NUEJ
NARESUAN UNIVERSITY
ENGINEERING JOURNAL

การควบคุมอุณหภูมิของเครื่องทำความเย็นด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี

สิทธิพงษ์ เพ็งประเดิม และ สมพร เรืองสินชัยวานิช

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ต.ท่าโพธิ์ อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000
Email: sittipongpa@hotmail.com, sompornru@yahoo.co.uk

บทคัดย่อ **– บทความวิจัยนี้นำเสนอ ต้นแบบชุดควบคุมอุณหภูมิความเย็นด้วยระบบพีไอดี โดยต้นแบบชุดควบคุมอุณหภูมิสามารถจ่ายความเย็นได้ถึง 324 บีทียูต่อชั่วโมง และปริมาตรของพื้นที่ควบคุมอุณหภูมิมีขนาด 1×1×1 ฟุต^3 สำหรับการควบคุมอุณหภูมิความเย็นเลือกใช้อินเวอร์เตอร์เพื่อปรับระดับความเร็วของพัดลมคอยล์เย็นและมอเตอร์คอมเพรสเซอร์ในระบบทำความเย็นให้เหมาะสมกับอุณหภูมิที่ต้องการ สำหรับการพัฒนาต้นแบบใช้โปรแกรมแลปวิว เพื่อช่วยสร้างแบบจำลองระบบควบคุมพีไอดีและใช้การ์ดอินเตอร์เฟส(DAQ USB-6009) ในการติดต่อระหว่างซอฟแวร์กับฮาร์ดแวร์สำหรับรูปแบบการควบคุมวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์ร่วมกับวิธีการปรับแบบลองผิดลองถูกใช้ในการคำนวณตัวแปรผลตอบสนองเพื่อเป็นตัวแปรพื้นฐานป้อนให้แก่พีไอดี พบว่าต้นแบบสามารถควบคุมอุณหภูมิภายในพื้นที่ควบคุมได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยิ่งไปกว่านั้นผลตอบสนองของอุณหภูมิควบคุมเป็นแบบไม่พุ่งเกิน และมีค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวของอุณหภูมิควบคุมไม่เกิน ± 0.5 องศาเซลเซียส**

คำสำคัญ – ตัวควบคุมแบบพีไอดี, เครื่องทำความเย็น, แลปวิว, ผลตอบสนอง, การพุ่งเกิน

Abstract **- This research paper presents a prototype of cooling temperature control by a PID system. The prototype of the cooling temperature control prototype can provide up to 324 Btu/hr. –The area volume of the controlling chamber is 1×1×1 ft^3. The inverter was used for adjusting the speed levels of either evaporator fan or motor compressor in the refrigerator's system in order to control the set point of the cooling temperature. To develop of the prototype, the LabVIEW program is utilized to simulate the PID control system and the interface card, DAQ USB-6009, is used for communicating between the software and hardware. For control methodology, the Ziegler-Nichols method combined with the trial and error method is used for calculating the responding parameters, which is the basic parameter for feeding the PID. It found that the prototype can control the temperature inside the controlling chamber efficiently. Moreover, the controlling temperature respond is non-overshoot and the steady state error of the controlling temperature is less than ± 0.5 degrees Celsius.**

Keywords – PID Controller, Refrigerator, LabVIEW, Response, Overshoot

1. บทนำ

ระบบควบคุมกระบวนการในภาคอุตสาหกรรม โดยส่วนใหญ่นั้นกระบวนการ (Process) เป็นแบบระบบอันดับหนึ่ง (First Order), ระบบอันดับสอง (Second Order) และไปจนถึงระบบอันดับสูง (Higher Order) รวมไปถึงกระบวนการที่มีเวลาไร้ผลตอบสนอง (Dead Time) ซึ่งกระบวนการทำความเย็นเป็นกระบวนการควบคุมอุณหภูมิแบบหนึ่ง ที่ได้มีการนำไปประยุกต์ใช้กันอย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรม โดยคุณลักษณะของกระบวนการทำความเย็น เป็นกระบวนการแบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาไร้ผลตอบสนองร่วมอยู่ด้วย (First Order Plus Dead Time) ซึ่งตัวควบคุมที่ได้รับความนิยมนำไปใช้งานในการควบคุมกระบวนการโดยส่วนใหญ่คือตัวควบคุมประเภทพีไอดีซึ่งประกอบไปด้วย ตัวควบคุมแบบพี (P Controller), ตัวควบคุมแบบพีไอ (PI Controller) และตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller) [1-4] จุดเด่นหลักที่ทำให้ตัวควบคุมประเภทพีไอดีได้รับความนิยมสูงคือการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมสามารถทำได้ง่ายโดยการทดลองปรับแต่งหาค่าในระหว่างการควบคุมจริงได้โดยไม่ต้องใช้ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมมากนัก และให้ผลในระดับที่น่าพอใจ

ในบทความนี้นำเสนอ การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดีสำหรับประยุกต์ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องทำความเย็น โดยการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดีและการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องทำความเย็นนั้น ได้กระทำบนโปรแกรม

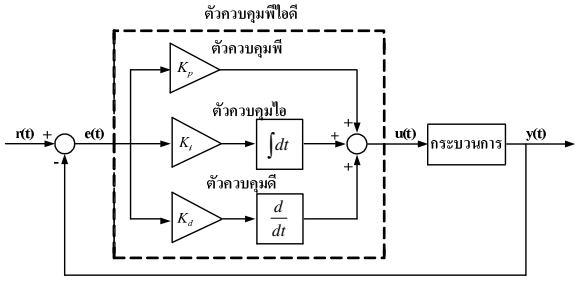
แลปวิว และใช้การ์ดอินเตอร์เฟส (DAQ USB-6009) ในการรับส่งสัญญาณระหว่างคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ควบคุมเครื่องทำความเย็น สำหรับการทดลองจะทำการควบคุมเครื่องทำความเย็นด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี โดยจะทำการปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่ไม่มีการพุ่งเกินและสามารถเข้าสู่ค่าเป้าหมายและรักษาระดับให้คงที่โดยใช้ระยะเวลาไม่เกิน 20 นาที

2. ตัวควบคุมแบบพีไอดี

รูปแบบของการควบคุมแบบพีไอดี โดยทั่วไปสามารถแสดงได้ดังภาพ 1 โดยสามารถแบ่งตัวแปรของตัวควบคุมออกเป็น 3 แบบ ดังนี้ K_p เป็นอัตราขยายของตัวควบคุมพี, K_i เป็นอัตราขยายของตัวควบคุมไอและ K_d เป็นอัตราขยายของตัวควบคุมดี ซึ่งความหมายของตัวแปรทั้ง 3 แบบ คือ ตัวแปรพี (P)หมายถึงสัดส่วน (Proportional) โดยพิจารณาค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในขณะนั้น ตัวแปรไอ (I) หมายถึง อินทีกรัล (Integral) จะพิจารณาผลรวมของค่าความผิดพลาดในแต่ละช่วงเวลา และตัวแปรดี (D)หมายถึงอนุพันธ์ (Derivative) จะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดต่อเวลา หากพิจารณาระบบควบคุมแบบพีไอดีในรูปที่ 1 สามารถเขียนสมการคณิตศาสตร์ดังนี้

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau)\, d\tau + K_d \frac{d\, e(t)}{dt} \qquad (1)$$

โดยที่ u(t) คือ สัญญาณควบคุม, e(t) = r(t) – y(t) คือ ค่าความผิดพลาดหรือค่าผลต่างของการควบคุมซึ่งเป็นอินพุตของตัวควบคุมแบบพีไอดี, y(t) คือ สัญญาณเอาท์พุตของระบบที่ถูกควบคุม และ r(t) คือ สัญญาณอ้างอิงของการควบคุม

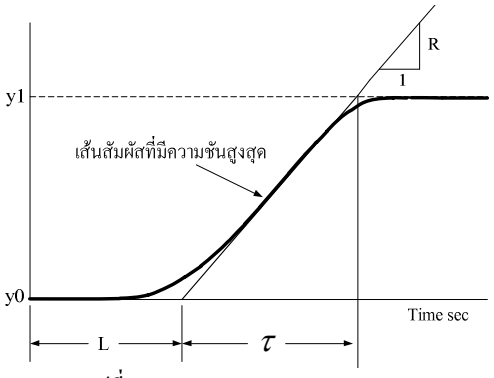


รูปที่ 1 รูปแบบโดยทั่วไปของระบบควบคุมแบบพีไอดี

สำหรับการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมประเภทพีไอดี ถูกแนะนำโดยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์ [5-7] เนื่องจากเป็นวิธีที่เหมาะสำหรับระบบที่มีการตอบสนองที่ค่อนข้างช้า และใช้ได้กับระบบที่มีเสถียรภาพขณะที่ยังไม่มีการควบคุมเท่านั้น เป็นวิธีการหาค่าพารามิเตอร์โดยพิจารณาจากผลตอบสนองของระบบต่อสัญญาณอินพุตแบบฟังก์ชันขั้นบันได จะใช้วิธีการป้อนสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดให้กับกระบวนการดังแสดงในรูปที่ 2 และบันทึกผลตอบสนองของกระบวนการตั้งแต่เริ่มต้นจนผลตอบสนองเข้าสู่สภาวะคงตัว ดังรูปที่ 3

รูปที่ 2 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมแสดงการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมประเภทพีไอดี

จากรูปที่ 3 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการ ซึ่งสามารถคำนวณหาค่า R และ L เพื่อนำไปคำนวณหาค่าพารามิเตอร์หรือค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพี แบบพีไอ และแบบพีไอดี ได้จากตาราง 1



รูปที่ 3 ผลตอบสนองของกระบวนการ

สามารถคำนวณหาค่า R ได้จาก

$$R = \left(\frac{y1 - y0}{Control\ Signal\ Value} \right) \div \tau \qquad (2)$$

โดยที่ y1 คือ ค่าที่สภาวะคงตัว
y2 คือ ค่าที่สภาวะเริ่มต้น

ตารางที่ 1 การหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์

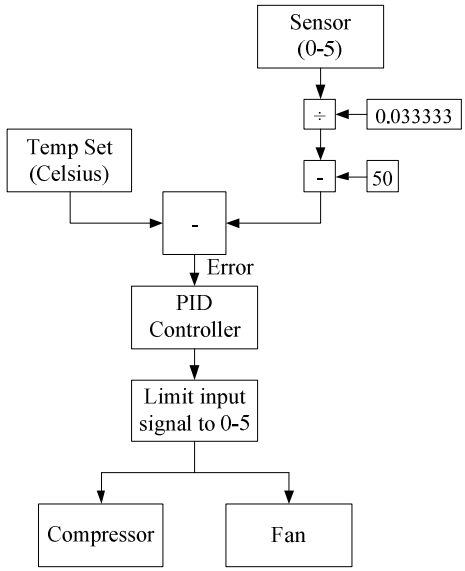
ตัวควบคุม	K_p	K_i	K_d
P	1/RL	-	-
PI	0.9/RL	$K_p/3.3L$	-
PID	1.2/RL	$K_p/2L$	$0.5K_pL$

3. การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดีด้วยแลปวิว

ระบบควบคุมอุณหภูมิเครื่องทำความเย็นสามารถเขียนบนโปรแกรมแลปวิวด้วยบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 4 โดยโปรแกรมที่เขียนประกอบไปด้วย ส่วนรับสัญญาณจากอุปกรณ์วัดอุณหภูมิแล้วแปลงเป็นค่าอุณหภูมิจริง ค่าอุณหภูมิจริงที่ได้จะถูกส่งต่อไปยังส่วนวัดค่าความผิดพลาด เมื่อได้ค่าความผิดพลาดจะถูกส่งต่อไปยังตัวควบคุมแบบพีไอดี ค่าเอาท์พุตของตัวควบคุมประเภทพีไอดีคือสัญญาณควบคุมจะถูกจำกัดสัญญาณควบคุมให้อยู่ในระดับ 0-5 เนื่องจากมีข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์ควบคุม หลังจากนั้นจึงทำการส่งสัญญาณควบคุมผ่านทางส่วนส่งสัญญาณออกแบ่งออกเป็นสัญญาณควบคุมคอมเพรสเซอร์และสัญญาณควบคุมพัดลมคอยล์เย็น โดยที่ส่วนสุดท้ายนั้นได้กำหนดย่านความถี่ใช้งานของคอมเพรสเซอร์และพัดลมดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ระดับการทำงานของคอมเพรสเซอร์และพัดลม

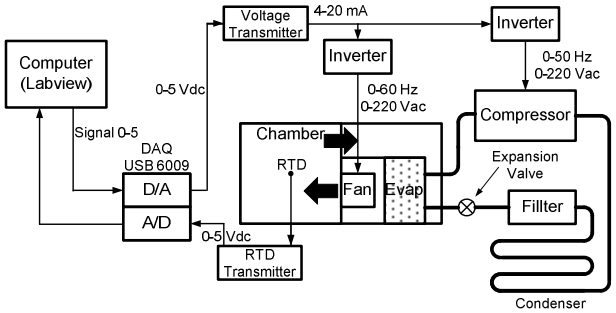
สัญญาณควบคุม	ความถี่คอมเพรสเซอร์ (Hz)	ความถี่พัดลม (Hz)
0	0	0
1	30	4
2	30	8
3	30	12
4	40	16
5	50	20



รูปที่ 4 บล็อกไดอะแกรมการออกแบบตัวควบคุมด้วยแลปวิว

4. การออกแบบระบบควบคุมของเครื่องทำความเย็น

การควบคุมการทำความเย็นกระทำบนคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรมแลปวิว ซึ่งการรับส่งสัญญาณระหว่างคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์ควบคุม ใช้การ์ดอินเตอร์เฟส (DAQ USB-6009) ในการรับส่งสัญญาณ (สัญญาณควบคุมมีขนาด 0-5 โวลต์) โดยที่สัญญาณควบคุมจะถูกส่งผ่านไปยังอุปกรณ์แปลงแรงดัน (0-5 โวลต์) เป็นกระแส (4-20 มิลลิแอมแปร์) สำหรับเป็นอินพุตของอินเวอร์เตอร์เพื่อทำหน้าที่ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์คอมเพรสเซอร์และพัดลมคอยล์เย็น การตรวจวัดอุณหภูมิใช้อาร์ทีดีเป็นตัวตรวจวัด ช่วงของอุณหภูมิที่สามารถวัดได้อยู่ในช่วง -50 ถึง 100 องศาเซลเซียส อุปกรณ์แปลงสัญญาณรับค่าจากอาร์ทีดีเพื่อแปลงสัญญาณอุณหภูมิที่วัดได้ให้อยู่ในช่วง 0-5 โวลต์ ระบบควบคุมของเครื่องทำความเย็นแสดงได้ดังรูปที่ 5



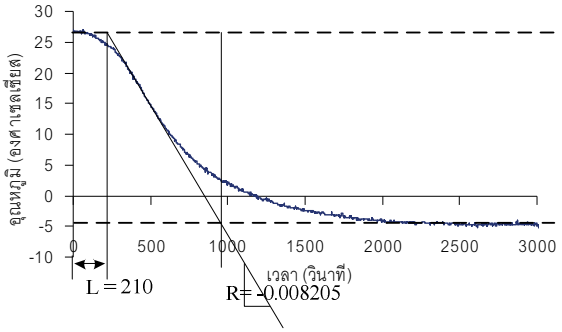
รูปที่ 5 ระบบควบคุมของเครื่องทำความเย็น

5. ผลการทดลอง

ในส่วนของการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องทำความเย็นนั้น แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การทดลองหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดีด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์ และการทดลองควบคุมกระบวนการด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี

5.1 การหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์

ทำการป้อนสัญญาณควบคุมเท่ากับ 5 ให้กับกระบวนการ และบันทึกผลตอบสนองของกระบวนการตั้งแต่เริ่มต้นจนผลตอบสนองเข้าสู่สภาวะคงตัว ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ผลตอบสนองของระบบควบคุมแบบวงเปิด

จากรูปที่ 6 สามารถนำค่า R และ L แทนลงในตารางที่ 1 ดังนั้นจะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีดังตารางที่ 3

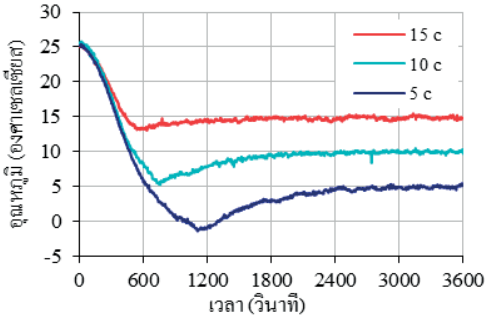
ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดี

ตัวควบคุม	K_p	K_i	K_d
PID	-0.696429	-0.001658	-73.125

จากตารางที่ 3 พบว่าค่าอัตราขยายของตัวควบคุมติดลบ เนื่องมาจากการหาค่า R นั้นต้องนำค่าอุณหภูมิสุดท้ายที่อยู่ในสภาวะคงตัวลบด้วยค่าอุณหภูมิเริ่มต้น จะเห็นว่าค่าอุณหภูมิสุดท้ายนั้นมีค่าน้อยกว่า จึงทำให้ค่า R ที่หาได้ติดลบ เมื่อนำค่า R แทนลงในตารางที่ 1 จึงทำให้ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมติดลบ

5.2 การควบคุมกระบวนการด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี

การทดลองควบคุมกระบวนการด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี จะทำการควบคุมโดยใช้พารามิเตอร์ที่หาจากวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์เป็นพารามิเตอร์ของตัวควบคุม โดยทำการตั้งค่าอุณหภูมิเป้าหมายเป็น 5, 10 และ 15 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการทดลอง 1 ชั่วโมง (3600 วินาที) สามารถแสดงผลการทดลองได้ดังรูปที่ 7



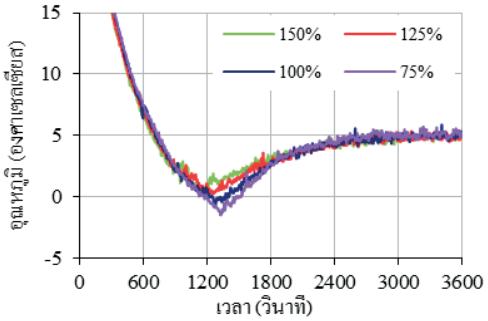
รูปที่ 7 ผลตอบสนองของระบบควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี

พบว่าผลตอบสนองที่ได้จากการหาพารามิเตอร์ด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์นั้นเกิดการพุ่งเกินและเข้าสู่สภาวะคงตัวช้า โดยเฉพาะยิ่งค่าเป้าหมายอยู่ไกลจากค่าตั้งต้นยิ่งทำให้การพุ่งเกินและเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวมีค่ามากขึ้น

ผู้วิจัยจึงแก้ปัญญาโดยการใช้วิธีแบบลองผิดลองถูก (Trial and Error) เพื่อที่จะทำให้ผลตอบสนองเกิดการพุ่งเกินและเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวน้อยลง โดยการนำพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ได้มาจากวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์ เป็นค่าตั้งต้นสำหรับการทดลองปรับแต่งตัวควบคุมด้วยวิธีลองผิดลองถูกจะทำการทดลองที่ค่าเป้าหมายเป็น 5 องศาเซลเซียส ขั้นแรกสำหรับการปรับแต่งผู้วิจัยจะทำการเพิ่มและลดพารามิเตอร์ Kp ครั้งละ 25% โดยใช้ค่าอัตราขยายดังตารางที่ 4 และสามารถแสดงผลตอบสนองของการปรับค่า K_p ได้ดังรูปที่ 8

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดีโดยการปรับค่า K_p

ตัวควบคุม	K_p	K_i	K_d
K_p 75%	-0.522322	-0.001658	-73.125
K_p 125%	-0.870536	-0.001658	-73.125
K_p 150%	-1.044644	-0.001658	-73.125



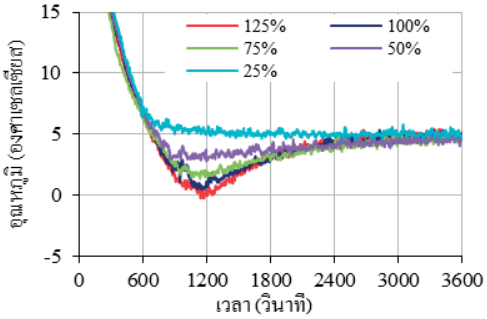
รูปที่ 8 ผลตอบสนองของระบบเมื่อปรับค่า K_p

พบว่าการเพิ่มค่า K_p นั้นสามารถลดค่าการพุ่งเกินของผลตอบสนองลงได้โดยค่าที่ดีที่สุดจากการทดลองปรับค่าคือ K_p 150%

ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการปรับค่า K_i โดยการนำค่า K_p 150% จากการทดลองที่ผ่านมานำมาใช้เป็นค่าคงที่และจะทำการเพิ่มและลดพารามิเตอร์ K_i ครั้งละ 25% โดยใช้ค่าอัตราขยายดังตารางที่ 5 และสามารถแสดงผลตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงค่า K_i ได้ดังรูปที่ 9

ตารางที่ 5 พารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดีโดยการปรับค่า K_i

ตัวควบคุม	K_p	K_i	K_d
K_i 25%	-1.044644	-0.000415	-73.125
K_i 50%	-1.044644	-0.000829	-73.125
K_i 75%	-1.044644	-0.001244	-73.125
K_i 125%	-1.044644	-0.002073	-73.125



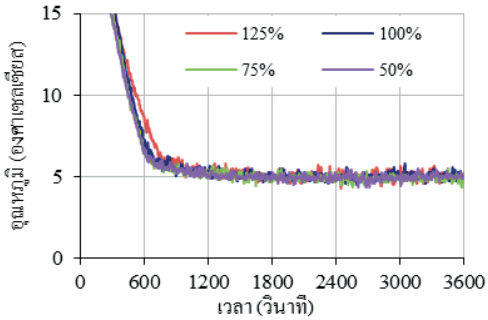
รูปที่ 9 ผลตอบสนองของระบบเมื่อปรับค่า K_i

พบว่าการลดค่า K_i นั้นสามารถลดค่าการพุ่งเกินของผลตอบสนองลงได้โดยค่าที่ดีที่สุดจากการทดลองปรับค่าคือ K_i 25%

ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการปรับค่า K_d โดยการนำค่า K_p และ K_iจากการทดลองที่ผ่านมานำมาใช้เป็นค่าคงที่และจะทำการเพิ่มและลดพารามิเตอร์ K_d ครั้งละ 25%โดยใช้ค่าอัตราขยายดังตาราง 6 และสามารถแสดงผลตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงค่า K_i ได้ดังรูปที่ 10

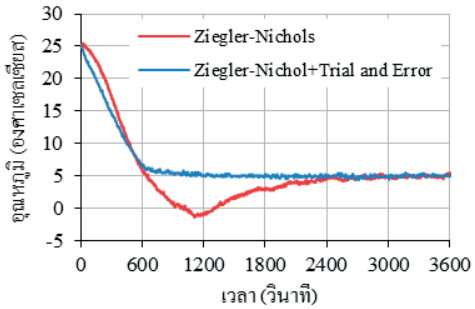
ตารางที่ 6 พารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดีโดยการปรับค่า K_d

ตัวควบคุม	K_p	K_i	K_d
K_d 50%	-1.044644	-0.000415	-36.563
K_d 75%	-1.044644	-0.000415	-54.844
K_d 125%	-1.044644	-0.000415	-91.406

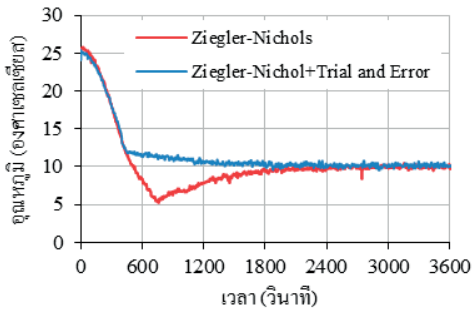


รูปที่ 10 ผลตอบสนองของระบบเมื่อปรับค่า K_d

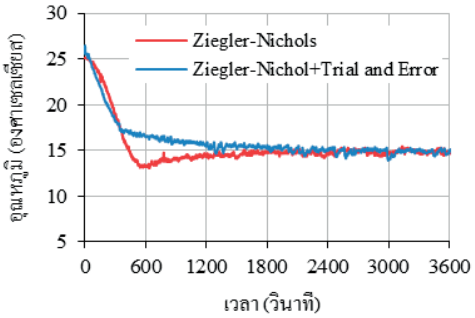
พบว่าการลดค่า K_d นั้นสามารถลดค่าการพุ่งเกินของผลตอบสนองลงได้โดยค่าที่ดีที่สุดจากการทดลองปรับค่าคือ K_d 50%



รูปที่ 11 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อทำการตั้งค่าเป้าหมายที่ 5 องศาเซลเซียส



รูปที่ 12 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อทำการตั้งค่าเป้าหมายที่ 10 องศาเซลเซียส



รูปที่ 13 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อทำการตั้งค่าเป้าหมายที่ 15 องศาเซลเซียส

รูปที่ 11, 12 และ 13 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมอุณหภูมิเครื่องทำความเย็นด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีโดยการเปรียบเทียบกันของการควบคุมด้วยพารามิเตอร์ที่หาค่าโดยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์กับการปรับพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์ด้วยวิธีลองผิดลองถูก ซึ่งผลตอบสนองของระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมที่ปรับพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์ด้วยวิธีลองผิดลองถูกนั้น สามารถทำให้ผลตอบสนองเข้าสู่สภาวะคงตัว (Settling Time)ได้เร็วกว่า และทำให้ผลตอบสนองไม่มีค่าพุ่งเกิน (Percent Overshoot) สามารถแสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะได้ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 สมรรถนะของระบบควบคุม

Method	Percent overshoot (%)			Settling time 5% (sec)		
	5	10	15	5	10	15
Ziegler-Nichols	30	26.6	20	2000	1700	1200
Ziegler-Nichols +Trial and Error	0	0	0	630	1100	1200

6. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองควบคุมอุณหภูมิเครื่องทำความเย็นด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีพบว่าผลตอบสนองที่ได้จากการหาพารามิเตอร์ด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์นั้นเกิดการพุ่งเกินและเข้าสู่สภาวะคงตัวช้า สามารถแก้ไขได้โดยการทดลองปรับแก้ด้วยวิธีลองผิดลองถูก โดยใช้ค่าที่ได้จากวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์เป็นค่าตั้งต้น ซึ่งหลังจากการปรับแล้วสามารถทำให้ควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องทำความเย็นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวเร็วขึ้น ให้ผลตอบสนองที่ไม่มีการพุ่งเกิน และมีค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวไม่เกิน ± 0.5 องศาเซลเซียส

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณบริษัท เบลตัน อินดัสเตรียล (ไทยแลนด์) จำกัด สำหรับการสนับสนุนข้อมูลที่สำคัญและนักวิจัย นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทางการเงินโดยศูนย์วิจัยร่วมเฉพาะทางด้านส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ (I/UCRC in HDDComponent) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) (โครงการ: CPN-HR 09-02-53M)

8. เอกสารอ้างอิง

[1] Saeed Tavakoli and Mahdi Tavakoli, “Optimal tuning of PID controller for first order plus time delay models using dimensional analysis”, in *Proc. 2003 IEEE Control and Automation Conf.*, pp. 942-946.

[2] Noor Hayatee Abdul Hamid, Mahanijah Md Kamal and Faieza Hanum Yahaya, “Application of PID Controller in Controlling Refrigerator Temperature” , in *Proc. 2009 IEEE Signal Processing & Its Applications Conf.*, pp. 378-384.

[3] K. Ang, G. Chong, “PID Control System Analysis, Design and Technology”, in *Proc. 2005 IEEE Control Systems Technology Conf.*, pp. 559-569

[4] วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์, *การวัดและควบคุมกระบวนการ*, กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2550.

[5] วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, *การควบคุมระบบพลศาสตร์*, กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548, หน้า 229-234.

[6] สุวัฒน์ กุลธนปรีดา, *วิศวกรรมการควบคุมอัตโนมัติ*. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2552.

[7] Dingyu Xue, Yang Quan Chen and Delek P.Atherton, *Linear Feedback Control*, The Society for Industrial and Applied Mathematics, 2007.