอาร์คระหว่างบริเวณแคโอดกับแอโนด บริเวณนี้ความร้อนเกิดขึ้นเนื่องจากความต้านทานของพลาสมา ความร้อนที่เกิดขึ้นจะแผ่รังสีให้กับบริเวณรอบด้าน

ในกรณีของเตาอาร์คที่ใช้ในอุตสาหกรรมการถลุงหรือการหลอม แรงดันไฟฟ้าที่ให้กับแอโนดและแคโอดเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ แท่งอิเล็กโทรดจึงสลับกันเป็นแอโนดและแคโอดทุกๆ ครึ่งรอบของความถี่ของแหล่งจ่ายแรงดัน [6] ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงวงจรไฟฟ้าพื้นฐานของเตาอาร์ค

ในวงจรไฟฟ้าพื้นฐานของเตาอาร์ค ดังรูปที่ 2.4 สมการแรงดันบังคับของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Voltage Law) คือ

$$V_s = V_x + V_a$$

หรือ

$$= XI + V_a \quad (2.3)$$

เมื่อ V_s คือ แรงดันของแหล่งจ่ายไฟฟ้า มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

V_x คือ แรงดันไฟฟ้าที่รีแอกเตอร์ มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

V_a คือ แรงดันรวมของลำแสงอาร์ค มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

I คือ กระแสอาร์ค มีหน่วยเป็นแอมแปร์ (A)

X คือ รีแอกแตนซ์ใส่เข้าไปเพื่อควบคุมกระแสอาร์ค มีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อมีการอาร์คเกิดขึ้น แล้วแยกแท่งอิเล็กโทรดทำให้ระยะอาร์คยาวขึ้น ความต้านทานของลัอาร์คเพิ่มขึ้น กระแสอาร์คจะลดต่ำลง ทำให้แรงดัน V_x ลดน้อยลง แต่เนื่องจากแรงดันของแหล่งจ่าย V_s คงที่ แรงดัน V_o ($V_o = V_s - V_x$) ก็เพิ่มขึ้น ทำให้กระแสอาร์คเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานของลัอาร์คลดน้อยลง กระแสอาร์คก็จะกลับเพิ่มขึ้นใหม่ แรงดัน V_x ก็เพิ่มขึ้น ทำให้แรงดันอาร์ค V_o ลดน้อยลง กระแสอาร์คลดน้อยลง จะเกิดปรากฏการณ์ในลักษณะนี้ซ้ำซ้อนต่อเนื่องกัน โดยการออกแบบค่า X และใช้ค่าแรงดัน V_s ที่เหมาะสม จะทำให้สภาพการอาร์คอยู่ในลักษณะคงตัวได้อย่างสม่ำเสมอ อันที่จริงแล้วอาจใช้ความต้านทาน (R) แทนรีเอคแตนซ์ X ได้ แต่ในกรณีเมื่อใช้ความต้านทานจะทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียอย่างมาก และความต้านทาน R จะต้องมีขนาดโตมาก ไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ

การเพิ่มรีเอคแตนซ์เข้าไปในวงจรไฟฟ้าของเตาอาร์ค จะทำให้ตัวประกอบกำลังของวงจรล่าหลัง (Lagging) น้อยกว่าหนึ่งเสมอ และค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับสภาพการทำงานของเตาอาร์ค

2.2.3 เตาไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เตาไฟฟ้าเหนี่ยวนำใช้หลักการทำงานทางไฟฟ้าที่ว่า จะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในตัวนำไฟฟ้าที่อยู่ภายในสนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลง ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลวน (Eddy Current) ในตัวนำ กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในตัวนำจะเปลี่ยนไปเป็นความร้อน ทำให้อุณหภูมิของตัวนำเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าในตัวนำก็คือ ความหนาแน่นความร้อนในตัวนำซึ่งขึ้นอยู่กับค่า Skin Depth [7] ซึ่งกำหนดโดยสมการที่ (2.4)

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu_0 \mu_r \omega}} \quad (2.4)$$

เมื่อ δ คือ ค่า Skin Depth มีหน่วยเป็นเมตร (m)

ρ คือ ความต้านทานจำเพาะของตัวนำ มีหน่วยเป็นโอห์ม-เมตร ($\Omega \cdot m$)

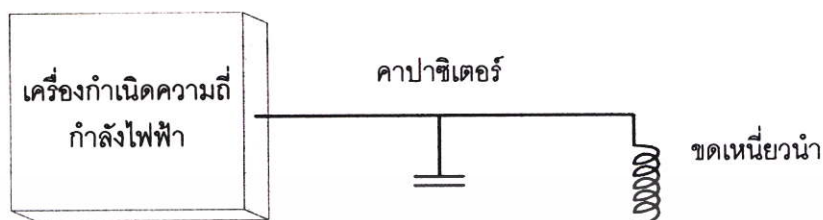
μ_0 คือ ความซาบซึ่มแม่เหล็กของอากาศ เท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ มีหน่วยเป็นเฮนรีต่อเมตร (H/m)

μ_r คือ ความซาบซึ่มแม่เหล็กสัมพัทธ์ของตัวนำ (ค่าคงตัว)

ω คือ ความถี่เชิงมุมของสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz)

ความถี่เชิงมุมของสนามแม่เหล็กสามารถบังคับให้เปลี่ยนได้โดยง่าย โดยการเปลี่ยนค่าความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขดเหนี่ยวนำของเตาเหนี่ยวนำ ซึ่งทำให้สามารถควบคุมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าได้โดยง่าย จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานต่างๆ ได้อย่างกว้างขวาง
ขีดจำกัดของเตาแบบนี้อยู่ที่อุณหภูมิหลอมเหลวของวัสดุที่ใช้บุผนังเตา ในรูปที่ 2.5 เป็นแผนภูมิ
ไฟฟ้าของระบบเตาเหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.5 แสดงแผนภูมิทางไฟฟ้าของระบบเตาไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั่วไป

โดยเหตุที่เตาไฟฟ้าเหนี่ยวนำใช้ขดเหนี่ยวนำเป็นตัวสร้างสนามแม่เหล็ก และขดเหนี่ยวนำ
มีสภาพทางไฟฟ้าเป็นรีเอคเตอร์ จึงมีตัวประกอบกำลังไฟฟ้าต่ำมาก ทำให้จำเป็นต้องต่อคาปาซิ
เตอร์เพื่อปรับค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าไว้ด้วย ตัวประกอบกำลังไฟฟ้ารวมจึงมีค่าเข้าใกล้หนึ่ง
(Unity) อย่างไรก็ตามในกรณีที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าเป็นแบบความถี่คงที่ จะต้องคอยปรับตัวประกอบ
กำลังไฟฟ้าอยู่เสมอ แต่ในกรณีที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าเป็นแบบความถี่เปลี่ยนแปลง จะมีเครื่องควบคุม
ความถี่เพื่อทำให้วงจรของขดขดเหนี่ยวนำและคาปาซิเตอร์อยู่ในสภาวะตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเข้า
ใกล้หนึ่งตลอดเวลา ค่า Skin Depth นอกจากจะปรากฏที่ตัวนำไฟฟ้าที่ต้องการเพิ่มอุณหภูมิแล้ว
ยังเกิดขึ้นที่ขดเหนี่ยวนำ ทำให้ความต้านทานที่มีผลจริง (Effective Resistance) ของขดเหนี่ยวนำ
เพิ่มขึ้นเมื่อความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดที่มีผล
จริงของขดเหนี่ยวนำลดลง กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดเหนี่ยวนำเพิ่มมากขึ้น ซึ่งกำลังไฟฟ้าสูญเสีย
ในขดเหนี่ยวนำถูกเปลี่ยนไปเป็นความร้อน และถูกกำจัดออกไปด้วยน้ำหล่อเย็นของขดเหนี่ยวนำ
ผลที่ตามมาก็คือ กำลังไฟฟ้าที่ถ่ายทอดให้กับโลหะที่ต้องการเพิ่มอุณหภูมิ (ชิ้นงาน) ลดน้อยลง

2.3 เทคนิคการควบคุมกระบวนการทางความร้อนที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

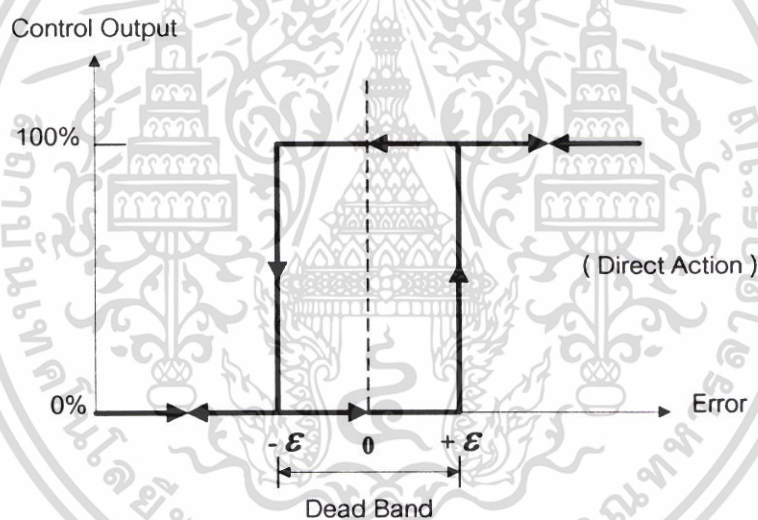
ในปัจจุบันการควบคุมกระบวนการทางความร้อนส่วนใหญ่ จะใช้การพิจารณาถึง
คุณลักษณะของกระบวนการทางความร้อนที่ต้องการควบคุม ทั้งนี้เนื่องจากจะได้เลือกชนิดของ
การควบคุมให้เหมาะสมกับระบบ เพื่อให้การควบคุมมีประสิทธิภาพและมีความคุ้มค่าที่สุด โดย
สัญญาณที่ใช้ในการควบคุมจะเป็นไปตามลักษณะของการสร้างสัญญาณควบคุมหรือกริยาการ
ควบคุม (Control Action) ซึ่งเทคนิคการควบคุมกระบวนการทางความร้อนที่นิยมใช้อยู่ในปัจจุบัน
มี 5 แบบใหญ่ๆ [4] คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การควบคุมความร้อนแบบ On-Off
2. การควบคุมความร้อนแบบ Time- Proportional
3. การควบคุมความร้อนแบบ Proportional (P)
4. การควบคุมความร้อนแบบ Proportional - Integral (PI)
5. การควบคุมความร้อนแบบ Proportional - Integral - Derivative (PID)

2.3.1 การควบคุมความร้อนแบบ On-Off

การควบคุมความร้อนแบบ On-Off เป็นการควบคุมความร้อนที่ง่ายที่สุดและเป็นวิธีการควบคุมที่ใช้กันมากกับระบบควบคุมความร้อนที่มีขนาดความจุมาก ๆ ซึ่งอุณหภูมิของระบบที่ใช้การควบคุมแบบนี้จะเป็นในลักษณะที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างช้า ๆ โดยตัวควบคุมจะทำงานเพียง 2 สถานะ คือ เปิดกับปิด และสัญญาณเอาต์พุตที่ได้ก็จะมี 2 สถานะเช่นกัน คือ 0% หรือ 100% กริยาการควบคุมความร้อนแบบ On-Off แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงกริยาการควบคุมความร้อนแบบ On-Off

จากรูปที่ 2.6 จะเห็นว่า ถ้าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นมากกว่าค่าวิกฤต (Critical value) หรือ $+\epsilon$ ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมจะเปลี่ยนจาก 0% ไปเป็น 100% ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิลดต่ำลงจนต่ำกว่าค่าวิกฤต ($-\epsilon$) ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมจะเปลี่ยนจาก 100% ไปเป็น 0% ดังนั้น จะเห็นว่าก่อนที่ค่าเอาต์พุตจะเปลี่ยนแปลงนั้นจะเกิดเดทแบนด์ (Dead Band) ขึ้นรอบๆ ค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับศูนย์ (Zero Error) โดยในช่วงเดทแบนด์นั้น ค่าเอาต์พุตจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใดซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากการเสียดทานที่ไม่คาดคิดไว้ก่อน หรือบางครั้งก็ต้องทำให้มีช่วงเดทแบนด์ เพื่อป้องกันการ On-Off บ่อยเกินไป อัน

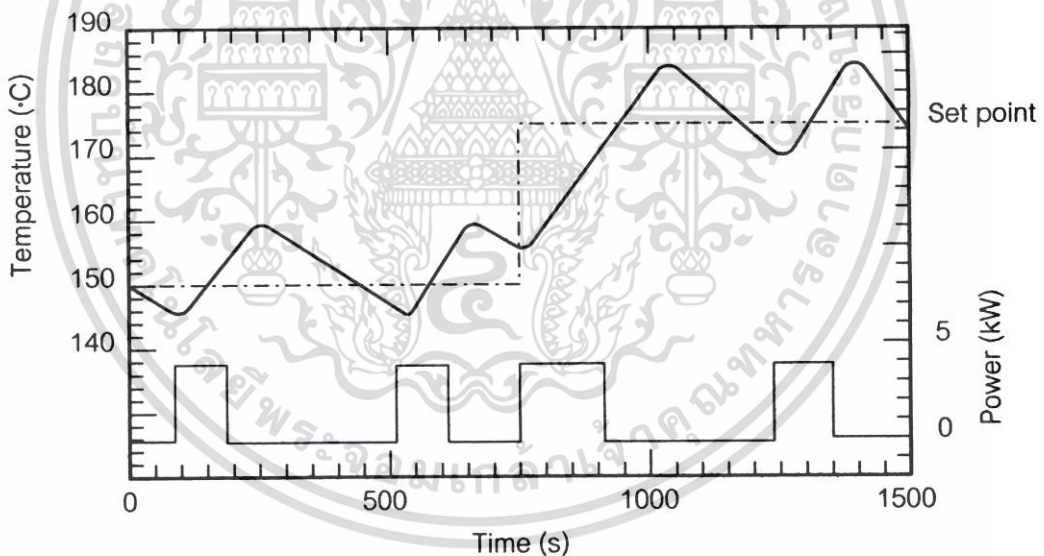
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะทำให้อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิหรือกระบวนการเกิดการเสียหายได้ แต่ช่วงเดธแบนด์นี้ก็ต้องไม่กว้างนักเพราะจะทำให้ค่าความเที่ยงตรงของการควบคุมอุณหภูมิลดลง ฏริยาการควบคุมแบบ On-Off สามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} m(t) &= 0\% && \text{เมื่อ } e < -\varepsilon \\ &= 100\% && \text{เมื่อ } e > +\varepsilon \end{aligned} \quad (2.5)$$

เมื่อ $m(t)$ คือ สัญญาณควบคุมหรือเอาต์พุตของตัวควบคุม
 $e(t)$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อน
 ε คือ $\frac{1}{2}$ ของค่าเดธแบนด์

จากการควบคุมความร้อนแบบ On-Off จะทำให้ผลตอบสนองของระบบเกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง (Oscillation) สูง ดังแสดงในรูปที่ 2.7



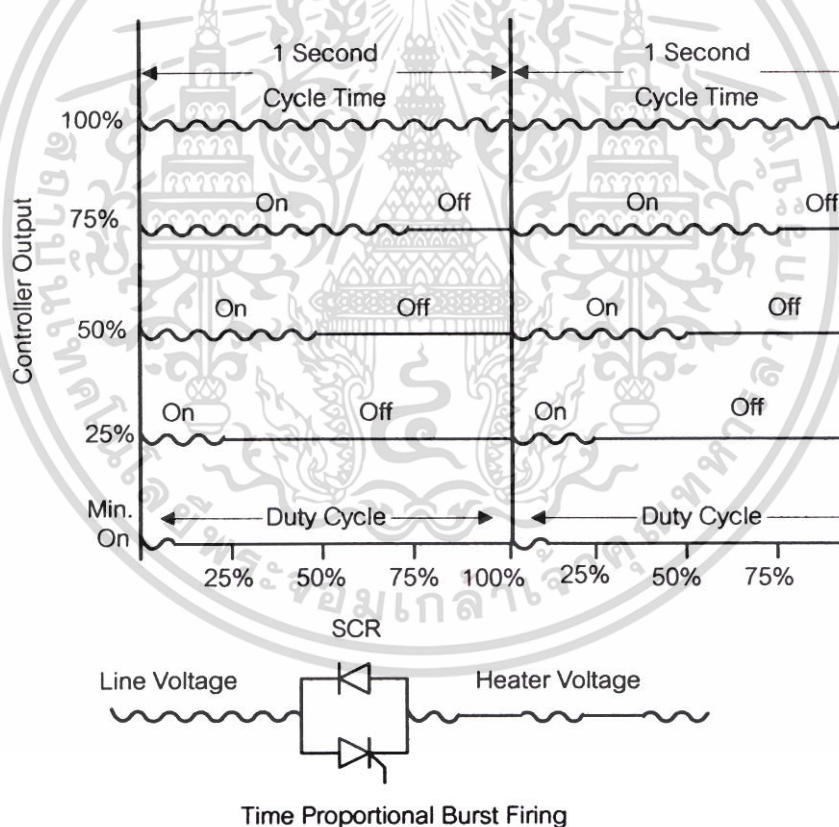
รูปที่ 2.7 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของระบบควบคุมอุณหภูมิแบบ On-Off

การควบคุมความร้อนแบบ On-Off จะนิยมใช้ในการควบคุมกระบวนการทางความร้อนที่ไม่ต้องการความเที่ยงตรงที่สูงนัก และผลของความคลาดเคลื่อนไม่ส่งผลต่อการควบคุม เช่น การควบคุมอุณหภูมิในระบบควบคุมความร้อนที่มีขนาดความจุมาก ๆ ซึ่งอุณหภูมิของระบบที่ใช้การควบคุมแบบนี้จะเป็นในลักษณะที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างช้า ๆ เนื่องจากค่าความคลาดเคลื่อนจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดค่าความจุ ทำให้ลดต้นทุนได้อย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการเรียนการสอน ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 การควบคุมความร้อนแบบ Time-Proportional

จากการที่การควบคุมความร้อนแบบ On-Off ใช้วิธีการควบคุมธรรมดาที่ง่าย ๆ คือ ควบคุมในช่วงค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดจากที่ตั้งอุณหภูมิไว้ ซึ่งอุณหภูมิที่ได้จะไม่คงที่จะทำให้เกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง (Oscillation) สูงดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ทำให้มีการพัฒนาโดยการออกแบบการควบคุมความร้อนแบบ Time Proportional ขึ้น โดยตัวควบคุมยังคงทำงานเพียง 2 สถานะ คือ เปิดกับปิด และสัญญาณเอาต์พุตที่ได้ก็จะมี 2 สถานะ เช่นกัน คือ 0% หรือ 100% แต่จะต่างจากการควบคุมความร้อนแบบ On-Off ตรงที่ การควบคุมความร้อนแบบ Time Proportional จะควบคุมโดยประมวลผลจากการเปรียบเทียบค่าที่ตั้งไว้ (Setpoint) กับค่าผิดพลาด (Error) และสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะเปิด-ปิดเป็นอัตราส่วนเวลาตามค่าความแตกต่างที่ได้จากการเปรียบเทียบ ทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่มากยิ่งขึ้น ตัวอย่างการใช้งาน เช่น การควบคุมอุณหภูมิในงานอุตสาหกรรมโดยใช้หลอดความร้อน ลักษณะสัญญาณควบคุมแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะสัญญาณควบคุมแบบ Time- Proportional

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

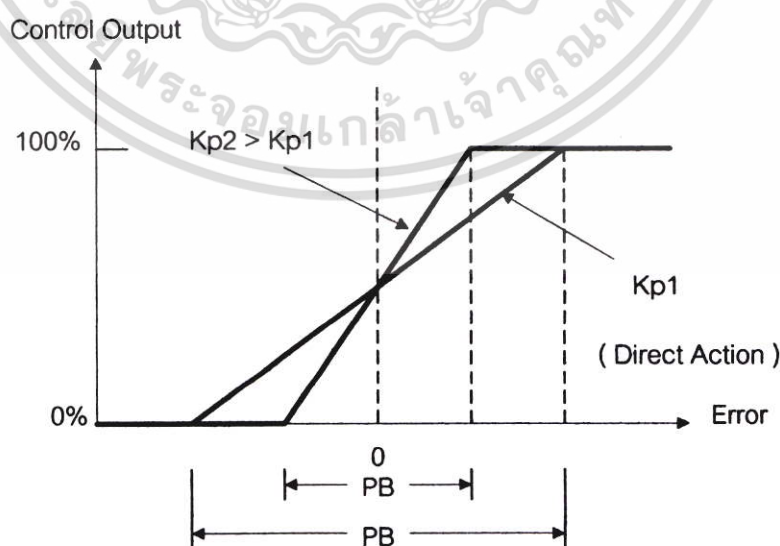
2.3.3 การควบคุมความร่อนแบบ Proportional (P)

การควบคุมความร่อนแบบ Proportional จะนิยมใช้ในการควบคุมกระบวนการทางความร่อนที่ไม่ต้องการความเที่ยงตรงที่สูงนัก แต่ผลของความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิจะส่งผลต่อการควบคุม ซึ่งการควบคุมความร่อนแบบ Proportional นั้น จะควบคุมโดยประมวลผลจากค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิ สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมจะเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิ กล่าวคือ ถ้าค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิมียิ่งมากค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมก็จะมากขึ้นตาม และถ้าค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิมียิ่งน้อยค่าเอาต์พุตที่ได้ก็จะน้อยด้วย ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัวนี้ คือ อัตราขยายของตัวควบคุมความร่อนแบบ P (Proportional Gain) [4] กริยาการควบคุมแบบ P สามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ ได้ดังนี้

$$m_p(t) = \bar{m} + K_p e(t) \quad (2.6)$$

เมื่อ $m_p(t)$ คือ ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ Proportional
 K_p คือ อัตราขยายของตัวควบคุมแบบ Proportional
 \bar{m} คือ ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุม เมื่อความคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์ หรือค่าไบอัส (Bias)

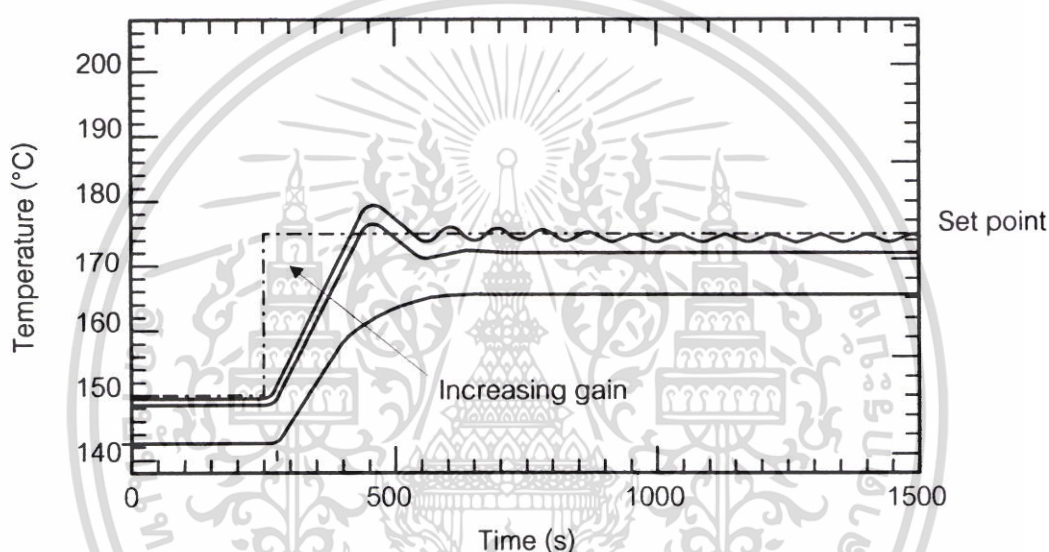
คุณสมบัติของกริยาการควบคุมความร่อนแบบ P แสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงคุณสมบัติของกริยาการควบคุมความร่อนแบบ Proportional

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.9 แสดงให้เห็นว่าจะเกิดการอ้อมตัวของค่าความคลาดเคลื่อน คือ เมื่อเอาต์พุตสูงถึง 100% ขณะที่ค่าคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิยังคงเพิ่มขึ้นไปอีกค่าเอาต์พุตจะไม่สามารถเพิ่มขึ้นตามได้ ในลักษณะเดียวกันเมื่อค่าเอาต์พุตเท่ากับ 0% ขณะที่ค่าคลาดเคลื่อนของอุณหภูมียังคงลดลงไปอีกค่าเอาต์พุตก็ไม่สามารถลดลงตามได้ ซึ่งช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างที่เอาต์พุตมีค่าจาก 0% ถึง 100% เรียกว่า Proportion Band (PB) โดยค่า PB มีผลต่ออัตราขยายของตัวควบคุมคือ กล่าวคือ เมื่อ PB สูงขึ้นค่าอัตราขยายของตัวควบคุมจะลดลง เนื่องจาก $K_p = 100/PB$ และเมื่ออัตราขยายของตัวควบคุมลดลงจะทำให้ระบบที่ทำการควบคุมอุณหภูมิเกิดออฟเซ็ทที่มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของระบบควบคุมอุณหภูมิแบบ Proportional

2.3.4 การควบคุมความร้อนแบบ Proportional-Integral (PI)

การควบคุมความร้อนแบบ PI จะนิยมใช้ในการควบคุมกระบวนการทางความร้อนที่ต้องการความเที่ยงตรงที่สูงและมีระยะเวลาในการเข้าสู่อุณหภูมิเป้าหมายที่นานได้ เป็นวิธีการควบคุมที่ใช้กันมากกับระบบควบคุมความร้อนที่มีขนาดความจุไม่มากนัก จากที่ทราบกันว่าการควบคุมความร้อนแบบ P นั้น จะเกิดการแกว่งของอุณหภูมิขึ้นเมื่อใช้อัตราขยายของตัวควบคุมที่สูง หรือมีออฟเซ็ทเกิดขึ้นเมื่อต้องการผลตอบสนองของระบบควบคุมอุณหภูมิที่เรียบ ซึ่งการกำจัดค่าออฟเซ็ทนั้นสามารถทำได้โดยการเพิ่มการควบคุมแบบ I (Integral) เข้าไป [4] ซึ่งการทำการควบคุมแบบ I มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการควบคุมแบบรีเซ็ท (Reset Control) โดยการควบคุมจะพิจารณาค่าคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นทั้งหมด ซึ่งการหาค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิในวิธีการควบคุมแบบ I นี้จะต้องหาค่าพื้นที่ทั้งหมดภายใต้กราฟของค่าความคลาดเคลื่อนเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลาดเคลื่อนต่อเวลา จากนั้นนำไปคูณกับค่าคงที่เรียกว่า อัตราขยายของตัวควบคุมแบบ I (Integral Gain) ซึ่งหาค่าเอ้าท์พุท ได้ดังสมการที่ (2.7)

$$m_I(t) = K_I \int_0^t e(t)dt + \bar{m}_I(0) \quad (2.7)$$

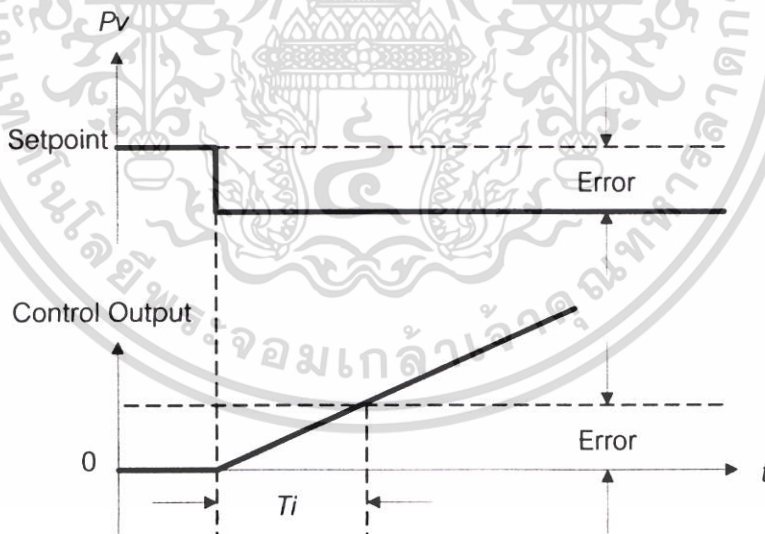
เมื่อ $m_I(t)$ คือ ค่าเอ้าท์พุทของตัวควบคุมแบบ Integral

K_I คือ อัตราขยายของตัวควบคุมแบบ Integral

$\bar{m}_I(0)$ คือ ค่าเอ้าท์พุทของตัวควบคุมที่เวลา t มีค่าเป็นศูนย์

$\int_0^t e(t)dt$ คือ พื้นที่ทั้งหมดของความคลาดเคลื่อน

ผลของปฏิบัติการควบคุมแบบ I นี้ จะทำให้ไม่เกิดออฟเซ็ทขึ้นในระบบและลดค่าพุ่งเกินของระบบควบคุมอุณหภูมิลงได้ แต่ถ้าปฏิบัติการควบคุมมีค่าสูงเกินไปจะทำให้ผลตอบสนองของกระบวนการช้าลง ผลตอบสนองของปฏิบัติการควบคุมแบบ I แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงผลตอบสนองของปฏิบัติการควบคุมแบบ Integral

ดังนั้นสมการสัญญาณเอ้าท์พุทของตัวควบคุมความร้อนแบบ PI จะเป็นไปตามสมการที่

(2.8)

$$m_{PI}(t) = \bar{m} + K_p e(t) + K_p K_I \int_0^t e(t) dt \quad (2.8)$$

หรือ

$$m_{PI}(t) = \bar{m} + K_c e(t) + \frac{K_c}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (2.9)$$

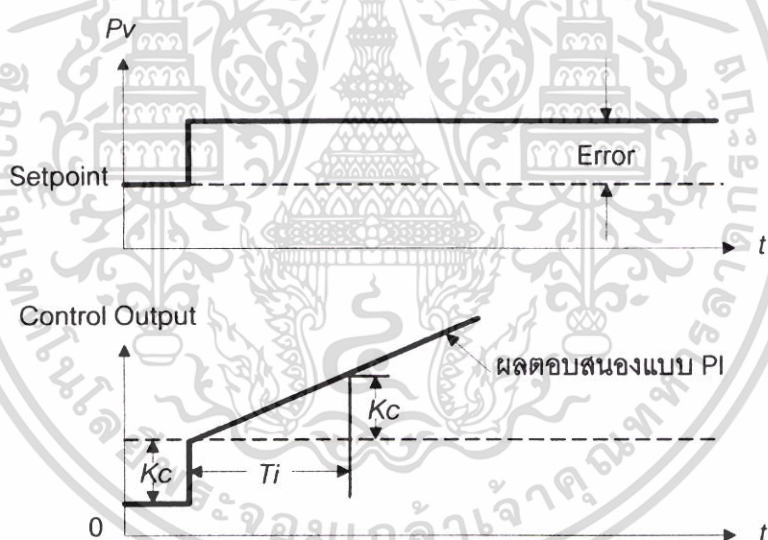
เมื่อ $m_{PI}(t)$ คือ ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ Proportional-Integral

K_c คือ K_p อัตราขยายของตัวควบคุม

K_I คือ $1/T_i$

T_i คือ เวลาในการอินทิเกรตหรือเวลารีเซต (Integral or Reset Time)

ดังนั้น ผลตอบสนองของกิริยาการควบคุมความร้อนแบบ PI แสดงดังรูปที่ 2.12

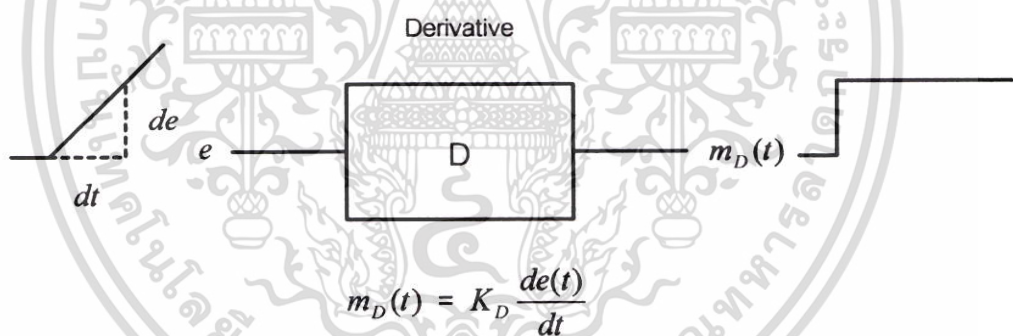


รูปที่ 2.12 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของกิริยาการควบคุมแบบ PI (Direct Action)

นอกจากกิริยาการควบคุมความร้อนแบบ PI จะทำให้ค่าออฟเซตที่สภาวะคงที่เป็นศูนย์แล้ว ยังช่วยลดค่าพุ่งเกินและการแกว่ง (Oscillation) ของระบบควบคุมอุณหภูมิลงได้ แต่จะทำให้ Rise Time และ Setting Time มีค่ามากขึ้น

2.3.5 การควบคุมความร่อนแบบ Proportional-Integral-Derivative (PID)

การควบคุมความร่อนแบบ PID จะนิยมใช้ในการควบคุมกระบวนการทางความร่อนที่ต้องการความเที่ยงตรงที่สูงและต้องการระยะเวลาในการเข้าสู่อุณหภูมิเป้าหมายที่เร็ว การควบคุมความร่อนแบบ PID เป็นวิธีการควบคุมที่ใช้กันมากกับระบบควบคุมความร่อนที่มีขนาดความจุไม่มากนัก จากที่ทราบกันว่า ฏิกิริยาการควบคุมแบบ PI นั้น ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่สภาวะคงที่ลดลงหรือหมดไปแต่ทำให้เสถียรภาพสัมพัทธ์ลดลง (Rise Time และ Setting Time มีค่ามากขึ้น) ดังนั้น ในบางครั้งเพื่อให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมอุณหภูมิมีประสิทธิภาพดีขึ้นตามต้องการจึงต้องมีการประยุกต์ใช้ฏิกิริยาการควบคุมแบบ D (Derivative) ร่วมกับฏิกิริยาควบคุมความร่อนแบบ PI ก็เพื่อทำให้ผลตอบสนองของระบบรวดเร็วขึ้น [4] ซึ่งจะทำให้ได้ฏิกิริยาการควบคุมความร่อนแบบ PID โดยฏิกิริยาควบคุมแบบ D สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมจะขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความคลาดเคลื่อนต่อเวลา (Time Rate of Change of Error) จะเห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนนี้มีโอกาสเป็นศูนย์ได้ และค่าเอาต์พุตก็สามารถเปลี่ยนแปลงให้มีความสูงขึ้น เมื่อความคลาดเคลื่อนเปลี่ยนแปลง ซึ่งเรียกการกระทำดังกล่าวนี้ว่า อัตราการกระทำ (Rate Action) ตามตัวอย่าง ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงตัวอย่างคุณสมบัติของฏิกิริยาการควบคุมแบบ Derivative

จากรูปที่ 2.13 จะเห็นว่าที่ค่าความคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์ มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของความชันสูง ผลของการเปลี่ยนแปลงนี้ทำให้ค่าเอาต์พุตเกิดการเปลี่ยนแปลงสูงตามไปด้วย ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความคลาดเคลื่อนสามารถประมาณได้โดยการหาค่าความแตกต่างระหว่างค่าความคลาดเคลื่อน 2 ค่า และหารด้วยเวลาระหว่าง 2 ค่านี้ แล้วนำไปคูณกับค่าคงที่ที่เรียกว่า อัตราขยายของตัวควบคุมแบบ D (Derivative Gain) เพื่อหาค่าสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุม ดังสมการ (2.10)

$$m_D(t) = K_D \frac{[e(t) - e(t_0)]}{(t - t_0)} \quad (2.10)$$

หรือ

$$m_D(t) = K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.11)$$

เมื่อ $m_D(t)$ คือ ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ Derivative ที่เวลา t

K_D คือ อัตราขยายของตัวควบคุมแบบ Derivative

$e(t)$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่เวลา t

$e(t_0)$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่เวลา t_0

การควบคุมแบบ D เหมาะสำหรับกระบวนการที่มีเวลาหน่วง (Time Lag) มากๆ เพราะสามารถแก้ค่าความคลาดเคลื่อนโดยการกระทำล่วงหน้าก่อนที่จะมีการกระทำเกิดขึ้น จึงช่วยให้ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิเร็วขึ้นแต่มีข้อเสีย คือ การควบคุมมีความไวต่อสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อนมาก โดยเฉพาะกรณีที่ τ_D หรือ K_D มีค่ามาก ซึ่งจะทำให้เกิดค่าพุ่งเกินสูงได้ ดังนั้น จึงไม่เหมาะสมกับกระบวนการควบคุมอุณหภูมิที่มีค่าเวลาหน่วงน้อยๆ และกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงได้ง่าย การควบคุมแบบ D ไม่สามารถนำไปใช้งานโดดเดี่ยวได้ เพราะว่าเมื่อค่าความคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์ จะทำให้สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมเป็นศูนย์ด้วย ดังนั้นเมื่อมีการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบ D ร่วมกับการควบคุมความร้อนแบบ PI (การควบคุมแบบ PID) ทำให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมอุณหภูมิลดเร็วขึ้น ซึ่งจะทำให้ได้การควบคุมแบบ PID ที่มีสมการสัญญาณเอาต์พุต ดังสมการ (2.12)

$$m_{PID}(t) = \bar{m} + K_p e(t) + K_p K_I \int_0^t e(t) dt + K_p K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.12)$$

หรือ

$$m_{PID}(t) = \bar{m} + K_c e(t) + \frac{K_c}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_c T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.13)$$

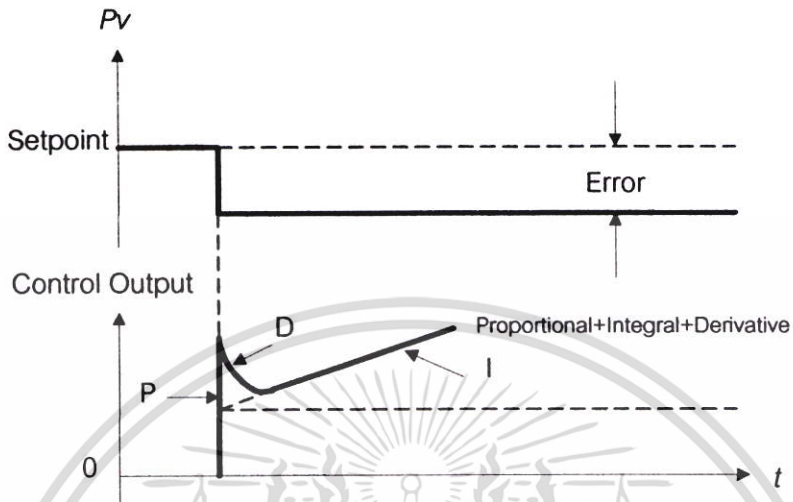
เมื่อ $m_{PID}(t)$ คือ ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ Proportional-Integral-Derivative

K_D คือ T_d

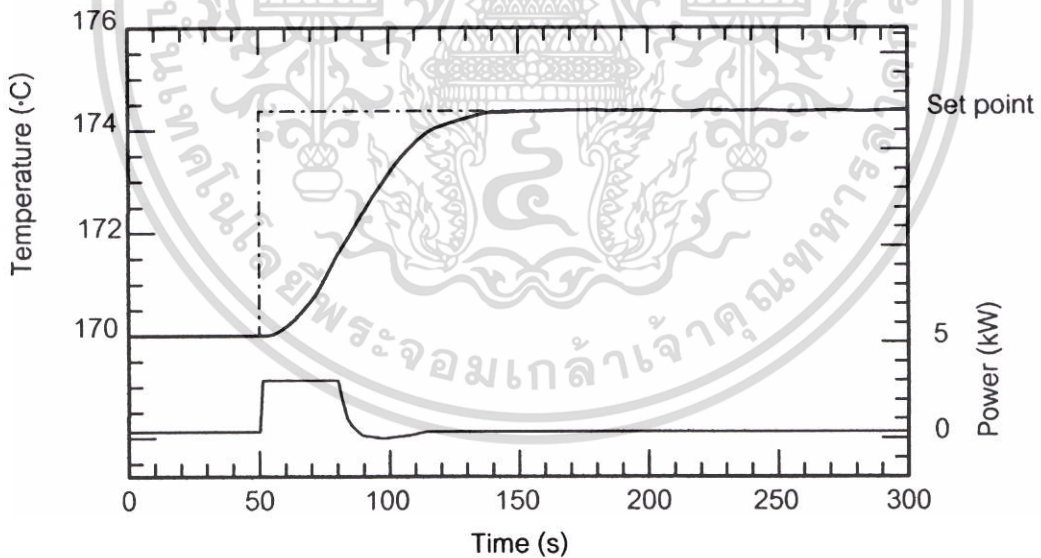
T_d คือ ค่าของ Derivative or Rate Time

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบ PID และตัวอย่างผลตอบสนองของระบบควบคุมอุณหภูมิแบบ PID แสดงดังรูปที่ 2.14 และ 2.15 ตามลำดับ



รูปที่ 2.14 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบ PID



รูปที่ 2.15 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของระบบควบคุมอุณหภูมิแบบ PID

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎีทางความร้อนและหลักการควบคุมแรงดันไฟฟ้า กระแสสลับ

3.1 กล่าวนำ

การออกแบบการควบคุมกระบวนการทางความร้อนในอุตสาหกรรมหรือระบบควบคุมที่ใช้ในกระบวนการทางความร้อนในอุตสาหกรรม จำเป็นต้องทราบธรรมชาติและคุณลักษณะหรือคุณสมบัติของกระบวนการและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการทางความร้อนทั้งหมด เพื่อใช้ศึกษาคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงสภาพของกระบวนการ เมื่อได้รับการควบคุมจากตัวควบคุมหรืออุปกรณ์ควบคุมอื่นๆ หรือเมื่อถูกรบกวนจากการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมภายนอก ทั้งนี้ก็เพื่อที่จะได้ออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสม ในอันที่จะได้รับการควบคุมที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งหลักการและทฤษฎีทางความร้อนที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมแบบสองสภาวะหลายระดับ สำหรับการควบคุมอุณหภูมินั้น ผู้วิจัยได้ศึกษาถึงทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) โดยใช้หลักการพลังงานสมดุล (Energy Balance) เพื่อคำนวณหาค่าพลังงานของสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมกับกระบวนการทางความร้อน ซึ่งจากที่ทราบแล้วว่ากระบวนการทางความร้อนโดยส่วนใหญ่เป็นแบบเตาไฟฟ้าอุตสาหกรรม ดังนั้นการเข้าใจหลักการแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อใช้ในการควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการทางความร้อนจึงเป็นเรื่องที่จำเป็นสำหรับการประยุกต์ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสม

3.2 ทฤษฎีทางความร้อนที่ประยุกต์ใช้ในการออกแบบ

ในการออกแบบกระบวนการทางความร้อนต่างๆ นั้น ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนเป็นเรื่องจำเป็นในการศึกษาคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงสภาพของกระบวนการทางความร้อน ซึ่งในการออกแบบตัวควบคุมแบบสองสภาวะหลายระดับสำหรับการควบคุมอุณหภูมินั้น อัตราการถ่ายเทความร้อนของกระบวนการนำไปสู่การหาค่าพลังงานของสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมโดยใช้การกำหนดจากหลักการพลังงานสมดุล ดังที่จะกล่าวต่อไป

3.2.1 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน

ในทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic) พลังงานไม่สามารถที่จะสร้างขึ้นใหม่หรือทำลายได้ แต่พลังงานสามารถเปลี่ยนจากรูปแบบหนึ่งไปเป็นอีกรูปแบบหนึ่งได้ ดังนั้นการถ่ายเทพลังงานในแง่ของความร้อนนั้นไม่สามารถที่จะวัดโดยตรงได้ แต่สามารถพิจารณาได้จากวิธีทางฟิสิกส์เพราะว่าความร้อนเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่วัดได้ โดยการสังเกตพบว่า

เมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิเกิดขึ้นในระบบ ความร้อนก็จะมีการถ่ายเทจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า

การศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน ความร้อนสามารถเคลื่อนที่จากจุดๆ หนึ่งไปยังจุดอีกจุดหนึ่งได้ 3 วิธีด้วยกันคือ การนำความร้อน (Conduction Heat Transfer) การพาความร้อน (Convection Heat Transfer) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation Heat Transfer) [8] โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.2.1.1 การนำความร้อน

การนำความร้อนหมายถึงการส่งถ่ายพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในตัวกลาง โดยมีอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางจากด้านที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่ด้านที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยส่งถ่ายความร้อนจากโมเลกุลหนึ่งสู่อีกโมเลกุลอย่างต่อเนื่อง การนำความร้อนสามารถเกิดขึ้นได้ในตัวกลางที่เป็นของแข็ง ของเหลว และก๊าซ

หลักการคำนวณเกี่ยวกับการนำความร้อนถูกตั้งขึ้นโดย โจเซฟ ฟูเรียร์ (Joseph Fourier) นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส ได้เสนอสมการที่ใช้สำหรับคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการนำ ในปี ค.ศ. 1822 โดยอาศัยข้อมูลจากการทดลองซึ่ง กล่าวว่า

สำหรับการนำความร้อนผ่านตัวกลางในทิศทางใดทิศทางหนึ่งอัตราการถ่ายเทความร้อน (Q_x) ผ่านตัวกลางในทิศทางนั้นเป็นปฏิภาคโดยตรงกับพื้นที่ถ่ายเทความร้อนที่ตั้งฉากกับทิศทางของการไหลของความร้อน (A) และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวกลางในทิศทางดังกล่าว (dT/dx) [9]

การนำความร้อนในทิศทาง x ภายใต้สภาวะคงตัว (Steady state) อุณหภูมิในตัวกลาง $T = T(x)$ จากกฎของฟูเรียร์ (Fourier' Law) จะเป็นไปตามสมการ (3.1)

$$Q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (3.1)$$

เมื่อ Q_x คือ อัตราการนำความร้อนผ่านพื้นที่ A ในทิศทางบวก x มีหน่วยเป็น W

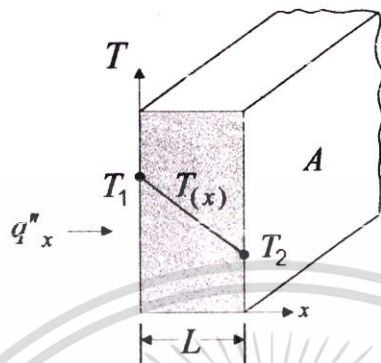
k คือ ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) มีหน่วยเป็น W/m·K

A คือ พื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของความร้อน มีหน่วยเป็น m^2

$\frac{dT}{dx}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับระยะทาง

สมการนี้เรียกว่า Fourier rate equation ซึ่งเป็นสมการที่ได้มาโดยอาศัยผลการทดลอง เครื่องหมายลบซึ่งก็คือ กฎของฟูเรียร์ โดยพิจารณาจากกฎข้อที่สองของ เทอร์โมไดนามิกส์ [9]

ลักษณะของการนำความร้อนผ่านตัวกลางใน 1 มิติที่กีด x แสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะการนำความร้อนผ่านตัวกลางใน 1 มิติที่กีด x

ค่าฟลักซ์ความร้อนผ่านตัวกลาง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.2)

$$q_x'' = \frac{\dot{Q}_x}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad (3.2)$$

เมื่อ q_x'' คือ ค่าฟลักซ์ความร้อนผ่านตัวกลาง มีหน่วยเป็น W/m^2

ในสมการ (3.1) และ (3.2) ถ้าอุณหภูมิของตัวกลางลดลงตามทิศทาง $+x$ พบว่าค่าของ dT/dx เป็นลบ ดังนั้นถ้า \dot{Q}_x หรือ q_x'' มีเครื่องหมายบวก แสดงว่า \dot{Q}_x หรือ q_x'' มีทิศทางการไหลในทิศ $+x$ ภายใต้สภาวะคงตัวและตัวกลางมี k เป็นค่าคงที่ อุณหภูมิ $T(x)$ เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นดังในรูปที่ 3.1 ดังนั้น

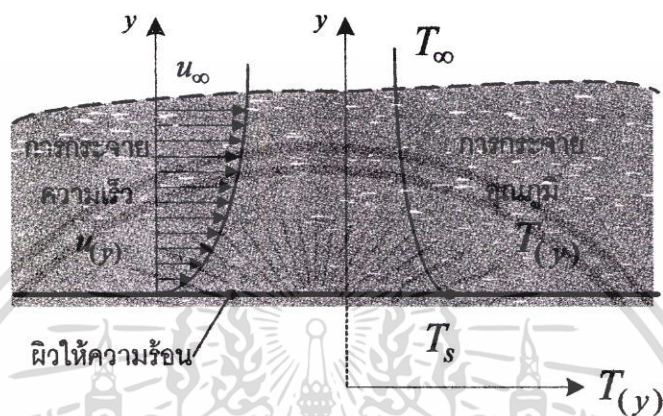
$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} = \frac{-(T_1 - T_2)}{L} \quad (3.3)$$

ดังนั้น

$$q_x'' = \frac{k(T_1 - T_2)}{L} = \frac{k\Delta T}{L} \quad (3.4)$$

3.2.1.2 การพาความร้อน

การพาความร้อนหมายถึงการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวของแข็งกับของไหล ผลการเคลื่อนไหวยังของไหลส่งผลให้เกิดการถ่ายเทโมเมนตัม ซึ่งมีผลต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวของแข็งนั้น ($h, W/m^2 \cdot K$) พลังงานความร้อนถูกโอนถ่ายเป็นผลมาจากการแพร่ (Diffusion) ของโมเลกุลและผลจากการเคลื่อนไหวยังไปทั้งปริมาตรของของไหล [10]



รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะการกระจายความเร็วและอุณหภูมิของของไหล ขณะเกิดการพาความร้อนบริเวณใกล้ผิวให้ความร้อน

การพาความร้อนจำแนกออกเป็น 2 ประเภท คือ

1) การพาความร้อนตามธรรมชาติ (Natural Convection) คือการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยไม่มีกลไกใดๆ ที่ทำให้ของไหลเคลื่อนที่ แต่ของไหลที่อยู่ใกล้กับผิวของของแข็งก็อาจเคลื่อนที่ได้โดยแรงลอยตัวของของไหลเอง แรงลอยตัวนี้เกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นของของไหล เมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิในชั้นของของไหลขึ้น เช่น ปล่อยแผ่นวัตถุร้อนที่วางในบรรยากาศให้เย็น



รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะการพาความร้อนตามธรรมชาติ

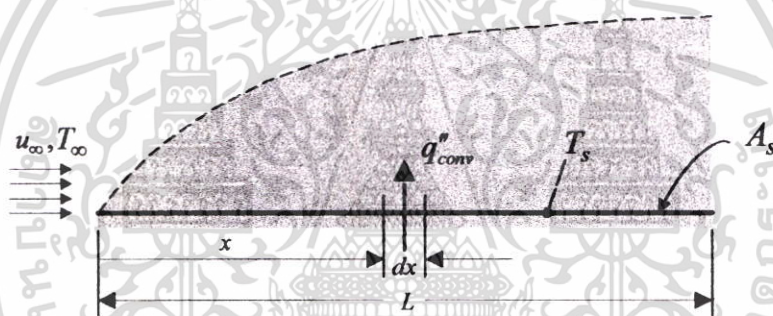
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การพาความร้อนโดยบังคับ (Forced Convection) คือการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยที่ของไหลถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปสัมผัสผิวด้านหนึ่งของของแข็ง โดยกลไกภายนอกเช่น เครื่องสูบลม เครื่องเป่าลม (Blower) เป็นต้น



รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะการพาความร้อนโดยบังคับ

ลักษณะการพาความร้อนในชั้นขีดยืดความร้อนและชั้นขีดยืดความเร็ว แสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะการพาความร้อนในชั้นขีดยืดความร้อนและชั้นขีดยืดความเร็ว

ในรูปที่ 3.5 พิจารณาการพาความร้อนจากผิวของแข็งพื้นที่ A_s อุณหภูมิ T_s ของไหลไหลผ่านด้วยความเร็ว u_∞ และอุณหภูมิ T_∞ คงที่ ฟลักซ์ความร้อนเฉพาะที่คำนวณเป็นไปตามกฎการทำให้เย็นตัวลงของนิวตัน (Newton's law of cooling) ดังสมการ

$$q''_{conv} = h(T_s - T_\infty) \quad (3.5)$$

เมื่อ q''_{conv} คือ ค่าฟลักซ์ความร้อนเฉพาะที่ มีหน่วยเป็น W/m^2

h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะที่ มีหน่วยเป็น $W/m^2 \cdot K$

ดังนั้นจะคำนวณอัตราการพาความร้อนทั้งหมด ($\dot{Q}_{convection}$) บนพื้นผิว A_s จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q_{convection} = \int_{A_s} q''_{conv} dA_s = (T_s - T_\infty) \int h dA_s \quad (3.6)$$

การคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพา นั้นเป็นสิ่งที่ยุ่งยาก เมื่อพิจารณาแล้วมีหลายสิ่งหลายอย่างที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของความร้อนแบบการพานี้ เป็นต้นว่า คุณสมบัติของของไหล ความหนาแน่น ความร้อนจำเพาะ ความหนืด ความเร็วของของไหล ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของพื้นผิวของของแข็งและของไหล เป็นต้น นิวตัน (Newton) ได้ตัดปัญหาความยุ่งยากเหล่านี้ โดยเสนอสมการสำหรับคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพา ดังนี้คือ

$$Q_{conv} = hA(T_s - T_\infty) \quad (3.7)$$

เมื่อ Q_{conv} คือ อัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพา มีหน่วยเป็น W

h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน มีหน่วยเป็น W/m²·K

A คือ พื้นที่หน้าตัด มีหน่วยเป็น m²

T_s คือ อุณหภูมิที่ร้อน มีหน่วยเป็น K หรือ °C

T_∞ คือ อุณหภูมิที่เย็น มีหน่วยเป็น K หรือ °C

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในช่วงใช้งาน

ชนิดของการพาความร้อน	ค่าสัมประสิทธิ์ (W/m ² ·K)
การพาความร้อนตามธรรมชาติ	5~25
การพาความร้อนโดยบังคับ	
ก๊าซ	25~250
ของเหลว	50~20000
การพาความร้อนขณะเปลี่ยนแปลงเฟส (เดือดตัวและควบแน่น)	2500~100000

3.2.1.3 การแผ่รังสีความร้อน

การแผ่รังสีความร้อนหมายถึงการถ่ายเทความร้อนจากผิวดังกลางหนึ่ง ไปสู่อีกผิวดังกลางหนึ่งซึ่งมีอุณหภูมิแตกต่างกัน พลังงานของการแผ่รังสีถูกส่งถ่ายในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave) หรือในรูปของโฟตอน (Photon) โดยไม่ต้องอาศัยวัสดุตัวกลาง การแผ่รังสีความร้อนจึงสามารถเกิดในสุญญากาศได้

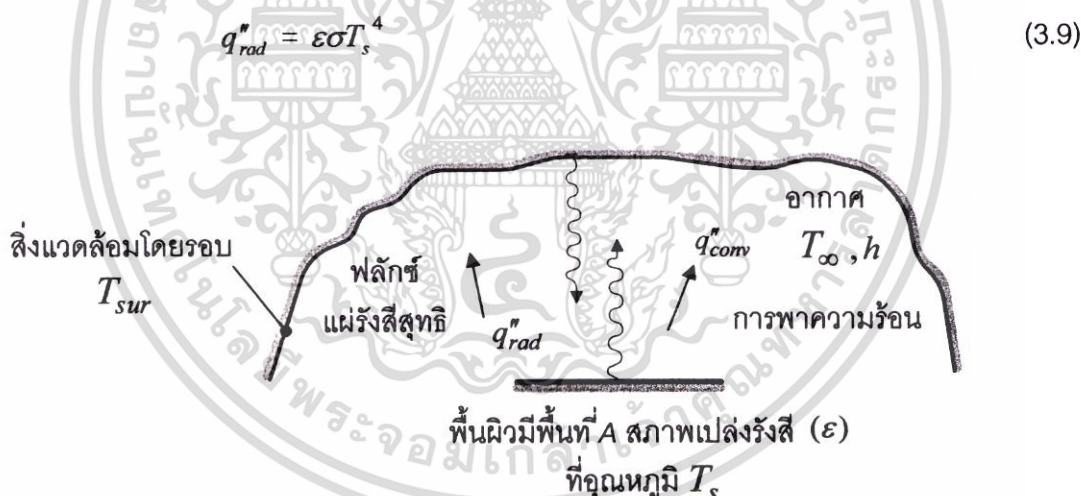
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟลักซ์สูงสุดของการแผ่รังสีออกจากผิวตัวกลาง คำนวณจากกฎของสเตฟาน-โบลต์ซมันน์ (Stefan-Boltzmann) [10] ดังนี้

$$q_{rad}'' = \sigma T_s^4 \quad (3.8)$$

เมื่อ q_{rad}'' คือ ค่าฟลักซ์สูงสุดของการแผ่รังสีออกจากผิวตัวกลาง มีหน่วยเป็น W/m^2
 T_s คือ อุณหภูมิผิวแผ่รังสีในหน่วยของศาสสมบูรณ์ มีหน่วยเป็น K
 σ คือ ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลต์ซมันน์ มีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$

สมการ (3.8) ใช้กับกรณีของตัวแผ่รังสีในอุดมคติ (Ideal Radiator) หรือวัตถุดำ (Black body) สำหรับกรณีของพื้นผิวจริง (Real surface) ฟลักซ์แผ่รังสีจะน้อยกว่ากรณีของวัตถุดำ ทั้งนี้จะขึ้นกับสภาพเปล่งรังสี (Emissivity) ของพื้นผิวนั้น (ϵ) ด้วย ฟลักซ์แผ่รังสีบนพื้นผิวจริงคำนวณจากสมการที่ (3.9)



รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะการแผ่รังสีแลกเปลี่ยนกันระหว่างพื้นผิวหนึ่งกับสิ่งแวดล้อมโดยรอบ

พิจารณาการแผ่รังสีแลกเปลี่ยนกันระหว่างพื้นผิว A อุณหภูมิ T_s มีสภาพเปล่งรังสี (ϵ) กับสิ่งแวดล้อมโดยรอบซึ่งมีอุณหภูมิคงที่ T_{sur} อัตราการแผ่รังสีสุทธิบนพื้นผิว A คือ

$$q_{net}'' = \frac{\dot{Q}_{rad,net}}{A} = \epsilon \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (3.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากรูปแบบสมการ (3.10) แล้ว รูปแบบสมการอย่างง่ายสำหรับคำนวณการแผ่รังสี จะเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\dot{Q}_{rad,net} = h_r A (T_s - T_{sur}) \quad (3.11)$$

โดยที่ h_r คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนมีหน่วยเป็น $W/m^2 \cdot K$ ซึ่งคำนวณได้จาก

$$h_r = \varepsilon \sigma (T_s + T_{sur})(T_s^2 + T_{sur}^2) \quad (3.12)$$

ในรูปที่ 3.6 ถ้าหากระหว่างพื้นผิว A กับสิ่งแวดล้อมเป็นก๊าซ จะมีการพาความร้อนเกิด ร่วมกับการแผ่รังสีความร้อนด้วย ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดสุทธิออกจากพื้นผิว A คำนวณจาก

$$\dot{Q}_{tot} = \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad,net} \quad (3.13)$$

ดังนั้น

$$= hA(T_s - T_\infty) + \varepsilon A \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (3.14)$$

เมื่อ \dot{Q}_{tot} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดสุทธิ มีหน่วยเป็น W

3.3.2 ทฤษฎีกฎการอนุรักษ์พลังงาน

การเข้าใจถึงทฤษฎีกฎการอนุรักษ์พลังงานจะช่วยให้การพิจารณาเรื่องสัดส่วนของ พลังงานความร้อนที่ถูกนำไปใช้ในส่วนต่างๆ ทำได้ง่ายขึ้น จากการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็น พลังงานความร้อนเพื่อเปลี่ยนค่าอุณหภูมิให้กับวัสดุที่ต้องการ โดยอุณหภูมิคงตัวของวัตถุเกิดขึ้น เมื่ออัตราพลังงานความร้อนให้กับระบบมีค่าเท่ากับอัตราการสูญเสียรวมทั้งหมด ถ้าอัตราพลังงาน ความร้อนจ่ายเข้ามากกว่าอัตราพลังงานความร้อนสูญเสีย วัตถุจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ถ้าอัตรา พลังงานความร้อนจ่ายเข้าน้อยกว่าอัตราพลังงานความร้อนสูญเสียวัตถุจะมีอุณหภูมิลดลง ซึ่ง เป็นไปตามหลักการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of Energy Principle) หรือหลักพลังงาน สมดุล (Energy Balance) ในกฎข้อที่หนึ่งของหลักการถ่ายเทความร้อน (Thermodynamic) [11] ที่กล่าวว่า การเปลี่ยนแปลงพลังงานรวมทั้งหมดของระบบในกระบวนการเท่ากับความแตกต่าง ระหว่างพลังงานรวมทั้งหมดที่เข้าสู่ระบบและพลังงานรวมทั้งหมดที่ออกจากระบบในกระบวนการ ดังสมการที่ (3.15)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left(\begin{array}{c} \text{Total energy} \\ \text{entering the} \\ \text{system} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Total energy} \\ \text{leaving the} \\ \text{system} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Change in the} \\ \text{total energy of} \\ \text{the system} \end{array} \right) \quad (3.15)$$

พลังงานที่เข้าและออกจากระบบสามารถถ่ายเทในรูปแบบของความร้อน (Heat) งาน (Work) และปริมาณการไหล (Mass Flow) และพลังงานรวมทั้งหมดที่ได้ภายในของระบบ ประกอบด้วยพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) พลังงานศักย์ (Potential Energy) ซึ่งหลักการพลังงานสมดุลสำหรับทุกๆ ระบบในทุกๆ กระบวนการ สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3.16)

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E_{system} \quad (3.16)$$

เมื่อ E_{in}, E_{out} คือ พลังงานรวมสุทธิที่ถ่ายเทในลักษณะรูปแบบความร้อน งาน และ ปริมาณการไหล

ΔE_{system} คือ การเปลี่ยนแปลงภายในรูปแบบพลังงานจลน์ พลังงานศักย์ ฯลฯ

หรือคิดเป็นอัตรา ดังสมการที่ (3.17)

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = dE_{system} / dt \quad (3.17)$$

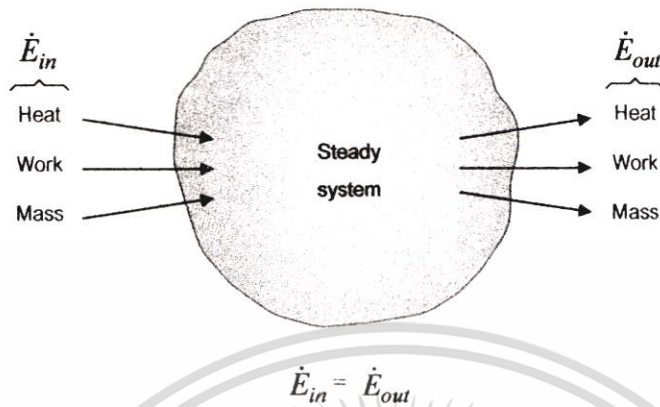
เมื่อ $\dot{E}_{in}, \dot{E}_{out}$ คือ อัตราพลังงานรวมที่ถ่ายเทในลักษณะรูปแบบความร้อน งาน และ ปริมาณการไหล

dE_{system} / dt คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงภายในรูปแบบพลังงานจลน์ พลังงานศักย์ ฯลฯ

การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในระบบจะเป็นศูนย์ ($\Delta E_{system} = 0$) ถ้าสภาพของระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลงภายในกระบวนการ นั่นคือกระบวนการอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady) หลักการพลังงานสมดุลในกรณีนี้สามารถเขียนได้ ดังสมการที่ (3.18)

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out} \quad (3.18)$$

ลักษณะอัตราการถ่ายเทพลังงานสู่ระบบเท่ากับอัตราการถ่ายเทพลังงานออกจากระบบ
ในสภาวะคงตัว แสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงหลักการพลังงานสมดุลในสภาวะคงตัว

3.3 การแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับในการควบคุมอุณหภูมิขดลวดความร้อน

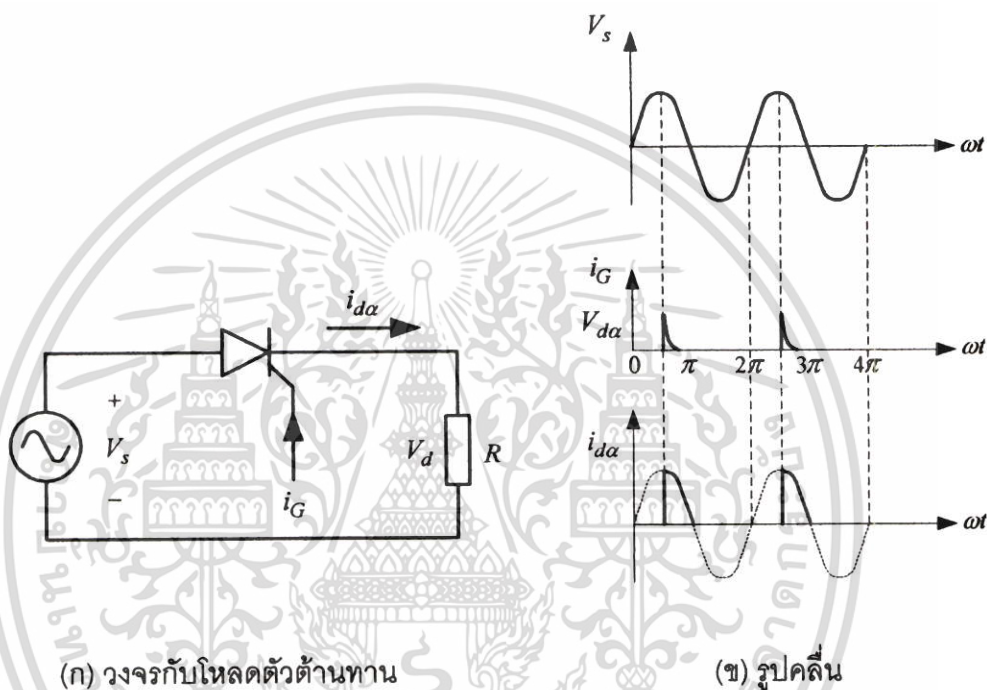
การควบคุมกำลังไฟฟ้าให้แก่โหลดบางอย่างที่ไม่จำเป็นต้องใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เช่น การควบคุมอุณหภูมิขดลวดความร้อน การควบคุมความสว่างหลอดไฟ การเปลี่ยนจุดต่อ (Tap) ของหม้อแปลง การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ งานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า เป็นต้น [12] โหลดต่างๆ เหล่านี้สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าได้โดยการควบคุมค่าอาร์เอ็มเอส (Root Mean Square: RMS) ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายให้แก่โหลด จากที่ทราบแล้วว่ากระบวนการทางความร้อนโดยส่วนใหญ่เป็นแบบเตาไฟฟ้าอุตสาหกรรม ซึ่งเตาไฟฟ้าอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องในวิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นแบบเตาความต้านทาน จากที่เตาไฟฟ้าแบบนี้ใช้ความต้านทานเป็นตัวกำเนิดความร้อน และมีอุปกรณ์ควบคุมขั้นสุดท้าย (Final Control Device) เป็นขดลวดความร้อน การศึกษาถึงหลักการควบคุมอุณหภูมิของขดลวดความร้อนโดยใช้การแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับในการควบคุมอุณหภูมิขดลวดความร้อน จึงเป็นประโยชน์ต่อความเข้าใจในการออกแบบตัวควบคุมที่นำเสนอซึ่งใช้สัญญาณควบคุมในการแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อควบคุมอุณหภูมิของขดลวดความร้อน

การแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับในการควบคุมอุณหภูมิขดลวดความร้อนนั้น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มักเป็นที่นิยมใช้คือ เซลล์ซิลิโคน (Silicon Controlled Rectifier: SCR) และไทริสเตอร์ (Thyristors) เพราะอุปกรณ์เหล่านี้มีความสามารถปิดกั้นแรงดันได้ (Blocking Voltage) และกระแสไหลได้ทิศทางเดียว (Unidirectional Current) เพื่อให้เข้าใจหลักการพื้นฐานการแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับในการควบคุมอุณหภูมิขดลวดความร้อน ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงขอกกล่าวถึง

เอกสารเฉพาะเอสซีอาร์มาเป็นตัวอย่างการใช้งานในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 การใช้เอสซีอาร์ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

การใช้งานเอสซีอาร์ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ มีลักษณะการต่อวงจรเช่นเดียวกับ ไดโอดกำลัง เอสซีอาร์จะนำกระแสที่นั้นไม่เพียงแต่ต้องได้รับแรงดันไปหน้า (Forward Bias) ตกคร่อมระหว่างขั้วแอโนดกับแคโทดเท่านั้น เอสซีอาร์จะต้องได้รับกระแสจุดชนวนเกต (Gate) ด้วย ดังนั้นการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจึงสามารถควบคุมได้ โดยหน่วงเวลาจุดชนวนเกตหรือควบคุมมุมจุดชนวนเกต (Trigger Delay Angle: α) นั้นเองดังแสดงในรูปที่ 3.8

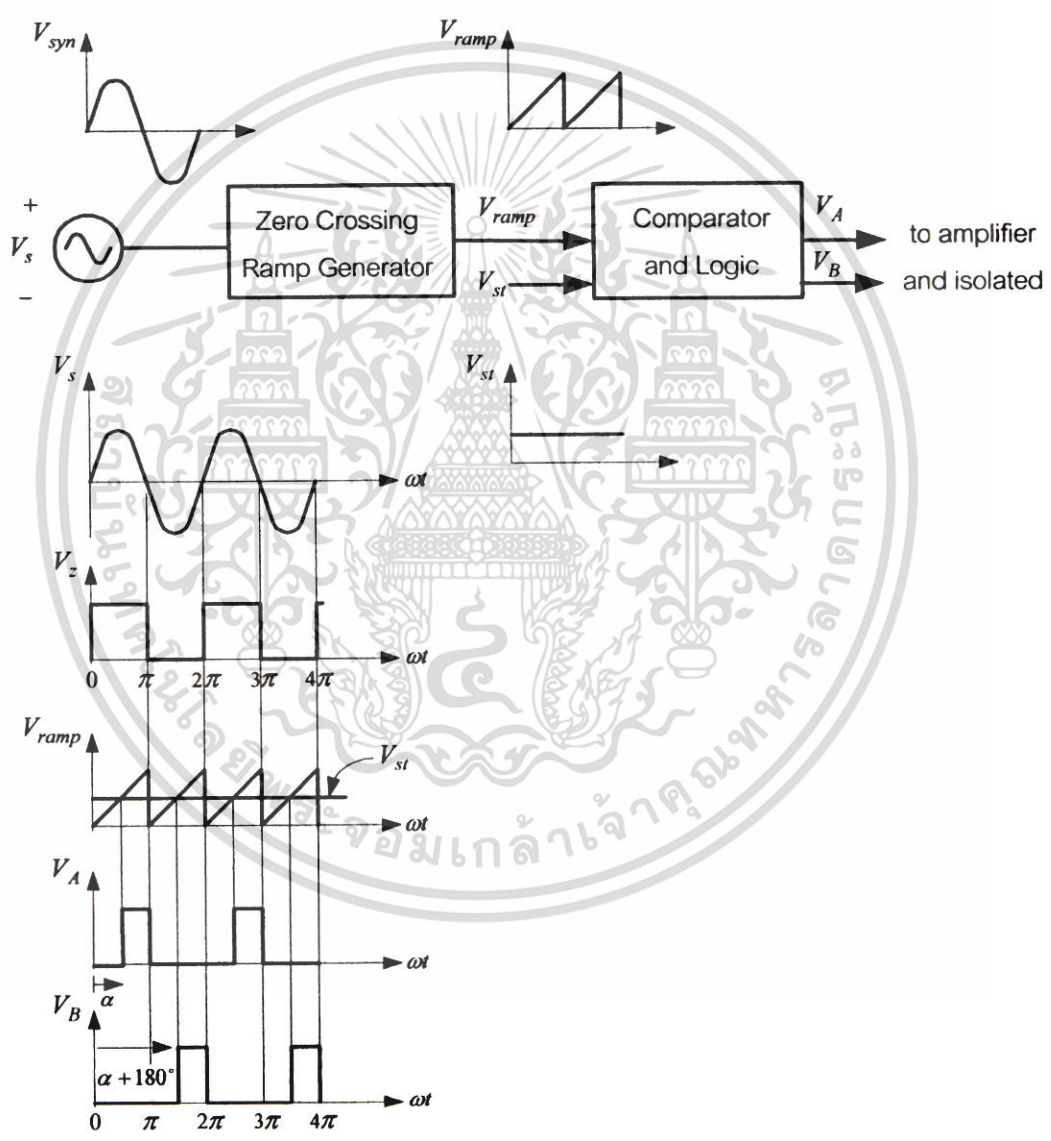


รูปที่ 3.8 แสดงการใช้งานเอสซีอาร์ควบคุมมุมจุดชนวนเกตในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

จากรูปที่ 3.8 (ก) ขั้วแอโนดของเอสซีอาร์ต่อกับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ V_s (แรงดันอินพุท) ขั้วแคโทดต่อกับตัวด้านทาน ช่วงเวลาที่แรงดันอินพุทเป็นบวกเอสซีอาร์จะได้รับแรงดันไปหน้า $0 < \omega t < 180^\circ$ เมื่อจุดชนวนเกตจะทำให้เอสซีอาร์นำกระแส ตั้งแต่ $\omega t = \alpha$ ไปจนกว่ากระแสไหลผ่านเอสซีอาร์ต่ำกว่ากระแสยึด (Holding Current) เอสซีอาร์จึงหยุดนำกระแส แรงดันอินพุทซึ่งเป็นไฟฟ้ากระแสสลับจะตกสู่ศูนย์ทุกๆ ครึ่งรอบหรือทุกๆ 180 องศา ทำให้กระแสลดลงเป็นศูนย์ ดังนั้นเอสซีอาร์จะหยุดนำกระแสทุกครึ่งรอบเช่นเดียวกัน ด้วยเหตุนี้ในรอบต่อไปต้องจุดชนวนเกตอีกครั้งเพื่อให้เอสซีอาร์เริ่มนำกระแสในรอบต่อไป

3.3.2 การจูนจนวนเกตเอสซีอาร์

ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับเอสซีอาร์ต้องการสัญญาณจูนจนวนเกตทุกๆ รอบ ดังนั้น หลักการเบื้องต้นที่จะสร้างสัญญาณจูนจนวนเกต ต้องตรวจวัดมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้า กระแสสลับก่อน เพื่อนำมาอ้างอิงและหน่วงเวลาจูนจนวนเกตเอสซีอาร์ มุมจูนจนวนเกตจะต้อง สัมพันธ์กับแรงดันอินพุตทุกๆ รอบซึ่งเรียกว่า การซิงโครไนซ์ (Synchronizing) การออกแบบวงจร สร้างสัญญาณจูนจนวนเกตเบื้องต้นแสดงในรูปที่ 3.9



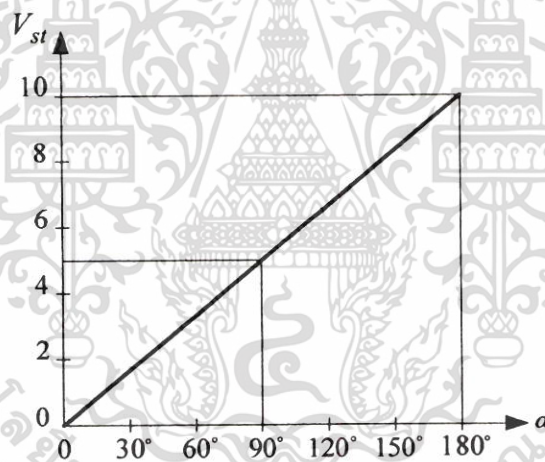
รูปที่ 3.9 แสดงแผนภาพการออกแบบวงจรสร้างสัญญาณจูนจนวนเกตเบื้องต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.9 แสดงแผนภาพการสร้างสัญญาณจุดชนวนเกต โดยเริ่มจากการตรวจวัดแรงดันอินพุตรูปคลื่นไซน์และแปลงเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม (V_z) โดยวิธี Zero Crossing และแปลงเป็นสัญญาณแรงดันลาดเอียง (Ramp Voltage: V_{ramp}) ที่มีมุมเฟสตรงกับแรงดันอินพุต สัญญาณลาดเอียงจะนำมาเปรียบเทียบกับแรงดันควบคุม (Control Voltage: V_{st}) ถ้าแรงดันควบคุมสูงกว่าแรงดันลาดเอียงจะได้ลอจิกศูนย์ แต่ถ้าแรงดันควบคุมต่ำกว่าแรงดันลาดเอียงจะได้ลอจิกหนึ่ง ดังนั้นมุมของสัญญาณลอจิกที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์กับแรงดันควบคุม [13] ดังสมการที่ (3.19)

$$\text{Angle } (\alpha) = 180^\circ \times V_{st} / V_{ramp(peak)} \quad (3.19)$$

สัญญาณลอจิกที่ได้จะนำไปขยายสัญญาณให้สูงขึ้น เพื่อให้กระแสเกตมีค่าสูงพอที่จะจุดชนวนเกตให้เอสซีอาร์นำกระแสได้ จากสมการที่ (3.19) มุมจุดชนวนเกตมีคุณลักษณะการควบคุม ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงคุณลักษณะการควบคุมมุมจุดชนวนเกต

3.3.3 การควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

การควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับในการควบคุมอุณหภูมิขดลวดความร้อนปกติแรงดันอินพุตจะเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่และขนาดค่าแรงดันอาร์เอ็มเอสคงที่ (220/380 V, 50Hz.) การควบคุมกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ขดลวดความร้อนจะเป็นการควบคุมแรงดันอาร์เอ็มเอสของไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายให้แก่ขดลวดความร้อน มีการควบคุม 2 วิธี [12] คือ

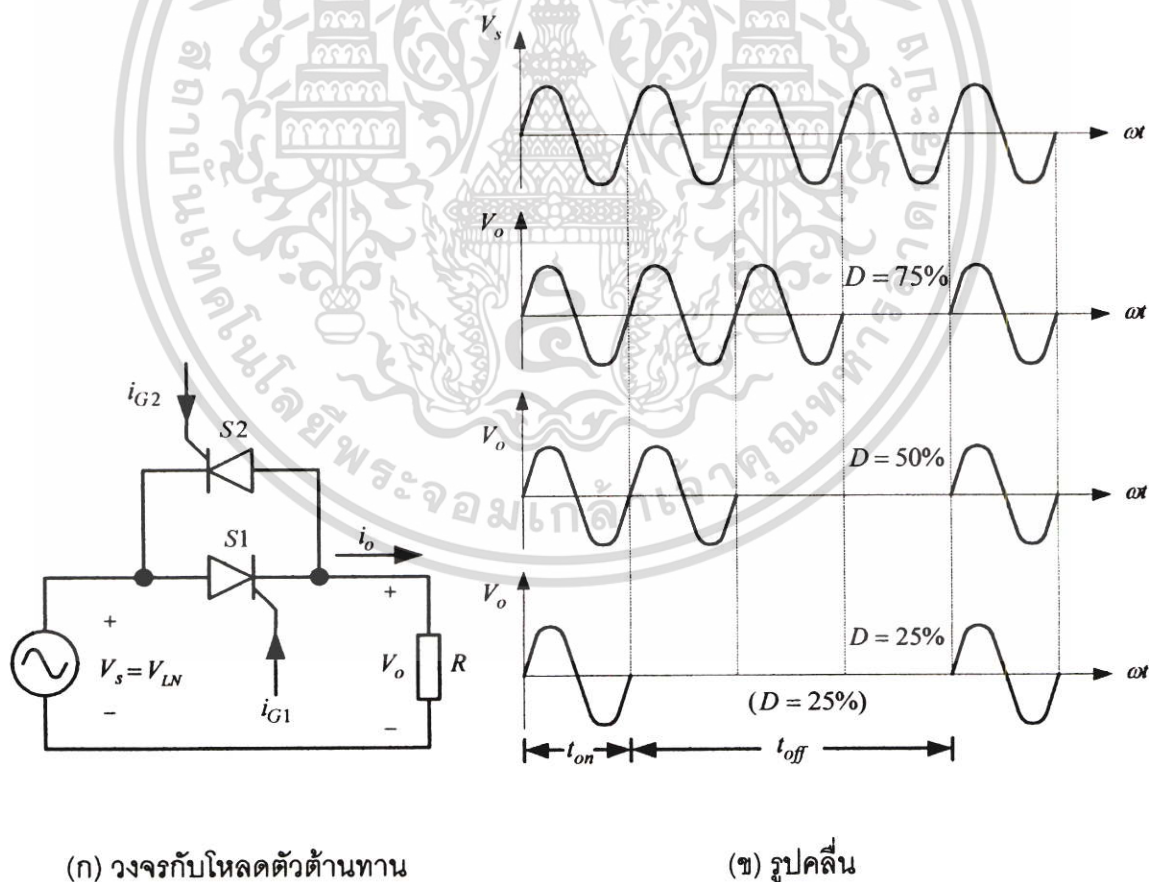
1. การควบคุมแบบเปิด-ปิด (On-Off Control)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มอนูญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3.1 การควบคุมแบบเปิด-ปิด (On-Off Control)

การควบคุมอุณหภูมิขดลวดความร้อนแบบเปิด-ปิด เป็นวิธีที่ออกแบบง่าย โดยใช้เอสซีอาร์หรือไทรแอก (Triac) เป็นสวิตช์กำลังต่อระหว่างโหลดกับแหล่งจ่ายไฟฟ้า แรงดันที่ตกคร่อมโหลดจะมีลักษณะเต็มรูปคลื่นและเป็นสัดส่วนกับเวลา เอสซีอาร์หรือไทรแอกจะถูกจุดชนวนเกิดเป็นช่วงๆ ที่มุม $\alpha = 0^\circ$ หรือจุดชนวนเกิดที่แรงดันอินพุทเป็นศูนย์ (Zero-Voltage Crossing) ลักษณะการทำงานคล้ายกับสวิตช์ทางกล เช่น คอนแทคเตอร์ (Contactor) ที่ทำงานด้วยความถี่สวิตช์สูง

ตัวอย่างการใช้งาน เช่น การควบคุมอุณหภูมิในงานอุตสาหกรรมโดยใช้ขดลวดความร้อน การควบคุมอาจใช้วิธีธรรมดาที่ง่ายๆ คือควบคุมในช่วงค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดที่ตั้งอุณหภูมิไว้ ซึ่งอุณหภูมิที่ได้จะไม่คงที่ ส่วนการควบคุมแบบ Time Proportional Control จะควบคุมโดยประมวลผลจากการเปรียบเทียบค่าที่ตั้งไว้ (Setpoint) กับค่าผิดพลาด (Error) ทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่มากยิ่งขึ้น วงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแบบเปิด-ปิดในการควบคุมอุณหภูมิขดลวดความร้อน แสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แสดงวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแบบเปิด-ปิดในการควบคุมอุณหภูมิขดลวดความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่ารอบทำงาน (D) มีค่าเท่ากับ

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \quad (3.20)$$

เมื่อ D คือ ค่ารอบทำงาน (Duty Cycle)

t_{on} คือ ช่วงเวลาสวิตช์กำลังนำกระแส (เปิด)

t_{off} คือ ช่วงเวลาสวิตช์กำลังไม่นำกระแส (ปิด)

ค่าแรงดันอาร์เอ็มเอสที่ตกคร่อมโหลด หรือแรงดันเอาต์พุต คำนวณได้จากสมการ

$$V_o = \left(\frac{t_{on}}{2\pi(t_{on} + t_{off})} \int_0^{2\pi} V_s^2 \sin^2 \omega t d\omega \right)^{1/2}$$

หรือ

$$V_o = V_s \sqrt{D} \quad (3.21)$$

เมื่อ V_o คือ ค่าแรงดันอาร์เอ็มเอสที่ตกคร่อมโหลด

V_s คือ ค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

ค่ากระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านเอสซีอาร์ ($I_{T(AV)}$) แต่ละตัว คำนวณได้จากสมการ

$$I_{T(AV)} = \frac{t_{on}}{2\pi(t_{on} + t_{off})} \int_0^{\pi} \frac{1}{R} V_s \sin \omega t d\omega$$

หรือ

$$= \frac{\sqrt{2} V_s D}{R\pi} \quad (3.22)$$

ค่ากระแสอาร์เอ็มเอสที่ไหลผ่านเอสซีอาร์ ($I_{T(RMS)}$) แต่ละตัว คำนวณได้จากสมการ

$$I_{T(RMS)} = \left(\frac{t_{on}}{2\pi(t_{on} + t_{off})} \int_0^{\pi} \frac{2}{R^2} V_s^2 \sin^2 \omega t d\omega \right)^{1/2}$$

หรือ

$$= \frac{\sqrt{2}V_s\sqrt{D}}{R\pi} \quad (3.23)$$

ค่ากระแสอาร์เอ็มเอสที่ไหลผ่านโหลด (I_o) คำนวณได้จากสมการ

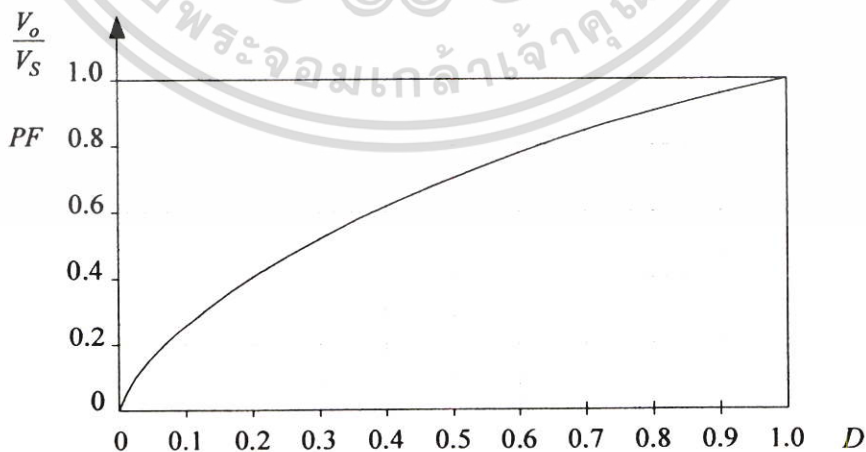
$$I_o = \frac{V_o}{R} ; I_o = I_s \quad (3.24)$$

ค่าตัวประกอบกำลัง (PF) คำนวณได้จากสมการ

$$PF = \frac{P_o}{VA} = \frac{V_o I_o}{V_s I_s} = \sqrt{D} \quad (3.25)$$

การควบคุมแบบเปิด-ปิด ช่วงเวลาการควบคุมหนึ่งรอบทำงาน (T_s) ปกติจะน้อยกว่า 1 วินาที ซึ่งมักจะนำไปใช้กับงานที่มีค่าคงที่ทางความร้อนสูง เช่น การควบคุมอุณหภูมิของชุดลดความร้อนในงานอุตสาหกรรม หรืองานที่โหลดทางกลมีความเฉื่อยสูง เช่น การควบคุมความเร็วมอเตอร์ เป็นต้น

คุณลักษณะการควบคุมแบบเปิด-ปิด ตัวประกอบกำลังและแรงดันเอาต์พุตจะแปรผันตามรากที่สองของค่ารอบทำงาน ดังสมการที่ (3.21) และ (3.25) ดังนั้นตัวประกอบกำลังและแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าต่ำเมื่อค่ารอบทำงานต่ำ เส้นโค้งคุณลักษณะการควบคุมแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แสดงคุณลักษณะการควบคุมแรงดันเอาต์พุต และค่าตัวประกอบกำลัง แบบเปิด-ปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3.2 การควบคุมมุมเฟส (Phase-Angle Control)

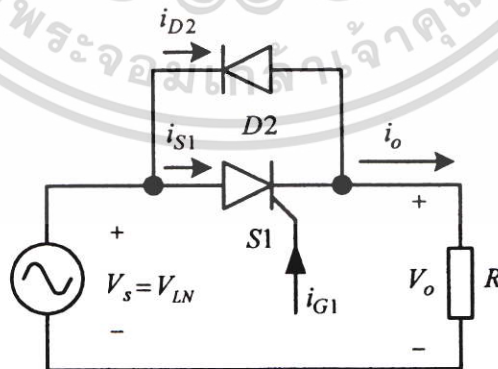
การควบคุมอุณหภูมิขดลวดความร้อนแบบมุมเฟสสามารถควบคุมค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับได้โดยหน่วงเวลาจุดชนวนเกิดในแต่ละครึ่งรอบของรูปคลื่นแรงดัน ดังแสดงในรูปที่ 3.8 แรงดันตกคร่อมโหลดจะไม่ครบรูปคลื่นเนื่องจากถูกปิดกั้นด้วยสวิตช์กำลังในแต่ละครึ่งรอบ ดังนั้นจึงสามารถควบคุมค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันได้ จากหลักการนี้สามารถนำไปใช้ได้กับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียวและสามเฟส

ตัวอย่างการใช้งาน เช่น การควบคุมอุณหภูมิในงานอุตสาหกรรมโดยใช้ขดลวดความร้อน เช่น การควบคุมแบบ PI และการควบคุมแบบ PID ซึ่งอุณหภูมิที่ได้จะคงที่ โดยจะควบคุมโดยประมวลผลจากการเปรียบเทียบค่าที่ตั้งไว้ (Setpoint) กับค่าผิดพลาด (Error) ทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่มากยิ่งขึ้นกว่าการควบคุมแบบ On-Off และแบบ Time Proportional Control การควบคุมอุณหภูมิขดลวดความร้อนแบบมุมเฟสแบ่งได้ 2 แบบคือ

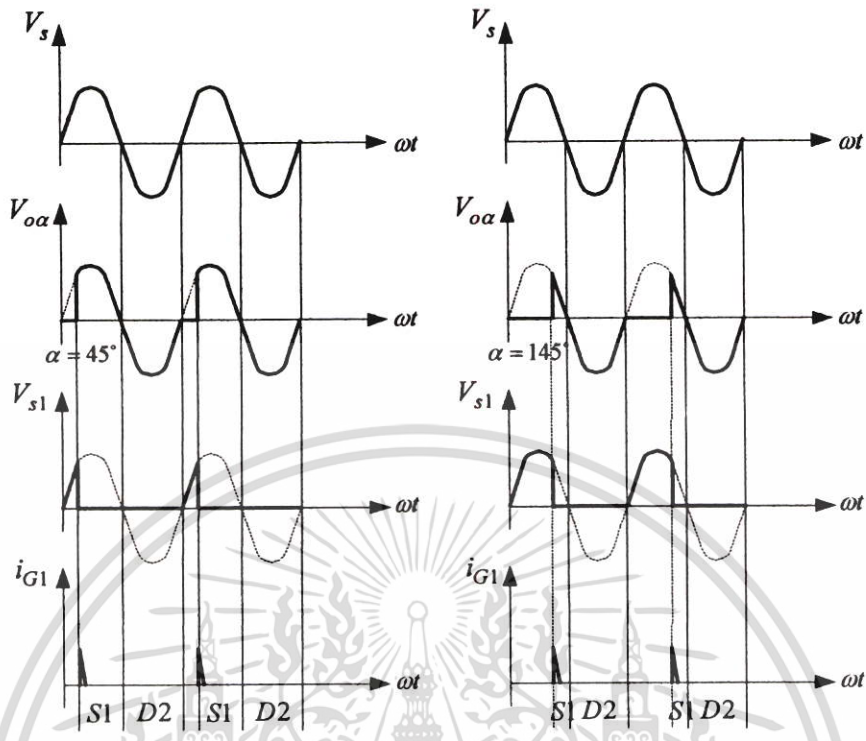
1. การควบคุมแบบครึ่งคลื่น (Half Wave Control)
2. การควบคุมแบบเต็มคลื่น (Full Wave Control)

1. การควบคุมมุมเฟสแบบครึ่งคลื่น

การควบคุมมุมเฟสแบบครึ่งคลื่นเป็นการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแบบทางเดียว (Unidirectional) คือควบคุมเฉพาะช่วงบวกหรือช่วงลบของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเท่านั้น กรณีนี้กระแสที่ไหลในวงจรจะมีองค์ประกอบของกระแสตรงจึงเหมาะสำหรับงานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าต่ำๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.13



(ก) วงจรกับโหลดตัวต้านทาน



(ข) รูปคลื่น

รูปที่ 3.13 แสดงการควบคุมมุมเฟสแบบครึ่งคลื่น กับโหลดตัวต้านทาน

ค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันเอาต์พุตกับโหลดตัวต้านทาน คำนวณได้จากสมการ

$$\begin{aligned}
 V_o &= \left(\frac{1}{2\pi} \left[\int_{\alpha}^{\pi} 2V_s^2 \sin^2 \omega t d\omega t + \int_{\pi}^{2\pi} 2V_s^2 \sin^2 \omega t d\omega t \right] \right)^{1/2} \\
 &= \left(\frac{2}{4\pi} V_s^2 \left[\int_{\alpha}^{\pi} (1 - \cos 2\omega t) d\omega t + \int_{\pi}^{2\pi} (1 - \cos 2\omega t) d\omega t \right] \right)^{1/2} \\
 &= V_s \left(\frac{1}{2\pi} \left(2\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) \right)^{1/2} ; 0 < \alpha < 180^\circ \tag{3.26}
 \end{aligned}$$

ค่าเฉลี่ยของแรงดันเอาต์พุตกับโหลดตัวต้านทาน คำนวณได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_o = \left(\frac{1}{2\pi} \left[\int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2}V_s^2 \sin \omega t d\omega t + \int_{\pi}^{2\pi} \sqrt{2}V_s \sin \omega t d\omega t \right] \right)$$

$$= \frac{\sqrt{2}V_s}{2\pi} (\cos \alpha - 1) ; 0 < \alpha < 180^\circ \quad (3.27)$$

ค่าตัวประกอบกำลังกับโหลดตัวต้านทาน คำนวณได้จากสมการ

$$PF = \frac{P_o}{VA} = \frac{V_o I_o}{V_s I_s}$$

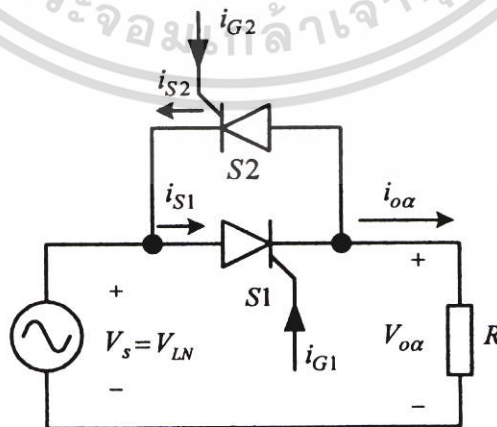
$$= \left(\frac{1}{2\pi} (2\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2}) \right)^{1/2} \quad (3.28)$$

จากสมการแรงดันที่ (3.27) และ (3.28) จะเห็นว่าการควบคุมมุมจุดชนวนเกิดมีค่าระหว่าง $0 < \alpha < 180^\circ$ แรงดันอาร์เอ็มเอสควบคุมได้ระหว่าง 0 ถึง $V_s / \sqrt{2}$ แรงดันเฉลี่ยควบคุมได้ระหว่าง 0 ถึง $\sqrt{2}V_s / \pi$

2. การควบคุมมุมเฟสแบบเต็มคลื่น

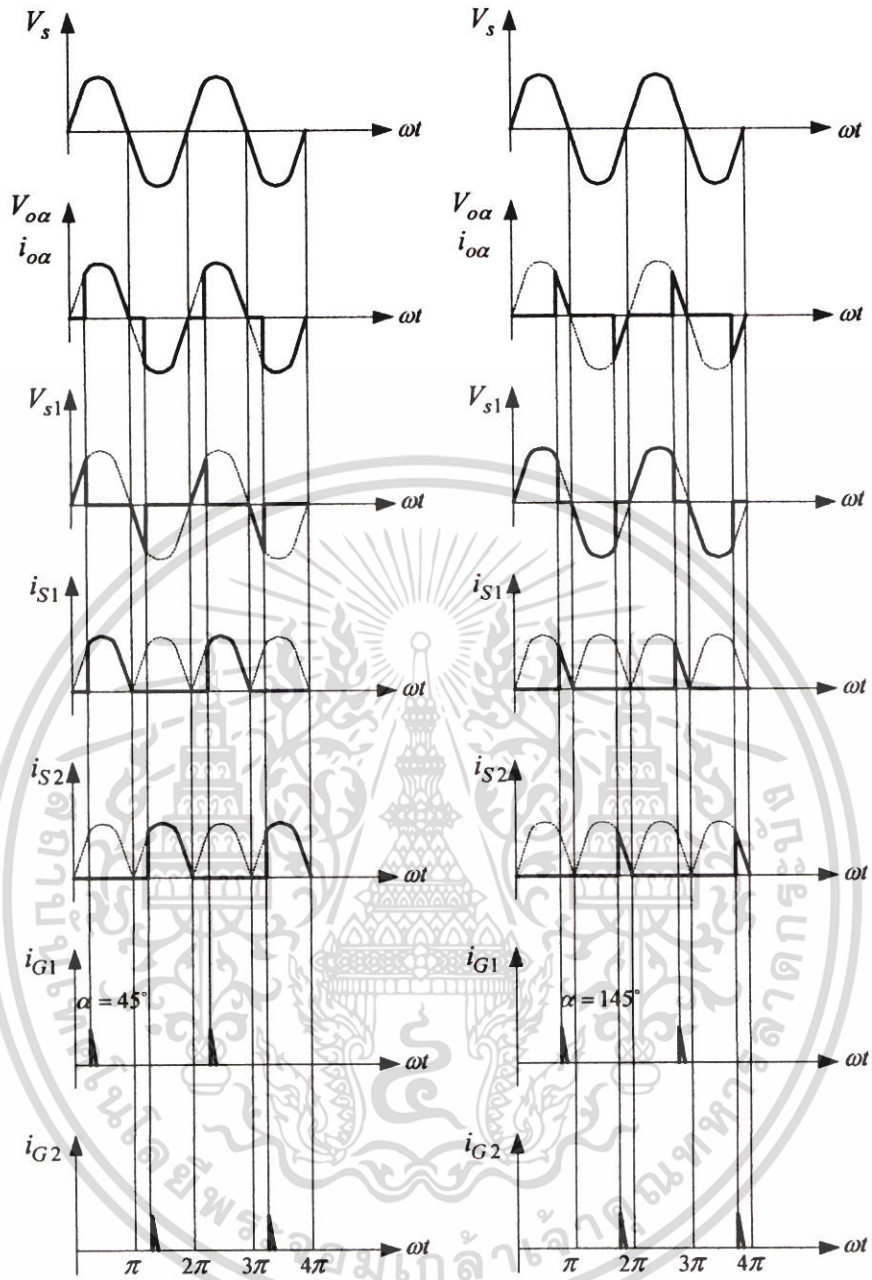
การควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับโดยการควบคุมมุมเฟสแบบเต็มคลื่น เป็นการควบคุมมุมเฟสแบบสองทาง (Bi-directional) คือควบคุมทั้งช่วงบวกและช่วงลบของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งจะทำให้องค์ประกอบของไฟฟ้ากระแสตรงหมดไป ดังแสดงในรูปที่

3.14



(ก) วงจรกับโหลดตัวต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) รูปคลื่น

รูปที่ 3.14 แสดงการควบคุมมุมเฟสแบบเต็มคลื่นในการควบคุมอุณหภูมิขดลวดความร้อน

ค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันเอาต์พุตกับโหนดตัวต้านทาน คำนวณได้จากสมการ

$$V_o = \left(\frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} 2V_s^2 \sin^2 \omega t d\omega t \right)^{1/2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \left(\frac{4}{4\pi} V_s^2 \int_{\alpha}^{\pi} (1 - \cos 2\omega t) d\omega t \right)^{1/2}$$

หรือ

$$= V_s \left(\frac{1}{\pi} (\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2}) \right)^{1/2} ; 0 < \alpha < 180^\circ \quad (3.29)$$

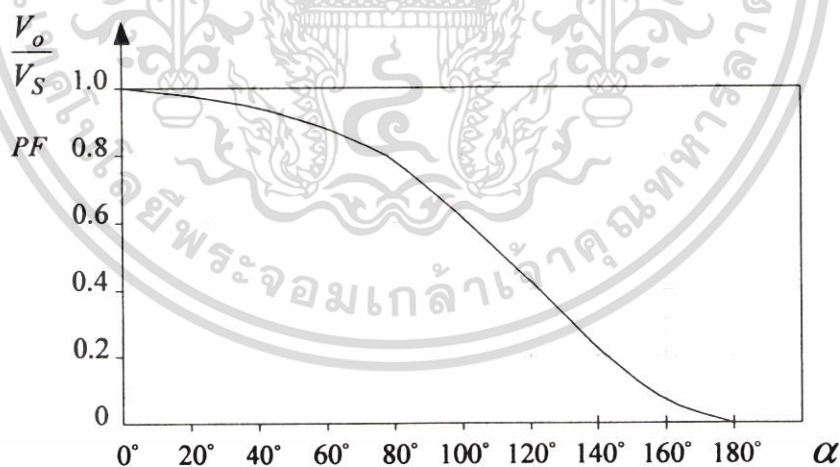
ค่าตัวประกอบกำลังกับโพลต์ตัวต้านทาน คำนวณได้จากสมการ

$$PF = \frac{P_o}{VA} = \frac{V_o I_o}{V_s I_s}$$

หรือ

$$= \left(\frac{1}{\pi} (2\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2}) \right)^{1/2} \quad (3.30)$$

คุณลักษณะการควบคุมแบบเต็มคลื่นกับโพลต์ตัวต้านทาน ตัวประกอบกำลังและแรงดันเอาต์พุตจะเป็นฟังก์ชันของมุมจุดชนวนเกต ดังสมการที่ (3.29) และ (3.30) เส้นโค้งคุณลักษณะการควบคุมแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 แสดงคุณลักษณะการควบคุมแรงดันเอาต์พุต และค่าตัวประกอบกำลัง แบบเต็มคลื่นกับโพลต์ตัวต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

หลักการของเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิแบบสองสภาวะ หลายระดับและการออกแบบ

4.1 กล่าวนำ

ในการออกแบบเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิแบบสองสภาวะหลายระดับนั้น เพื่อความสะดวกในการออกแบบและการทดลอง ทางผู้วิจัยได้นำหลักการของเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิที่ออกแบบไปประยุกต์ใช้กับตัวควบคุมที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ ซึ่งเป็นตัวควบคุมชนิดสำเร็จรูปที่ไม่มี ความซับซ้อนมากและมีความแม่นยำสูง สามารถออกแบบเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิได้โดยการ เขียนโปรแกรมกำหนดให้ตัวควบคุมทำงานตามเงื่อนไขการควบคุมอุณหภูมิแบบสองสภาวะ (On-Off) เป็นจำนวน n ระดับตามการออกแบบ โดยการกำหนดค่าของระดับสัญญาณควบคุมจากการ คำนวณตามหลักการพลังงานสมดุล (Energy Balance) ณ อุณหภูมิเป้าหมายจากหลัก ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนกับพลังงานไฟฟ้าของการถ่ายเทความร้อน (Thermodynamic) ของกระบวนการ เพื่อเป็นการออกแบบให้ตัวควบคุมสามารถควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการได้ ตรงตามอุณหภูมิเป้าหมาย โดยระบบควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการออกแบบเป็นชุดทดลอง กระบวนการจำลองการควบคุมอุณหภูมิภายในภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม ซึ่งเป็นชุดทดลอง กระบวนการจำลองการควบคุมอุณหภูมิที่ใช้หลักการพลังงานไฟฟ้าในการผลิตความร้อน โดยมีชุด ควบคุมเฟส (Phase) ที่มีความแม่นยำสูงในการแปลงผันพลังงานไฟฟ้ากระแสลับให้กับตัวทำ ความร้อนของกระบวนการอยู่ก่อนแล้ว ซึ่งชุดทดลองกระบวนการจำลองการควบคุมอุณหภูมินี้เป็น ที่สะดวกแก่การออกแบบและทดลองตามเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิที่นำเสนอเป็นอย่างยิ่ง

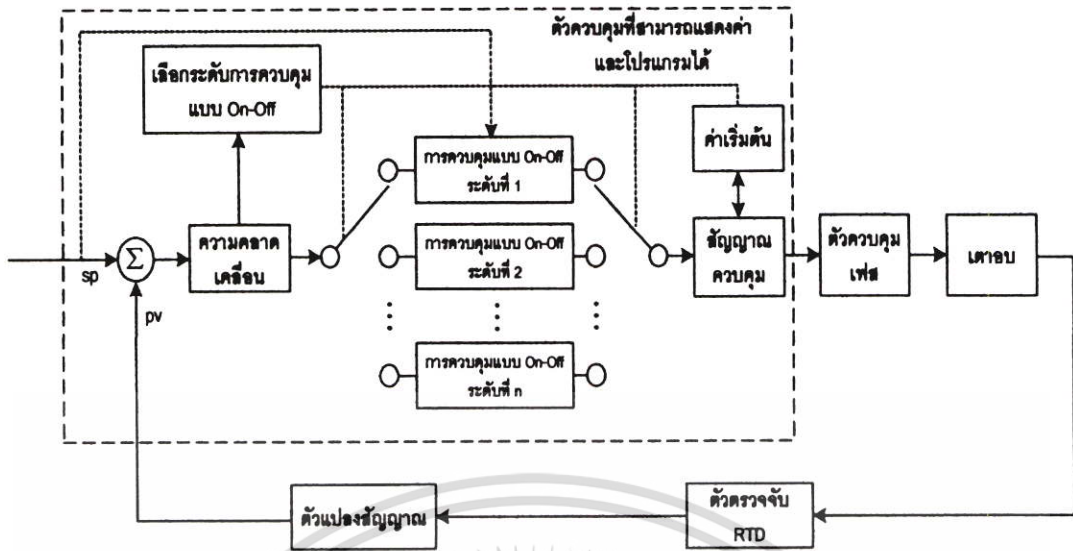
4.2 หลักการและการคำนวณในการประยุกต์ใช้งาน

ผู้วิจัยได้ออกแบบเทคนิคการควบคุมให้มีความสัมพันธ์กับฟังก์ชันการใช้งานของตัว ควบคุมเชิงพาณิชย์ที่ใช้ในการออกแบบ เพื่อความสะดวกต่อการเขียนโปรแกรมให้กับตัวควบคุม และการทดลองในคราวต่อไป โดยมีหลักการและการคำนวณในการประยุกต์ใช้งานดังต่อไปนี้

4.2.1 หลักการของเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิแบบสองสภาวะหลายระดับ

เทคนิคการควบคุมอุณหภูมิแบบสองสภาวะหลายระดับมีหลักการควบคุมดังแสดง

ในรูปที่ 4.1

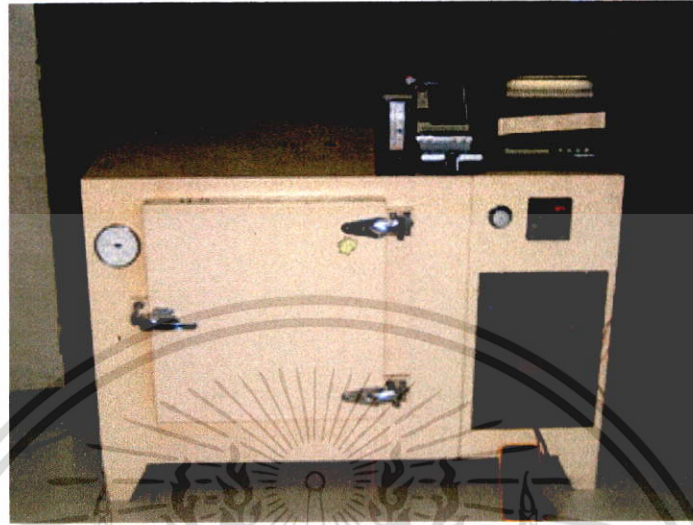


รูปที่ 4.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมหลักการของเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิที่นำเสนอ

จากรูปที่ 4.1 หลักการของเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิที่นำเสนอนี้สามารถอธิบายได้ว่า อัตราส่วนเปอร์เซ็นต์ On-Off ของสัญญาณควบคุมได้ถูกกำหนดออกเป็น n ระดับ จากระดับที่มีอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์ On-Off ของสัญญาณควบคุมที่สูงที่สุดในระดับการควบคุมที่ 1 (1st Steps) ไปจนถึงระดับการควบคุมสุดท้ายหรือระดับที่ n (nth Steps) ซึ่งมีอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์ On-Off ของสัญญาณควบคุมที่น้อยที่สุด ในการเลือกระดับการควบคุมตัวควบคุมจะทำการเลือกระดับการควบคุมตามเงื่อนไขของค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงทางอุณหภูมิเป้าหมายในแต่ละระดับการควบคุมที่ได้กำหนดเอาไว้ โดยในการออกแบบเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิที่นำเสนอ ได้กำหนดเงื่อนไขของค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงทางอุณหภูมิเป้าหมายในระดับการควบคุมที่ 1 ให้มีค่ามากที่สุด และมีอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์ On-Off ของสัญญาณควบคุมเท่ากับ 100% กับ 0% ทั้งนี้เพื่อให้ตัวควบคุมสามารถนำอุณหภูมิของกระบวนการในช่วงเริ่มต้นเข้าสู่อุณหภูมิเป้าหมายได้เร็วที่สุด ซึ่งในระดับการควบคุมต่อๆ มาจะกำหนดเงื่อนไขของค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงทางอุณหภูมิเป้าหมายให้มีค่าลดลงจากระดับการควบคุมที่ 1 เรื่อยๆ ตามลำดับ และมีอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์ On-Off ของสัญญาณควบคุมในแต่ละระดับที่มีอัตราการ On ที่ลดลงเรื่อยๆ เช่นกัน จนถึงระดับการควบคุมสุดท้ายซึ่งมีเงื่อนไขของค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงทางอุณหภูมิเป้าหมายที่น้อยที่สุดหรือใกล้เคียงกับอุณหภูมิเป้าหมายมากที่สุด โดยกำหนดอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์ On-Off ของสัญญาณควบคุมในระดับการควบคุมสุดท้ายนี้เท่ากับอัตราการ On ตามการคำนวณหลักการพลังงานสมดุล (Energy Balance) ณ อุณหภูมิเป้าหมายจากหลักความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนกับพลังงานไฟฟ้าของการถ่ายเทความร้อน (Thermodynamic) เพื่อให้ตัวควบคุมสามารถควบคุมอุณหภูมิของระบบได้ตรงตามเป้าหมาย

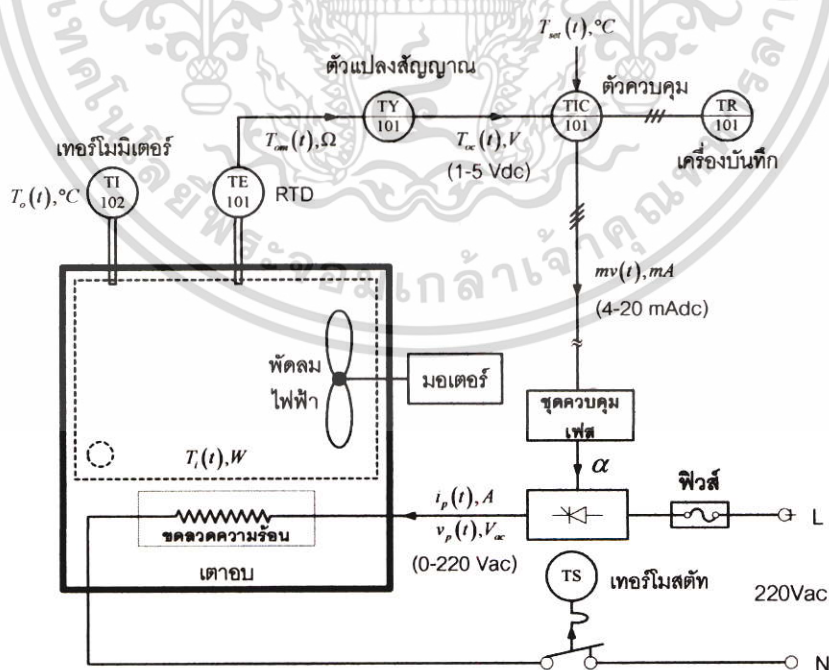
4.2.2 ระบบควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการออกแบบและการคำนวณ

ชุดทดลองกระบวนการจำลองการควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการออกแบบเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิแบบสองสถานะหลายระดับแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงชุดทดลองกระบวนการจำลองการควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการออกแบบ

จากชุดทดลองกระบวนการจำลองการควบคุมอุณหภูมิในรูปที่ 4.2 มีหลักการควบคุมอุณหภูมิแบบป้อนกลับ (Feedback Control) ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงหลักการควบคุมอุณหภูมิแบบป้อนกลับของชุดทดลองกระบวนการจำลองการ

ควบคุมอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 เพื่อที่จะรักษาอุณหภูมิของชุดทดลอง (Output temperature) หรือเตาอบ $T_o(t)$ ให้ได้ค่าตามที่ต้องการหรือค่าเป้าหมาย (Set point) $T_{set}(t)$ ซึ่งอุณหภูมิที่ได้จากชุดทดลอง หรือตัวแปรที่ถูกควบคุม (Controlled Variable) ได้ทำการตรวจวัดและบันทึกด้วยอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Thermometer, TI102) และเครื่องบันทึก (Recorder, TR101) ตามลำดับ เฟสของสัญญาณควบคุมใช้ในการปรับแรงดันไฟฟ้า $v_p(t)$ จ่ายให้กับตัวทำความร้อนของเตาอบโดยกระแสไฟฟ้า $i_p(t)$ ที่สัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้า $v_p(t)$ ผ่านเข้าไปยังชุดลดความร้อนของเตาอบ ทำหน้าที่ผลิตความร้อนหรือก่อให้เกิดความร้อน $T_i(t)$ (Input Temperature) เข้าไปในระบบ ตัวเทอร์โมสแตท (Thermostat) ในระบบใช้เพื่อรักษาอุณหภูมิของชุดทดลองให้ต่ำกว่าค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ตั้งไว้ ($200\text{ }^{\circ}\text{C}$) ในระบบมีพัดลมไฟฟ้าติดตั้งไว้เพื่อกระจายอุณหภูมิให้ทั่วทั้งเตาอบ

หลักการควบคุมแบบป้อนกลับในชุดควบคุมอุณหภูมิที่ทดลอง ควบคุมได้โดยการนำอุณหภูมิที่ได้หรือตัวแปรที่ถูกควบคุม $T_{om}(t)$ ที่วัดจากตัวตรวจจับ (RTD, TE101) และตัวแปลงสัญญาณ (Converter, TY101) ซึ่งผลิตสัญญาณ $T_{oc}(t)$ ที่มีสัดส่วนเหมาะสมกับเตาอบสัญญาณ $T_{oc}(t)$ ส่งไปยังตัวควบคุม (Controller, TIC101) โดยใช้ตัวควบคุมที่สามารถแสดงค่าและโปรแกรมได้ (SLPC) ซึ่งตัวควบคุมจะผลิตสัญญาณเอาต์พุต (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 Vac. โดยชุดลดความร้อนจะทำการผลิตความร้อน $T_i(t)$ ตามแรงดันไฟฟ้าที่ได้รับ

ในระบบควบคุมอุณหภูมิเป้าหมายที่สำคัญคือการทำให้ผลของอุณหภูมิที่ได้ตรงกับค่าอุณหภูมิที่ต้องการ ซึ่งการหาค่าสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมในการควบคุมอุณหภูมิของเทคนิคการควบคุมที่นำเสนอ สามารถกำหนดได้จากหลักความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนกับพลังงานไฟฟ้าของการถ่ายเทความร้อน ซึ่งมีอยู่ 3 รูปแบบ ได้แก่ การแผ่รังสีความร้อน การพาความร้อน และการนำความร้อน เมื่อศึกษาถึงเตาอบในรูปที่ 4.2 การถ่ายเทความร้อนของเตาอบส่วนใหญ่เป็นไปตามลักษณะของการพาความร้อน โดยมีอัตราการถ่ายเทความร้อน ดังสมการที่ (4.1)

$$\dot{Q} = h \times A(T_w - T_b) \quad (4.1)$$

เมื่อ \dot{Q} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน มีหน่วยเป็น W

h คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน มีหน่วยเป็น $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ หรือ $\text{W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$

A คือ พื้นที่ผิวของสื่อกลาง มีหน่วยเป็น m^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T_w คือ อุณหภูมิของพื้นผิววัตถุ มีหน่วยเป็น K หรือ °C

T_b คือ อุณหภูมิของก๊าซล้อมรอบ (อากาศ) มีหน่วยเป็น K หรือ °C

ผนังด้านในของเตาอบที่ใช้ทดลองเป็นเหล็กปลอดสนิม (Stainless Steel) ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน h ประมาณ $3.7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ พื้นที่ผิวของสี่เหลี่ยม A มีขนาด 3.7 m^2 อุณหภูมิของก๊าซล้อมรอบหรืออุณหภูมิสิ่งแวดล้อมประมาณ 27°C หรือ 300 K เมื่อนำค่าไปแทนในสมการที่ (4.1) สามารถเขียนสมการอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ดังสมการที่ (4.2)

$$\dot{Q} = 13.69(T_w - 300) \quad (4.2)$$

จากสมการที่ (4.2) หาอุณหภูมิของพื้นผิววัตถุในหน่วยของเคลวิน (Kelvin ;K) เท่ากับ

$$T_w = \frac{\dot{Q}}{13.69} + 300 \quad (4.3)$$

เมื่อศึกษาการทำงานของเตาอบแบบการพาความร้อน (Convection Oven) ซึ่งใช้หลักการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขดลวดความร้อนทำการผลิตความร้อน สามารถเขียนสมการได้เป็น

$$P = i_p^2 R \quad (4.4)$$

เมื่อ P คือ พลังงานผลิตความร้อน มีหน่วยเป็น W

i_p คือ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับตัวทำความร้อน มีหน่วยเป็น A

R คือ ความต้านทานของตัวทำความร้อน มีค่าความต้านทานเท่ากับ 23.4Ω

ในการทดลอง ตัวตรวจจับ (RTD) มีกระแสไฟฟ้าเลี้ยงตัวเองอยู่จำนวนหนึ่ง และกระแสจำนวนนี้ก็สร้างความร้อนขึ้นในตัวอาร์ทีดีเองด้วย ทำให้เกิดค่าผิดพลาดขึ้น แต่เนื่องจากค่าผิดพลาดนี้มีไม่เกิน $\pm 2\%$ (ขึ้นอยู่กับชนิดโลหะของอาร์ทีดี) เพื่อความสะดวกในการออกแบบเทคนิคการควบคุมจึงไม่คำนึงถึง และจากกฎการอนุรักษ์พลังงานในอุดมคติโดยไม่คำนึงถึงความร้อนสูญเสีย ณ สภาวะคงตัว จะได้พลังงานที่ผลิตความร้อนเท่ากับอัตราการถ่ายเทความร้อน คือ

$$P = \dot{Q} \quad (4.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำสมการที่ (4.5) แทนในสมการที่ (4.3) สมการอุณหภูมิของพื้นผิววัตถุสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (4.6)

$$T_w = \frac{P}{13.69} + 300 = \frac{(i_p^2 R)}{13.69} + 300 \quad (4.6)$$

จะเห็นว่าอุณหภูมิของพื้นผิววัตถุหรืออุณหภูมิที่ต้องการ $T_o(t)$ สามารถควบคุมได้โดยกระแสไฟฟ้า $i_p(t)$ ที่สัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้า $v_p(t)$ ซึ่งสามารถปรับได้โดยตรงด้วยการควบคุมเฟส ตารางที่ 4.1 แสดงข้อมูลของกระบวนการทางอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง ข้อมูลในหลักที่ 2 ถึงหลักที่ 5 เป็นค่าที่ได้จากการวัดจากชุดทดลองในรูปที่ 4.2 โดยการทดลองทดสอบกระบวนการแบบลูปเปิด (Open Loop) ในขณะที่ข้อมูลในหลักที่ 6 ถึงหลักที่ 8 ได้จากการคำนวณจากสมการที่ (4.2) ถึงสมการที่ (4.6) ซึ่งอัตราส่วนร้อยละของสัญญาณควบคุมอยู่ระหว่าง 0% ถึง 100%

ตารางที่ 4.1 แสดงข้อมูลของกระบวนการทางอุณหภูมิที่ทดลอง

<i>mv</i>	การวัดแรงดัน [v_p] (%) (0~220Vac.)	การวัดกระแส [i_p] (0~10Amp.)	การวัดอุณหภูมิ [T_{meas}] (30~185.5 °C)	การวัดอุณหภูมิ [T_{meas}] (Kelvin)	คำนวณพลังงาน ผลิตความร้อน [P_{cal}] (Watt)	คำนวณอัตราการ ถ่ายเทความร้อน [\dot{Q}_{cal}] (Watt)	คำนวณอุณหภูมิ [T_{cal}] (Kelvin)
5	0.17	0.20	31.0	304.1	0.936	56.677	300.068
10	9.63	0.41	32.1	305.2	3.963	71.736	300.289
15	20.20	0.87	33.2	306.3	17.893	86.795	301.307
20	33.64	1.46	35.1	308.2	49.625	112.806	303.625
25	50.66	2.19	39.8	312.9	112.544	177.149	308.221
30	67.90	2.94	44.4	317.5	202.177	240.123	314.768
35	85.40	3.70	54.0	327.1	319.821	371.547	323.362
40	103.14	4.46	64.3	337.4	466.494	512.554	334.076
45	120.56	5.22	74.0	347.1	637.380	645.347	346.558
50	137.32	5.94	84.2	357.3	826.912	784.985	360.403
55	153.06	6.63	98.0	371.1	1027.343	973.907	375.043
60	167.15	7.24	111.6	384.7	1225.193	1160.091	389.496
65	180.20	7.80	125.2	398.3	1423.972	1346.275	404.015

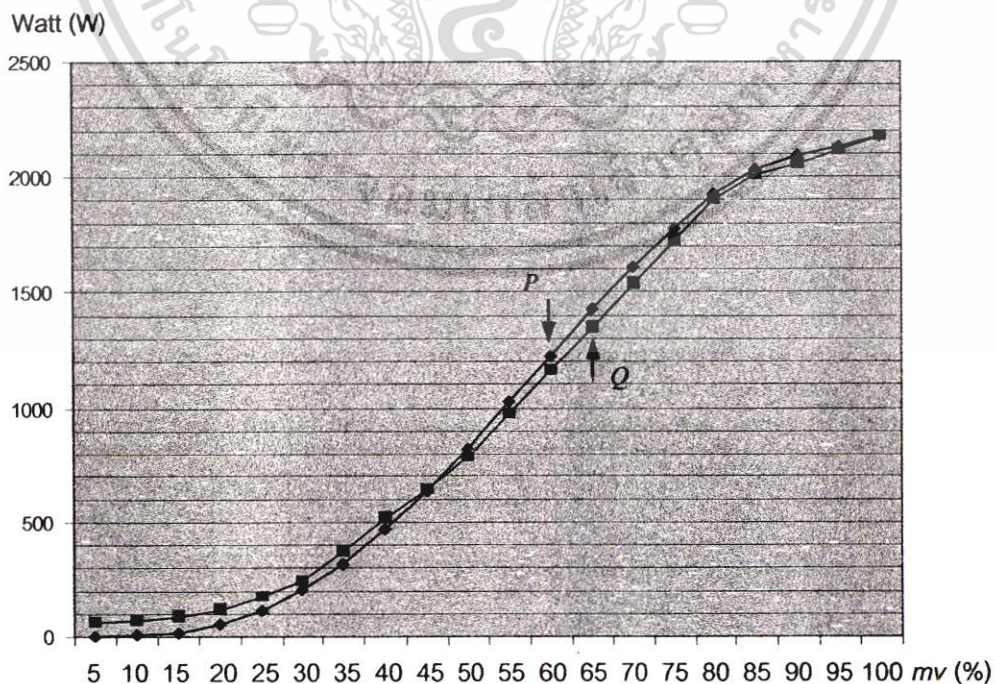
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้แก้ไขหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

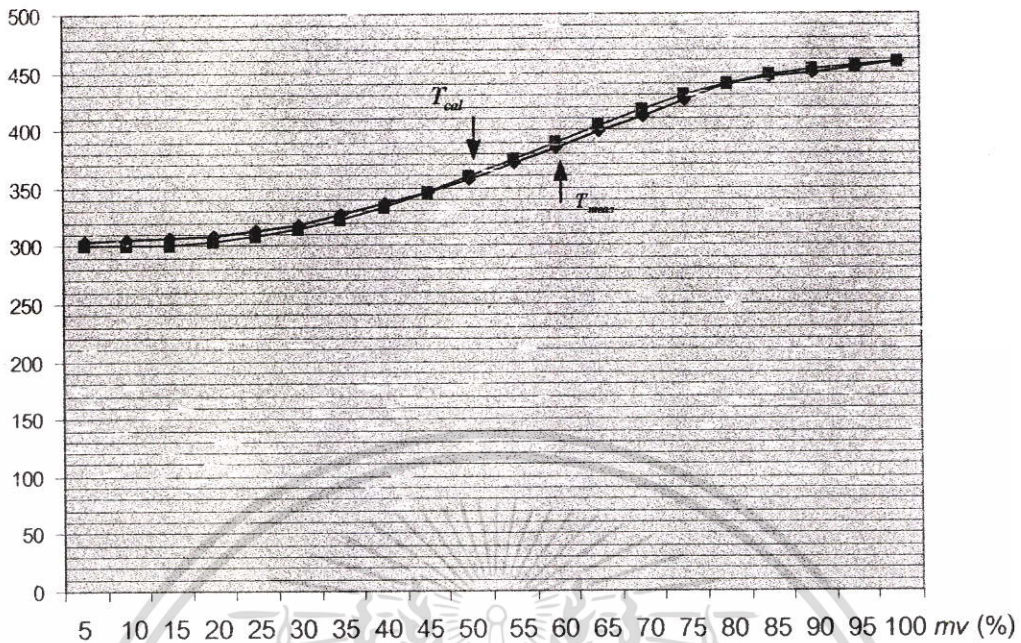
<i>mv</i>	การวัด แรงดัน $[v_p]$ (%) (0~220Vac.)	การวัด กระแส $[i_p]$ (0~10Amp.)	การวัด อุณหภูมิ $[T_{meas}]$ (30~185.5 °C)	การวัด อุณหภูมิ $[T_{meas}]$ (Kelvin)	คำนวณพลังงาน ผลิตความร้อน $[P]$ (Watt)	คำนวณอัตราการ ถ่ายเทความร้อน $[\dot{Q}]$ (Watt)	คำนวณ อุณหภูมิ $[T_{cal}]$ (Kelvin)
70	191.40	8.92	138.6	411.7	1606.482	1529.721	417.347
75	201.35	8.72	152.4	425.5	1777.850	1718.643	429.865
80	209.40	9.06	166.0	439.1	1922.849	1904.827	440.456
85	215.08	9.31	173.4	446.5	2028.579	2006.133	448.180
90	218.26	9.45	177.0	450.1	2089.008	2055.417	452.594
95	220.57	9.55	181.3	454.4	2133.461	2114.284	455.841
100	222.73	9.64	185.5	458.6	2175.451	2171.782	458.908

จากข้อมูลในตารางที่ 4.1 นำมาเขียนแผนภูมิเส้นแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าพลังงานผลิตความร้อน P กับอัตราการถ่ายเทความร้อน \dot{Q} ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และการเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิที่ได้จากการวัด T_{meas} กับอุณหภูมิที่ได้จากการคำนวณ T_{cal} ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งอัตราส่วนร้อยละของสัญญาณควบคุมอยู่ระหว่าง 0% ถึง 100% จะเห็นว่าข้อมูลที่ได้ในรูปที่ 4.4 และในรูปที่ 4.5 มีค่าใกล้เคียงและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

รูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าของ P และ \dot{Q} จากข้อมูลในตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Temperature (K)



รูปที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าของ T_{meas} และ T_{cal} จากข้อมูลในตารางที่ 4.1

4.2.3 การออกแบบเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิแบบสองสภาวะหลายระดับกับระบบควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการออกแบบ

ในการออกแบบเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิแบบสองสภาวะหลายระดับกับระบบควบคุมอุณหภูมิ การกำหนดเงื่อนไขของค่าความคลาดเคลื่อนอ้างอิงทางอุณหภูมิเป้าหมายและอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์ On-Off ของสัญญาณควบคุมในแต่ละระดับ อาศัยหลักในการออกแบบตามความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนกับพลังงานไฟฟ้าของการถ่ายเทความร้อนของระบบอุณหภูมิที่ควบคุม เพื่อให้ตัวควบคุมสามารถเปลี่ยนระดับสัญญาณควบคุมได้สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในการนำอุณหภูมิเข้าสู่เป้าหมาย การกำหนดค่าอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์ On-Off ของสัญญาณควบคุมในแต่ละระดับการดำเนินการให้เหมาะสมกับกระบวนการทางความร้อนที่ทำการควบคุมสามารถกำหนดได้จากหลักการพลังงานสมดุล ณ อุณหภูมิเป้าหมายจากความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนกับพลังงานไฟฟ้าของการถ่ายเทความร้อน เพื่อให้ตัวควบคุมสามารถควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการได้ตรงตามอุณหภูมิเป้าหมาย การคำนวณระดับสัญญาณควบคุมที่เหมาะสม ณ อุณหภูมิเป้าหมายสามารถทำได้โดยการนำค่าอุณหภูมิเป้าหมายที่ต้องการคำนวณเปรียบเทียบกับข้อมูลของกระบวนการทางอุณหภูมิที่ใช้ทดลองในตารางที่ 4.1 ซึ่งกำหนดช่วงการควบคุมอุณหภูมิออกเป็นจำนวนเปอร์เซ็นต์จากอุณหภูมิต่ำสุดที่ 30 °C ถึงอุณหภูมิสูงสุดที่ 185 °C เป็น 0% ถึง 100% (อัตราส่วน 1% ต่อ 1.55 °C) ในการคำนวณสัญญาณควบคุม ณ อุณหภูมิเป้าหมาย ใช้สมการที่ (4.2) คำนวณห้อตราการถ่ายเทความร้อน ณ อุณหภูมิเป้าหมาย จากนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

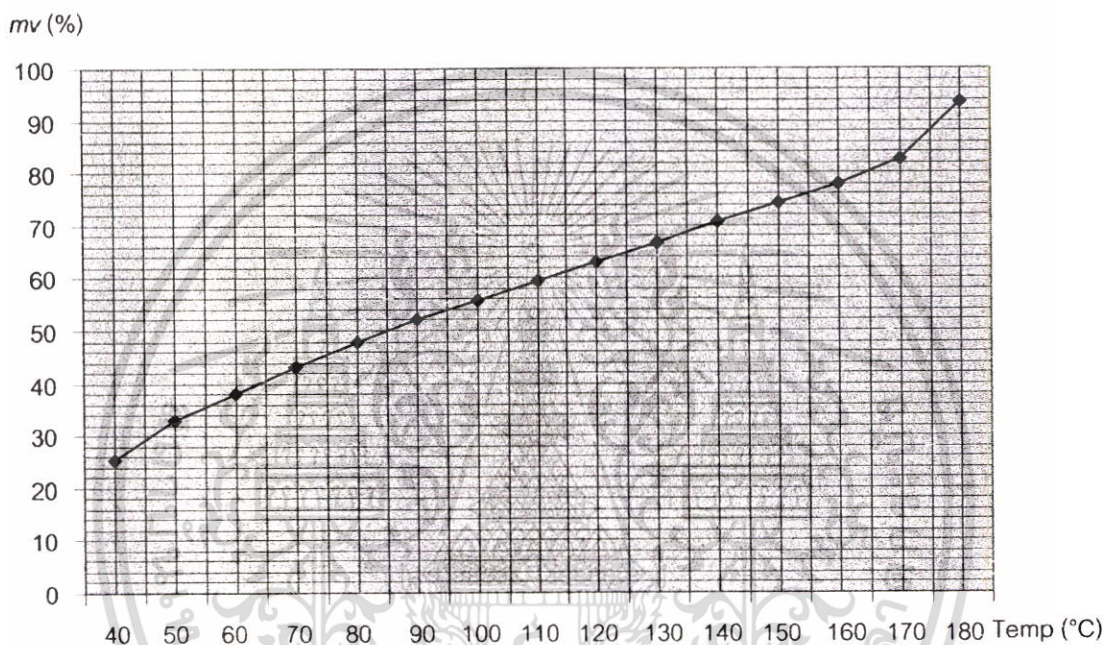
นำค่าที่ได้ไปคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าระดับสัญญาณควบคุม โดยคำนวณเทียบกับค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน \dot{Q} และค่าสัญญาณควบคุม mv ในตารางที่ 4.1 โดยในการออกแบบเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิแบบสองสภาวะหลายระดับกับระบบควบคุมอุณหภูมินี้ ผู้วิจัยออกแบบเทคนิคการควบคุมโดยการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนกับพลังงานไฟฟ้าของการถ่ายเทความร้อนของระบบอุณหภูมิที่ควบคุม โดยใช้ตัวอย่างข้อมูลที่มีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในแต่ละข้อมูลที่ต่างกัน $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ทั้งนี้ก็เพื่อความสะดวกในการคำนวณและบันทึกผล ซึ่งตารางที่ 4.2 แสดงตัวอย่างข้อมูลจากการคำนวณหาระดับสัญญาณควบคุมในแต่ละอุณหภูมิเป้าหมาย

ตารางที่ 4.2 แสดงตัวอย่างข้อมูลจากการคำนวณระดับสัญญาณควบคุมในแต่ละอุณหภูมิเป้าหมายตามหลักการพลังงานสมดุล

อุณหภูมิเป้าหมาย [sp] ($^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิเป้าหมาย [sp] (Kelvin)	อุณหภูมิเป้าหมาย [sp] (%)	คำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อน [\dot{Q}] (Watt)	คำนวณระดับสัญญาณควบคุม [mv_{cal}] (%)
30	303	0	41.07	3.62
40	313	6.45	177.97	25.22
50	323	12.90	314.87	32.92
60	333	19.35	451.77	37.91
70	343	25.80	588.67	42.94
80	353	32.25	725.57	47.94
90	363	38.70	862.47	52.10
100	373	45.15	999.37	55.74
110	383	51.60	1136.27	59.41
120	393	58.05	1273.17	63.09
130	403	64.50	1410.07	66.79
140	413	70.95	1546.97	70.51
150	423	77.40	1683.87	74.13
160	433	83.85	1820.77	77.79
170	443	90.30	1957.67	82.70
180	453	96.75	2094.57	93.49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อมูลในตารางที่ 4.2 นำมาเขียนแผนภูมิเส้นแสดงระดับสัญญาณควบคุมในแต่ละอุณหภูมิเป้าหมาย ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งในการออกแบบระดับการดำเนินการ n ระดับของเทคนิคที่นำเสนอจะนำค่าระดับสัญญาณควบคุมในแต่ละอุณหภูมิเป้าหมายที่ต้องการจากการคำนวณดังตัวอย่างข้อมูลในตารางที่ 4.2 มาเป็นระดับสัญญาณควบคุมในระดับการดำเนินการสุดท้าย (n^{th} Steps) ของการออกแบบในแต่ละอุณหภูมิเป้าหมาย เนื่องจากค่าระดับสัญญาณควบคุมที่ได้นี้จะทำให้ตัวควบคุมสามารถผลิตความร้อนได้ตรงตามอุณหภูมิเป้าหมายที่ต้องการ



รูปที่ 4.6 แผนภูมิเส้นแสดงระดับสัญญาณควบคุมในแต่ละอุณหภูมิเป้าหมายจากตัวอย่างข้อมูลในตารางที่ 4.2

การออกแบบระดับการดำเนินการ n ระดับของเทคนิคการควบคุมที่นำเสนอ นั้น ผู้วิจัยออกแบบให้ระดับการดำเนินการในระดับแรกมีอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์ On-Off ของสัญญาณควบคุมเต็มเท่ากับ 100% และ 0% เพื่อให้ระบบเข้าสู่อุณหภูมิเป้าหมายได้เร็วหากระบบมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนทางอุณหภูมิเป้าหมายที่มากกว่าเงื่อนไขค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงในระดับการควบคุมที่ 1 ก่อนที่จะเปลี่ยนไปเป็นระดับการดำเนินการแบบ On-Off ในระดับถัดไป โดยในการออกแบบเทคนิคการควบคุมจะกำหนดเงื่อนไขของค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงทางอุณหภูมิเป้าหมายในระดับการควบคุมที่ 1 ตามอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของระบบจากการทดลองทดสอบกระบวนการแบบลูปเปิด (Open Loop) ซึ่งผู้วิจัยออกแบบระดับการดำเนินการในระดับต่อๆ มาให้มีเงื่อนไขค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงที่ลดลงในแต่ละระดับเป็นลักษณะเชิงเส้น (Linear) ตามจำนวน n ที่กำหนดจนถึงระดับการควบคุมสุดท้ายซึ่งมี

เงื่อนไขค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงทางอุณหภูมิเป้าหมายที่น้อยที่สุดหรือเท่ากับศูนย์ และมีอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์ On-Off ของสัญญาณควบคุมที่มีอัตราการ On ที่ลดลงในแต่ละระดับ เป็นลักษณะเชิงเส้นตามจำนวน n ที่กำหนดเช่นกัน โดยมีช่วงความต่างของสัญญาณควบคุมในแต่ละระดับตามค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุม Δmv_{cal} จากการคำนวณหลักการพลังงานสมดุล ณ อุณหภูมิเป้าหมายเพื่อให้ระบบมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เข้าสู่เป้าหมายได้เร็วสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมตามการคำนวณหลักการพลังงานสมดุล ณ อุณหภูมิเป้าหมายไปจนกระทั่งถึงระดับสัญญาณควบคุมสุดท้ายซึ่งมีระดับสัญญาณควบคุมตามหลักการพลังงานสมดุล ณ อุณหภูมิเป้าหมาย จากตัวอย่างข้อมูลในตารางที่ 4.2 สามารถคำนวณหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุม Δmv_{cal} ในแต่ละอุณหภูมิเป้าหมาย ได้ดังข้อมูลในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงตัวอย่างข้อมูลจากการคำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมในแต่ละอุณหภูมิเป้าหมาย

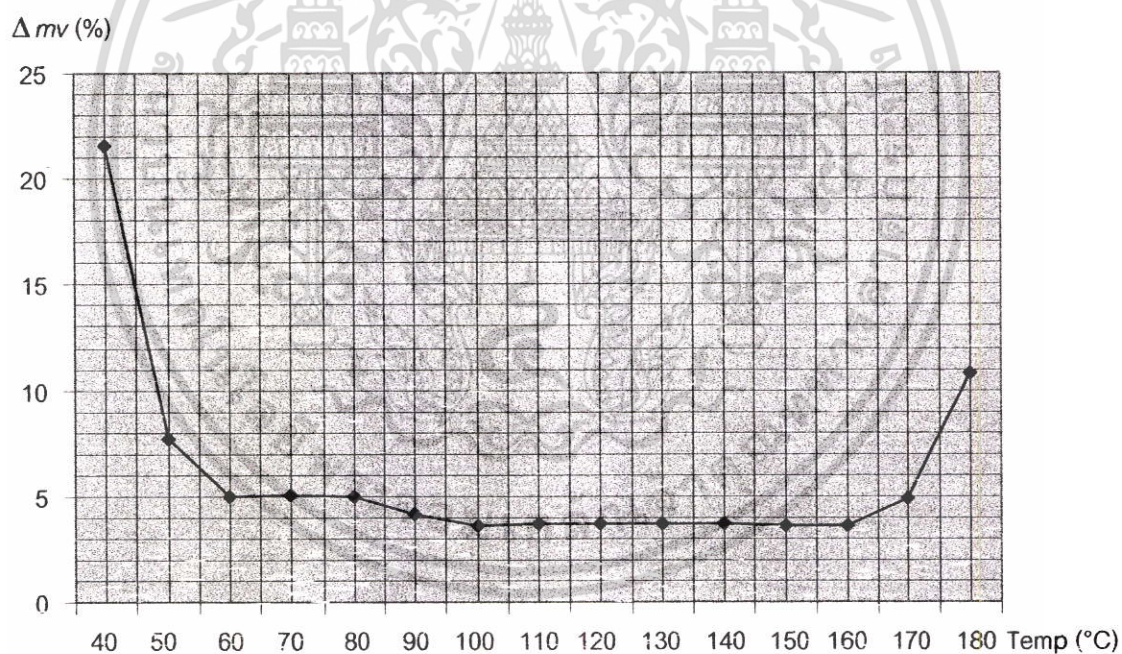
อุณหภูมิเป้าหมาย [sp] (°C)	อุณหภูมิเป้าหมาย [sp] (%)	คำนวณระดับสัญญาณควบคุม [mv_{cal}] (%)	คำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณควบคุม [Δmv_{cal}] (%)
30	0	3.62	3.62
40	6.45	25.22	21.62
50	12.90	32.92	7.70
60	19.35	37.91	4.99
70	25.80	42.94	5.03
80	32.25	47.94	5.00
90	38.70	52.10	4.16
100	45.15	55.74	3.64
110	51.60	59.41	3.67
120	58.05	63.09	3.68
130	64.50	66.79	3.70
140	70.95	70.51	3.72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

อุณหภูมิ เป้าหมาย [<i>sp</i>] (°C)	อุณหภูมิ เป้าหมาย [<i>sp</i>] (%)	จำนวนระดับ สัญญาณควบคุม [<i>mv_{cal}</i>] (%)	จำนวนอัตราการเปลี่ยนแปลง ของระดับสัญญาณควบคุม [Δmv_{cal}] (%)
150	77.40	74.13	3.62
160	83.85	77.79	3.66
170	90.30	82.70	4.91
180	96.75	93.49	10.79

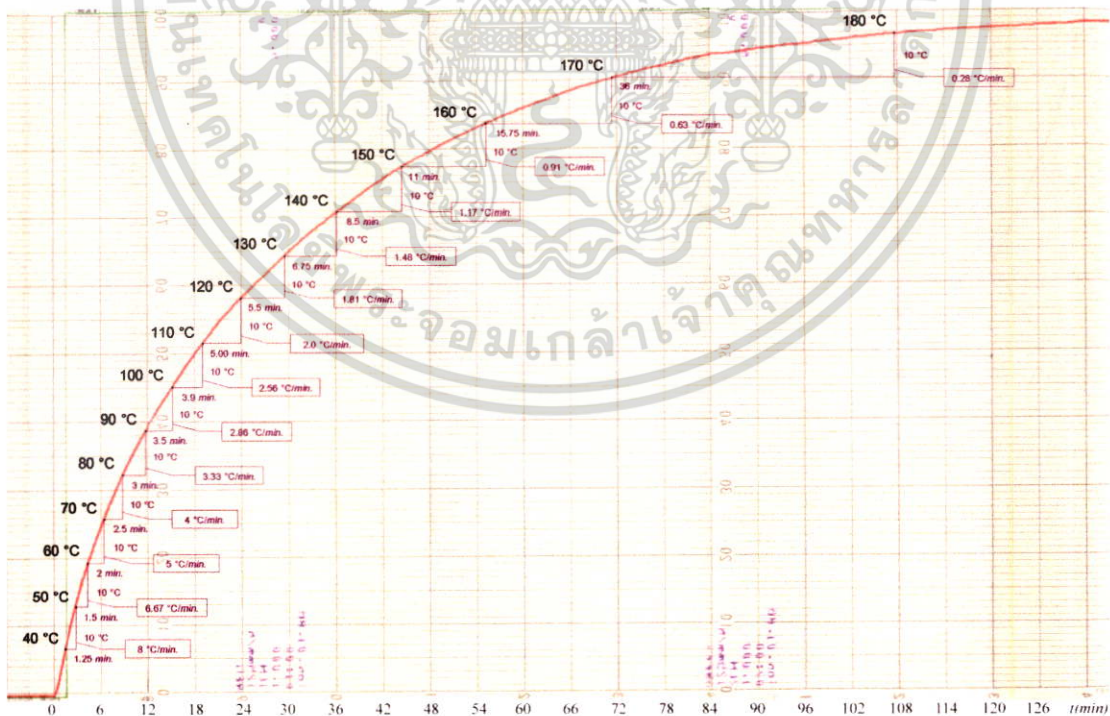
จากข้อมูลในตารางที่ 4.3 นำมาเขียนแผนภูมิเส้นแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณควบคุมในแต่ละอุณหภูมิเป้าหมาย ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แผนภูมิเส้นแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณควบคุมในแต่ละอุณหภูมิเป้าหมายจากตัวอย่างข้อมูลในตารางที่ 4.3

การกำหนดเงื่อนไขของค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงในแต่ละระดับของเทคนิคการควบคุมที่นำเสนอนั้น การกำหนดค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงในระดับการควบคุมที่ 1 ของแต่ละอุณหภูมิเป้าหมายจะมีผลโดยตรงต่อการนำอุณหภูมิของกระบวนการเข้าสู่เป้าหมายของเทคนิคการควบคุมที่นำเสนอ เพราะถ้าหากกำหนดเงื่อนไขของค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงที่สูงเกินไป จะทำให้การดำเนินงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับว่าดีนักในการดำเนินการคำนวณและปรับปรุงกระบวนการ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลาดเคลื่อนอ้างอิงในระดับการควบคุมที่ 1 เอาไว้ไม่เหมาะสมกับอัตราเฉลี่ยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในแต่ละเป้าหมายจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมที่กำหนดในแต่ละระดับ ก็จะทำให้ระบบใช้เวลาในการเข้าสู่อุณหภูมิเป้าหมายที่นานขึ้นถ้าหากว่าตั้งเงื่อนไขของค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงในระดับแรกเอาไว้มากกว่าอัตราเฉลี่ยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในแต่ละอุณหภูมิเป้าหมายที่กำหนด หรือเกิดค่าพุ่งเกิน (Overshoot) ขึ้นหากว่าตั้งเงื่อนไขของค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงในระดับแรกเอาไว้น้อยกว่าอัตราเฉลี่ยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในแต่ละอุณหภูมิเป้าหมายที่กำหนด โดยสามารถกำหนดเงื่อนไขค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงในระดับการควบคุมที่ 1 ของแต่ละอุณหภูมิเป้าหมายให้สัมพันธ์กับอัตราเฉลี่ยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในแต่ละอุณหภูมิเป้าหมายได้จากอัตราเฉลี่ยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากผลตอบสนองของกระบวนการจากการทดสอบกระบวนการแบบลูปเปิด (Open Loop) เพราะผลตอบสนองของกระบวนการในแต่ละค่าอุณหภูมิที่ได้จะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เร็วที่สุดเนื่องจากการให้สัญญาณอินพุตแบบ Step ที่ 100% เพื่อให้สัมพันธ์กับการออกแบบเทคนิคการควบคุมที่นำเสนอที่ต้องการนำอุณหภูมิของกระบวนการให้เข้าสู่เป้าหมายได้เร็วที่สุด ซึ่งในรูปที่ 4.8 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการในแต่ละค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น จากการทดสอบแบบลูปเปิด



รูปที่ 4.8 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการในแต่ละค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น จากการทดสอบแบบลูปเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลตอบสนองของกระบวนการในรูปที่ 4.8 สามารถคำนวณหาอัตราเฉลี่ยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในแต่ละอุณหภูมิเป้าหมายเพื่อใช้ในการกำหนดเงื่อนไขค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงในระดับการควบคุมที่ 1 ได้ดังข้อมูลในตารางที่ 4.4

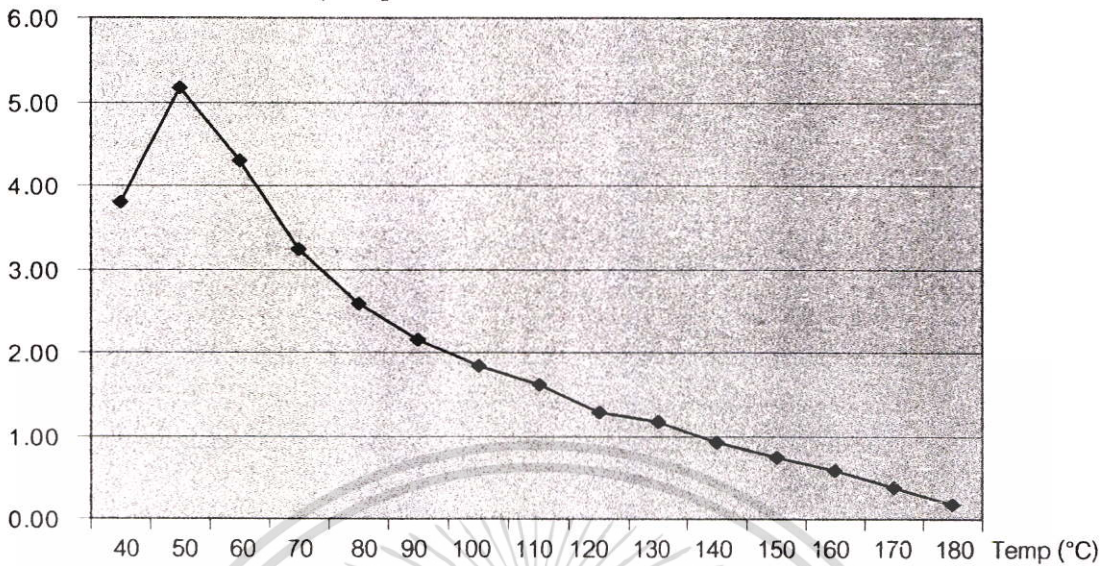
ตารางที่ 4.4 แสดงตัวอย่างข้อมูลของอัตราเฉลี่ยการเพิ่มขึ้นในแต่ละอุณหภูมิเป้าหมายจากการทดสอบกระบวนการแบบลูเปิด

อุณหภูมิเป้าหมาย [sp] (°C)	อุณหภูมิเป้าหมาย [sp] (Kelvin)	อุณหภูมิเป้าหมาย [sp] (%)	ระยะเวลา [t] (min.)	อัตราเฉลี่ยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ (°C/min.)	อัตราเฉลี่ยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ (%/min.)
40	313	6.45	1.70	5.88	3.79
50	323	12.90	2.95	8.00	5.16
60	333	19.35	4.45	6.67	4.30
70	343	25.80	6.45	5.00	3.23
80	353	32.25	8.95	4.00	2.58
90	363	38.70	11.95	3.33	2.15
100	373	45.15	15.45	2.86	1.85
110	383	51.60	19.35	2.56	1.61
120	393	58.05	24.00	2.00	1.29
130	403	64.50	29.50	1.81	1.17
140	413	70.95	36.25	1.48	0.92
150	423	77.40	44.75	1.17	0.75
160	433	83.85	55.75	0.91	0.59
170	443	90.30	71.50	0.63	0.38
180	453	96.75	107.50	0.28	0.17

จากข้อมูลในตารางที่ 4.4 นำมาเขียนแผนภูมิเส้นแสดงอัตราเฉลี่ยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในแต่ละอุณหภูมิเป้าหมายจากการทดสอบกระบวนการแบบลูเปิดดังแสดงในรูปที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราเฉลี่ยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ (%/min.)



รูปที่ 4.9 แผนภูมิเส้นแสดงอัตราเฉลี่ยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในแต่ละอุณหภูมิเป้าหมาย จากตัวอย่างข้อมูลในตารางที่ 4.4

การกำหนดจำนวนของระดับการควบคุม n นั้น ผู้วิจัยได้ออกแบบให้เป็นการกำหนดความละเอียดของค่าความคลาดเคลื่อนอ้างอิงทางอุณหภูมิเป้าหมาย จากค่าสูงสุดของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงในระดับการควบคุมแรก ซึ่งกำหนดตามอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในแต่ละอุณหภูมิเป้าหมายจากการทดลองทดสอบกระบวนการแบบลูปเปิดจนถึงระดับการควบคุมสุดท้ายหรือระดับการควบคุมที่ n ซึ่งมีเงื่อนไขค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงทางอุณหภูมิเป้าหมายที่น้อยที่สุดหรือเท่ากับศูนย์ และถ้ากำหนดจำนวนของระดับการควบคุม n ให้มาก ความละเอียดของค่าความคลาดเคลื่อนอ้างอิงทางอุณหภูมิเป้าหมายก็มากตาม ซึ่งการกำหนดจำนวนของระดับการควบคุม n ยังเป็นการกำหนดความหลากหลายของระดับสัญญาณควบคุมจากระดับการดำเนินการในระดับแรกที่มีอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์ On-Off ของสัญญาณควบคุมเต็มที่เท่ากับ 100% กับ 0% จนถึงระดับสัญญาณควบคุมสุดท้ายซึ่งมีอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์ On-Off ของระดับสัญญาณควบคุมตามหลักการพลังงานสมมูล ณ อุณหภูมิเป้าหมาย ซึ่งในระบบที่มีขนาดความจุน้อยจะมีลักษณะการกำหนดจำนวนเงื่อนไข n ของค่าความคลาดเคลื่อนอ้างอิงทางอุณหภูมิเป้าหมายที่มากหรือกล่าวได้ว่าให้ตัวควบคุมมีความหลากหลายของสัญญาณควบคุม ซึ่งอุปกรณ์ควบคุมขั้นสุดท้าย (Final Control Device) ของระบบแบบนี้จะทำงานได้ตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในระบบที่เร็ว ดังนั้นการกำหนดจำนวนของระดับการควบคุม n จึงขึ้นอยู่กับลักษณะของกระบวนการและความละเอียดของค่าความคลาดเคลื่อนอ้างอิงทางอุณหภูมิเป้าหมายและความหลากหลายของระดับสัญญาณควบคุมที่ต้องการ ซึ่งอาจจะต้องทำการทดลองเพื่อหาจำนวนของระดับการควบคุม n ที่ดีที่สุด

ยกตัวอย่างการออกแบบระดับการดำเนินการ n เท่ากับ 5 ระดับ โดยมีอุณหภูมิเป้าหมายที่ 120°C หรือที่เป้าหมาย 58.05% โดยกำหนดเงื่อนไขค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงในแต่ละระดับให้ต่ำลงจากค่าเปอร์เซ็นต์อัตราเฉลี่ยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในแต่ละอุณหภูมิเป้าหมายจากข้อมูลในตารางที่ 4.4 คือ 1.29% ให้ลดลงจนมีเงื่อนไขค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงทางอุณหภูมิเป้าหมายที่น้อยที่สุดและเท่ากับศูนย์ในระบับการควบคุมสุดท้ายโดยให้มีอัตราการลดลงเป็นแบบเชิงเส้น โดยกำหนดเงื่อนไขค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงในแต่ละระดับดังนี้

ในระบับการควบคุมที่ 1 (1st Steps) มีเงื่อนไขค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงคือ

$$error\ 1^{st} > 1.29\%$$

ในระบับการควบคุมที่ 2 (2nd Steps) มีเงื่อนไขค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงคือ

$$error\ 2^{nd} \leq 1.29\%$$

ในระบับการควบคุมที่ 3 (3rd Steps) มีเงื่อนไขค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงคือ

$$error\ 3^{rd} \leq 0.97\%$$

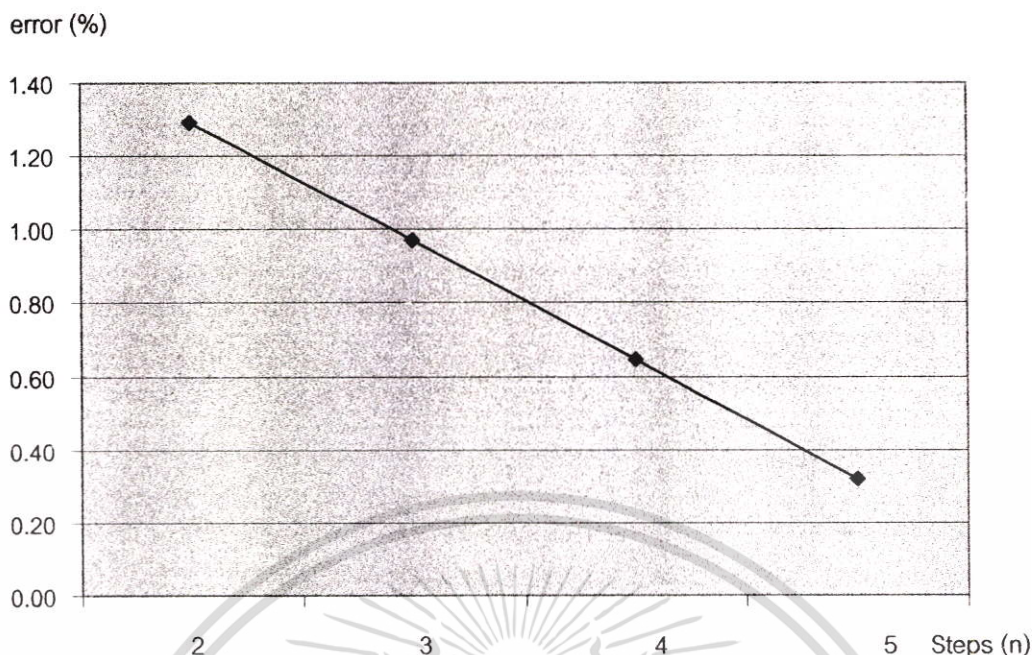
ในระบับการควบคุมที่ 4 (4th Steps) มีเงื่อนไขค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงคือ

$$error\ 4^{th} \leq 0.65\%$$

ในระบับการควบคุมที่ 5 (5th Steps) มีเงื่อนไขค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงคือ

$$error\ 5^{th} \leq 0.32\%$$

โดยสามารถเขียนแผนภูมิเส้นแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงในแต่ละระดับการดำเนินการ ณ อุณหภูมิเป้าหมายที่ 120°C ของจำนวน n เท่ากับ 5 ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 แผนภูมิเส้นแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงในแต่ละระดับการดำเนินการ ณ อุณหภูมิเป้าหมายที่ 120 °C ของจำนวน n เท่ากับ 5 ระดับ

การคำนวณระดับสัญญาณควบคุม ณ อุณหภูมิเป้าหมายที่ 120 °C หรือที่เป้าหมาย 58.05% ซึ่งมีระดับสัญญาณควบคุม mv_{cal} ตามหลักการพลังงานสมดุล ณ อุณหภูมิเป้าหมาย จากข้อมูลในตารางที่ 4.2 คือ 63.09% และมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณควบคุม Δmv_{cal} ณ อุณหภูมิเป้าหมายจากข้อมูลในตารางที่ 4.3 คือ 3.68% และกำหนดระดับสัญญาณควบคุมในแต่ละระดับให้มีค่าความแตกต่างเป็นแบบเชิงเส้นตามค่าเปอร์เซ็นต์อัตราเฉลี่ยการเพิ่มขึ้นของสัญญาณควบคุมในแต่ละอุณหภูมิเป้าหมายจากการคำนวณหลักการถ่ายเทความร้อนและพลังงานสมดุลของกระบวนการจำลองการควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ทดลอง จากการกำหนดให้ตัวควบคุมมีจำนวนระดับการดำเนินการ n เท่ากับ 5 ระดับ โดยมีการคำนวณระดับสัญญาณควบคุมในแต่ละระดับ ณ อุณหภูมิเป้าหมายที่ 120 °C ของเทคนิคการควบคุมที่น่าเสนอ ได้ดังนี้

ในระดัการควบคุมที่ 1 (1st Steps) มีอัตราการ Off คือ 0% และมีอัตราการ On คือ

$$mv_{1^{st}} = 100\%$$

ในระดัการควบคุมที่ 2 (2nd Steps) มีอัตราการ Off คือ 0% และมีอัตราการ On คือ

$$\begin{aligned} mv_{2^{nd}} &= mv_{cal} + (3 \times \Delta mv_{cal}) \\ &= 63.09 + (3 \times 3.68) = 74.13\% \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในระดับการควบคุมที่ 3 (3rd Steps) มีอัตราการ Off คือ 0% และมีอัตราการ On คือ

$$\begin{aligned} mv_{3^{\text{rd}}} &= mv_{cal} + (2 \times \Delta mv_{cal}) \\ &= 63.09 + (2 \times 3.68) = 70.45\% \end{aligned}$$

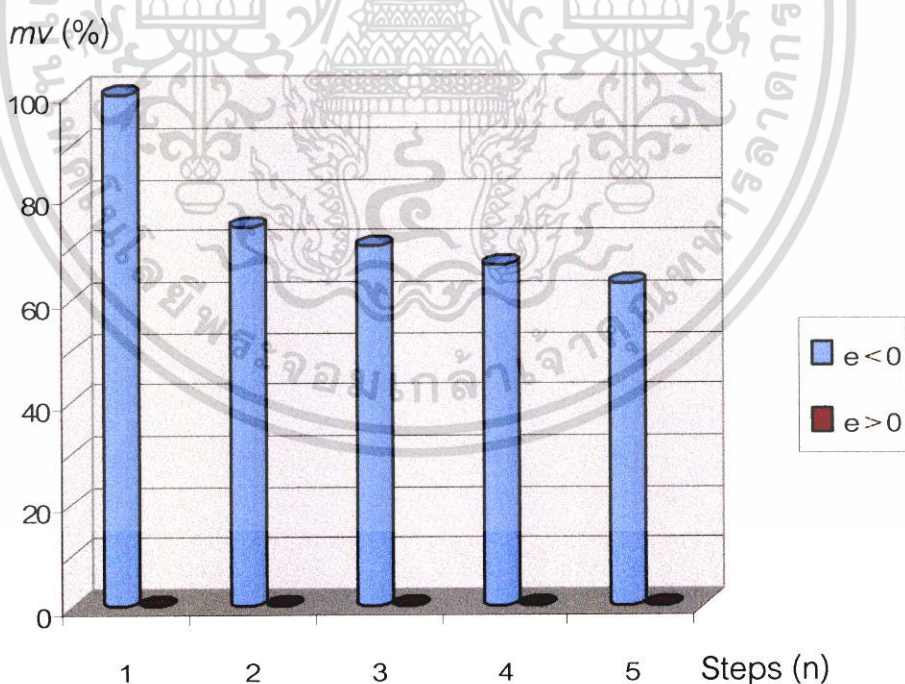
ในระดับการควบคุมที่ 4 (4th Steps) มีอัตราการ Off คือ 0% และมีอัตราการ On คือ

$$\begin{aligned} mv_{4^{\text{th}}} &= mv_{cal} + (1 \times \Delta mv_{cal}) \\ &= 63.09 + (1 \times 3.68) = 66.77\% \end{aligned}$$

และในระดับการควบคุมที่ 5 (5th Steps) มีอัตราการ Off คือ 0% และมีอัตราการ On คือ

$$\begin{aligned} mv_{5^{\text{th}}} &= mv_{cal} \\ &= 63.09\% \end{aligned}$$

ซึ่งในรูปที่ 4.11 แสดงแผนภูมิแท่งของระดับสัญญาณควบคุมในแต่ละระดับการดำเนินการ ณ อุณหภูมิเป้าหมายที่ 120 °C จากการคำนวณสัญญาณควบคุมเมื่อมีจำนวนของระดับดำเนินการ n เท่ากับ 5 ระดับ



รูปที่ 4.11 แผนภูมิแท่งแสดงระดับสัญญาณควบคุมในแต่ละระดับการดำเนินการ ณ อุณหภูมิเป้าหมายที่ 120 °C เมื่อมีจำนวนของระดับดำเนินการ n เท่ากับ 5 ระดับ

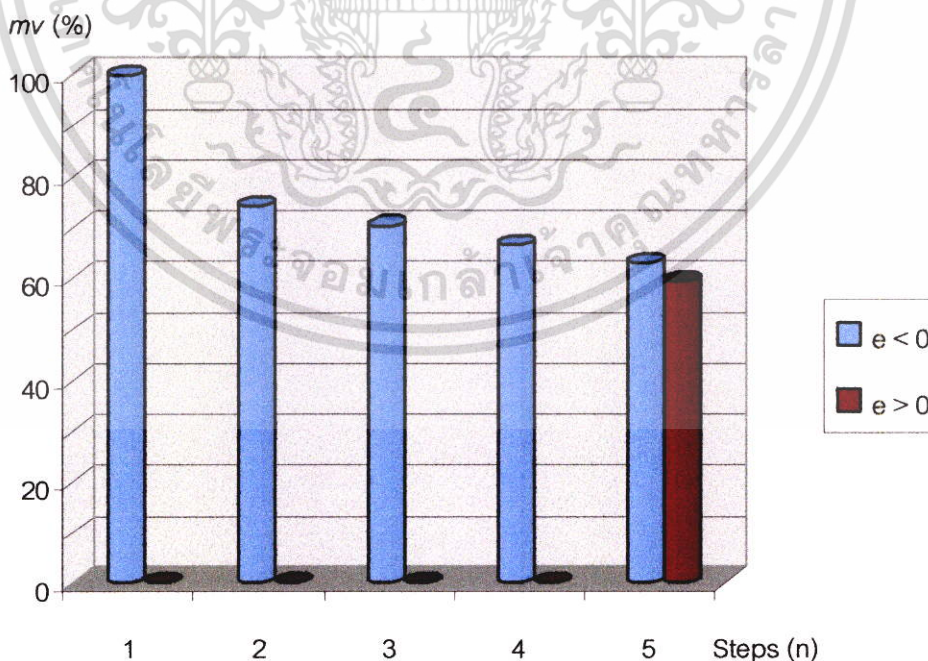
ในกรณีที่ระบบที่ทำการควบคุมเป็นระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในที่ค่อนข้างเร็ว ในการออกแบบเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ออกแบบให้ตัวควบคุมในระดับสุดท้าย (n^{th} Steps) มีระดับสัญญาณควบคุมไบอัส (Bias) ตามอัตราการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณควบคุม Δmv_{cal} ณ อุณหภูมิเป้าหมายจากข้อมูลในตารางที่ 4.3 เพิ่มเข้ามาแทนระดับสัญญาณควบคุมที่ 0% เมื่อระบบมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมากกว่าศูนย์ ($e > 0\%$) เพื่อเป็นการป้องกันการแกว่งของอุณหภูมิจากการ Off ในระดับสุดท้ายซึ่งเป็นระดับการควบคุมที่ระบบมีอุณหภูมิที่เข้าใกล้เป้าหมายที่สุด และจากตัวอย่างการคำนวณระดับสัญญาณควบคุมในแต่ละระดับการดำเนินการ ณ อุณหภูมิเป้าหมายที่ 120°C จากที่กล่าวมา สามารถคำนวณระดับสัญญาณควบคุมในระดับการควบคุมสุดท้ายโดยการเพิ่มการไบอัสได้ ดังแสดงในรูปที่ 5.12

ในระดับการควบคุมที่ 5 (5^{th} Steps) มีอัตราการ On คือ

$$mv_{5^{\text{th}}} = mv_{cal} = 63.09\%$$

และมีระดับสัญญาณควบคุมไบอัส คือ

$$mv_{5^{\text{th}}} = mv_{cal} - (1 \times \Delta mv_{cal}) = 63.09 - (1 \times 3.68) = 59.41\%$$

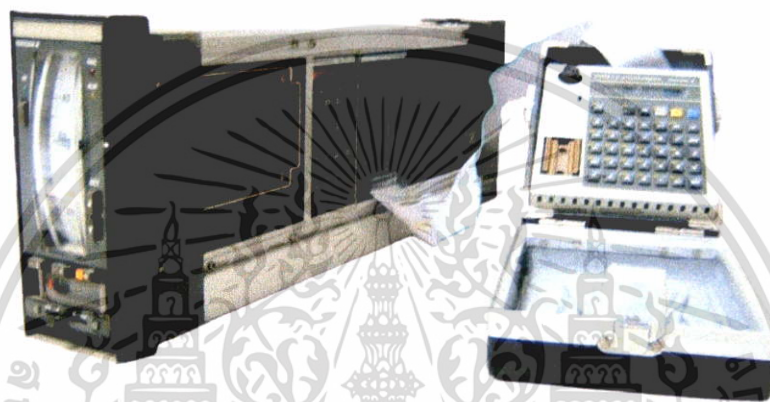


รูปที่ 4.12 แผนภูมิแท่งแสดงระดับสัญญาณควบคุมในแต่ละระดับการดำเนินการ ณ อุณหภูมิเป้าหมายที่ 120°C เมื่อเพิ่มสัญญาณควบคุมไบอัสให้กระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 การประยุกต์ใช้เทคนิคการควบคุมอุณหภูมิแบบสองสภาวะหลายระดับกับตัวควบคุมที่ใช้ในเชิงพาณิชย์

ในการออกแบบเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิแบบสองสภาวะหลายระดับกับระบบควบคุมอุณหภูมิ ตัวควบคุมที่ใช้ในการออกแบบและทดลองในวิทยานิพนธ์คือ ตัวควบคุมที่สามารถแสดงค่าและโปรแกรมได้หรือที่เรียกว่า เอสแอลพีซี (Single Loop Programmable Controller; SLPC) ของบริษัทโยโกกาวา อิเล็กทริก (YOKOGAWA ELECTRIC) [14] ดังแสดงในรูปที่ 4.13

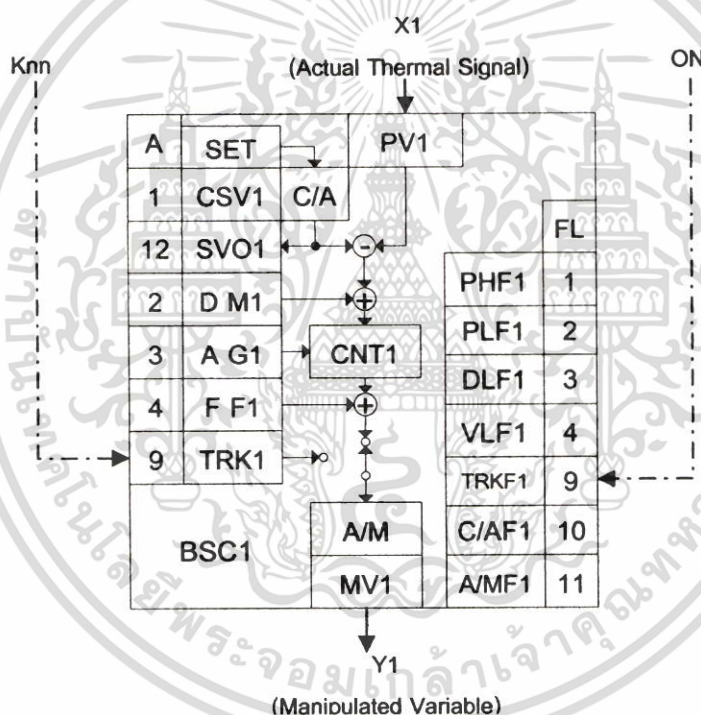


รูปที่ 4.13 แสดงตัวควบคุมที่สามารถแสดงค่าและโปรแกรมได้ (SLPC) ที่ใช้ในการทดลอง

ในการนำตัวควบคุมที่สามารถแสดงค่าและโปรแกรมได้ (SLPC) ไปใช้งานจะต้องทำการป้อนโปรแกรมก่อน ซึ่งอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ป้อนโปรแกรมเรียกว่า เอสพีอาร์จีโปรแกรมเมอร์ (SPRG programmer) คำสั่งที่ป้อนให้กับตัวควบคุมเป็นคำสั่งสำเร็จรูปที่ไม่มีความซับซ้อนมาก ซึ่งผู้ผลิตตัวควบคุมได้จัดเตรียมไว้ให้เป็นที่เรียบร้อย โปรแกรมการใช้งานทั่วไปที่ทำให้ตัวควบคุมที่สามารถแสดงค่าและโปรแกรมได้ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมแบบ P แบบ PI และการควบคุมแบบ PID (ใช้การกำหนดตัวแปร K_c , T_i และ T_d ของตัวควบคุมแบบที่ต้องการ) คือ

1. LD X1
2. BSC
3. ST Y1
4. END

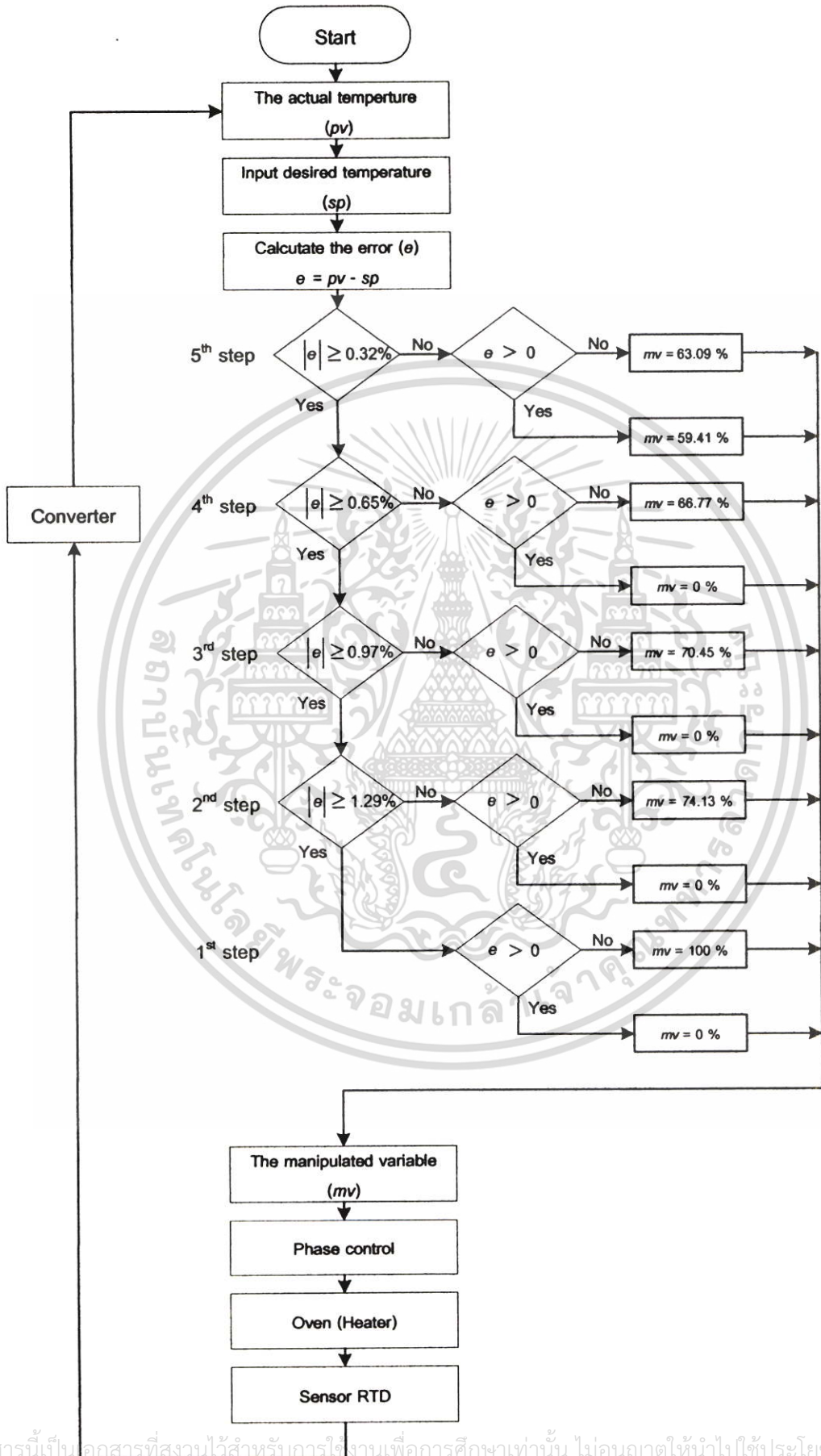
การใช้งานของตัวควบคุมที่สามารถแสดงค่าและโปรแกรมได้ (SLPC) ในการออกแบบเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิแบบสองสถานะหลายระดับกับระบบควบคุมอุณหภูมิจะถูกกำหนดจากค่าสมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนทางอุณหภูมิระหว่างค่าจริงกับค่าเป้าหมาย ($|error| = |pv - sp|$) ตามฟังก์ชันการใช้งานจริงของตัวควบคุม เมื่อค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของระบบเป็นจริงตามเงื่อนไขของค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงในแต่ละระดับการควบคุมที่กำหนด TRKF1 (Tracking Signal Switching) จะอยู่ในสถานะ ON และสวิตช์ไปยัง TRK1 ซึ่งเป็นการใช้เทคนิคการควบคุมที่น่าเสนอ โดยมีสัญญาณควบคุมตามอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์ On-Off ของระดับสัญญาณควบคุมที่กำหนดในแต่ละระดับ ซึ่งฟังก์ชันการใช้งานของตัวควบคุมที่สามารถแสดงค่าและโปรแกรมได้ (SLPC) ที่ใช้ในการทดลอง แสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 แสดงฟังก์ชันการใช้งานของตัวควบคุมที่สามารถแสดงค่าและโปรแกรมได้ (SLPC) ที่ใช้ในการทดลอง

จากตัวอย่างการออกแบบระดับการดำเนินการ n เท่ากับ 5 ระดับ โดยมีอุณหภูมิเป้าหมายที่ 120°C หรือที่เป้าหมาย 58.05% ซึ่งเทคนิคการควบคุมที่น่าเสนอสามารถแสดงได้โดยแผนผังการทำงานดังรูปที่ 4.15 โดยการเขียนโปรแกรมกำหนดให้ตัวควบคุมที่สามารถแสดงค่าและโปรแกรมได้ (SLPC) ทำงานตามเงื่อนไขการควบคุมอุณหภูมิแบบสองสถานะ (On-Off) หลายระดับตามแผนภูมิแท่งดังรูปที่ 4.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าการรูปที่ 4.15 แผนผังตัวอย่างของหลักการควบคุมอุณหภูมิที่นำเสนอ ณ อุณหภูมิเป้าหมาย 120°C

จากรูปที่ 4.15 ตัวควบคุมมีเงื่อนไขของค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงในระดับการควบคุมแรก (1st Steps) คือ ถ้าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนทางอุณหภูมิเป้าหมายของระบบมากกว่าหรือเท่ากับ 1.29% ($e \geq 1.29\%$) ให้ตัวควบคุมมีสัญญาณควบคุมแบบ On-Off เต็มที่เท่ากับ 100% ถ้าหากอุณหภูมิของระบบมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าศูนย์ ($e < 0$) และมีสัญญาณควบคุมเท่ากับ 0% ถ้าหากอุณหภูมิของระบบมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมากกว่าศูนย์ ($e > 0$)

ในระดับการควบคุมที่สอง (2nd Steps) มีเงื่อนไขของค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงว่า ถ้าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนทางอุณหภูมิเป้าหมายของระบบน้อยกว่า 1.29% ($e < 1.29\%$) ให้ตัวควบคุมมีสัญญาณควบคุมแบบ On-Off เท่ากับ 74.13% ถ้าหากอุณหภูมิของระบบมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าศูนย์ ($e < 0$) และมีสัญญาณควบคุมเท่ากับ 0% ถ้าหากอุณหภูมิของระบบมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมากกว่าศูนย์ ($e > 0$)

ในระดับการควบคุมที่สาม (3rd Steps) มีเงื่อนไขของค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงว่า ถ้าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนทางอุณหภูมิเป้าหมายของระบบน้อยกว่า 0.97% ($e < 0.97\%$) ให้ตัวควบคุมมีสัญญาณควบคุมแบบ On-Off เท่ากับ 70.45% ถ้าหากอุณหภูมิของระบบมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าศูนย์ ($e < 0$) และมีสัญญาณควบคุมเท่ากับ 0% ถ้าหากอุณหภูมิของระบบมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมากกว่าศูนย์ ($e > 0$)

ในระดับการควบคุมที่สี่ (4th Steps) มีเงื่อนไขของค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงว่า ถ้าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนทางอุณหภูมิเป้าหมายของระบบน้อยกว่า 0.65% ($e < 0.65\%$) ให้ตัวควบคุมมีสัญญาณควบคุมแบบ On-Off เท่ากับ 66.77% ถ้าหากอุณหภูมิของระบบมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าศูนย์ ($e < 0$) และมีสัญญาณควบคุมเท่ากับ 0% ถ้าหากอุณหภูมิของระบบมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมากกว่าศูนย์ ($e > 0$)

และในระดับการควบคุมที่ห้า (5th Steps) ซึ่งเป็นระดับที่อุณหภูมิของระบบจะเข้าใกล้ค่าเป้าหมายมากที่สุด โดยใช้การคำนวณสัญญาณควบคุมตามหลักการพลังงานสมดุลตามความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนกับพลังงานไฟฟ้าของการถ่ายเทความร้อน ซึ่งมีเงื่อนไขของค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงว่า ถ้าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนทางอุณหภูมิเป้าหมายของระบบน้อยกว่า 0.32% ($e < 0.32\%$) ตัวควบคุมจะมีสัญญาณควบคุมเท่ากับ 63.09% ถ้าหากอุณหภูมิของระบบมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าศูนย์ ($e < 0$) และมีสัญญาณควบคุมเท่ากับระดับสัญญาณไบอัส 59.4% ถ้าหากอุณหภูมิของระบบมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมากกว่าศูนย์ ($e > 0$) ซึ่งสัญญาณควบคุมที่ได้จะต่อไปยังชุดควบคุมเฟสเพื่อปรับแรงดันไฟฟ้าซึ่งอยู่ระหว่าง 0 ถึง 220 Vac. ในสัดส่วนที่เหมาะสมตามสัญญาณควบคุมในแต่ละระดับจากตัวควบคุมเพื่อป้อนให้ชุดลดความร้อนทำการผลิตความร้อนตามแรงดันไฟฟ้าที่ได้รับ

บทที่ 5

ผลการทดลอง

5.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะเป็นการนำเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิที่ออกแบบไปทดลองกับโปรแกรมจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์ (MATLAB) เพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมในเบื้องต้นก่อนที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับตัวควบคุมที่ใช้ในเชิงพาณิชย์เพื่อทำการทดลองกับกระบวนการจำลองการควบคุมอุณหภูมิ โดยทำการทดลองให้เห็นผลตอบสนองของการควบคุมที่ค่าเป้าหมายต่างๆ ของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ตัวควบคุมที่ต่างชนิดกัน เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นความแตกต่างจากผลตอบสนองของการควบคุมด้วยเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิที่นำเสนอ กับเทคนิคการควบคุมชนิดอื่นที่มีใช้ในปัจจุบัน นอกจากนี้ยังนำเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิที่ออกแบบไปใช้ทดลองเสมือนการใช้งานจริงโดยการอบอาหาร และในตอนท้ายได้นำเทคนิคการควบคุมแบบสองสถานะหลายระดับไปออกแบบและประยุกต์ใช้ในการทดลองกับกระบวนการจำลองการควบคุมระดับของของเหลวเพื่อยืนยันถึงประสิทธิภาพของเทคนิคการควบคุมดังกล่าว

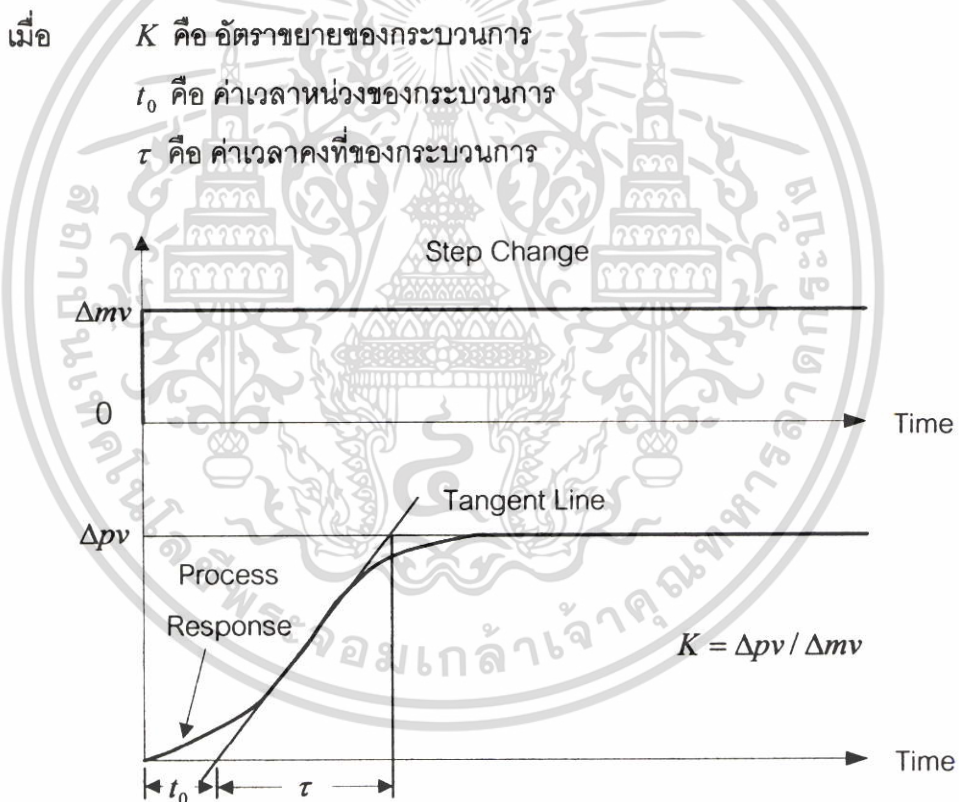
5.2 การทดลองเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิแบบสองสถานะหลายระดับกับโปรแกรมจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์

การทดลองเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิแบบสองสถานะหลายระดับกับโปรแกรมจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์ ในวิทยานิพนธ์นี้ อาศัยโปรแกรม MATLAB ซึ่งสามารถจำลอง และทดสอบการทำงานของระบบพลศาสตร์ในเชิงเวลาได้โดยการใช้ Simulink ซึ่งเป็นเครื่องมือ (Toolbox) ที่อยู่ในโปรแกรม MATLAB โดยจะทำงานภายใต้หน้าต่างที่เป็นการเชื่อมต่อทางรูปภาพของ Simulink เท่านั้น การทำงานของ Simulink จะกระทำโดยการนำ Block Diagram แต่ละ Block ในหน้าต่าง Library Simulink มาต่อกันเพื่อทำการจำลองระบบตามที่เราต้องการ การจำลองระบบสามารถกระทำได้โดยการป้อนอินพุตให้กับระบบที่สร้างไว้แล้วดูผลลัพธ์ของระบบเนื่องจากอินพุตที่ป้อนเข้าไป ซึ่งในการหาคุณลักษณะของกระบวนการเพื่อทำการทดลองเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิที่ออกแบบกับโปรแกรมจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์นั้นใช้วิธีการคำนวณจากวิธี Process Reaction Curve ของ Ziegler-Nichols [15] โดยใช้ผลตอบสนองรูปตัว S ในการอธิบายคุณลักษณะของกระบวนการ (Process Characteristic) ด้วยพารามิเตอร์ 3 ค่า คือ ค่าอัตราขยายของกระบวนการ (Process Gain) ค่าเวลาน่องของกระบวนการ (Process Dead Time) และค่าเวลาคงที่ของกระบวนการ (Process Time Constant) โดยค่าเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยของกระบวนการ และค่าเวลาคงที่ของกระบวนการ จะถูกประมาณโดยการลากเส้นสัมผัสกับจุดที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุด (Maximum Slope) ดังรูปที่ 5.1 ส่วนค่าอัตราขยายของกระบวนการทราบได้เมื่อผลตอบสนองของกระบวนการเข้าสู่สภาวะคงที่ และโดยทั่วไปฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) ของกระบวนการจะถูกอนุมานให้เป็นรูปแบบของกระบวนการอันดับหนึ่งแบบมีการหน่วงเวลา (First-Order Lag Plus Dead Time : FOPDT) เนื่องจากการอนุมานที่ดีที่สุดสำหรับกระบวนการอุตสาหกรรม [16] ซึ่งฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการแบบ FOPDT แสดงตามสมการ (5.1)

$$G(s) = \frac{Ke^{-t_0s}}{\tau s + 1} \quad (5.1)$$



รูปที่ 5.1 แสดงผลตอบสนองของรูปตัว S เมื่อใช้วิธี Process Reaction Curve

จากสมการ (5.1) จะเห็นได้ว่าคุณลักษณะของกระบวนการอยู่ในรูปของตัวแปร 3 ตัว ซึ่งสามารถหาได้จากการทดสอบกระบวนการ โดยการทำการทดสอบแบบลูปเปิด หรือแบบไม่มีการป้อนกลับ ซึ่งจากข้อมูลการคำนวณระดับสัญญาณควบคุมในแต่ละอุณหภูมิเป้าหมายตามหลักการพลังงานสมดุลของกระบวนการทางอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองในตารางที่ 4.2 จากชุดทดลองในรูปที่ 4.2 โดยนำข้อมูลในหลักที่ 1 และหลักที่ 5 มาทำการทดลองทดสอบกระบวนการ

แบบรูปเปิดด้วยวิธี Process Reaction Curve และอ่านค่าจากกระดาษบันทึกในการอธิบายคุณลักษณะของกระบวนการ 3 ค่า คือ อัตราขยายของกระบวนการ (K) ค่าเวลาคงที่ของกระบวนการ (τ) และค่าเวลาหน่วงของกระบวนการ (t_0) ตามสมการที่ (5.1) เพื่อกำหนดลงใน Block ฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการ (Transfer Fcn) ซึ่งเป็นเครื่องมือใช้งานหนึ่งของ Simulink ในการจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์ โดยผู้วิจัยได้เลือกทำการทดลองผลตอบสนองของกระบวนการโดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบสองสถานะหลายระดับที่อุณหภูมิเป้าหมาย 90 °C 120 °C และ 150 °C ตามลำดับ ซึ่งในการทดลองทดสอบกระบวนการแบบรูปเปิดได้ใช้สัญญาณอินพุทแบบ Step ตามข้อมูลในตารางที่ 4.2 และอ่านค่าจากกระดาษบันทึกในการอธิบายคุณลักษณะของกระบวนการได้ดังนี้

ที่อุณหภูมิเป้าหมาย 90 °C ใช้สัญญาณอินพุทแบบ Step ที่ 52.1% โดยการทดลองสามารถวัดค่าเวลาคงที่ของกระบวนการได้ 23 มิลลิเมตร ค่าเวลาหน่วง 1 มิลลิเมตร และกระบวนการเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ระดับ 40% หรือคิดเป็น 92 °C และในการทดลองปรับความเร็วในการบันทึกของเครื่องบันทึกสัญญาณไว้ที่ 100 mm./h. นั่นคือ 1mm./36 sec. ดังนั้น

$$K = 40\% / 52.1\% = 0.76$$

$$\tau = 23 \times 36 = 828 \text{ sec.}$$

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

ที่อุณหภูมิเป้าหมาย 120 °C ใช้สัญญาณอินพุทแบบ Step ที่ 63.1% โดยการทดลองสามารถวัดค่าเวลาคงที่ของกระบวนการได้ 31 มิลลิเมตร ค่าเวลาหน่วง 0.5 มิลลิเมตร และกระบวนการเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ระดับ 59% หรือคิดเป็น 121.45 °C และในการทดลองปรับความเร็วในการบันทึกของเครื่องบันทึกสัญญาณไว้ที่ 100 mm./h. นั่นคือ 1mm./36 sec. ดังนั้น

$$K = 59\% / 63.1\% = 0.93$$

$$\tau = 31 \times 36 = 1,116 \text{ sec.}$$

$$t_0 = 0.5 \times 36 = 18 \text{ sec.}$$

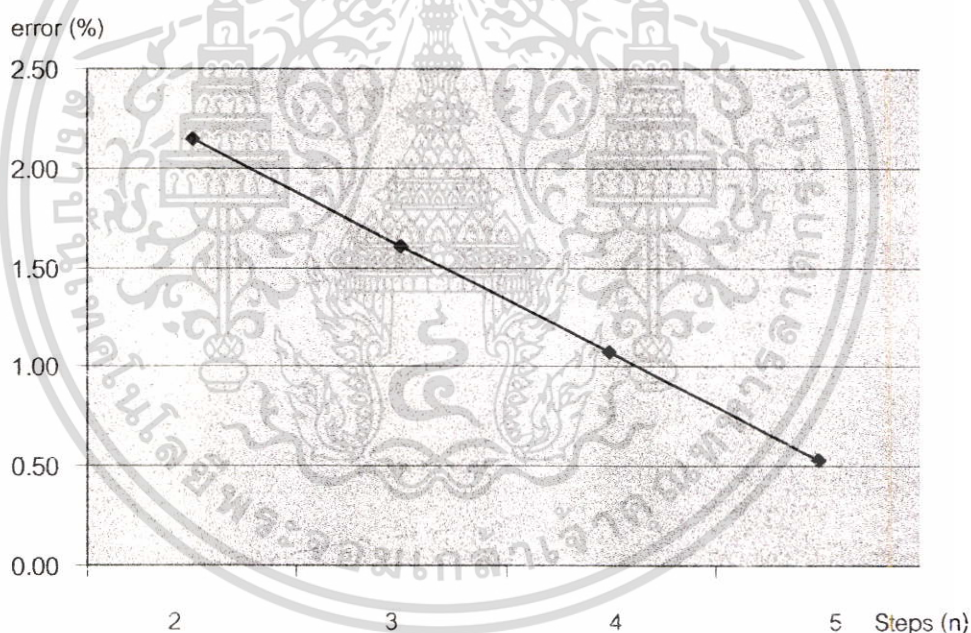
ที่อุณหภูมิเป้าหมาย 150 °C ใช้สัญญาณอินพุทแบบ Step ที่ 74.1% โดยการทดลองสามารถวัดค่าเวลาคงที่ของกระบวนการได้ 47 มิลลิเมตร ค่าเวลาหน่วง 0.5 มิลลิเมตร และกระบวนการเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ระดับ 78% หรือคิดเป็น 150.9 °C และในการทดลองปรับความเร็วในการบันทึกของเครื่องบันทึกสัญญาณไว้ที่ 100 mm./h. นั่นคือ 1mm./36 sec. ดังนั้น

$$K = 78\% / 74.1\% = 1.05$$

$$\tau = 47 \times 36 = 1,692 \text{ sec.}$$

$$t_0 = 0.5 \times 36 = 18 \text{ sec.}$$

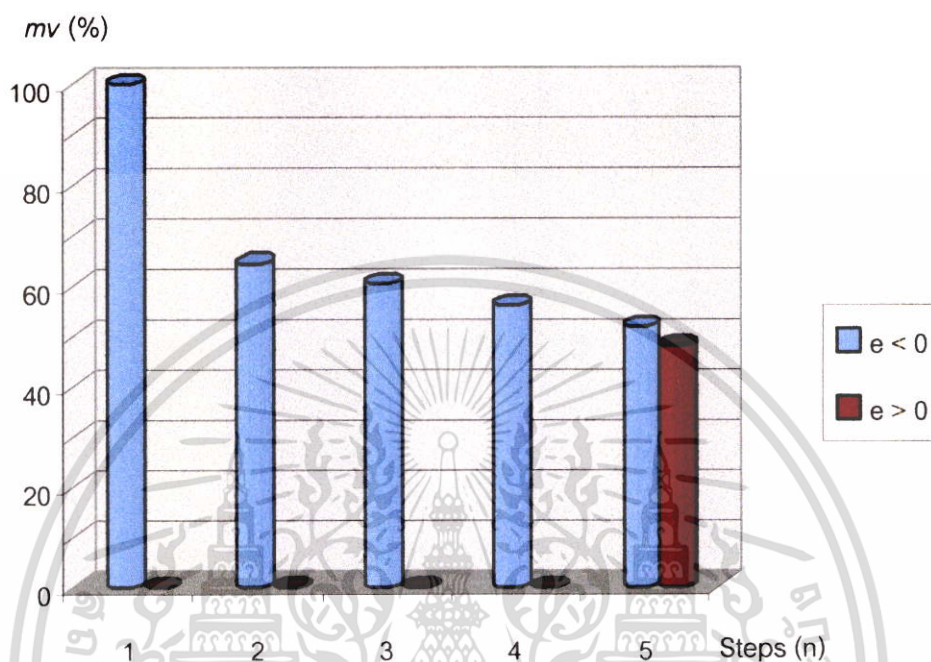
ในการทดลองผลการตอบสนองของระบบเมื่อใช้เทคนิคการควบคุมอุณหภูมิที่นำเสนอที่เป้าหมาย 38.70% หรือ 90 °C นั้น ทางผู้วิจัยได้ออกแบบระดับในการ On-Off ตามการคำนวณตามหลักการพลังงานสมดุล ณ อุณหภูมิเป้าหมายจากหลักความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนกับพลังงานไฟฟ้าของการถ่ายเทความร้อนของกระบวนการ ซึ่งได้คำนวณเอาไว้ก่อนหน้านี้โดยใช้ข้อมูลในตารางที่ 4.2 ถึงตารางที่ 4.4 ในการออกแบบตามหัวข้อ 4.2.3 โดยในเบื้องต้นได้ออกแบบเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิเป็น 5 ระดับ ซึ่งในรูปที่ 5.2 แสดงแผนภูมิเส้นของค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงในแต่ละระดับการดำเนินการที่ออกแบบ



รูปที่ 5.2 แผนภูมิเส้นแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงในแต่ละระดับการดำเนินการ ณ อุณหภูมิเป้าหมายที่ 90 °C ของจำนวน n เท่ากับ 5 ระดับ

เนื่องจากระบบที่ทำการทดลองเป็นระบบที่มีความจุต่ำและมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในที่เร็ว ในการทดลองเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิกครั้งนี้ได้ออกแบบให้ตัวควบคุมในระดับสุดท้าย (5th Steps) มีระดับสัญญาณควบคุมไบอัส (Bias) เท่ากับ 47.9% ตามอัตราการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณควบคุม Δmv_{cal} ณ อุณหภูมิเป้าหมายจากข้อมูลในตารางที่ 4.3 เพิ่มเข้ามาแทนระดับสัญญาณควบคุมที่ 0% เมื่อระบบมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมากกว่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศูนย์ ($e > 0\%$) เพื่อเป็นการป้องกันการแกว่งของอุณหภูมิจากการ Off ในระดับสุดท้ายซึ่งเป็นระดับการควบคุมที่ระบบมีอุณหภูมิที่เข้าใกล้เป้าหมายที่สุด และในรูปที่ 5.3 แสดงระดับสัญญาณควบคุมในแต่ละระดับการดำเนินการที่ออกแบบ



รูปที่ 5.3 แผนภูมิแท่งแสดงระดับสัญญาณควบคุมในแต่ละระดับการดำเนินการ ณ อุณหภูมิเป้าหมายที่ 90°C เมื่อมีจำนวนของระดับดำเนินการ n เท่ากับ 5 ระดับ

จากแผนภูมิเส้นของค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงในแต่ละระดับการดำเนินการ ในรูปที่ 5.2 และระดับสัญญาณควบคุมในแต่ละระดับการดำเนินการที่ออกแบบในรูปที่ 5.3 สามารถเขียนฟังก์ชันคำสั่งเงื่อนไขการควบคุมแบบสองสภาวะหลายระดับ ณ อุณหภูมิเป้าหมายที่ 90°C หรือ 38.7% ได้ดังรูปที่ 5.4 โดยใช้ Block ของฟังก์ชัน MATLAB (MATLAB Fcn) เพื่อเป็นการเรียกฟังก์ชัน MATLAB ของเงื่อนไขการควบคุมที่อุณหภูมิเป้าหมาย 38.7% มาใช้งานโดยการกำหนดชื่อฟังก์ชันใน Simulink ในการควบคุมระบบจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งในรูปที่ 5.5 แสดงโปรแกรมจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์โดยการใช้ Simulink ที่อุณหภูมิเป้าหมาย 38.7% โดยสามารถแสดงผลตอบสนองของระบบผ่านทาง Block แสดงผล Scope (Recorder) และในรูปที่ 5.6 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการจากการจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์ ณ อุณหภูมิเป้าหมาย 38.70% หรือ 90°C โดยทำการบันทึกผลตอบสนองของสัญญาณควบคุม mv และผลตอบสนองของ pv ซึ่งแกนตั้งระบุค่าจาก 0% ถึง 100% และแกนนอนระบุค่าเวลาเป็นวินาที (sec.)

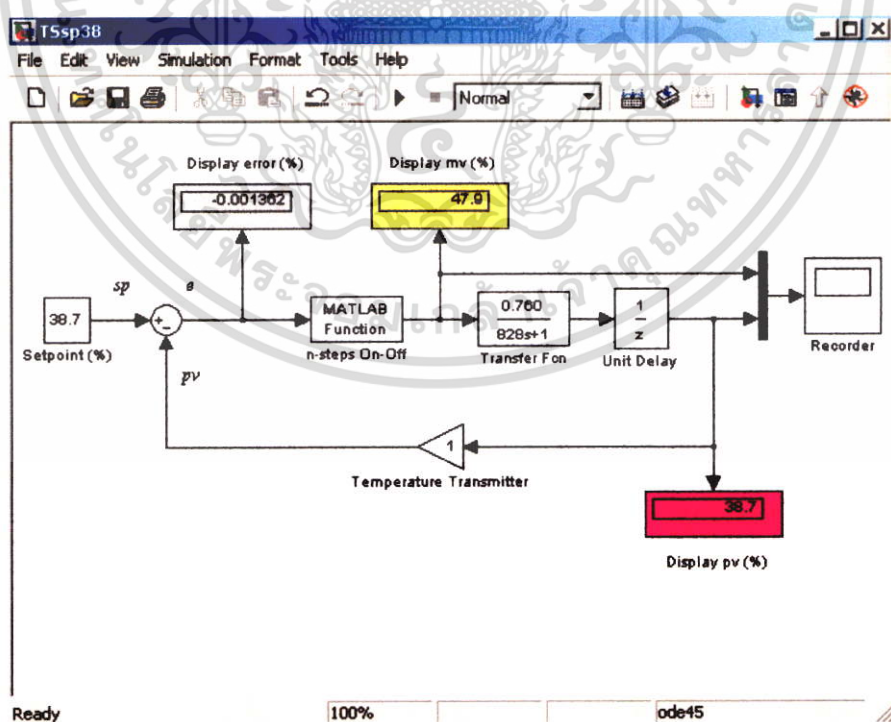
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

1 function mv = FindMV1(e)
2 if abs(e) <= 0.53
3     if e <= 0
4         mv = 47.9;
5     else
6         mv = 52.1;
7     end
8 else
9     if abs(e) <= 1.07
10        if e <= 0
11            mv = 0;
12        else
13            mv = 56.2;
14        end
15    else
16        if abs(e) <= 1.61
17            if e <= 0
18                mv = 0;
19            else
20                mv = 60.4;
21            end
22        else
23            if abs(e) <= 2.14
24                if e <= 0
25                    mv = 0;
26                else
27                    mv = 64.5;
28                end
29            else
30                if e <= 0
31                    mv = 0;
32                else
33                    mv = 100;
34                end
35            end
36        end
37    end

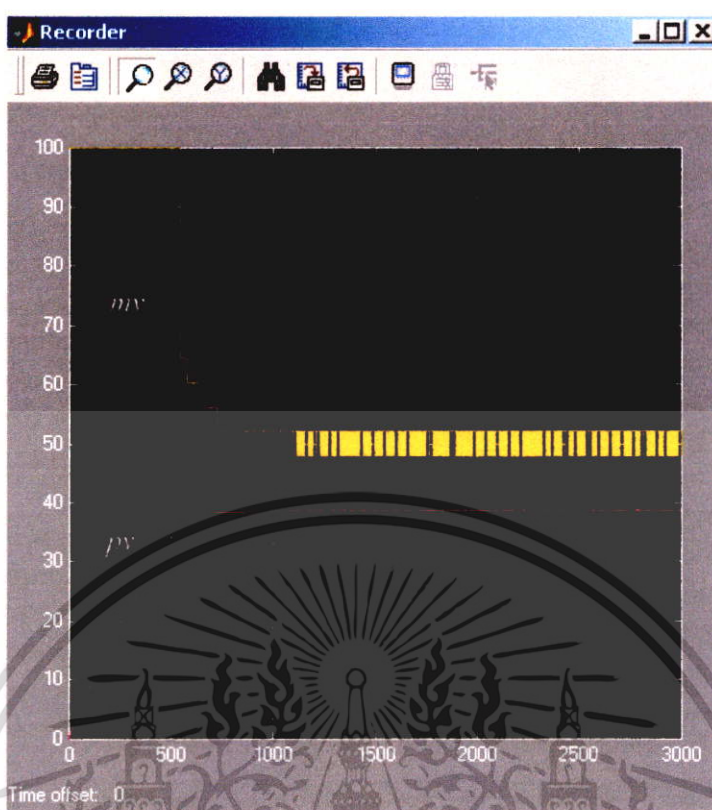
```

รูปที่ 5.4 แสดงโปรแกรมคำสั่งของ Block เทคนิคการควบคุมที่นำเสนอนั้น อุณหภูมิเป้าหมายที่ 38.7% หรือที่อุณหภูมิ 90 °C



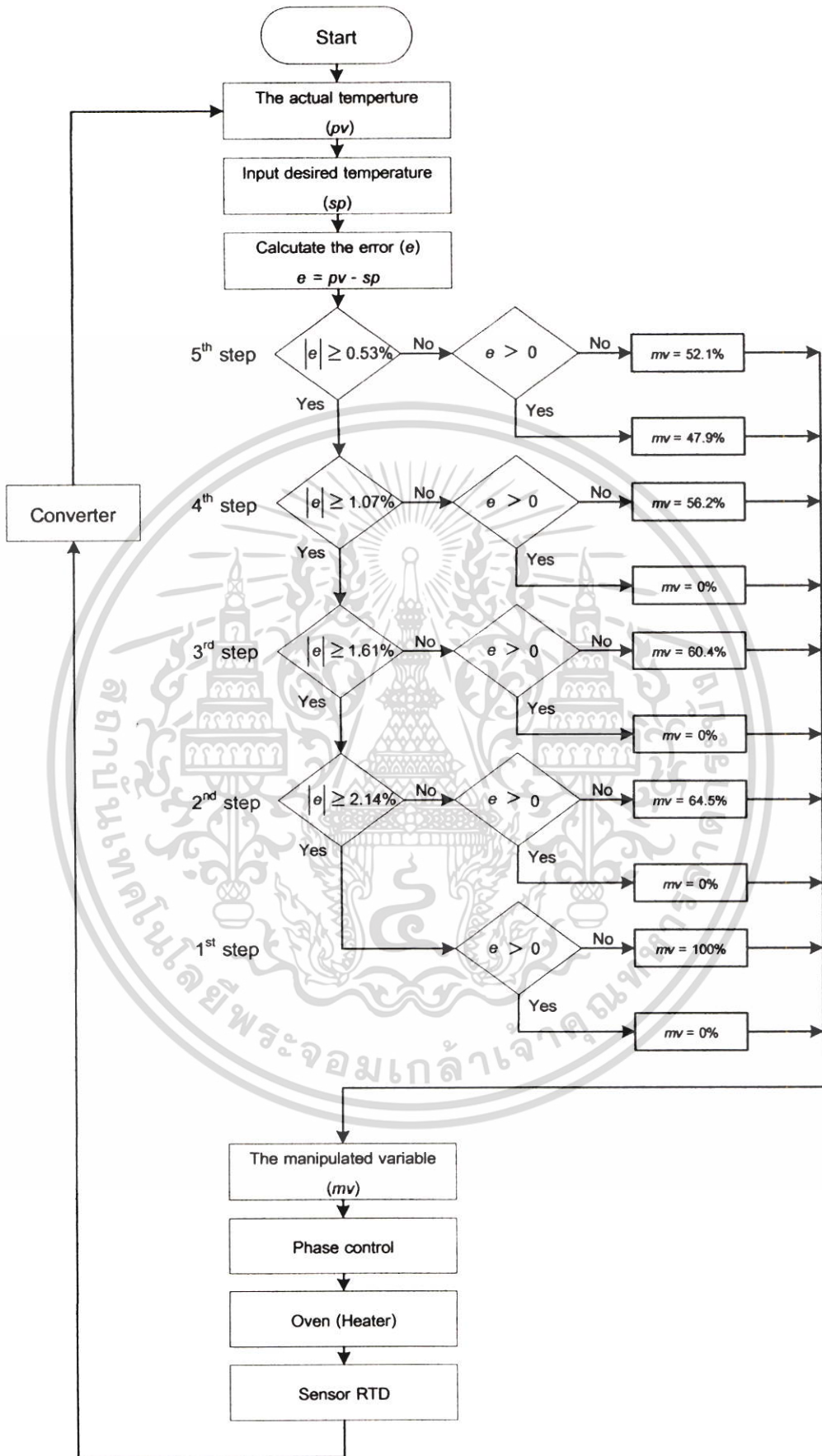
รูปที่ 5.5 แสดงโปรแกรมจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์โดยการใช้ Simulink นั้น อุณหภูมิเป้าหมายที่ 38.7% หรือที่อุณหภูมิ 90 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการจากการจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์ ณ อุณหภูมิเป้าหมายที่ 38.70% หรือที่อุณหภูมิ 90 °C

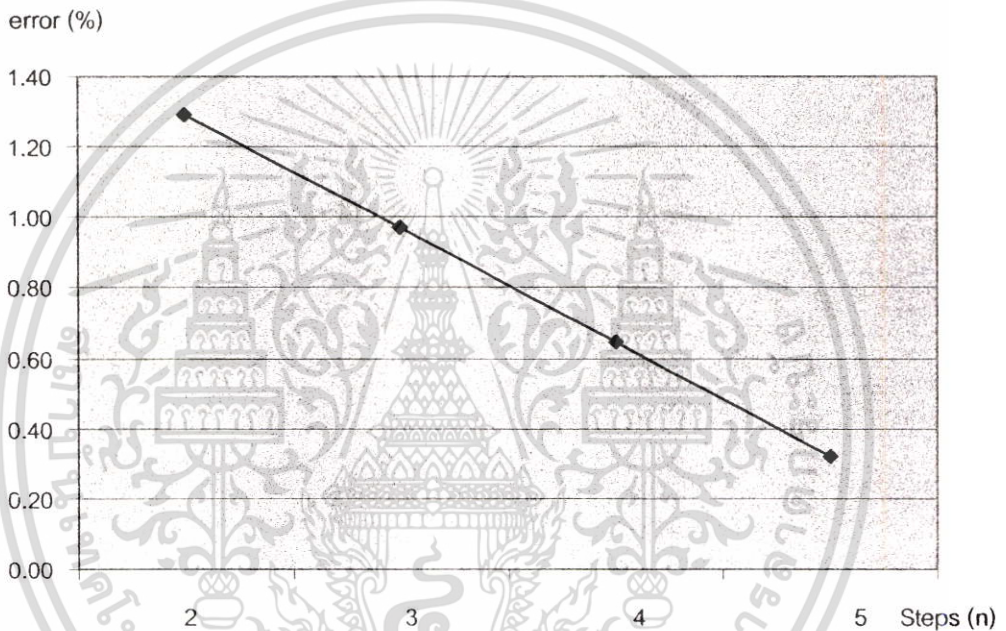
จากผลตอบสนองของกระบวนการจากการจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์ ณ อุณหภูมิเป้าหมาย 38.70% หรือ 90 °C ในรูปที่ 5.6 จะเห็นว่าระดับสัญญาณควบคุมจะแกว่งอยู่ ณ ระดับของสัญญาณควบคุมในระดับการควบคุมสุดท้ายตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่คลาดเคลื่อนจากเป้าหมายเพียงเล็กน้อยอยู่ตลอดเวลา ซึ่งจากการออกแบบเทคนิคการควบคุมแบบสองสถานะหลายระดับ ณ อุณหภูมิเป้าหมายที่ 90 °C หรือ 38.7% นำไปประยุกต์ใช้กับตัวควบคุมที่สามารถแสดงค่าและโปรแกรมได้ (SLPC) โดยมีแผนผังของหลักการควบคุมอุณหภูมิที่เป้าหมาย 38.70% หรือที่ 90 °C ดังแสดงในรูปที่ 5.7 เพื่อทำการทดลองกับกระบวนการจำลองการควบคุมอุณหภูมิในหัวข้อ 5.4 ต่อไป



รูปที่ 5.7 แสดงแผนผังการทดลองของหลักการควบคุมอุณหภูมิที่เป้าหมาย 90 °C

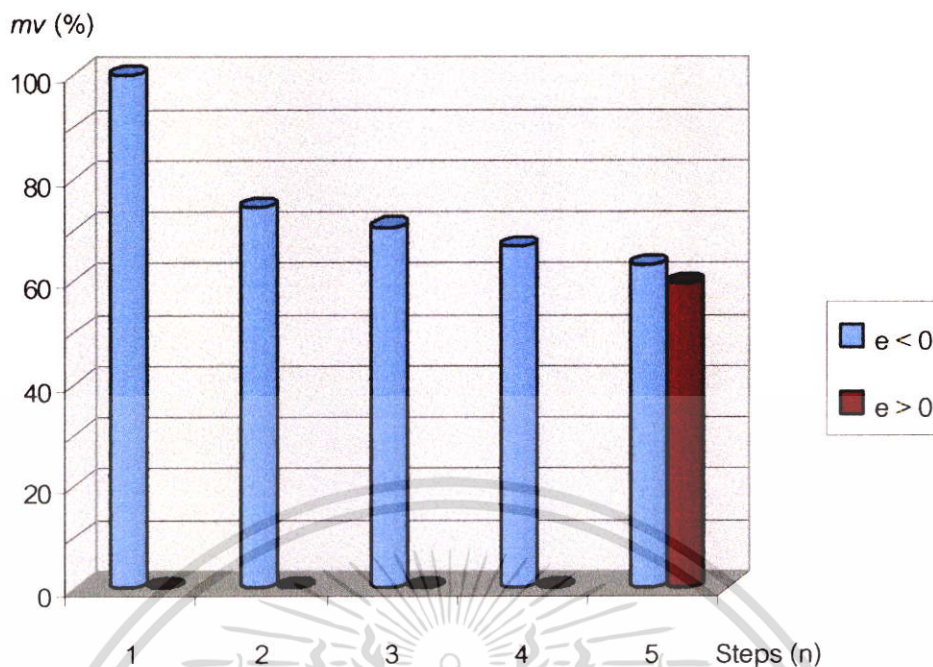
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดลองผลการตอบสนองของระบบเมื่อใช้เทคนิคการควบคุมอุณหภูมิที่ออกแบบที่เป้าหมาย 58.05% หรือ 120 °C นั้น ทางผู้วิจัยได้ออกแบบระดับในการ On-Off ตามการคำนวณตามหลักการพลังงานสมดุล ณ อุณหภูมิเป้าหมายจากหลักความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนกับพลังงานไฟฟ้าของการถ่ายเทความร้อนของกระบวนการ ซึ่งได้คำนวณเอาไว้ก่อนหน้านี้โดยใช้ข้อมูลในตารางที่ 4.2 ถึงตารางที่ 4.4 ในการออกแบบตามหัวข้อ 4.2.3 โดยในเบื้องต้นได้ออกแบบเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิออกเป็น 5 ระดับ ซึ่งในรูปที่ 5.8 แสดงแผนภูมิเส้นของค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงในแต่ละระดับการดำเนินการที่ออกแบบ



รูปที่ 5.8 แผนภูมิเส้นแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงในแต่ละระดับการดำเนินการ ณ อุณหภูมิเป้าหมายที่ 120 °C ของจำนวน n เท่ากับ 5 ระดับ

เนื่องจากระบบที่ทำการทดลองเป็นระบบที่มีความจุต่ำและมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในที่เร็ว ในการทดลองเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิครั้งนี้ได้ออกแบบให้ตัวควบคุมในระดับสุดท้าย (5th Steps) มีระดับสัญญาณควบคุมไบอัส (Bias) เท่ากับ 59.4% ตามอัตราการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณควบคุม Δmv_{cal} ณ อุณหภูมิเป้าหมายจากข้อมูลในตารางที่ 4.3 เพิ่มเข้ามาแทนระดับสัญญาณควบคุมที่ 0% เมื่อระบบมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมากกว่าศูนย์ ($e > 0\%$) เพื่อเป็นการป้องกันการแกว่งของอุณหภูมิจากการ Off ในระดับสุดท้ายซึ่งเป็นระดับการควบคุมที่ระบบมีอุณหภูมิที่เข้าใกล้เป้าหมายที่สุด และในรูปที่ 5.9 แสดงระดับสัญญาณควบคุมในแต่ละระดับการดำเนินการเมื่อมีระดับดำเนินการ n เท่ากับ 5



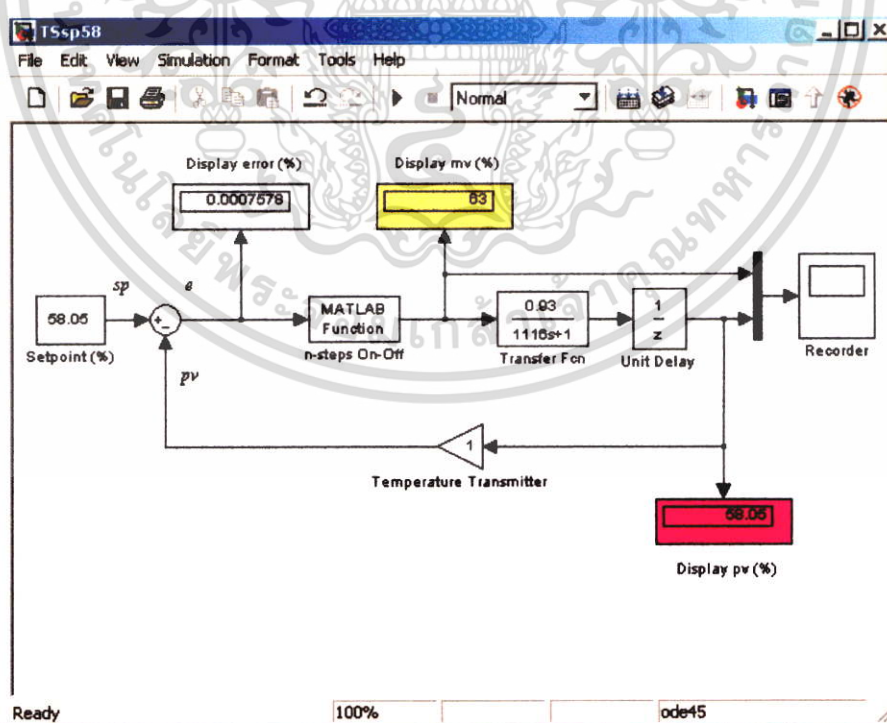
รูปที่ 5.9 แผนภูมิแท่งแสดงระดับสัญญาณควบคุมในแต่ละระดับการดำเนินการ ณ อุณหภูมิเป้าหมายที่ 120°C เมื่อมีจำนวนของระดับดำเนินการ n เท่ากับ 5 ระดับ

จากแผนภูมิเส้นของค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงในแต่ละระดับการดำเนินการ ในรูปที่ 5.8 และระดับสัญญาณควบคุมในแต่ละระดับการดำเนินการที่ออกแบบในรูปที่ 5.9 สามารถเขียนฟังก์ชันคำสั่งเงื่อนไขการควบคุมแบบสองสถานะหลายระดับ ณ อุณหภูมิเป้าหมายที่ 120°C หรือ 58.05% ได้ดังรูปที่ 5.10 โดยใช้ Block ฟังก์ชันของ MATLAB (MATLAB Fcn) เพื่อเป็นการเรียกฟังก์ชัน MATLAB ของเงื่อนไขการควบคุมที่อุณหภูมิเป้าหมาย 58.05% มาใช้งาน โดยการกำหนดชื่อฟังก์ชันใน Simulink ในการควบคุมระบบจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งในรูปที่ 5.11 แสดงโปรแกรมจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์โดยการใช้ Simulink ที่อุณหภูมิเป้าหมาย 58.05% โดยสามารถแสดงผลตอบสนองของระบบผ่านทาง Block แสดงผล Scope (Recorder) และในรูปที่ 5.12 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการจากการจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์ ณ อุณหภูมิเป้าหมาย 58.05% หรือ 120°C โดยทำการบันทึกผลตอบสนองของสัญญาณควบคุม mv และผลตอบสนองของ pv ซึ่งแกนตั้งระบุค่าจาก 0% ถึง 100% และแกนอิสระระบุค่าเวลาเป็นวินาที (sec.)

```

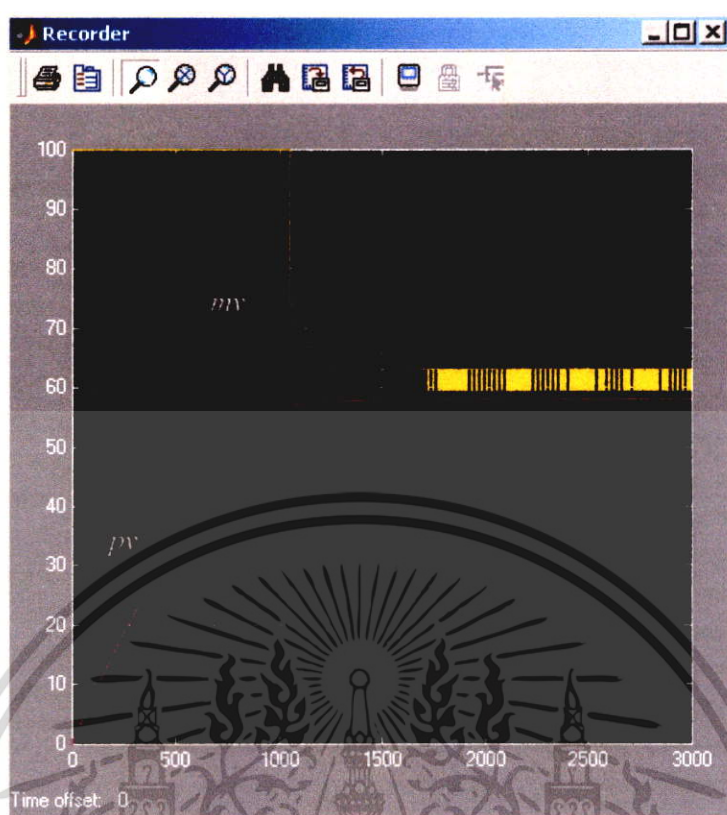
1 function mv = FindMV2(e)
2 if abs(e) <= 0.32
3     if e <= 0
4         mv = 59.4;
5     else
6         mv = 63.0;
7     end
8 else
9     if abs(e) <= 0.65
10        if e <= 0
11            mv = 0;
12        else
13            mv = 66.7;
14        end
15    else
16        if abs(e) <= 0.97
17            if e <= 0
18                mv = 0;
19            else
20                mv = 70.4;
21            end
22        else
23            if abs(e) <= 1.29
24                if e <= 0
25                    mv = 0;
26                else
27                    mv = 74.1;
28                end
29            else
30                if e <= 0
31                    mv = 0;
32                else
33                    mv = 100;
34                end
35            end
36        end
37    end
38 end
  
```

รูปที่ 5.10 แสดงโปรแกรมคำสั่งของ Block เทคนิคการควบคุมที่นำเสนอน ณ อุณหภูมิเป้าหมายที่ 58.05% หรือที่อุณหภูมิ 120 °C



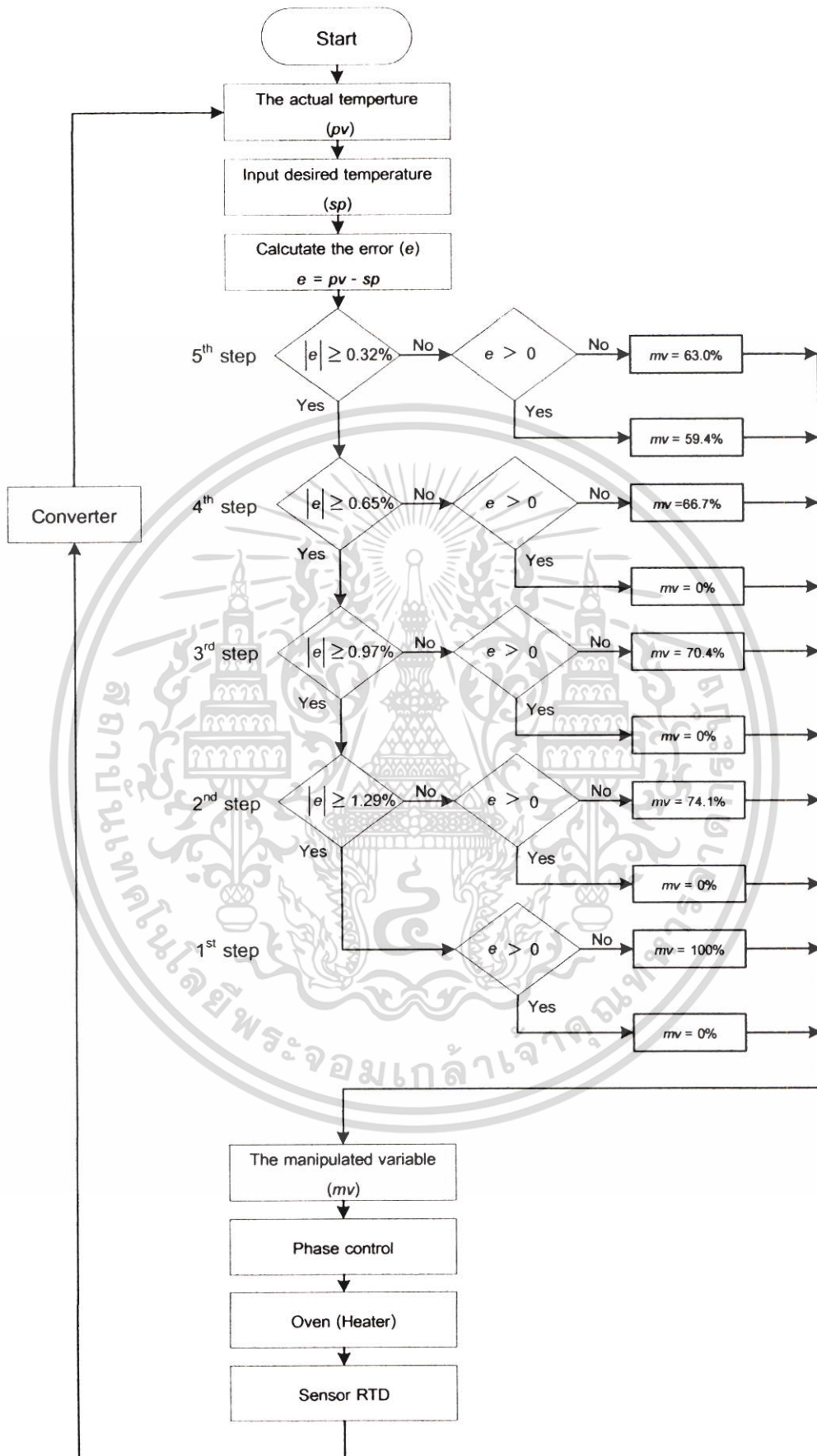
รูปที่ 5.11 แสดงโปรแกรมจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์โดยการใช้ Simulink ที่อุณหภูมิเป้าหมาย 58.05% หรือที่อุณหภูมิ 120 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการจากการจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์ ณ อุณหภูมิเป้าหมาย 58.05% หรือที่อุณหภูมิ 120 °C

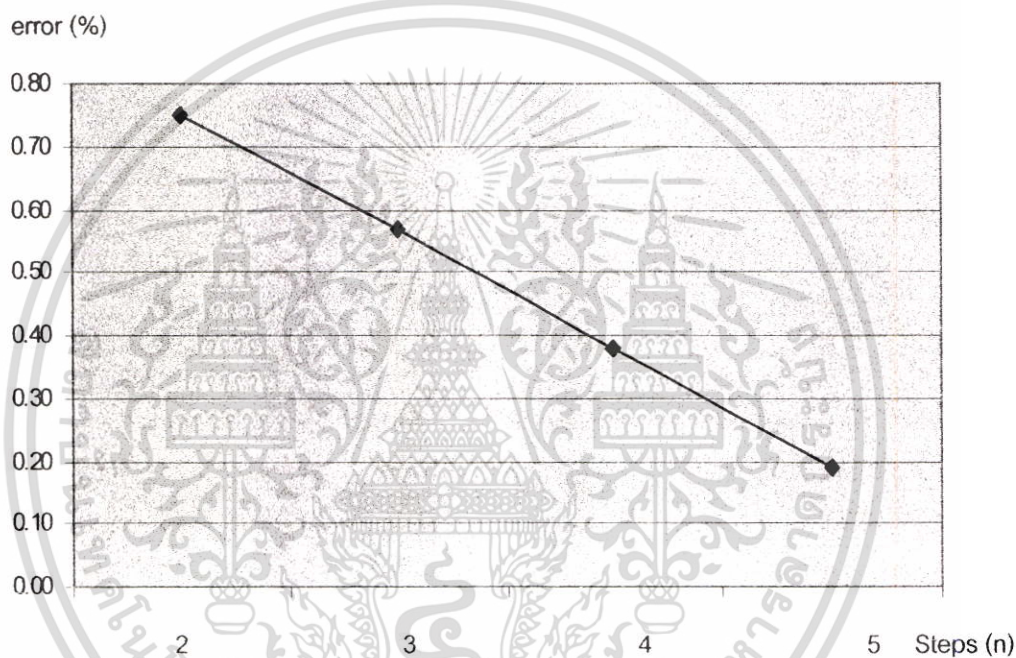
จากผลตอบสนองของกระบวนการจากการจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์ ณ อุณหภูมิเป้าหมาย 58.05% หรือ 120 °C ในรูปที่ 5.12 จะเห็นว่าระดับสัญญาณควบคุมจะแกว่ง อยู่ ณ ระดับของสัญญาณควบคุมในระดับการควบคุมสุดท้ายตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ คลาดเคลื่อนจากเป้าหมายเพียงเล็กน้อยอยู่ตลอดเวลา ซึ่งจากการออกแบบเทคนิคการควบคุม แบบสองสภาวะหลายระดับ ณ อุณหภูมิเป้าหมายที่ 120 °C หรือ 58.05% นำไปประยุกต์ใช้กับตัว ควบคุมที่สามารถแสดงค่าและโปรแกรมได้ (SLPC) โดยมีแผนผังของหลักการควบคุมอุณหภูมิที่ เป้าหมาย 58.05% หรือที่ 120 °C ดังแสดงในรูปที่ 5.13 เพื่อทำการทดลองกับกระบวนการจำลอง การควบคุมอุณหภูมิในหัวข้อ 5.4 ต่อไป



รูปที่ 5.13 แสดงแผนผังการทดลองของหลักการควบคุมอุณหภูมิที่เป้าหมาย 120 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

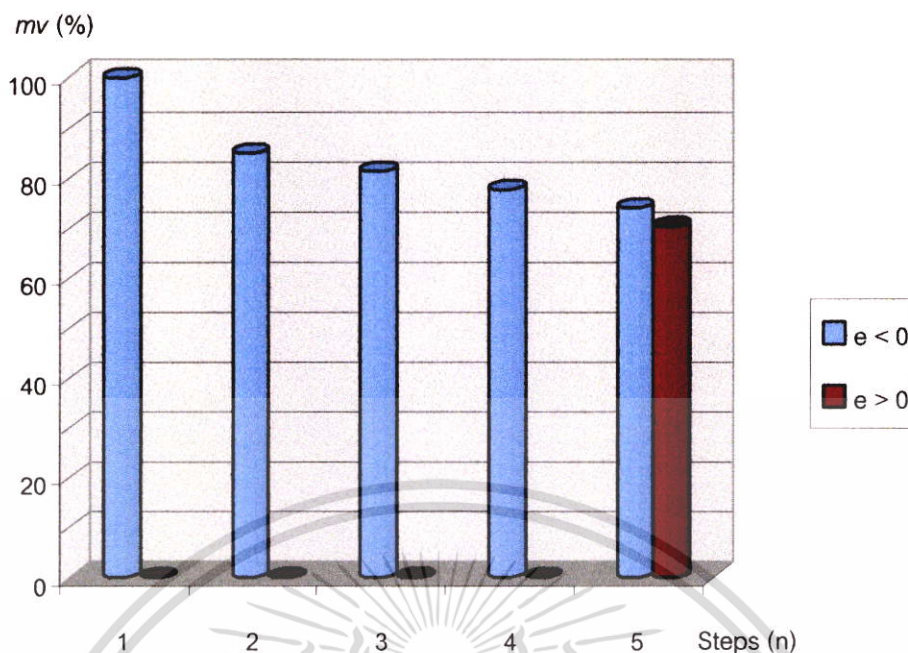
ในการทดลองผลการตอบสนองของระบบเมื่อใช้เทคนิคการควบคุมอุณหภูมิที่ออกแบบที่เป้าหมาย 77.40% หรือ 150 °C นั้น ทางผู้วิจัยได้ออกแบบระดับในการ On-Off ตามการคำนวณตามหลักการพลังงานสมดุล ณ อุณหภูมิเป้าหมายจากหลักความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนกับพลังงานไฟฟ้าของการถ่ายเทความร้อนของกระบวนการ ซึ่งได้คำนวณเอาไว้ก่อนหน้านี้โดยใช้ข้อมูลในตารางที่ 4.2 ถึงตารางที่ 4.4 ในการออกแบบตามหัวข้อ 4.2.3 โดยในเบื้องต้นได้ออกแบบเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิออกเป็น 5 ระดับ ซึ่งในรูปที่ 5.14 แสดงแผนภูมิเส้นของค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงในแต่ละระดับการดำเนินการที่ออกแบบ



รูปที่ 5.14 แผนภูมิเส้นแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงในแต่ละระดับการดำเนินการ ณ อุณหภูมิเป้าหมายที่ 150 °C ของจำนวน n เท่ากับ 5 ระดับ

เนื่องจากระบบที่ทำการทดลองเป็นระบบที่มีความจุต่ำและมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในที่เร็ว ในการทดลองเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิครั้งนี้ได้ออกแบบให้ตัวควบคุมในระดับสุดท้าย (5th Steps) มีระดับสัญญาณควบคุมไบอัส (Bias) เท่ากับ 70.5% ตามอัตราการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณควบคุม Δmv_{cat} ณ อุณหภูมิเป้าหมายจากข้อมูลในตารางที่ 4.3 เพิ่มเข้ามาแทนระดับสัญญาณควบคุมที่ 0% เมื่อระบบมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมากกว่าศูนย์ ($e > 0\%$) เพื่อเป็นการป้องกันการแกว่งของอุณหภูมิจากการ Off ในระดับสุดท้ายซึ่งเป็นระดับการควบคุมที่ระบบมีอุณหภูมิที่เข้าใกล้เป้าหมายที่สุด และในรูปที่ 5.15 แสดงระดับสัญญาณควบคุมในแต่ละระดับการดำเนินการเมื่อมีระดับดำเนินการ n เท่ากับ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.15 แผนภูมิแท่งแสดงระดับสัญญาณควบคุมในแต่ละระดับการดำเนินการ ณ อุณหภูมิเป้าหมายที่ 150°C เมื่อมีจำนวนของระดับดำเนินการ n เท่ากับ 5 ระดับ

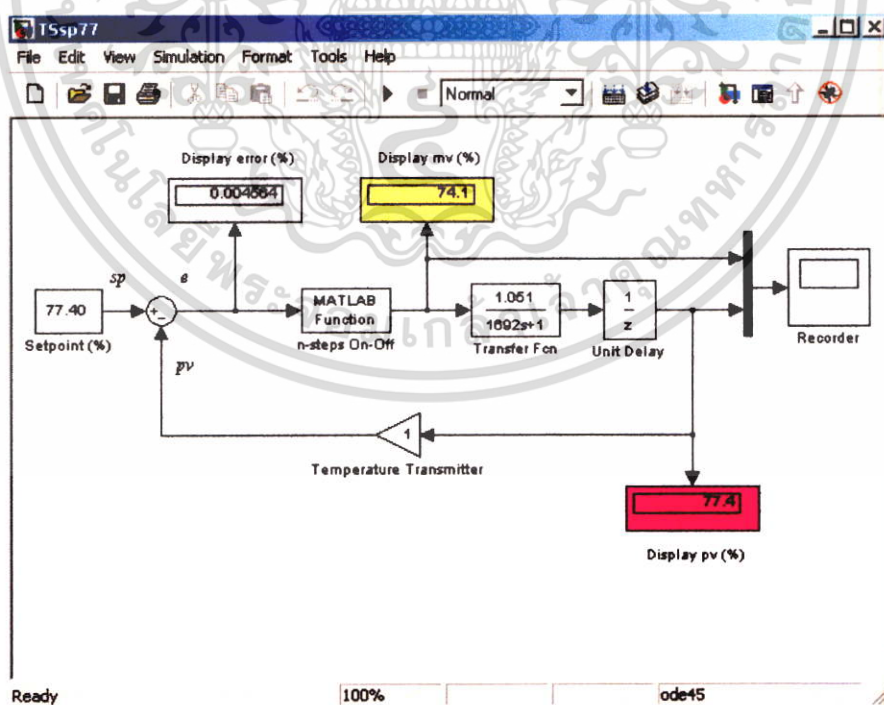
จากแผนภูมิเส้นของค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงในแต่ละระดับการดำเนินการในรูปที่ 5.14 และระดับสัญญาณควบคุมในแต่ละระดับการดำเนินการที่ออกแบบในรูปที่ 5.15 สามารถเขียนฟังก์ชันคำสั่งเงื่อนไขการควบคุมแบบสองสภาวะหลายระดับ ณ อุณหภูมิเป้าหมายที่ 150°C หรือ 77.4% ได้ดังรูปที่ 5.16 โดยใช้ Block ฟังก์ชันของ MATLAB (MATLAB Fcn) เพื่อเป็นการเรียกฟังก์ชัน MATLAB ของเงื่อนไขการควบคุมที่อุณหภูมิเป้าหมาย 77.4% มาใช้งานโดยการกำหนดชื่อฟังก์ชันใน Simulink ในการควบคุมระบบจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งในรูปที่ 5.17 แสดงโปรแกรมจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์โดยการใช้ Simulink ที่อุณหภูมิเป้าหมาย 77.4% โดยสามารถแสดงผลตอบสนองของระบบผ่านทาง Block แสดงผล Scope (Recorder) และในรูปที่ 5.18 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการจากการจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์ ณ อุณหภูมิเป้าหมาย 77.4% หรือ 150°C โดยทำการบันทึกผลตอบสนองของสัญญาณควบคุม mv และผลตอบสนองของ pv ซึ่งแกนตั้งระบุค่าจาก 0% ถึง 100% และแกนนอนระบุค่าเวลาเป็นวินาที (sec.)

```

C:\MATLAB\work\FindMV3.m
File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help
Stack: None
1 function mv = FindMV3(e)
2 if abs(e) <= 0.19
3     if e <= 0
4         mv = 70.5;
5     else
6         mv = 74.1;
7     end
8 else
9     if abs(e) <= 0.38
10        if e <= 0
11            mv = 0;
12        else
13            mv = 77.7;
14        end
15    else
16        if abs(e) <= 0.57
17            if e <= 0
18                mv = 0;
19            else
20                mv = 81.3;
21            end
22        else
23            if abs(e) <= 0.75
24                if e <= 0
25                    mv = 0;
26                else
27                    mv = 84.9;
28                end
29            else
30                if e <= 0
31                    mv = 0;
32                else
33                    mv = 100;
34                end
35            end
36        end
37    end
38 end
FindMV2.m FindMV3.m

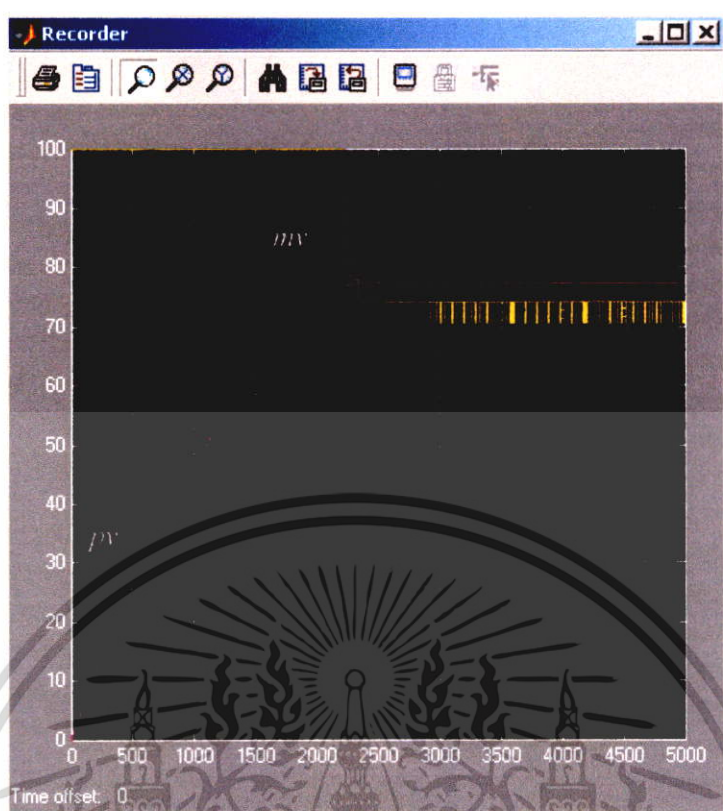
```

รูปที่ 5.16 แสดงโปรแกรมคำสั่งของ Block เทคนิคการควบคุมที่นำเสนอ ณ อุณหภูมิเป้าหมาย 77.4% หรือที่อุณหภูมิ 150 °C



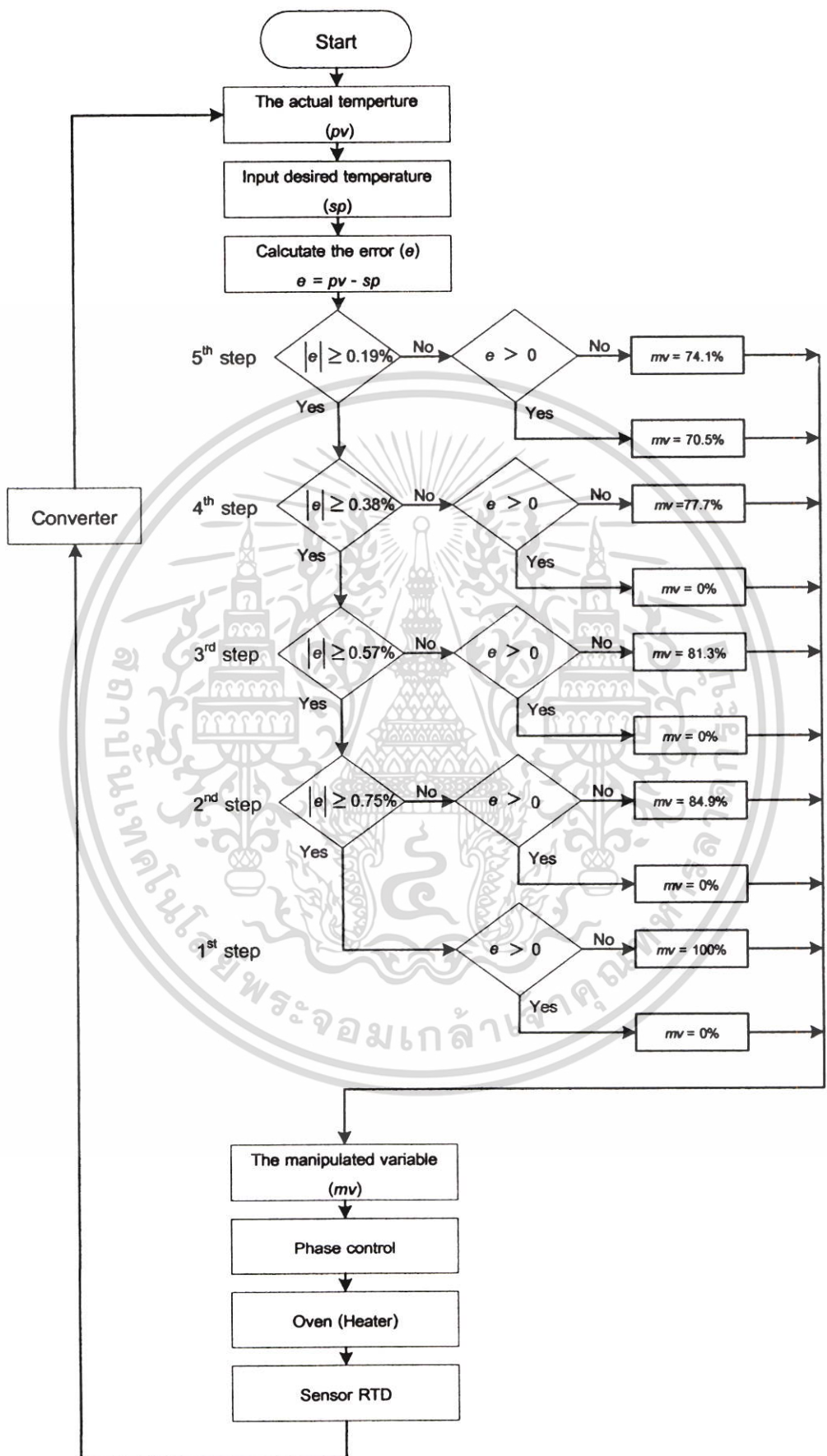
รูปที่ 5.17 แสดงโปรแกรมจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์โดยการใช้ Simulink ที่อุณหภูมิเป้าหมาย 77.4% หรือที่อุณหภูมิ 150 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.18 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการจากการจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์ ณ อุณหภูมิเป้าหมาย 77.4% หรือที่อุณหภูมิ 150 °C

จากผลตอบสนองของกระบวนการจากการจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์ ณ อุณหภูมิเป้าหมาย 77.4% หรือ 150 °C ในรูปที่ 5.18 จะเห็นว่าระดับสัญญาณควบคุมจะแกว่งอยู่ ณ ระดับของสัญญาณควบคุมในระดับการควบคุมสุดท้ายตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่คลาดเคลื่อนจากเป้าหมายเพียงเล็กน้อยอยู่ตลอดเวลา ซึ่งจากการออกแบบเทคนิคการควบคุมแบบสองสถานะหลายระดับ ณ อุณหภูมิเป้าหมายที่ 150 °C หรือ 77.4% นำไปประยุกต์ใช้กับตัวควบคุมที่สามารถแสดงค่าและโปรแกรมได้ (SLPC) โดยมีแผนผังของหลักการควบคุมอุณหภูมิที่เป้าหมาย 77.4% หรือที่ 150 °C ดังแสดงในรูปที่ 5.19 เพื่อทำการทดลองกับกระบวนการจำลองการควบคุมอุณหภูมิในหัวข้อ 5.4 ต่อไป



รูปที่ 5.19 แสดงแผนผังการทดลองของหลักการควบคุมอุณหภูมิเป้าหมาย 150 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณกุญแจ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

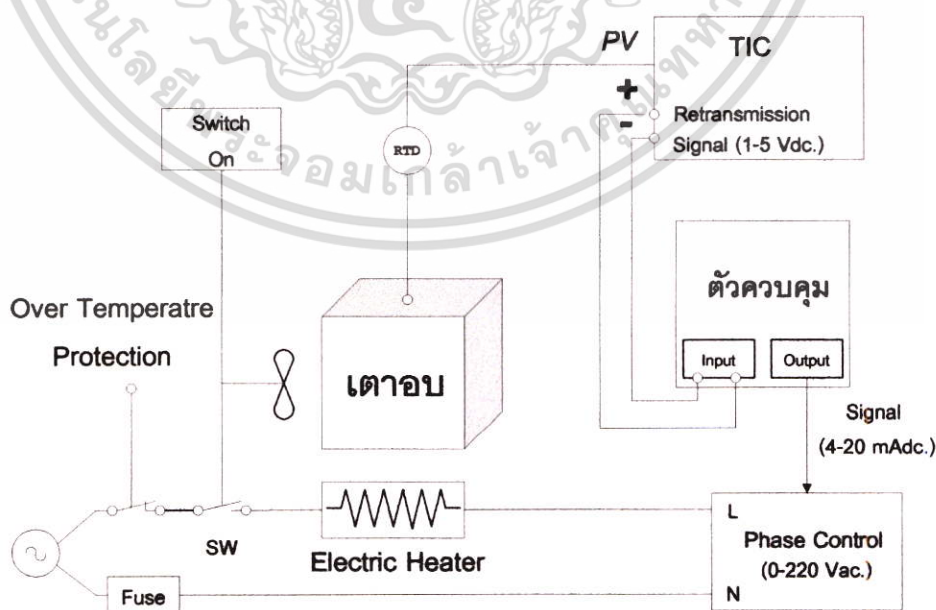
5.3 การทดลองเทคนิคการควบคุมกับกระบวนการจำลองการควบคุมอุณหภูมิ

การทดลองในครั้งนี้เป็นการนำเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิที่ออกแบบไปประยุกต์ใช้กับตัวควบคุมที่สามารถแสดงค่าและโปรแกรมได้ (SLPC) ดังแสดงในรูปที่ 5.20



รูปที่ 5.20 แสดงการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมที่สามารถแสดงค่าและโปรแกรมได้ (SLPC) กับเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิที่ออกแบบกับกระบวนการควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ทดลอง

จากรูปที่ 5.20 เขียนโครงสร้างการทดลองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิให้เห็นชัดเจนได้ดังรูปที่ 5.21



รูปที่ 5.21 แสดงโครงสร้างการทดลองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับว่าตีพิมพ์เผยแพร่ในเชิงพาณิชย์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

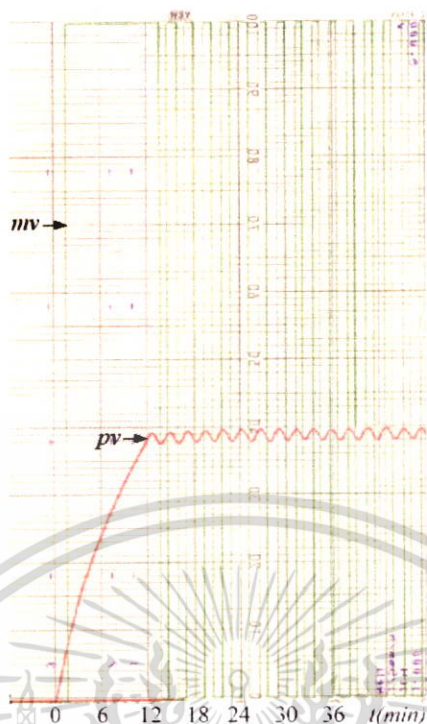
การทำงานของระบบในการทดลอง เมื่อคอสวิตช์ ON พัดลมจะทำงานเพื่อกระจายความร้อนภายในตู้อบ พร้อมทั้งต่อให้ขดลวดความร้อน (Electric Heater) ทำงานครบวงจร โดยขดลวดความร้อนจะรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 0-220 Vac. เพื่อกำเนิดความร้อนจากชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้า (Phase Control) ซึ่งจะทำงานเมื่อได้รับอินพุตที่เป็นกระแสไฟฟ้า 4-20 mA_{dc}. ส่วนอุณหภูมิในตู้อบจะถูกตรวจวัดโดยอาร์ทีดี (Resistance Temperature Detector; RTD) และส่งออกไปแสดงผลในรูปของแรงดันไฟฟ้า 1-5 V_{dc}. ผ่านตัวควบคุม ซึ่งระดับอุณหภูมิภายในตู้อบจะถูกป้องกันไม่ให้สูงเกินกว่าระดับอุณหภูมิสูงสุดที่ตั้งไว้โดยตัวป้องกันอุณหภูมิเกิน (Over Temperature Protection) โดยเริ่มแรกถ้าตัวควบคุมที่ออกแบบยังไม่ถูกสั่งให้ทำงาน ขดลวดก็ยังไม่เกิดความร้อนขึ้น เนื่องจากไม่มีสัญญาณอินพุตป้อนให้กับชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นระดับแรงดันไฟฟ้าที่เอาท์พุทของชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้าจะเป็นศูนย์ และเมื่อตัวควบคุมที่ออกแบบถูกสั่งให้ทำงานจากการได้รับสัญญาณอินพุต p_v ที่วัดจากตัวตรวจจับสนุติผ่านตัวแปลงสัญญาณ (Converter) ซึ่งผลิตสัญญาณอินพุต (แรงดันไฟฟ้า 1-5 V_{dc}) ที่มีสัดส่วนตามอุณหภูมิของเตาอบ โดยตัวควบคุมจะทำการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนหรือเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่วัดได้กับอุณหภูมิที่ต้องการ (Percent Error) เพื่อกำหนดหาระดับในการ On-Off ในระดับที่ตรงตามเงื่อนไขของค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงทางอุณหภูมิเป้าหมายที่กำหนด จากนั้นตัวควบคุมจะผลิตสัญญาณเอาท์พุท (Output Signal) หรือสัญญาณควบคุม m_v (4-20 mA_{dc}) ตามระดับการ On-Off ที่ได้ทำการเลือกในระดับนั้นๆ (ซึ่งตัวควบคุมที่ออกแบบนี้ เริ่มระดับการ On-Off ในระดับแรก (1st Steps) ไว้ที่ 0% และ 100% หรือ 0 และ 220 Vac. เพื่อเร่งให้ระบบเข้าสู่อุณหภูมิเป้าหมายได้เร็วที่สุด) ซึ่งสัญญาณควบคุมนั้นเชื่อมต่อกับชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้า โดยชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ามีหน้าที่ปรับแรงดันไฟฟ้าในสัดส่วนที่เหมาะสมตามสัญญาณควบคุมจากตัวควบคุม ซึ่งแรงดันไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 220 Vac. ป้อนให้กับขดลวดความร้อนซึ่งอุณหภูมิภายในตู้อบก็จะค่อยๆ เพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันตัวควบคุมจะทำการคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่วัดได้กับอุณหภูมิที่ต้องการนี้อยู่ตลอดเวลา ($error = p_v - s_p$) เพื่อทำการกำหนดหาระดับในการ On-Off ต่อไปจนกระทั่งถึงระดับในการ On-Off ในระดับสุดท้าย (n^{th} Steps) ซึ่งเป็นระดับที่อุณหภูมิเข้าใกล้ค่าเป้าหมายมากที่สุดโดยใช้การกำหนดระดับสัญญาณควบคุมจากการคำนวณตามหลักการพลังงานสมดุล (Energy Balance) ณ อุณหภูมิเป้าหมายจากหลักความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนกับพลังงานไฟฟ้าของการถ่ายเทความร้อน (Thermodynamic) ของกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

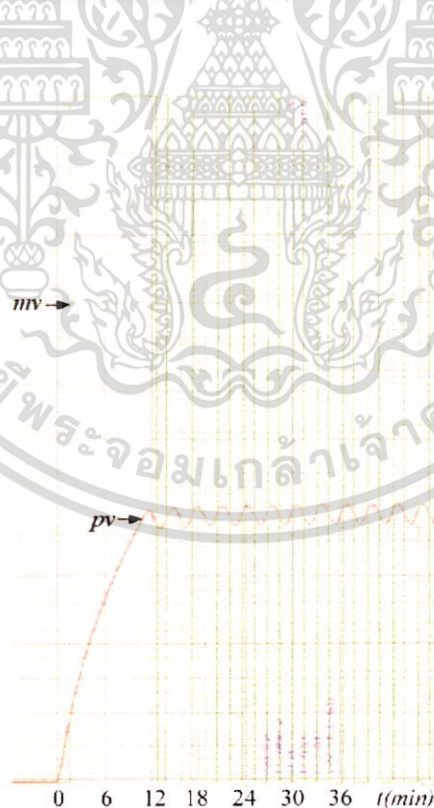
5.4 การทดลองเทคนิคการควบคุมเพื่อเปรียบเทียบกับหลักการควบคุมกระบวนการทางความร้อนที่ใช้ในปัจจุบัน

ผลการทดลองของเทคนิคการควบคุมที่น่าเสนอจากการใช้ชุดทดลองทางความร้อน ภายใต้สภาวะการควบคุมอุณหภูมิเปรียบเทียบกับตัวควบคุมกระบวนการทางความร้อนชนิดอื่นๆ ที่ใช้ในปัจจุบัน โดยตั้งค่าอุณหภูมิเป้าหมายไว้ที่ $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ หรือเป้าหมาย 38.70% ตามข้อมูลในตารางที่ 4.2 โดยตั้งความเร็วในการบันทึกผลตอบสนองทั้งหมดของกระบวนการไว้ที่ 125 mm./h. เพื่อให้สามารถอ่านค่าเวลาได้ช่องละ 6 นาทีตามขนาดของกระดาษที่ใช้บันทึกผล (กว้างช่องละ 12.5 mm.) โดยใช้เส้นหมึกสีแดงแสดงอุณหภูมิของกระบวนการและเส้นหมึกสีเขียวแสดงสัญญาณควบคุม ซึ่งในรูปที่ 5.22 แสดงผลการตอบสนองของระบบเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ On-Off ทั่วไป ในรูปที่ 5.23 แสดงผลการตอบสนองของระบบเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ Proportional ในรูปที่ 5.24 แสดงผลการตอบสนองของระบบเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ PID และจากรูปที่ 5.7 ผลตอบสนองของระบบในการทดลองเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิที่ออกแบบโดยการเขียนโปรแกรมกำหนดให้ตัวควบคุมทำงานตามเงื่อนไขการควบคุมอุณหภูมิแบบสองสภาวะหลายระดับ แสดงในรูปที่ 5.25 ตามลำดับ

ในการทดลองผลการตอบสนองของระบบเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ On-Off ทั่วไปนั้น ทางผู้วิจัยได้กำหนดให้ตัวควบคุมมีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยการเขียนโปรแกรมให้ตัวควบคุมเป็นแบบ On-Off ทั่วไปที่มีค่าคลาดเคลื่อนจากอุณหภูมิเป้าหมายน้อยที่สุดเท่าที่ตัวควบคุมจะทำได้ ซึ่งค่าคลาดเคลื่อนสามารถเขียนโปรแกรมตั้งได้น้อยสุดถึง 0.2% ซึ่งผลการตอบสนองของระบบที่ได้แสดงในรูปที่ 5.22 ส่วนในการทดลองผลการตอบสนองของระบบเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ PID นั้นผู้วิจัยได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PID ให้เป็นไปตามเงื่อนไขวิธี "Process Reactive Curve" ของ Ziegler-Nichols [15] ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในวงการอุตสาหกรรม และได้ทำการปรับละเอียด (Fine Tuning) [17] อีกครั้งหนึ่งด้วยวิธีการลองผิดลองถูก (Trial and Error Method) ซึ่งผลการตอบสนองของระบบที่ได้ แสดงในรูปที่ 5.24

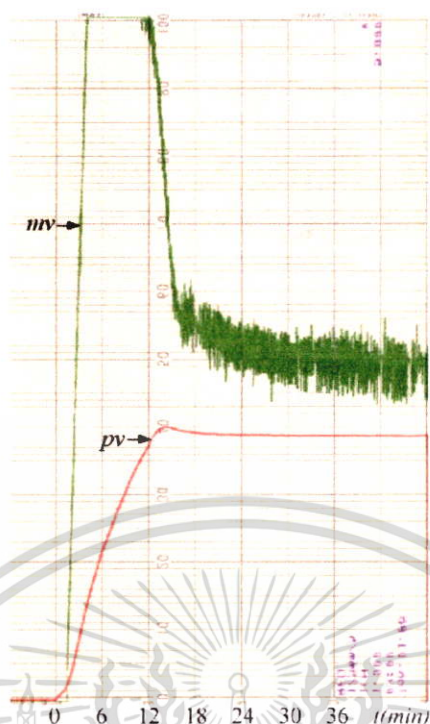


รูปที่ 5.22 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่เป้าหมาย 38.70% หรือที่อุณหภูมิ 90 °C ที่ความเร็วในการบันทึก 125 mm./h. เมื่อใช้การควบคุมแบบ On-Off

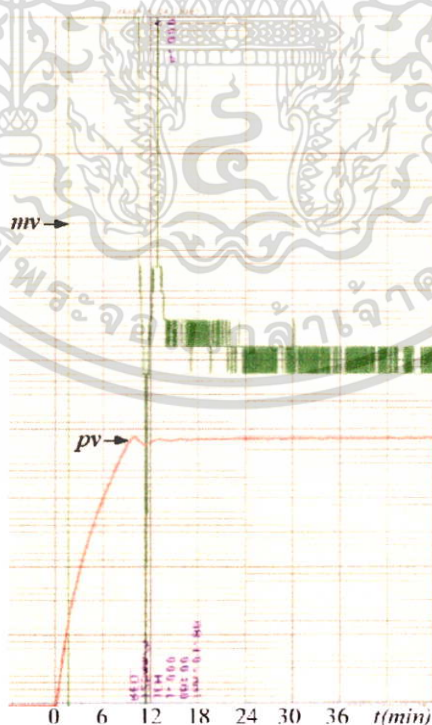


รูปที่ 5.23 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่เป้าหมาย 38.70% หรือ 90 °C ที่ความเร็วในการบันทึก 125 mm./h. เมื่อใช้การควบคุมแบบ Proportional ด้วยค่าพารามิเตอร์ $K_p = 10$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.24 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่เป้าหมาย 38.70% หรือ 90 °C ที่ความเร็วในการบันทึก 125 mm./h. เมื่อใช้การควบคุมแบบ PID ตามวิธีของ Ziegler-Nichols ด้วยค่าพารามิเตอร์ $K_c = 10$, $T_i = 120$ sec. และ $T_d = 5$ sec.



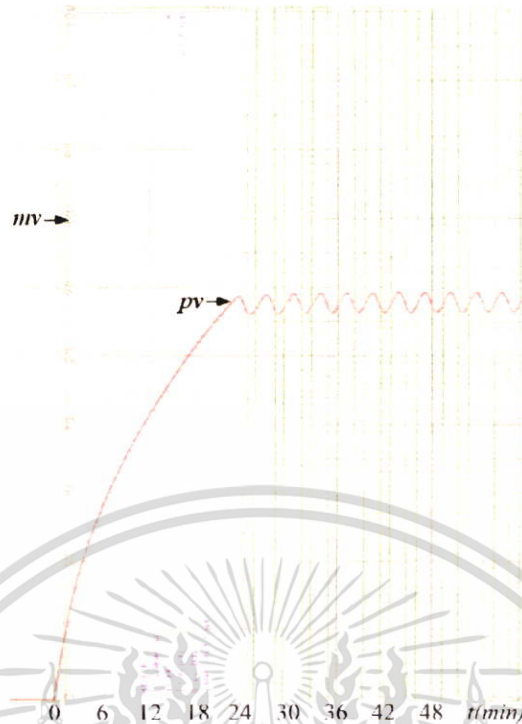
รูปที่ 5.25 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่เป้าหมาย 38.70% หรือ 90 °C ที่ความเร็วในการบันทึก 125 mm./h. เมื่อใช้เทคนิคการควบคุมที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

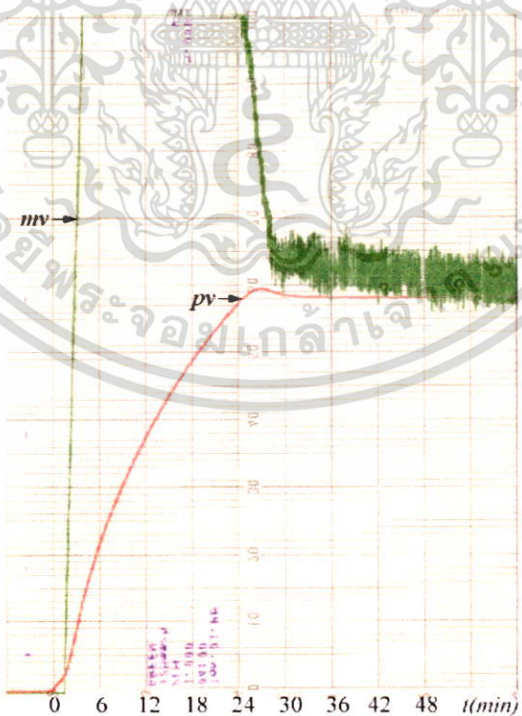
ผลการทดลองของเทคนิคการควบคุมที่นำเสนอจากการใช้ชุดทดลองทางความร้อน ภายใต้สภาวะการควบคุมอุณหภูมิเปรียบเทียบกับตัวควบคุมกระบวนการทางความร้อนชนิดอื่นๆ ที่ใช้ในปัจจุบัน โดยตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการไว้ที่ 120°C หรือเป้าหมาย 58.05% ตามข้อมูลในตารางที่ 4.2 และตั้งความเร็วในการบันทึกไว้ที่ 125 mm./h. โดยใช้เส้นหมึกสีแดงแสดงอุณหภูมิของกระบวนการและเส้นหมึกสีเขียวแสดงสัญญาณควบคุม ซึ่งในรูปที่ 5.26 แสดงผลการตอบสนองของระบบเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ On-Off ทั่วไป ในรูปที่ 5.27 แสดงผลการตอบสนองของระบบเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ Proportional ในรูปที่ 5.28 แสดงผลการตอบสนองของระบบเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ PID และจากรูปที่ 5.13 ผลตอบสนองของระบบในการทดลองเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิที่ออกแบบโดยการเขียนโปรแกรมกำหนดให้ตัวควบคุมทำงานตามเงื่อนไขการควบคุมอุณหภูมิแบบสองสภาวะหลายระดับ แสดงในรูปที่ 5.29 ตามลำดับ



รูปที่ 5.26 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่เป้าหมาย 58.05% หรือที่ 120°C ที่ความเร็วในการบันทึก 125 mm./h. เมื่อใช้การควบคุมแบบ On-Off ทั่วไป

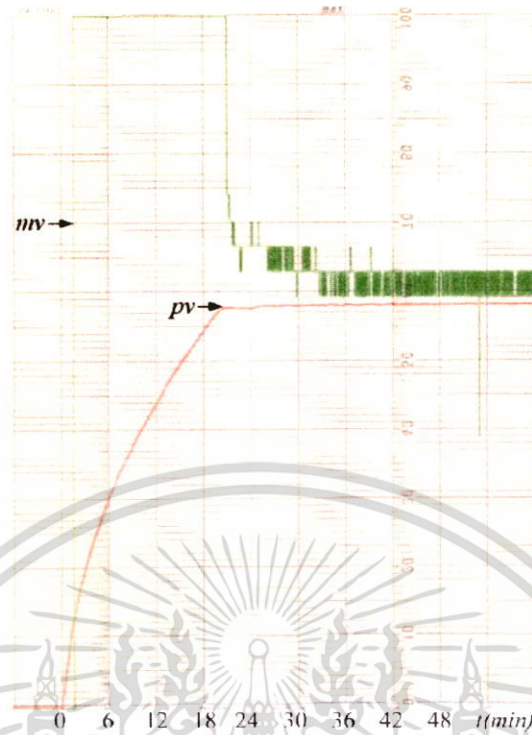


รูปที่ 5.27 แสดงผลตอบสนองของระบบการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่เป้าหมาย 58.05% หรือที่อุณหภูมิ 120°C ที่ความเร็วในการบันทึก 125 mm./h. เมื่อใช้การควบคุมแบบ Proportional ด้วยค่าพารามิเตอร์ $K_p = 10$



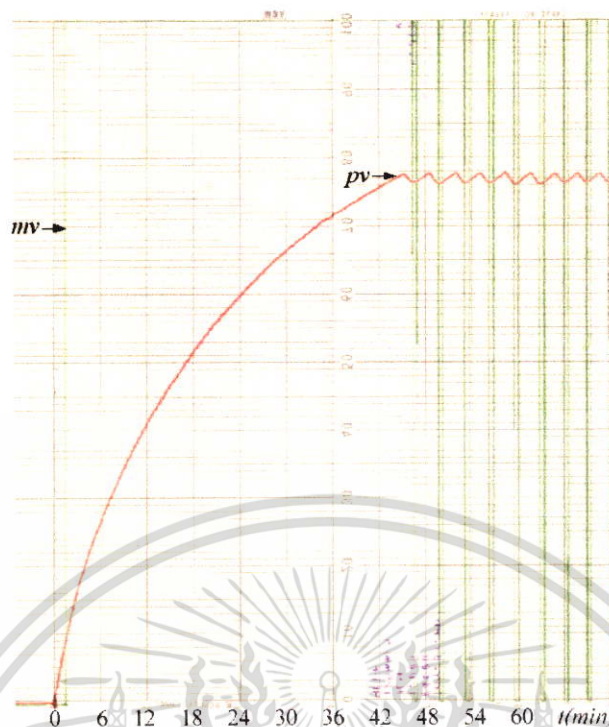
รูปที่ 5.28 แสดงผลตอบสนองของระบบการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่เป้าหมาย 58.05% หรือที่ 120°C ที่ความเร็วในการบันทึก 125 mm./h. เมื่อใช้การควบคุมแบบ PID ตามวิธีของ Ziegler-Nichols ด้วยค่าพารามิเตอร์ $K_p = 10$, $T_i = 120$ sec. และ $T_d = 5$ sec.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ภายใต้เงื่อนไขการใช้งาน เมื่อผู้ดูแลระบบเห็นแบบฉบับหรือข้อผิดพลาดในการคำนวณหรือการพิมพ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

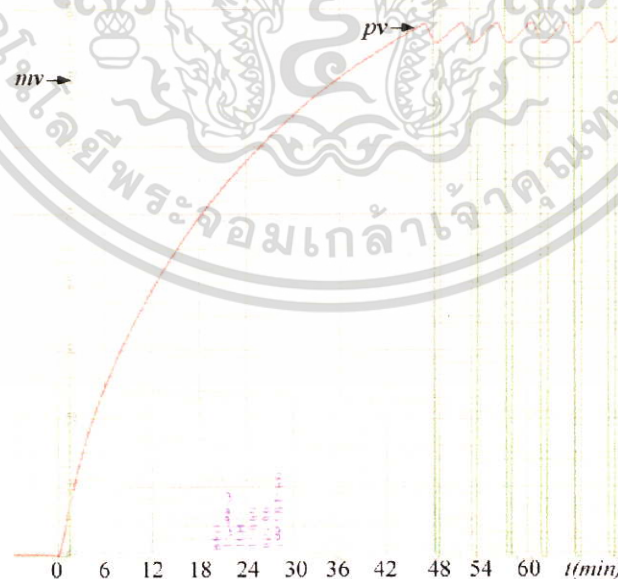


รูปที่ 5.29 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่เป้าหมาย 58.05% หรือที่ 120°C ที่ความเร็วในการบันทึก 125 mm./h. เมื่อใช้เทคนิคการควบคุมที่ออกแบบ

ผลการทดลองของเทคนิคการควบคุมที่นำเสนอจากการใช้ชุดทดลองทางความร้อนภายใต้สภาวะการควบคุมอุณหภูมิเปรียบเทียบกับตัวควบคุมกระบวนการทางความร้อนชนิดอื่นๆ ที่ใช้ในปัจจุบัน โดยตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการไว้ที่ 150°C หรือเป้าหมาย 77.40% ตามข้อมูลในตารางที่ 4.2 และตั้งความเร็วในการบันทึกไว้ที่ 125 mm./h. โดยใช้เส้นหมึกสีแดงแสดงอุณหภูมิของกระบวนการและเส้นหมึกสีเขียวแสดงสัญญาณควบคุม ซึ่งในรูปที่ 5.30 แสดงผลการตอบสนองของระบบเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ On-Off ทั่วไป ในรูปที่ 5.31 แสดงผลการตอบสนองของระบบเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ Proportional ในรูปที่ 5.32 แสดงผลการตอบสนองของระบบเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ PID และจากรูปที่ 5.19 ผลตอบสนองของระบบในการทดลองเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิที่ออกแบบโดยการเขียนโปรแกรมกำหนดให้ตัวควบคุมทำงานตามเงื่อนไขการควบคุมอุณหภูมิแบบสองสภาวะหลายระดับ แสดงในรูปที่ 5.33

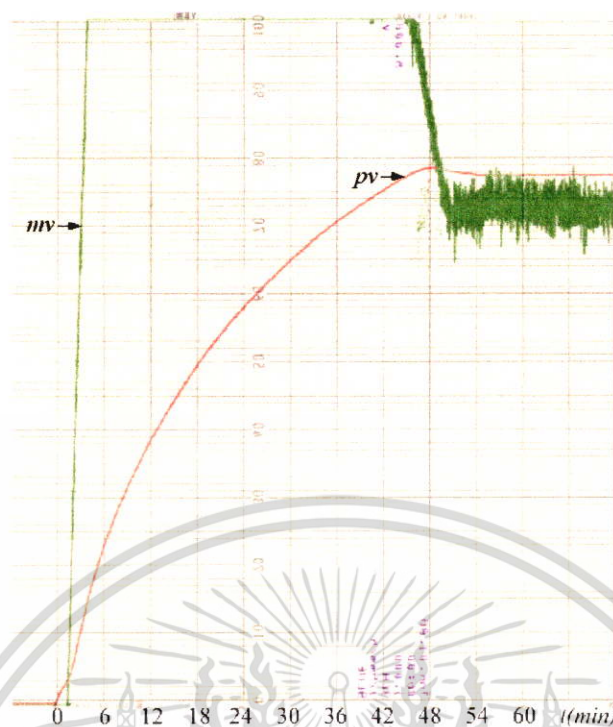


รูปที่ 5.30 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่เป้าหมาย 77.40% หรือที่ 150 °C ที่ความเร็วในการบันทึก 125 mm./h. เมื่อใช้การควบคุมแบบ On-Off ทั่วไป

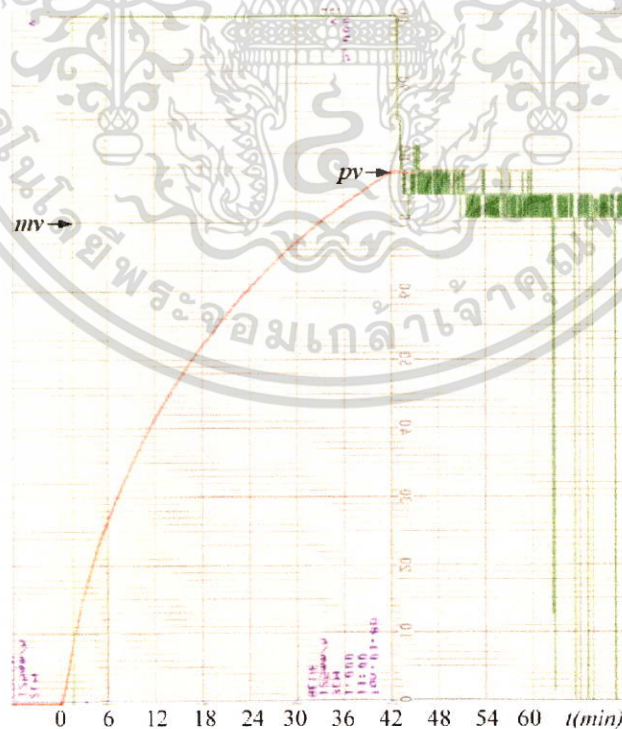


รูปที่ 5.31 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่เป้าหมาย 77.40% หรือที่ 150 °C ที่ความเร็วในการบันทึก 125 mm./h. เมื่อใช้การควบคุมแบบ Proportional ด้วยค่าพารามิเตอร์ $K_p = 10$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.32 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่เป้าหมาย 77.40% หรือที่ 150 °C ที่ความเร็วในการบันทึก 125 mm./h. เมื่อใช้การควบคุมแบบ PID ตามวิธี Ziegler-Nichols ด้วยค่าพารามิเตอร์ $K_c = 10$, $T_i = 120$ sec. และ $T_d = 5$ sec.



รูปที่ 5.33 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่เป้าหมาย 77.40% หรือที่ 150 °C ที่ความเร็วในการบันทึก 125 mm./h. เมื่อใช้เทคนิคการควบคุมที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5 การทดลองนำเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิที่ออกแบบไปใช้ทดลองเสมือน การใช้งานจริงโดยการอบอาหาร

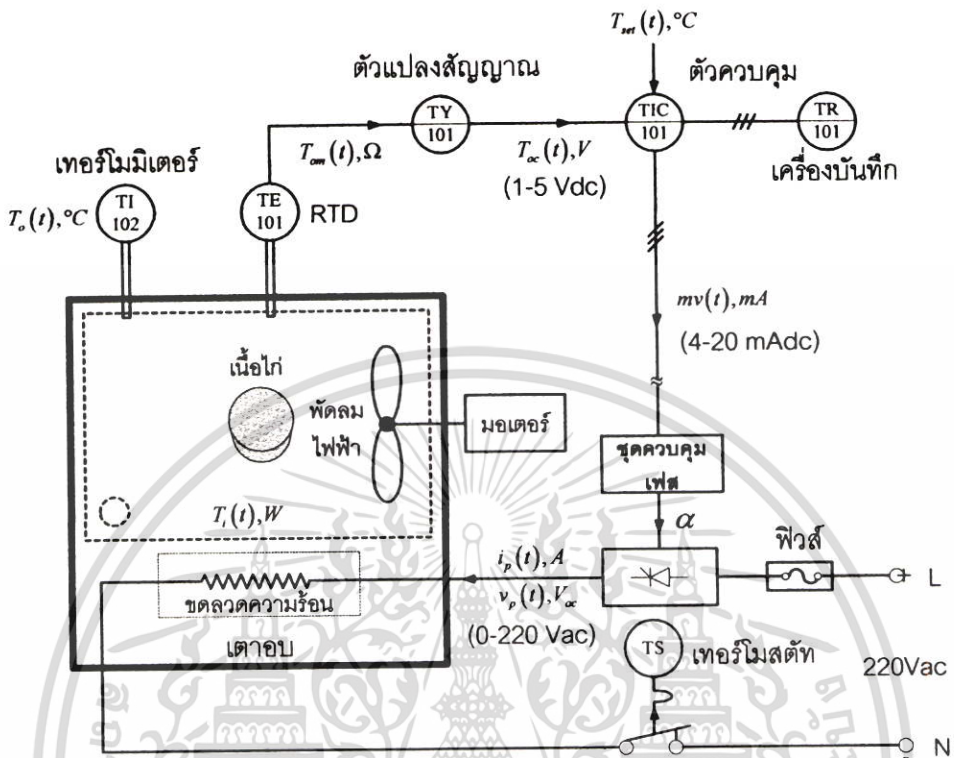
การทดลองนี้เป็นการประยุกต์ใช้เทคนิคการควบคุมอุณหภูมิที่ออกแบบกับตัวควบคุมที่สามารถแสดงค่าและโปรแกรมได้ (SLPC) ไปใช้ทดลองเสมือนการใช้งานจริงโดยการอบอาหาร เพื่อทำการเปรียบเทียบให้เห็นความแตกต่างของเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิที่ออกแบบกับตัวควบคุมชนิด PID โดยในการทดลองใช้เนื้อไก่รูปทรงกระบอกที่มีพื้นที่ 0.013 ตารางเมตร จำนวนหนึ่งชิ้นต่อหนึ่งการทดลอง โดยใส่ในกระบวนการจำลองการควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการออกแบบตรงตำแหน่งตรงกลางเพื่อให้เนื้อไก่ได้รับความร้อนเฉลี่ยที่เท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 5.34 โดยควบคุมตัวแปรต่างๆ ในการทดลองไว้เช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อที่ 5.4 ซึ่งในการทดลองจะทำการอบโดยการใส่อาหารในขณะที่เตาอบมีอุณหภูมิเริ่มแรกและการทดลองอบโดยการใส่อาหารในขณะที่เตาอบมีอุณหภูมิสูงถึง 150 °C ตามลำดับ เพื่อให้เห็นประสิทธิภาพ และระยะเวลาที่ใช้ของตัวควบคุมทั้งสองในการควบคุมอุณหภูมิให้เข้าสู่เป้าหมาย



รูปที่ 5.34 แสดงการทดลองอบอาหารโดยใช้เนื้อไก่รูปทรงกระบอกพื้นที่ 0.013 ตารางเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.34 มีหลักการควบคุมอุณหภูมิแบบป้อนกลับ ดังแสดงในรูปที่ 5.35



รูปที่ 5.35 แสดงการควบคุมอุณหภูมิแบบป้อนกลับในสภาวะการทดลองอบอาหาร

เมื่อศึกษาถึงเตาอบในรูปที่ 5.35 การถ่ายเทความร้อนรวมของเตาอบส่วนใหญ่เป็นไปตามลักษณะของการพาความร้อน โดยมีอัตราการถ่ายเทความร้อนเป็นดังสมการที่ (5.2)

$$\dot{Q}_{Total} = \dot{Q}_{Heater} + \dot{Q}_{Chicken} \tag{5.2}$$

จากสมการการถ่ายเทความร้อน สมการที่ (4.1) สามารถเขียนสมการที่ (5.2) ได้เป็น

$$\dot{Q}_{Total} = [h_{Stainless} \times A_{Stainless} (T_w - T_b)] + [h_{Air} \times A_{Chicken} (T_w - T_b)] \tag{5.3}$$

เมื่อ \dot{Q}_{Total} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนรวม มีหน่วยเป็น W

h คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน มีหน่วยเป็น $W/m^2 \cdot K$ หรือ $W/m^2 \cdot ^\circ C$

A คือ พื้นที่ผิวของสื่อกลาง มีหน่วยเป็น m^2

T คือ อุณหภูมิของพื้นผิววัตถุ มีหน่วยเป็น K หรือ $^\circ C$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T_b คือ อุณหภูมิของก๊าซล้อมรอบ (อากาศ) มีหน่วยเป็น K หรือ °C

ผนังด้านในของเตาอบที่ใช้ทดลองเป็นเหล็กปลอดสนิม (Stainless Steel) ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน h ประมาณ $3.7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ พื้นที่ผิวของสี่กกลาง A มีขนาด 3.7 m^2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยบังคับของอากาศ h ประมาณ $25 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ พื้นที่ผิวของสี่กกลางของเนื้อไก่ A มีขนาด 0.013 m^2 อุณหภูมิของก๊าซล้อมรอบหรืออุณหภูมิสิ่งแวดล้อมประมาณ $27 \text{ }^\circ\text{C}$ หรือ 300 K เมื่อนำค่าไปแทนในสมการที่ (5.3) สามารถเขียนสมการอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ดังสมการที่ (5.4)

$$\dot{Q}_{Total} = 13.69(T_w - 300) + 0.33(T_w - 300) \quad (5.4)$$

จากสมการที่ (5.4) หาอุณหภูมิของพื้นผิววัตถุในหน่วยของเคลวิน (Kelvin ;K) เท่ากับ

$$T_w = \frac{\dot{Q}_{Total}}{14.02} + 300 \quad (5.5)$$

จากหลักการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าชุดลดความร้อนทำการผลิตความร้อน ดังสมการที่ (4.4) และจากกฎการอนุรักษ์พลังงานในอุดมคติโดยไม่คำนึงถึงความร้อนสูญเสีย ณ สภาวะคงตัว จะได้พลังงานที่ผลิตความร้อนเท่ากับอัตราการถ่ายเทความร้อน ดังสมการที่ (4.5) ดังนั้นสามารถเขียนสมการอุณหภูมิของพื้นผิววัตถุได้ดังสมการที่ (5.6)

$$T_w = \frac{P}{14.02} + 300 = \frac{(i_p^2 R)}{14.02} + 300 \quad (5.6)$$

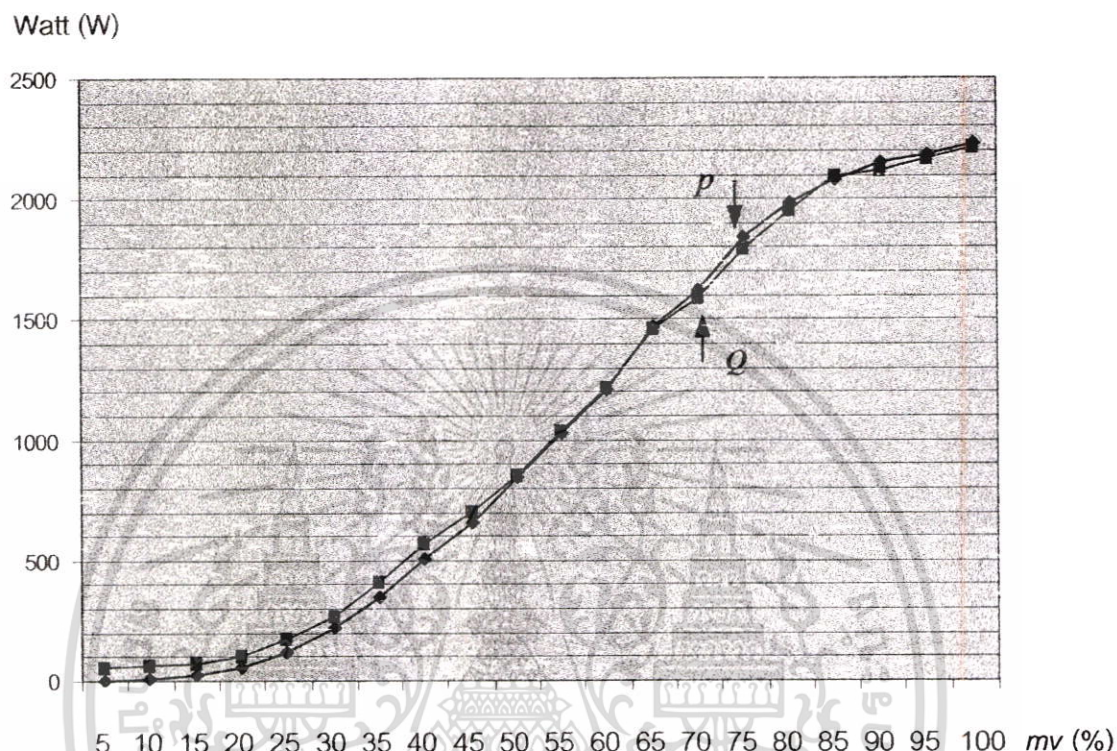
จะเห็นว่าอุณหภูมิของพื้นผิววัตถุหรืออุณหภูมิที่ต้องการ $T_o(t)$ สามารถควบคุมได้โดยกระแสไฟฟ้า $i_p(t)$ ที่สัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้า $v_p(t)$ ซึ่งสามารถปรับได้โดยตรงด้วยการควบคุมเฟส ตารางที่ 5.1 แสดงข้อมูลของกระบวนการทางอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง ข้อมูลในหลักที่ 2 ถึงหลักที่ 5 เป็นค่าที่ได้จากการวัดจากชุดทดลองในรูปที่ 5.20 ในขณะที่ข้อมูลในหลักที่ 6 ถึงหลักที่ 8 ได้จากการคำนวณจากสมการที่ (5.4) ถึงสมการที่ (5.6)

ตารางที่ 5.1 แสดงข้อมูลของกระบวนการทางอุณหภูมิต่อการทดลองอบอาหาร

<i>mv</i>	การวัด แรงดัน [v_p] (%) (0~220Vac.)	การวัด กระแส [i_p] (0~10Amp.)	การวัด อุณหภูมิ [T_{meas}] (30~185.5 °C)	การวัด อุณหภูมิ [T_{meas}] (Kelvin)	คำนวณพลังงาน ผลิตความร้อน [P_{cal}] (Watt)	คำนวณอัตราการ ถ่ายเทความร้อน [\dot{Q}_{cal}] (Watt)	คำนวณ อุณหภูมิ [T_{cal}] (Kelvin)
5	0.18	0.21	30.9	304.0	1.032	56.621	300.074
10	10.40	0.44	31.2	304.3	4.622	60.825	300.330
15	22.53	0.96	32.2	305.3	21.692	74.840	301.548
20	36.77	1.57	34.4	307.5	57.779	105.673	304.123
25	53.56	2.29	39.3	312.4	122.593	174.347	308.747
30	72.18	3.08	46.1	319.2	222.648	269.649	315.886
35	90.70	3.88	56.0	329.1	351.559	408.397	325.085
40	108.65	4.64	67.5	340.6	504.480	569.570	335.996
45	124.03	5.30	77.2	350.3	657.412	705.515	346.908
50	140.80	6.02	88.1	361.2	847.207	858.279	360.450
55	154.85	6.62	101.0	374.1	1024.723	1039.072	373.116
60	168.16	7.19	113.8	386.9	1208.452	1218.464	386.226
65	185.74	7.94	131.5	404.6	1474.331	1466.530	405.197
70	194.72	8.32	140.6	413.7	1620.337	1594.066	415.614
75	207.58	8.87	155.1	428.2	1841.430	1797.284	431.390
80	215.51	9.21	166.5	439.6	1984.810	1957.055	441.620
85	220.73	9.43	176.4	449.5	2082.125	2095.803	448.564
90	224.30	9.59	178.1	451.2	2150.021	2119.629	453.409
95	226.00	9.66	181.5	454.6	2182.735	2167.280	455.743
100	228.31	9.76	185.2	458.3	2227.584	2219.135	458.943

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

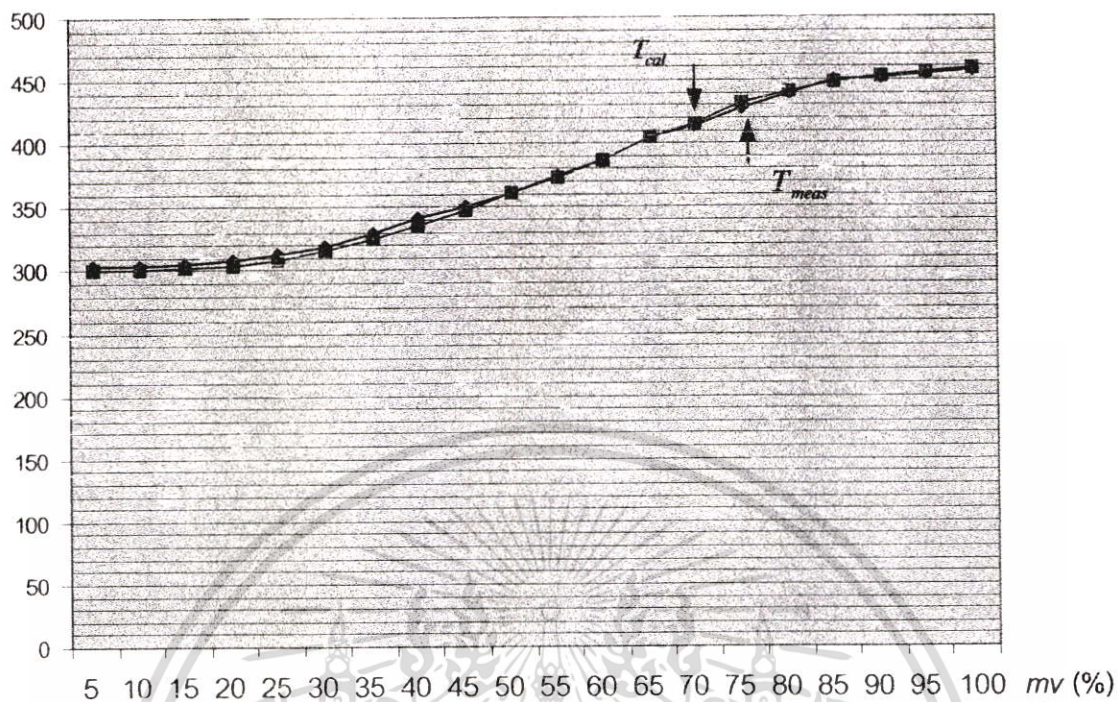
จากข้อมูลในตารางที่ 5.1 นำมาเขียนแผนภูมิเส้นแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าพลังงานผลิตความร้อน P กับอัตราการถ่ายเทความร้อน \dot{Q} ดังแสดงในรูปที่ 5.36 จะเห็นว่าข้อมูลที่ได้ในรูปที่ 5.36 มีค่าใกล้เคียงและไปในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 5.36 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าของ P และ \dot{Q} จากข้อมูลในตารางที่ 5.1

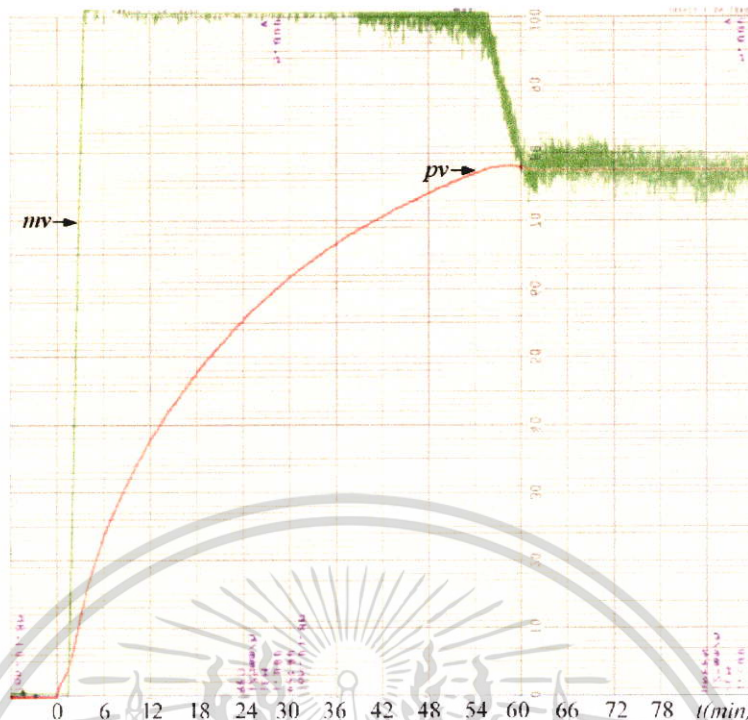
และจากข้อมูลในตารางที่ 5.1 สามารถเขียนแผนภูมิเส้นแสดงการเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิที่ได้จากการวัด T_{meas} กับอุณหภูมิที่ได้จากการคำนวณ T_{cal} ดังแสดงในรูปที่ 5.37 จะเห็นว่าข้อมูลที่ได้ในรูปที่ 5.37 มีค่าใกล้เคียงและไปในทิศทางเดียวกันเช่นกัน ซึ่งจากข้อมูลในตารางที่ 5.1 สามารถออกแบบเทคนิคการควบคุมแบบสองสภาวะหลายระดับได้ตามขั้นตอนเช่นเดียวกับการออกแบบเทคนิคการควบคุมในหัวข้อที่ 4.3.2 ต่อไป

Temperature (K)



รูปที่ 5.37 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าของ T_{meas} และ T_{cal} จากข้อมูลในตารางที่ 5.1

ในการทดลองเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิแบบสองสภาวะหลายระดับจากการใช้ชุดทดลองทางความร้อนภายใต้สภาวะการควบคุมอุณหภูมิโดยการทดลองเสมือนการใช้งานจริงโดยการอบอาหารเปรียบเทียบกับตัวควบคุมกระบวนการทางความร้อนชนิด PID โดยตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการไว้ที่ 150°C หรือเป้าหมาย 77.40% และตั้งความเร็วในการบันทึกไว้ที่ 125 mm./h. โดยใช้เส้นหมึกสีแดงแสดงอุณหภูมิของกระบวนการและเส้นหมึกสีเขียวแสดงสัญญาณควบคุม โดยการทดลองใส่อาหารในขณะที่เตาอบมีอุณหภูมิเริ่มแรกและการทดลองใส่อาหารในขณะที่เตาอบมีอุณหภูมิสูงถึง 150°C ตามลำดับ เพื่อให้เห็นประสิทธิภาพของตัวควบคุมทั้งสองในการควบคุมอุณหภูมิให้เข้าสู่เป้าหมาย ซึ่งในรูปที่ 5.38 แสดงผลการตอบสนองของระบบเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ PID โดยการใส่อาหารในขณะที่เตาอบมีอุณหภูมิเริ่มแรก และในรูปที่ 5.40 แสดงผลการตอบสนองของระบบเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ PID โดยการใส่อาหารในขณะที่เตาอบมีอุณหภูมิ 150°C ตามลำดับ

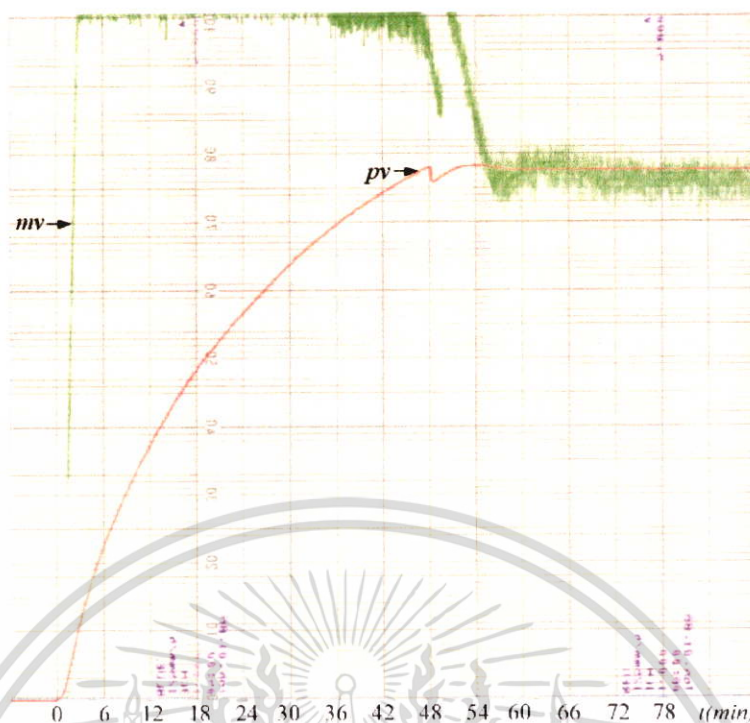


รูปที่ 5.38 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่เป้าหมาย 77.4% หรือที่ 150 °C ที่ความเร็วในการบันทึก 125 mm./h. เมื่อใช้การควบคุมแบบ PID ตามวิธีของ Ziegler-Nichols ด้วยค่าพารามิเตอร์ $K_c = 10$, $T_i = 120$ sec. และ $T_d = 5$ sec. โดยการใส่อาหารในขณะที่เตาอบมีอุณหภูมิเริ่มแรก



รูปที่ 5.39 แสดงผลของการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่เป้าหมาย 77.4% หรือที่ 150 °C เมื่อใช้การควบคุมแบบ PID โดยการใส่อาหารในขณะที่เตาอบมีอุณหภูมิเริ่มแรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



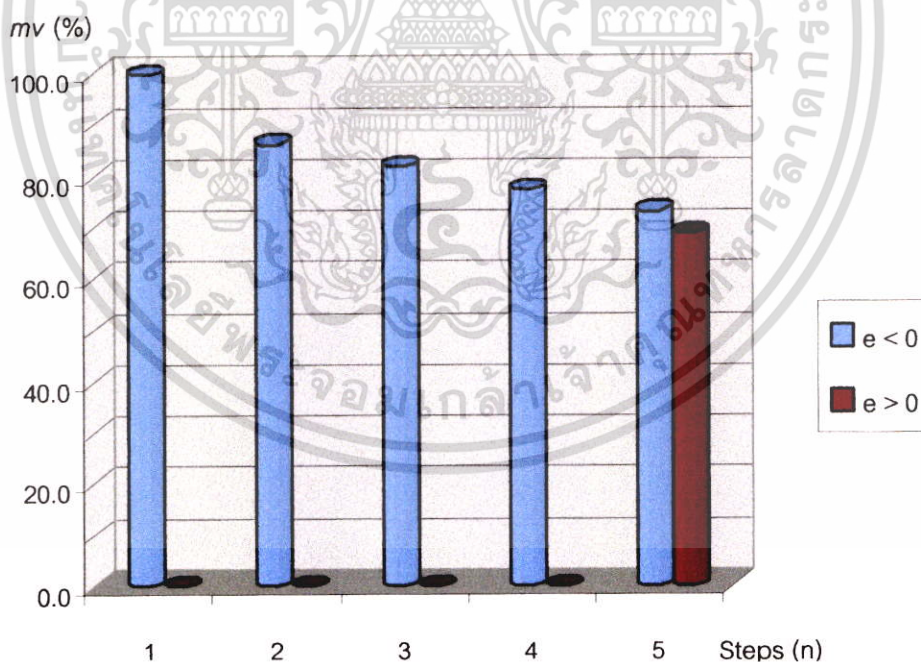
รูปที่ 5.40 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่เป้าหมาย 77.4% หรือที่ 150 °C ที่ความเร็วในการบันทึก 125 mm./h. เมื่อใช้การควบคุมแบบ PID ตามวิธีของ Ziegler-Nichols ด้วยค่าพารามิเตอร์ $K_c=10$, $T_i=120$ sec. และ $T_d=5$ sec. โดยการใส่อาหารในขณะที่เตาอบมีอุณหภูมิ 150 °C



รูปที่ 5.41 แสดงผลของการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่เป้าหมาย 77.4% หรือที่ 150 °C เมื่อใช้การควบคุมแบบ PID โดยการใส่อาหารในขณะที่เตาอบมีอุณหภูมิ 150 °C

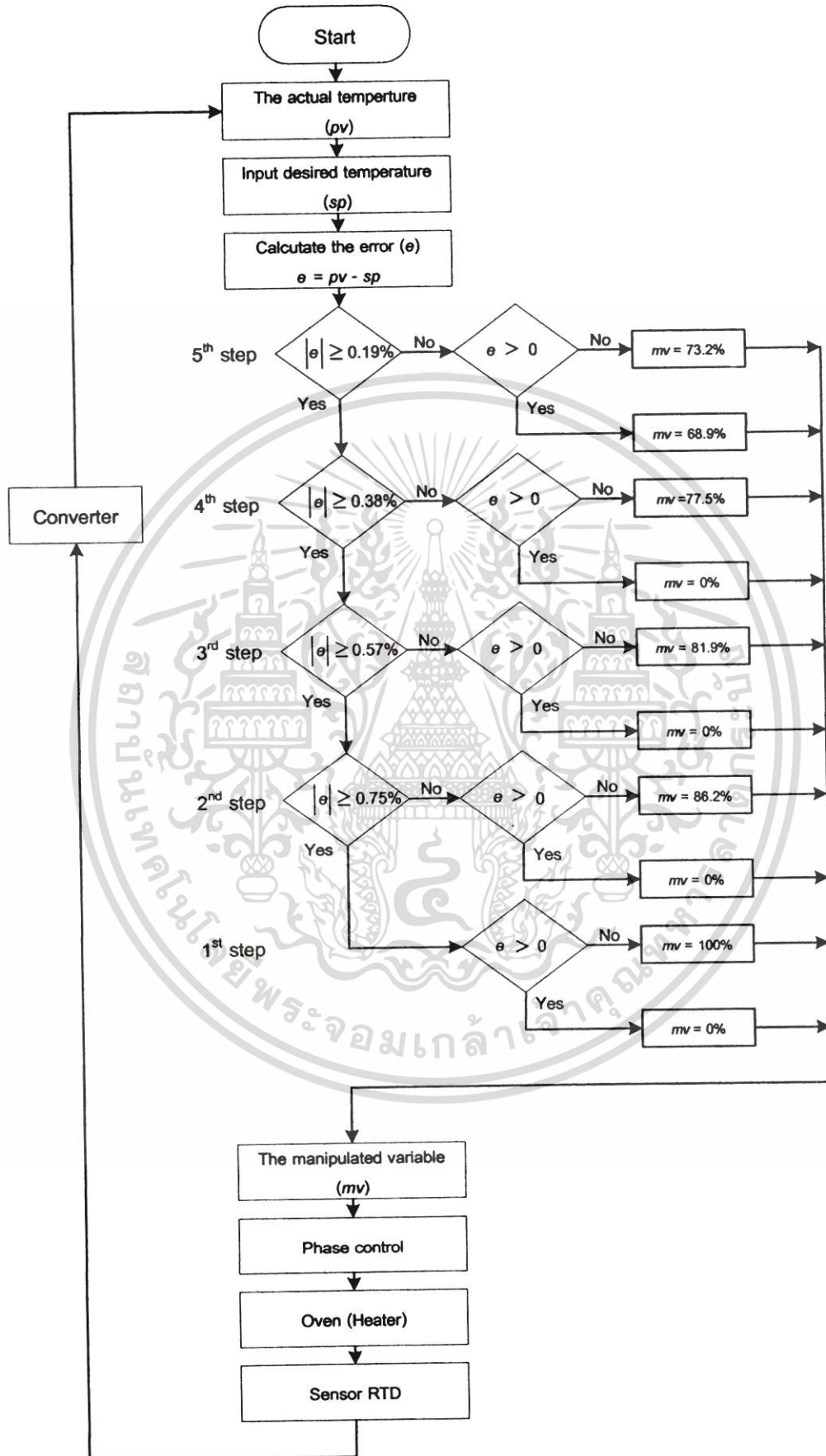
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดลองผลการตอบสนองของระบบเมื่อใช้เทคนิคการควบคุมที่ออกแบบในการทดลองอบอาหารที่เป้าหมาย 77.40% หรือ 150 °C นั้น ทางผู้วิจัยได้ออกแบบระดับในการ On-Off ตามการคำนวณตามหลักการพลังงานสมดุล ณ อุณหภูมิเป้าหมายจากหลักความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนกับพลังงานไฟฟ้าของการถ่ายเทความร้อนของกระบวนการ ซึ่งได้คำนวณเอาไว้ก่อนหน้านี้โดยใช้ข้อมูลในตารางที่ 5.1 ในการออกแบบ และใช้ขั้นตอนในการออกแบบเช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 4.2.3 โดยในเบื้องต้นได้ออกแบบเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิเป็น 5 ระดับ และเนื่องจากระบบที่ทำการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในที่เร็ว ในการทดลองเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิครั้งนี้ได้ออกแบบให้ตัวควบคุมในระดับสุดท้าย (5th Steps) มีระดับสัญญาณควบคุมไบอัส (Bias) เท่ากับ 68.9% เพิ่มเข้ามาตามอัตราค่าการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณควบคุม Δmv_{cal} ณ อุณหภูมิเป้าหมายเมื่อระบบมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมากกว่าศูนย์ ($e > 0$) เพื่อเป็นการป้องกันการแกว่งของอุณหภูมิในระดับการควบคุมสุดท้าย โดยใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงในแต่ละระดับการดำเนินการในรูปที่ 5.14 และมีระดับสัญญาณควบคุมในแต่ละระดับการดำเนินการ ดังแสดงในรูปที่ 5.42 โดยแผนผังการทดลองของหลักการควบคุมอุณหภูมิที่เป้าหมาย 77.40% หรือที่ 150 °C แสดงในรูปที่ 5.43

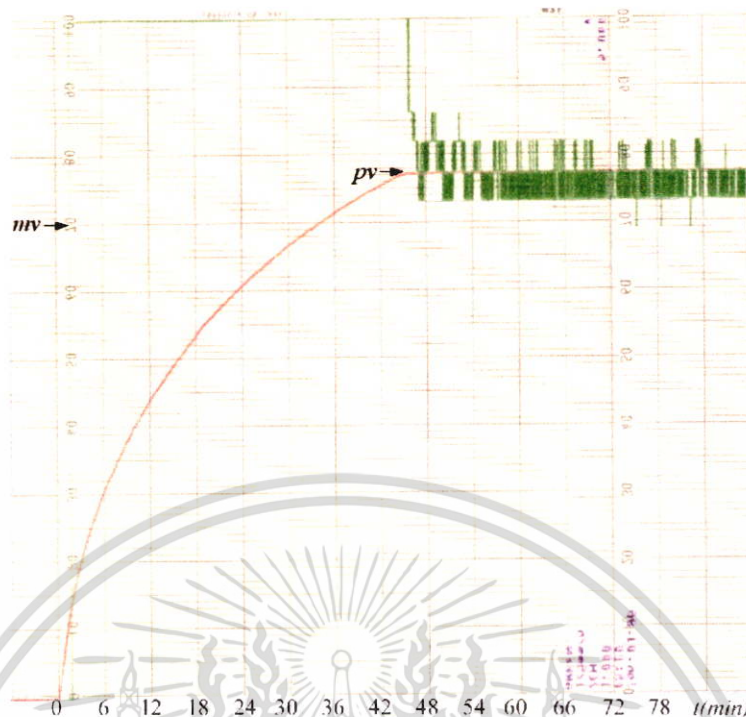


รูปที่ 5.42 แผนภูมิแท่งแสดงระดับสัญญาณควบคุมในการทดลองอบอาหาร ณ อุณหภูมิเป้าหมายที่ 150 °C เมื่อมีจำนวนของระดับดำเนินการ n เท่ากับ 5 ระดับ

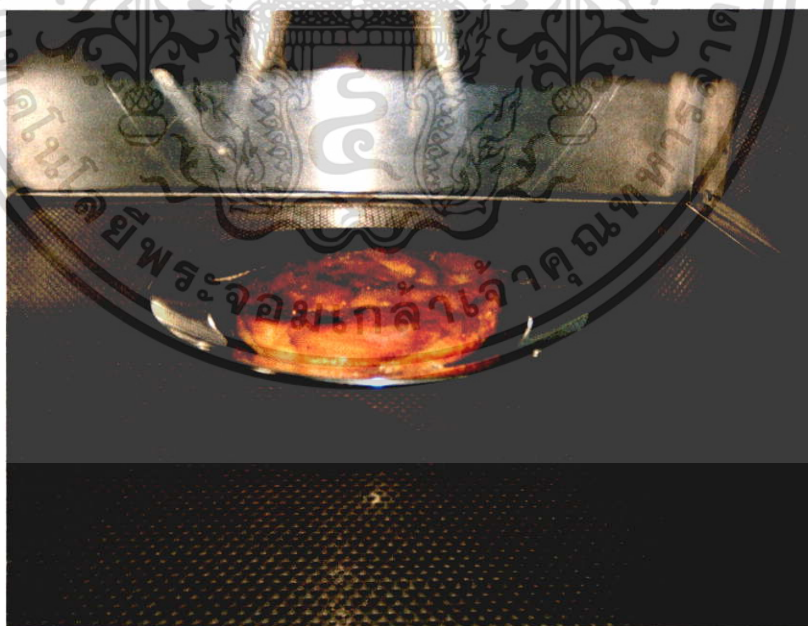
ซึ่งผลการตอบสนองของระบบเมื่อใส่อาหารในขณะที่เตาอบมีอุณหภูมิเริ่มแรกแสดงในรูปที่ 5.44 และในรูปที่ 5.46 แสดงผลการตอบสนองเมื่อใส่อาหารขณะที่เตาอบมีอุณหภูมิ 150 °C เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของนักศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 รูปที่ 5.43 แสดงแผนผังการตัดสินใจของหลักการควบคุมอุณหภูมิที่เป้าหมาย 77.4% หรือ 150 °C
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

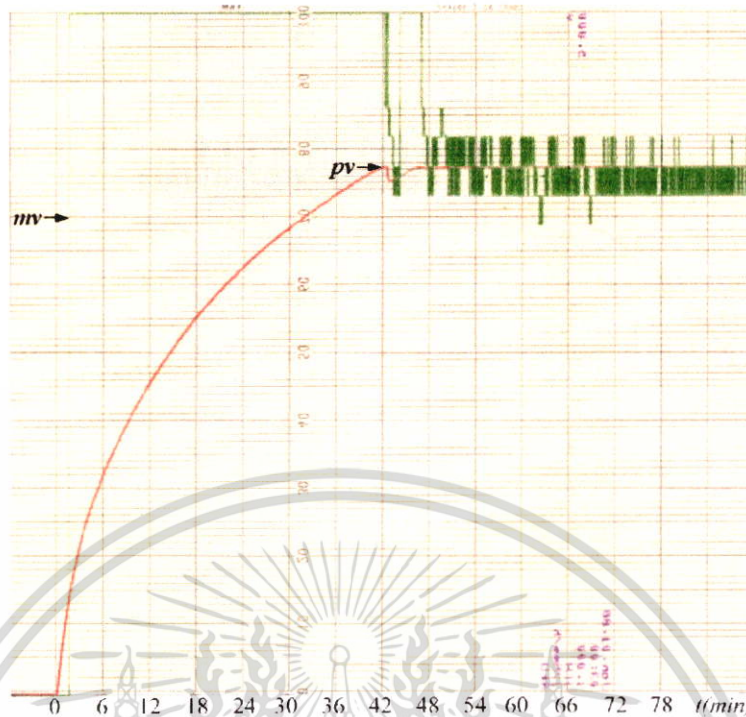


รูปที่ 5.44 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่เป้าหมาย 77.4% หรือที่ 150 °C ที่ความเร็วในการบันทึก 125 mm./h. เมื่อใช้เทคนิคการควบคุมที่ออกแบบโดยการใส่อาหารในขณะที่เตาอบมีอุณหภูมิเริ่มแรก



รูปที่ 5.45 แสดงผลของการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่เป้าหมาย 77.4% หรือ 150 °C เมื่อใช้เทคนิคการควบคุมที่ออกแบบ โดยการใส่อาหารในขณะที่เตาอบมีอุณหภูมิเริ่มแรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.46 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่เป้าหมาย 77.4% หรือที่ 150 °C ที่ความเร็วในการบันทึก 125 mm./h. เมื่อใช้เทคนิคการควบคุมที่ออกแบบโดยการใส่อาหารในขณะที่เตาอบมีอุณหภูมิ 150 °C



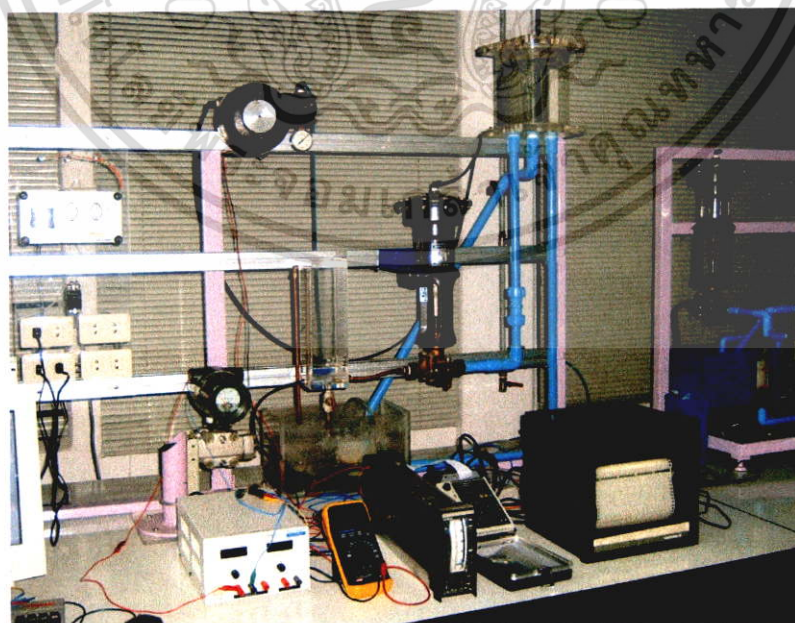
รูปที่ 5.47 แสดงผลของการควบคุมอุณหภูมิในตู้อบที่เป้าหมาย 77.4% หรือ 150 °C เมื่อใช้เทคนิคการควบคุมที่ออกแบบ โดยการใส่อาหารในขณะที่เตาอบมีอุณหภูมิ 150 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองอบอาหารในขณะที่มีอุณหภูมิเริ่มแรก และการทดลองอบอาหารในขณะที่มีอุณหภูมิ 150°C เพื่อให้เห็นถึงประสิทธิภาพของตัวควบคุมทั้งสองในการควบคุมอุณหภูมิของระบบให้เข้าสู่เป้าหมาย จะเห็นว่าผลการตอบสนองของระบบเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ PID จะใช้เวลาในการเข้าสู่อุณหภูมิเป้าหมายที่นานกว่าผลการตอบสนองของระบบเมื่อใช้ตัวควบคุมที่ใช้เทคนิคการควบคุมที่นำเสนอ และคุณภาพของอาหารจากการอบเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ PID โดยการใส่อาหารในขณะที่มีอุณหภูมิเริ่มแรกจะมีลักษณะที่แห้งมากกว่าการทดลองโดยใช้ตัวควบคุมที่ใช้เทคนิคการควบคุมที่นำเสนอ เนื่องจากการอบโดยใช้ตัวควบคุมแบบ PID ใช้เวลาในการเข้าสู่เป้าหมายที่นานกว่า ส่วนการทดลองอบอาหารโดยการใส่อาหารในขณะที่มีอุณหภูมิ 150°C นั้น คุณภาพของอาหารจากการอบเมื่อใช้ตัวควบคุมทั้งสองมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งจากการคำนวณพลังงานจากผลการตอบสนองของระบบจากเครื่องบันทึกด้วยวิธีการหาพื้นที่ใต้กราฟของระดับสัญญาณควบคุมทั้งสองจะได้ค่าพลังงานที่ใกล้เคียงกันเมื่อใช้เวลาเท่ากัน แต่การควบคุมด้วยเทคนิคการควบคุมที่นำเสนอจะใช้เวลาในการเข้าถึงอุณหภูมิเป้าหมายที่น้อยกว่า หรือหมายถึงการอบอาหารได้เสร็จก่อนนั่นเอง

5.6 การออกแบบเทคนิคการควบคุมแบบสองสถานะหลายระดับกับระบบควบคุมระดับของของเหลวและผลการทดลอง

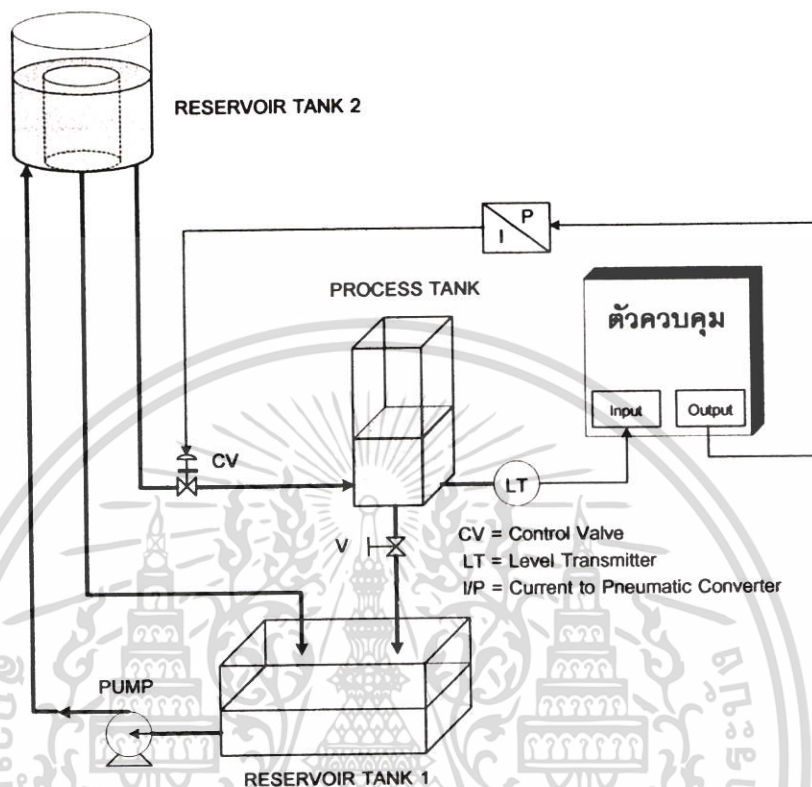
การทดลองนี้เป็นการประยุกต์ใช้เทคนิคการควบคุมที่นำเสนอไปออกแบบใช้กับกระบวนการควบคุมระดับของของเหลว ดังแสดงในรูปที่ 5.48



รูปที่ 5.48 แสดงการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมที่ใช้ในการออกแบบกับกระบวนการควบคุมระดับของของเหลวที่ใช้ทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.48 เขียนโครงสร้างการทดลองกับกระบวนการควบคุมระดับของเหลวให้
เห็นชัดเจนได้ดังรูปที่ 5.49



รูปที่ 5.49 แสดงโครงสร้างการทดลองกับกระบวนการควบคุมระดับของเหลว

การทำงานของ การทดลอง เครื่องสูบน้ำจะทำหน้าที่สูบน้ำจากถังเก็บน้ำ 1 (Reservoir Tank 1) ขึ้นไปตามท่อตลอดระยะเวลาการทดลอง ซึ่งน้ำที่ถูกสูบจะถูกส่งไปยังถังกระบวนการ (Process Tank) ผ่านถังเก็บน้ำ 2 (Reservoir Tank 2) ทำหน้าที่บายพาส (Bypass) เพื่อให้ น้ำไหลย้อนกลับมาที่ถังเก็บน้ำเมื่อวาล์วควบคุมปิด (วาล์วควบคุมชนิดปกติเปิด ; Normal Open) และน้ำที่อยู่ในถังกระบวนการจะไหลผ่านวาล์ว (V) ซึ่งเปิดตลอดเวลากลับไปที่ถังเก็บน้ำ 1 เริ่มแรก วาล์วควบคุมจะปิดสนิทเมื่อตัวควบคุมที่ใช้ในการออกแบบยังไม่จ่ายสัญญาณควบคุม เมื่อตัว ควบคุมทำงาน สัญญาณกระแสไฟฟ้า 4-20 mAdc. จะถูกจ่ายให้กับตัวแปลงสัญญาณกระแสเป็น ความดันลม (Current to Pneumatic Converter) เพื่อสั่งให้วาล์วเปิดตามอัตราส่วนของสัญญาณ กระแสไฟฟ้า น้ำที่ถูกสูบก็สามารถไหลเข้าสู่กระบวนการได้ ซึ่งระดับน้ำในถังกระบวนการจะถูกวัด โดย LT (Level Transmitter) และแปลงเป็นสัญญาณกระแสไฟฟ้า 4-20 mAdc. สัญญาณ กระแสไฟฟ้านี้จะถูกแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้า 1-5 Vdc. โดยใช้ความต้านทาน 250 โอห์ม 1% และ ถูกป้อนเป็นสัญญาณอินพุตให้กับตัวควบคุมที่ใช้ในการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

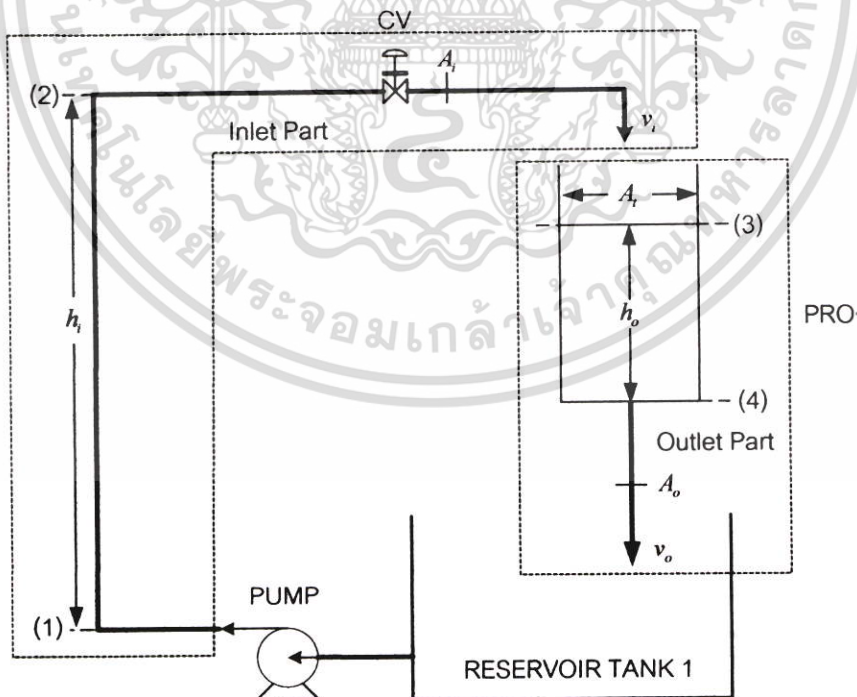
จากรูปที่ 5.49 เมื่อพิจารณาการไหลของของไหลสามารถอธิบายด้วยทฤษฎีของ Bernoulli ซึ่งเป็นผลรวมของเฮดความดัน (Pressure Head ; p/γ) เฮดความเร็ว (Velocity Head ; $v^2/2g$) และเฮดความสูง (Potential Head ; z) จะมีค่าเท่ากับค่าคงที่ [18] ดังนั้นสมการ Bernoulli จึงเขียนได้เป็น

$$\frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + z = \text{Constant} \quad (5.7)$$

เมื่อ g คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (เท่ากับ 9.81 m/s^2) v คือ ความเร็ว (m/s) z คือ ระดับอ้างอิง (m) p คือ ความดัน (psi) และ γ คือ ค่าน้ำหนักจำเพาะของของไหล และจากสมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) เมื่อของไหลมีอัตราการไหลคงตัว

$$\rho v A = \text{Constant} \quad (5.8)$$

เมื่อ ρ คือ ค่าความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3) ดังนั้นจากรูปที่ 5.49 สามารถพิจารณาระบบได้ดังรูปที่ 5.50



รูปที่ 5.50 แสดงระบบควบคุมระดับของเหลวในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ A_i คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อทางเข้า (m^2)
 A_o คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อทางออก (m^2)
 A_i คือ พื้นที่หน้าตัดของถังกระบวนการ (m^2)
 h_i คือ ความต่างของระดับในส่วนที่ (1) และส่วนที่ (2) (m)
 h_o คือ ความต่างของระดับในส่วนที่ (3) และส่วนที่ (4) (m)
 v_i คือ ความเร็วในการไหลเข้า (m/s)
 v_o คือ ความเร็วในการไหลออก (m/s)

จากรูปที่ 5.50 ระบบควบคุมระดับอย่างง่ายๆ ประกอบด้วยส่วนหลักสองส่วนคือ ส่วนขาเข้า (Inlet Part) และส่วนขาออก (Outlet Part) ซึ่งพลังงานกลสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ พลังงานจลน์ (Kinetic Energy : K_E) และพลังงานศักย์ (Potential Energy : P_E) [19] พลังงานจลน์จากส่วนของการไหลเข้าจะเปลี่ยนเป็นพลังงานศักย์ในส่วนของการไหลออก และเปลี่ยนกลับจากพลังงานศักย์เป็นพลังงานจลน์อีกครั้งหนึ่ง จากหลักการของการเปลี่ยนรูปพลังงานตามทฤษฎีของ Bernoulli เมื่อพิจารณาในส่วนที่ (1) และส่วนที่ (2) จากสมการที่ (5.7) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \quad (5.9)$$

- เมื่อ v_1 และ v_2 คือ ความเร็วในการไหลในส่วนที่ (1) และ (2) ในหน่วย m/s
 p_1 และ p_2 คือ ความดันที่ตำแหน่งในส่วนที่ (1) และ (2) ในหน่วย psi
 z_1 และ z_2 คือ ระดับความสูงที่ตำแหน่ง (1) และ (2) ในหน่วย m

เมื่อกำหนดให้ $v_2 = v_1 = v_i$ และ $h_i = z_2 - z_1$ สมการที่ (5.9) สามารถเขียนได้เป็น

$$p_1 - p_2 = \gamma \cdot h_i \quad (5.10)$$

พิจารณาส่วนที่ (3) และส่วนที่ (4) ตามทฤษฎีของ Bernoulli จากสมการที่ (5.7) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{p_3}{\gamma} + \frac{v_3^2}{2g} + z_3 = \frac{p_4}{\gamma} + \frac{v_4^2}{2g} + z_4 \quad (5.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ v_3 และ v_4 คือ ความเร็วในการไหลในส่วนที่ (3) และ (4) ในหน่วย m/s

p_3 และ p_4 คือ ความดันที่ตำแหน่งในส่วนที่ (3) และ (4) ในหน่วย psi

z_3 และ z_4 คือ ระดับความสูงที่ตำแหน่ง (3) และ (4) ในหน่วย m

โดยที่ $p_3 = p_4$ และ $h_o = z_3 - z_4$ โดยความเร็วของน้ำในการไหลในส่วนที่ (3) ในทางปฏิบัติเท่ากับศูนย์ จากสมการที่ (5.8) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$v_o^2 = 2g \cdot h_o \quad (5.12)$$

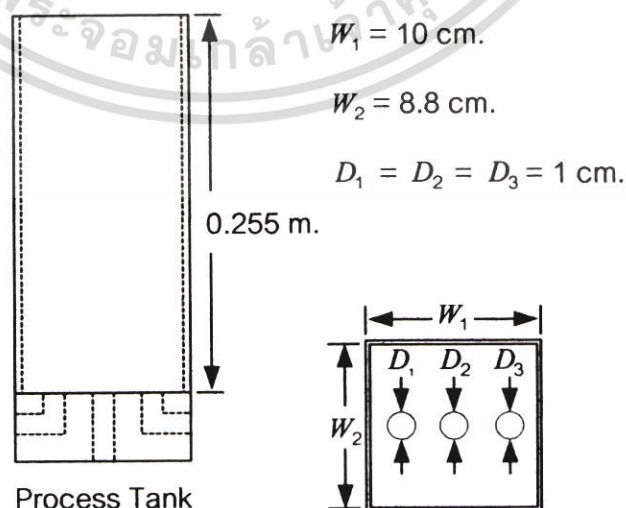
สามารถเขียนสมการที่ (5.12) ใหม่ได้เป็น

$$v_o = \sqrt{2g \cdot h_o} \quad (5.13)$$

อัตราการไหลออก Q_o ในหน่วย m^3/s หาได้โดย

$$Q_o = v_o A_o \quad (5.14)$$

รูปที่ 5.51 แสดงโครงสร้างและขนาดของถังกระบวนการ โดย D_1 เป็นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อที่ใช้ในการวัดระดับความสูงของน้ำในถังกระบวนการ D_2 เป็นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อน้ำออก และ D_3 เป็นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อน้ำเข้า



รูปที่ 5.51 แสดงลักษณะและขนาดของถังกระบวนการที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ กรุณาแจ้งเจ้าของลิขสิทธิ์ก่อนการนำออกไปใช้

จากสมการที่ (5.13) และ (5.14) ความเร็วของของไหล v_o (m/s) และอัตราการไหลออก Q_o (m³/s) ของกระบวนการควบคุมระดับของของเหลวในรูปที่ 5.48 คำนวณได้จากสมการที่ (5.15) และ (5.16) ตามลำดับ

$$\begin{aligned} v_o &= \sqrt{2 \times 9.81 \times h_o} \\ &= 4.4294466918 \sqrt{h_o} \end{aligned} \quad (5.15)$$

และ

$$\begin{aligned} Q_o &= (\pi \times 0.005^2) \times 4.4294466918 \sqrt{h_o} \\ &= 3.478879296 \times 10^{-4} \sqrt{h_o} \end{aligned} \quad (5.16)$$

การกำหนดขนาดของวาล์วควบคุมที่เหมาะสมนำไปสู่การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของขนาดของวาล์ว โดยนำค่า C_v ที่คำนวณได้มากำหนดขนาดของวาล์ว โดยสมการพื้นฐานที่ใช้กำหนดขนาดของวาล์วของของเหลวหาได้จาก

$$C_v = Q \sqrt{\frac{G_f}{\Delta p}} \quad (5.17)$$

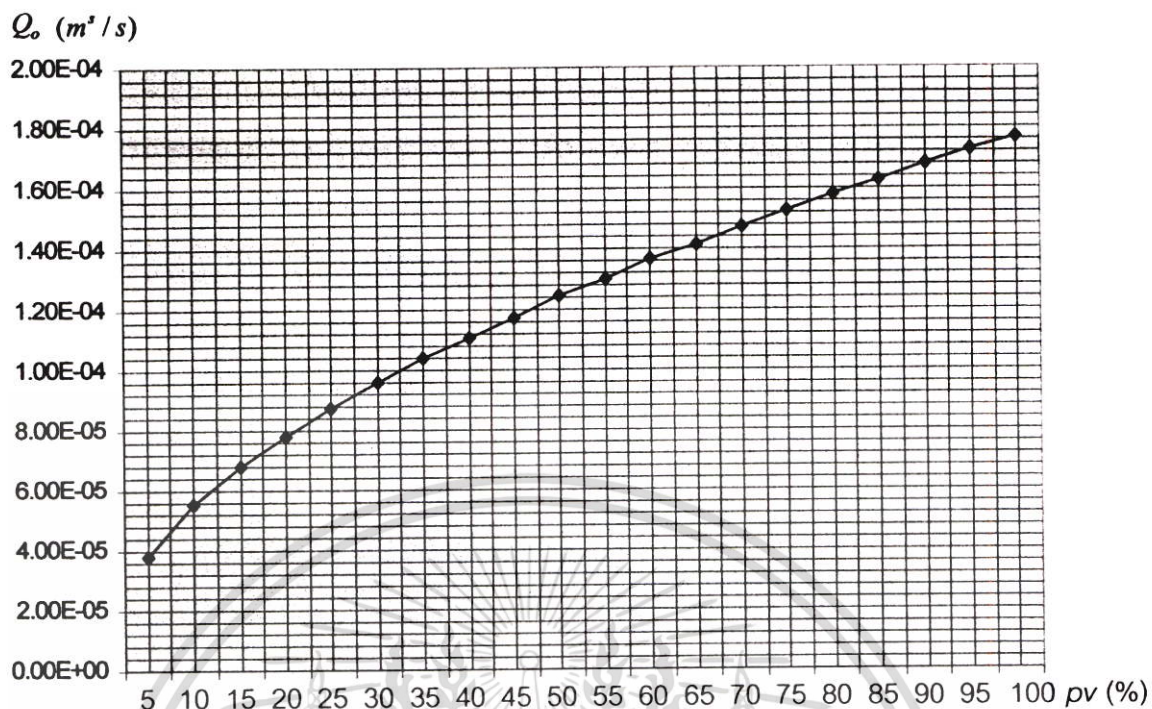
เมื่อ G_f คือ ค่าความถ่วงจำเพาะของของเหลวที่อุณหภูมิใช้งาน (น้ำมีค่าเท่ากับ 1 ที่อุณหภูมิ 60 °F) (m/s²)
 Δp คือ แรงดันแตกต่างที่ตกคร่อมวาล์ว (psi)

จากสมการที่ (5.13) จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าอัตราการไหลออก Q_o สามารถควบคุมได้โดยการกำหนดค่าเป้าหมายระดับของถังกระบวนการ h_o และสามารถควบคุมอัตราการไหลเข้าให้เท่ากับอัตราการไหลออกได้โดยอาศัยหลักการพลังงานสมดุล โดยการควบคุมให้วาล์วควบคุมอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมที่ทำให้อัตราการไหลเข้าเท่ากับอัตราการไหลออกในขณะนั้นๆ ซึ่งในตารางที่ 5.2 แสดงข้อมูลของกระบวนการควบคุมระดับของของเหลวที่ใช้ในการทดลอง

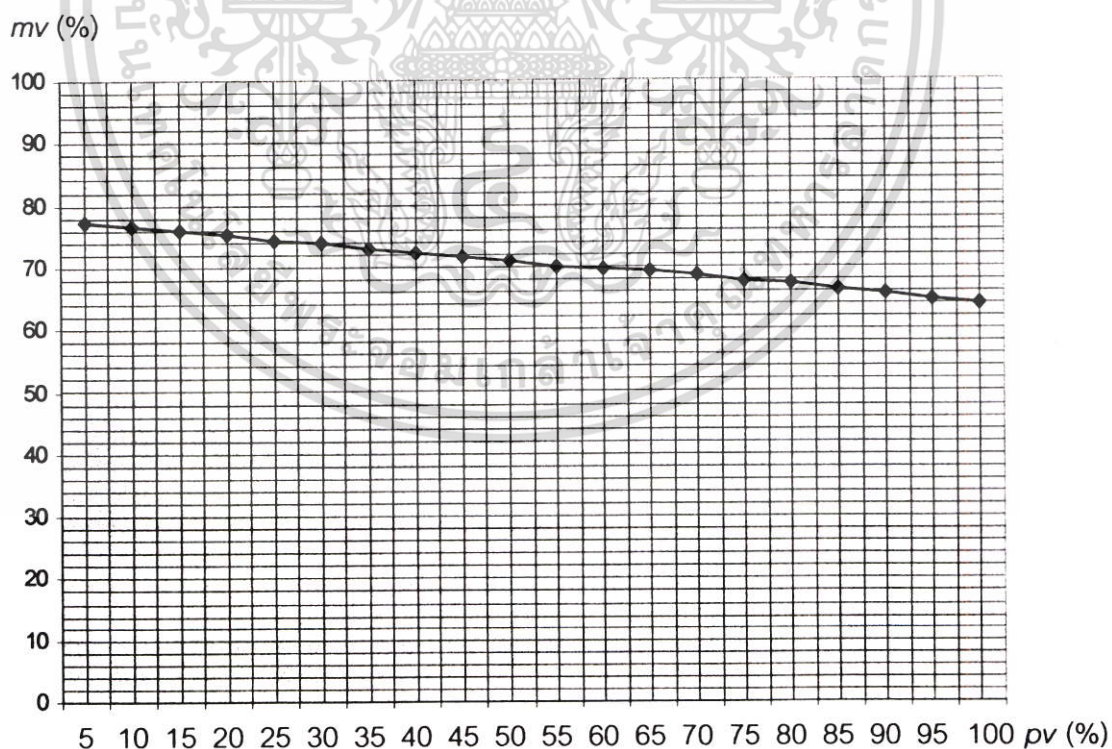
ตารางที่ 5.2 แสดงข้อมูลของกระบวนการควบคุมระดับของของเหลวที่ใช้ในการทดลอง

pv	pv (Meas.) (%) (1~5 Vdc.)	h_o (0~0.255 m.)	mv (%)	mv (meas.) (1~5 Vdc.)	mv (meas.) (4~20 mA.)	v_o (Cal.) (m/s)	Q_o (Cal.) (m ³ /s)
0	1.00	0	77.7	4.09	16.36	0	0
5	1.19	0.012	77.1	4.07	16.25	0.4852	0.38109×10^{-4}
10	1.40	0.025	76.6	4.04	16.16	0.7004	0.55006×10^{-4}
15	1.59	0.038	75.8	4.01	15.99	0.8634	0.67811×10^{-4}
20	1.79	0.051	75.1	3.98	15.86	1.0003	0.78564×10^{-4}
25	1.99	0.063	74.4	3.94	15.75	1.1118	0.87319×10^{-4}
30	2.20	0.076	73.3	3.90	15.72	1.2211	0.95906×10^{-4}
35	2.38	0.089	73.2	3.88	15.50	1.3214	1.03784×10^{-4}
40	2.59	0.102	72.4	3.87	15.42	1.4146	1.11106×10^{-4}
45	2.80	0.114	71.5	3.84	15.35	1.4955	1.17460×10^{-4}
50	3.00	0.127	71.0	3.82	15.26	1.5785	1.23977×10^{-4}
55	3.18	0.140	70.2	3.79	15.10	1.6573	1.30167×10^{-4}
60	3.41	0.153	69.7	3.77	15.05	1.7325	1.36077×10^{-4}
65	3.60	0.165	69.5	3.75	15.00	1.7992	1.41312×10^{-4}
70	3.79	0.178	68.6	3.70	14.86	1.8687	1.46774×10^{-4}
75	3.99	0.191	68.0	3.65	14.60	1.9358	1.52039×10^{-4}
80	4.19	0.204	67.0	3.64	14.56	2.0006	1.57128×10^{-4}
85	4.38	0.216	66.5	3.62	14.45	2.0586	1.61683×10^{-4}
90	4.58	0.229	65.6	3.59	14.31	2.1196	1.66478×10^{-4}
95	4.78	0.242	64.8	3.56	14.22	2.1789	1.71138×10^{-4}
100	4.98	0.255	64.1	3.53	14.10	2.2367	1.75674×10^{-4}

จากข้อมูลในตารางที่ 5.2 นำมาเขียนแผนภูมิเส้นแสดงระดับอัตราการไหลออก Q_o ในแต่ละระดับของของเหลวเป้าหมาย ดังแสดงในรูปที่ 5.52 และแผนภูมิเส้นแสดงระดับสัญญาณควบคุม mv ในแต่ละระดับของของเหลวเป้าหมาย ดังแสดงในรูปที่ 5.53 ตามลำดับ



รูปที่ 5.52 แผนภูมิเส้นแสดงระดับอัตราการไหลออก Q_o ในแต่ละระดับของของเหลวเป้าหมาย จากตัวอย่างข้อมูลในตารางที่ 5.2



รูปที่ 5.53 แผนภูมิเส้นแสดงระดับสัญญาณควบคุม mv ในแต่ละระดับของของเหลวเป้าหมาย จากตัวอย่างข้อมูลในตารางที่ 5.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อมูลในตารางที่ 5.2 สามารถคำนวณหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุม Δmv_{cal} ในแต่ละอุณหภูมิเป้าหมายเพื่อใช้ในการกำหนดระดับสัญญาณควบคุมในแต่ละระดับของของเหลวเป้าหมาย ได้ดังข้อมูลในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 แสดงตัวอย่างข้อมูลจากการคำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมในแต่ละระดับของของเหลวเป้าหมาย

ระดับของของเหลวเป้าหมาย [pv] (%)	ระดับของของเหลวเป้าหมาย [h _o] (metre)	ระดับสัญญาณควบคุม [mv] (%)	คำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลง ของระดับสัญญาณควบคุม [Δmv_{cal}] (%)
5	0.012	77.1	-
10	0.025	76.6	0.55
15	0.038	75.8	0.67
20	0.051	75.1	0.73
25	0.063	74.4	0.83
30	0.076	73.3	0.63
35	0.089	73.2	0.67
40	0.102	72.4	0.60
45	0.114	71.5	0.73
50	0.127	71.0	0.73
55	0.140	70.2	0.60
60	0.153	69.7	0.50
65	0.165	69.5	0.53
70	0.178	68.6	0.57
75	0.191	68.0	0.83
80	0.204	67.0	0.70
85	0.216	66.5	0.80
90	0.229	65.6	0.73
95	0.242	64.8	0.80
100	0.255	64.1	0.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (5.1) คุณลักษณะของกระบวนการอยู่ในรูปของตัวแปร 3 ตัว ซึ่งสามารถหาได้จากการทดสอบกระบวนการแบบรูปเปิด ซึ่งจากข้อมูลการคำนวณระดับสัญญาณควบคุมในแต่ละระดับของของเหลวเป้าหมายตามหลักการพลังงานสมดุลของกระบวนการที่ใช้ในการทดลองในตารางที่ 5.2 จากชุดทดลองในรูปที่ 5.48 โดยนำข้อมูลในหลักที่ 1 และหลักที่ 4 มาทำการทดลองทดสอบกระบวนการแบบรูปเปิดด้วยวิธี Process Reaction Curve และอ่านค่าจากกระดาษบันทึกในการอธิบายคุณลักษณะของกระบวนการ 3 ค่า คือ อัตราขยายของกระบวนการ (K) ค่าเวลาคงที่ของกระบวนการ (τ) และค่าเวลาหน่วงของกระบวนการ (t_0) ตามสมการที่ (5.1) เพื่อกำหนดลงใน Block ฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการ (Transfer Fcn) ในการจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์ โดยผู้วิจัยได้เลือกทำการทดลองผลตอบสนองของกระบวนการโดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบสองสถานะหลายระดับที่ระดับของของเหลวเป้าหมาย 30% หรือที่ระดับความสูง 7.6 cm. ที่ระดับของของเหลวเป้าหมาย 50% หรือที่ระดับความสูง 12.7 cm. และที่ระดับของของเหลวเป้าหมาย 70% หรือที่ระดับความสูง 17.8 cm. ตามลำดับ ซึ่งในการทดลองทดสอบกระบวนการแบบรูปเปิดได้ใช้สัญญาณอินพุตแบบ Step ตามข้อมูลในตารางที่ 5.2 และอ่านค่าจากกระดาษบันทึกในการอธิบายคุณลักษณะของกระบวนการได้ดังนี้

ที่ระดับของของเหลวเป้าหมาย 30% ใช้สัญญาณอินพุตแบบ Step ที่ 73.3% โดยการทดลองสามารถวัดค่าเวลาคงที่ของกระบวนการได้ 10 มิลลิเมตร ค่าเวลาหน่วง 1 มิลลิเมตร และกระบวนการเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ระดับ 30.19% หรือคิดเป็น 7.7 เซนติเมตร และในการทดลองปรับความเร็วในการบันทึกของเครื่องบันทึกสัญญาณไว้ที่ 600 mm./h. นั่นคือ 1mm./6 sec. ดังนั้น

$$K = 30.19\% / (77.7\% - 73.3\%) = 6.86$$

$$\tau = 10 \times 6 = 60 \text{ sec.}$$

$$t_0 = 1 \times 6 = 6 \text{ sec.}$$

ที่ระดับของของเหลวเป้าหมาย 50% ใช้สัญญาณอินพุตแบบ Step ที่ 71.0% โดยการทดลองสามารถวัดค่าเวลาคงที่ของกระบวนการได้ 14 มิลลิเมตร ค่าเวลาหน่วง 1 มิลลิเมตร และกระบวนการเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ระดับ 50.5% หรือคิดเป็น 12.8 เซนติเมตร และในการทดลองปรับความเร็วในการบันทึกของเครื่องบันทึกสัญญาณไว้ที่ 600 mm./h. นั่นคือ 1mm./6 sec. ดังนั้น

$$K = 50.5\% / (77.7\% - 71.0\%) = 7.53$$

$$\tau = 14 \times 6 = 84 \text{ sec.}$$

$$t_0 = 1 \times 6 = 6 \text{ sec.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

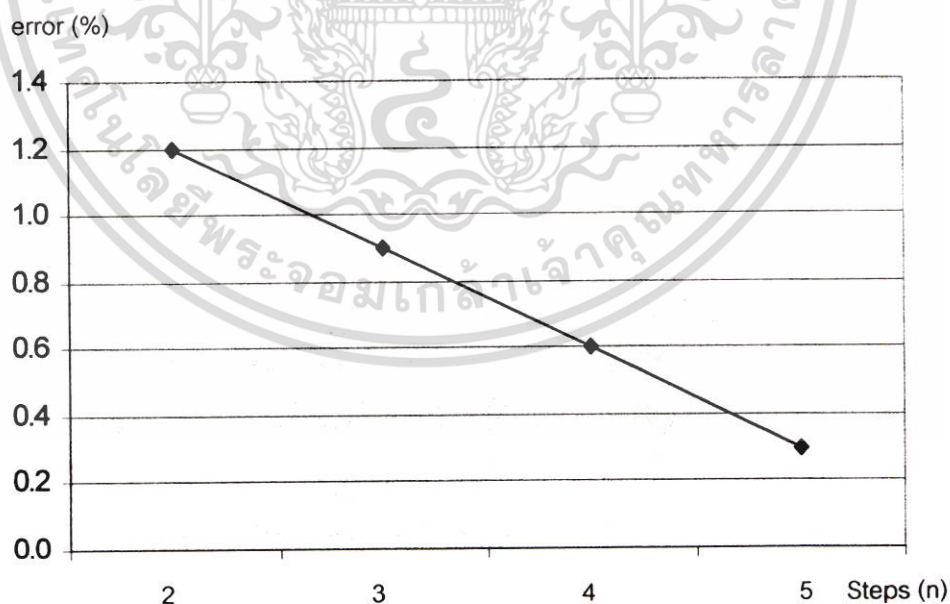
ที่ระดับของของเหลวเป้าหมาย 70% ใช้สัญญาณอินพุทแบบ Step ที่ 68.6% โดยการทดลองสามารถวัดค่าเวลาคงที่ของกระบวนการได้ 17 มิลลิเมตร ค่าเวลาหน่วง 1 มิลลิเมตร และกระบวนการเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ระดับ 69.4% หรือคิดเป็น 17.7 เซนติเมตร และในการทดลองปรับความเร็วในการบันทึกของเครื่องบันทึกสัญญาณไว้ที่ 600 mm./h. นั่นคือ 1mm./6 sec. ดังนั้น

$$K = 69.4\% / (77.7\% - 68.6\%) = 7.62$$

$$\tau = 17 \times 6 = 102 \text{ sec.}$$

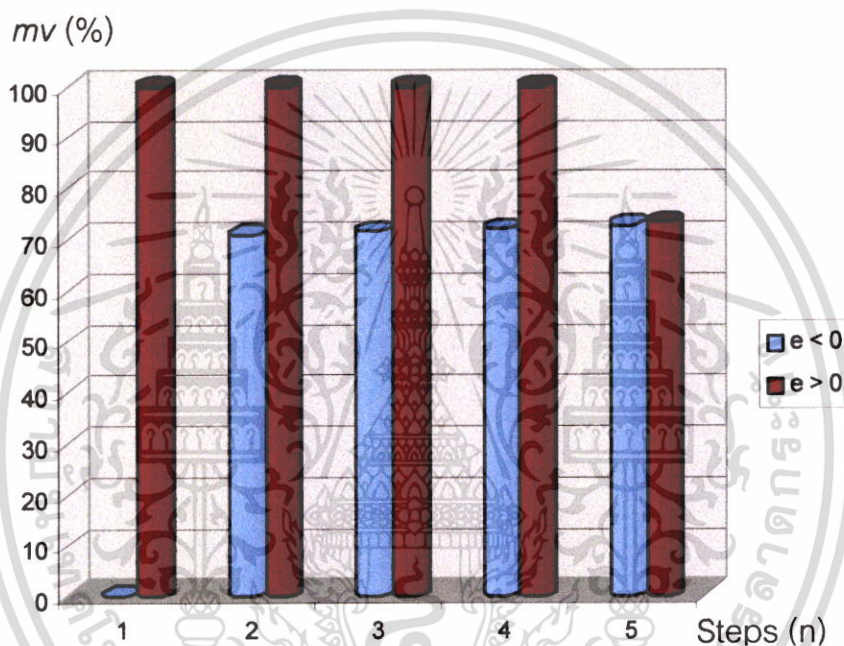
$$t_0 = 1 \times 6 = 6 \text{ sec.}$$

ในการทดลองผลการตอบสนองของระบบเมื่อใช้เทคนิคการควบคุมระดับของของเหลวที่นำเสนอนี้ที่เป้าหมาย 30% หรือที่ระดับความสูง 7.6 cm. ทางผู้วิจัยได้ออกแบบระดับในการ On-Off ตามการคำนวณตามหลักการพลังงานสมดุล ตามข้อมูลในตารางที่ 5.2 ถึงตารางที่ 5.3 โดยใช้ขั้นตอนในการออกแบบตามแนวทางหัวข้อ 4.2.3 โดยในเบื้องต้นได้ออกแบบเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิเป็น 5 ระดับ ซึ่งในรูปที่ 5.54 แสดงแผนภูมิเส้นของค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงในแต่ละระดับการดำเนินการที่ออกแบบจากการทดสอบกระบวนการแบบรูปเปิด (ไม่ได้แสดงในวิทยานิพนธ์)



รูปที่ 5.54 แสดงแผนภูมิเส้นของค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงในแต่ละระดับการดำเนินการที่ออกแบบ

เนื่องจากระบบที่ทำการทดลองเป็นระบบที่มีความจุต่ำและมีการเปลี่ยนแปลงระดับของของเหลวภายในที่เร็ว ในการทดลองเทคนิคการควบคุมระดับของของเหลวครั้งนี้ได้ออกแบบให้ตัวควบคุมในระดับสุดท้าย (5th Steps) มีระดับสัญญาณควบคุมไบอัสเท่ากับ 73.3% เมื่อระบบมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมากกว่าศูนย์ ($e > 0$) เพื่อป้องกันการแกว่งของระดับของของเหลวจากการ Off ในระดับสุดท้ายซึ่งมีระดับของของเหลวที่เข้าใกล้เป้าหมายที่สุด และในรูปที่ 5.55 แสดงระดับสัญญาณควบคุมในแต่ละระดับการดำเนินการที่ออกแบบ โดยวาล์วควบคุมที่ใช้ทดลองเป็นชนิดแบบปกติเปิด



รูปที่ 5.55 แผนภูมิแท่งแสดงระดับสัญญาณควบคุมในแต่ละระดับการดำเนินการ ณ ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 30% หรือที่ระดับความสูง 7.6 cm. (วาล์วควบคุมชนิดปกติเปิด)

จากแผนภูมิเส้นของค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงในแต่ละระดับการดำเนินการในรูปที่ 5.54 และระดับสัญญาณควบคุมในแต่ละระดับการดำเนินการที่ออกแบบในรูปที่ 5.55 สามารถเขียนฟังก์ชันคำสั่งเงื่อนไขการควบคุมแบบสองสภาวะหลายระดับ ณ ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 30% หรือที่ระดับความสูง 7.6 cm. ได้ดังรูปที่ 5.56 โดยใช้ Block ของฟังก์ชัน MATLAB (MATLAB Fcn) เพื่อเป็นการเรียกฟังก์ชัน MATLAB ของเงื่อนไขการควบคุมที่ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 30% มาใช้งาน ซึ่งในรูปที่ 5.57 แสดงโปรแกรมจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์โดยการใช้ Simulink ที่ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 30% และในรูปที่ 5.58 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการจากการจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์ ณ ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 30% หรือที่ระดับความสูง 7.6 cm.

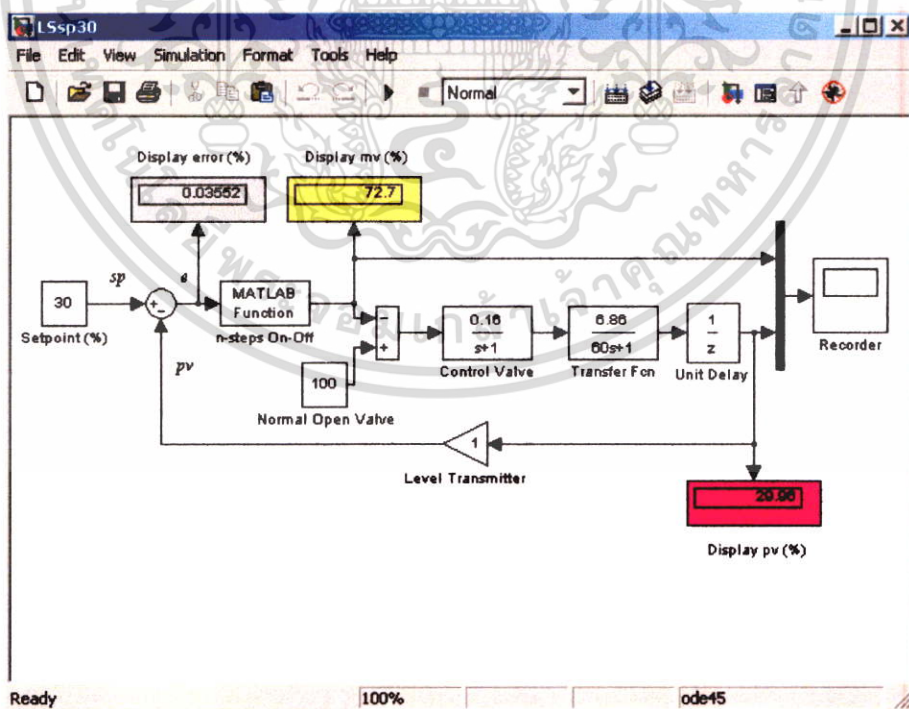
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

1 function mv = FindMV30(e)
2 if abs(e) <= 0.3
3     if e <= 0
4         mv = 73.3;
5     else
6         mv = 72.7;
7     end
8 else
9     if abs(e) <= 0.6
10        if e <= 0
11            mv = 100;
12        else
13            mv = 72.1;
14        end
15    else
16        if abs(e) <= 0.9
17            if e <= 0
18                mv = 100;
19            else
20                mv = 71.5;
21            end
22        else
23            if abs(e) <= 1.2
24                if e <= 0
25                    mv = 100;
26                else
27                    mv = 70.9;
28                end
29            else
30                if e <= 0
31                    mv = 100;
32                else
33                    mv = 0;
34                end
35            end
36        end
37    end
end

```

รูปที่ 5.56 แสดงโปรแกรมคำสั่งของ Block เทคนิคการควบคุมที่นำเสนอนี้ ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 30% หรือที่ระดับความสูง 7.6 cm.



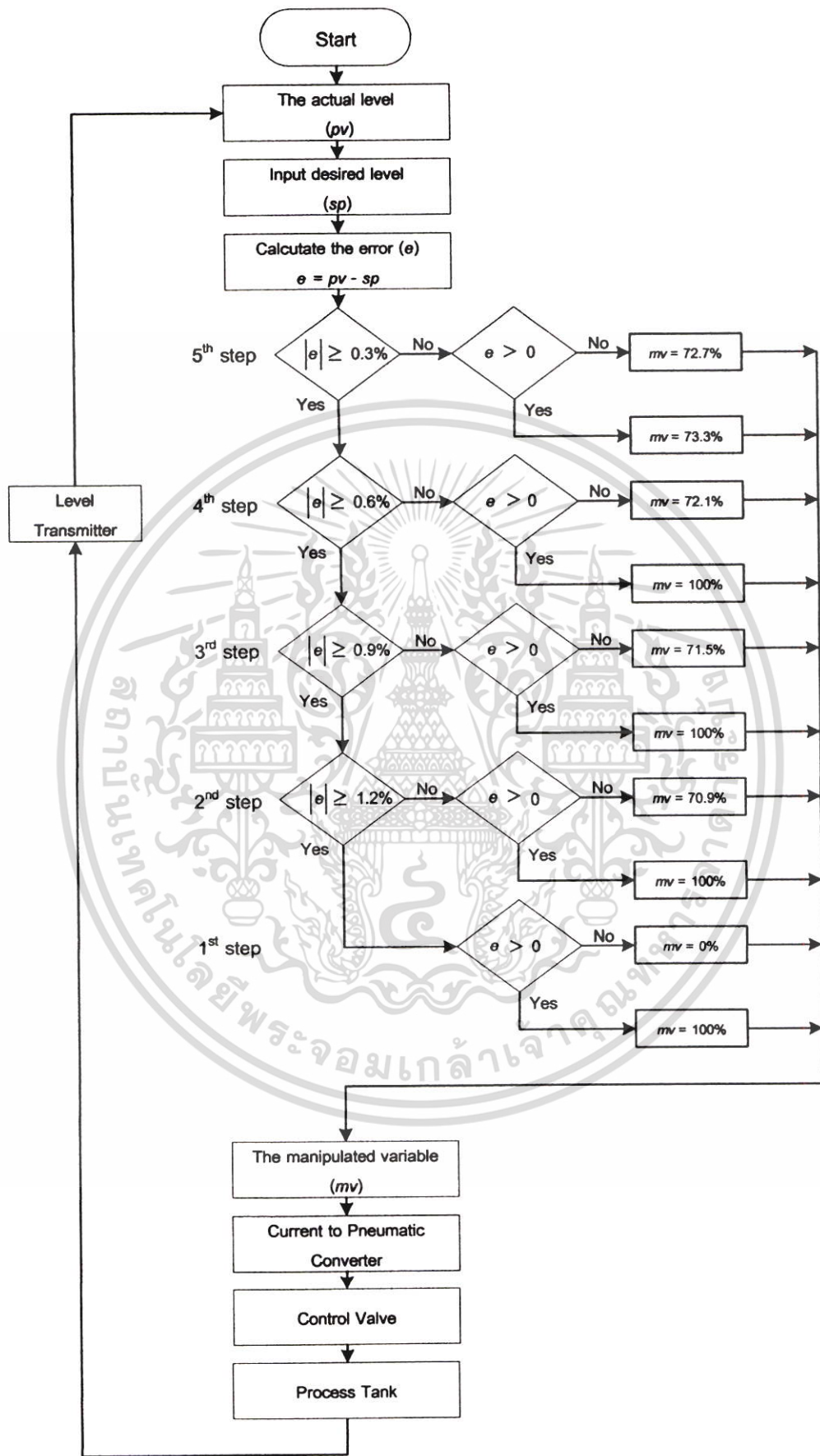
รูปที่ 5.57 แสดงโปรแกรมจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์โดยการใช้ Simulink ที่ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 30%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.58 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการจากการจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์ ณ ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 30% หรือที่ระดับความสูง 7.6 cm.

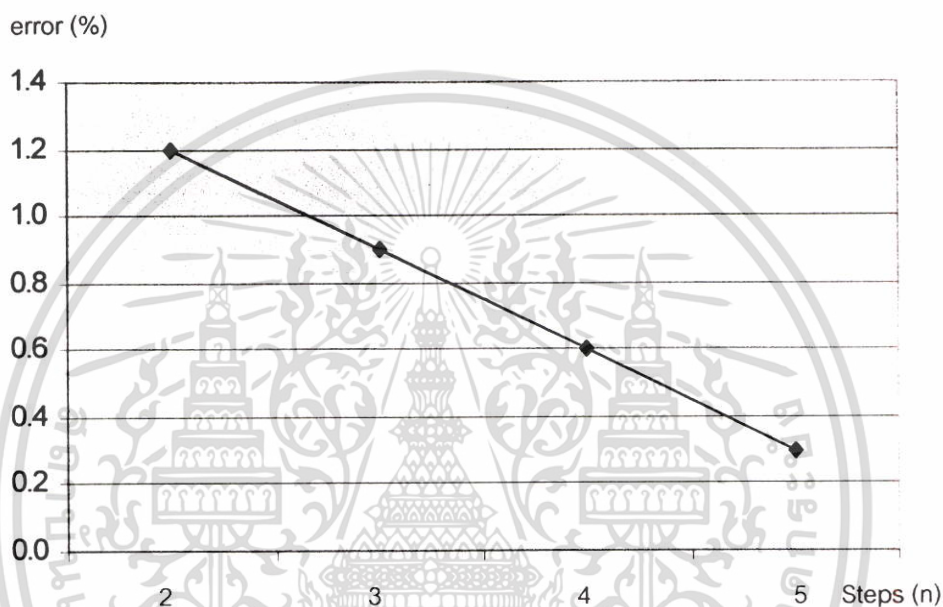
จากผลตอบสนองของกระบวนการจากการจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์ ณ ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 30% หรือที่ระดับความสูง 7.6 cm. ในรูปที่ 5.58 จะเห็นว่าระดับสัญญาณควบคุมจะอยู่ ณ ระดับสัญญาณควบคุมในระดับการควบคุมสุดท้ายตามการคำนวณระดับสัญญาณควบคุม ณ เป้าหมาย โดยผลตอบสนองของกระบวนการมี Overshoot เกิดขึ้นในช่วงแรกเพียงเล็กน้อย ซึ่งจากการออกแบบเทคนิคการควบคุมแบบสองสถานะหลายระดับ ณ ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 30% หรือที่ระดับความสูง 7.6 cm. นำไปประยุกต์ใช้กับตัวควบคุมที่สามารถแสดงค่าและโปรแกรมได้ (SLPC) โดยมีแผนผังของหลักการควบคุม ณ ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 30% หรือที่ระดับความสูง 7.6 cm. แสดงในรูปที่ 5.59 เพื่อใช้ในการทำการทดลองกับกระบวนการจำลองการควบคุมระดับของของเหลวซึ่งจะกล่าวต่อไป



รูปที่ 5.59 แสดงแผนผังการทดลองของหลักการควบคุม ณ ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 30%

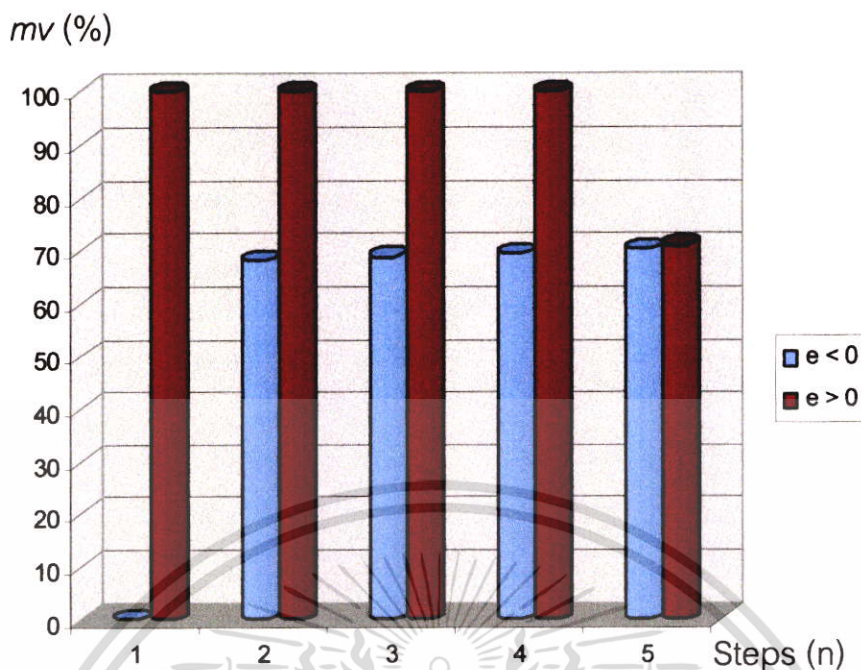
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดลองผลการตอบสนองของระบบเมื่อใช้เทคนิคการควบคุมระดับของของเหลวที่นำเสนอนี้เป้าหมาย 50% หรือ 12.7 cm. นั้น ทางผู้วิจัยได้ออกแบบระดับในการ On-Off ตามการคำนวณตามหลักการพลังงานสมดุล ณ ระดับของของเหลวเป้าหมายตามข้อมูลในตารางที่ 5.2 ถึงตารางที่ 5.3 โดยใช้ขั้นตอนในการออกแบบตามแนวทางหัวข้อ 4.2.3 โดยในเบื้องต้นได้ออกแบบเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิเป็น 5 ระดับ ซึ่งในรูปที่ 5.60 แสดงแผนภูมิเส้นของค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงในแต่ละระดับการดำเนินการที่ออกแบบที่เป้าหมาย 50%



รูปที่ 5.60 แสดงแผนภูมิเส้นของค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงในแต่ละระดับการดำเนินการที่ออกแบบที่เป้าหมาย 50%

เนื่องจากระบบที่ทำการทดลองเป็นระบบที่มีความจุต่ำและมีการเปลี่ยนแปลงระดับของของเหลวภายในที่เร็ว ในการทดลองเทคนิคการควบคุมระดับของของเหลวครั้งนี้ได้ออกแบบให้ตัวควบคุมในระดับสุดท้าย (5th Steps) มีระดับสัญญาณควบคุมไบอัสเท่ากับ 71.0% เมื่อระบบมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมากกว่าศูนย์ ($e > 0\%$) เพื่อป้องกันการแกว่งของระดับของของเหลวจากการ Off ในระดับสุดท้ายซึ่งมีระดับของของเหลวที่เข้าใกล้เป้าหมายที่สุด และในรูปที่ 5.61 แสดงระดับสัญญาณควบคุมในแต่ละระดับการดำเนินการที่ออกแบบที่เป้าหมาย 50% โดยวาล์วควบคุมที่ใช้ทดลองเป็นชนิดแบบปกติเปิด



รูปที่ 5.61 แผนภูมิแท่งแสดงระดับสัญญาณควบคุมในแต่ละระดับการดำเนินการ ณ ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 50% หรือที่ระดับความสูง 12.7 cm. (วาล์วควบคุมชนิดปกติเปิด)

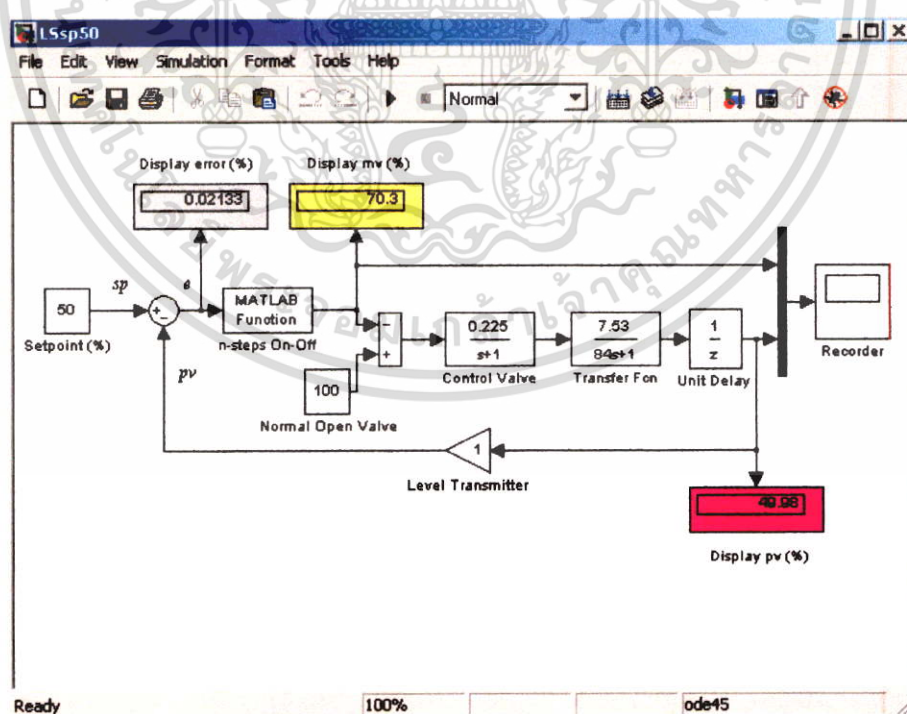
จากแผนภูมิเส้นของค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงในแต่ละระดับการดำเนินการ ในรูปที่ 5.60 และระดับสัญญาณควบคุมในแต่ละระดับการดำเนินการที่ออกแบบในรูปที่ 5.61 สามารถเขียนฟังก์ชันคำสั่งเงื่อนไขการควบคุมแบบสองสภาวะหลายระดับ ณ ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 50% หรือที่ระดับความสูง 12.7 cm. ได้ดังรูปที่ 5.62 โดยใช้ Block ของฟังก์ชัน MATLAB (MATLAB Fcn) เพื่อเป็นการเรียกฟังก์ชัน MATLAB ของเงื่อนไขการควบคุมที่ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 50% มาใช้งาน ซึ่งในรูปที่ 5.63 แสดงโปรแกรมจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์โดยการใช้ Simulink ที่ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 50%

```

1 function mv = FindMV50(e)
2 if abs(e) <= 0.3
3     if e <= 0
4         mv = 71.0;
5     else
6         mv = 70.3;
7     end
8 else
9     if abs(e) <= 0.6
10        if e <= 0
11            mv = 100;
12        else
13            mv = 69.6;
14        end
15    else
16        if abs(e) <= 0.9
17            if e <= 0
18                mv = 100;
19            else
20                mv = 68.9;
21            end
22        else
23            if abs(e) <= 1.2
24                if e <= 0
25                    mv = 100;
26                else
27                    mv = 68.2;
28                end
29            else
30                if e <= 0
31                    mv = 100;
32                else
33                    mv = 0;
34                end
35            end
36        end
37    end
end

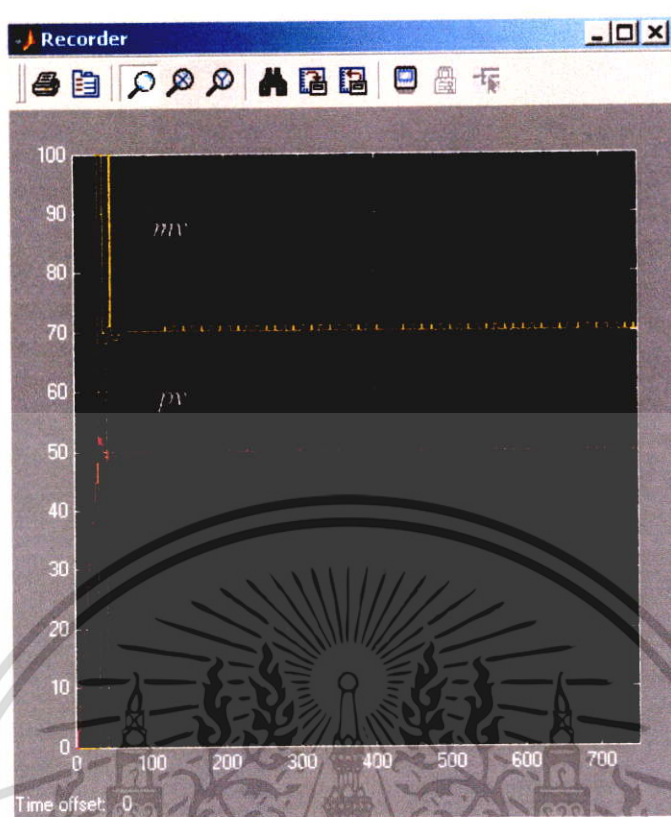
```

รูปที่ 5.62 แสดงโปรแกรมคำสั่งของ Block เทคนิคการควบคุมที่นำเงื่อนไขระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 50% หรือที่ระดับความสูง 12.7 cm.



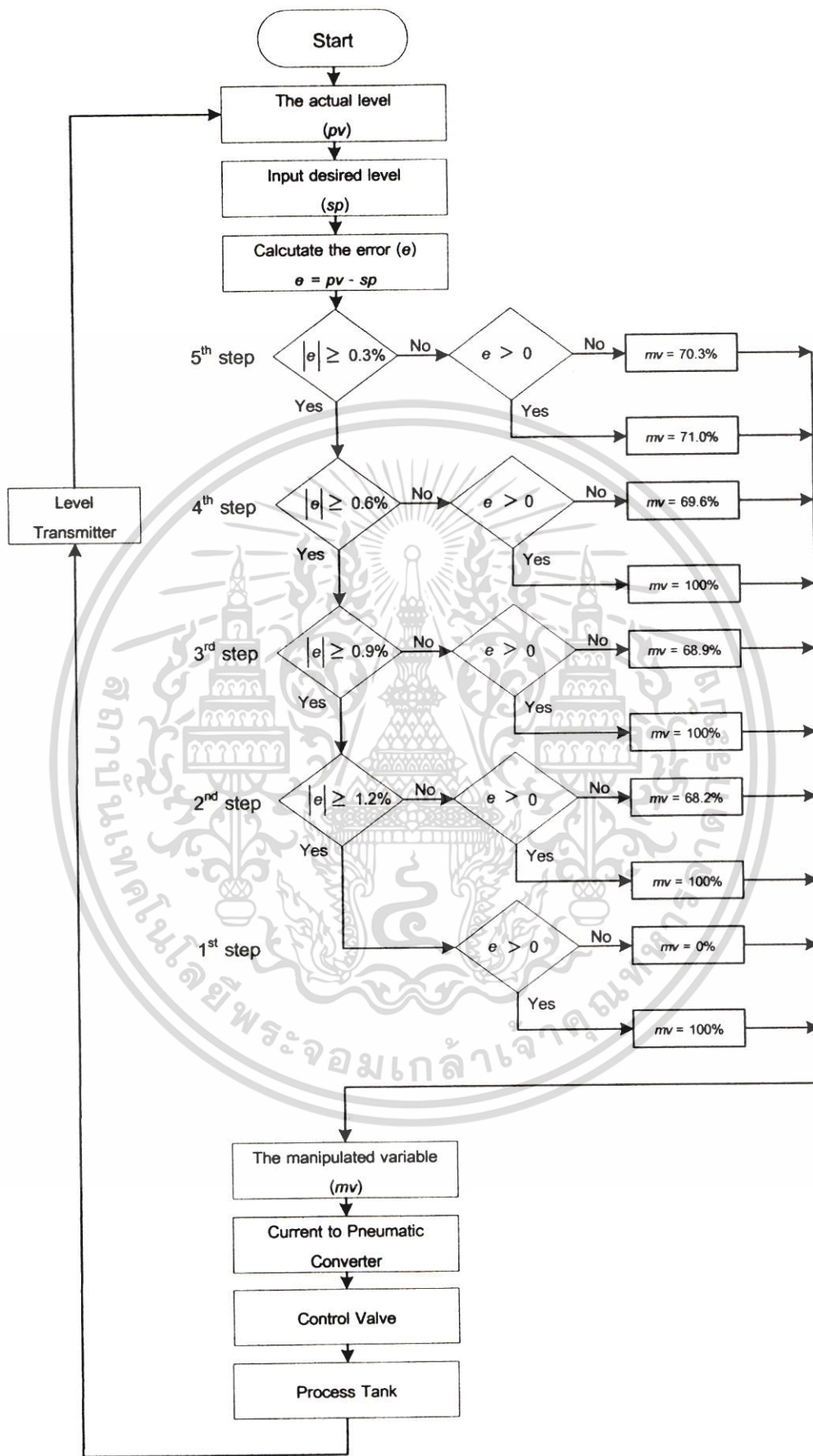
รูปที่ 5.63 แสดงโปรแกรมจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ Simulink ที่ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 50%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



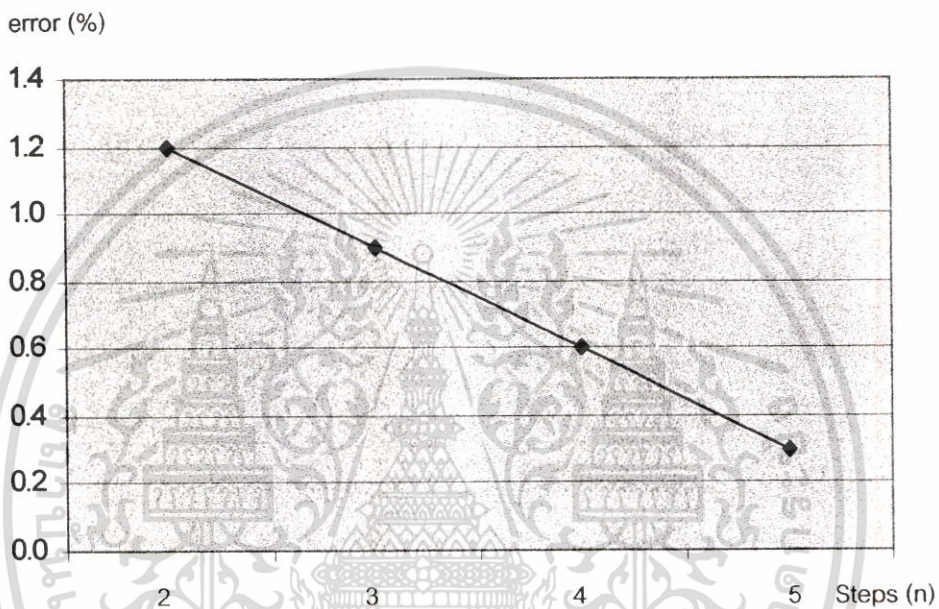
รูปที่ 5.64 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการจากการจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์ ณ ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 50% หรือที่ระดับความสูง 12.7 cm.

จากผลตอบสนองของกระบวนการจากการจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์ ณ ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 50% หรือที่ระดับความสูง 12.7 cm. ในรูปที่ 5.64 จะเห็นว่าระดับสัญญาณควบคุมจะแกว่งอยู่ ณ ระดับของสัญญาณควบคุมในระดับการควบคุมสุดท้ายตามการเปลี่ยนแปลงของระดับของของเหลวที่คลาดเคลื่อนจากเป้าหมายเพียงเล็กน้อยอยู่ตลอดเวลา โดยผลตอบสนองของกระบวนการมี Overshoot เกิดขึ้นในช่วงแรกเพียงเล็กน้อย ซึ่งจากการออกแบบเทคนิคการควบคุมแบบสองสถานะหลายระดับ ณ ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 50% หรือที่ระดับความสูง 12.7 cm. นำไปประยุกต์ใช้กับตัวควบคุมที่สามารถแสดงค่าและโปรแกรมได้ (SLPC) โดยมีแผนผังของหลักการควบคุม ณ ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 50% หรือที่ระดับความสูง 12.7 cm. แสดงในรูปที่ 5.65 เพื่อใช้ทำการทดลองกับกระบวนการจำลองการควบคุมระดับของของเหลวต่อไป



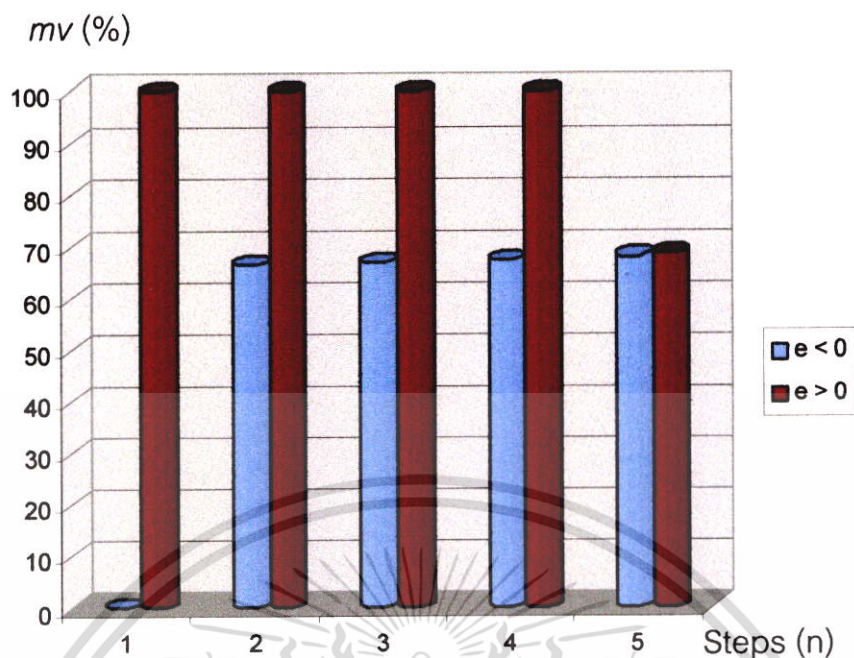
รูปที่ 5.65 แสดงแผนผังการทดลองของหลักการควบคุม ณ ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 50% เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดลองผลการตอบสนองของระบบเมื่อใช้เทคนิคการควบคุมระดับของของเหลวที่นำเสนอนี้เป้าหมาย 70% หรือ 17.8 cm. นั้น ทางผู้วิจัยได้ออกแบบระดับในการ On-Off ตามการคำนวณตามหลักการพลังงานสมดุล ณ ระดับของของเหลวเป้าหมายตามข้อมูลในตารางที่ 5.2 ถึงตารางที่ 5.3 โดยใช้ขั้นตอนในการออกแบบตามแนวทางหัวข้อ 4.2.3 โดยในเบื้องต้นได้ออกแบบเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิเป็น 5 ระดับ ซึ่งในรูปที่ 5.66 แสดงแผนภูมิเส้นของค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงในแต่ละระดับการดำเนินการที่ออกแบบที่เป้าหมาย 70%



รูปที่ 5.66 แสดงแผนภูมิเส้นของค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงในแต่ละระดับการดำเนินการที่ออกแบบที่เป้าหมาย 70%

เนื่องจากระบบที่ทำการทดลองเป็นระบบที่มีความจุต่ำและมีการเปลี่ยนแปลงระดับของของเหลวภายในที่เร็ว ในการทดลองเทคนิคการควบคุมระดับของของเหลวครั้งนี้ได้ออกแบบให้ตัวควบคุมในระดับสุดท้าย (5th Steps) มีระดับสัญญาณควบคุมไบอัสเท่ากับ 68.6% เมื่อระบบมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมากกว่าศูนย์ ($e > 0\%$) เพื่อป้องกันการแกว่งของระดับของของเหลวจากการ Off ในระดับสุดท้ายซึ่งมีระดับของของเหลวที่เข้าใกล้เป้าหมายที่สุด และในรูปที่ 5.67 แสดงระดับสัญญาณควบคุมในแต่ละระดับการดำเนินการที่ออกแบบที่เป้าหมาย 70% โดยวาล์วควบคุมที่ใช้ทดลองเป็นชนิดแบบปกติเปิด



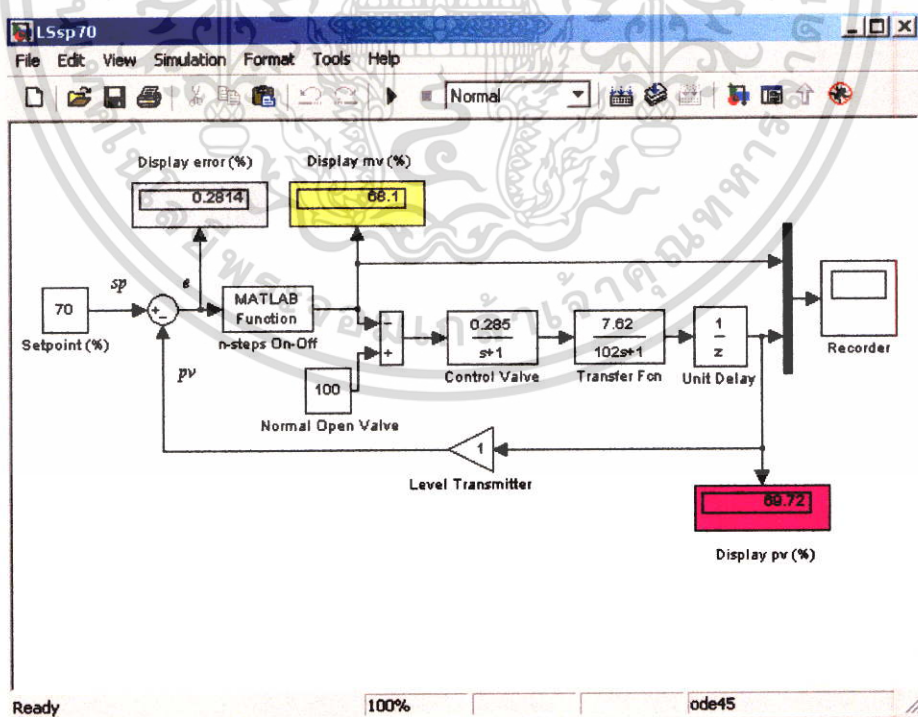
รูปที่ 5.67 แผนภูมิแท่งแสดงระดับสัญญาณควบคุมในแต่ละระดับการดำเนินการ ณ ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 70% หรือที่ระดับความสูง 17.8 cm. (วาล์วควบคุมชนิดปกติเปิด)

จากแผนภูมิเส้นของค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอ้างอิงในแต่ละระดับการดำเนินการ ในรูปที่ 5.66 และระดับสัญญาณควบคุมในแต่ละระดับการดำเนินการที่ออกแบบในรูปที่ 5.67 สามารถเขียนฟังก์ชันคำสั่งเงื่อนไขการควบคุมแบบสองสภาวะหลายระดับ ณ ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 70% หรือที่ระดับความสูง 17.8 cm. ได้ดังรูปที่ 5.68 โดยใช้ Block ของฟังก์ชัน MATLAB (MATLAB Fcn) เพื่อเป็นการเรียกฟังก์ชัน MATLAB ของเงื่อนไขการควบคุมที่ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 70% มาใช้งาน ซึ่งในรูปที่ 5.69 แสดงโปรแกรมจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์โดยการใช้ Simulink ที่ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 70% และในรูปที่ 5.70 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการจากการจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์ ณ ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 70% หรือที่ระดับความสูง 17.8 cm. โดยทำการบันทึกผลตอบสนองของสัญญาณควบคุม mv และผลตอบสนองของ pv ซึ่งแกนตั้งระบุค่าจาก 0% ถึง 100% และแกนอนระบุค่าเวลาเป็นวินาที (sec.)

```

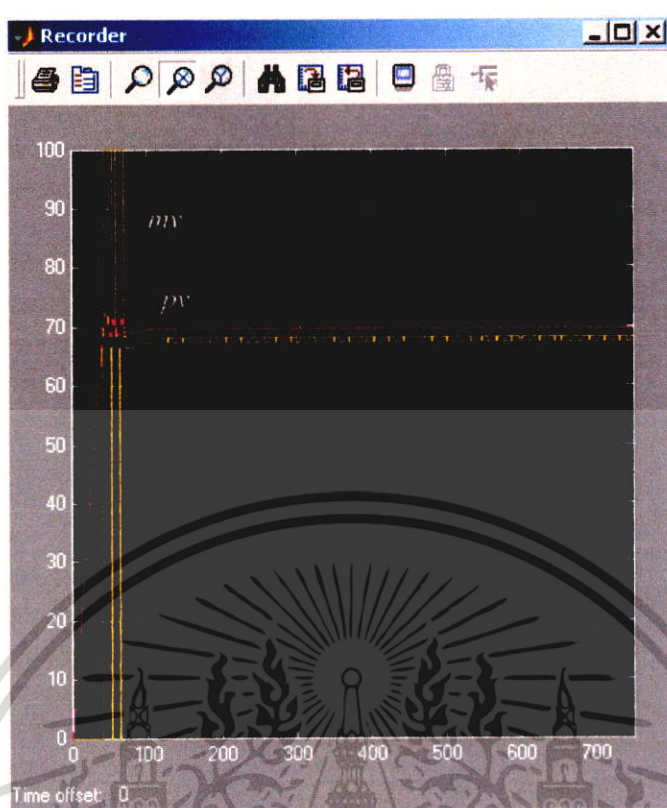
1 function mv = FindMV70(e)
2 if abs(e) <= 0.3
3     if e <= 0
4         mv = 68.6;
5     else
6         mv = 68.1;
7     end
8 else
9     if abs(e) <= 0.6
10        if e <= 0
11            mv = 100;
12        else
13            mv = 67.5;
14        end
15    else
16        if abs(e) <= 0.9
17            if e <= 0
18                mv = 100;
19            else
20                mv = 67.0;
21            end
22        else
23            if abs(e) <= 1.2
24                if e <= 0
25                    mv = 100;
26                else
27                    mv = 66.4;
28                end
29            else
30                if e <= 0
31                    mv = 100;
32                else
33                    mv = 0;
34                end
35            end
36        end
37    end
end
    
```

รูปที่ 5.68 แสดงโปรแกรมคำสั่งของ Block เทคนิคการควบคุมที่นำเสนอนี้ ณ ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 70% หรือที่ระดับความสูง 17.8 cm.



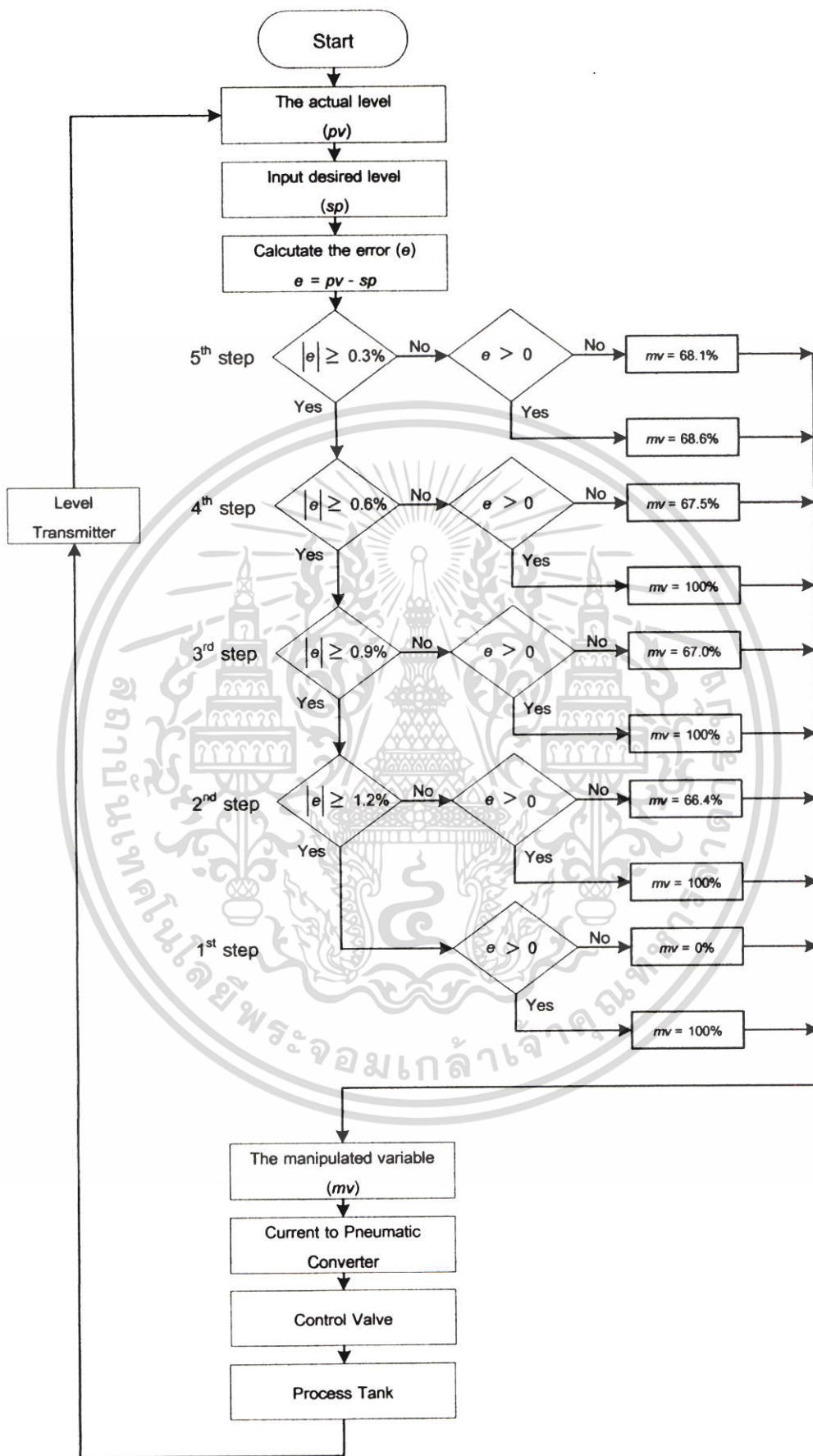
รูปที่ 5.69 แสดงโปรแกรมจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์โดยการใช้ Simulink ที่ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 70%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.70 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการจากการจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์ ณ ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 70% หรือที่ระดับความสูง 17.8 cm.

จากผลตอบสนองของกระบวนการจากการจำลองการทดลองทางคณิตศาสตร์ ณ ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 70% หรือที่ระดับความสูง 17.8 cm. ในรูปที่ 5.70 จะเห็นว่าระดับสัญญาณควบคุมจะแกว่งอยู่ ณ ระดับของสัญญาณควบคุมในระดับการควบคุมสุดท้ายตามการเปลี่ยนแปลงของระดับของของเหลวที่คลาดเคลื่อนจากเป้าหมายเพียงเล็กน้อยอยู่ตลอดเวลา โดยผลตอบสนองของกระบวนการมี Overshoot เกิดขึ้นในช่วงแรกเพียงเล็กน้อย ซึ่งจากการออกแบบเทคนิคการควบคุมแบบสองสถานะหลายระดับ ณ ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 70% หรือที่ระดับความสูง 17.8 cm. นำไปประยุกต์ใช้กับตัวควบคุมที่สามารถแสดงค่าและโปรแกรมได้ (SLPC) โดยมีแผนผังของหลักการควบคุม ณ ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 70% หรือที่ระดับความสูง 17.8 cm. แสดงในรูปที่ 5.71 เพื่อใช้ทำการทดลองกับกระบวนการจำลองการควบคุมระดับของของเหลว ซึ่งจะกล่าวต่อไป



รูปที่ 5.71 แสดงแผนผังการทดลองของหลักการควบคุม ณ ระดับของของเหลวเป้าหมายที่ 70% เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

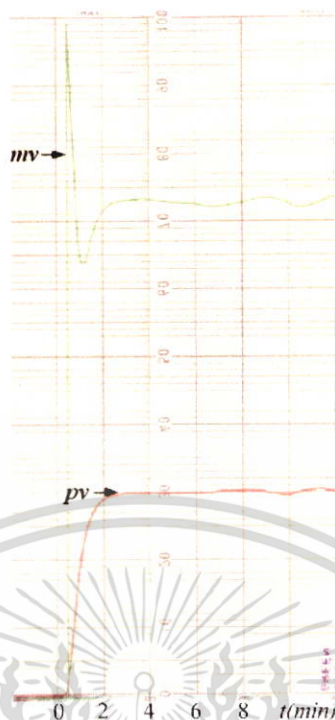
ผลการทดลองของเทคนิคการควบคุมที่นำเสนอจากการใช้ชุดทดลองภายใต้สภาวะการควบคุมระดับของของเหลวเปรียบเทียบกับตัวควบคุมกระบวนการชนิดอื่นๆ ที่ใช้ในปัจจุบัน โดยตั้งค่าระดับของของเหลวเป้าหมายไว้ที่ 7.6 cm. หรือเป้าหมาย 30% ตามข้อมูลในตารางที่ 5.2 โดยตั้งความเร็วในการบันทึกผลตอบสนองทั้งหมดของกระบวนการไว้ที่ 360 mm./h. เพื่อให้สามารถอ่านค่าเวลาได้เฉลี่ยช่องละ 2 นาทีตามขนาดของกระดาษที่ใช้บันทึกผล (กว้างช่องละ 12.5 mm.) โดยใช้เส้นหมึกสีแดงแสดงระดับของของเหลวของกระบวนการและเส้นหมึกสีเขียวแสดงสัญญาณควบคุม ซึ่งในรูปที่ 5.72 แสดงผลการตอบสนองของระบบเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ On-Off ทั่วไป ในรูปที่ 5.73 แสดงผลการตอบสนองของระบบเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ PI และจากรูปที่ 5.59 ผลตอบสนองของระบบในการทดลองเทคนิคการควบคุมที่ออกแบบโดยการเขียนโปรแกรม กำหนดให้ตัวควบคุมทำงานตามเงื่อนไขการควบคุมอุณหภูมิแบบสองสภาวะหลายระดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.74 ตามลำดับ



รูปที่ 5.72 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับของของเหลวที่เป้าหมาย 30% หรือที่ 7.6 cm. ที่ความเร็วในการบันทึก 360 mm./h. เมื่อใช้การควบคุมแบบ On-Off ทั่วไป

การทดลองผลการตอบสนองของระบบเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ PI นั้น ผู้วิจัยได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PI ให้เป็นไปตามเงื่อนไขวิธี "Process Reactive Curve" ของ Ziegler-Nichols [15] และได้ทำการปรับละเอียด [17] อีกครั้งหนึ่งด้วยวิธีการลองผิดลองถูก ซึ่งผลการตอบสนองของระบบที่ได้แสดงในรูปที่ 5.73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



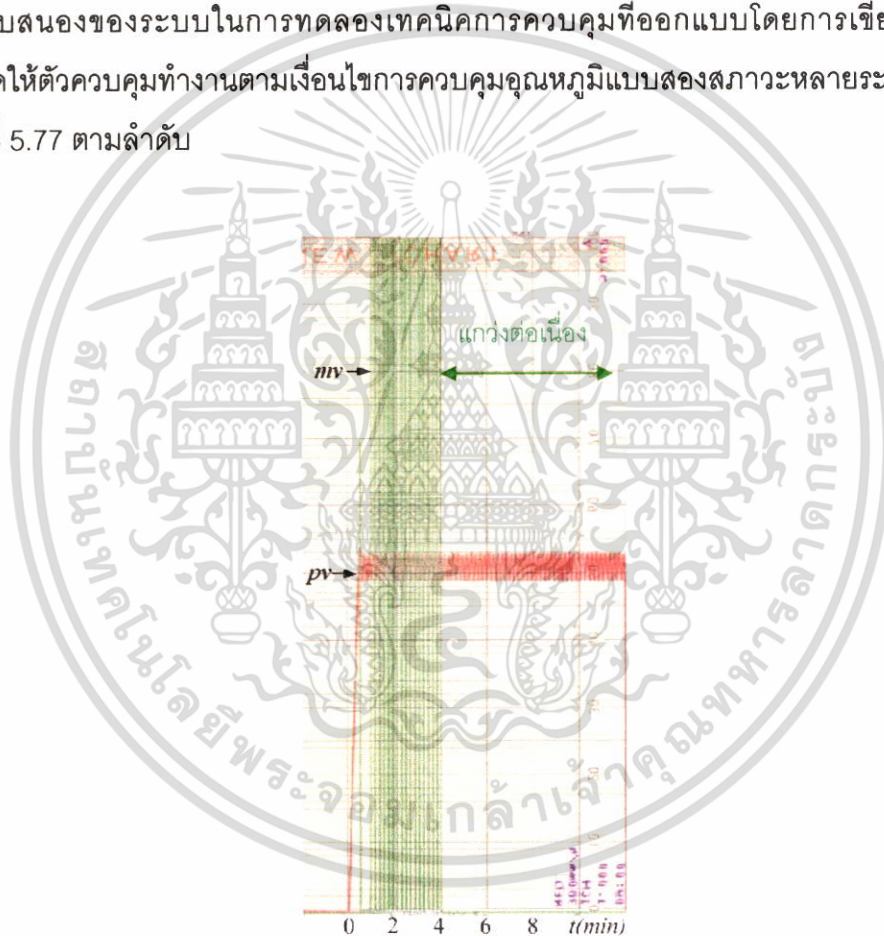
รูปที่ 5.73 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับของของเหลวที่เป้าหมาย 30% หรือที่ 7.6 cm. ที่ความเร็วในการบันทึก 360 mm./h. เมื่อใช้การควบคุมแบบ PI ตามวิธีของ Ziegler-Nichols ด้วยค่าพารามิเตอร์ $K_c = 1.57$ และ $T_i = 40$ sec.



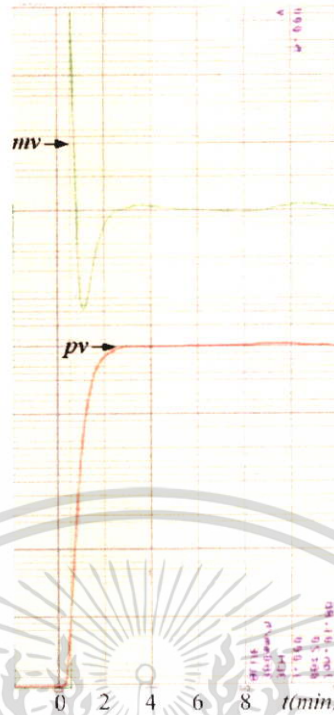
รูปที่ 5.74 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับของของเหลวที่เป้าหมาย 30% หรือที่ 7.6 cm. ที่ความเร็วในการบันทึก 360 mm./h. เมื่อใช้เทคนิคการควบคุมที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

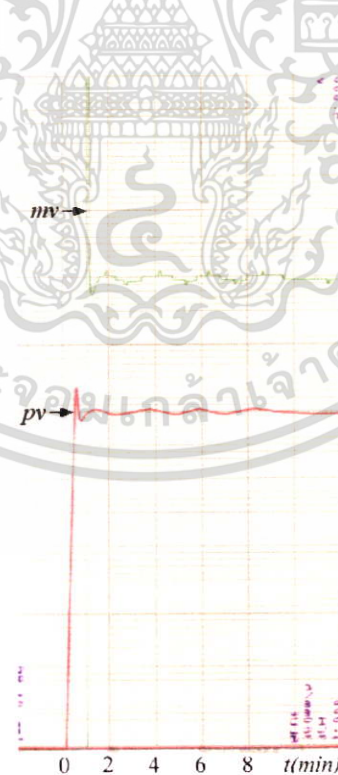
ผลการทดลองของเทคนิคการควบคุมที่นำเสนอจากการใช้ชุดทดลองภายใต้สภาวะการควบคุมระดับของของเหลวเปรียบเทียบกับตัวควบคุมกระบวนการชนิดอื่นๆ ที่ใช้ในปัจุบัน โดยตั้งค่าระดับของของเหลวเป้าหมายไว้ที่ 12.7 cm. หรือเป้าหมาย 50% ตามข้อมูลในตารางที่ 5.2 โดยตั้งความเร็วในการบันทึกผลตอบสนองทั้งหมดของกระบวนการไว้ที่ 360 mm./h. เพื่อให้สามารถอ่านค่าเวลาได้เฉลี่ยช่องละ 2 นาทีตามขนาดของกระดาษที่ใช้บันทึกผล (กว้างช่องละ 12.5 mm.) โดยใช้เส้นหมึกสีแดงแสดงระดับของของเหลวของกระบวนการและเส้นหมึกสีเขียวแสดงสัญญาณควบคุม ซึ่งในรูปที่ 5.75 แสดงผลการตอบสนองของระบบเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ On-Off ทั่วไป ในรูปที่ 5.76 แสดงผลการตอบสนองของระบบเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ PI และจากรูปที่ 5.65 ผลตอบสนองของระบบในการทดลองเทคนิคการควบคุมที่ออกแบบโดยการเขียนโปรแกรมกำหนดให้ตัวควบคุมทำงานตามเงื่อนไขการควบคุมอุณหภูมิแบบสองสภาวะหลายระดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.77 ตามลำดับ



รูปที่ 5.75 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับของของเหลวที่เป้าหมาย 50% หรือที่ 12.7 cm. ที่ความเร็วในการบันทึก 360 mm./h. เมื่อใช้การควบคุมแบบ On-Off ทั่วไป



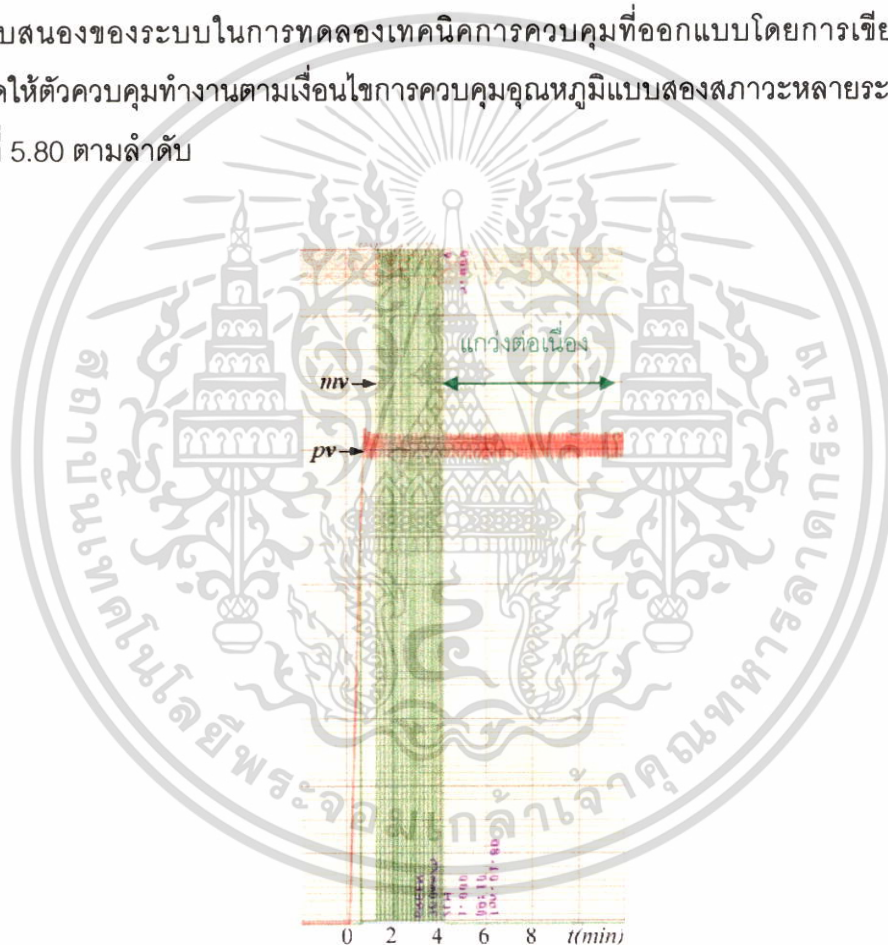
รูปที่ 5.76 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับของของเหลวที่เป้าหมาย 50% หรือที่ 12.7 cm. ที่ความเร็วในการบันทึก 360 mm./h. เมื่อใช้การควบคุมแบบ PI ตามวิธีของ Ziegler-Nichols ด้วยค่าพารามิเตอร์ $K_c = 1.57$ และ $T_i = 40$ sec.



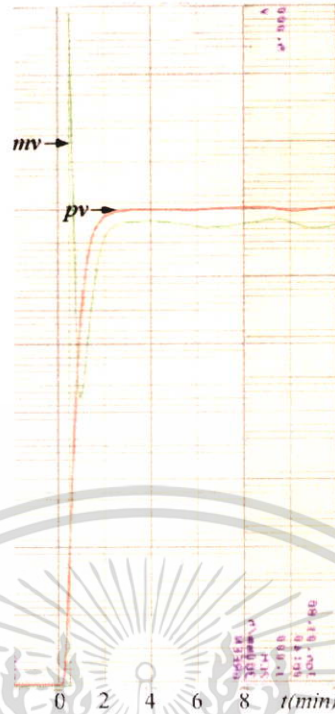
รูปที่ 5.77 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับของของเหลวที่เป้าหมาย 50% หรือที่ 12.7 cm. ที่ความเร็วในการบันทึก 360 mm./h. เมื่อใช้เทคนิคการควบคุมที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

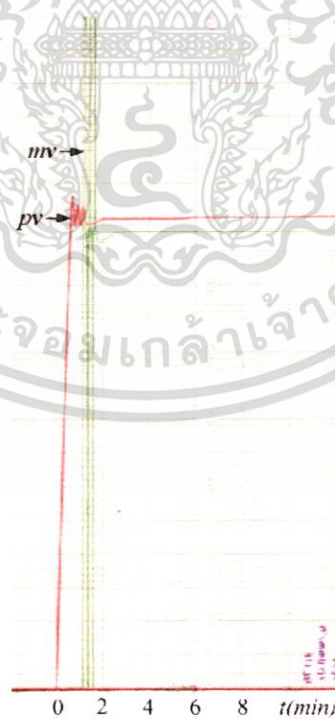
ผลการทดลองของเทคนิคการควบคุมที่นำเสนอจากการใช้ชุดทดลองภายใต้สภาวะการควบคุมระดับของของเหลวเปรียบเทียบกับตัวควบคุมกระบวนการชนิดอื่นๆ ที่ใช้ในปัจจุบัน โดยตั้งค่าระดับของของเหลวเป้าหมายไว้ที่ 17.8 cm. หรือเป้าหมาย 70% ตามข้อมูลในตารางที่ 5.2 โดยตั้งความเร็วในการบันทึกผลตอบสนองทั้งหมดของกระบวนการไว้ที่ 360 mm./h. เพื่อให้สามารถอ่านค่าเวลาได้เฉลี่ยช่องละ 2 นาทีตามขนาดของกระดาษที่ใช้บันทึกผล (กว้างช่องละ 12.5 mm.) โดยใช้เส้นหมึกสีแดงแสดงระดับของของเหลวของกระบวนการและเส้นหมึกสีเขียวแสดงสัญญาณควบคุม ซึ่งในรูปที่ 5.78 แสดงผลการตอบสนองของระบบเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ On-Off ทั่วไป ในรูปที่ 5.79 แสดงผลการตอบสนองของระบบเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ PI และจากรูปที่ 5.71 ผลตอบสนองของระบบในการทดลองเทคนิคการควบคุมที่ออกแบบโดยการเขียนโปรแกรมกำหนดให้ตัวควบคุมทำงานตามเงื่อนไขการควบคุมอุณหภูมิแบบสองสภาวะหลายระดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.80 ตามลำดับ



รูปที่ 5.78 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับของของเหลวที่เป้าหมาย 70% หรือที่ 17.8 cm. ที่ความเร็วในการบันทึก 360 mm./h. เมื่อใช้การควบคุมแบบ On-Off ทั่วไป



รูปที่ 5.79 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับของของเหลวที่เป้าหมาย 70% หรือที่ 17.8 cm. ที่ความเร็วในการบันทึก 360 mm./h. เมื่อใช้การควบคุมแบบ PI ตามวิธีของ Ziegler-Nichols ด้วยค่าพารามิเตอร์ $K_c = 1.57$ และ $T_i = 40$ sec.



รูปที่ 5.80 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับของของเหลวที่เป้าหมาย 70% หรือที่ 17.8 cm. ที่ความเร็วในการบันทึก 360 mm./h. เมื่อใช้เทคนิคการควบคุมที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.7 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเทคนิคการควบคุมแบบสองสภาวะหลายระดับ สำหรับการควบคุมอุณหภูมิ โดยประยุกต์ใช้กับตัวควบคุมที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ในการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิกับตัวควบคุมที่ต่างชนิดกัน จะเห็นว่าผลที่ได้จากตัวควบคุมแบบสองสภาวะหลายระดับมีผลตอบสนองของกระบวนการที่เรียบกว่าและมีการแกว่ง ณ สภาวะคงตัวที่ต่ำกว่าการควบคุมแบบ On-Off และการควบคุมแบบ Proportional ทั่วไป นอกจากนี้เทคนิคการควบคุมที่นำเสนอยังมีผลตอบสนองของกระบวนการที่เข้าสู่อุณหภูมิเป้าหมายได้เร็วกว่าการควบคุมแบบ PID ซึ่งเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิที่ออกแบบยังสามารถนำไปใช้งานได้จริงกับกระบวนการทางความร้อนที่ต้องการความเร็วในการเข้าสู่เป้าหมายเพื่อลดค่าเวลางาน โดยสามารถพิสูจน์ได้จากการทดลองอบอาหารที่อุณหภูมิสูงๆ ซึ่งผลการทดลองเป็นที่น่าพอใจเนื่องจากเทคนิคการควบคุมแบบสองสภาวะหลายระดับใช้เวลาในการอบที่น้อยกว่า ซึ่งหมายถึงพลังงานในการใช้งานที่น้อยกว่า และได้อุณหภูมิที่ค่อนข้างใกล้เคียงเป้าหมาย ทำให้ได้คุณภาพอาหารที่ตรงตามต้องการ ซึ่งน่าจะเหมาะกับร้านอาหารสะดวกซื้อที่จำหน่ายอาหารประเภทจานด่วน (Fast Food) ที่ต้องการเวลาในการผลิตอาหาร (Product Time) ที่เร็วและได้คุณภาพ และจากการทดลองนำเทคนิคการควบคุมแบบสองสภาวะหลายระดับไปออกแบบและประยุกต์ใช้ในการทดลองกับกระบวนการจำลองการควบคุมระดับของของเหลว ซึ่งเป็นระบบที่มีขนาดความจุ้น้อย โดยผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมที่ได้ยังคงเรียบกว่าและมีการแกว่ง ณ สภาวะคงตัวที่ต่ำกว่าการควบคุมแบบ On-Off ทั่วไป แต่ผลตอบสนองของกระบวนการก็มี Overshoot เกิดขึ้นในช่วงแรกเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามเทคนิคการควบคุมแบบสองสภาวะหลายระดับนี้ เป็นเทคนิคการควบคุมที่ให้ผลดีในระดับหนึ่งเท่านั้น โดยมีความเหมาะสมกับระบบควบคุมทางอุตสาหกรรมที่มีขนาดความจุที่ค่อนข้างมากหรือใช้เวลาในการเข้าสู่เป้าหมายที่นาน (โดยเฉพาะระบบควบคุมอุณหภูมิ) ซึ่งถ้าต้องการให้ผลตอบสนองของกระบวนการเป็นไปตามการอย่างแท้จริง ต้องทำการปรับละเอียดอีกครั้งหนึ่ง

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 บทสรุปและวิจารณ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาและวิจัยเพื่อออกแบบตัวควบคุมสำหรับการควบคุมอุณหภูมิให้สามารถควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการให้เข้าสู่เป้าหมายได้เร็วที่สุด และมีความใกล้เคียงอุณหภูมิเป้าหมายมากขึ้นกว่าการควบคุมแบบ On-Off และแบบ Proportional ทั่วไป โดยงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้พัฒนาและออกแบบตัวควบคุมแบบสองสภาวะหลายระดับ สำหรับการควบคุมอุณหภูมิเพื่อใช้เป็นตัวควบคุมอุณหภูมิที่เหมาะสมกับระบบควบคุมความร้อนที่มีขนาดใหญ่และมีค่าเวลาหน่วงที่มาก ให้เข้าสู่เป้าหมายที่ต้องการได้เร็ว และลดขนาดของการเกิดค่าพุ่งเกินและการแกว่งของอุณหภูมิจากการ On-Off ที่ 100% และ 0% ตลอดเวลา เพื่อเป็นทางเลือกใหม่แทนการควบคุมแบบ On-Off และการควบคุมแบบ Proportional ทั่วไปที่มีใช้ในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมในปัจจุบัน โดยมีหลักการทำงานของเทคนิคการควบคุมที่นำเสนอ คือ การนำค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างอุณหภูมิเป้าหมายกับอุณหภูมิของกระบวนการมาใช้ในการกำหนดระดับของสัญญาณควบคุมแบบ On-Off ที่เหมาะสม โดยอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์การ On-Off ของสัญญาณควบคุมได้ถูกกำหนดออกเป็น n ระดับ เมื่อสัญญาณความคลาดเคลื่อนออกห่างจากค่าศูนย์หรือค่าอุณหภูมิที่ต้องการ สัญญาณควบคุมจะมีอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์ On-Off ที่สูง ในทางตรงกันข้ามถ้าหากสัญญาณความคลาดเคลื่อนมีค่าใกล้กับค่าศูนย์ สัญญาณควบคุมจะมีอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์ On-Off ที่ต่ำตามหลักการพลังงานสมดุล ณ อุณหภูมิเป้าหมายจากการคำนวณไว้ล่วงหน้าตามหลักความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนกับพลังงานไฟฟ้าของการถ่ายเทความร้อนของกระบวนการ ซึ่งจำนวน n ระดับของการ On-Off ของสัญญาณควบคุมที่ออกแบบส่งผลโดยตรงต่อระดับความเรียบของผลตอบสนองของกระบวนการ กล่าวคือ ถ้าจำนวน n ระดับของการ On-Off ของสัญญาณควบคุมมีจำนวนที่มากหรือละเอียดขึ้นสัมพันธ์ตามอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการ ผลตอบสนองที่ได้จะเรียกว่าผลตอบสนองของกระบวนการจากการควบคุมที่ใช้จำนวน n ระดับของการ On-Off ของสัญญาณควบคุมที่น้อย และอาจไม่ต้องมีระดับสัญญาณควบคุมไบอัส (Bias) เพื่อแก้ปัญหาค่าแกว่งของผลตอบสนองของกระบวนการที่เกิดจากระดับการ On-Off ของสัญญาณควบคุมที่ไม่ละเอียดเพียงพอ

จากการทดลองเทคนิคการควบคุมแบบสองสภาวะหลายระดับไปประยุกต์ใช้กับตัวควบคุมที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ เพื่อทดลองกับกระบวนการจำลองการควบคุมอุณหภูมิ และกระบวนการจำลองการควบคุมระดับของของเหลว โดยทำการทดลองเปรียบเทียบผลตอบสนองของกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควบคุมกับตัวควบคุมที่ต่างชนิดกัน จะเห็นว่าผลที่ได้จากตัวควบคุมแบบสองสถานะหลายระดับมีผลตอบสนองของกระบวนการที่เรียกว่าและมีการแกว่ง ณ สถานะคงตัวที่ต่ำกว่าการควบคุมแบบ On-Off และการควบคุมแบบ Proportional ทั่วไป และยังมีผลตอบสนองของกระบวนการที่เข้าสู่เป้าหมายได้เร็วกว่าการควบคุมแบบ PID อย่างไรก็ตาม เทคนิคการควบคุมแบบสองสถานะหลายระดับนี้ ยังเป็นเทคนิคการควบคุมที่ให้ผลดีในระดับหนึ่งเท่านั้น เพราะในการใช้งานจริงอาจต้องทำการปรับละเอียดอยู่บ้าง และอาจไม่เหมาะสมในการใช้งานกับกระบวนการที่มีขนาดความจุ้น้อย หรือกระบวนการที่ต้องการความเที่ยงตรงที่สูงมาก

6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

การออกแบบตัวควบคุมแบบสองสถานะหลายระดับสำหรับการควบคุมอุณหภูมิในวิทยานิพนธ์นี้ มีข้อจำกัดในการออกแบบและทดลองถึงประสิทธิภาพของเทคนิคการควบคุมอยู่บ้างพอสมควร เช่น จำนวน n ระดับการทำงานของตัวควบคุมที่ผู้วิจัยสามารถออกแบบให้มีจำนวนระดับสัญญาณควบคุมแบบ On-Off ได้มากที่สุดเพียง 5 ระดับ ทั้งนี้เนื่องจากจำนวนบรรทัดในการโปรแกรมเงื่อนไขการทดลองที่มีจำนวนเพียงจำกัด (99 บรรทัด) [14] ตามฟังก์ชันการใช้งานของตัวควบคุมที่สามารถแสดงค่าและโปรแกรมได้ (SLPC) ที่ใช้ในการทดลองในรุ่นนั้นๆ และเมื่อทำการทดลองโดยการเปลี่ยนระดับเป้าหมายต่างๆ ก็จำเป็นต้องทำการโปรแกรมให้ตัวควบคุมใหม่ตามการออกแบบในสถานะสมดุลที่อุณหภูมิเป้าหมายนั้นๆ เสมอ ซึ่งถ้าหากสามารถออกแบบโดยใช้ตัวควบคุมที่สามารถแสดงค่าและโปรแกรมได้ที่มีจำนวนบรรทัดในการเขียนโปรแกรมที่มากขึ้น ก็สามารถทำการทดลองโดยการโปรแกรมให้ตัวควบคุมมีจำนวนระดับสัญญาณควบคุมแบบ On-Off ได้มากขึ้น และตัวควบคุมสามารถจ่ายระดับสัญญาณควบคุมแบบ On-Off ได้ตามอุณหภูมิเป้าหมายต่างๆ ตามที่ได้คำนวณระดับสัญญาณควบคุมในสถานะสมดุลที่อุณหภูมิเป้าหมายต่างๆ ให้ครอบคลุมช่วงการใช้งานได้โดยไม่ต้องทำการโปรแกรมข้อมูลใหม่ ซึ่งจะทำให้ตัวควบคุมที่ใช้เทคนิคการควบคุมแบบสองสถานะหลายระดับนี้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

เนื่องจากเทคนิคการควบคุมแบบสองสถานะหลายระดับนี้มีหลักการทำงานที่ง่าย คือ การนำค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างอุณหภูมิเป้าหมายกับอุณหภูมิของกระบวนการมาใช้ในการกำหนดระดับของสัญญาณควบคุมแบบ On-Off ที่เหมาะสม ดังนั้นจึงสามารถประยุกต์ใช้หลักการของเทคนิคการควบคุมนี้ไปออกแบบวงจรจ่ายระดับสัญญาณควบคุมได้ โดยใช้อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่มีคุณสมบัติในการเปรียบเทียบค่าความแตกต่างระหว่างระดับสัญญาณของกระบวนการกับค่าเป้าหมาย เพื่อทำการจ่ายระดับสัญญาณควบคุมมาตรฐานแก่อุปกรณ์ควบคุมขั้นสุดท้ายของระบบหรือชุดควบคุมเฟสเพื่อปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับป้อนเข้าชุดลดความร้อน แทนตัวควบคุมเชิงพาณิชย์ที่มีราคาแพงได้ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Yoneya A., Kondo T., Hashimoto Y., and Togari Y. "Two-Valued PID Controller." IEEE Transactions on Industrial Electronics., Vol. 45, No.1, Feb 1998. pp. 183-184.
- [2] Golob M., Tovornik B., Donlagic D. "Comparison of the Self-Tuning On-Off Controller with the Conventional Switching Controllers." First IEEE Conference On Control Application., Sep 1992. pp. 962-963.
- [3] Huang X., Richard D. Benton. "Computer-Based Temperature Controller in an Energy-Conservative Manner." IEEE Southeastcon'94., Creative Technology Transfer-A Global Affair., Proceedings of the 1994 IEEE, Apr 1994. pp. 465-469.
- [4] Erickson C. James. **Handbook of Electrical Heating for Industry**. New York : IEEE, Inc. 1995.
- [5] Sugimoto K. Chief Engineer. **Energy Saving in Industry**. 19th Edition. Technological Promotion Association (Thai-Japan). : Teijin Engineering Ltd. May 1982.
- [6] Edneral, F. P. **Electrometallurgy of Steel and Ferro-alloys**. Vol. 1 1st Edition. Mir Publishers Moscow, 1979.
- [7] Davies J. and Simpson P. **Induction Heating Hand Book**. 1st Edition. : McGraw-Hill Companies, Inc., 1979.
- [8] Holman, J.P. **Heat Transfer**. 7th Edition. Singapore : McGraw-Hill, Inc., 1992
- [9] Kreith F. and Mark, S. Bohn. **Principle of heat transfer**. 5th Edition. New York : PWS Publishing Company, 1997.
- [10] Kakac S. and Yener Y. **Convective Heat Transfer**. 2nd Edition. Florida : CRC Press, Inc., 1995
- [11] Yanus, A. Cengel. **Heat Transfer**. 2nd Edition. New York : McGraw-Hill Companies, Inc., 2003
- [12] Rashid, M. H. **Power Electronics Circuit, Device, and Application**. 2nd Edition. New Jersey : Prentice-Hall, Inc., 1993.
- [13] Mohan N., Undeland, T. M. and Robbins, W. P. **Power Electronics**. 3rd Edition. : John Wiley & Sons, Inc., 2003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] Yokogawa Electric Cor., **Technical Information: YS170 Programmable Type Programming Functions**. 1st Edition. 1992.
- [15] Ziegler, J.G. and Nichols, N.B. "Optimum Settings for Automatic Controllers." Transactions of the A.S.M.E., Vol.64, November 1942. pp. 759-768.
- [16] Zhuang M. and Atherton, D.P. "Automatic Tuning of Optimum PID Controllers." IEEE Proceedings-D, Vol.140, No.3, May 1993. pp. 216-244.
- [17] Okata M. **Modern Control Engineering**. 3rd Edition. : Prentice-Hall, Int., 1997. pp. 670-679. 1997.
- [18] Sangjeen N., Chaikla A., Pannil P. and Julserrewong P. "A Design of Two-mode Controller Using PC-based Lookup Table Technique and PID Control Algorithm." ICCAS 2002, Proceeding of the 2002 International Conference on Control, Automation and Systems, Korea, pp.412-417.
- [19] Archie Culp Jr. W. **Principles of Energy Conversion**. McGraw-Hill Book Company, 1996





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

n-Steps On-Off Temperature Controller

Songwut Khwanjai, Pittaya Pannil, Dolchai Sookcharoenphol,
Thanit Trisuwannawat, and Prasit Julsereewong

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 an n-steps on-off controller to maintain the desired temperature of the thermal process. The proposed technique is simple and convenient to implement based on the programmable commercial controller. The thermal plant model is experimented to observe the performances of the proposed controller. The experimental results included demonstrate the good performance of the proposed controller.

Keywords: on-off control, temperature control, feedback control, thermal process

1. INTRODUCTION

The temperature control of the thermal process is the important in industrial systems. In general, the temperature control must be investigated on a case by case basis to achieve the good control performance. Three widely used methodologies are two-position (on-off), time proportional (throttling), and Proportional-Integral-Derivative (PID) algorithm [1]-[2]. The PID algorithm is suitable for the systems having small mass or small capacity. It provides the high precision and stable control. However, the long rise time may be obtained from this conventional control. The on-off and time proportioning controls are the most common methods and used when the mass of the system is so huge causing the extremely slowly changes in temperature. In addition, the large overshoot and the offset obtained from the on-off control and the proportioning action occur within a proportional band around the desired temperature or set point [3]. The time proportional control methodology may require an operator to make a small manual adjustment to bring the temperature to the desired temperature at the initial state. To eliminate the overshoot and reduce the offset associated with on-off and proportional controls, the multiple step operations on-off controller is proposed in this paper.

This paper aims to design the n-step on-off controller for temperature control, which is based on the use of the commercial controller, Yokogawa Electric corporation's Single Loop Programmable Controller (SLPC) [4]. The performances of the proposed temperature controller were observed using the experimental thermal plant model at Process Control Lab, KMITL, Thailand. The experimental results included demonstrate the good performance of the proposed controller

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.

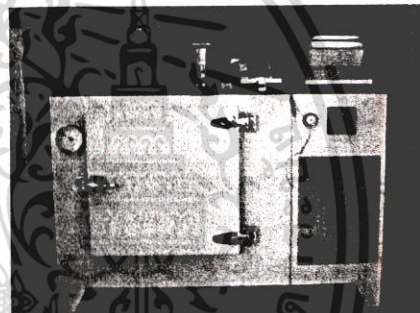


Fig. 1 The studied thermal plant model

The feedback control scheme works as follows: the output temperature or controlled variable $T_{om}(t)$ is measured by 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 to generate an output signal or manipulated variable $mv(t)$, on the basis of the error or difference between the measurement 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 $v_p(t)$ in proportional to the controller output signal $mv(t)$, where the electric voltage is varied from 0 to 220V_{ac}. Thus, the generated heat $T_i(t)$ is a function of the supplied electric voltage $v_p(t)$.

3. THE PROPOSED CONTROLLER

3.1 Design of the proposed controller

Fig. 3 shows the block diagram of the proposed controller. The design of proposed controller based on the use of the programmable commercial controller as SLPC can be explained as follows.

The rate percent on-off of manipulated signal is assigned to each step, where the number of step operations n depend on the characteristic of temperature control system and the desired precision. The temperature deviation or error signal is

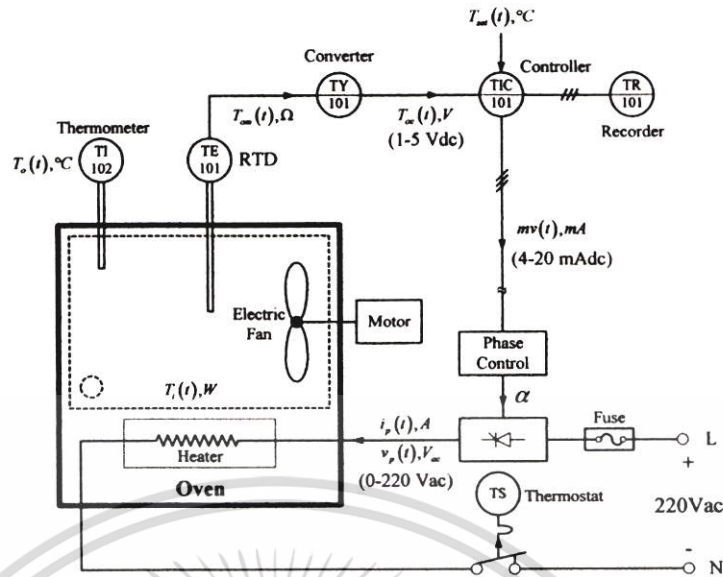


Fig. 2 Temperature feedback control loop

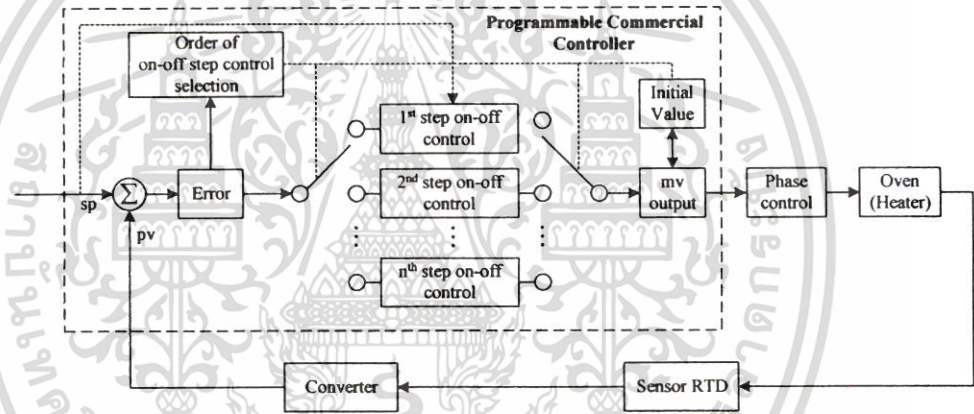


Fig. 3 Block diagram showing the proposed technique

used to decide the suitable rate percent on-off of manipulate signal. When the error signal is further from the desired temperature or set point, the manipulated signal is high rate percent on-off. On the contrary, if the error signal is near the set point, the manipulate signal is low rate percent on-off.

The temperature control system must be investigated on a case by case to provide the output temperature at its set point.

The appropriate manipulated signal to control the temperature was determined by the thermodynamic principles of heat transfer [5]. 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

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

Where:

- Q is the heat transfer rate (W)
- h is the heat transfer coefficient (W/m².K)
- A is the surface area of the medium (m²)

T_w is the temperature of the heating element (°C or K)

T_b is the temperature of the surrounding fluid (air) (°C or K)

The enclosure of studied heater is stainless steel, thus the heat transfer coefficient h is approximately 3.7 W/m².K. The surface area of the medium A assuming a free-standing enclosure is about 3.7m². The temperature of the surrounding fluid or the ambient temperature is about 27°C or 300K. Substituting these values into the Eq. (1), the heat transfer rate can be written as

$$Q = 13.69(T_w - 300)$$

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

$$T_w = \frac{Q}{13.69} + 300$$

From section 2, the operation of the studied convection oven is based on the electric current passing through the oven heater, thus generated 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 (Ω), 23.4 Ω 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 $T_o(t)$ 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 2nd to 5th columns are measured values from the experimental plant model in Fig. 1, while the data in 6th to 8th columns are calculated from Eqs. (2)-(5).

From data in Table 1, Fig. 4(a) and Fig. 4(b) show the comparisons between the values, P and Q, T_{meas} and T_{cal} , respectively. Where the percentage of manipulated signal is varied from 0 to 100. It should be noted that the number of step operations n of the proposed technique can be considered based on the characteristics of thermal process as shown in Fig 4.

In this paper, the number of step operations n is equal to 5, which are 0% - 100%, 0% - 90%, 0% - 80%, 0% - 70%, and 0% - 60% of on-off manipulate signals. The high error signal (0% < e < 2%) during the first step causes the 100% on-off manipulate signal, while the low error signal (0% < e < 2%) during the fifth step causes only 60% on-off control signal. The proposed technique can be graphically displayed by the following flowchart as shown in Fig.5.

Table 1 The experimental thermal process data

mv (%)	Measured Voltage [v_p] (V)	Measured Current [i_p] (A)	Measured Temperature [T_{meas}] (C)	Measured Temperature [T_{meas}] (K)	Calculated Generating Heat P (W)	Calculated Heat Transfer Rated Q (W)	Calculated Temperature [T_{cal}] (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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

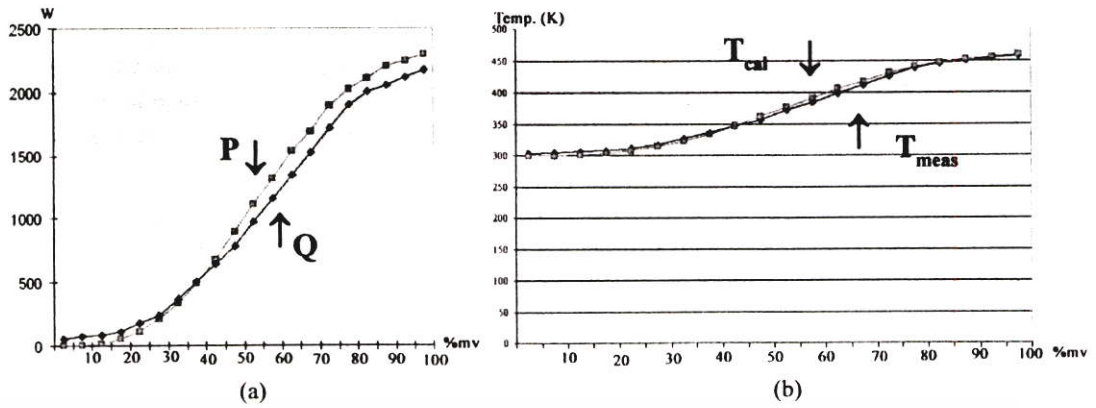


Fig. 4 The comparison of Lookup table data as shown in Table 1
 (a) the comparison between the values of P and Q
 (b) the comparison between the values of T_{meas} and T_{cal} (K)

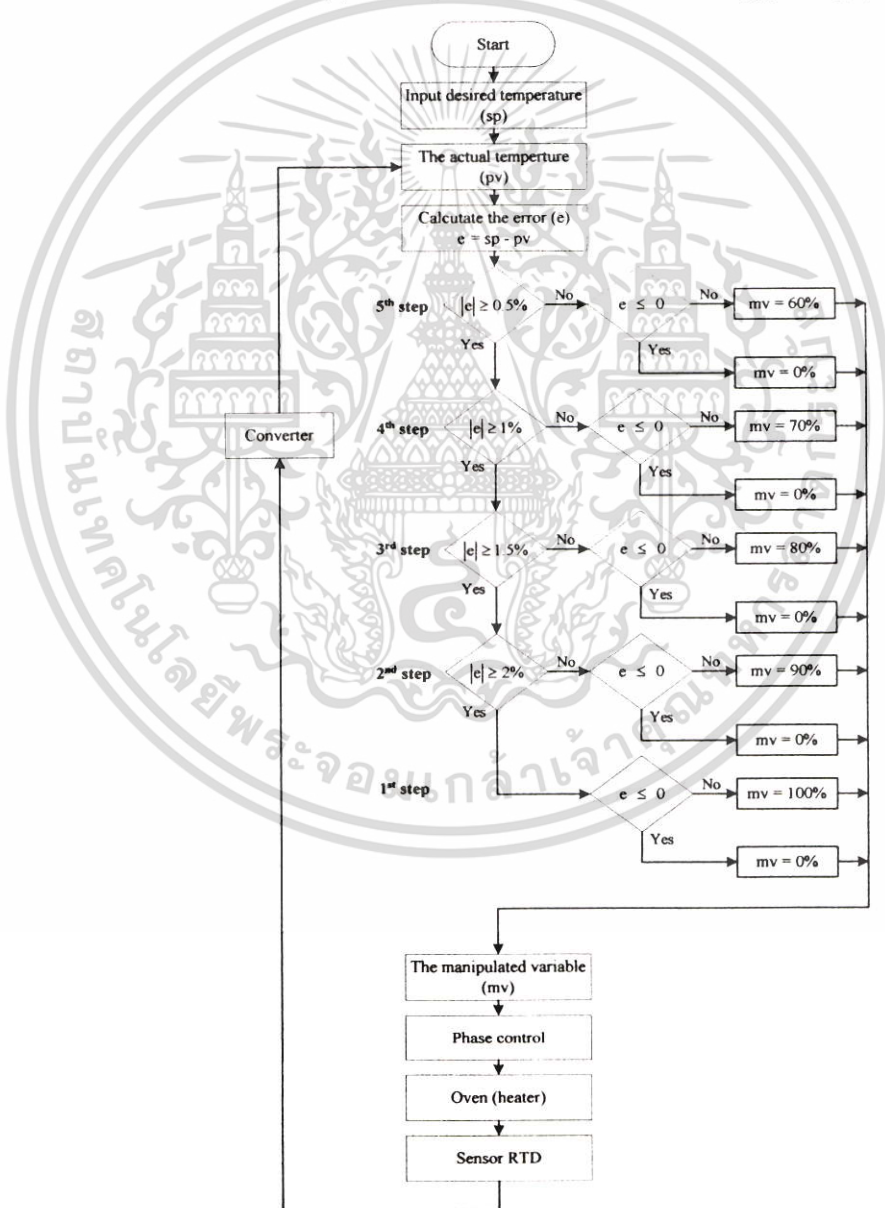


Fig. 5 Flowchart of temperature control

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 120°C. Fig. 6 - Fig.8 show the step responses based on the use of the conventional on-off control, the P-type control, and the proposed technique.

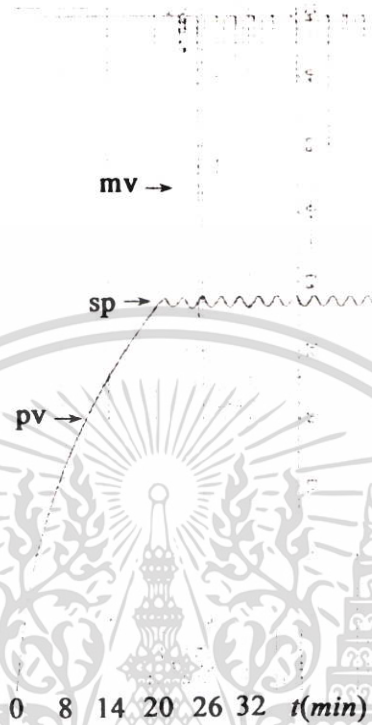


Fig. 6 Experimental result using on-off control

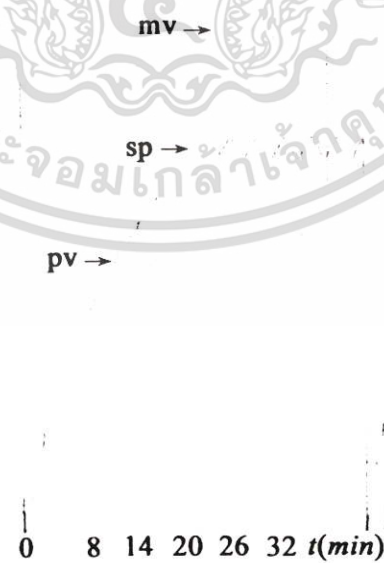


Fig. 7 Experimental result using the P-type control

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

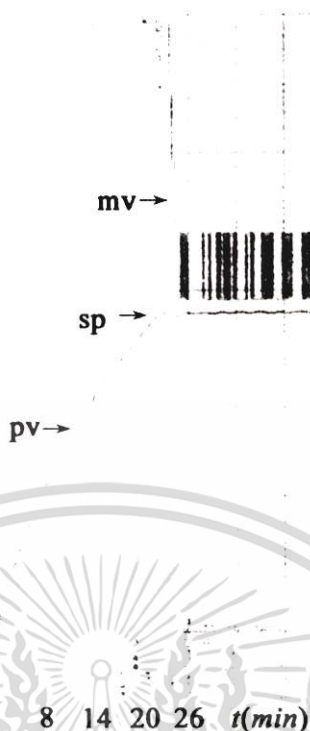


Fig. 8 Experimental result using the proposed technique

From the experimental-results comparison, it is clearly seen that the five steps on-off controller outperforms that using only the on-off and proportional control and the P-type control. That is, the response has more smoothness and lowest oscillator during steady state.

5. CONCLUSION

This paper described the design of n-steps on-off controller. The proposed controller is simple and convenient to design based on the use of the programmable commercial controller. The experimental results demonstrating that the proposed controller has sufficient performances for temperature control system.

REFERENCE

- [1] A. Yoneya, T. Kondo, Hashimoto Y., and Y.Togari, 'Two-valued PID controller', *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 45, No.1, pp. 183-184, Feb. 1998
- [2] Marjan Golob, Boris Tovornik, Dali Donlagic, "Comparison of the self-tuning on-off controller with the conventional switching controllers", *First IEEE Conference On Control Application*, pp. 962-963, Sep 1992.
- [3] Xinjie Huang and Richard D.Benton, 'Computer-based temperature controller in an energy-conservative manner', *IEEE Southeastcon'94.* Creative Technology Transfer-A Global Affair., Proceedings of the 1994 IEEE, pp. 465-469, Apr 1994
- [4] Yokogawa Electric Cor., "Technical Information: YS170 Programmable Type Programming Functions", 1st Edition, 1992
- [5] Frank Kreith and Mark S. Bohn, *Principle of heat transfer*, St.Paul, MN West, c1993



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ตัวควบคุมที่สามารถแสดงค่าและโปรแกรมได้ (SLPC)



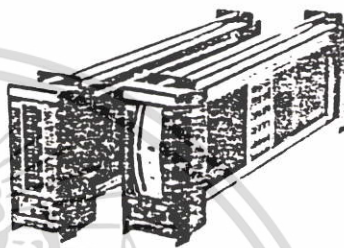
YEW SERIES 80

Model SLPC

PROGRAMMABLE INDICATING CONTROLLER

The SLPC Programmable Indicating Controller is a micro-processor-based, user-programmable instrument which allows powerful computational functions to be combined with control functions.

- This controller will satisfy a wide variety of requirements, not just simple PID control or control with compensation – one SLPC can replace two conventional controllers in applications such as cascade loops, high or low autoselector control.
- Non-interacting PID settings: drift-free manual control.
- The front panel operation (setting set point, manipulating manual output, etc.) is identical to that of the SLCD Indicating Controller, and resembles that of conventional analog controllers.
- The user can construct his own algorithms (using a library of functions as building blocks).
- Incorporates self diagnostics, I/O signal level checks.
- Options such as remote setting, feedforward control, dead time compensation and output tracking are supported.
- Communication functions allow the SLPC controller to be used with a central CRT-display operator's console or supervisory computer.



Fail Output Signal: 1 point

Transistor Contact Rating: 30 V DC, 200 mA (resistive load) (Contact open during power failure).

Note: Analog I/O signals are not isolated from each other, but use a common negative line and are isolated from power supply. Contact I/O signals are each isolated from other internal circuitry and power supply.

STANDARD SPECIFICATIONS

Input/Output Signals

Analog Input/Output Signals:

Analog Inputs	1 to 5 V DC	5 points Input resistance 1 M Ω
Analog Outputs	1 to 5 V DC	2 points Load at least 2 k Ω
Manipulated Output Signal	4 to 20 mA DC	1 point Load up to 750 Ω

Input Conversion Accuracy: $\pm 0.2\%$ of span.

Output Conversion Accuracy:

For current output, $\pm 1\%$ of span.For voltage output, $\pm 0.3\%$ of span.

Contact Input Signals: 3 points (contact status may be read by program). Contact or voltage signals.

Input	Input status – ON	Input status – OFF
Contact*	Contact closed – source up to 200 Ω	Contact open – source at least 100 k Ω
Voltage	Low: -1 to +1 V	High: +4.5 to 25 V

* Contact rating at least 5 V DC, 20 mA

Contact Output Signals: 3 points (contact status may be changed by program).

Transistor Contact Rating: 30 V DC, 200 mA (resistive load).

On: Contact closed. Off: Contact open.

Indicators

Process Variable & Set Point Indicators: Moving coil meter, or fluorescent bar graph display. Vertical scale.

Common Specifications:

Indication Range: 0 to 100%.

Scale: 100 mm long, interchangeable.

Scale Marking: Single scale with units marking. Major divisions are marked.

Moving Coil Version: Dual index (dual pointer) meter.

Index Color: Process variable – red, Set point – blue.

Indicator Accuracy: $\pm 0.5\%$ of span.

Fluorescent Bar Graph Version: ---

Bar Graph Resolution: 1% of span (101-segments)

Process Variable Indicator: Bar graph

Set Point Indicator: Bright cursor

Digital Display: 4-digit display of process variable or

set point (selected by side-panel switch – process variable normally displayed). Linear display in

engineering units, range -1999 to 4999.

Display Accuracy: $\pm 0.5\%$ of span ± 1 digit.

Output Indicator: Moving coil type, with two memory indexes for limits and with valve open/close marks. Horizontal scale.

Scale: 39-mm scale with 20 equal divisions.

Indicator Accuracy: $\pm 2.5\%$ of span.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ตัวควบคุมที่สามารถแสดงค่าและโปรแกรมได้ (SLPC) (ต่อ)

2

Mode Transfer: By Cascade (C)/Auto (A)/Manual (M) switches on front panel. Mode indicator lamp is built into each switch button. Mode can also be changed under program control or remotely (SICU/UFCU required – see “Communications Functions” below). Transfers between cascade, auto and manual modes are bumpless and balanceless.

Set Point: Manual, Cascade or Remote setting (side panel switch selects whether the set point comes from analog input or via communications bus – see “Communications Functions” below). Manual SET buttons (on front panel) vary set point at rate 40 sec./full scale.

Manual Output: Set by two-speed lever action.

SLOW: 40 seconds/full scale.

FAST: 4 seconds/full scale.

Setting Computational Coefficients/Parameters & Selecting Display Data: Uses a 16-key keypad on the tuning panel (side panel). A side-panel switch enables/inhibits parameter changes. Communication functions available for remote setting (see below).

Side Panel Digital Display:

Parameter or Data Label: 3-digit alphanumeric.

Parameter or Data Value: 4-digit numeric.

Input data and some variable parameters are in engineering units (but units are not displayed).

Control Functions

The control functions are decided by “interconnection” of software modules in the controller. One of three control modules may be selected:

Basic Control Module: A single control module.

Cascade Control Module: Two control modules connected in cascade. One SLPC controller can implement a cascade loop.

Signal Selector Control Module: Two control modules connected in parallel. One SLPC controller can implement an autoselector control loop.

Control Elements: A control module comprises one of three control elements: Basic PID control element, Sample-and-hold control element or PID control element with batch switch. These control elements, described below, may contain the following common functions: output tracking, manipulated value output limiter and process variable limit alarms (–6.3 to 106.3%), deviation (0 to 100%) and velocity limit alarms, non-linear control (dead band gain: 0 to 1.0, dead band width: 0 to 100%). In addition to control elements, a variety of computational functions (described below) may be used.

Basic PID Control Element (with or without non-linear band):

P (Proportional band): 6.3 to 999.9%.

I (Integral time): 1 to 9999 seconds.

D (Derivative of process variable) – (Derivative time): 0 to 9999 seconds.

Scan and Control Period: 0.2 seconds.

PID Control Element with Batch Switch: When the control deviation exceeds a preset band – e.g. during startup – a fixed (preset) value is output. When the deviation decreases to within the preset band, a bias is added to or subtracted from the output (depending whether the control action is direct or reverse) and the controller switches to PID control. Control does not revert from PID to manual control unless the deviation exceeds (deviation set point + lockup band).

High or low limit batch control may be selected.

Deviation Set Point: 0 to ±100%.

Bias Set Point: 0 to 100%.

Lockup Band: 0 to 100%.

The PID parameters and scan/control period are the same as for basic control (above).

Sample-and-Hold PI Control Element: The control algorithms are executed after each input scan cycle, and the output is then held constant (until after the following scan). This is useful for processes with dead time.

Sample Period: 0 to 9999 seconds.

Control Period: 0 to 9999 seconds.

The PI parameters and scan period are the same as for basic control (above).

Computational Functions

Function	Function name	Max no of times function may be used in program
General Functions	Addition, Subtraction	–
	Multiplication, Division	–
	Magnitude (absolute value)	–
	Square root	–
	High selector, Low selector	–
	High limiter, Low limiter	–
	10-segment transfer function (break points user-definable) (two functions)	–
	High limit alarms	4
	Low limit alarms	4
	First order lag	8
First order lead	2	
Dead time and velocity computations	3 total	
Velocity limiter	6	
Timers	4	
Pulse rate output	2	
Logical Functions	AND, OR, NOT	–
	CMP (compare greater than or equal)	–
	Branching, Conditional branching	–
	Signal switching	–

Note: Where limits are indicated by a dash “–” above, this means that there is no preset limit.

ภาคผนวก ข.

ตัวควบคุมที่สามารถแสดงค่าและโปรแกรมได้ (SLPC) (ต่อ)

3

(Complete) values indicate sensor parameters (preset by user):

16 registers for general use, plus 22 for 10-segment line-segment functions.

Constants: 16.

Temporary Registers: 4.

Programming

No. of Program Steps: 99 (control instructions, arithmetic functions and data read/write instructions each take one step).

Programming: The SPRG Programmer is connected, and the program is entered using a calculator-like language. The completed program is written to UV EPROM (Erasable Programmable Read Only Memory).

Communication Functions

Communication with operator's console and supervisory computer via Interface Unit (SICU) or Field Control Unit (FCU). Max. distance between SICU/FCU and SLPC: 100 m.

Data Transmitted: Process variable*, set point*, manipulated output, instrument mode, output limits, PID constants*, variables (2), analog data (3 items).

Data with Remote Setting: Set point*, manipulated output, instrument mode, output limits, PID constants*, variables (2). A side-panel switch enables, inhibits both remote and local parameter changes.

* For a cascade controller or where selector functions are involved, these apply to the primary loop.

Backup Mode Selection: If the communications or supervisory computer systems fail, the YewSeries 80 system reverts to backup mode. Either auto or manual backup modes can be selected using a side-panel switch.

Power-Fail/Restart Functions

For a Power Failure of up to Approx. 2 Seconds: Status prior to power failure retained.

For a Power Failure Longer than Approx. 2 Seconds: Restart mode can be selected from the following by a switch on the side panel –

HOT (Computational data and status prior to power failure preserved).

COLD (Status reset to manual mode, manipulated variable output set to low limit (-6.3%). Computational functions are initialized and temporary registers reset to 0).

Data Memory Backup during Power Failure: By internal battery.

Life of Backup Battery (temperature up to 45°C):

At least 5 years (normal operation).

At least 1 year (backup operation)

Self-Diagnostic Features

Computation and Control Abnormalities: "FAIL" lamp lights, "FAIL" contact output opens. ("FAIL" contact also opens during power failure). Manual operation is possible.

Input/Output Signal Abnormalities (Input overflow, current output wire open circuit, computational overflow): "ALM" lamp lights.

Memory Backup Battery Low: "ALM" lamp flashes.

Communications Abnormal: "C" lamp flashes (during communications).

For diagnostic purposes, numeric error codes corresponding to faults can be displayed on side panel display.

Normal Operating Conditions

Ambient Temperature: 0 to 50°C.

Ambient Humidity: 5 to 90% Relative Humidity (non-condensing).

Power Supply: AC or DC. (No change to instrument)

DC supply: 20 to 130 V, polarity reversible.

AC supply: 30 to 128 V, 47 to 63 Hz.

Maximum Power Consumption:

Maximum Current Consumption: 370 mA (with 24 V DC supply). With fluorescent bar graph indicator, 150 mA higher.

Maximum Power Consumption: 15 VA (with 100 V AC supply). With fluorescent bar graph indicator, 6 VA higher.

Insulation Resistance:

Between I/O Terminals and Ground: 100 MΩ/500 V DC.

Between Power and Ground: 100 MΩ/500 V DC.

Dielectric Strength:

Between I/O Terminals and Ground: 500 V AC for 1 minute.

Between Power and Ground: 1000 V AC for 1 minute.

Wiring:

Signal Wiring to/from the Field: ISO M4 size (4 mm) screws on terminal block.

Power and Ground Wiring: Two-pole plug with earthing contact (IEC A5-15, UL 498, JIS C8303: 125 V, 15 A) and 30-cm cord.

Mounting: Flush panel mounting. Instruments are in housings, and may be mounted individually or side-by-side.

Instrument may be inclined with front up to 75° from vertical (rear of instrument lower than front) (Indicator zero may need readjustment).

Nameplate: Size 8 x 63.3 mm, cream semi-gloss finish. Lettering: In black, one or two rows each up to 34 alphanumeric characters long.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ตัวควบคุมที่สามารถแสดงค่าและโปรแกรมได้ (SLPC) (ต่อ)

Bezel: Aluminium diecast, black baked-enamel finish
 Housing: Open front; connector for SPBD portable manual station.
 Housing Dimensions: 182.5 (H) x 87 (W) x 480 (D) depth behind panel) (mm).
 Weight:
 Controller less Housing: 3.3 kg
 Housing: 2 kg (excluding mounting kit)

OPTIONS

- /SPR: Controller supplied with standard program configuration (see TI 1B4C2-02E for programs available)
- /NPR: Controller supplied unprogrammed (with blank EPROM). The user can write a program to EPROM using the SPRG Programmer.
- /MTS: Controller supplied with kit for individual mounting. For mounting in groups, see GS 1B411-1.
- /SCC/M: Mounting kit bezel color change from standard color (black) to other color from set of optional colors (see GS 22101E1-E). Bezel color code in space □.
- /NH: No housing, instrument only. See GS 1B411-E to order housing separately.
- /NP: With marking on front panel nameplate.

SPARE PARTS SUPPLIED

1 A fuse, quantity one

MODEL & SUFFIX CODES

Model	Suffix codes	Style	Option codes	Description
SLPC				Programmable Indicating Controller
Indicator	-1			Moving coil version
	-2			Fluorescent bar graph version
Communica-tions functions	0			None
	1			With communication functions
		0		Always 0
Style code		*A		Style A
Options		/SPR		With standard program
		/NPR		Unprogrammed
Common options		/MTS		With mounting kit
		/SCC		Bezel color change
		/GOM		
		NH		Without housing
		NP		With nameplate marking

TERMINAL CONNECTIONS

Terminal Designation	Description	Terminal Designation	Description
1	Analog input 1	19	Contact output 3
2	Analog input 1	20	Fail (negative terminal)
3	Analog input 2	21	Analog output 1 (1/2) (current output)
4	Analog input 2	A	Analog output 2
5	Analog input 3	B	Analog output 3
6	Analog input 3	C	Analog output 1
7	Analog input 4	D	Analog output 2
8	Analog input 4	E	Analog output 3
9	Analog input 5	F	Contact output 1
10	Analog input 5	G	Contact output 2
11	Contact input 1	H	Contact output 1
12	Contact input 1	J	Contact output 2
13	Contact input 2	K	Contact output 1
14	Contact input 2	L	Contact output 2
15	Contact input 3	M	Fail (positive terminal)
16	Contact input 3	N	
17	Communications (1)		
18	Communications (1)		

Notes: *1 Use shielded twisted-pair cable (SCCD, see GS 34B5K3-02E)
 *2 If these terminals are not used, connect them together

ORDERING INSTRUCTIONS

- Specify the following when ordering:
1. Model, suffix and option codes.
 2. Main scale and engineering units marking (see GS 22101E1-E).
 3. Nameplate marking, if required (option /NP).
 4. Mounting kit (option /MTS), if the instrument is to be mounted individually.
 5. Program code, if a standard program or special user's program is required.
 6. Fill out program worksheets if a special user's program is required.

RELATED EQUIPMENT

Related Instruments
 Model SPRG Programmer See GS 1B4W1-E
 Model SICU Interface Unit See GS 34B5C2-21E
 Model UFCU Field Control Unit See GS 34B5C2-01E

Related Spare Parts
 User's EPROM Part No. G9003LT
 Memory Backup Battery Part No. E9711DH

GS 1B4C2-E

Subject to change without notice



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

โปรแกรมที่ใช้ในการทดลองของตัวควบคุมที่สามารถแสดงค่าและโปรแกรมได้ (SLPC)

Main program of 5 steps On-Off for temperature control

1. LD A15 ; load process variable (pv)
2. LD A12 ; load setpoint value (sp)
3. - ; $dv = pv - sp$
4. ST T01 ; store input error (dv)
5. ABS ; absolute error
6. ST T02 ; store error $|dv|$
7. LD K01 ; set limit error (%) of step 5
8. LD T02 ; load error (absolute)
9. CMP ; compare absolute error value with limited error of step 5
10. NOT ; negative output
11. GIF 22 ; jump to step 4 if $S1 = 1$
12. LD T01 ; load error
13. LD K10 ; set error value (0)
14. CMP ; compare error value with limited error (0)
15. GIF 19 ; jump to output bias ($mv = bias\%$) if $S1 = 1$
16. LD K05 ; set output ($mv \%$) of step 5
17. ST A09 ; output of step 5 ($mv = step\ 5 \%$)
18. GO 76 ; run
19. LD K12 ; set output bias of step 5
20. ST A09 ; output of step 5 ($mv = bias \%$)
21. GO 76 ; run
22. LD K02 ; set limit error (%) of step 4
23. LD T02 ; load error (absolute)
24. CMP ; compare absolute error value with limited error of step 4
25. NOT ; negative output
26. GIF 37 ; jump to step 3 if $S1 = 1$
27. LD T01 ; load error

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมที่ใช้ในการทดลองตัวควบคุมที่สามารถแสดงค่าและโปรแกรมได้ (SLPC) (ต่อ)

28. LD K10 ; set error value (0)
29. CMP ; compare error value with limited error (0)
30. GIF 34 ; jump to output 0 ($mv = 0\%$) if $S1 = 1$
31. LD K06 ; set output (%) of step 4
32. ST A09 ; output of step 4 ($mv = \text{step } 4\%$)
33. GO 76 ; run
34. LD K10 ; set mv value (0 %)
35. ST A09 ; output of step 4 ($mv = 0\%$)
36. GO 76 ; run
37. LD K03 ; set limit error (%) of step 3
38. LD T02 ; load error (absolute)
39. CMP ; compare absolute error value with limited error of step 3
40. NOT ; negative output
41. GIF 52 ; jump to step 2 if $S1 = 1$
42. LD T01 ; load error
43. LD K10 ; set error value (0)
44. CMP ; compare error value with limited error (0)
45. GIF 49 ; jump to output 0 ($mv = 0\%$) if $S1 = 1$
46. LD K07 ; set output (%) of step 3
47. ST A09 ; output of step 3 ($mv = \text{step } 3\%$)
48. GO 76 ; run
49. LD K10 ; set mv value (0 %)
50. ST A09 ; output of step 3 ($mv = 0\%$)
51. GO 76 ; run
52. LD K04 ; set limit error (%) of step 2
53. LD T02 ; load error (absolute)
54. CMP ; compare absolute error value with limited error of step 2
55. NOT ; negative output
56. GIF 67 ; jump to step 1 if $S1 = 1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมที่ใช้ในการทดลองตัวควบคุมที่สามารถแสดงค่าและโปรแกรมได้ (SLPC) (ต่อ)

57. LD T01 ; load error
 58. LD K10 ; set error value (0)
 59. CMP ; compare error value with limited error (0)
 60. GIF 64 ; jump to output 0 ($mv = 0\%$) if $S1 = 1$
 61. LD K08 ; set output (%) of step 2
 62. ST A09 ; output of step 2 ($mv = \text{step } 2\%$)
 63. GO 76 ; run
 64. LD K10 ; set mv value (0 %)
 65. ST A09 ; output of step4 ($mv = 0\%$)
 66. GO 76 ; run
 67. LD T10 ; load error
 68. LD K10 ; set error value (0)
 69. CMP ; compare error value with limited error (0)
 70. GIF 74 ; jump to output 0 ($mv = 0\%$) if $S1 = 1$
 71. LD K09 ; set output (%) of step 1
 72. ST A09 ; output of step 1 ($mv = \text{step } 1 ; 100\%$)
 73. GO 76 ; run
 74. LD K10 ; set mv value (0 %)
 75. ST A09 ; output of step 1 ($mv = 0\%$)
 76. LD K11 ; set 1
 77. ST FL09 ; store FL09
 78. LD X1 ; input
 79. BSC ; basic system control function
 80. ST Y1 ; output
 81. END

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมที่ใช้ในการทดลองตัวควบคุมที่สามารถแสดงค่าและโปรแกรมได้ (SLPC) (ต่อ)

Parameters of 5 steps On-Off for temperature control

อุณหภูมิเป้าหมาย [pv] (38.7% or 90 °C)	อุณหภูมิเป้าหมาย [pv] (58.0% or 120 °C)	อุณหภูมิเป้าหมาย [pv] (77.4% or 150 °C)
K01 = 0.005	K01 = 0.003	K01 = 0.002
K02 = 0.010	K02 = 0.006	K02 = 0.003
K03 = 0.016	K03 = 0.010	K03 = 0.005
K04 = 0.021	K04 = 0.012	K04 = 0.007
K05 = 0.521	K05 = 0.630	K05 = 0.741
K06 = 0.562	K06 = 0.667	K06 = 0.777
K07 = 0.604	K07 = 0.704	K07 = 0.813
K08 = 0.645	K08 = 0.741	K08 = 0.849
K09 = 1.000	K09 = 1.000	K09 = 1.000
K010 = 0.000	K010 = 0.000	K010 = 0.000
K011 = 1.000	K011 = 1.000	K011 = 1.000
K012 = 0.479	K012 = 0.594	K012 = 0.705

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมที่ใช้ในการทดลองของตัวควบคุมที่สามารถแสดงค่าและโปรแกรมได้ (SLPC)

Main program of 5 steps On-Off for level control

1. LD	A15	; load process variable (pv)
2. LD	A12	; load setpoint (sp)
3. -		; $dv = pv - sp$
4. ST	T01	; store input error (dv)
5. ABS		; absolute error
6. ST	T02	; store error $ dv $
7. LD	K01	; set limit error (%) of step 5
8. LD	T02	; load error (absolute)
9. CMP		; compare absolute error value with limited error of step 5
10. NOT		; negative output
11. GIF	22	; jump to step 4 if $S1 = 1$
12. LD	T01	; load error
13. LD	K10	; set error value (0)
14. CMP		; compare error value with limited error (0)
15. GIF	19	; jump to output bias ($mv = bias\%$) if $S1 = 1$
16. LD	K05	; set output ($mv \%$) of step 5
17. ST	A09	; output of step 5 ($mv = step\ 5 \%$)
18. GO	76	; run
19. LD	K12	; set output bias of step 5
20. ST	A09	; output of step 5 ($mv = bias \%$)
21. GO	76	; run
22. LD	K02	; set limit error (%) of step 4
23. LD	T02	; load error (absolute)
24. CMP		; compare absolute error value with limited error of step 4
25. NOT		; negative output
26. GIF	37	; jump to step 3 if $S1 = 1$
27. LD	T01	; load error

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมที่ใช้ในการทดลองตัวควบคุมที่สามารถแสดงค่าและโปรแกรมได้ (SLPC) (ต่อ)

28. LD K10 ; set error value (0)
29. CMP ; compare error value with limited error (0)
30. GIF 34 ; jump to output 100% ($mv = 100\%$) if $S1 = 1$
31. LD K06 ; set output (%) of step 4
32. ST A09 ; output of step 4 ($mv = \text{step } 4\%$)
33. GO 76 ; run
34. LD K13 ; set mv value (100 %)
35. ST A09 ; output of step 4 ($mv = 100\%$)
36. GO 76 ; run
37. LD K03 ; set limit error (%) of step 3
38. LD T02 ; load error (absolute)
39. CMP ; compare absolute error value with limited error of step 3
40. NOT ; negative output
41. GIF 52 ; jump to step 2 if $S1 = 1$
42. LD T01 ; load error
43. LD K10 ; set error value (0)
44. CMP ; compare error value with limited error (0)
45. GIF 49 ; jump to output 100 ($mv = 100\%$) if $S1 = 1$
46. LD K07 ; set output (%) of step 3
47. ST A09 ; output of step 3 ($mv = \text{step } 3\%$)
48. GO 76 ; run
49. LD K14 ; set mv value (100 %)
50. ST A09 ; output of step 3 ($mv = 100\%$)
51. GO 76 ; run
52. LD K04 ; set limit error (%) of step 2
53. LD T02 ; load error (absolute)
54. CMP ; compare absolute error value with limited error of step 2
55. NOT ; negative output
56. GIF 67 ; jump to step 1 if $S1 = 1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมที่ใช้ในการทดลองตัวควบคุมที่สามารถแสดงค่าและโปรแกรมได้ (SLPC) (ต่อ)

57. LD T01 ; load error
 58. LD K10 ; set error value (0)
 59. CMP ; compare error value with limited error (0)
 60. GIF 64 ; jump to output 0 ($mv = 100\%$) if $S1 = 1$
 61. LD K08 ; set output (%) of step 2
 62. ST A09 ; output of step 2 ($mv = \text{step } 2\%$)
 63. GO 76 ; run
 64. LD K15 ; set mv value (100 %)
 65. ST A09 ; output of step4 ($mv = 100\%$)
 66. GO 76 ; run
 67. LD T10 ; load error
 68. LD K10 ; set error value (0)
 69. CMP ; compare error value with limited error (0)
 70. GIF 74 ; jump to output 100 ($mv = 100\%$) if $S1 = 1$
 71. LD K09 ; set output (%) of step 1
 72. ST A09 ; output of step 1 ($mv = \text{step } 1; 0\%$)
 73. GO 76 ; run
 74. LD K11 ; set mv value (100 %)
 75. ST A09 ; output of step 1 ($mv = 100\%$)
 76. LD K11 ; set 1
 77. ST FL09 ; store FL09
 78. LD X1 ; input
 79. BSC ; basic system control function
 80. ST Y1 ; output
 81. END

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมที่ใช้ในการทดลองตัวควบคุมที่สามารถแสดงค่าและโปรแกรมได้ (SLPC) (ต่อ)

Parameters of 5 steps On-Off for level control

ระดับของของเหลว [pv] (30% or 7.6 cm.)	ระดับของของเหลว [pv] (50% or 12.7 cm.)	ระดับของของเหลว [pv] (70% or 17.8 cm.)
K01 = 0.003	K01 = 0.003	K01 = 0.003
K02 = 0.006	K02 = 0.006	K02 = 0.006
K03 = 0.009	K03 = 0.009	K03 = 0.009
K04 = 0.012	K04 = 0.012	K04 = 0.012
K05 = 0.727	K05 = 0.703	K05 = 0.681
K06 = 0.721	K06 = 0.696	K06 = 0.675
K07 = 0.715	K07 = 0.689	K07 = 0.670
K08 = 0.709	K08 = 0.682	K08 = 0.664
K09 = 0.000	K09 = 0.000	K09 = 0.000
K010 = 0.000	K010 = 0.000	K010 = 0.000
K011 = 1.000	K011 = 1.000	K011 = 1.000
K012 = 0.733	K012 = 0.710	K012 = 0.686
K013 = 1.000	K013 = 1.000	K013 = 1.000
K014 = 1.000	K014 = 1.000	K014 = 1.000
K015 = 1.000	K015 = 1.000	K015 = 1.000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

- ชื่อ-นามสกุล นายทรงวุฒิ ขวัญใจ
- วัน เดือน ปีเกิด 29 มีนาคม 2521 ที่จังหวัดสุราษฎร์ธานี
- ที่อยู่ 27 หมู่ 2 ถนนมหาไถ ตำบลเขาหัวควาย อำเภอพุนพิน จังหวัดสุราษฎร์ธานี
84130 โทร 077-205050
- ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาในปี พ.ศ.2534 จากโรงเรียนมานิตานุเคราะห์, ระดับมัธยมศึกษาตอนต้นในปี พ.ศ.2537 จากโรงเรียนสุราษฎร์พิทยา, ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ ในปี พ.ศ.2540 จากวิทยาลัยเทคนิคสุราษฎร์ธานี, ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไปในปี พ.ศ.2542 จากวิทยาลัยเทคนิคสุราษฎร์ธานี และระดับปริญญาตรี สาขาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ในปี พ.ศ.2545 จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมการวัดคุม คณะบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในปี พ.ศ.2545
- ความชำนาญเฉพาะด้าน 1. การออกแบบระบบควบคุมทางความร้อน
2. การออกแบบระบบควบคุมระดับของของเหลว
- ประสบการณ์ทำงานและผลงานวิจัย
- ปี พ.ศ.2546 มีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ ณ ประเทศเกาหลี.
- ปี พ.ศ.2547 เข้าทำงานตำแหน่งวิศวกรควบคุมคุณภาพ (Quality Assurance) ที่ NHK Spring (Thailand) Co.Ltd ที่นิคมอุตสาหกรรมเวลโกร (Wellgrow)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้