การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับกระบวนการควบคุมอุณหภูมิที่มีการประยุกต์ใช้งานเชิงอุตสาหกรรม

นายอินกวี สุภานันท์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Design of PID controller for temperature control process with industrial application

Mr. Inkawee Supanant

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering
Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2017
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับกระบวนการควบคุมอุณหภูมิที่มีการประยุกต์ใช้งานเชิงอุตสาหกรรม
โดย	นายอินกวี สุภานันท์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพงศ์ สุวรรณกวิน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย)

....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพงศ์ สุวรรณกวิน)

....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.ชนินทร์ บุญลักษณานุสรณ์)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

อินกวี สุภานันท์ : การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับกระบวนการควบคุมอุณหภูมิที่มีการประยุกต์ใช้งานเชิงอุตสาหกรรม (Design of PID controller for temperature control process with industrial application) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.สุรพงศ์ สุวรรณกวิน, 46 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการพัฒนาตัวควบคุมพีไอดีสำหรับระบบควบคุมอุณหภูมิ โดยเริ่มต้นนำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบถ่ายเทความร้อนด้วยแบบจำลองชนิดพารามิเตอร์สี่ตัวที่พิจารณาผลของเวลาประวิงชนิดขนส่ง พร้อมทั้งแสดงการหาพารามิเตอร์ต่างๆของแบบจำลองดังกล่าว ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นให้ผลตอบสนองที่มีความแม่นยำใกล้เคียงกับกระบวนการจริง ในลำดับถัดมาได้นำเสนอการออกแบบอัตราขยายตัวควบคุมพีไอดีที่รองรับกับโครงสร้างของแบบจำลองสี่พารามิเตอร์ที่มีค่าเวลาประวิงยาวนาน จากการศึกษาเชิงเปรียบเทียบผลตอบสนองด้วยวิธีออกแบบอัตราขยายแบบต่างๆ อาทิเช่น วิธีของซิกเกลอ-นิโคล วิธีของเชน-ฮรอนเนส-เรสวิก และวิธีของฮาลมาน พบว่าการออกแบบด้วยวิธีของฮาลมาน ให้ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิคำสั่งแบบขั้นและผลตอบสนองต่อโหลดรบกวนภายนอกที่ดี หลังจากนั้นงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมพีไอดีแบบออนไลน์ตามค่าอุณหภูมิของจุดทำงานต่างๆ ที่ค่าเวลาประวิงมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ เพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่ดียิ่งขึ้นสำหรับจุดทำงานในช่วงกว้าง ผลการทดลองกับระบบควบคุมอุณหภูมิในช่วง 90°C – 150°C ที่ขนาดพิกัดของตัวทำความร้อน 590 W ให้ผลตอบสนองที่สอดคล้องกับแนวคิดทางทฤษฎีที่ได้ประยุกต์ใช้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่อนิสิต	....
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก	....
ปีการศึกษา	2560		

5770368521 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEYWORDS: PID CONTROLLER / TEMPERATURE CONTROL SYSTEM / TRANSPORT-DELAY / PID-GAIN DESIGN

INKAWEE SUPANANT: Design of PID controller for temperature control process with industrial application. ADVISOR: ASST. PROF.SURAPONG SUWANKAWIN, Ph.D., 46 pp.

This thesis presents a development of Proportional-Integral-Differentiate (PID) controller for temperature control system. Firstly, a mathematical model of heat-exchange system is conducted with a four-parameter model which takes the transport-delay time into account and all parameters of the model are also identified. The accuracy of the four-parameter model is evaluated and the test outcome shows that the response of the model is close to that of the real system. Secondly, the design procedure of PID gain is introduced and it also suits to the structure of four-parameter model with long delay time. With regard to the comparative study among various design methods, i.e. Ziegler-Nichols method, Chen-Hrones-Reswick method and the Haalman's method, it is found that the Haalman's method exhibits better performances not only the response to the step command, but also the response to the external load disturbance. Thirdly, since the delay time is varied according to the operating temperature, the on-line adaptation of PID gain is initiated in order to enhance the performance for the wide range of operating temperature. Finally, the implementation with the temperature control system; for the operating range of 90°C – 150°C, and a 590-W heater provides the experimental results which agree well with the applied theoretical concept.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Department:	Electrical Engineering	Student's Signature	....
Field of Study:	Electrical Engineering	Advisor's Signature	....
Academic Year:	2017		

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี ขอขอบคุณความทุ่มเทและอบรมสั่งสอนอย่างดียิ่งของอาจารย์ ผศ.ดร. สุรพงศ์ สุวรรณกวิน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้า อีกทั้งยังเป็นผู้สนับสนุนและให้ความช่วยเหลือด้านต่างๆที่เป็นประโยชน์ตลอดการทำวิจัย ขอขอบคุณ บริษัท ไพรมัส จำกัดที่ได้ให้การสนับสนุนในด้านเครื่องควบคุม เครื่องมือ อุปกรณ์ต่างๆ และบุคลากรที่มาร่วมให้ความรู้และแบ่งปันประสบการณ์ต่างๆในการทำวิจัยของข้าพเจ้า ขอขอบคุณคณาจารย์มหาวิทยาลัยที่ได้ให้ความรู้ที่มีคุณค่า

ขอบคุณรุ่นพี่ รุ่นน้อง สมาชิกห้องปฏิบัติการวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ที่ร่วมแบ่งปันประสบการณ์ดีๆในการเรียนรู้และการทำวิจัย

สุดท้ายขอขอบคุณครอบครัวของข้าพเจ้าที่ให้การสนันสนุนด้านการศึกษา และกำลังใจเสมอมา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .... จ

กิตติกรรมประกาศ .... ฉ

สารบัญ .... ช

สารบัญตาราง .... ฌ

สารบัญรูปภาพ .... ญ

รายการสัญลักษณ์และคำย่อ .... ฐ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ปัญหาและข้อจำกัดของผลิตภัณฑ์ภายในประเทศ 2

1.2 เป้าหมายและประเด็นที่จะพัฒนาในวิทยานิพนธ์ 4

1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์ 5

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 5

1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย 6

บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานของระบบอุณหภูมิ 7

2.1 แบบจำลองทางพลวัตของการถ่ายเทความร้อนด้วยตัวทำความร้อน 7

2.2 แบบจำลองทางพลวัตของระบบถ่ายเทความร้อนที่มีการพิจารณาเวลาประวิงชนิดขนส่ง 9

2.2.1 การหาค่าพารามิเตอร์ของระบบถ่ายเทความร้อนของแบบจำลองสามพารามิเตอร์ 9

2.3 แบบจำลองทางพลวัตของระบบถ่ายเทความร้อนที่มีการเพิ่มอันดับ 11

2.3.1 การหาค่าพารามิเตอร์ของระบบถ่ายเทความร้อนของแบบจำลองสี่พารามิเตอร์ 12

2.3.2 แบบจำลองสี่พารามิเตอร์สำหรับระบบควบคุมอุณหภูมิที่มีเวลาประวิงชนิดขนส่งสูงมาก 15

2.4 เวลาประวิงชนิดขนส่งที่มีการเปลี่ยนแปลงในระบบควบคุมอุณหภูมิ $\left(L(\mathrm{T})\right)$ 18

บทที่ 3 การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับระบบควบคุมอุณหภูมิ 19

หน้า

3.1 หลักการและโครงสร้างตัวควบคุมพีไอดี 19
3.1.1 โครงสร้างของตัวควบคุมพีไอดีแบบสององศาอิสระ 20
3.1.2 การจำกัดค่าอัตราขยายอนุพันธ์........ 21
3.1.3 การต่อต้านการไขขึ้นของตัวควบคุมปริพันธ์ 21
3.2 การออกแบบอัตราขยายตัวควบคุมพีไอดีที่มีการพิจารณาถึงผลของเวลาประวิง 24
3.2.1 การออกแบบอัตราขยายด้วยวิธีซีกเกอร์-นิโคล (Ziegler-Nichols’s Method)........ 24
3.2.2 การออกแบบอัตราขยายด้วยวิธีเชน-ฮรอนเนส-เรสวิก (CHR’s Method)........ 24
3.2.3 การออกแบบด้วยวิธีของฮาลมาน (Haalman’s Method)........ 25
3.3 ผลการจำลองผลตอบสนองของระบบควบคุมอุณหภูมิที่ออกแบบด้วยวิธีต่างๆ 27
บทที่ 4 ผลการทดสอบระบบควบคุมอุณหภูมิที่มีตัวควบคุมพีไอดี 29
4.1 ระบบควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ........ 29
4.2 ผลการทดสอบระบบควบคุมอุณหภูมิ 33
4.2.1 ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิคำสั่ง 33
4.2.2 ผลตอบสนองต่อโหลดรบกวน........ 33
4.2.2 การปรับค่าอัตราขยายพีไอดีแบบออนไลน์เพื่อลดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงเวลาประวิงชนิดขนส่งที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ........ 37
บทที่ 5 บทสรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ 42
5.1 บทสรุปงานวิจัย........ 42
5.2 ข้อเสนอแนะ........ 43
รายการอ้างอิง........ 44
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 46

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองสามพารามิเตอร์โดยเทียบเคียงกับผลตอบสนองอ้างอิงในรูปที่ 2.6 11

ตารางที่ 2.2 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองสี่พารามิเตอร์โดยเทียบเคียงกับผลตอบสนองอ้างอิงในรูปที่ 2.8 (ระบบที่ 1) 12

ตารางที่ 2.3 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองสี่พารามิเตอร์โดยเทียบเคียงกับผลตอบสนองอ้างอิงในรูปที่ 2.8 (ระบบที่ 2) 16

ตารางที่ 3.1 การออกแบบอัตราขยายพีไอดีด้วยวิธีซิเกลอร์-นิโคล....24

ตารางที่ 3.2 การออกแบบอัตราขยายพีไอดีด้วยวิธีเชน-ฮรอนเนส-เรสวิก 24

ตารางที่ 3.3 ค่าอัตราขยายตัวควบคุมพีไอดีวิธีของฮาลมาน 26

ตารางที่ 3.4 ตารางสรุปการปรับตั้งค่าอัตราขยายพีไอดีเปรียบเทียบกับวิธีต่างๆ 27

ตารางที่ 4.1 อัตราขยายพีไอดีด้วยวิธีของฮาลมานในรูปแบบของเวลาอนุพันธ์และเวลาปริพันธ์......31

ตารางที่ 4.2 ค่าอัตราขยายตัวควบคุมพีไอดีที่ออกแบบ 32

ตารางที่ 4.3 หัวข้อการทดสอบผลตอบสนองของระบบ 33

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 เครื่องควบคุมอุณหภูมิจากผู้ประกอบการภายในประเทศ ... 1

รูปที่ 1.2 ผลตอบสนองต่ออุณหภูมิคำสั่งในช่วงกว้างของตัวควบคุมพีไอดีของผลิตภัณฑ์ภายในประเทศ ... 2

รูปที่ 1.3 ผลตอบสนองต่อโหลดรบกวนของตัวควบคุมพีไอดีของผลิตภัณฑ์ภายในประเทศ ... 3

รูปที่ 2.1 การถ่ายเทความร้อนที่มีการแยกโดดอย่างสมบูรณ์ ... 7

รูปที่ 2.2 การถ่ายเทความร้อนที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนกับบริเวณแวดล้อมภายนอก ... 8

รูปที่ 2.3 ลักษณะสมบัติทางพลวัตของระบบถ่ายเทความร้อน ... 8

รูปที่ 2.4 ลักษณะสมบัติทางพลวัตของระบบถ่ายเทความร้อนที่พิจารณาถึงผลของเวลาประวิง ... 9

รูปที่ 2.5 ระบบควบคุมอุณหภูมิที่มีตัวกลางแท่งโลหะชนิดเหล็ก (ระบบที่ 1) ... 9

รูปที่ 2.6 ผลตอบสนองอ้างอิงที่ใช้พิจารณาหาค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองสามพารามิเตอร์ ... 10

รูปที่ 2.7 ผลตอบสนองจากระบบจริงที่ใช้พิจารณาหาค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองสี่พารามิเตอร์ ... 10

รูปที่ 2.8 ผลตอบสนองอ้างอิงที่ใช้พิจารณาหาค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองสี่พารามิเตอร์ ... 12

รูปที่ 2.9 ผลตอบสนองจากระบบจริงที่ใช้หาค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองสี่พารามิเตอร์ ... 12

รูปที่ 2.10 แผนผังการคำนวณหา T_{Q1} และ T_{Q2} ด้วยวิธีเชิงประสบการณ์ ... 13

รูปที่ 2.11 บล็อกไดอะแกรมเปรียบเทียบแบบจำลองสามพารามิเตอร์และแบบจำลองสี่พารามิเตอร์ ... 14

รูปที่ 2.12 เปรียบเทียบผลตอบสนองระหว่างกระบวนการจริง (สีแดง) แบบจำลองสามพารามิเตอร์ (สีเหลือง) และแบบจำลองสี่พารามิเตอร์ (สีน้ำเงิน) ของระบบที่ 1 ... 14

รูปที่ 2.13 ระบบควบคุมอุณหภูมิที่มีตัวกลางแท่งโลหะชนิดเหล็ก (ระบบที่ 2) ... 15

รูปที่ 2.14 ผลตอบสนองของกระบวนการแบบวงรอบเปิดในระบบมีค่าเวลาประวิงชนิดขนส่งสูงมาก ... 15

รูปที่ 2.15 บล็อกไดอะแกรมเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบกับแบบจำลองสี่พารามิเตอร์ (ระบบที่ 2) 16

รูปที่ 2.16 เปรียบเทียบระหว่างผลตอบสนองของระบบจริง (สีแดง) และผลตอบสนองของแบบจำลองสี่พารามิเตอร์ (สีน้ำเงิน) ของระบบที่มีเวลาประวิงชนิดขนส่งสูงมาก 17

รูปที่ 2.17 การหาสมการเส้นโค้งที่เหมาะสม (Curve fitting) ของค่าเวลาประวิงชนิดขนส่งทั้ง 4 จุด 18

รูปที่ 3.1 ตัวควบคุมพีไอดีที่มีโครงสร้างแบบขนาน 19

รูปที่ 3.2 โครงสร้างตัวควบคุมพีไอดีแบบสององศาอิสระ 20

รูปที่ 3.3 ตัวควบคุมพีไอดีแบบสององศาอิสระและมีการต่อต้านการไขขึ้น 22

รูปที่ 3.4 ผลการจำลองการทำงานเปรียบเทียบผลตอบสนองของตัวควบคุมพีไอดีระหว่างกรณีที่มีและไม่มีการใส่ตัวต่อต้านการไขขึ้น 23

รูปที่ 3.5 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมอุณหภูมิในรูปของฟังก์ชันโอนย้าย $G_C(s)$ และ $G_P(s)$ 25

รูปที่ 3.6 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมอุณหภูมิที่มีแบบจำลองสี่พารามิเตอร์และตัวควบคุมพีไอดี 26

รูปที่ 3.7 กราฟแสดงผลตอบสนองของระบบด้วยตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีของฮาลมาน (สีแดง) วิธีของซีเกลอ-นิโคล (สีเขียว) และวิธีของเชน-ฮรอนเนส-เรสวิค (สีเหลือง) 28

รูปที่ 3.8 ผลตอบสนองต่อตัวโหลดรบกวน (PV = 24.2W (หรือ ≈ 10 ℃)) 28

รูปที่ 4.1 ระบบควบคุมอุณหภูมิด้วยตัวควบคุมพีไอดีที่ใช้ในการทดสอบ 29

รูปที่ 4.2 โครงสร้างของระบบถ่ายเทความร้อนที่ใช้ทดสอบ 29

รูปที่ 4.3 ตัวขับเร้าสำหรับระบบตัวทำความร้อน 30

รูปที่ 4.4 สัญญาณขับนำตัวขับเร้าด้วยวิธีมอดูเลตความกว้างพลัลส์ 30

รูปที่ 4.5 ฮาร์ดแวร์และส่วนบูรณาการสิ่งแวดล้อมในการพัฒนา (IDE) 31

รูปที่ 4.6 โครงสร้างตัวควบคุมพีไอดีแบบขนานที่มีการดัดแปลง 31

รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิคำสั่งในช่วงกว้าง 30℃ -> 120℃ 34

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4.8 ผลจำลองการทำงานการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิคำสั่งในช่วงกว้าง 30°C -> 120°C 34

รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิคำสั่งแบบขั้นในช่วงแคบ 35

รูปที่ 4.10 ผลจำลองการทำงานการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิคำสั่งแบบขั้นในช่วงแคบ 35

รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบการตอบสนองต่อโหลดรบกวนที่อุณหภูมิคำสั่ง 100°C 36

รูปที่ 4.12 ผลจำลองการทำงานการตอบสนองต่อโหลดรบกวนที่อุณหภูมิคำสั่ง 100°C 36

รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิคำสั่งแบบขั้น ที่มีการปรับค่าอัตราขยาย K_C ตามอุณหภูมิ 38

รูปที่ 4.14 อัตราขยาย K_C ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ 38

รูปที่ 4.15 ภาพขยายของผลการทดสอบการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิคำสั่งในช่วงกว้าง 30°C -> 120°C ที่มีการปรับค่าอัตราขยาย K_C ตามอุณหภูมิ 39

รูปที่ 4.16 ภาพขยายของผลการทดสอบการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิคำสั่งในช่วงแคบ 90°C -> 100°C ที่มีการปรับค่าอัตราขยาย K_C ตามอุณหภูมิ 39

รูปที่ 4.17 ภาพขยายของผลการทดสอบการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิคำสั่งในช่วงแคบ 100°C -> 120°C ที่มีการปรับค่าอัตราขยาย K_C ตามอุณหภูมิ 40

รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบการตอบสนองต่อโหลดรบกวนที่ค่าอุณหภูมิคำสั่ง 120°C ที่ตัวควบคุมมีการปรับค่าอัตราขยาย K_C ตามอุณหภูมิ 40

รูปที่ 4.19 อัตราขยาย K_C ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ 41

Chulalongkorn University

รายการสัญลักษณ์และคำย่อ

K_P	อัตราขยายพี
K_I	อัตราขยายไอ
K_D	อัตราขยายดี
K_A	อัตราขยายตัวต่อต้านการไขขึ้น
T_I	เวลาปริพันธ์
T_D	เวลาอนุพันธ์
N	ค่าจำกัดอัตราขยายตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน
K_C	อัตราขยายตัวควบคุมพีไอดี
T	อุณหภูมิ
T_{Peak}	อุณหภูมิที่ค่ายอด
T_{Start}	อุณหภูมิเริ่มต้น, อุณหภูมิห้อง
$^{\circ}C$	หน่วยเซลเซียล
SV	ค่าจุดปรับตั้งค่า (setpoint value), อุณหภูมิคำสั่งอ้างอิง
PV	ค่าอุณหภูมิของกระบวนการ (process value)
PV_{Range}	ค่าพิสัยของอุณหภูมิ
sec	วินาที
W	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)
P_{in}	กำลังงานไฟฟ้าเข้า
P_D	กำลังงานสูญเสียคงตัว
P_L	กำลังงานสูญเสีย
P_{LD}	กำลังงานของโหลดรบกวน
Q_{in}	พลังงานความร้อนเข้า
Q_L	พลังงานความร้อนสูญเสีย
Q_D	ความร้อนสูญเสียคงตัว
Q_{LT}	ความร้อนสูญเสียเปลี่ยนตามอุณหภูมิ
C_Q	สัมประสิทธิการถ่ายเทอุณหภูมิ
u_P	สัญญาณออกตัวควบคุมพี
u_I	สัญญาณออกตัวควบคุมไอ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

u_D	สัญญาณออกตัวควบคุมดี
u_{PID}	สัญญาณออกตัวควบคุมพีไอดี
$u(\mathrm{t})$	สัญญาณด้านออกตัวควบคุม
$y(\mathrm{t})$	สัญญาณด้านออก
$s(\mathrm{t})$	ผลตอบสนองของระบบแบบขั้น
$U_{\max}$	ค่าจำกัดสูงสุด
$U_{\min}$	ค่าจำกัดต่ำสุด
K	อัตราขยาย
L	เวลาประวิงชนิดขนส่ง
T_Q	ค่าคงตัวเวลาของความร้อน
T_{Q1}	ค่าคงตัวเวลาของความร้อนที่หนึ่ง
T_{Q2}	ค่าคงตัวเวลาของความร้อนที่สอง
t_1	ค่าเวลาที่อุณหภูมิของกระบวนการตัวที่หนึ่ง
t_2	ค่าเวลาที่อุณหภูมิของกระบวนการตัวที่สอง
R	ความชัน
G_C	สมการตัวควบคุม
G_{PID}	สมการโครงสร้างตัวควบคุมพีไอดีแบบขนาน
G_P	สมการของระบบ (Plant)
G_L	สมการฮาลมาน
G_{02}	สมการวงรอบปิด
s	ค่าตัวแปรโดเมนความถี่
V_{relay}	สัญญาณขับนำการปิดและเปิดรีเลย์
T_{cycle}	คาบเวลา
T_{pulse}	ช่วงเวลาที่รีเลย์ปิดวงจร
b,c	ค่าน้ำหนัก
e	ค่าความผิดพลาด (error)
t_{K}	อัตราความละเอียด (sampling rate)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

ในอุตสาหกรรมปัจจุบัน ตัวควบคุมอุณหภูมิสำหรับตัวทำความร้อน (Heater) มีการใช้อย่างกว้างขวางมาก ตัวอย่างเช่น การใช้ความร้อนในการแปรรูปอาหารหรือถนอมอาหาร ใช้ในการปิดผนึกบรรจุภัณฑ์อาหาร ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุชิ้นงานพลาสสติก ใช้ในการให้ความร้อนสสารเพื่อให้เกิดการรวมตัวกัน และอื่นๆเช่น การใช้ความร้อนเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของพลอยให้ดีขึ้น ฯลฯ ดังนั้นการควบคุมการทำความร้อนให้มีความแม่นยำและมีประสิทธิภาพจะช่วยให้นำมาซึ่งคุณภาพที่ดีของผลิตภัณฑ์ การควบคุมความร้อนนั้นสามารถควบคุมได้หลายวิธี เช่น การควบคุมแบบเปิด-ปิด (On-Off Control) การควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอดี (PID Control) การควบคุมแบบฟัซซี่ (Fuzzy Control) และการควบคุมเชิงคาดการณ์ (Predictive Control) ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์ตัวควบคุมพีไอดีสำหรับอุตสาหกรรมก็ได้ประยุกต์ใช้วิธีการควบคุมที่หลากหลายนี้พร้อมๆกัน โดยมีตัวควบคุมแบบพีไอดีเป็นตัวควบคุมหลัก

เพื่อเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันของผู้ประกอบการไทยให้ทัดเทียมกับผลิตภัณฑ์ที่นำเข้าจากต่างประเทศ วิทยานิพนธ์จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาตัวควบคุมพีไอดีที่ประยุกต์ใช้กับระบบควบคุมอุณหภูมิในอุตสาหกรรม โดยรูปที่ 1.1 แสดงถึงเครื่องควบคุมอุณหภูมิจากผู้ประกอบการภายในประเทศ

รูปที่ 1.1 เครื่องควบคุมอุณหภูมิจากผู้ประกอบการภายในประเทศ

1.1 ปัญหาและข้อจำกัดของผลิตภัณฑ์ภายในประเทศ

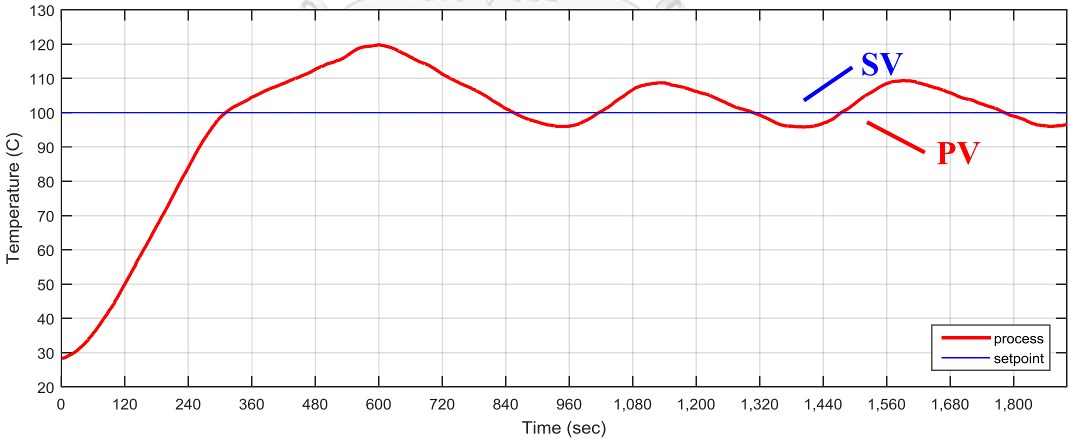
ข้อจำกัดของตัวควบคุมพีไอดีจากผลิตภัณฑ์ภายในประเทศสามารถสรุปเป็นประเด็นได้ดังนี้

1) ผลกระทบจากเวลาประวิงชนิดขนส่ง (Transport-Delay time) ทำให้เกิดการพุ่งเกิน (Overshoot) และเข้าสู่สถานะอยู่ตัวช้า และมีการแกว่ง (Oscillate) ที่สถานะอยู่ตัวด้วยขนาดสูง ดังแสดงในรูปที่ 1.2

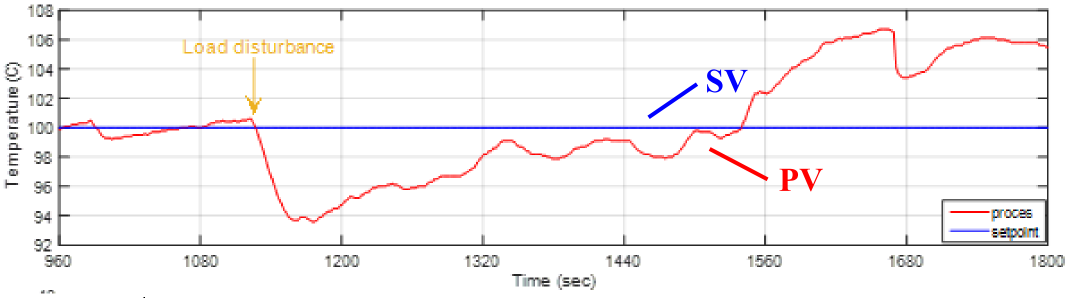
   หมายเหตุ เนื่องจากตัวขับเร้า (Actuator) ของระบบควบคุมอุณหภูมิแบบพื้นฐานทั่วไป โดยส่วนใหญ่เป็นตัวขับเร้าแบบทิศทางเดียว คือ ควบคุมการเพิ่มความร้อนจากตัวทำความร้อน (ไม่ได้มีแหล่งจ่ายความเย็นเพื่อควบคุมให้อุณหภูมิลดลงได้) ทำให้การลดของอุณหภูมิสามารถทำได้ช้ากว่าการเพิ่มอุณหภูมิ เพราะต้องอาศัยการถ่ายเทความร้อนจากสภาพแวดล้อมภายนอก ทำให้ผลตอบสนองช้าและเกิดการแกว่งได้ง่าย

2) สมรรถนะของการตอบสนองต่อโหลดรบกวน (Load disturbance) ไม่เพียงพอต่อการประยุกต์ใช้งานบางประเภท ดังแสดงในรูปที่ 1.3

3) การออกแบบอัตราขยายตัวควบคุมพีไอดี ใช้วิธีพื้นฐานในการออกแบบ ซึ่งไม่รองรับกับระบบที่มีค่าเวลาประวิงชนิดขนส่งสูงโดยตัวควบคุมไม่มีการปรับตัวอัตราขยายเพื่อรองรับกับการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบ



รูปที่ 1.2 ผลตอบสนองต่ออุณหภูมิคำสั่งในช่วงกว้างของตัวควบคุมพีไอดีของผลิตภัณฑ์ภายในประเทศ



รูปที่ 1.3 ผลตอบสนองต่อโหลดรบกวนของตัวควบคุมพีไอดีของผลิตภัณฑ์ภายในประเทศ

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์ที่จะปรับปรุงสมรรถนะของตัวควบคุมพีไอดีสำหรับระบบควบคุมอุณหภูมิ เพื่อพัฒนาขีดความสามารถผลิตภัณฑ์ภายในประเทศให้สามารถแข่งขันได้กับผลิตภัณฑ์จากต่างประเทศ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.2 เป้าหมายและประเด็นที่จะพัฒนาในวิทยานิพนธ์

ก.) การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการหาพารามิเตอร์

แบบจำลองของระบบทำความร้อนที่แม่นยำเป็นองค์ประกอบสำคัญในการออกแบบอัตราขยายเพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่ดี ในวิทยานิพนธ์นี้จะพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบถ่ายเทความร้อนโดยพิจารณาผลของเวลาประวิงชนิดขนส่ง นอกจากนี้พารามิเตอร์ของระบบเป็นข้อมูลสำคัญที่ใช้สำหรับออกแบบตัวควบคุมพีไอดี การหาพารามิเตอร์และการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีซีกเกอร์-นิโคล [1] เป็นวิธีมาตรฐานที่ใช้กันในอุตสาหกรรม อย่างไรก็ดีจากข้อมูลทางปฏิบัติวิธีดังกล่าว มีข้อจำกัดสำหรับระบบควบคุมอุณหภูมิคือ กระบวนการหาพารามิเตอร์แบบพื้นฐานยังไม่มีความแม่นยำ ซึ่งทำให้ไม่สามารถประยุกต์ใช้กับงานบางลักษณะที่ระบบมีค่าเวลาประวิงชนิดขนส่งสูงรวบถึงในกรณีที่ค่าพารามิเตอร์ของระบบมีการเปลี่ยนแปลง วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาวิธีการหาพารามิเตอร์และการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีการเพิ่มอันดับค่าคงตัวเวลา เพื่อทำให้แบบจำลองมีความแม่นยำใกล้เคียงกับกระบวนการจริงของระบบมากขึ้นและลดข้อจำกัดดังกล่าว

ข.) การออกแบบอัตราขยายตัวควบคุมพีไอดี

จะเห็นได้ว่าวิธีการออกแบบค่าอัตราขยายตัวควบคุมพีไอดีในเอกสารวิชาการ [2] และ [3] มีข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้กับระบบควบคุมอุณหภูมิ ได้แก่ 1) ไม่รองรับกับแบบจำลองแบบสี่พารามิเตอร์ ทำให้ตัวควบคุมไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิในระบบถ่ายเทความร้อนซึ่งมีเวลาประวิงชนิดขนส่งสูงและไม่มีประสิทธิภาพในการกำจัดโหลดรบกวน 2) ไม่รองรับกับระบบที่ค่าพารามิเตอร์มีการเปลี่ยนแปลง วิทยานิพนธ์นี้จะใช้วิธีของฮาลมาน [4] ในการออกแบบอัตราขยายตัวควบคุมพีไอดีซึ่งรองรับกับแบบจำลองสี่พารามิเตอร์ โดยใช้โครงสร้างของตัวควบคุมพีไอดีที่รองรับการประยุกต์ใช้งานในทางปฏิบัติ นอกจากนี้จะมีวิธีการปรับค่าอัตราขยายแบบออนไลน์เพื่อให้ตัวควบคุมสามารถปรับตัวอัตราขยายตามระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเวลาประวิงชนิดขนส่งตามอุณหภูมิ โดยจะทำให้มีผลตอบสนองที่ดียิ่งขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

1. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) ของกระบวนการ (Process) ในระบบถ่ายเทความร้อนที่มีเวลาประวิงชนิดขนส่งสูง ให้มีความแม่นยำ
2. ออกแบบอัตราขยายตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีของฮาลมาน [4] โดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากวิธีปฏิกิริยากระบวนการ (Process reaction method) แบบวงรอบเปิดสำหรับแบบจำลองสี่พารามิเตอร์
3. เครื่องควบคุมอุณหภูมิด้วยรีเลย์ใช้ตัวทำความร้อน (Heater) เป็นตัวขับเร้าในการควบคุมอุณหภูมิความร้อนในระบบที่มีค่าเวลาประวิงชนิดขนส่งสูง ให้มีผลตอบสนองที่ดีและมีความแม่นยำในการฟื้นฟูอุณหภูมิให้คงที่ในช่วงค่าความผิดพลาดคงตัว (Steady state error) ที่ประมาณ ± 2°C โดยใช้ตัวทำความร้อนที่มีพิกัดขนาด 590W (สำหรับระบบถ่ายเทความร้อนที่มีค่าเวลาประวิงชนิดขนส่งสูงสุด 69 sec)
4. ตัวควบคุมพีไอดีสามารถกำจัดโหลดรบกวน (Load disturbance rejection) ในช่วงสถานะชั่วครู (Transient) และสถานะอยู่ตัว (Steady state) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
5. ตัวควบคุมพีไอดีสามารถปรับตัวค่าอัตราขยายแบบออนไลน์ให้เหมาะสมกับจุดปรับตั้งค่า (Setpoint) ต่างๆของระบบควบคุมความร้อนที่มีเวลาประวิงชนิดขนส่งเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิในระบบควบคุมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1. เครื่องควบคุมอุณหภูมิด้วยรีเลย์แบบดิจิตอลที่ใช้ตัวควบคุมพีไอดีในการควบคุมความร้อนด้วยตัวทำความร้อน สามารถฟื้นฟูอุณหภูมิให้คงที่ได้ในช่วงค่าความผิดพลาดคงตัวที่ประมาณ ± 2 °C
2. เครื่องควบคุมอุณหภูมิสามารถลดการพุ่งเกินและการแกว่งของอุณหภูมิกระบวนการในระบบถ่ายเทความร้อนแบบปกติและแบบที่มีค่าเวลาประวิงชนิดขนส่งสูงได้
3. เครื่องควบคุมอุณหภูมิด้วยตัวควบคุมพีไอดี สามารถตอบสนองต่อโหลดรบกวนและสามรถฟื้นฟูอุณหภูมิให้คงที่ได้ดี
4. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ สามารถควบคุมความร้อนด้วยตัวทำความร้อนหลากหลายขนาด และสามารถใช้ได้กับระบบถ่ายเทความร้อนที่มีค่าเวลาประวิงชนิดขนส่งสูงได้
5. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ มีฟังก์ชันในการปรับตั้งค่าอัตราขยายตัวควบคุมพีไอดีแบบวงรอบเปิดและอัตราขยายตัวควบคุมพีไอดีมีสมรรถนะที่ดีต่อผลตอบสนองของระบบ

1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

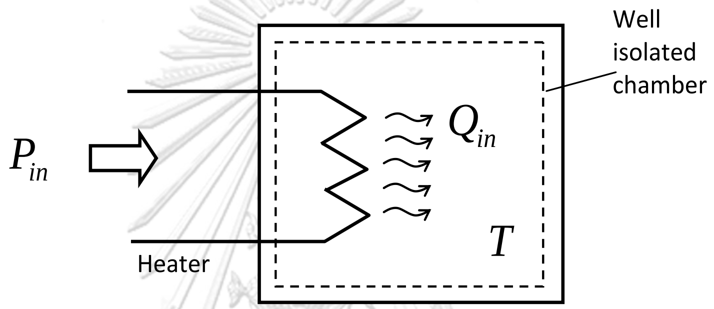
1. ศึกษาทฤษฎีแบบจำลองของระบบถ่ายเทความร้อน
2. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และหาพารามิเตอร์ของระบบถ่ายเทความร้อนจากผลการทดสอบจริง และนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับผลตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink
3. ศึกษาทฤษฎีตัวควบคุมพีไอดีและการออกแบบค่าอัตราขยาย
4. ออกแบบตัวควบคุมพีไอดี และจำลองระบบควบคุมอุณหภูมิด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink
5. ออกแบบค่าอัตราขยายตัวควบคุมพีไอดี โดยศึกษาวิธีออกแบบที่มีความสัมพันธ์กับแบบจำลองและสามารถนำไปสู่การปรับตั้งค่าอัตราขยายแบบอัตโนมัติด้วยวิธีวงรอบเปิดได้
6. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของระบบถ่ายเทความร้อนซึ่งเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น
7. นำมาปรับค่าอัตราขยายตัวควบคุม ตามพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงของระบบถ่ายเทความร้อน
8. นำสมการที่ได้จากการคำนวณและการจำลองมาแปลงให้อยู่ในรูปดิจิตอล เพื่อใช้กับเครื่องควบคุมอุณหภูมิ
9. เปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอดี ระหว่างผลการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink กับผลการทดสอบจากเครื่องควบคุมอุณหภูมิจริง ที่ค่าคำสั่งแบบคงที่แบบขั้น และแบบมีโหลดรบกวน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 2
ทฤษฎีพื้นฐานของระบบอุณหภูมิ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานของระบบควบคุมอุณหภูมิ โดยแยกอธิบายแต่ละองค์ประกอบ ดังนี้

2.1 แบบจำลองทางพลวัตของการถ่ายเทความร้อนด้วยตัวทำความร้อน (Dynamic Model of Heat exchanger with Heater)



รูปที่ 2.1 การถ่ายเทความร้อนที่มีการแยกโดดอย่างสมบูรณ์

รูปที่ 2.1 แสดงถึงการถ่ายเทพลังงานความร้อนที่มีการแยกโดดอย่างสมบูรณ์ โดยไม่มีการถ่ายเทพลังงานความร้อนระหว่างบริเวณที่ต้องการควบคุมอุณหภูมิ T และสภาพแวดล้อมภายนอก เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ป้อนไปที่ตัวทำความร้อน P_{in} และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ได้ดังสมการที่ (2.1)

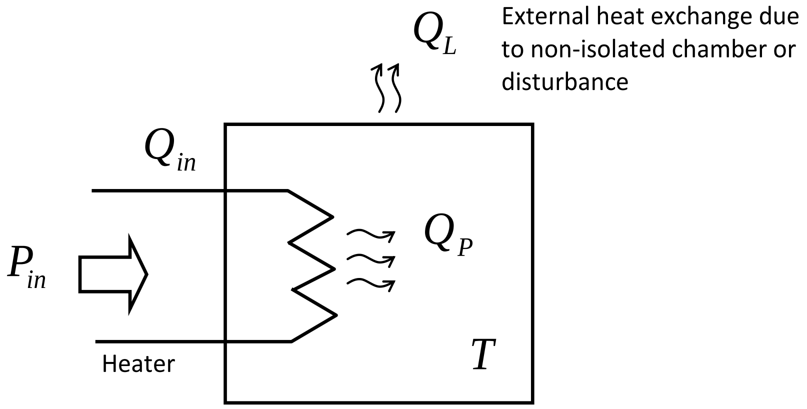
$$P_{in} = \frac{dQ_{in}}{dt} = C_Q \frac{dT}{dt} \tag{2.1}$$

โดยที่ C_Q คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทอุณหภูมิ

จะเห็นได้ว่าระบบจะมีฟังก์ชันโอนย้ายเป็นตัวอินทิเกรตดังแสดงในสมการที่ (2.2)

$$\frac{T}{P_{in}} = \frac{1}{C_Q \cdot s} \tag{2.2}$$

อย่างไรก็ดีในทางปฏิบัติจะมีความร้อนที่ถ่ายเทกับบริเวณแวดล้อมโดยรอบอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ รูปที่ 2.2 แสดงถึงผลดังกล่าว และลักษณะสมบัติของการแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนสามารถแสดงได้ด้วยสมการที่ (2.3) - (2.5)



รูปที่ 2.2 การถ่ายเทความร้อนที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนกับบริเวณแวดล้อมภายนอก

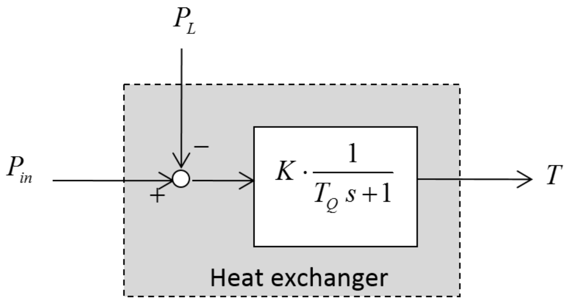
$$Q_L = \underbrace{Q_D}_{\text{Constant heat loss}} + \underbrace{Q_{LT}}_{\text{Heat loss varied with temperature}} \quad (2.3)$$

$$P_L = \underbrace{P_D}_{\text{Constant power loss}} + \underbrace{K_Q \cdot T}_{\text{Power loss varied with temperature}} \quad (2.4)$$

$$P_{in} - P_L = \frac{d\,Q_P}{dt} = C_Q \frac{dT}{dt} \quad (2.5)$$

จากสมการที่ (2.4) และ (2.5) สามารถเขียนฟังก์ชันโอนย้ายได้ดังสมการที่ (2.6) และบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 2.3 หรือเรียกว่าแบบจำลองสองพารามิเตอร์

$$\frac{T}{P_{in} - P_D} = \frac{1}{C_Q \cdot s + K_Q} = K \cdot \frac{1}{T_Q \cdot s + 1} \quad (2.6)$$



รูปที่ 2.3 ลักษณะสมบัติทางพลวัตของระบบถ่ายเทความร้อน

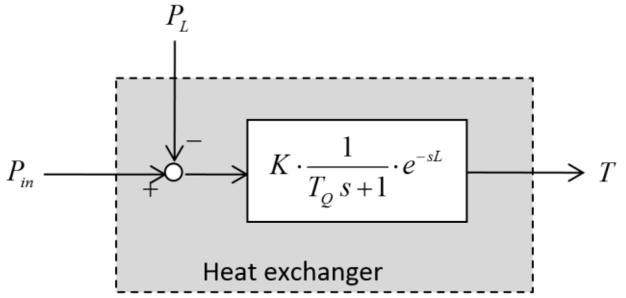
โดยที่ $T_Q = \frac{C_Q}{K_Q}$ และ $K = \frac{1}{K_Q}$ จะเห็นได้ว่าระบบถ่ายเทความร้อนจะมีผลตอบสนองแบบอันดับหนึ่งที่มีค่าคงตัวเวลาเท่ากับ T_Q

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.2 แบบจำลองทางพลวัตของระบบถ่ายเทความร้อนที่มีการพิจารณาเวลาประวิงชนิดขนส่ง

ในการถ่ายเทความร้อนค่าเวลาประวิงชนิดขนส่งมีนัยสำคัญต่อระบบ ยกตัวอย่างเช่น ระบบที่พิจารณาในวิทยานิพนธ์นี้ค่าเวลาประวิงชนิดขนส่งสูงถึง 30-69 วินาที ซึ่งสมการที่ (2.7) และรูปที่ 2.4 แสดงถึงผลตอบสนองทางพลวัตเมื่อพิจารณาเวลาประวิงชนิดขนส่งในระบบถ่ายเทความร้อน โดยจะเรียกว่าแบบจำลองสามพารามิเตอร์

$$G_{P1}(s) = \frac{T}{P_{in} - P_D} = K \cdot \frac{1}{T_Q \cdot s + 1} \cdot e^{-sL} \quad (2.7)$$



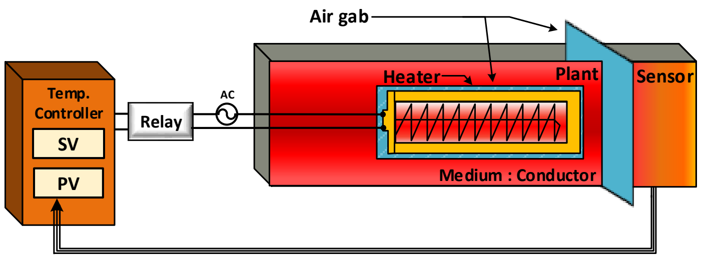
รูปที่ 2.4 ลักษณะสมบัติทางพลวัตของระบบถ่ายเทความร้อนที่พิจารณาถึงผลของเวลาประวิง

2.2.1 การหาค่าพารามิเตอร์ของระบบถ่ายเทความร้อนของแบบจำลองสามพารามิเตอร์ (Three-Parameter Model)

ในวิทยานิพนธ์นี้จะศึกษาระบบถ่ายเทอุณหภูมิแบบนำความร้อนโดยมีตัวกลางเป็นโลหะที่ใช้ในอุตสาหกรรม ดังแสดงในรูปที่ 2.5 คือตัวกลางนำความร้อนชนิดที่เป็นโลหะคือเหล็กรีดความร้อนในอุตสาหกรรมรีดพลาสติก โดยขนาดกำลังส่งของตัวทำความร้อนและระยะห่างของตัวทำความร้อนกับตัววัดอุณหภูมิ มีผลต่อค่าเวลาประวิงชนิดขนส่งที่แตกต่างกันไป โดยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ตัวทำความร้อนที่มีพิกัดขนาด 590W คงที่ และจะทดสอบกับระบบที่ 1 คือตัวทำความร้อนกับตัววัดอุณหภูมิอยู่ใกล้กันและระบบที่ 2 ตัวทำความร้อนกับตัววัดอุณหภูมิอยู่ไกลกัน (เวลาประวิงชนิดขนส่งสูงมาก)

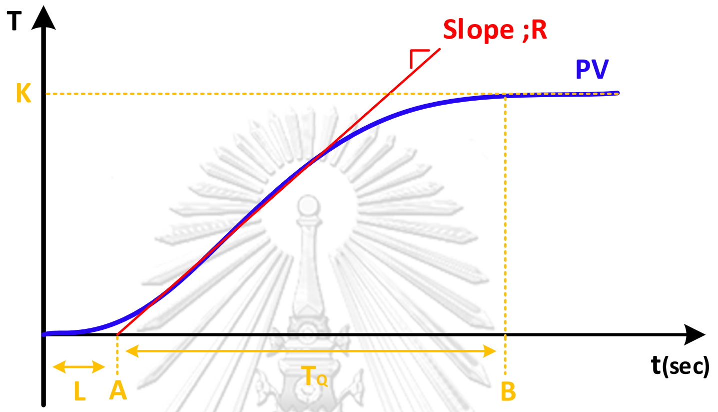
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากฟังก์ชันโอนย้ายของระบบถ่ายเทอุณหภูมิในสมการที่ (2.7) จะเห็นได้ว่ามีพารามิเตอร์ของระบบที่ต้องหาอยู่ 3 ค่าคือ K, T_Q และ L

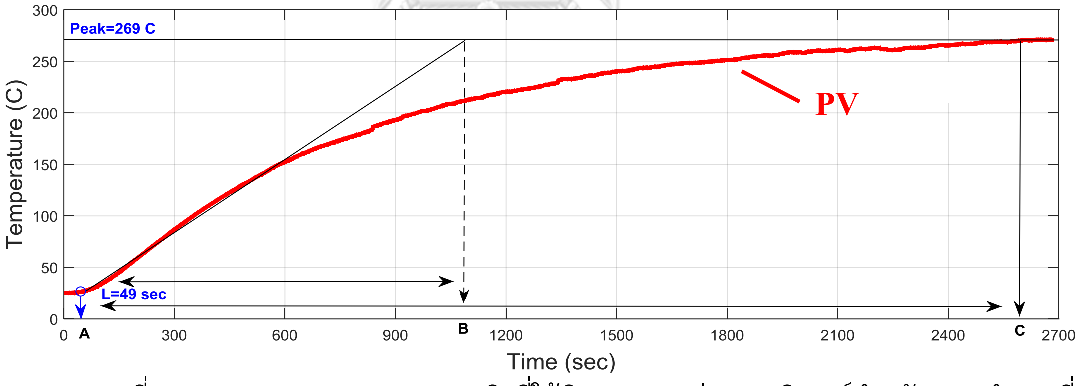


รูปที่ 2.5 ระบบควบคุมอุณหภูมิที่มีตัวกลางแท่งโลหะชนิดเหล็ก (ระบบที่ 1)

รูปที่ 2.6 แสดงถึงผลตอบสนองโดยทั่วไปของการถ่ายเทอุณหภูมิ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆจะสะท้อนไปที่ผลตอบสนองในแต่ละช่วงเวลา โดยผลตอบสนองตอนเริ่มต้นสะท้อนถึงค่าเวลาประวิงชนิดขนส่ง L ซึ่งพิจารณาจากช่วงเวลาที่ PV มีการเปลี่ยนแปลง 1% ($^{\circ}C$) ของค่าอุณหภูมิที่สถานะอยู่ตัว (PV_{range}) ลำดับถัดมาในช่วงสถานะชั่วครู่ อุณหภูมิจะเพิ่มมากขึ้น โดยแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความชันของอุณหภูมิ R กับค่าคงตัวทางเวลา T_Q และในลำดับสุดท้ายที่สถานะอยู่ตัวจะสะท้อนถึงค่าอัตราขยาย K



รูปที่ 2.6 ผลตอบสนองอ้างอิงที่ใช้พิจารณาหาค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองสามพารามิเตอร์



รูปที่ 2.7 ผลตอบสนองจากระบบจริงที่ใช้พิจารณาหาค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองสี่พารามิเตอร์

จากแนวคิดดังกล่าวจะทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ทั้งสามของแบบจำลองสามพารามิเตอร์ได้ โดยพิจารณผลตอบสนองจากการทดลองจริงในรูปที่ 2.7 เทียบเคียงกับผลตอบสนองอ้างอิงในรูปที่ 2.6 ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และฟังก์ชันโอนย้ายในสมการที่ (2.8)

ตารางที่ 2.1 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองสามพารามิเตอร์โดยเทียบเคียงกับผลตอบสนองอ้างอิงในรูปที่ 2.6

No.	Parameters	Value
1.	Slope ; $R = \dfrac{T_{(b)} - T_{(a)}}{t_{(b)} - t_{(a)}}$	1.77 T/sec
2.	$PV_{range} = T_{peak} - T_{start}$	269°C – 25.2°C = 243.8°C
3.	$K = \dfrac{PV_{range}}{P_{in}}$	0.41322
4.	Time Constant ; T_Q	2600 sec
5.	Transport delay time ; L	49 sec

จากรูปที่ 2.7 และตารางที่ 2.1 เราสามารถเขียนฟังก์ชันโอนย้ายของระบบถ่ายเทอุณหภูมิพร้อมกับค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 ค่าดังแสดงในสมการที่ (2.11)

$$G_{P1}(s) = 0.41322 \cdot \frac{1}{2600 \cdot s + 1} \cdot e^{-49s} \qquad (2.8)$$

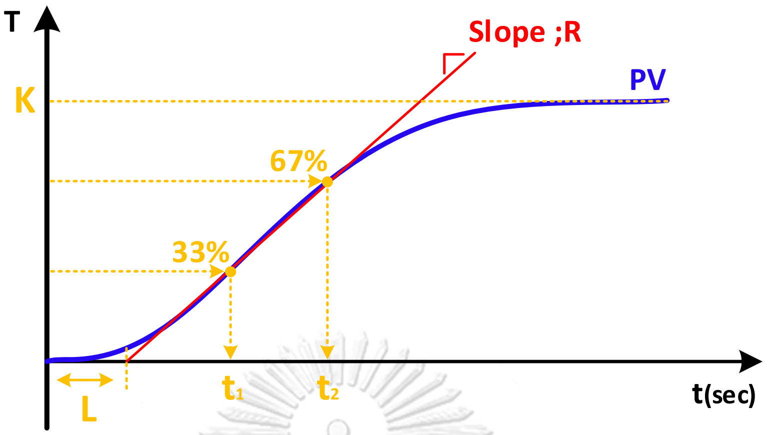
2.3 แบบจำลองทางพลวัตของระบบถ่ายเทความร้อนที่มีการเพิ่มอันดับ

ในกรณีที่ต้องการความแม่นยำของแบบจำลอง เราสามารถเพิ่มอันดับของแบบจำลอง โดยจะเห็นได้ว่าแบบจำลองเป็นแบบพารามิเตอร์สี่ตัว (Four-Parameter Model) ซึ่งกระบวนการหาพารามิเตอร์ทั้งสี่ตัว (L, T_{Q1}, T_{Q2}, K) จะคล้ายกับในกรณีของแบบจำลองสามพารามิเตอร์ในหัวข้อที่แล้ว โดยแบบจำลองที่มีพารามิเตอร์ 4 ตัว ซึ่งมีรูปแบบทั่วไปดังนี้

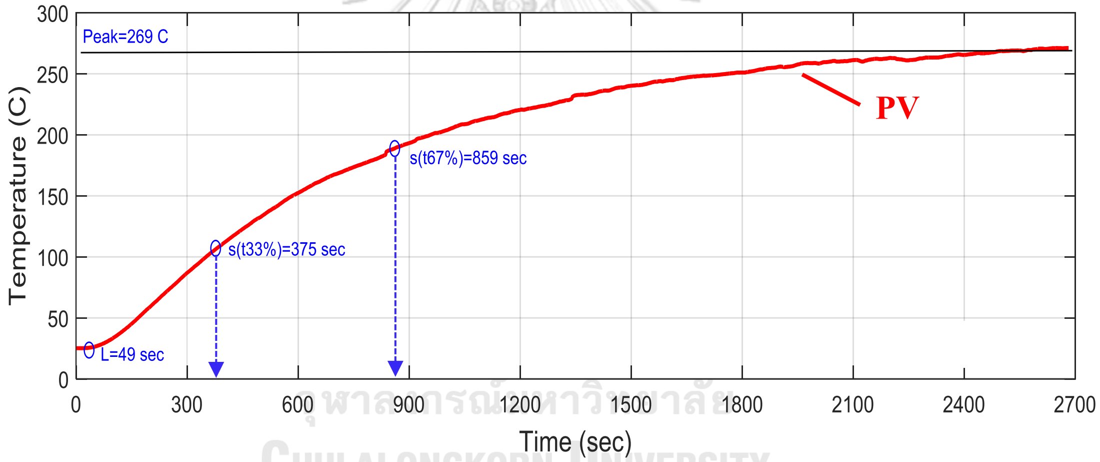
$$G_P(s) = K \cdot \frac{1}{\left(T_{Q1} \cdot s + 1\right)\left(T_{Q2} \cdot s + 1\right)} \cdot e^{-sL} \qquad (2.12)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.3.1 การหาค่าพารามิเตอร์ของระบบถ่ายเทความร้อนของแบบจำลองสี่พารามิเตอร์(Four-Parameter Model)



รูปที่ 2.8 ผลตอบสนองอ้างอิงที่ใช้พิจารณาหาค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองสี่พารามิเตอร์



รูปที่ 2.9 ผลตอบสนองจากระบบจริงที่ใช้หาค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองสี่พารามิเตอร์

ตารางที่ 2.2 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองสี่พารามิเตอร์โดยเทียบเคียงกับผลตอบสนองอ้างอิงใน รูปที่ 2.8 (ระบบที่ 1)

No.	Parameters	Value
1.	$PV_{range} = T_{\mathrm{peak}} - T_{\mathrm{start}}$	269°C – 25.2°C = 243.8°C
2.	Time at 33% of PV_{range} ; $t_1 = (PV_{range} \cdot 0.33) + T_{\mathrm{start}}$	105.654°C → t_1 = 375 sec
3.	Time at 67% of PV_{range} ; $t_2 = (PV_{range} \cdot 0.67) + T_{\mathrm{start}}$	188.546°C → t_2 = 859 sec
4.	$K = \dfrac{PV_{range}}{P_{in}}$	0.41322
5.	Transport delay time ; L	49 sec

รูปที่ 2.8 แสดงถึงแนวคิดในการหาพารามิเตอร์ทั้ง 4 ค่าโดยค่าอัตราขยาย K และเวลาประวิง L สามารถหาได้โดยตรงจากกราฟการทดลองในรูปที่ 2.9 โดยมีวิธีการหาค่พารามิเตอร์เช่นเดียวกับในกรณีของแบบจำลองสามพารามิเตอร์ โดยอัตราขยาย K มีค่าเท่ากับ 0.41322 และเวลาประวิง L มีค่าเท่ากับ 49 sec สำหรับการหาพารามิเตอร์ T_{Q1} และ T_{Q2} เราจะพิจารณาจากผลตอบสนองของระบบแบบขั้น $s(t)$ พร้อมกับเลือกค่าผลตอบสนองสองชุด $\left[\left(t_1, s(t_1)\right), \left(t_2, s(t_2)\right)\right]$ เพื่อคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ T_{Q1} และ T_{Q2} ได้ ผลตอบสนองแบบขั้นในรูปแบบทั่วไปของระบบแบบพารามิเตอร์ 4 ค่าสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$s(t) = K\cdot\left(1+\frac{T_{Q2}\,e^{\frac{(L-t)}{T_{Q2}}} - T_{Q1}\,e^{\frac{(L-t)}{T_{Q1}}}}{T_{Q1}-T_{Q2}}\right) \quad ;T_{Q1}\neq T_{Q2} \qquad (2.13)$$

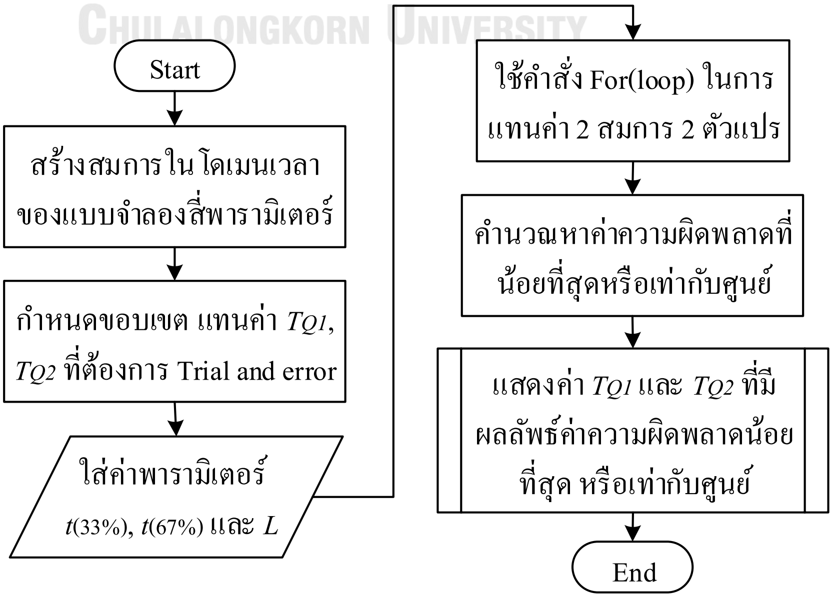
เมื่อเลือกผลตอบสนองที่ $s(t_1)=33\%$ และ $s(t_2)=67\%$ พร้อมกับแทนค่าอัตราขยาย K และเวลาประวิงชนิดขนส่ง L ลงในสมการที่ (2.13) จะได้ว่า

$$0.33 = 1\cdot\left(1+\frac{T_{Q2}\,e^{\frac{(49-375)}{T_{Q2}}} - T_{Q1}\,e^{\frac{(49-375)}{T_{Q1}}}}{T_{Q1}-T_{Q2}}\right) \qquad (2.14)$$

$$0.67 = 1\cdot\left(1+\frac{T_{Q2}\,e^{\frac{(49-859)}{T_{Q2}}} - T_{Q1}\,e^{\frac{(49-859)}{T_{Q1}}}}{T_{Q1}-T_{Q2}}\right) \qquad (2.15)$$

เนื่องจากการหาค่า T_{Q1} และ T_{Q2} จากสมการที่ (2.13) ไม่สามารถจัดรูปและแทนค่าได้โดยตรง จึงต้องใช้วิธีการหาโดยใช้วิธีเชิงประสบการณ์ (Empirical method) โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการช่วยคำนวณ รูปที่ 2.10 แสดงขั้นตอนของการคำนวณดังกล่าว

CHULALONGKORN UNIVERSITY

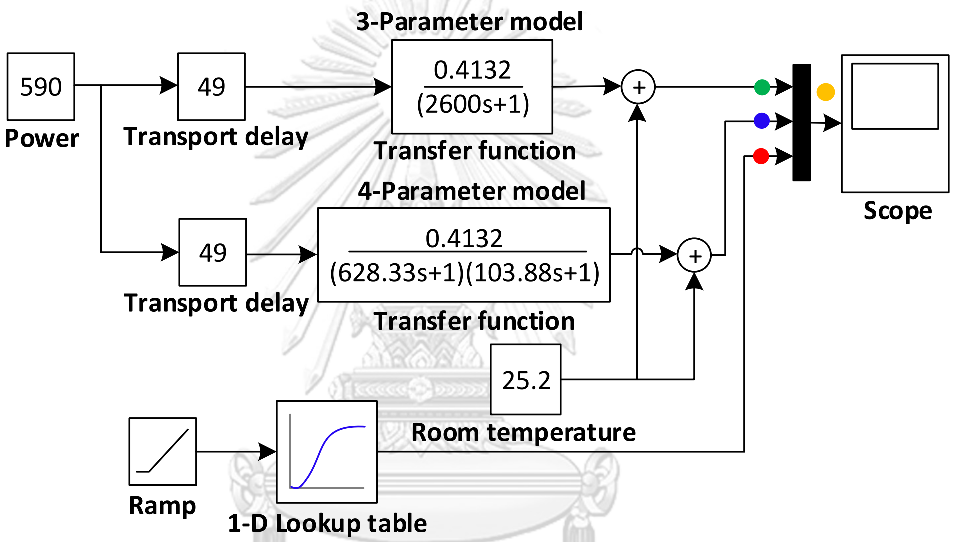


รูปที่ 2.10 แผนผังการคำนวณหา T_{Q1} และ T_{Q2} ด้วยวิธีเชิงประสบการณ์

จากขั้นตอนดังกล่าวและตารางที่ 2.2 เราสามารถเขียนแบบจำลองสี่พารามิเตอร์พร้อมกับพารามิเตอร์ทั้ง 4 ค่าที่หาได้ดังนี้

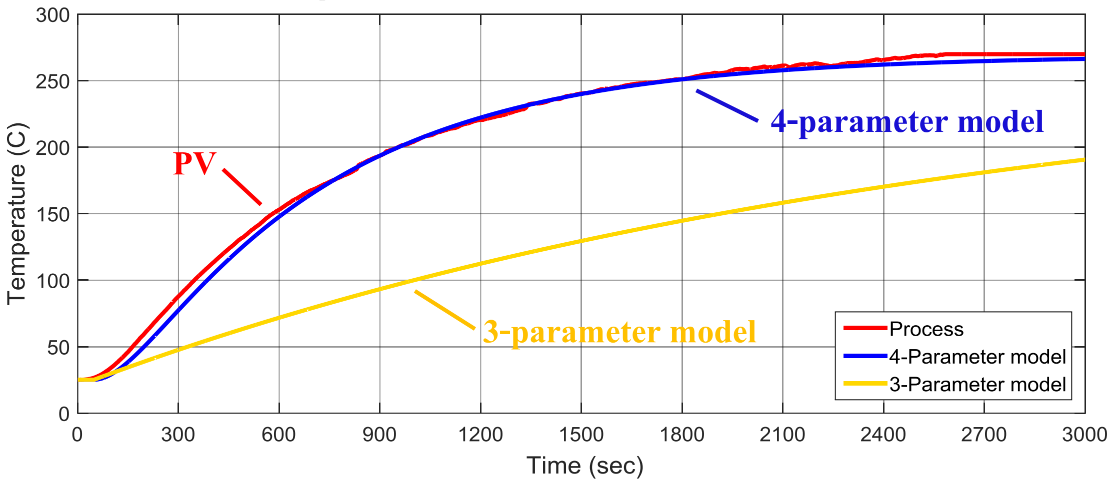
$$G_{P1}(s) = \frac{0.41322}{(1+628.33s)(1+103.88s)} e^{-49s} \tag{2.16}$$

รูปที่ 2.11 และ 2.12 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างผลตอบสนองจริงจากผลการทดลองและผลตอบสนองของแบบจำลองสามพารามิเตอร์ และผลตอบสนองของแบบจำลองสี่พารามิเตอร์ จะเห็นได้ว่าแบบจำลองสี่พารามิเตอร์(สีน้ำเงิน) มีผลตอบสนองที่ใกล้เคียงกับผลตอบสนองของกระบวนการจริง(สีแดง) ซึ่งเราจะใช้แบบจำลองสี่พารามิเตอร์นี้สำหรับการออกแบบอัตราขยายตัวควบคุมพีไอดีในหัวข้อถัดไป



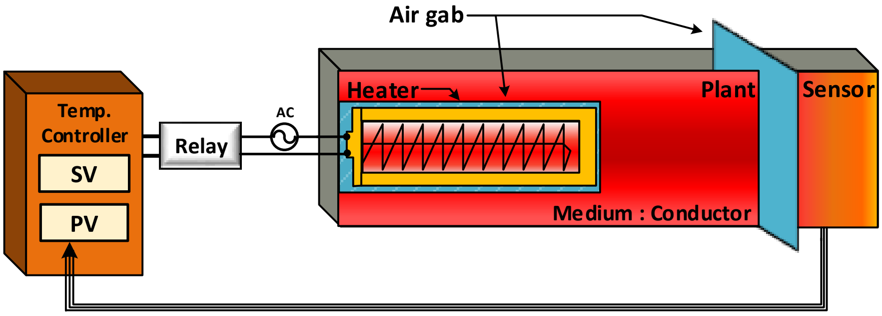
รูปที่ 2.11 บล็อกไดอะแกรมเปรียบเทียบแบบจำลองสามพารามิเตอร์และแบบจำลองสี่พารามิเตอร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



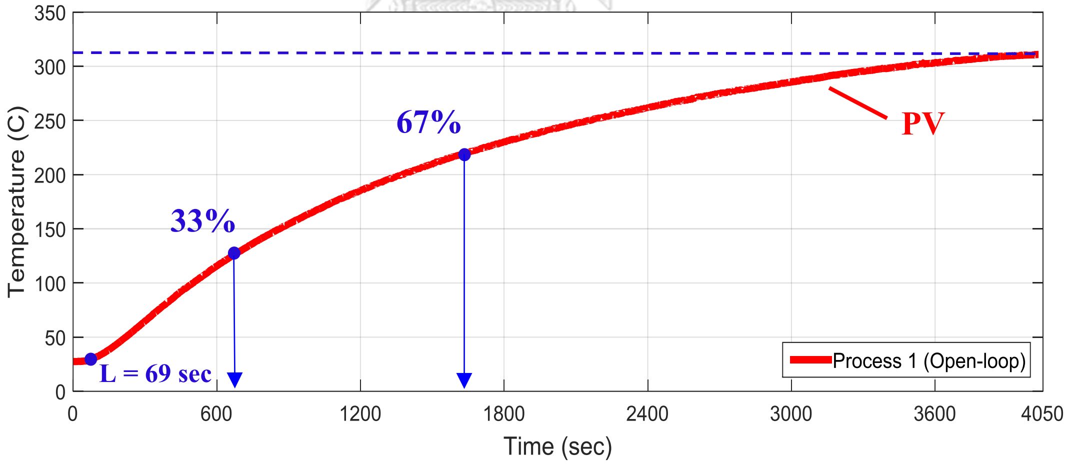
รูปที่ 2.12 เปรียบเทียบผลตอบสนองระหว่างกระบวนการจริง (สีแดง) แบบจำลองสามพารามิเตอร์ (สีเหลือง) และแบบจำลองสี่พารามิเตอร์ (สีน้ำเงิน) ของระบบที่ 1

2.3.2 แบบจำลองสี่พารามิเตอร์สำหรับระบบควบคุมอุณหภูมิที่มีเวลาประวิงชนิดขนส่งสูงมาก



รูปที่ 2.13 ระบบควบคุมอุณหภูมิที่มีตัวกลางแท่งโลหะชนิดเหล็ก (ระบบที่ 2)

ในระบบที่ 2 นี้เป็นระบบถ่ายเทความร้อนแบบนำความร้อนที่มีระยะห่างระหว่างตัวทำความร้อนกับตัววัดอุณหภูมิที่มากขึ้น ทำให้ค่าเวลาประวิงชนิดขนส่งสูงขึ้นจากระบบที่ 1 โดยผลการทดลองในรูปที่ 2.14 มีค่าเวลาประวิงชนิดขนส่งประมาณ 69 วินาที และเมื่อนำมาทดสอบหาพารามิเตอร์ของแบบจำลองสี่พารามิเตอร์ ตามกระบวนการหาพารามิเตอร์ของแบบจำลองเช่นเดียวกับของระบบที่ 1 จะได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงในตามรางที่ 2.3 และสมการที่ (2.18)



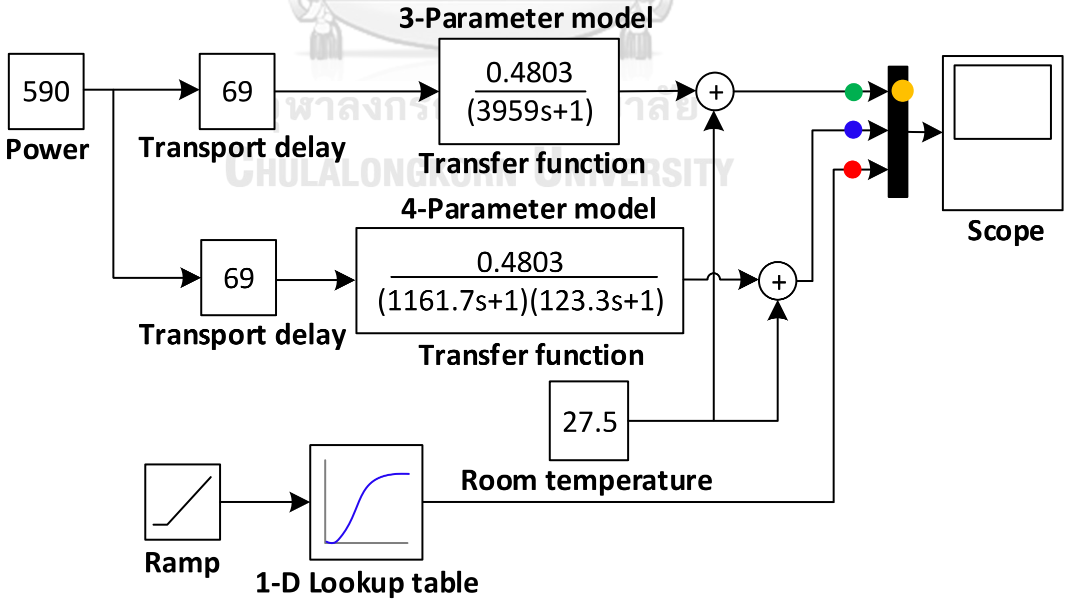
รูปที่ 2.14 ผลตอบสนองของกระบวนการแบบวงรอบเปิดในระบบมีค่าเวลาประวิงชนิดขนส่งสูงมาก

ตารางที่ 2.3 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองสี่พารามิเตอร์โดยเทียบเคียงกับผลตอบสนองอ้างอิงในรูปที่ 2.8 (ระบบที่ 2)

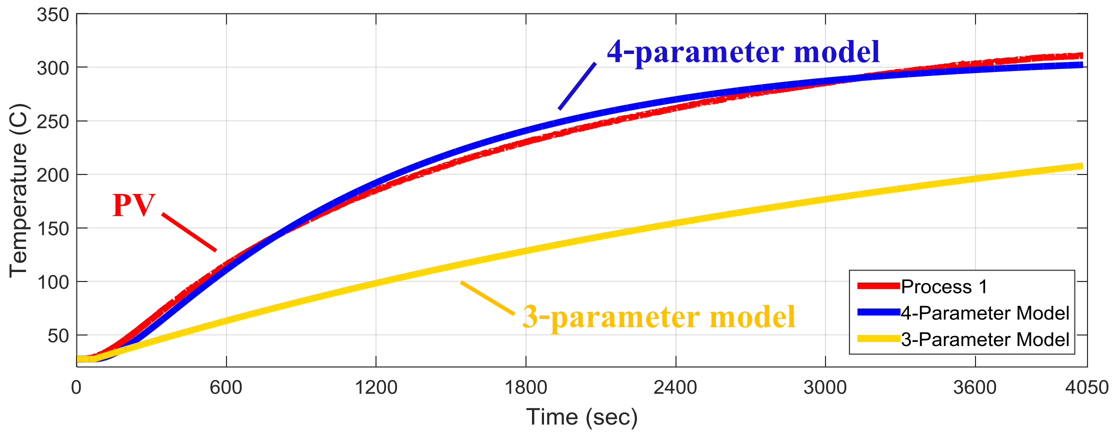
No.	Parameters	Value
1.	$PV_{range} = T_{peak} - T_{start}$	310.9°C – 27.5°C =283.4°C
2.	Time at 33% of PV_{range} ; $t_1 = (PV_{range} \cdot 0.33) + T_{start}$	121.22°C → t_1 = 638 sec
3.	Time at 67% of PV_{range} ; $t_2 = (PV_{range} \cdot 0.67) + T_{start}$	217.378°C → t_2 = 1598 sec
4.	$K = \dfrac{PV_{range}}{P_{in}}$	0.4803
5.	Transport delay time ; L	69 sec

$$G_{P2}(s) = \frac{0.4803}{(1161.7s+1)(123.3s+1)} e^{-69s} \tag{2.18}$$

บล๊อกไดอะแกรมในรูปที่ 2.15 และกราฟในรูปที่ 2.6 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองของแบบจำลองสี่พารามิเตอร์กับผลตอบสนองระบบจริงจากการทดลอง ซึ่งจะเห็นว่าได้มีผลตอบสนองที่ใกล้เคียง



รูปที่ 2.15 บล็อกไดอะแกรมเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบกับแบบจำลองสี่พารามิเตอร์ (ระบบที่ 2)



รูปที่ 2.16 เปรียบเทียบระหว่างผลตอบสนองของระบบจริง (สีแดง) และผลตอบสนองของแบบจำลองสี่พารามิเตอร์ (สีน้ำเงิน) ของระบบที่มีเวลาประวิงชนิดขนส่งสูงมาก

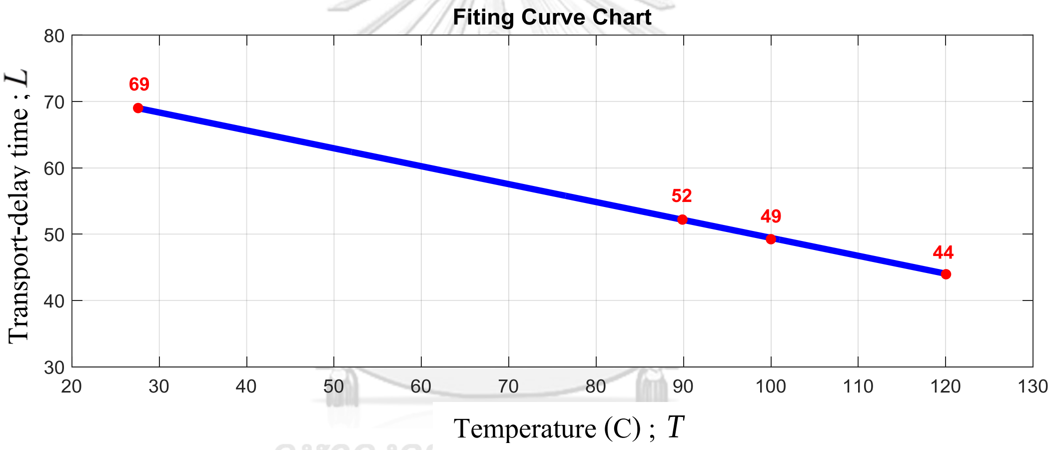
จากผลการทดสอบกับระบบที่ 1 และระบบที่ 2 ยืนยันให้เห็นว่าแบบสำลองสี่พารามิเตอร์มีความเหมาะสมกับระบบถ่ายเทความร้อน นอกจากนี้กระบวนการหาพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองมีความแม่นยำที่สามารถให้ผลตอบสนองของแบบจำลองใกล้เคียงกับของผลตอบสนองของระบบจริง และเราจะใช้แบบจำลองสี่พารามิเตอร์นี้ในการออกแบบอัตราขยายของตัวควบคุมพีไอดีซึ่งจะกล่าวในบทถัดไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.4 เวลาประวิงชนิดขนส่งที่มีการเปลี่ยนแปลงในระบบควบคุมอุณหภูมิ $\left(L(\mathrm{T})\right)$

เนื่องจากลักษณะสมบัติของระบบถ่ายเทความร้อน จะมีค่าเวลาประวิงชนิดขนส่งเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ $\left(L(\mathrm{T})\right)$ ดังนั้นจึงได้ทำการทดสอบหาค่าเวลาประวิงชนิดขนส่งที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 27.5°C, 90°C, 100°C และ 120°C ซึ่งผลการทดสอบสามารถหาค่าเวลาประวิงชนิดขนส่งได้เท่ากับ 69 วินาที, 52 วินาที, 49 วินาที และ 44 วินาที ตามลำดับ จากตัวอย่างข้อมูลที่ได้ทดสอบเราสามารถหาความสัมพันธ์ด้วยการทำเส้นโค้งที่เหมาะสม (Curve fitting) ระหว่างค่าเวลาประวิงชนิดขนส่งและอุณหภูมิของจุดทำงานได้ดังสมการที่ (2.19) และรูปที่ 2.17 ซึ่งเราจะใช้ความสัมพันธ์นี้ในการปรับเปลี่ยนค่าอัตราขยายตัวควบคุมพีไอดีแบบออนไลน์ ดังจะกล่าวต่อไปในบทที่ 3

$$L(\mathrm{T}) = 76.427-(0.2717 \cdot T) \tag{2.19}$$



รูปที่ 2.17 การหาสมการเส้นโค้งที่เหมาะสม (Curve fitting) ของค่าเวลาประวิงชนิดขนส่งทั้ง 4 จุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3
การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับระบบควบคุมอุณหภูมิ

ในบทนี้จะกล่าวถึงตัวควบคุมพีไอดี โดยเริ่มต้นจะนำเสนอหลักการพื้นฐานของตัวควบคุมพีไอดีหลังจากนั้นจะกล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมพีไอดดีสำหรับควบคุมอุณหภูมิ

3.1 หลักการและโครงสร้างตัวควบคุมพีไอดี

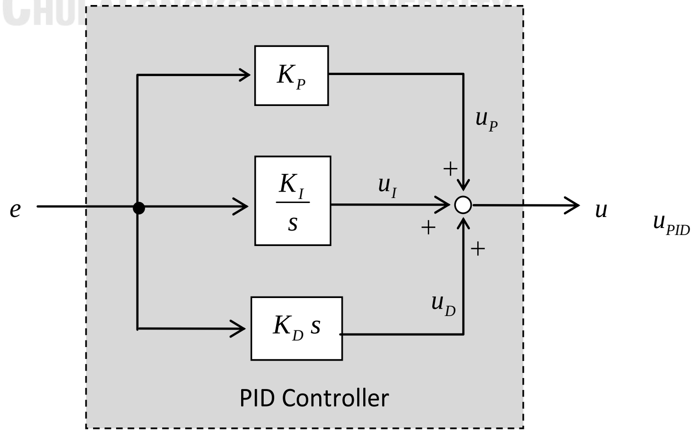
โครงสร้างตัวควบคุมพีไอดีที่นิยมใช้จะมีรูปแบบขนานดังแสดงในรูปที่ 3.1 เพราะมีประสิทธิภาพในการควบคุมได้ในวงกว้างและมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน ทำให้สามารถออกแบบอัตราขยายตัวควบคุมได้หลากหลายวิธีตามจุดประสงค์ของการควบคุม แต่เมื่อนำไปใช้ในทางปฏิบัติจำเป็นที่จะต้องมีการดัดแปลงโครงสร้าง หรือการเพิ่มขีดความสามารถให้ตัวควบคุมพีไอดี เพื่อรองรับการใช้งานในทางปฏิบัติตามจุดประสงค์ของการควบคุม

ตัวควบคุมพีไอดีพื้นฐานสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.1) - (3.2) และบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.1

$$u_{\mathrm{PID}}(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(\tau)\,d\tau + K_D \frac{de(t)}{dt} \tag{3.1}$$

$$\frac{U_{PID}(s)}{E(s)} = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \tag{3.2}$$

โดยที่ค่าความผิดพลาด $e = SP - PV$, SP คือค่าอุณหภูมิคำสั่งอ้างอิง และ PV คือค่าอุณหภูมิของกระบวนการจากตัววัดอุณหภูมิด้านออกของระบบ



รูปที่ 3.1 ตัวควบคุมพีไอดีที่มีโครงสร้างแบบขนาน

ตัวควบคุมพีไอดีในรูปที่ 3.1 มีข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้งานในทางปฏิบัติ ดังนั้นการใช้งานจริงจึงต้องมีการดัดแปลงตัวควบคุมโดยมีเป้าหมายคือ 1) การออกแบบตัวควบคุมที่มีอิสระเพื่อให้ได้ผลตอบสนองต่อค่าคำสั่งอ้างอิงได้ดี (Setpoint) พร้อมกับตอบสนองต่อโหลดรบกวน (Load Disturbance) และสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนจากการตรวจจับได้ (Measurement Noise) โดยวิทยานิพนธ์นี้จะประยุกต์ใช้ตัวควบคุมพีไอดีที่มีการดัดแปลงดังนี้

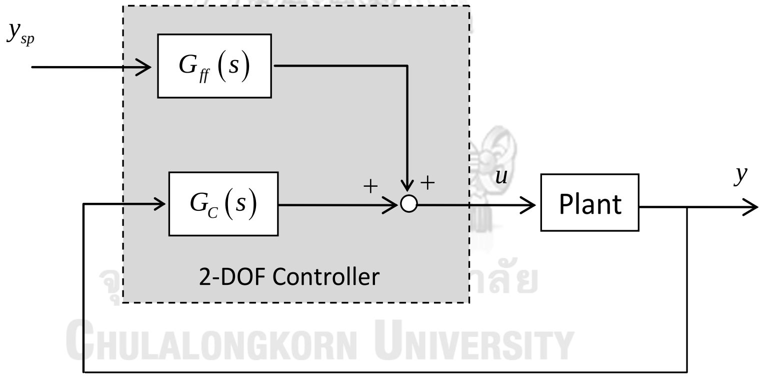
3.1.1 โครงสร้างของตัวควบคุมพีไอดีแบบสององศาอิสระ [1]

สมการที่(3.3) - (3.5) แสดงถึงการให้ค่าน้ำหนักของตัวควบคุมต่อค่าคำสั่งอ้างอิงที่แตกต่างกัน ค่าน้ำหนัก b และ c ทำให้เราสามารถออกแบบระบบเพื่อตอบสนองต่อค่าคำสั่งอ้างอิงและตัวโหลดรบกวนได้อย่างอิสระ จะเห็นได้ว่าในกรณีนี้ค่าน้ำหนักของตัวควบคุมปริพันธ์ยังคงมีค่าเท่ากับหนึ่งเพื่อให้ระบบมีสถานะอยู่ตัวเท่ากับศูนย์ โครงสร้างของตัวควบคุมดังกล่าวเป็นโครงสร้างของตัวควบคุมแบบสององศาอิสระ (Two-degree-of-freedom controller structure)

$$e_P = b \cdot SV - PV \tag{3.3}$$

$$e_I = e = SV - PV \tag{3.4}$$

$$e_D = c \cdot SV - PV \tag{3.5}$$



รูปที่ 3.2 โครงสร้างตัวควบคุมพีไอดีแบบสององศาอิสระ

รูปที่ 3.2 แสดงถึงบล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมพีไอดีที่มีโครงสร้างแบบสององศาอิสระ โดยที่ฟังก์ชันโอนย้าย $G_{ff}(s)$ และ $G_C(s)$ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.6) - (3.7)

$$G_{ff}(s) = bK_P + \frac{K_I}{s} + cK_D s \tag{3.6}$$

$$G_C(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \tag{3.7}$$

ความแตกต่างระหว่างฟังก์ชันโอนย้ายสะท้อนให้เห็นถึงหน้าที่ที่แตกต่างกัน โดยฟังก์ชันโอนย้าย $G_{ff}(s)$ ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมแบบป้อนไปหน้า ในขณะที่ฟังก์ชันโอนย้าย $G_C(s)$ ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมแบบป้อนกลับ กล่าวโดยสรุปได้ว่า การให้ค่าน้ำหนักของค่าคำสั่งอ้างอิงให้แก่

ตัวควบคุมพีไอดีแบบดั้งเดิมทำให้เราสามารถดัดแปลงโครงสร้างตัวควบคุมให้เป็นแบบสององศาอิสระได้

3.1.2 การจำกัดค่าอัตราขยายอนุพันธ์ (Limitation of Derivative Gain)

เทอมอนุพันธ์ทำให้เกิดปัญหาในทางปฏิบัติเนื่องจากจะมีความไวหรืออัตราขยายมากต่อสัญญาณรบกวนความถี่สูงที่ปะปนมากับการตรวจจับสัญญาณด้านออก ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องจำกัดค่าอัตราขยายที่ความถี่สูงของตัวควบคุมอนุพันธ์ดังแสดงในสมการที่ (3.8)

$$u_{DC} \quad = \quad -\frac{K_D \cdot s}{1+K_D/N \cdot s} \cdot PV \tag{3.8}$$

โดยที่ u_{DC} คือสัญญาณด้านออกของตัวควบคุมอนุพันธ์ในส่วนป้อนกลับ $G_C(s)$ การดัดแปลงดังกล่าวเป็นการใส่วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่มีค่าคงตัวเวลา K_D/N ซึ่งตัวควบคุมยังคงมีคุณสมบัติของอนุพันธ์สำหรับสัญญาณที่ความถี่ต่ำ ในขณะที่อัตราขยายที่ความถี่สูงจะถูกจำกัดให้เท่ากับ N

ในอีกด้านหนึ่งสำหรับสัญญาณด้านออกของตัวควบคุมอนุพันธ์ที่มาจากส่วนป้อนไปหน้า $G_{ff}(s)$ โดยทั่วไปแล้วค่าน้ำหนัก c สำหรับตัวควบคุมอนุพันธ์จะให้เท่ากับศูนย์เพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดสัญญาณควบคุมขนาดใหญ่ในช่วงสถานะชั่วครู่ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าคำสั่งอ้างอิงแบบทันทีทันใด เช่น การเปลี่ยนแปลงค่าคำสั่งแบบขั้น เป็นต้น

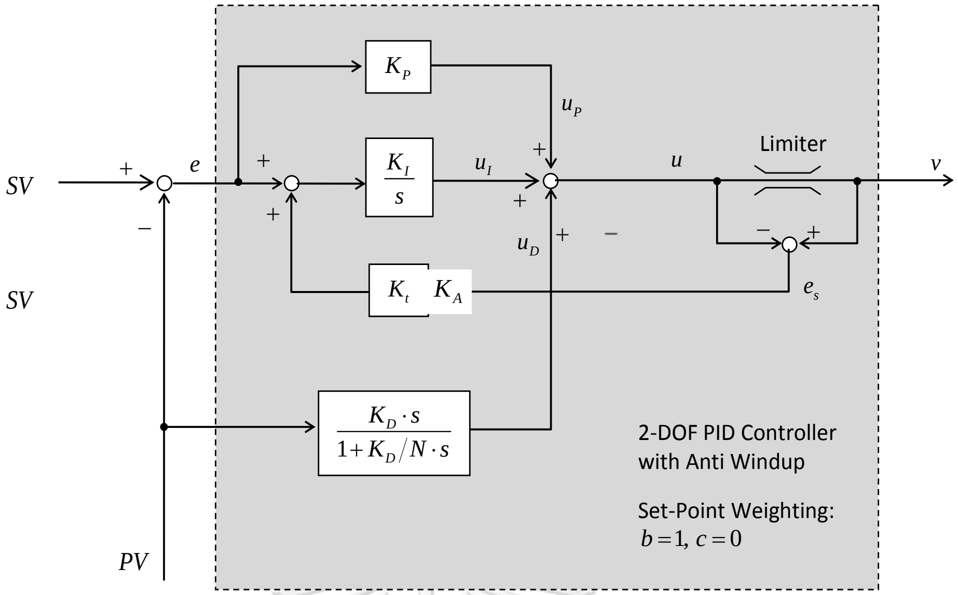
3.1.3 การต่อต้านการไขขึ้นของตัวควบคุมปริพันธ์ (Anti-Windup for Integrator Controller)

พฤติกรรมของตัวควบคุมปริพันธ์ทำให้เกิดการไขขึ้นและเกิดการพุ่งเกินได้ เมื่อสัญญาณด้านออกของตัวควบคุมมีค่ามากกว่าค่าจำกัด ทั้งนี้ค่าจำกัดของตัวควบคุมจะพิจารณาจากค่าพิกัดของตัวขับเร้า ดังนั้นจึงต้องมีกลไกเพิ่มเติมในการต่อต้านการไขขึ้นของตัวควบคุมปริพันธ์ รูปที่ 3.3 แสดงถึงการจำกัดการไขขึ้นโดยเพิ่มเติมส่วนป้อนกลับไปยังด้านเข้าของตัวควบคุมปริพันธ์ ส่วนป้อนกลับนี้จะทำหน้าที่เมื่อสัญญาณด้านออกของตัวควบคุม u_{PID} มีขนาดมากกว่าค่าจำกัดของตัวขับเร้า $(u > v)$ ค่าผิดพลาด e_s จะถูกป้อนกลับผ่านอัตราขยาย K_A กลับรวมกับสัญญาณด้านเข้าของตัวควบคุมปริพันธ์จนกระทั่งสัญญาณด้านเข้ารวมของตัวควบคุมปริพันธ์เท่ากับศูนย์ที่สู่สภาวะอยู่ตัวซึ่งจะได้เงื่อนไขดังแสดงในสมการที่ (3.9)

$$e_s \quad = \quad -\frac{1}{K_A} \cdot e \tag{3.9}$$

และเนื่องจาก $u = v - e_s$ ดังนั้นจะได้ว่าระบบจะหยุดการไขขึ้นโดยที่สัญญาณด้านออกของตัวควบคุมจะมีค่าอิ่มตัว $u_{\lim}$ และมีความสัมพันธ์กับค่าพิกัดของตัวขับเร้าดังนี้

$$u = u_{\lim} + \frac{1}{K_A} \cdot e \tag{3.10}$$



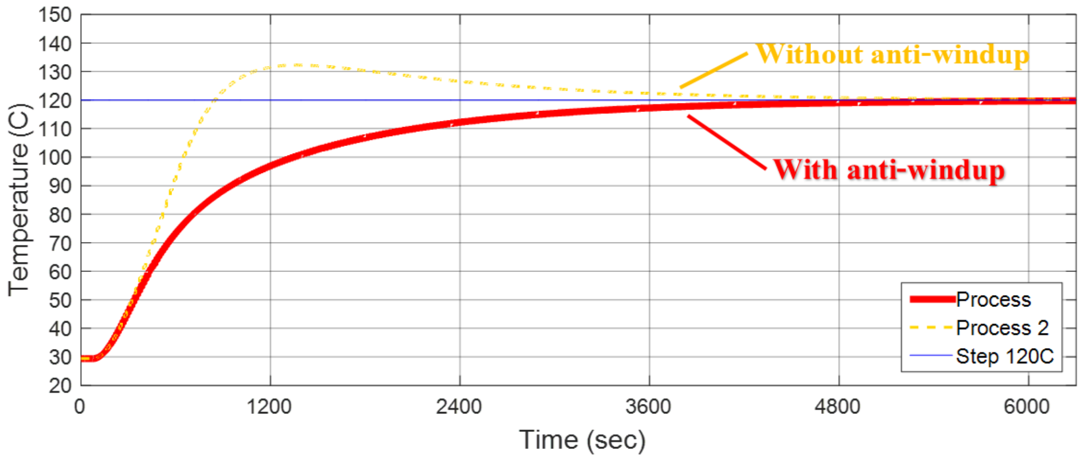
รูปที่ 3.3 ตัวควบคุมพีไอดีแบบสององศาอิสระและมีการต่อต้านการไขขึ้น

จากรูปที่ 3.3 ตัวควบคุมพีไอดีแบบสององศาอิสระที่มีการดัดแปลง สามารถนำมาเขียนสมการตัวควบคุมพีไอดีดังแสดงในสมการที่ (3.11)

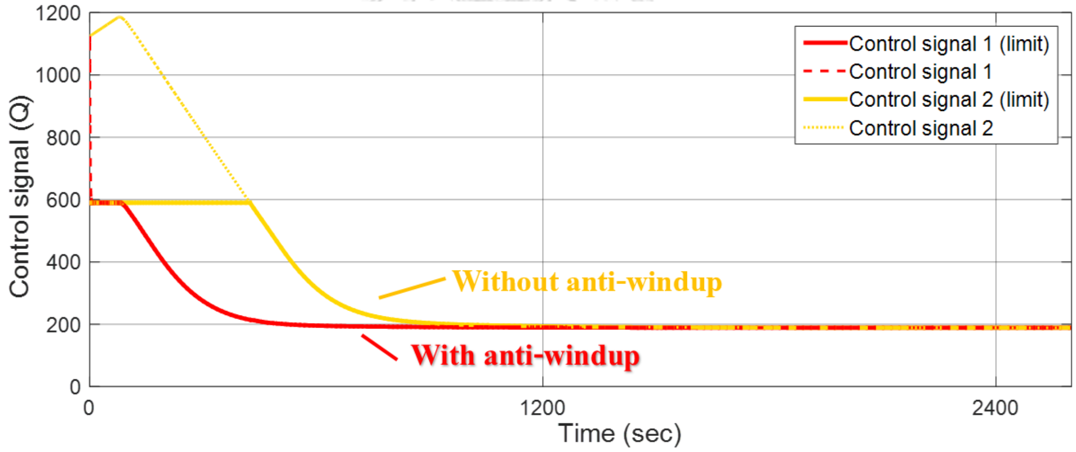
$$U_{PID}(\mathrm{s}) = \left(\left(\left(K_P + \frac{K_I}{s}\right)\cdot e\right) - \left(\frac{K_D \cdot s}{1+K_D/N \cdot s}\cdot PV\right)\right) \tag{3.11}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ผลการจำลองผลตอบสนองการต่อต้านการไขขึ้นของตัวปริพันธ์ รูปที่ 3.4 (ก) เปรียบเทียบผลตอบสนองของตัวควบคุมพีไอดีเมื่อการใส่ตัวต่อต้านการไขขึ้น จะเห็นว่าจะช่วยลดการพุ่งเกินของผลตอบสนองอุณหภูมิของระบบได้ โดยสามารถจำกัดสัญญาณด้านออกของตัวควบคุมพีไอดีที่มีค่าสูงมากในช่วงสถานะชั่วครู่ ให้มีค่าไม่เกินค่าที่จำกัดไว้ได้ โดยแสดงในรูปที่ 3.4 (ข)



(ก) ผลตอบสนองอุณหภูมิ T ของระบบ



(ข) สัญญาณด้านออก u_{PID} ของตัวควบคุมพีไอดี

รูปที่ 3.4 ผลการจำลองการทำงานเปรียบเทียบผลตอบสนองของตัวควบคุมพีไอดีระหว่างกรณีที่มีและไม่มีการใส่ตัวต่อต้านการไขขึ้น

วิทยานิพนธ์นี้จะใช้โครงสร้างตัวควบคุมพีไอดีแบบขนานที่มีรูปแบบการดัดแปลงเพื่อการใช้งานในทางปฏิบัติ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 กับระบบควบคุมอุณหภูมิด้วยตัวทำความร้อน โดยมีแนวทางการออกแบบอัตราขยายตัวควบคุม ดังแสดงในหัวข้อถัดไปนี้

3.2 การออกแบบอัตราขยายตัวควบคุมพีไอดีที่มีการพิจารณาถึงผลของเวลาประวิง

3.2.1 การออกแบบอัตราขยายด้วยวิธีซีกเกอร์-นิโคล (Ziegler-Nichols's Method) [2]

วิธีนี้จะพิจารณาจะผลตอบสนองแบบขั้น โดยค่าอัตราขยายพีไอดีจึงขึ้นกับพารามิเตอร์ของระบบ ซึ่งได้แก่ค่าเวลาประวิง L และความชันของผลตอบสนองคือพารามิเตอร์ R (ดูรูปที่ 2.6 ประกอบ) ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.2 การออกแบบอัตราขยายพีไอดีด้วยวิธีซิเกลอร์-นิโคล

อัตราขยายตัวควบคุมพีไอดี
$K_P = \frac{1.2}{R \cdot L}$
$K_I = \frac{0.6}{L^2 \cdot R}$
$K_D = \frac{0.6}{R}$

3.2.2 การออกแบบอัตราขยายด้วยวิธีเชน-ฮรอนเนส-เรสวิก (CHR's Method) [3]

วิธีนี้ดัดแปลงมาจากวิธีของซีกเกอร์-นิโคล โดยนำเสนอความไวต่อผลตอบสนองซึ่งนำผลของค่าพุ่งเกินมาพิจารณาประกอบ ทั้งนี้วิธีนี้จะแยกการออกแบบอัตราขยายสำหรับผลตอบสนองต่อตัวโหลดรบกวนและผลตอบสนองต่อค่าคำสั่งอ้างอิง ดังแสดงในตารางที่ 3.2

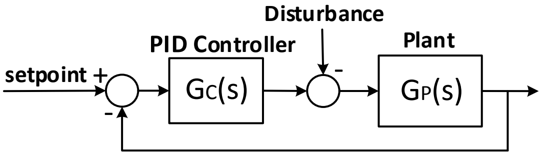
ตารางที่ 3.4 การออกแบบอัตราขยายพีไอดีด้วยวิธีเชน-ฮรอนเนส-เรสวิก

CHR Disturbance Response Method	
Overshoot 0%	Overshoot 20%
$K_P = \frac{0.9}{R \cdot L}$	$K_P = \frac{1.2}{R \cdot L}$
$K_I = \frac{0.369}{L^2 \cdot R}$	$K_I = \frac{0.475}{L^2 \cdot R}$
$K_D = \frac{0.4}{R}$	$K_D = \frac{0.4}{R}$
CHR Setpoint Response Method	
Overshoot 0%	Overshoot 20%
$K_P = \frac{0.9}{R \cdot L}$	$K_P = \frac{0.95}{R \cdot L}$
$K_I = \frac{0.6}{L^2 \cdot R}$	$K_I = \frac{0.68}{L^2 \cdot R}$
$K_D = \frac{0.3}{R}$	$K_D = \frac{0.4465}{R}$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.2.3 การออกแบบด้วยวิธีของฮาลมาน (Haalman's Method) [4]

จากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.6 วิธีนี้จะกำหนดผลตอบสนองที่ต้องการผ่านฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิด $G_L(s)$ และคำนวณหาฟังก์ชันโอนย้ายของตัวควบคุม $G_C(s)$ จากฟังก์ชันโอนย้ายของระบบ $G_P(s)$ ดังแสดงในสมการที่ (3.12)



รูปที่ 3.5 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมอุณหภูมิในรูปของฟังก์ชันโอนย้าย $G_C(s)$ และ $G_P(s)$

$$G_C(s) = \frac{G_L(s)}{G_P(s)} \tag{3.12}$$

โดย $G_P(s)$ คือฟังก์ชันโอนย้ายของแบบจำลองสี่พารามิเตอร์ดังแสดงในสมการที่ (3.13) ในระบบที่เวลาประวิงชนิดขนส่งมีนัยสำคัญ ฮาลมานแนะนำให้เลือกฟังก์ชันโอนย้ายของวงรอบปิดตามสมการที่ (3.14) และออกแบบค่าอัตราขยายตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีการหักล้างค่าขั้วและศูนย์ (Pole and zero cancellation)

$$G_{P2}(s) = \frac{K}{(T_{Q1}s+1)(T_{Q2}s+1)} \cdot e^{-sL} \tag{3.13}$$

$$G_L(s) = \frac{2}{3Ls} \cdot e^{-sL} \tag{3.14}$$

ซึ่งทำให้ระบบมีผลตอบสนองที่ดีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าคำสั่งอ้างอิงแบบขั้นและมีความไว (Sensitivity) ที่ยอมรับได้ จากแนวคิดดังกล่าว เราสามารถหาฟังก์ชันโอนย้ายของตัวควบคุมพีไอดีสำหรับระบบที่มีแบบจำลองแบบสี่พารามิเตอร์สมการที่ (3.13) ได้ดังแสดงในสมการที่ (3.15) และ (3.16)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$G_C(s) = \frac{2(T_{Q1}s+1)(T_{Q2}s+1)}{3Ls} \tag{3.15}$$

$$G_C(s) = \left(\frac{2(T_{Q1}+T_{Q2})}{3L} + \frac{2}{3L\cdot s} + s\cdot\frac{2(T_{Q1}\cdot T_{Q2})}{3L}\right) \tag{3.16}$$

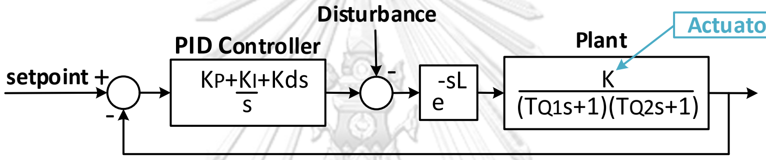
เมื่อเทียบเคียงกับฟังก์ชันโอนย้ายของตัวควบคุมพีไอดีในสมการที่ (3.17) แล้วจะสามารถแสดงค่าอัตราขยายที่ออกแบบในตารางที่ 3.3

$$G_{PID}(s) = \left(K_P + \frac{K_I}{s} + K_D\cdot s\right) \tag{3.17}$$

ตารางที่ 3.5 ค่าอัตราขยายตัวควบคุมพีไอดีวิธีของฮาลมาน

อัตราขยายตัวควบคุมพีไอดี
$K_P = \dfrac{2(T_{Q1}+T_{Q2})}{3\cdot L}$
$K_I = \dfrac{2}{3\cdot L}$
$K_D = \dfrac{2(T_{Q1}\cdot T_{Q2})}{3\cdot L}$

เมื่อแทนฟังก์ชันโอนย้าย $G_P(s)$ ในสมการที่ (3.14) และฟังก์ชันโอนย้ายของตัวควบคุมพีไอดีในสมการที่ (3.18) ลงในบล็อกไดแกรมในรูปที่ 3.5 จะสามารถเขียนบล็อกไดอะแกรมได้ใหม่ในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมอุณหภูมิที่มีแบบจำลองสี่พารามิเตอร์และตัวควบคุมพีไอดี

จากบล็อกไดอะแกรมของระบบในรูปที่ 3.6 และค่าอัตราขยายที่ออกแบบในตารางที่ 3.3 เราสามารถหาฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบปิดได้ดังแสดงสมการที่ (3.18) และ (3.19) ซึ่งผลจากการหักล้างระหว่างค่าขั้วและศูนย์ของตัวควบคุมและระบบ ทำให้ฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบปิดจะถูกกำหนดโดยค่าเวลาประวิงชนิดขนส่งเท่านั้น

$$G_{02}(s) = \frac{G_C(s)G_P(s)}{1+G_C(s)G_P(s)} \qquad (3.18)$$

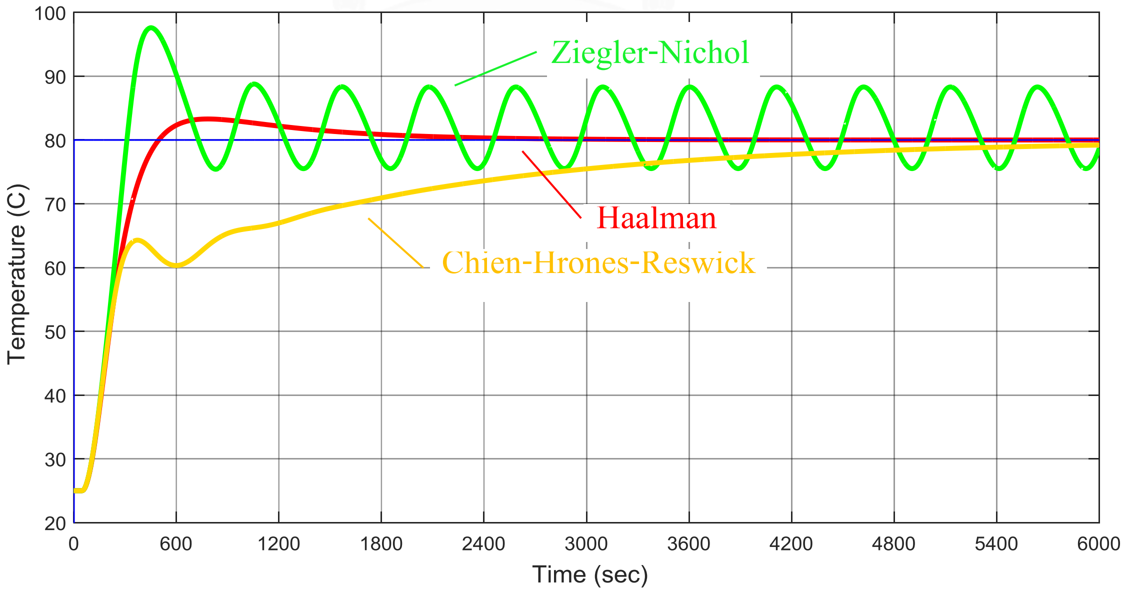
$$G_{02}(s) = \frac{2}{2+(3\cdot L\cdot s\cdot(e^{-sL}))} \qquad (3.19)$$

ตารางที่ 3.6 ตารางสรุปการปรับตั้งค่าอัตราขยายพีไอดีเปรียบเทียบกับวิธีต่างๆ

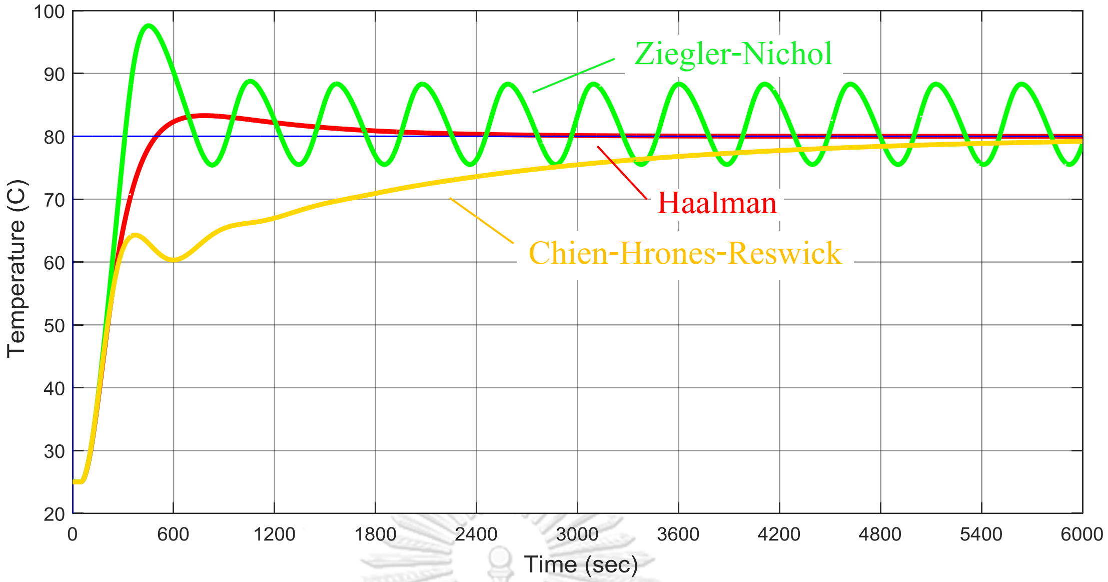
Design method	K_P	K_I	K_D
Ziegler-Nichol	$\frac{1.2}{R \cdot L}$	$\frac{0.6}{L^2 \cdot R}$	$\frac{0.6}{R}$
Chien, Hrones & Reswick	$\frac{0.9}{R \cdot L}$	$\frac{0.6}{L^2 \cdot R}$	$\frac{0.3}{R}$
Haalman	$\frac{2(T_{Q1}+T_{Q2})}{3 \cdot L}$	$\frac{2}{3 \cdot L}$	$\frac{2(T_{Q1} \cdot T_{Q2})}{3 \cdot L}$

3.3 ผลการจำลองผลตอบสนองของระบบควบคุมอุณหภูมิที่ออกแบบด้วยวิธีต่างๆ

รูปที่ 3.7(ก) แสดงถึงผลการจำลองการทำงานของผลตอบสนองต่อค่าอุณหภูมิคำสั่งอ้างอิงที่ 80 °C โดยใช้แนวทางการออกแบบอัตราขยายในตารางที่ 3.4 ซึ่งจะเห็นได้ว่าวิธีของซิกเกลอ-นิโคล จะ เกิดการพุ่งเกินและการแกว่งที่สถานะอยู่ตัว วิธีของเชน-ฮรอนเนส-เรสวิก จะแก้ไขการพุ่งเกินและการแกว่ง แต่ทำให้ระบบมีผลตอบสนองในการเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ช้า ในขณะที่วิธีของฮาลมานจะให้ผลตอบสนองที่ดี โดยมีค่าพุ่งเกินไม่สูงและมีผลตอบสนองช่วงเวลาเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่รวดเร็วประมาณ 1,260 วินาที นอกจากนี้ยังได้เปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ใช้วงจรกรองที่ตัวควบคุมอนุพันธ์ซึ่งมีผลตอบสนองที่ไม่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูป 3.7(ข) รูปที่ 3.8 แสดงถึงผลการตอบสนองต่อตัวโหลดรบกวน ($P_{LD} = 24.2W$) จะเห็นได้ว่าวิธีของฮาลมานยังคงให้ผลตอบสนองต่อตัวโหลดรบกวนที่ดีกว่าวิธีของ เชน-ฮรอนเนส-เรสวิก

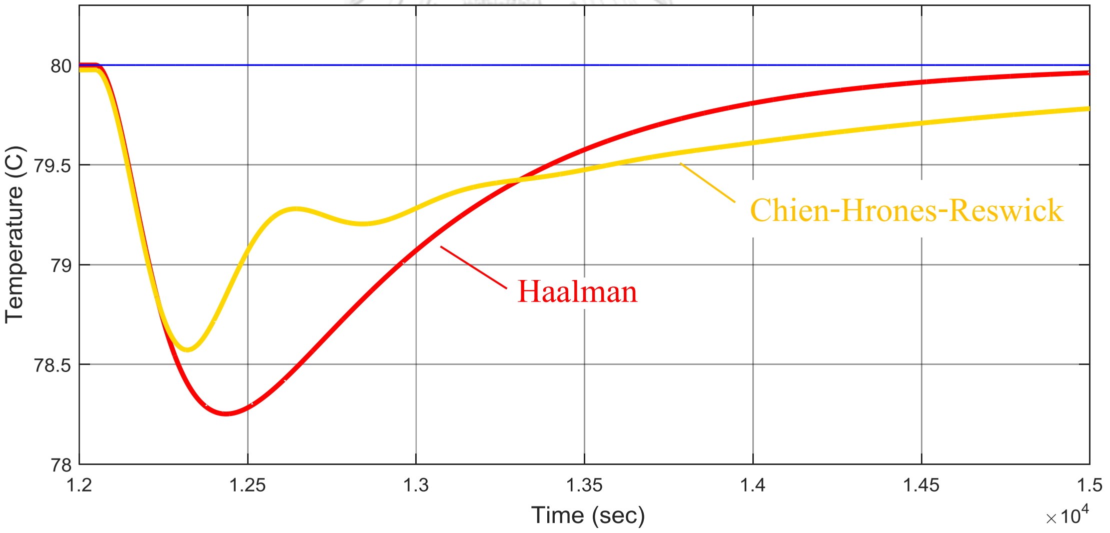


(ก) ไม่มีตัวกรองความถี่ต่ำผ่านที่ตัวควบคุมอนุพันธ์



(ข) มีตัวกรองความถี่ต่ำผ่านที่ตัวควบคุมอนุพันธ์ ($N = 10$)

รูปที่ 3.7 กราฟแสดงผลตอบสนองของระบบด้วยตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีของฮาลมาน (สีแดง) วิธีของซีเกลอ-นิโคล (สีเขียว) และวิธีของเชน-ฮรอนเนส-เรสวิค (สีเหลือง)



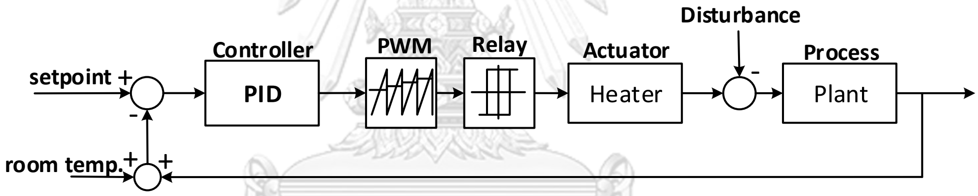
รูปที่ 3.9 ผลตอบสนองต่อตัวโหลดรบกวน (PV = 24.2W (หรือ ≈ 10 °C))

บทที่ 4
ผลการทดสอบระบบควบคุมอุณหภูมิที่มีตัวควบคุมพีไอดี

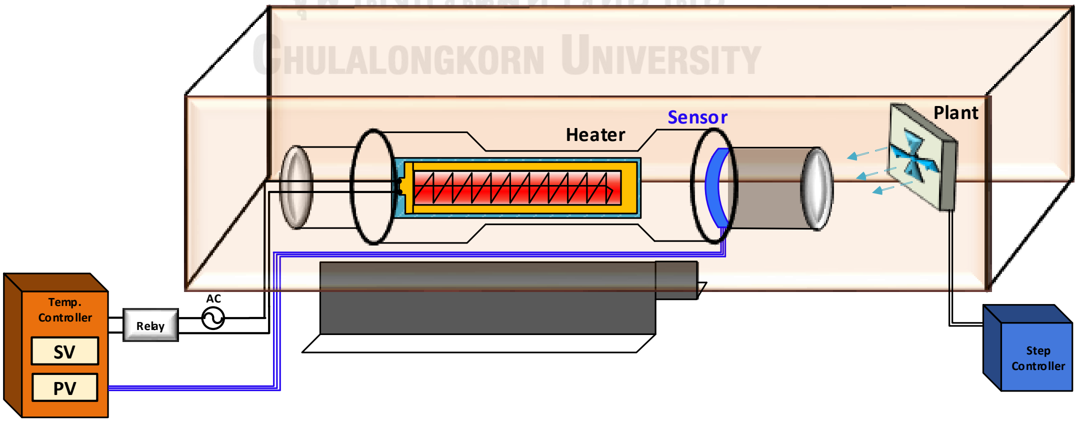
ในบทนี้จะกล่าวถึงการจำลองการทำงานและการทดสอบเครื่องควบคุมอุณหภูมิในระบบที่มีเวลาประวิงชนิดขนส่งสูง การทดสอบจะพิจารณาผลตอบสนองต่อค่าอุณหภูมิคำสั่งต่างๆ และผลตอบสนองต่อโหลดรบกวน โดยจะแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกับการออกแบบอัตราขยายพีไอดีที่เสนอในบทที่แล้ว

4.1 ระบบควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ

รูปที่ 4.1 แสดงภาพรวมของระบบควบคุมอุณภูมิที่ใช้ในการทดสอบ โดยรายละเอียดของแต่ละองค์ประกอบสามารถอธิบายได้ดังนี้ รูปที่ 4.2 แสดงถึงระบบกระบวนการถ่ายเทความร้อนด้วยตัวทำความร้อนแบบแท่งกลม (Cartridge) ที่มีตัวกลางนำความร้อนเป็นแท่งเหล็กที่มีค่าประวิงเวลาชนิดขนส่งสูง โดยมีโหลดรบกวน (Load Disturbance) เป็นพัดลมระบายอากาศที่มีการควบคุมอัตราเร็ว



รูปที่ 4.1 ระบบควบคุมอุณหภูมิด้วยตัวควบคุมพีไอดีที่ใช้ในการทดสอบ

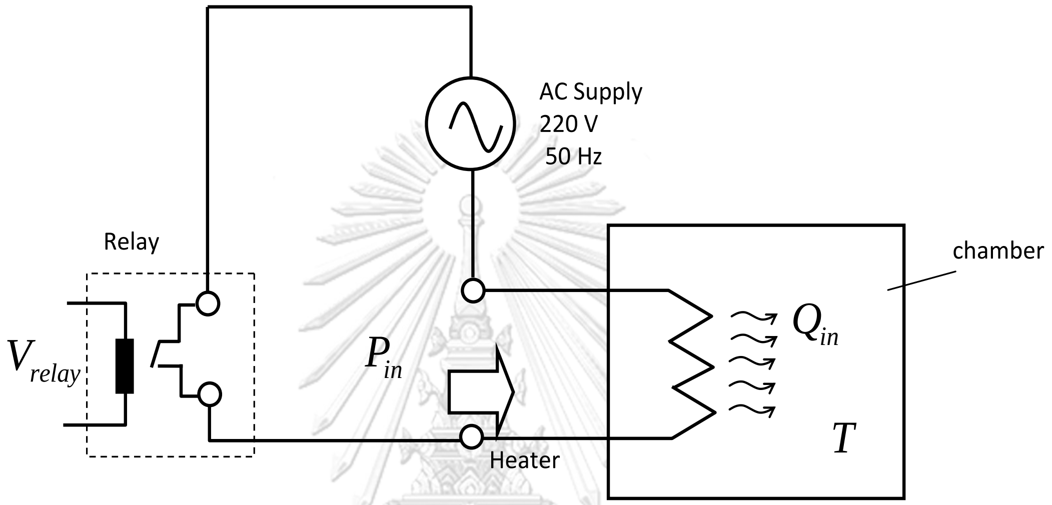


รูปที่ 4.2 โครงสร้างของระบบถ่ายเทความร้อนที่ใช้ทดสอบ

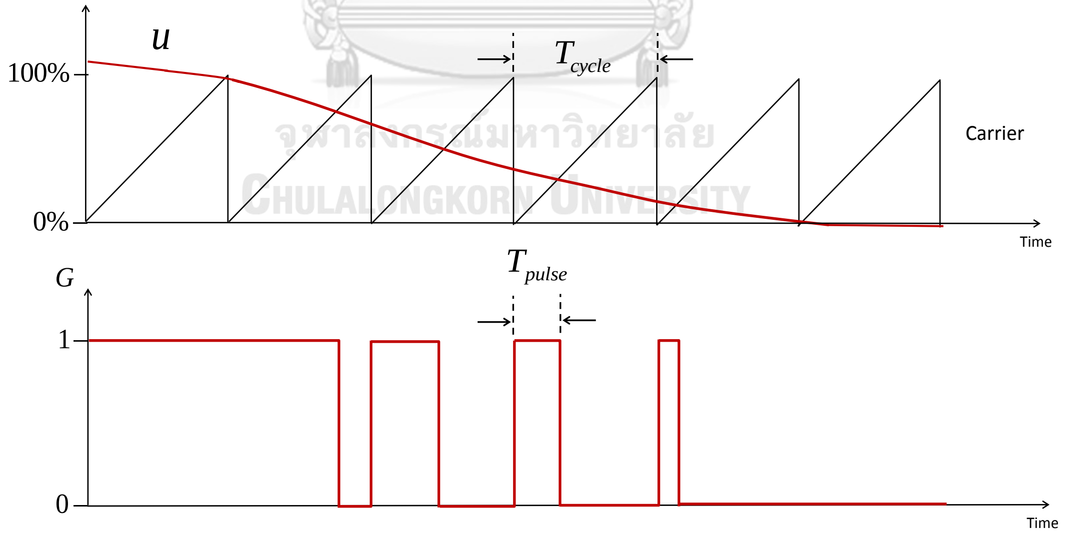
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ในส่วนตัวขับเร้าจะประกอบด้วยตัวทำความร้อน (Heater) ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งใช้รีเลย์เป็นสวิตช์กำลังสำหรับเชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟสลับไปยังตัวทำความร้อน สัญญาณขับนำการปิดและเปิดรีเลย์ V_{relay} มาจากการทำมอดูเลตแบบปรับความกว้างพลัลส์ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 สัญญาณ u_{PID} มาจากด้านออกของตัวควบคุมพีไอดี และคาบเวลา T_{cycle} ที่ใช้จะมีค่าอยู่ในช่วง 1-10 วินาที และช่วงเวลาที่รีเลย์ปิดวงจร T_{pulse} สามารถคำนวณได้ดังสมการ (4.1)

$$T_{pulse} = \frac{u}{100} \times T_{cycle} \qquad (4.1)$$



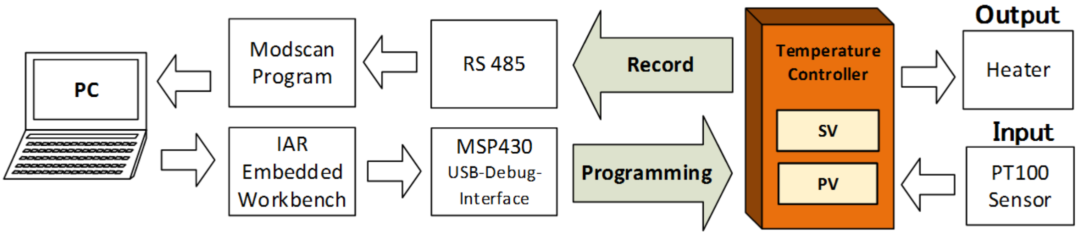
รูปที่ 4.3 ตัวขับเร้าสำหรับระบบตัวทำความร้อน



รูปที่ 4.4 สัญญาณขับนำตัวขับเร้าด้วยวิธีมอดูเลตความกว้างพลัลส์

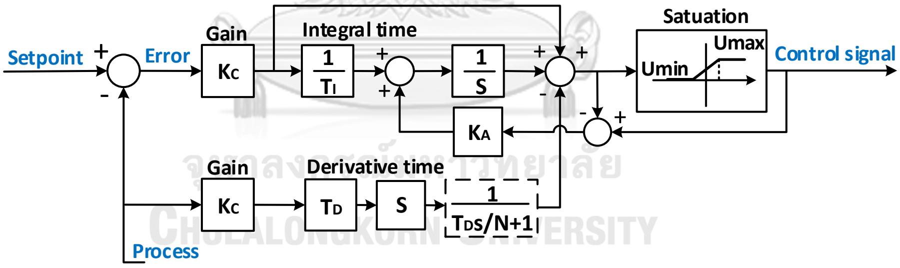
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4.5 แสดงถึงฮาร์ดแวร์และส่วนบูรณาการสิ่งแวดล้อมในการพัฒนา (Integrated Development Environment ;IDE) อัลกอลิทึมของตัวควบคุมพีไอดีจะใช้ตัวประมวลผลของ MSP430F4783 ของบริษัท Texas Instruments ที่มีสถาปัตยกรรมแบบ RISC 16-bit ที่มีรอบเวลาการประมวลผล (Instruction cycle time) 62.5 ns และมีช่องสัญญาณสำหรับแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิตอล 3 ช่องโดยตัวแปลงเป็นแบบ ซิกมา – เดลต้า ขนาด 16 บิต (16-Bit Sigma-Delta A/D Converter)



รูปที่ 4.5 ฮาร์ดแวร์และส่วนบูรณาการสิ่งแวดล้อมในการพัฒนา (IDE)

รูปที่ 4.6 แสดงถึงโครงสร้างของตัวควบคุมพีไอดีที่ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมพีไอดี (K_P , K_I , K_D) จะเขียนในรูปของอัตราขยาย K_C เวลาปริพันธ์ T_I และเวลาอนุพันธ์ T_D ดังเปรียบเทียบในตารางที่ 4.1 สำหรับกรณีออกแบบอัตราขยายด้วยวิธีของฮาลมาน ตารางที่ 4.2 แสดงถึงค่าอัตราขยายและพารามิเตอร์ต่างๆของตัวควบคุมพีไอดีที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 4.6 โครงสร้างตัวควบคุมพีไอดีแบบขนานที่มีการดัดแปลง

ตารางที่ 4.1 อัตราขยายพีไอดีด้วยวิธีของฮาลมานในรูปแบบของเวลาอนุพันธ์และเวลาปริพันธ์

อัตราขยายตัวควบคุมพีไอดี	
$K_P = \frac{2(T_{Q1}+T_{Q2})}{3\cdot L}$	$K_C = \frac{2(T_{Q1}+T_{Q2})}{3\cdot L}$
$K_I = \frac{2}{3\cdot L}$	$T_I = (T_{Q1}+T_{Q2})$
$K_D = \frac{2(T_{Q1}\cdot T_{Q2})}{3\cdot L}$	$T_D = \frac{(T_{Q1}\cdot T_{Q2})}{(T_{Q1}+T_{Q2})}$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.2 ค่าอัตราขยายตัวควบคุมพีไอดีที่ออกแบบ

Parameters	Value
K_C	12.42
T_I	1285
T_D	111.5
K_A	1
N	10
$U_{\max}$	590 W
$U_{\min}$	0 W
b	1
c	1
T_{cycle}	1 sec

สมการที่ (4.2) - (4.7) แสดงถึงการแปลงตัวควบคุมพีไอดีจากเวลาต่อเนื่องเป็นรูปแบบของเวลาดิสครีต โดยมีคาบเวลาในการสุ่ม T_{cycle} เท่ากับ 1 sec

- การแปลงเป็นสัญญาณดีสครีตสำหรับสัญญาณขาออกของตัวควบคุมพี $u_P(\mathrm{t})$

$$u_P(\mathrm{t}) = K_C \cdot b \cdot e(\mathrm{t}) \tag{4.2}$$

$$u_P(\mathrm{t_K}) = K_C \cdot b \cdot e(\mathrm{t_K}) \tag{4.3}$$

- การแปลงเป็นสัญญาณดีสครีตสำหรับสัญญาณขาออกของตัวควบคุมไอ $u_I(\mathrm{t})$

$$u_I(\mathrm{t}) = \frac{K_C}{T_I}\int_0^t e(\mathrm{t'})\,\mathrm{dt'} \tag{4.4}$$

$$u_I(\mathrm{t_K}+1) = u_I(\mathrm{t_K}) + \left(\frac{T_{cycle} \cdot K_C}{T_I} \cdot e(\mathrm{t_K}+1)\right) \tag{4.5}$$

- การแปลงเป็นสัญญาณดีสครีตสำหรับสัญญาณขาออกของตัวควบคุมดี $u_D(\mathrm{t})$

$$\frac{T_D}{N}\frac{du_D(\mathrm{t})}{dt} + u_D(\mathrm{t}) = -K_C \cdot T_D \frac{dPV(\mathrm{t})}{dt} \tag{4.6}$$

$$u_D(\mathrm{t_K}) = \frac{T_D}{T_D + N \cdot T_{cycle}} u_D(\mathrm{t_K}-1) - \frac{K_C \cdot T_D \cdot N}{T_D + N \cdot T_{cycle}}\left(PV(\mathrm{t_K}) - PV(\mathrm{t_K}-1)\right) \tag{4.7}$$

CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.2 ผลการทดสอบระบบควบคุมอุณหภูมิ

การทดสอบระบบควบคุมอุณหภูมิด้วยตัวควบคุมพีไอดีที่ออกแบบ สามารถแยกหัวข้อการทดสอบได้ดังแสดงตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 หัวข้อการทดสอบผลตอบสนองของระบบ

หัวข้อการทดสอบ	อัตราขยายพีไอดีคงที่ตามตารางที่ 4.2	อัตราขยายพีไอดีเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ
1) ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิคำสั่งในช่วงกว้าง (30°C ->120°C)	รูปที่ 4.7 - 4.8	รูปที่ 4.13 - 4.15
2) ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิคำสั่งในช่วงแคบ (90°C ->100°C ->120°C)	รูปที่ 4.9 - 4.10	รูปที่ 4.16 - 4.17
3) ผลตอบสนองต่อโหลดรบกวน	รูปที่ 4.11 - 4.12	รูปที่ 4.18 - 4.19

4.2.1 ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิคำสั่ง

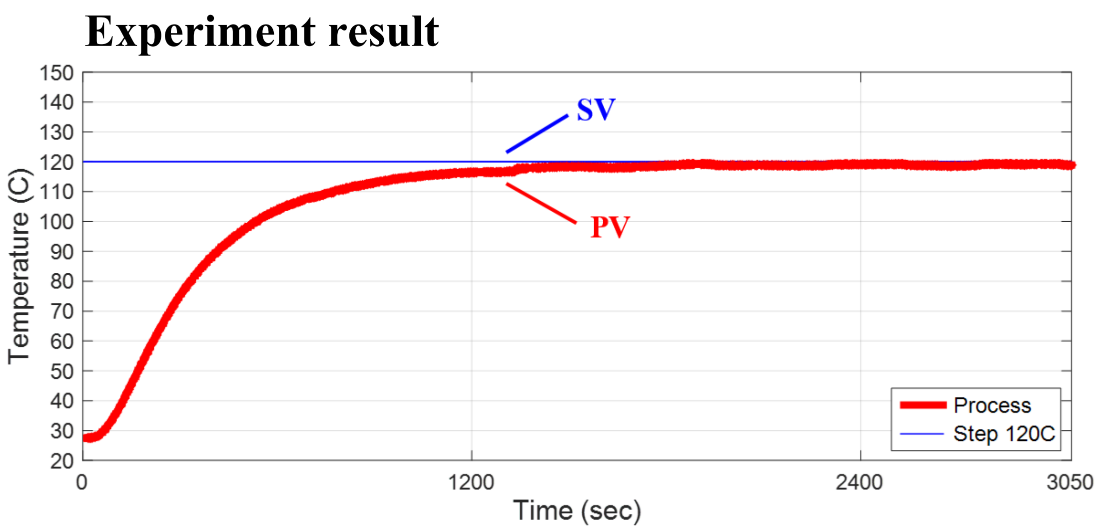
รูปที่ 4.7 แสดงผลการทดลองต่อการตอบสนองต่อค่าคำสั่งในช่วงกว้างจาก 30 °C -> 120 °C ผลตอบสนองของกระบวนการจริงใช้เวลาประมาณ 1300 sec โดยไม่เกิดการพุ่งเกินและการแกว่ง และมีผลตอบสนองที่คล้ายคลึงกับผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 4.8 อย่างไรก็ดีผลตอบสนองของกระบวนการจริงจะมีเวลาตอบสนองที่เร็วกว่าในกรณีของการจำลองการทำงาน (3800 sec) ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากผลกระทบของค่าเวลาประวิงชนิดขนส่งที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ $L(\mathrm{T})$ ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่แล้ว

รูปที่ 4.9 แสดงผลการทดลองของการตอบสนองต่อค่าคำสั่งในช่วงแคบ (90 °C -> 100 °C และ 100 °C -> 120 °C) จะเห็นได้ว่ามีผลการทดลองใกล้เคียงสอดคล้องกับผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 4.10 โดยมีเวลาในการตอบสนองประมาณ 500 sec และไม่เกิดการพุ่งเกินและการแกว่งที่สถานะอยู่ตัว เนื่องจากในกรณีนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงคำสั่งในช่วงแคบ ดังนั้นผลจากค่าเวลาประวิงชนิดขนส่งที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ จึงไม่ส่งผลกระทบมากเหมือนกับในกรณีของการเปลี่ยนแปลงค่าคำสั่งในช่วงกว้าง

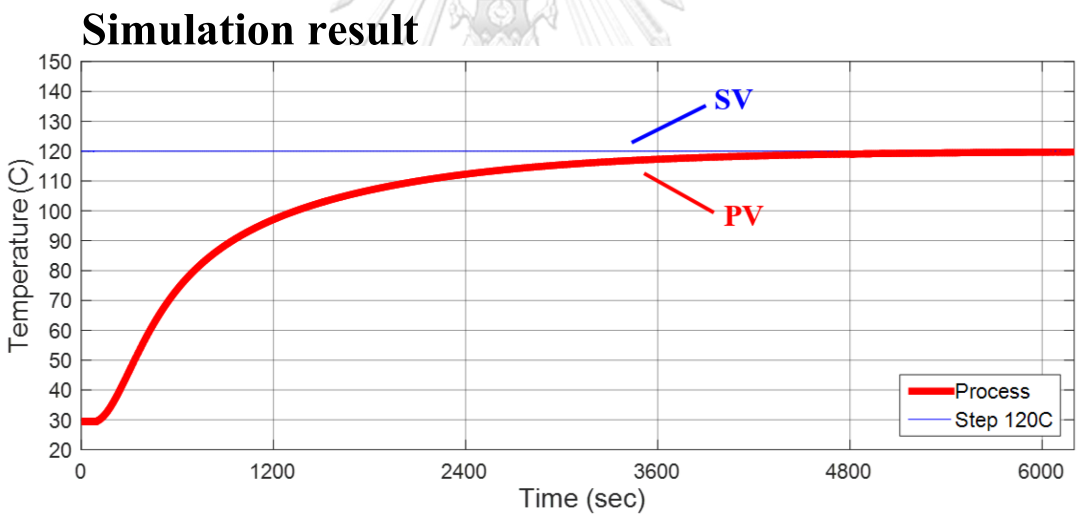
4.2.2 ผลตอบสนองต่อโหลดรบกวน

รูปที่ 4.11 - 4.12 แสดงผลตอบสนองต่อตัวโหลดรบกวน จะเห็นว่าทั้งผลการทดลองและผลการจำลองสอดคล้องกันโดยมีเวลาในการฟื้นตัว (Recovery time) ประมาณ 3000 sec และไม่มีการพุ่งเกิน ซึ่งยืนยันให้เห็นถึงสมรรถนะของตัวควบคุมที่ได้พัฒนาขึ้นจากผลิตภัณฑ์เดิม

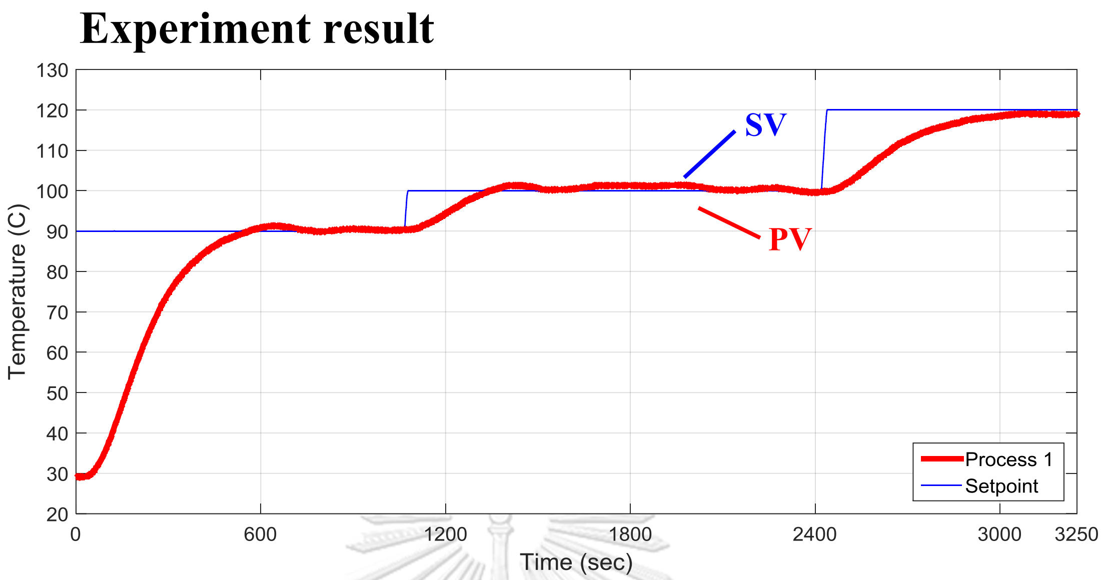
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



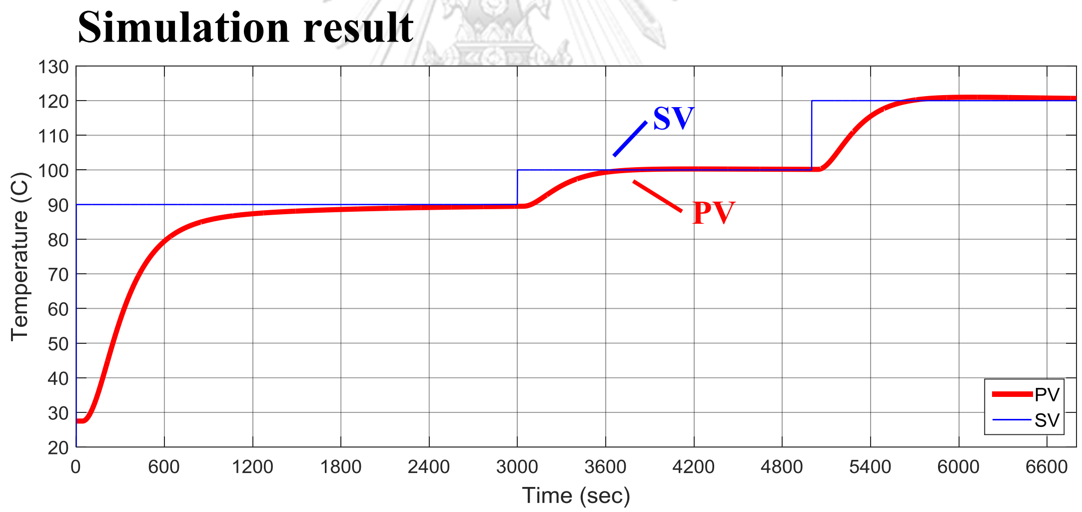
รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิคำสั่งในช่วงกว้าง 30°C -> 120°C



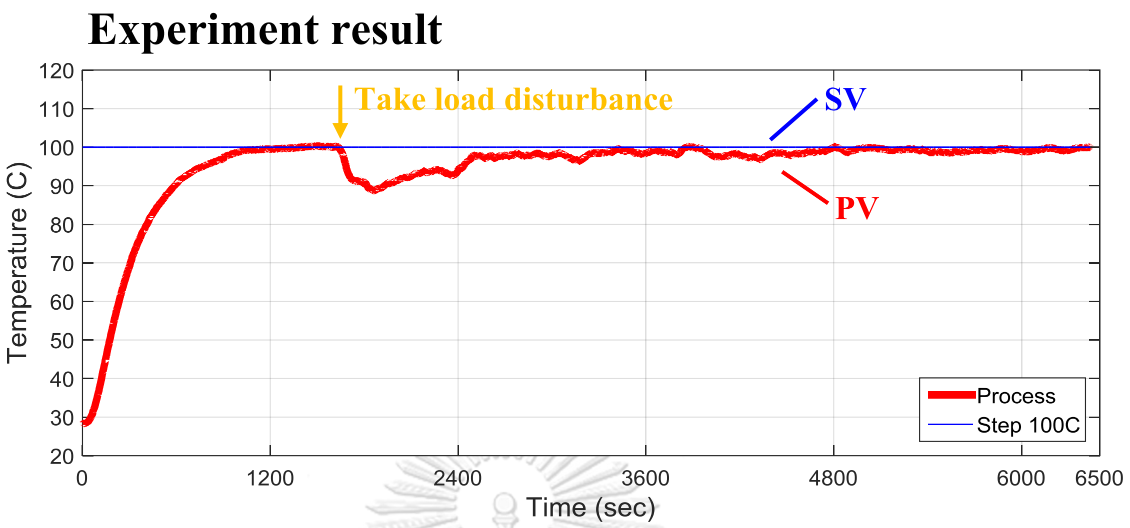
รูปที่ 4.8 ผลจำลองการทำงานการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิคำสั่งในช่วงกว้าง 30°C -> 120°C



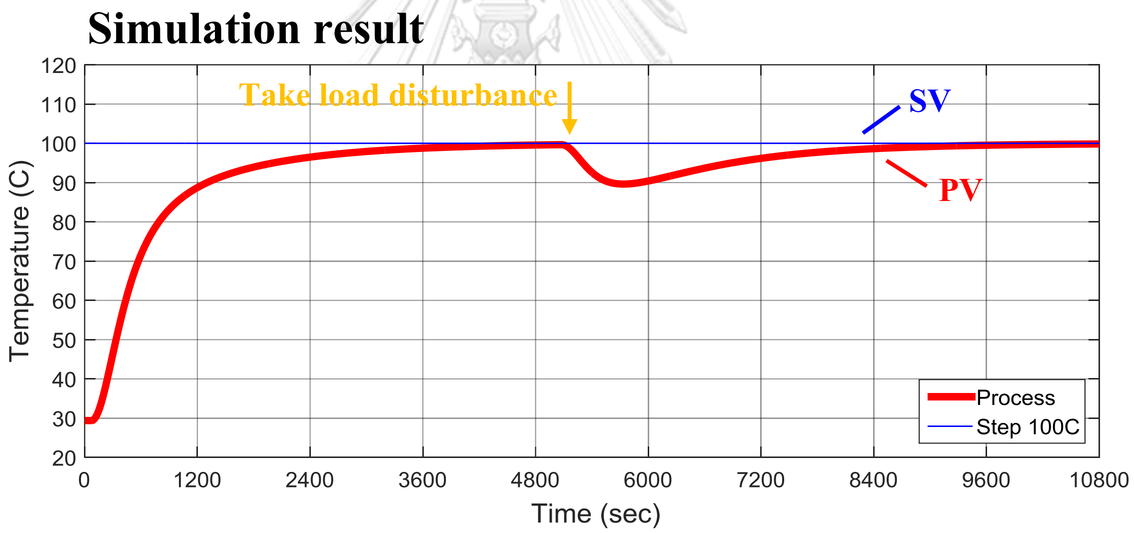
รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิคำสั่งแบบขั้นในช่วงแคบ



รูปที่ 4.10 ผลจำลองการทำงานการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิคำสั่งแบบขั้นในช่วงแคบ



รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบการตอบสนองต่อโหลดรบกวนที่อุณหภูมิคำสั่ง 100°C



รูปที่ 4.12 ผลจำลองการทำงานการตอบสนองต่อโหลดรบกวนที่อุณหภูมิคำสั่ง 100°C

4.2.2 การปรับค่าอัตราขยายพีไอดีแบบออนไลน์เพื่อลดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงเวลาประวิงชนิดขนส่งที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ

เนื่องจากค่าเวลาประวิงชนิดขนส่งจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ดังนำมาเขียนใหม่ในสมการที่ (4.8) ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลตอบสนองตามที่ออกแบบด้วยวิธีฮาลมาน จึงจำเป็นต้องปรับค่าอัตราขยายที่ออกแบบตามค่าเวลาประวิงชนิดขนส่งที่มีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิด้วยเช่นกัน ดังแสดงในสมการที่ (4.9)

$$L(\mathrm{T}) = 76.427 - (0.2717 \cdot T) \tag{4.8}$$

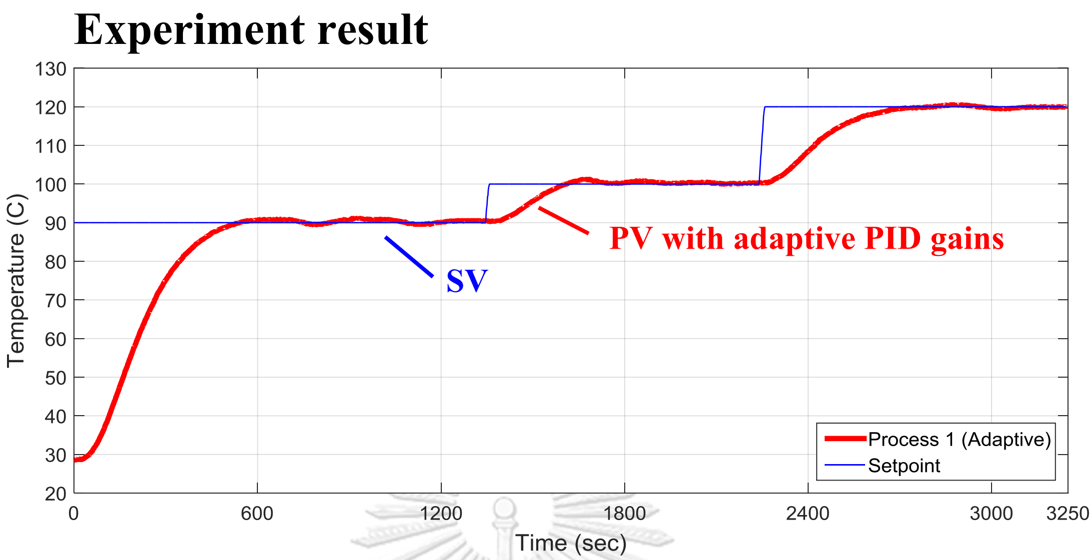
$$K_C = \frac{2\left(T_{Q1} + T_{Q2}\right)}{3 \cdot L(T)} \tag{4.9}$$

รูปที่ 4.13 แสดงผลการตอบสนองต่อค่าอุณหภูมิคำสั่งแบบขั้นที่ค่าต่างๆ โดยมีการปรับค่าอัตราขยาย K_C ตามจุดทำงานของอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15 เป็นรูปขยายของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงกว้างโดยเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ไม่มีการปรับค่าอัตราขยาย K_C จะเห็นได้ว่าในกรณีนี้จะมีผลตอบสนองไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงกว้าง สัญญาณด้านออกของตัวควบคุมโดยส่วนใหญ่จะถูกจำกัดไว้ที่ค่าจำกัดสูงสุด $U_{\max}$ ที่สถานะชั่วครู่เหมือนกัน ผลตอบสนองที่ได้จึงใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ดีจะสามารถสังเกตได้ว่าในช่วงที่จะเริ่มเข้าสู่สถานะอยู่ตัว (ที่วินาทีที่ 400 sec) ในกรณีที่มีการปรับตัวอัตราขยายจะมีผลตอบสนองที่ไวกว่าเล็กน้อย เนื่องจากสัญญาณด้านออกของตัวควบคุมไม่ได้ถูกจำกัดแล้ว จึงทำให้การปรับอัตราขยาย K_C สามารถช่วยปรับปรุงผลตอบสนองให้ดีขึ้น

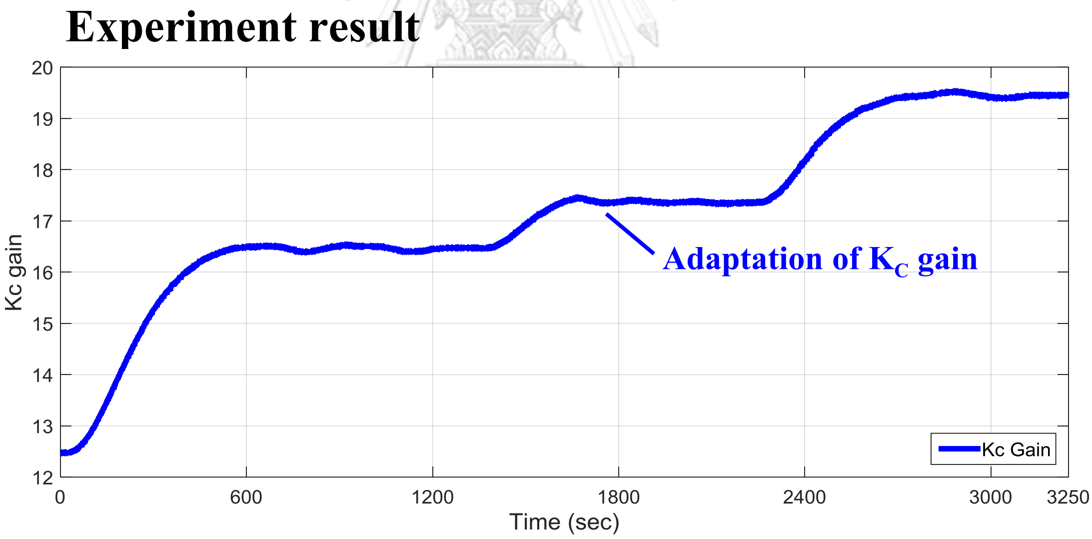
รูปที่ 4.16 - 4.17 เป็นรูปขยายของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงแคบ จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการปรับอัตราขยาย K_C สามารถช่วยปรับปรุงผลตอบสนองได้ดีขึ้น โดยระบบสามารถลู่เข้าสู่ค่าอุณหภูมิคำสั่งได้อย่างแม่นยำ (เท่ากับ 100°C และ 120°C) โดยใช้เวลาประมาณ 600 sec ในขณะที่ระบบที่ไม่ได้มีการปรับตัวค่าอัตราขยายจะใช้เวลาประมาณ 900 sec (รูปที่ 4.17) และมีค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวประมาณ 1°C (รูปที่ 4.16)

รูปที่ 4.18 แสดงผลการทดสอบผลตอบสนองต่อค่าอุณหภูมิคำสั่งที่ 120°C โดยมีการปรับค่าอัตราขยาย K_C ตามจุดทำงานของอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 4.19 มีการใส่โหลดรบกวนที่เวลา 1200 sec จะเห็นได้ว่าโดยระบบสามารถลู่เข้าสู่ค่าอุณหภูมิคำสั่งโดยสามารถกำจัดโหลดรบกวนภายในเวลาประมาณ 1200 sec และฟื้นฟูอุณหภูมิให้คงที่ได้ที่สถานะอยู่ตัว โดยไม่มีการพุ่งเกินและการแกว่ง

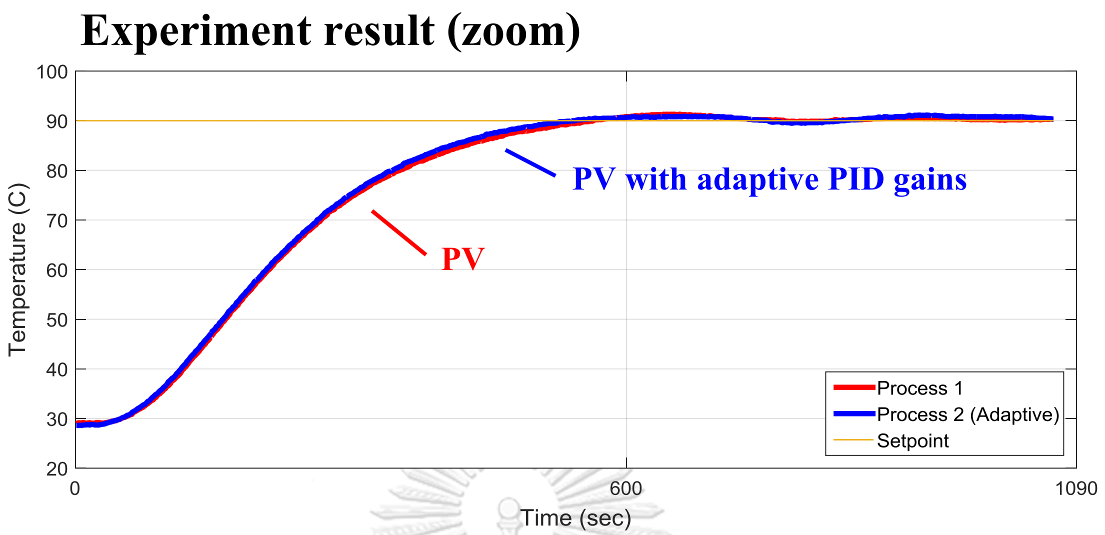
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



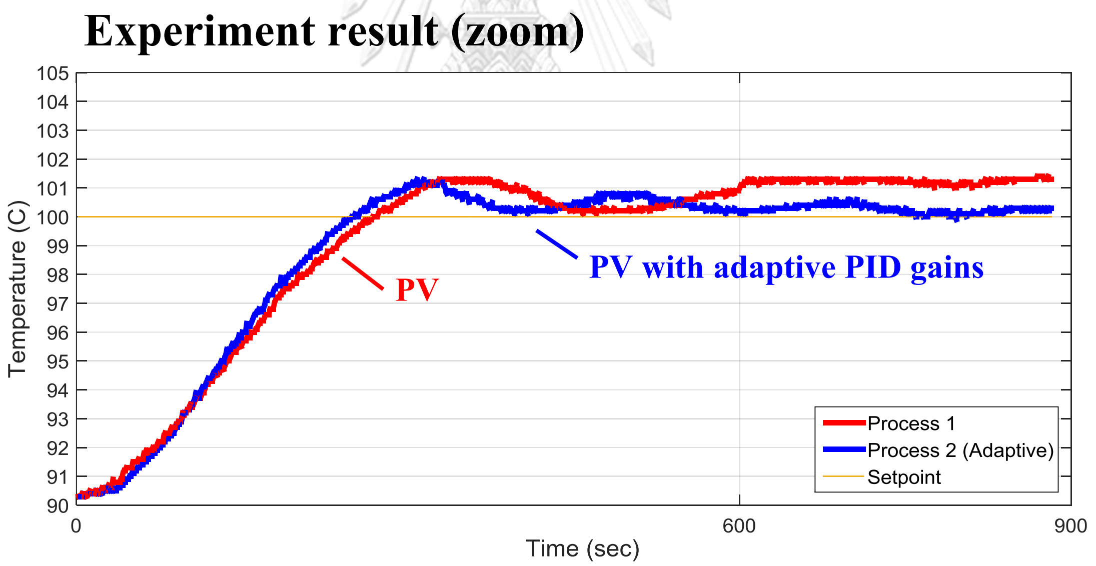
รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิคำสั่งแบบขั้น ที่มีการปรับค่าอัตราขยาย K_C ตามอุณหภูมิ



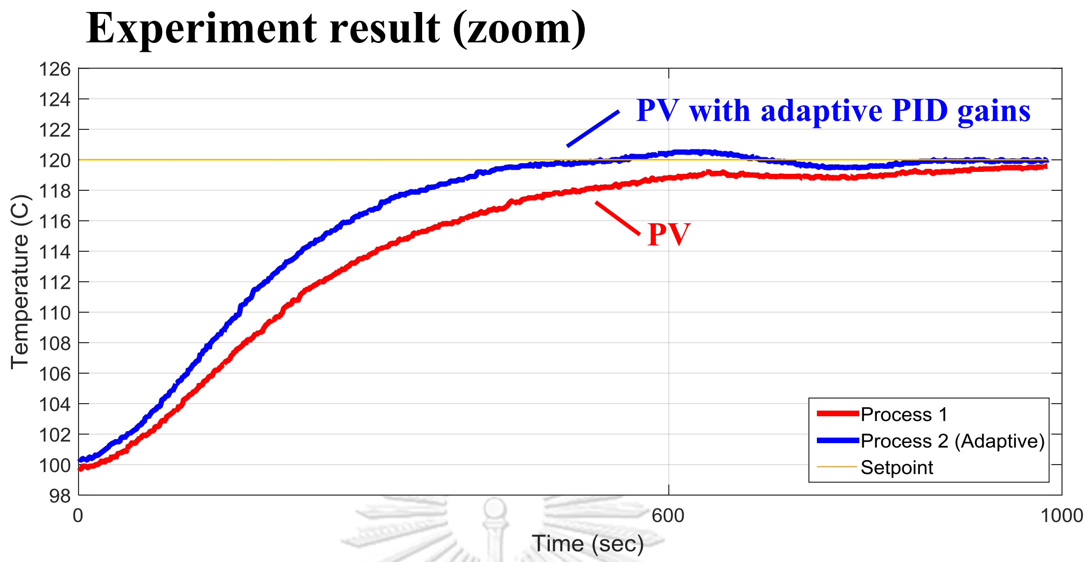
รูปที่ 4.14 อัตราขยาย K_C ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ



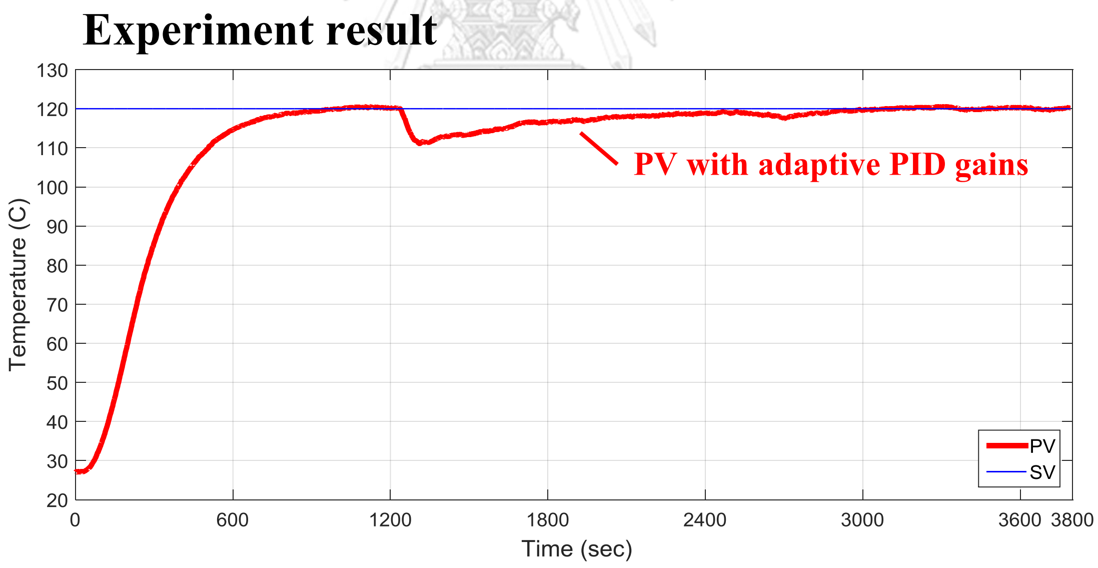
รูปที่ 4.15 ภาพขยายของผลการทดสอบการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิคำสั่ง ในช่วงกว้าง 30°C -> 120°C ที่มีการปรับค่าอัตราขยาย K_C ตามอุณหภูมิ



รูปที่ 4.16 ภาพขยายของผลการทดสอบการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิคำสั่ง ในช่วงแคบ 90°C -> 100°C ที่มีการปรับค่าอัตราขยาย K_C ตามอุณหภูมิ

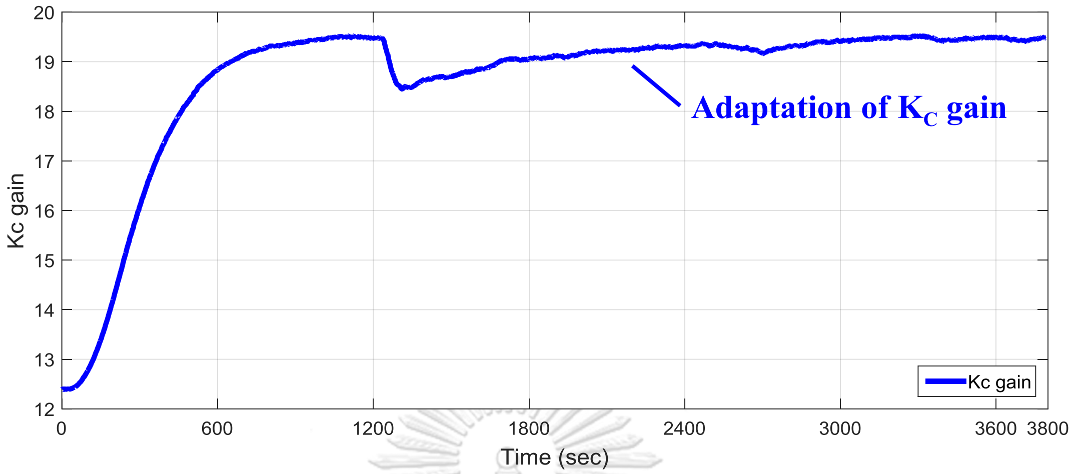


รูปที่ 4.17 ภาพขยายของผลการทดสอบการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิคำสั่งในช่วงแคบ 100°C -> 120°C ที่มีการปรับค่าอัตราขยาย K_C ตามอุณหภูมิ



รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบการตอบสนองต่อโหลดรบกวนที่ค่าอุณหภูมิคำสั่ง 120°C ที่ตัวควบคุมมีการปรับค่าอัตราขยาย K_C ตามอุณหภูมิ

Experiment result



รูปที่ 4.19 อัตราขยาย K_C ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 5
บทสรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุปงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการพัฒนาตัวควบคุมพีไอดีของเครื่องควบคุมอุณหภูมิด้วยตัวทำความร้อนซึ่งช่วยพัฒนาผลิตภัณฑ์ภายในประเทศ ให้สามารถใช้งานได้มีความแม่นยำและมีสมรรถนะที่ดีทัดเทียมกับผลิตภัณฑ์นำเข้าจากต่างประเทศ และสามารถนำไปใช้ได้จริงในอุตสาหกรรม โดยวิทยานิพนธ์นี้มีประเด็นในการพัฒนาที่สำคัญดังนี้คือ

1. การประยุกต์ใช้แบบจำลองแบบสี่พารามิเตอร์ซึ่งสามารถให้ผลตอบสนองที่แม่นยำใกล้เคียงกับผลตอบสนองของระบบจริง โดยโครงสร้างของแบบจำลองสี่พารามิเตอร์มีความเหมาะสมกับระบบถ่ายเทความร้อนที่มีค่าเวลาประวิงชนิดขนส่งสูงมาก พร้อมทั้งยังได้นำเสนอวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง ซึ่งเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับการออกแบบอัตราขยายพีไอดี นอกจากนี้ยังได้หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์เวลาประวิงชนิดขนส่งและอุณหภูมิของจุดทำงานต่างๆ เพื่อใช้สำหรับปรับอัตราขยายตัวควบคุมพีไอดีแบบออนไลน์อีกด้วย

2. ประยุกต์ใช้โครงสร้างตัวควบคุมพีไอดีเพื่อให้สามารถมีสมรรถนะที่ดีในทางปฏิบัติ อาทิเช่น ปรับโครงสร้างของตัวควบคุมเป็นแบบสององศาอิสระ เพื่อจำกัดความไวในการตอบสนองของตัวควบคุมอนุพันธ์ ต่อสัญญาณรบกวนและ/หรือการตอบสนองการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นต่อค่าอุณหภูมิคำสั่ง

3. ประยุกต์ใช้วิธีการออกแบบอัตราขยายของตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีของฮาลมาน วิธีการออกแบบดังกล่าวสามารถรองรับกับโครงสร้างของแบบจำลองแบบสี่พารามิเตอร์ วิธีการออกแบบนี้จะอาศัยค่าพารามิเตอร์ต่างๆของแบบจำลอง อาทิเช่น ค่าเวลาประวิงชนิดขนส่ง ซึ่งพิจารณาถึงสมรรถนะในการตอบสนองต่อค่าอุณหภูมิคำสั่งที่ดีและยังสามารถตอบสนองต่อโหลดรบกวนได้ โดยมีเวลาในการตอบสนองสอดคล้องกับการออกแบบทางทฤษฎี และปราศจากการพุ่งเกินและการแกว่ง

4. เนื่องจากวิธีการออกแบบของฮาลมานขึ้นอยู่กับข้อมูลพารามิเตอร์ของระบบ เช่น ค่าเวลาประวิงชนิดขนส่ง ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองนี้จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของจุดทำงาน ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอการปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมพีไอดีแบบออนไลน์ตามค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลาประวิงชนิดขนส่งและอุณหภูมิของจุดทำงานต่างๆ ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการปรับอัตราขยายตามค่าเวลาประวิงขนส่งจะทำให้มีผลตอบสนองที่ดีตามวิธีการออกแบบของฮาลมาน โดยสามารถปรับปรุงสมรรถนะของ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตัวควบคุมพีไอดีทั้งในด้านของผลตอบสนองในสถานะชั่วครู่ และความแม่นยำของการควบคุมอุณหภูมิที่สถานะอยู่ตัว

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยนี้ได้วางแนวทางในการปรับตั้งค่าอัตราขยายตัวควบคุมพีไอดีแบบอัตโนมัติของเครื่องควบคุมอุณหภูมิ โดยเครื่องควบคุมอุณหภูมิสามารถหาค่าพารามิเตอร์จากกระบวนการแบบวงรอบเปิด เพื่อหาค่าเวลาประวิงชนิดขนส่งเริ่มต้น(อุณหภูมิห้อง) ค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งเวลาต่างๆ และพิกัดของตัวทำความร้อนร่วมกับระบบถ่ายเทอุณหภูมิจากกระบวนการ และนำพารามิเตอร์ต่างๆ ไปออกแบบอัตราขยายตัวควบคุมพีไอดี แต่ในการหาพิกัดตัวทำความร้อนนั้น ต้องหาพิกัดสูงสุดทำให้เกิดความร้อนสูงและใช้เวลานานเพื่อให้อุณหภูมิลดลง แต่ถ้าสามารถรู้พิกัดของตัวทำความร้อนกับระบบหรือมีการประมาณค่าได้ จะทำให้ลดขั้นตอนที่ทำให้ความร้อนสูงในการหาค่าพารามิเตอร์ได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รายการอ้างอิง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายอินกวี สุภานันท์ เกิดเมื่อวันที่ 14 กุมภาพันธ์ 2533 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย ปีการศึกษา 2556 ได้รับทุนเป็นนักศึกษาแลกเปลี่ยนในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร์ ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีนากาโอกะ ประเทศญี่ปุ่น เป็นเวลา 1 ปี และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า(อิเล็กทรอนิกส์กำลัง) ณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2557

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University