# การควบคุมอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลลิ่งด้วยตัวควบคุมพีไอดี

# Temperature Control of Thermoelectric Cooling with PID Controller

กันต์พจน์ วงศ์หนองเตย[1], ณพล ศรีเกษมสุนทร[1] และ ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์[1*]

[1] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์(วิทยาเขตบางเขน)
เลขที่ 50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพ ฯ 10900
*ติดต่อ: taweedej.s@ku.th, 084-701-9449

***บทคัดย่อ***

งานวิจัยนี้เสนอการออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลลิ่ง (Thermoelectric Cooling) หรือแผ่นเพลเทียร์ (Peltier) ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำหรับทำความร้อนหรือทำความเย็น โดยใช้วิธีการควบคุมแบบพีไอดี (PID controller) เพื่อศึกษาการทำความร้อนของระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว ให้ตรงตามระดับอุณหภูมิ (Temperature Profile) ของปฏิกิริยาลูกโซ่พอลิเมอเรส (Polymerase chain reaction) ในการวิจัยนี้ยังได้ทำการสร้างอุปกรณ์ต้นแบบโดยใช้บอร์ด Arduino Uno R3 ที่มีไมโครคอนโทรลเลอร์ Atmega328p ติดตั้งอยู่บนบอร์ดเพื่อควบคุมระบบและทดสอบการทำงานของระบบควบคุมของเทอร์โมอิเล็กทรอกคูลลิ่งที่ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ให้ความร้อน มีชุดบล็อกอลูมิเนียม (chamber) เป็นอุปกรณ์สำหรับถ่ายเทความร้อน และใช้เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ เพื่อให้เป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (feedback control) โดยอุปกรณ์ต้นแบบนี้ใช้วิธีการควบคุมแบบพีไอดี และทำการทดลองปรับหาค่าเกนของพีไอดีเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมในการควบคุมระดับอุณหภูมิและเวลาในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จากการทดลองนั้นสามารถหาค่าเกนของพีไอดีที่เหมาะสมกับอุปกรณ์ต้นแบบที่ทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ตรงตามระดับอุณหภูมิของปฏิกิริยาลูกโซ่พอลิเมอเรส

***คำหลัก:*** พีไอดี, ควบคุมอุณหภูมิ,เพลเทียร์, เทอร์โมอิเล็กทริก, Arduino

***Abstract***

This paper presenting, the design of the thermoelectric cooling or peltier, which is a device for heating or cooling. By using the PID controller to study the heating and cooling system with rapid temperature changes to meet the temperature profile of the Polymerase Chain Reaction. In this experiment, the testing module was invented by using the Arduino Uno R3 board that has the Atmega328p microcontroller to control and test the operation of the control system of the thermoelectric cooling, there is a set of aluminum blocks that are devices for heat transfer and using a temperature sensor to be a feedback control system. This experiment device uses a PID control method. The trial and error for PID gain tuning is executed in order to obtain the appropriate gain to control the temperature. From the experiment, it is possible to find the gain of the PID that is suitable for the testing module, which can control the temperature according to the temperature of the polymerase chain reaction.

***Keywords:*** PID, temperature control, peltier, TEC, Arduino

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันมีการนำเทอร์โมอิเล็กทริกคูลลิ่งหรือเพลเทียร์ (Peltier) ไปใช้งานกันอย่างแพร่หลายมากขึ้น ซึ่งอุปกรณ์นี้สามารถทำความร้อนหรือทำความเย็น นอกจากนี้เพลเทียร์ยังมีขนาดเล็ก ทำให้เป็นที่นิยมในการนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ทำความเย็นในงานอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาระบบควบคุมของเพลเทียร์ให้สามารถทำอุณหภูมิได้ตามต้องการ โดยใช้วิธีการควบคุมแบบพีไอดี (PID control) เพื่อมาควบคุมระดับอุณหภูมิ (Temperature profile) ของปฏิกิริยาลูกโซ่พอลิเมอเรส (Polymerase chain reaction) ซึ่งเป็นกระบวนการเพิ่มปริมาณสารพันธุกรรม โดยจะต้องให้ความร้อนในระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกันมีลักษณะเป็น thermal cycle จึงได้มีการสร้างต้นแบบเพื่อศึกษาการทำงานของระบบควบคุมอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลลิ่ง

จากงานวิจัยของ Mihai P. Dinca, Marin Gheorghe and Paul Galvin [1] ได้ศึกษาทฤษฎีและหลักการในการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดีสำหรับปฏิกิริยาลูกโซ่พอลิเมอเรส โดยใช้ Labview ในการทดลองหาตัวควบคุมที่มีประสิทธิภาพในการควบคุมระบบด้วยวิธีต่างๆ เช่น PID, fuzzy-PID, Predictive Control with a neural network เป็นต้น ซึ่งเมื่อนำตัวควบคุมแต่ละแบบมาเปรียบเทียบพบว่าการควบคุมด้วยอัลกอริทึมพีไอดีอย่างนั้นสามารถควบคุมได้อย่างมีประสิทธิภาพและง่ายในการออก ต่อมางานวิจัยของ Tawee Pogfai, Krongkamol Wong-ek, Suriya Mongpraneet, Anurat Wisitsoraat and Adisorn Tuantranont [2] ได้กล่าวถึงการออกแบบและการสร้างอุปกรณ์ต้นแบบที่ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกของบริษัท Tiacang TE Model TEC1-12710 เป็นตัวทำความร้อนและความเย็น โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีเพื่อควบคุมระดับอุณหภูมิที่เหมาะสำหรับการเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่พอลิเมอเรส ซึ่งสรุปไว้ว่า อุปกรณ์ต้นแบบและระบบควบที่ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกของบริษัท Tiacang TE Model TEC1-12710 สามารถควบคุมระดับอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของปฏิกิริยาลูกโซ่พอลิเมอเรสได้ โดยมีการเพิ่มจำนวนของการสารพันธุกรรม

ดังนั้นจะงานวิจัยนี้ได้มีการนำเพลเทียร์มาใช้เป็นอุปกรณ์สำหรับทำความร้อนและทำความเย็นของกระบวนการปฏิกิริยาลูกโซ่พอลิเมอเรส ซึ่งในกระบวนการนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว โดยมีระดับอุณหภูมิอยู่ 3 ระดับได้แก่ ระดับที่หนึ่ง Denaturation มีระดับอุณหภูมิที่ 92-96 องศาเซลเซียส ระดับที่สอง Annealing มีระดับอุณหภูมิที่ 37-65 องศาเซลเซียส ระดับที่สาม Extension มีระดับอุณหภูมิที่ 72-75 องศาเซลเซียส โดยสร้างชุดต้นแบบเพื่อจำลองระบบควบคุมก และหาค่าเกน(Gain) ของพีไอดีที่เหมาะสมกับระบบควบคุมอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลลิ่งและสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ตรงตามระดับอุณหภูมิของปฏิกิริยาลูกโซ่พอลิเมอเรส

## 2. วัตถุประสงค์และขอบเขต

เพื่อศึกษาการทำงานของระบบควบคุมของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลลิ่งและทำการปรับหาค่าเกนสำหรับตัวควบคุมแบบพีไอดี ที่สามารถควบคุมระดับอุณหภูมิตามกระบวนการเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่พอลิเมอเรสได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีค่าความคาดเคลื่อนน้อยที่สุด

ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้สร้างอุปกรณ์ต้นแบบเพื่อจำลองระบบควบคุมและใช้บอร์ด Arduino Uno R3 ที่มีไมโครคอนโทรลเลอร์ Atmega328p เป็นตัวควบคุมโดยเขียนอัลกอริทึมและโปรแกรมควบคุมผ่านโปรแกรมผ่าน Arduino IDE

## 3. กระบวนการทดลอง

ในกระบวนการเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่พอลิเมอเรสนั้นจะมีระดับอุณหภูมิสำคัญอยู่ 3 ระดับตามตารางที่ 1 โดยเครื่อง PCR ทั่วไปจะมีการกำหนดระดับอุณหภูมิตามตารางที่ 1 แต่เวลาในการรักษาระดับความร้อนในแต่ละ

ช่วงนั้นจะขึ้นอยู่กับการออกแบบของผู้ผลิตโดยอาจใช้เวลาได้ตั้งแต่ 15 วินาทีถึง 10 นาที

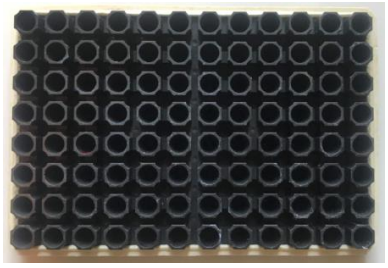
ตารางที่ 1 ระดับอุณหภูมิของปฏิกิริยาลูกโซ่พอลิเมอเรส

| ช่วง | ระดับอุณหภูมิ(°C) |
|---|---|
| 1. Denaturation | 92-96 |
| 2. Annealing | 37-65 |
| 3. Extension | 72-75 |

โดยในงานวิจัยนี้สามารถแบ่งขั้นตอนได้ ดังนี้

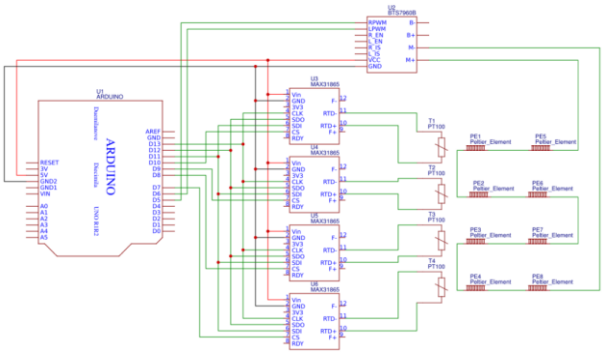
### 3.1. การสร้างอุปกรณ์ต้นแบบทดลอง

ในการสร้างอุปกรณ์ต้นแบบทดลองนั้นผู้วิจัยได้เลือกใช้อุปกรณ์หลัก ได้แก่ บล็อกอลูมิเนียม (chamber) ที่มีขนาดความกว้าง 75 มิลลิเมตร ยาว 110 มิลลิตร มีจำนวนหลุมทั้งหมด 96 หลุม ตามรูปที่ 1 ซึ่งเป็นบล็อกอลูมิเนียมที่มีขนาดเท่ากับที่ใช้ในเครื่องพีซีอาร์ยี่ห้อ ThermoHybaid รุ่น PCYL001 ISSUE3 ซึ่งจะมีจำนวนหลุมใส่หลอดทดลองและขนาดใกล้กับเครื่อง PCR ที่ใช้อยู่ทั่วไป



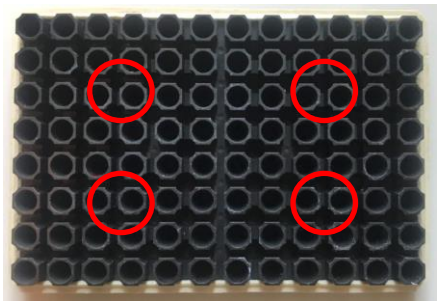
รูปที่ 1 บล็อคอลูมิเนียม

และเลือกเพลเทียร์ที่ใช้กำลังไฟฟ้า 20 วัตต์ และมีขนาดกว้าง 25 มิลลิเมตร ยาว 25 มิลลิเมตร จำนวน 8 ชิ้น โดยติดตั้ง 2 แถว แถวละ 4 ชิ้นทำให้มีขนาดใกล้เคียงกับบล็อกอลูมิเนียม เพื่อให้สามารถได้ความร้อนได้ครอบคลุมทุกพื้นที่ของบล็อกอลูมิเนียม แล้วนำอุปกรณ์ในตารางที่ 2 มาประกอบโดยต่อวงจรของเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ โมดูลมอสเฟต และเพลเทียร์ ตามรูปที่ 2



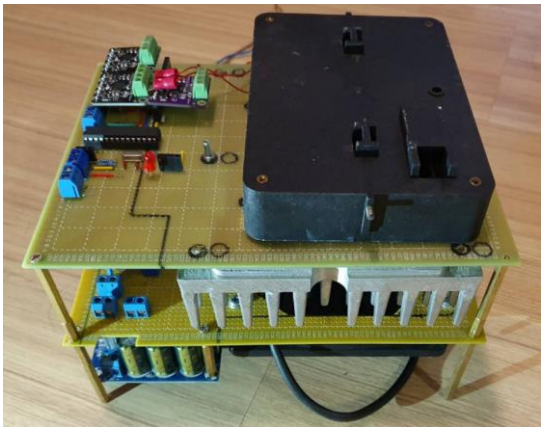

รูปที่ 2 วงจรของเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ
โมดูลมอสเฟตและเพลเทียร์

ทำการติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิทั้ง 4 ตัวตามวงกลมสีแดงตามรูปที่ 3 โดยหาค่าเฉลี่ยของเซนเซอร์ทั้ง 4 มาใช้เป็นค่าอุณหภูมิ

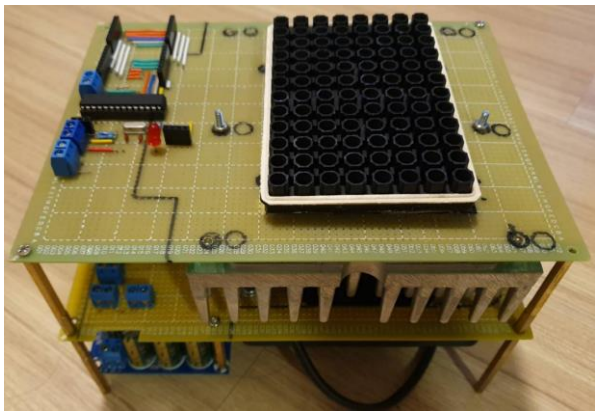


รูปที่ 3 ตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ

ทำการต่ออุปกรณ์ที่เหลือจะได้อุปกรณ์ต้นแบบทดลอง ตามรูปที่ 4



รูปที่ 4 อุปกรณ์ต้นแบบทดลองขณะปิดฝา



รูปที่ 5 อุปกรณ์ต้นแบบทดลองขณะเปิดฝา

รูปที่ 6 เครื่อง PCR ทั่วไป

ตารางที่ 2 อุปกรณ์และจำนวนอุปกรณ์ที่ใช้

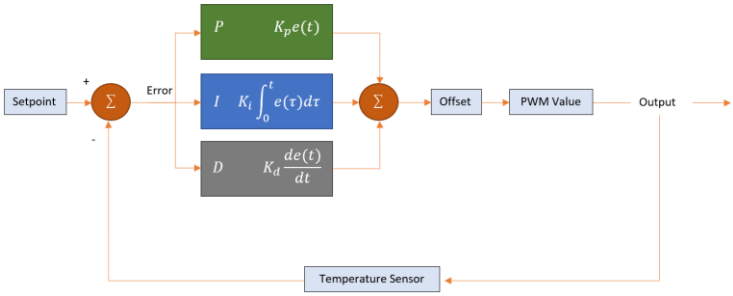
| รายชื่อ | จำนวน |
|---|---|
| 1. เพลเทียร์ขนาด 25*25 mm | 8 |
| 2. บล็อกอลูมิเนียม(chamber) | 1 |
| 3. ฟินระบายความร้อน | 1 |
| 4. พัดลม 10 โวลล์ | 1 |
| 5. Arduino Uno R3 Atmega328p | 1 |
| 6. โมดูลมอสเฟต(mosfet module) | 1 |
| 7. เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ(RTD PT100) | 4 |
| 8. Power supply | 1 |

### 3.2. การเขียนโปรแกรมอัลกอริทึมของพีไอดี

จากทฤษฎีการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี จะได้สมการ

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

และทำการเขียน Block diagram ของระบบตามรูปที่ 7




รูปที่ 7 block diagram ของระบบ

นำ Block diagram ในรูปที่ 7 มาเขียนเป็นอัลกอริทึมของพีไอดี โดยจะได้อัลกอริทึมตามรูปที่ 8

```
currentTime = millis();
deltaTime = currentTime - previousTime;
error = setpoint - input;
Ierror += error * deltaTime ;
Derror = (error - lastError)/elapsedTime;
PWMoutput = kp*error + ki*Ierror + kd*Derror + offsetValue ;

lastError = error;
previousTime = currentTime;
```

รูปที่ 8 อัลกอริทึมของพีไอดี

### 3.3. การทดลองเพื่อหาค่าเกนของพีไอดี

ทำการทดลองหาค่าเกนของพีไอดีด้วยวิธี Trial & Error Close-Loop Tuning โดยปรับค่า Ki และ Kd เป็นศูนย์แล้วทำการปรับหาค่า Kp กระทั่งสัญญาณขาออกเกิดการแกว่ง แล้วตั้งค่า Kp ให้เหลือครึ่งหนึ่งของค่าที่ทำให้เกิดการแกว่งสำหรับการตอบสนองชนิด "quarter amplitude decay" เมื่อได้ค่า Kp ที่เหมาะสมแล้ว ทำการปรับค่า Ki ที่ทำให้มีค่า steady- state error น้อยที่สุด หลังจากนั้นปรับค่า Kd เพื่อลด Overshoot ของระบบและลดเวลาเข้าสู่สมดุล

โดยทำการตั้งค่า setpoint ของทั้ง 3 ช่วงอุณหภูมิตามตารางที่ 3 แล้วทดสอบเพื่อดูลักษณะของอุณหภูมิที่

เปลี่ยนแปลงไปและกำหนดให้รักษาระดับของอุณหภูมิในแต่ละช่วงเป็นเวลา 30 วินาที

ตารางที่ 3 ระดับอุณหภูมิปฏิกิริยายาลูกโซ่พอลิเมอเรส

| ช่วง | setpoint |
|---|---|
| 1. Denaturation | 92 |
| 2. Annealing | 55 |
| 3. Extension | 72 |

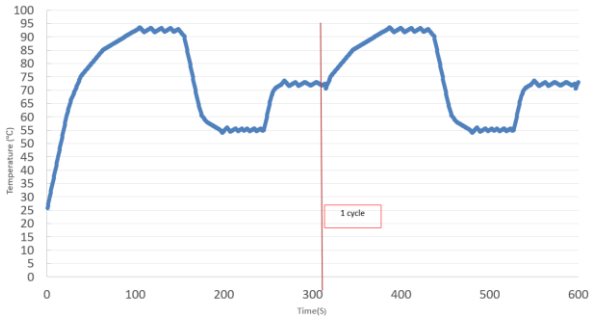
## 4. ผลการทดลอง

ผลของการค่าเกนพีไอดีที่ปรับแก้ด้วยวิธี Trial & Error Close-Loop Tuning ตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าเกนของพีไอดี

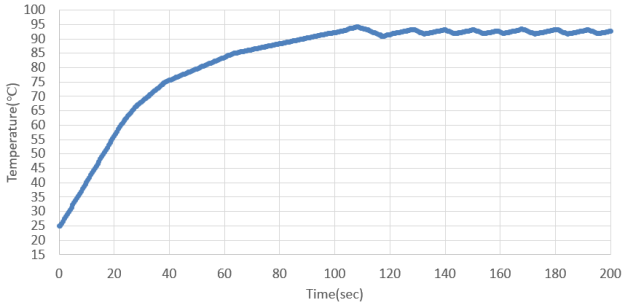
| เกน | ค่าเกน |
|---|---|
| P-gain | 8 |
| I-gain | 3 |
| K-gain | 0.2 |

จากรูปที่ 9 แสดงผลการควบคุมอุณหภูมิ 1 รอบโดยเริ่มต้นจากอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส ทำความร้อนจนเข้าสู่ steady-state ของช่วง Denaturation ที่ setpoint เท่ากับ 92 องศาเซลเซียส แล้วจะรักษาระดับอุณหภูมิเป็นเวลา 50 วินาที จึงเริ่มลดความร้อนลงเพื่อเข้าสู่ steady-state ของช่วง Annealing ที่ setpoint เท่ากับ 55 องศาเซลเซียส แล้วรักษาระดับอุณหภูมิเป็นเวลา 50 วินาที หลังจากนั้นจะเริ่มทำความร้อนอีกครั้งจนเข้าสู่ช่วง steady-state ของช่วง Extension ที่ setpoint เท่ากับ 72 องศาเซลเซียส แล้วรักษาระดับอุณหภูมิเป็นเวลา 50 วินาที เมื่อปรับระดับอุณหภูมิครบทั้ง 3 ช่วงจะนับเป็น 1 รอบ แล้วจะทำการเริ่มต้น รอบที่ 2 โดยเริ่มจากอุณหภูมิที่ 72 องศาเซลเซียสทำความร้อนจนถึงช่วง Denaturation ของ รอบที่ 2 ที่ setpoint เท่ากับ 92 องศาเซลเซียส โดยจะปรับอุณหภูมิเป็น thermal cycle ไปเรื่อย ๆ จนครบจำนวนรอบที่กำหนด



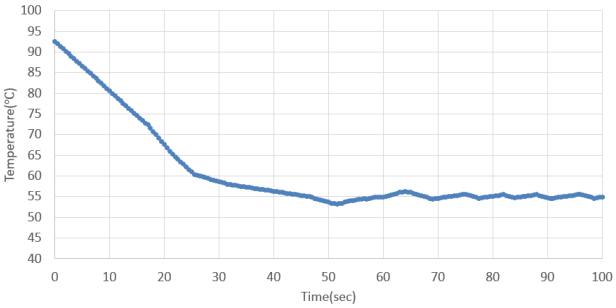

รูปที่ 9 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทั้ง 3 ระดับ

เมื่อทำการวิเคราะห์การควบคุมระดับอุณหภูมิในช่วง Denaturation เริ่มจากอุณหภูมิที่ 25 ถึง 92 องศาเซลเซียส จากรูปที่ 10 แสดงให้เห็นว่าระบบใช้เวลาในช่วง transient จนเข้าสู่ช่วง steady-state เป็นเวลา 113 วินาที เมื่อเข้าสู่ช่วง steady-state ที่ setpoint เท่ากับ 92 องศาเซลเซียสพบว่ามีค่าคาดเคลื่อนประมาณ ±2 องศาเซลเซียส



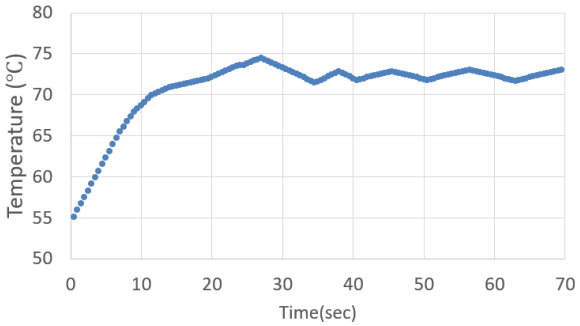

รูปที่ 10 การเปลี่ยนของอุณหภูมิ 25 ถึง 92 องศาเซลเซียส

เมื่อทำการวิเคราะห์การควบคุมระดับอุณหภูมิในช่วง Annealing ระบบจะลดอุณหภูมิจาก 92 ลงไปเหลือ 55 องศาเซลเซียส จากรูปที่ 11 แสดงให้เห็นว่าระบบใช้เวลาในช่วง transient จนเข้าสู่ช่วง steady-state เป็นเวลา 53 วินาที เมื่อเข้าสู่ช่วง steady-state ที่ setpoint เท่ากับ 55 องศาเซลเซียสพบว่ามีค่าคาดเคลื่อนประมาณ ±2 องศาเซลเซียส




รูปที่ 11 การเปลี่ยนของอุณหภูมิ 92 ถึง 55 องศาเซลเซียส

เมื่อทำการวิเคราะห์การควบคุมระดับอุณหภูมิในช่วง Extension เริ่มทำความร้อนจากอุณหภูมิ 55 ถึง 72 องศาเซลเซียส จากรูปที่ 12 แสดงให้เห็นว่าระบบใช้เวลาในช่วง transient จนเข้าสู่ช่วง steady-state เป็นเวลา 33 วินาที ในช่วง Extension นั้นมี Rise time น้อยทำให้เข้าสู่ช่วง steady-state ได้เร็วแต่มี overshoot มากกว่าช่วงอื่น โดยเมื่อเข้าสู่ steady-state ที่ setpoint เท่ากับ 72 องศาเซลเซียสพบว่ามีค่าคาดเคลื่อนประมาณ ±2 องศาเซลเซียส




รูปที่ 12 การเปลี่ยนของอุณหภูมิ 55 ถึง 72 องศาเซลเซียส

## 5. สรุปผลการทดลอง

อุปกรณ์ทดสอบระบบควบคุมเทอร์โมอิเล็กทริกคูลลิ่งด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ผ่านการปรับแก้ด้วยวิธี Trial & Error Close-Loop Tuning สามารถควบคุมการทำความร้อนและความเย็นได้ โดยสามารถทำอุณภูมิได้ตามระดับอุณหภูมิที่ตั้งไว้ตามตารางที่ 3 และสามารถรักษาระดับอุณหภูมิในแต่ละช่วงเป็นเวลา 30 วินาที ซึ่งมีระดับอุณหภูมิตรงตามปฏิกิริยาลูกโซ่พอลิเมอเรส

โดยในอนาคตนั้นสามารถศึกษา disturbance ของระบบที่เกิดจากการศูนย์เสียความร้อน หรือความเป็นฉนวนของอุปกรณ์ หรือทำการทดลองวิธีการปรับค่า PID gain ด้วยวิธีอื่นๆ เพื่อทำการเปรียบเทียบให้ได้ค่า PID gain ที่ดีที่สุด

## 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้จะเสร็จสมบูรณ์มิได้ถ้าขาดความอนุเคราะห์จาก ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

## 7. เอกสารอ้างอิง

### 7.1 บทความจากวารสาร (Journal)

[1] M. P. Dinca, M. Gheorghe and P. Galvin (2009). Design of a PID Controller for a PCR Micro Reactor, in IEEE Transactions on Education, vol. 52, no. 1, Feb. 2009, pp. 116-125.

[2] Tawee Pogfai, Krongkamol Wong-ek, Suriya Mongpraneet, Anurat Wisitsoraat and Adisorn Tuantranont (2008). Low cost and portable PCR thermoelectric cycle, in International journal of applied biomedical engineering. Vol. 1, no.1 (Jul.-Dec. 2008), p.41 – 45.

[3] T. Maturos, T. Pogfay, S. Mongpraneet, A. Wisitsoraat, T. Lomas and A. Tuantranont (2010). Temperature cycle and surface treatment study of thermoelectric based micro PCR, *2010 IEEE 5th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, Xiamen, 2010, pp. 712-715.

### 7.5 เว็บไซต์

[1] thaicontrol (2554). PID Tuning, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา https://thaicontrol.wordpress.com

, เข้าดูเมื่อวันที่ 20/11/2561.
[2] ศูนย์เทคโนโลยีชีวภาพเกษตร. บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ทั่วไป, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา http://www.cab.kps.ku.ac.th
, เข้าดูเมื่อวันที่ 20/12/2561.