KKU Res. J. 2012; 17(3):459-468
http : //resjournal.kku.ac.th

การออกแบบตัวควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าสำหรับระบบควบคุมอุณหภูมิของเครื่องทำน้ำอุ่น

Design of Feedforward Compensator for Temperature Control System in Electric Water Heater

*กอบเดช วงค์คินี[1] , บัญชา ป้อมสุวรรณ[1] และ วันจักรี เล่นวารี[1]**
*Kobdate Wongkinee[1] , Bunchar Bomsuwan[1] and Wanchak Lenwari[1]**

[1] *ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุมและเครื่องมือวัด คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*
* *Correspondent author: wanchak.len@kmutt.ac.th*

Received March 21, 2012
Accepted June 1, 2012

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอการออกแบบและหลักการพัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิของเครื่องทำน้ำอุ่นให้มีการรักษาระดับอุณหภูมิของน้ำออกให้คงที่ในสภาวะที่เกิดการรบกวน(Disturbance) ในระบบ ได้แก่ สภาวะแรงดันน้ำเข้าที่ไม่คงที่ โดยตัวควบคุมชนิด Proportional+Integral+Derivative (PID)+ Feedforward ซึ่งถูกโปรแกรมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ จะทำหน้าที่สร้างสัญญาณเพื่อควบคุมการจ่ายกำลังงานไฟฟ้าให้กับขดลวดความร้อนเพื่อรักษาระดับอุณหภูมิน้ำให้คงที่ หลักการออกแบบตัวควบคุมถูกนำเสนอในงานวิจัยนี้ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบควบคุมอุณหภูมิที่เสนอโดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะที่เกิดการรบกวน สามารถนำระบบที่นำเสนอมาประยุกต์ใช้ในพัฒนาเครื่องทำน้ำอุ่นให้มีประสิทธิภาพในด้านการประหยัดพลังงานไฟฟ้าในอนาคตได้

Abstract

This paper proposes the design and principle to enhance the performance of the temperature control system in an electric water heater which rapidly controls a temperature of water outlet under disturbances i.e. a condition of an unsteady flow inlet. The ability of a proposed control system employing PID plus Feedforward is investigated in particular the immunity to disturbances which is the main aim of this research. Microcontroller-based control system is used to generate signals and control power delivered to the heater. The design procedure of proposed method is presented. The experimental results confirm the excellent control response in particular to disturbances and effectiveness of this improved temperature control system. The proposed system can be applied to develop the electric water heater to be an energy efficient appliance in the future.

คำสำคัญ: ตัวควบคุมแบบ Feedforward ระบบควบคุมอุณหภูมิ เครื่องทำน้ำอุ่น การรบกวน
Keywords: Feedforward Compensator, Temperature Control, Electric Water Heater, Disturbances

1. บทนำ

ในปัจจุบันเครื่องทำน้ำอุ่นถูกใช้กันอย่างแพร่หลาย ถือเป็นสิ่งอำนวยความสะดวกชนิดหนึ่งในเกือบทุกครัวเรือน ในระยะแรกเครื่องทำน้ำอุ่นใช้แก๊สเป็นแหล่งพลังงานก่อนจะเปลี่ยนมาใช้พลังงานไฟฟ้า ซึ่งมีประสิทธิภาพและความสะดวกมากกว่า ในเครื่องทำน้ำอุ่นนั้นวงจรควบคุมอุณหภูมิมีความสำคัญและถือเป็นหัวใจหลักของการใช้งาน เนื่องจากจำเป็นต้องรักษาระดับอุณหภูมิให้คงที่เพื่อความพึงพอใจสูงสุดของผู้ใช้งานในทุกสภาวะ ปัญหาหลักของการใช้งานเครื่องทำน้ำอุ่นได้แก่ การรบกวนต่างๆที่ส่งผลต่ออุณหภูมิ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง แรงดันหรืออัตราการไหลที่ไม่คงที่ของน้ำเข้า ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิของน้ำออกไม่คงที่ ผลที่ได้รับคือผู้ใช้งานหรือผู้อาบน้ำจะรู้สึกถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ตัวอย่างเช่น หากแรงดันน้ำต่ำลง ผู้อาบจะรู้สึกถึงอุณหภูมิของน้ำที่สูงขึ้นชั่วขณะ นอกจากนี้น้ำที่ร้อนขึ้นเกินความจำเป็น หมายถึงสิ้นเปลืองพลังงานโดยเปล่าประโยชน์ ถ้าสามารถควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสมตามสภาวะโหลดหรือการไหลของน้ำ จะทำให้ช่วยประหยัดพลังงานได้ โดยเฉพาะหลายๆครัวเรือนรวมกัน (1) ในทางกลับกัน หากแรงดันน้ำสูงขึ้นผู้อาบน้ำจะรู้สึกถึงอุณหภูมิที่ต่ำลงแม้จะเกิดขึ้นชั่วขณะก็ตาม ได้มีการนำเสนอวิธีการออกแบบระบบควบคุมเพื่อใช้สำหรับเครื่องทำน้ำอุ่น (2) โดยหนึ่งในการวัดประสิทธิภาพของระบบควบคุมได้แก่ การตอบสนองต่อสภาวะที่อัตราการไหลมีการเปลี่ยนแปลง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลที่เปลี่ยนแปลงส่งผลต่อประสิทธิภาพการควบคุมชนิด Adaptive PID แต่ไม่ส่งผลมากหากชนิดการควบคุมเป็นแบบ Smith Predictive Control แต่การควบคุมชนิดนี้จำเป็นต้องใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์ที่ถูกต้องเพื่อการควบคุมที่มีประสิทธิภาพ (2)

จากเหตุผลที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่านอกจากระบบควบคุมอุณหภูมิจะมีความสำคัญอย่างยิ่งแล้ว ความสามารถในการตอบสนองต่อสภาวะการรบกวนถือเป็นอีกปัจจัยที่สำคัญที่ต้องนำมาพิจารณาในการออกแบบระบบควบคุม สิ่งนี้นำมาสู่การนำเสนองานวิจัยนี้ เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิสำหรับเครื่องทำน้ำอุ่น ขนาดพิกัด 4500 วัตต์ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมการทำงานของวงจรกำลังในการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับขดลวดทำความร้อน เพื่อรักษาระดับอุณหภูมิของน้ำออกของเครื่องทำน้ำอุ่นให้คงที่ตรงตามอุณหภูมิที่ตั้งไว้ตลอดเวลา ถึงแม้ว่าจะเกิดสภาวะอัตราการไหลของน้ำเข้าไม่คงที่ก็ตาม และได้ทำการทดสอบกับอุปกรณ์ในสภาวะการทำงานจริงซึ่งให้ผลการตอบสนองที่ดีในส่วนของการรักษาระดับของอุณหภูมิของน้ำออกในสภาวะต่างๆ

2. วิธีการวิจัย

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ทฤษฎีเรื่องความสัมพันธ์ของพลังงาน

จากสมการเรื่องความร้อนและอุณหพลศาสตร์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ได้พบว่าความสัมพันธ์มวลของน้ำส่งผลต่อการควบคุมอุณหภูมิเช่น ถ้าอัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องทำน้ำอุ่นน้อยหมายถึงมวลของน้ำในกระบวนการทำความร้อนน้อย ทำให้การเพิ่มอุณหภูมิของน้ำให้ร้อนจะใช้เวลาน้อยลง ในทางกลับกันถ้าอัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องทำน้ำอุ่นมากหมายถึงว่ามวลของน้ำในกระบวนการทำความร้อนมาก ซึ่งทำให้การเพิ่มอุณหภูมิของน้ำให้ร้อนจะใช้เวลานานขึ้น จากทั้งสองกรณีที่ผ่านมาพลังงานที่สามารถถ่ายโอนผ่านขอบเขตของระบบ (3) สามารถอธิบายได้โดย

$$Q = m.c.\Delta T \qquad (1)$$

โดยกำหนดให้

Q คือ ปริมาณความร้อน

m คือ มวล

c คือ ความจุความร้อนจำเพาะ

ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

2.1.2 ทฤษฎีเรื่องการควบคุมแบบพีไอดี (PID) และแบบป้อนไปข้างหน้า (Feedforward)

การควบคุมแบบพีไอดี (3) เป็นการควบคุมแบบรวมกันโดยอาศัยสัดส่วน (Proportional), ปริพันธ์ (Integral) และอนุพันธ์ (Derivative) เป็นตัวควบคุมระบบเพื่อทำให้การตอบสนองของระบบ มีเสถียรภาพที่ดีขึ้น สมการเอาท์พุทของตัวควบคุมพีไอดีในโดเมนความถี่โดยใช้การแปลงลาปลาสแสดงดังสมการ

$$Co(s) = K_P e(s) + \frac{K_i}{s} e(s) + K_d s\, e(s) \qquad (2)$$

โดยกำหนดให้

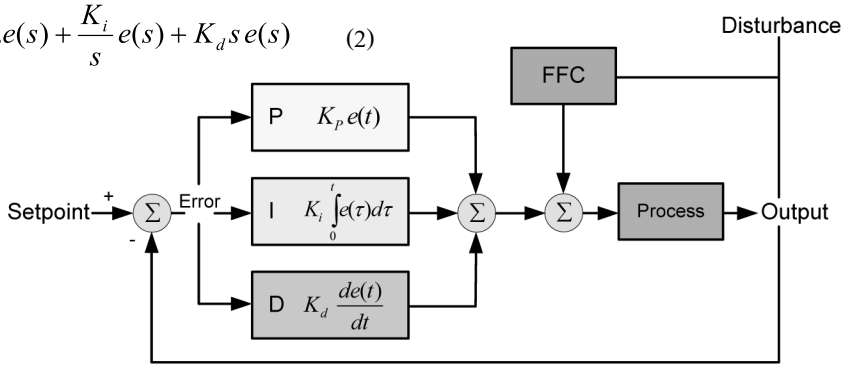
Co คือ เอาท์พุทของตัวควบคุม

e คือ ค่าความผิดพลาด(error)

K_P คือ Proportional Gain

K_i คือ Integral Gain

K_d คือ Derivative Gain

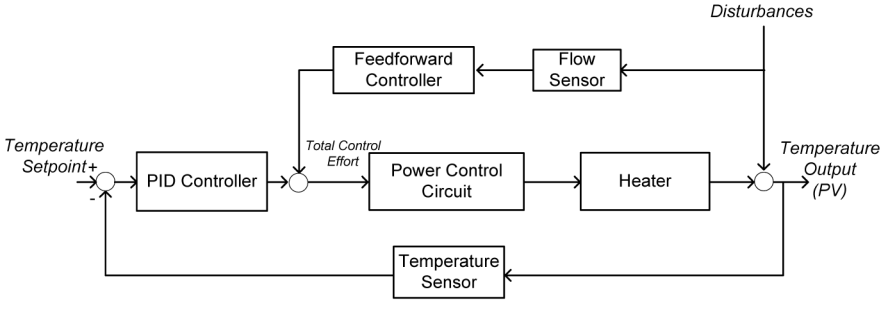


รูปที่ 1. บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบ PID+Feedforward

โดยหากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมในสภาวะที่มีการรบกวนสามารถทำได้โดยการเพิ่มตัวชดเชยแบบป้อนไปข้างหน้า ดังแสดงในรูปที่ 1

2.2 การออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิของเครื่องทำน้ำอุ่น

ระบบควบคุมการทำความร้อนของเครื่องทำน้ำอุ่นในสภาวะแรงดันน้ำเข้าไม่คงที่ที่ได้พัฒนาขึ้นแสดงในรูปที่ 2 การควบคุมอุณหภูมิน้ำออกจากกระบวนการทำความร้อนของเครื่องทำน้ำอุ่นจะอยู่บนพื้นฐานของการควบคุมแบบเฟส (Phase Control) โดยเอาท์พุทของตัวควบคุมจะถูกคำนวณและส่งไปที่ฟังก์ชั่น timer/counter ในโหมด Fast PWM เพื่อสร้างสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับนำไปปรับมุมจุดชนวนให้กับอุปกรณ์ไทริสเตอร์ คือไทรแอก (Triac) เพื่อควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับขดลวดทำความร้อนในการรักษาระดับอุณหภูมิของเครื่องทำน้ำอุ่น งานวิจัยนี้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR เบอร์ ATmega8 (4) ในการโปรแกรมฟังก์ชั่นการควบคุมแบบพีไอดีและแบบป้อนไปข้างหน้าโดยมีขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมดังหัวข้อถัดไป



รูปที่ 2. ระบบควบคุมอุณหภูมิของเครื่องทำน้ำอุ่นที่ได้ออกแบบ

2.3 การออกแบบตัวควบคุม

เริ่มจากการวิเคราะห์ระบบการทำอุณหภูมิเครื่องทำน้ำอุ่นโดยใช้ Energy balance (5) เพื่อหาพลวัตของระบบ ซึ่งผลการวิเคราะห์พบว่าระบบของเครื่องทำน้ำอุ่นเป็นระบบอันดับหนึ่งและมีความสัมพันธ์ทางฟิสิกส์ดังนี้

$$\frac{Y(t)}{R(t)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (3)$$

$$\tau = \frac{V C_v}{q_o C_P} \quad (4)$$

โดยกำหนดให้

$Y(t)$ คือ เอาท์พุทของระบบ

$R(t)$ คือ อินพุทของระบบ

K คือ อัตราขยาย

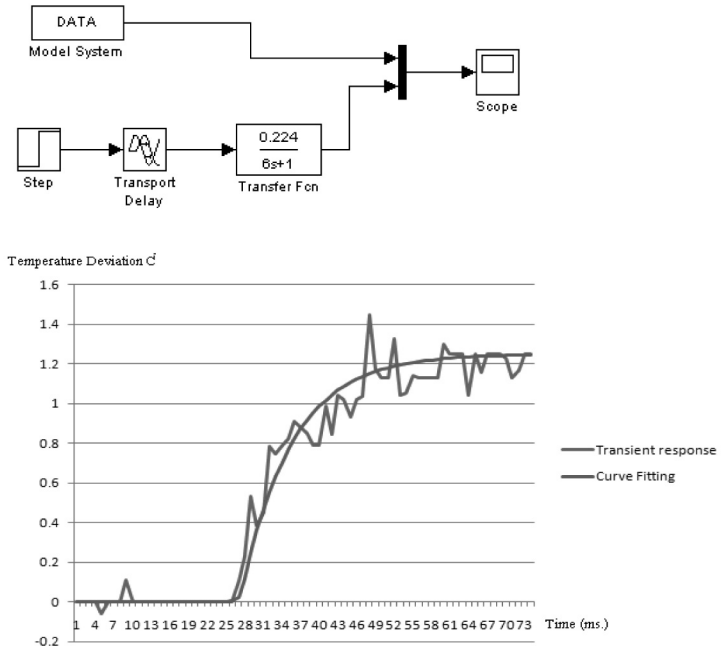
τ คือ ค่าคงตัวเวลาของระบบ

V คือปริมาตรของหม้อต้มน้ำ

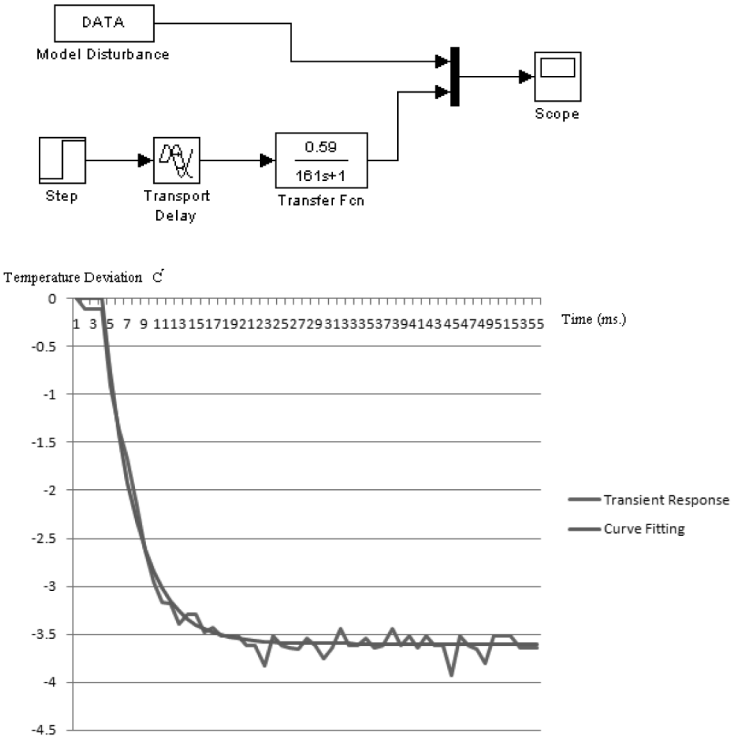
C_v คือพลังงานที่ให้กับสารหนึ่งหน่วยมวลแล้วส่งผลให้อุณหภูมิของสารนั้นเพิ่มขึ้น 1 หน่วยอุณหภูมิตามกระบวนการปริมาตรคงที่

C_p คือพลังงานที่ให้กับสารหนึ่งหน่วยมวลแล้วส่งผลให้อุณหภูมิของสารนั้นเพิ่มขึ้น 1 หน่วยอุณหภูมิตามกระบวนการความดันคงที่และ q_o คืออัตราการไหลออกของเครื่องทำน้ำอุ่น

วิเคราะห์ระบบการทำความร้อนของเครื่องทำน้ำอุ่นเพื่อทดสอบว่าระบบเป็นเชิงเส้นหรือไม่ โดยการทำการเปลี่ยนจุดทำงานแบบเป็นขั้นบันได ทุก 5 % โดยจาก 0% ถึง 100% ทำการเก็บข้อมูล (DATA) ที่ได้จากการทดลองเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์(Math Model)แต่ละช่วงของการทำงานของระบบ โดยปรับค่าพารามิเตอร์ของบล็อคฟังก์ชั่นถ่ายโอนในโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยวิธี Trial and Error ให้สอดคล้องเหมาะสมกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3 โดยผลการทดสอบที่ได้มีลักษณะการตอบสนองชั่วครู่ของระบบที่เหมือนกันทุกช่วงของการทดลองดังนั้นจึงประมาณได้ว่าระบบเป็นเชิงเส้นและการตอบสนองทุกช่วงเป็นระบบควบคุมอันดับหนึ่ง ซึ่งตรงตามการวิเคราะห์ระบบการทำความร้อนของเครื่องทำน้ำอุ่นโดยใช้ Energy balance หลังจากนั้น ทำการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการรบกวนโดยกำหนดอัตราการไหลของน้ำเข้าที่ 3 ลิตร/นาที(LPM) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และทำการรบกวนแบบเป็นขั้นบันไดโดยปรับอัตราการไหลของน้ำเข้าเพิ่มจากเดิม 5% (จากช่วงการวัดอัตราการไหลที่ 1-5 ลิตร/นาที) เป็น 3.2 ลิตร/นาที หลังจากการทดลองดังกล่าว ทำการหาแบบจำลองด้วยวิธีการเดียวกันข้างต้น จะได้แบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 3. การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องทำน้ำอุ่น



รูปที่ 4. การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Disturbance ของเครื่องทำน้ำอุ่น

รูปที่ 5 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม การหาตัวควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า เพื่อใช้ในการชดเชยระบบด้วยวิธี Static compensation (5) แสดงได้โดยสมการดังนี้

$$Dis(s)GD(s) + Dis(s)\,HD(s)FFC(s)G_s(s) = 0 \quad (5)$$

โดยกำหนดให้

Dis คือ การรบกวน

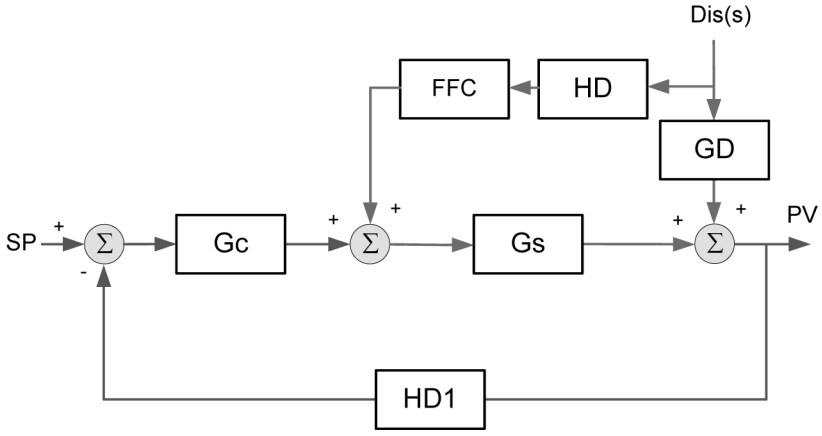
G_s คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเครื่องทำน้ำอุ่น

GD คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การรบกวนของเครื่องทำน้ำอุ่น

FFC คือ ตัวควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า

HD คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์วัดการรบกวน หรือ อุปกรณ์วัดอัตราการไหล

HD1 คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ



รูปที่ 5. บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม

จากสมการก่อนหน้านี้จะได้

$$FFC(s) = \frac{-GD(s)}{HD(s)G_s(s)} \quad (6)$$

ทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเครื่องทำน้ำอุ่น งานวิจัยนี้เลือกใช้ช่วงการทำงานของเครื่องทำน้ำอุ่นที่ 55% ถึง 60% ซึ่งเป็นช่วงของย่านการควบคุมที่สามารถทำให้อุณหภูมิของน้ำออกที่ 40 องศาเซลเซียสซึ่งเหมาะสมในการใช้น้ำอุ่น ก่อนนำมาหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยหลักการ Minimum IAE for disturbance input (5) และทำการเขียนโปรแกรมควบคุมแบบพีไอดี และแบบป้อนไปข้างหน้า เพื่อหาเอาท์พุตของคอนโทรลเลอร์ (Co) โดยใช้ขั้นตอนวิธีตามสมการต่อไปนี้ (พารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ได้จากการออกแบบแสดงในภาคผนวก)

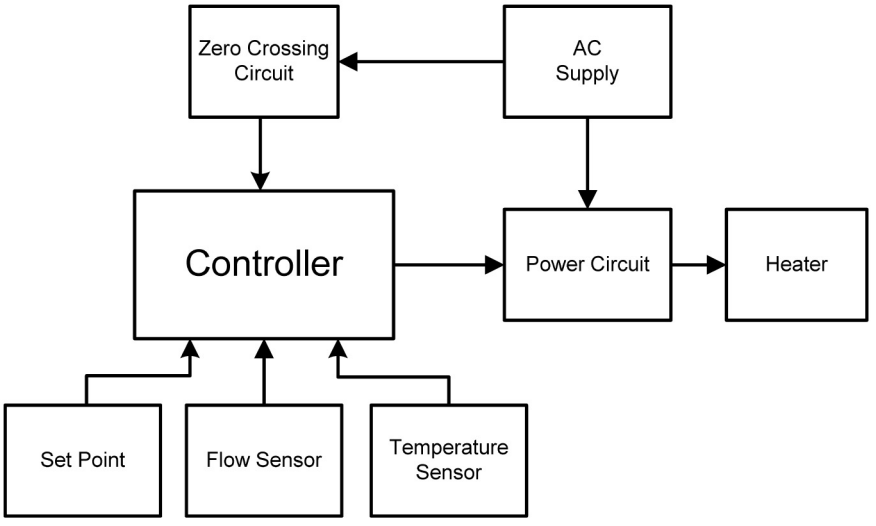
$$\begin{aligned} Co(k) = Co(k-1) &- K_P[PV(k) - PV(k-1)] + K_i * T * e(k) \\ &- (K_d / T)[PV(k) - 2PV(k-1) + PV(k-2)]; \end{aligned} \quad (7)$$

$$Co(k) = Co(k) + FFC \quad (8)$$

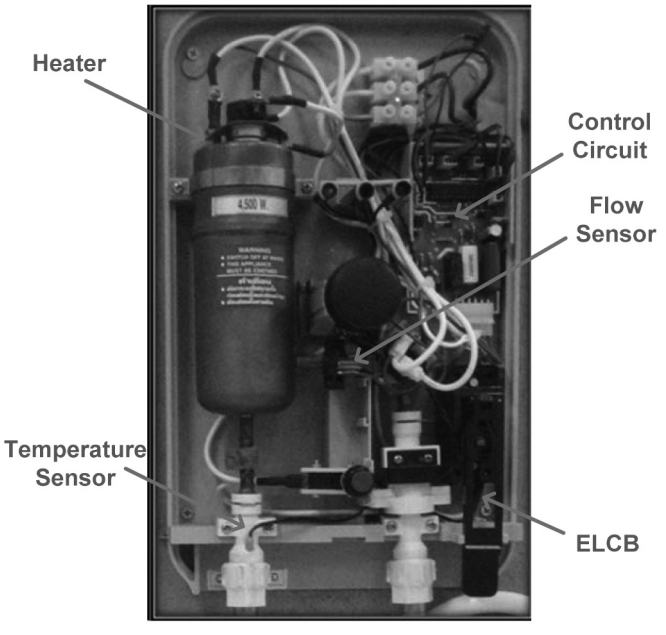
2.4 การออกแบบวงจรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ควบคุมอุณหภูมิของเครื่องทำน้ำอุ่น

รูปที่ 6 แสดงบล็อกไดอะแกรมและการเชื่อมโยงของวงจรต่างๆ เนื่องจากการควบคุมใช้หลักการควบคุมแบบเฟส วงจรตรวจจับแรงดันผ่านศูนย์(zero crossing circuit) ถูกใช้ในส่งข้อมูลไปที่ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อกำหนดจังหวะการควบคุมแบบเฟสให้สอดคล้อง(synchronize) กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลท์ ทำให้สามารถควบคุมกำลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดความร้อนได้โดยผ่านวงจรภาคกำลัง

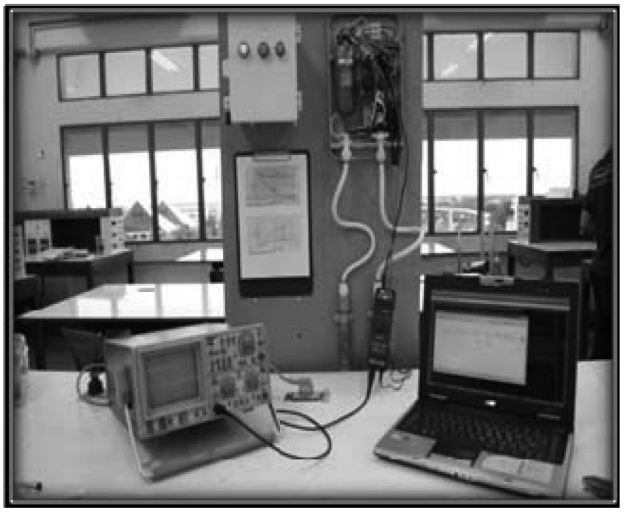
ซึ่งประกอบไปด้วยไทรแอก และวงจรขับเกทซึ่งรับสัญญาณทริกมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์ สัญญาณทริกถูกคำนวณและปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมในสภาวะต่างๆ ด้วยตัวควบคุมที่ได้ออกแบบและโปรแกรมไว้ในงานวิจัยนี้เซ็นเซอร์สำหรับการตรวจจับอัตราการไหลใช้หลักการวัดความดันที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากมีราคาที่เหมาะสมในการพัฒนาเชิงการค้าได้ รูปที่ 7 แสดงอุปกรณ์ภายในของเครื่องทำน้ำอุ่นทั้งหมด ส่วนการจัดเตรียมอุปกรณ์ต่างๆ สำหรับการทดลองแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 6. บล็อกไดอะแกรมของวงจรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ของเครื่องทำน้ำอุ่น



รูปที่ 7. อุปกรณ์ภายในของเครื่องทำน้ำอุ่น

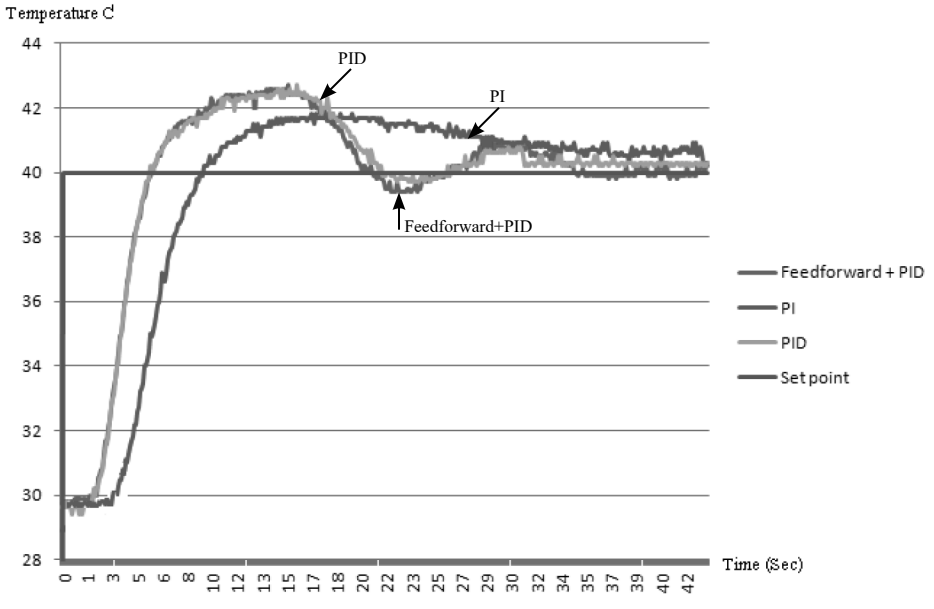


รูปที่ 8. การจัดอุปกรณ์ต่างๆสำหรับการทดลอง

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 การทดสอบที่จุดทำงาน 40 องศาเซลเซียส

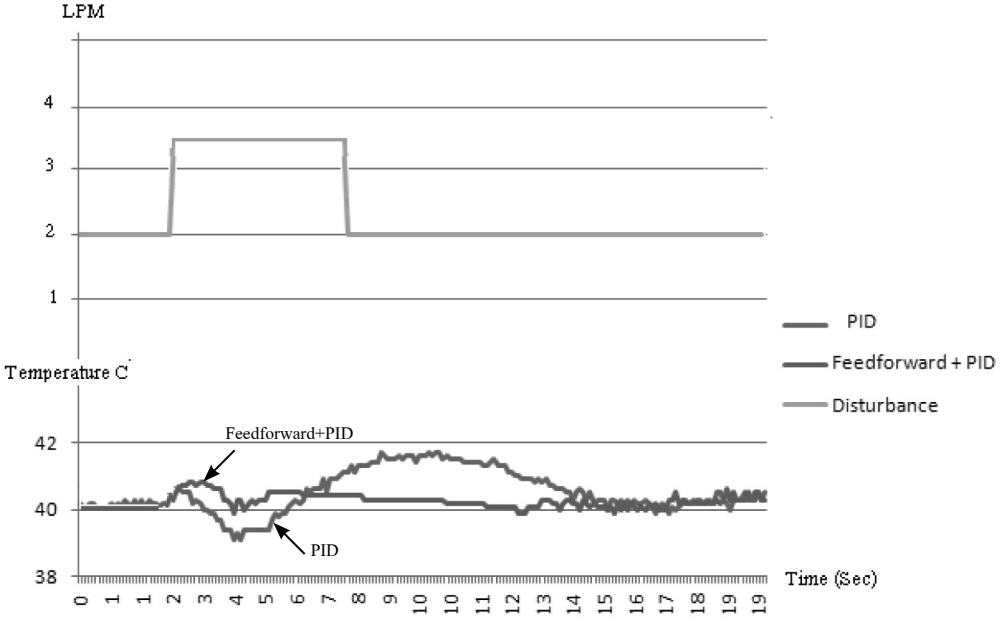
รูปที่ 9 เปรียบเทียบการควบคุมอุณหภูมิโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ, พีไอดี, และ พีไอดี+แบบป้อนไปข้างหน้าโดยเปลี่ยนระดับอุณหภูมิที่ต้องการจากอุณหภูมิห้องไปที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองทั้ง 3 แบบจะไม่มีความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว(steady-state error) ต่ออินพุทแบบขั้นบันได จากผลการเพิ่ม pole ที่จุดศูนย์ซึ่งจะเปลี่ยนชนิดของระบบจากชนิดศูนย์ ไปเป็นชนิดหนึ่ง (6) แต่ระบบการควบคุมแบบพีไอดี และพีไอดี+แบบป้อนไปข้างหน้า ซึ่งมีผลตอบสนองที่ใกล้เคียงกันจะมีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของอินพุทที่รวดเร็วกว่าระบบควบคุมแบบพีไอ เนื่องมาจากสมการควบคุมทั้ง 2 แบบดังกล่าว จะมีการเพิ่ม Zero เข้าในระบบมากกว่าการควบคุมแบบพีไอ ซึ่งทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลเร็วกว่า



รูปที่ 9. การเปรียบเทียบการตอบสนองเมื่อเปลี่ยนจุดทำงานของเครื่องทำน้ำอุ่น

3.2 การทดสอบการตอบสนองต่อ Disturbance

รูปที่ 10 เปรียบเทียบผลการตอบสนองต่อการรบกวนระหว่างตัวควบคุมแบบพีไอดี และ พีไอดี +แบบป้อนไปข้างหน้า การทดสอบได้ทำการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องทำน้ำอุ่นจาก 2 ลิตร/นาที เป็น 3.5 ลิตร/นาที เป็นเวลานาน 5 วินาที ผลการทดลองแสดงว่าเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี+แบบป้อนไปข้างหน้า จะมีการตอบสนองต่อการรบกวนที่รวดเร็วกว่าการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีทั่วไปอย่างชัดเจน โดยสามารถรักษาอุณหภูมิได้เป็นอย่างดีและสามารถกลับสู่ค่าที่ตั้งไว้ภายใน 10 วินาทีนับจากเกิดการรบกวนจากอัตราการไหลของน้ำ อันเนื่องมาจากผลการชดเชยแบบป้อนไปข้างหน้า ซึ่งการควบคุมแบบดังกล่าวจะเป็นการวัดค่าของการเปลี่ยนแปลงของการรบกวน เพื่อนำไปคำนวณค่าเอาท์พุทของตัวควบคุม ให้มีการชดเชยไว้ล่วงหน้าก่อนที่การรบกวนจะส่งผลต่อระบบตามสมการที่ 5 เมื่อขดลวดความร้อนได้รับพลังงานที่เหมาะสมจึงทำให้อุณหภูมิน้ำออกของเครื่องทำน้ำอุ่นเกิดการรักษาความสมดุลได้อย่างรวดเร็ว ไม่สูญเสียพลังงานไปโดยเปล่าประโยชน์



รูปที่ 10. การเปรียบเทียบการตอบสนองต่อ Disturbance

4. สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการหลักการออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิของเครื่องทำน้ำอุ่นให้มีการรักษาระดับอุณหภูมิของน้ำออกให้คงที่โดยเน้นการทำงานในสภาวะอัตราการไหลของน้ำเข้าเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการโปรแกรมตัวควบคุมแบบพีไอดี และ แบบป้อนไปข้างหน้า ซึ่งผลการทดลองได้แสดงถึงประสิทธิภาพของระบบควบคุมที่นำเสนอโดยเฉพาะอย่างยิ่งความสามารถในการตอบสนองต่อการรบกวนได้อย่างรวดเร็วเพื่อรักษาอุณหภูมิของน้ำออกให้คงที่ จากผลที่ได้สามารถนำมาใช้เป็นหลักการในการออกแบบและพัฒนาประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำอุ่นให้มีความสามารถด้านประหยัดพลังงานที่ดียิ่งขึ้นต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัทโตชิบ้า ประเทศไทย จำกัด ที่ได้สนับสนุนเครื่องทำน้ำอุ่นขนาด 4500 วัตต์ สำหรับการทดลองและพัฒนางานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

(1) Lemmer E F, Delport G J. The influence of a variable volume water heater on the domestic load profile: IEEE Trans. Energy Conversion. 1999; 14(4):1558-1563.

(2) Vieira J, Mota A. Passing from a gas to an electric water heater system: adaptive PID versus smith predictive control. Proceedings of the 11th International Conference on Intelligent Engineering Systems; 2007:201-206.

(3) Cengel Y , Boles M. Thermodynamics An Engineering Approach.4th ed. Mcgraw-Hill College; 2001

(4) http://www.atmel.com

(5) Smith C, Corripio A. Principles and Practices of Automation Process Control.3rd ed. John Wiley & Sons; 2005.

(6) Nise N. Control systems engineering.6th ed. John Wiley & Sons Ltd; 2010

ภาคผนวก

พารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ใช้ในการทดลอง

PI Controller: $K_P = 2.945$, $K_i = 13.144$

PID Controller: $K_P = 4.409$, $K_i = 9.25$, $K_d = 4.58$

PID + Feedforward Controller: $K_P = 4.409$, $K_i = 9.25$, $K_d = 4.58$, FFC = 3