

ต้นแบบตัวควบคุมอุณหภูมิสำหรับเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ
TEMPERATURE CONTROLLER PROTOTYPE FOR
AN INDUCTION HEAT FURNACE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

ต้นแบบตัวควบคุมอุณหภูมิสำหรับเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

TEMPERATURE CONTROLLER PROTOTYPE FOR
AN INDUCTION HEAT FURNACE



จิรกิตติ์ ชัยนคร

ชิตพล สิทธิดำรงค์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TEMPERATURE CONTROLLER PROTOTYPE FOR
AN INDUCTION HEAT FURNACE



THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN CONTROL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2559

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ต้นแบบตัวควบคุมอุณหภูมิสำหรับเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ
TEMPERATURE CONTROLLER PROTOTYPE FOR AN INDUCTION HEAT FURNACE

ผู้จัดทำ นายจิริกิตต์ ชยันคร 56010183
 นายชิตพล สิทธิดำรงค์ 56010309




.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.ถาวร เบญจจรัสสุทธิ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้นแบบตัวควบคุมอุณหภูมิสำหรับเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

โดย

นายจิริกิตตี ชัยนคร 56010183

นายชิตพล สิทธิดำรงค์ 56010309

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร. ถาวร เภญจนราษฎร์

ปีการศึกษา 2559

บทคัดย่อ

ปัจจุบันเทคโนโลยีการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ได้รับความนิยมในอุตสาหกรรม ซึ่งโดยทั่วไปมักใช้ร่วมกับอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิสำเร็จรูป ทั้งในรูปแบบระบบวงเปิด และระบบวงปิด เพื่อควบคุมให้อุณหภูมิของวัตถุเป้าหมายมีค่าตามที่กำหนด อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิสำเร็จรูปดังกล่าวมีราคาค่อนข้างสูง และยังมีข้อจำกัดในการใช้งานตามคุณสมบัติของอุปกรณ์ในแต่ละรุ่นที่เลือกใช้งาน ปริญญานิพนธ์นี้จึงออกแบบต้นแบบตัวควบคุมอุณหภูมิในระบบวงปิดด้วยต้นทุนการผลิตที่ถูกลงกว่าการใช้อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิสำเร็จรูป และสามารถปรับให้เหมาะสมกับการใช้งานเฉพาะทางของผู้ใช้งานได้มากยิ่งขึ้น

ปริญญานิพนธ์นี้ใช้เตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำของบริษัท ซีอีพี อินดักชั่นฮีต จำกัด ในการสร้างต้นแบบตัวควบคุมอุณหภูมิ โดยตัวควบคุมอุณหภูมิที่พัฒนาขึ้นอาศัยเทอร์โมคัปเปิลในการวัดค่าอุณหภูมิ ค่าวัดดังกล่าวจะถูกส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผลสัญญาณควบคุม โดยอาศัยกฎการควบคุมแบบพีเอ็ดี หรือแบบอื่นตามความต้องการของผู้ใช้ สัญญาณควบคุมดังกล่าวจะถูกส่งให้วงจรขับของเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ซึ่งผลการทดลองพบว่า ต้นแบบตัวควบคุมอุณหภูมิมีประสิทธิภาพในการทำงาน สามารถใช้งานกับเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำตามวัตถุประสงค์ในการควบคุม และมีต้นทุนต่ำกว่าหนึ่งในสามของอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิสำเร็จรูป

TEMPERATURE CONTROLLER PROTOTYPE FOR AN INDUCTION HEAT FURNACE

By

Mr. Jirakit Chainakorn 56010183

Mr. Chittaphon Sitthidamrong 56010309

Advisor

Assoc. Prof. Dr. Taworn Benjanarasuth

Academic Year 2016

ABSTRACT

Induction heating technology is applied more and more in industries. An induction heating furnace is normally used with a temperature controller equipment readily available in a market to control the temperature of a heated target. However, such temperature controller equipment is comparatively expensive and has its limitation depending on the selected model. This project is to design and implement a temperature controller prototype that reduces the cost and can be adjusted for specific usage.

The induction heating furnace produced by CEP INDUCTIONHEAT Co., Ltd. is employed in this thesis. The temperature controller prototype mainly composes of a thermocouple and microcontroller. The thermocouple is used as a temperature sensor and its measured signal is transmitted to the microcontroller. The microcontroller processes the data and computes a corresponding command signal based on PID control law or others. The control signal is then sent to the driver circuit of the induction heating furnace. The experimental results in using the prototype temperature controller verify that it works efficiently and achieves its objective to control the induction heating furnace. In addition, it costs less than one-third of the temperature controller equipment readily available in a market.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ถาวร เบญจนาสุทธิ อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูง ที่ได้ให้คำปรึกษาแนวทางการแก้ปัญหา ความคิดริเริ่ม ตลอดจนการฝึกฝนให้ผู้เขียนมีความสามารถในการทำวิจัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงให้ความเอาใจใส่ดูแลสอบถามถึงความก้าวหน้าอย่างสม่ำเสมอ ทำให้ผู้เขียนทำงานอย่างมีระบบและใช้เวลาอย่างมีประสิทธิภาพ

ขอขอบคุณ บริษัท ซีอีพี อินดักซ์ฮีด จำกัด ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำในการทำวิจัยครั้งนี้ รวมถึงอำนวยความสะดวกในเรื่องของสถานที่ทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมกรรมกรวัดและควบคุม ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ และเครื่องมือในการทำวิจัย ตลอดจนอำนวยความสะดวกให้แก่ผู้เขียน จนสามารถทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสิ้น

ท้ายที่สุด ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่รักและเคารพ ที่สนับสนุนให้โอกาสแก่ผู้เขียน ได้เล่าเรียนจนถึงวันนี้ ตลอดจนเพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ ในห้องวิจัย ทุกคนที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และเป็นกำลังใจให้ด้วยดีเสมอมาจนสามารถนำสิ่งต่าง ๆ ที่ได้รับมานั้นจัดทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ให้เสร็จสมบูรณ์

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ผู้จัดทำ

จิรกิตติ์ ชัยนคร

ชิตพล สิทธิดำรงค์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VIII
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 จุดประสงค์ของโครงการ	2
1.2 ขอบเขตของโครงการ	2
1.3 เนื้อหาปริญญานิพนธ์	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 การเหนี่ยวนำความร้อน	4
2.1.1 ความเป็นมา	4
2.1.2 หลักการเหนี่ยวนำความร้อน	4
2.1.3 กฎของแอมแปร์	6
2.1.4 หลักการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก	7
2.1.5 ความลึกผิว	7
2.2 อินเวอร์เตอร์	9
2.2.1 หลักการพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์	9
2.2.2 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว	10
2.2.3 พูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์	10
2.2.4 อินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์แบบอนุกรม	12
2.3 หม้อแปลง	13
2.3.1 แกนเฟอร์ไรต์และการเลือกใช้	13
2.3.1.1 ลักษณะสมบัติของเนื้อสารที่ใช้ทำแกนเฟอร์ไรท์	15
2.3.1.2 เส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิส	15
2.3.1.3 ค่าการสูญเสียในแกนเฟอร์ไรท์	17
2.3.2 การคำนวณหาขนาดขดลวด	18

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4 การควบคุมแบบลูปเดี่ยว	19
2.5 การควบคุมแบบพีไอดี	19
2.5.1 ตัวควบคุมแบบพี	19
2.5.2 ตัวควบคุมแบบไอ	20
2.5.3 ตัวควบคุมแบบดี	21
2.5.4 ตัวควบคุมแบบพีไอดี	22
2.5.5 ตัวควบคุมแบบพีไอดีเวลาดีสครีต	23
2.5.6 การระงับการปรีฟันซ์	24
2.6 เทอร์โมคัปเปิล	27
2.6.1 หลักการทำงานของเทอร์โมคัปเปิล	27
2.6.2 การประกอบหัวเทอร์โมคัปเปิล	28
2.6.2.1 แบบเปลือย	28
2.6.2.2 แบบมีกราวด์	28
2.6.2.3 แบบไม่มีกราวด์	29
2.6.3 คุณสมบัติของเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐาน	29
2.6.3.1 ความไว	29
2.6.3.2 โครงสร้าง	29
2.6.3.3 ย่านการใช้งาน	30
2.6.3.4 เวลาตอบสนอง	30
2.6.3.5 การปรับสภาพสัญญาณ	30
2.6.4 การเลือกใช้งานเทอร์โมคัปเปิล	30
บทที่ 3 การออกแบบและโครงสร้าง	32
3.1 เตาทำความร้อนแบบเหนียวนำ	32
3.1.1 แผงอิเล็กทรอนิกส์	33
3.1.1.1 วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชัน	33
3.1.1.2 วงจรขับนำเกต	34
3.1.1.3 วงจรป้องกันกระแสเกิน	35
3.1.2 วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง	35
3.1.2.1 วงจรเรียงกระแส	36
3.1.2.2 วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์	37

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.1.2.3 หม้อแปลงความถี่สูง	38
3.1.3 โครงสร้างเตา	38
3.1.3.1 โหลด	38
3.1.3.2 โครงสร้างตู้	38
3.2 การออกแบบกล่องควบคุมอุณหภูมิ	39
3.2.1 กล่องควบคุม	39
3.2.1.1 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์	40
3.2.1.2 บอร์ดสำหรับแปลงสัญญาณดิจิตอลให้เป็นสัญญาณแอนะล็อก	40
3.2.1.3 บอร์ดสำหรับแปลงสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิล	40
3.2.1.4 หน้าจอสัมผัส	41
3.2.1.5 โปรแกรมสำหรับกล่องควบคุม	41
3.2.2 เทอร์โมคัปเปิล	45
บทที่ 4 ผลการทดลอง	46
4.1 การทดลองวงจรขับ	46
4.2 การวัดเทียบอุณหภูมิ	48
4.3 การตอบสนองของเทอร์โมคัปเปิล	50
4.4 การทดลองตัวควบคุมระบบวงปิด	51
4.4.1 ตัวควบคุมแบบพี	52
4.4.2 ตัวควบคุมแบบพีไอ	53
4.4.2.1 การระงับปรีพันซ์	53
4.4.2.2 ตัวควบคุมแบบพีไอโดยปรับค่าเกน	54
4.4.3 ตัวควบคุมแบบพีดี	55
4.4.4 ตัวควบคุมแบบพีไอดี	56
4.4.5 สมรรถนะของตัวควบคุม	57
4.4.6 การทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุม	57

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุปผล	60
5.1 สรุปการทดลอง	60
5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข	61
เอกสารอ้างอิง	62
ภาคผนวก	63
ภาคผนวก ก คู่มือการใช้งานอุปกรณ์ในโครงงาน	64
ก.1 คู่มือการใช้งานไอซี MAX6675	64
ก.2 คู่มือการใช้งานไอซี PCF8591	66
ก.3 คู่มือการใช้งานบอร์ด Arduino Leonardo	69
ก.4 ตารางลวดทองแดงมาตรฐาน AWG	70
ภาคผนวก ข แบบโครงสร้างกล่องควบคุม	..71

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	5
2.2	6
2.3	8
2.4	9
2.5	10
2.6	11
2.7	11
2.8	12
2.9	13
2.10	16
2.11	17
2.12	18
2.13	19
2.14	20
2.15	21
2.16	22
2.17	23
2.18	25
2.19	27
2.20	28
2.21	28
2.22	29
2.23	30
3.1	32
3.2	34
3.3	34
3.4	35
3.5	36
3.6	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 วงจรพูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์	37
3.8 ภาพรวมของโครงการ	39
3.9 บอร์ด ET-BASE AVR EASY32U4	40
3.10 บอร์ด PCF8591	40
3.11 บอร์ด MAX6675	41
3.12 หน้าจอสัมผัส ET-TFT43-EVE	41
3.13 แผนผังการทำงานของโปรแกรม	42
3.14 ฟังก์ชันการควบคุมแบบพีไอดี	43
3.15 การเชื่อมต่อวงจรในการรับส่งสัญญาณข้อมูล	43
3.16 ฟังก์ชันในการส่งสัญญาณเอาต์พุต	44
3.17 ฟังก์ชันในการรับสัญญาณอินพุต	44
3.18 หน้าจอแสดงผล	45
3.19 กล่องควบคุมที่พัฒนาแล้วเสร็จ	45
3.20 เทอร์โมคัปเปิลรุ่น TKS/103	45
4.1 บอร์ดเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ	46
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสของเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ	47
4.3 การวัดเทียบอุณหภูมิด้วยปืนวัดอินฟราเรด	48
4.4 เอาต์พุตอุณหภูมิที่อินพุต 25%, 50% และ 75%	49
4.5 การตอบสนองของเทอร์โมคัปเปิล	50
4.6 การเตรียมการทดลองระบบวงปิด	51
4.7 การทดลองเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพี	52
4.8 การทดลองเปรียบเทียบเมื่อใช้ตัวควบคุมพีไอและพีไอแบบระงับปริพันธ์	53
4.9 การทดลองเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ	54
4.10 การทดลองเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีดี	55
4.11 การทดลองเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี	56
4.12 การทดลองเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 700 °C เป็น 600 °C	58
4.13 การทดลองเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 700 °C เป็น 800 °C	59

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างการเลือกใช้งานแกนเฟอร์ไรท์แบบ ETD	14
2.2 ตัวอย่างการเลือกใช้งานแกนเฟอร์ไรท์แบบ EI	14
2.3 ตัวอย่างการเลือกใช้งานแกนเฟอร์ไรท์แบบ EE	14
2.4 ผลกระทบจากการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดี	23
2.5 ชนิดของเทอร์โมคัปเปิล	31
4.1 ผลการทดลองวงจรขับ	47
4.2 ค่าวัดอุณหภูมิจากปืนวัดอุณหภูมิอินฟราเรดและเทอร์โมคัปเปิล	49
4.3 สมรรถนะของตัวควบคุม	57



บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ (Induction Heating) ได้รับความนิยมอย่างมากในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อาทิ อุตสาหกรรมรถยนต์ที่ใช้ในการหลอมชิ้นรูปชิ้นส่วน อุตสาหกรรมอาหารที่ต้องใช้เตาทำความร้อนในกระบวนการผลิต อีกทั้งยังใช้ในการเผาปรับปรุงคุณภาพพลอย และการหลอมชิ้นรูป ซึ่งต้องใช้ความร้อนสูง และอุณหภูมิที่แม่นยำ ยิ่งไปกว่านั้น การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำมีข้อดีหลายประการ อาทิ เป็นการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ เป็นการให้ความร้อนที่ไม่อาศัยการเผาไหม้จึงทำให้ไม่เกิดมลพิษ และเป็นการให้ความร้อนที่ใช้ระยะเวลาสั้นในการเริ่มทำงาน จนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ [1 – 3]

ในปัจจุบันระบบควบคุมของเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำมีสองรูปแบบหลัก รูปแบบแรกคือ การควบคุมแบบวงเปิด ซึ่งเป็นการควบคุมแบบไม่มีการป้อนกลับค่าวัดอุณหภูมิ ทำให้เมื่อระบบถูกรบกวน อุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลง และมักไม่กลับสู่ค่าเป้าหมาย ซึ่งส่วนใหญ่เป็นในลักษณะนี้ เพราะมีต้นทุนต่ำ เนื่องจากไม่ต้องใช้ตัวควบคุม และเซนเซอร์ และอีกรูปแบบหนึ่งคือ การควบคุมแบบวงปิด ซึ่งเป็นการควบคุมแบบมีการป้อนกลับค่าวัดอุณหภูมิ ทำให้เมื่อระบบถูกรบกวน อุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงชั่วขณะแต่จะสามารถกลับสู่ค่าเป้าหมายได้ โดยทั่วไปแล้ว การควบคุมแบบวงปิดมีราคาสูงกว่า เนื่องจากต้องใช้ตัวควบคุม และเซนเซอร์ โดยการควบคุมเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำแบบวงปิดมีหลายรูปแบบ อาทิ การควบคุมแบบเปิด/ปิด (On/Off Control) [2] ซึ่งมีข้อดีคือ ใช้งานได้ง่าย และราคาถูก แต่มีข้อเสียคือ มักมีประสิทธิภาพด้อยกว่าการควบคุมแบบอื่นเพราะสัญญาณควบคุมมีเพียงการเปิดและการปิด และไม่เหมาะสมสำหรับงานที่ต้องใช้ความแม่นยำในการควบคุม การควบคุมแบบพีไอดี (PID Control) [2] มีข้อดีคือ สัญญาณควบคุมจะปรับระดับเองจึงมักมีประสิทธิภาพดีกว่าการควบคุมแบบเปิด/ปิด แต่การปรับแต่งค่าเกนยากกว่า และการควบคุมแบบอื่น ๆ เช่น ฟัซซีลอจิก (Fuzzy Logic Control) [4] ซึ่งเป็นการควบคุมที่มีความซับซ้อนขึ้น เพื่อปรับปรุงให้ระบบควบคุมมีสมรรถนะดียิ่งขึ้นตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน

ในทางปฏิบัติพบว่าบริษัทผู้ผลิตเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำจำนวนมาก ได้ผลิตเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำในขนาดต่าง ๆ ออกมาจำหน่าย ซึ่งส่วนมากจะเป็นรูปแบบระบบวงเปิด เพื่อควบคุมต้นทุนการผลิต ในกรณี บริษัท ซีอีพี อินดักชั่นฮีต จำกัด ที่ไปทำการศึกษานั้นก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน กล่าวคือ บริษัทผู้ผลิตเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำรูปแบบระบบวงเปิดเป็นหลัก เว้นแต่ในบางงานที่จำเป็นต้องการความแม่นยำสูง จึงจะอาศัยควบคุมแบบระบบวงปิด โดยใช้ตัวควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller) ร่วมกับพีแอลซี (Programmable Logic Controller) และเลเซอร์เซนเซอร์ (Laser Sensor) สำเร็จรูปที่มีขายในท้องตลาด โดยหลายกรณีมีคุณสมบัติเกินความจำเป็นในการใช้งาน ซึ่งทำให้มีต้นทุนที่สูงขึ้นอย่างมากโดยไม่จำเป็นเมื่อเทียบกับการควบคุมแบบระบบวงเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอ ต้นแบบตัวควบคุมอุณหภูมิหรือกล่องควบคุม เพื่อใช้ร่วมกับเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำของ บริษัท ซีอีพี อินดักชั่นฮีต จำกัด ในการควบคุมแบบระบบวงปิด โดยอาศัยเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) เป็นเซนเซอร์สำหรับวัดค่าอุณหภูมิแล้วส่งค่าที่วัดได้ไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) เพื่อประมวลผลสัญญาณควบคุมที่สอดคล้อง เพื่อควบคุมอุณหภูมิให้ได้ตามความต้องการ ด้วยต้นทุนการผลิตที่ถูกต่ำกว่าการใช้อุปกรณ์ซึ่งมีขายในท้องตลาดซึ่งเคยใช้อยู่เดิม

1.1 จุดประสงค์ของโครงการ

1. ศึกษาเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำของ บริษัท ซีอีพี อินดักชั่นฮีต จำกัด
2. ออกแบบ และสร้างต้นแบบตัวควบคุมอุณหภูมิสำหรับเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำซึ่งมีราคาถูก
3. ควบคุมอุณหภูมิของเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำในระบบวงปิดด้วยตัวควบคุมอุณหภูมิที่สร้างขึ้น

1.2 ขอบเขตของโครงการ

1. ศึกษาเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ และระบบควบคุมเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำตลอดจนอุปกรณ์ที่จำเป็นในปริญญาานิพนธ์
2. ออกแบบกล่องควบคุม โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ร่วมกับหน้าจอสัมผัสในการรับและแสดงผล และเทอร์โมคัปเปิลในการวัดอุณหภูมิ โดยเลือกใช้อุปกรณ์ที่เหมาะสมจากการศึกษา
3. สร้างต้นแบบตัวควบคุมอุณหภูมิสำหรับเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ
4. ทดลองเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำในระบบวงเปิด
5. ทดลองเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำในระบบวงปิด โดยเปรียบเทียบ ตัวควบคุมแบบพีไอ ตัวควบคุมแบบพีดี และตัวควบคุมแบบพีไอดี
6. บันทึกผล วิเคราะห์ผล สรุปผล และจัดทำปริญญาานิพนธ์

1.3 เนื้อหาปริญญาานิพนธ์

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งออกเป็น 5 บท ซึ่งรายละเอียดของแต่ละบทสามารถอธิบายได้ดังนี้ บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงวัตถุประสงค์ ขอบเขตของโครงการ พร้อมทั้งรายละเอียดของปริญญาานิพนธ์ของแต่ละบทในปริญญาานิพนธ์

บทที่ 2 ทฤษฎี และความรู้ที่เกี่ยวข้อง กล่าวถึงหลักการ และทฤษฎีในการจัดทำโครงการ หลักการเหนี่ยวนำความร้อน การควบคุมแบบลูปเดี่ยว และการควบคุมโดยอาศัยตัวควบคุมแบบพีไอดี

บทที่ 3 หลักการออกแบบ นำเสนอโครงสร้างของเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ และการออกแบบกล่องควบคุม อุปกรณ์ภายในกล่องควบคุม และโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น

บทที่ 4 การทดลอง และผลการทดลอง มีการทดลองวงจรขับ การวัดเทียบอุณหภูมิของ เซนเซอร์ที่ใช้งาน การทดลองการตอบสนองของเทอร์โมคัปเปิล และการทดสอบกล่องควบคุมที่ พัฒนาขึ้นในโครงการ

บทที่ 5 บทวิจารณ์ และสรุป ซึ่งจะสรุปผลการดำเนินงานในโครงการทั้งหมด ปัญหาที่พบ และ แนวทางการปรับปรุงแก้ไขรวมไปถึงการพัฒนาโครงการนี้ต่อไป และในส่วนท้ายของปริญญาานิพนธ์ ประกอบด้วยภาคผนวก ซึ่งมีคู่มือการใช้งานของไอซีต่าง ๆ และภาพร่างต้นแบบของกล่องควบคุม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่ใช้ในปริณญาณิพนธ์ฉบับนี้ประกอบไปด้วยสองหัวข้อหลัก หัวข้อแรกเป็นทฤษฎีที่อธิบายพฤติกรรมของเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ อาทิ ทฤษฎีเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำความร้อนจะเป็นการอธิบายวิธีการให้ความร้อนของเตา และอธิบายส่วนประกอบหลักของเตาทั้งส่วนของวงจรเรียงกระแส (Rectifier) วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter) และหม้อแปลง (Transformer) และหัวข้อที่สองเป็นทฤษฎีที่จำเป็นในการพัฒนากล่องควบคุมอุณหภูมิซึ่งอธิบายหลักการควบคุมอุณหภูมิ และอุปกรณ์ที่ใช้วัดอุณหภูมิ

2.1 การเหนี่ยวนำความร้อน

การเหนี่ยวนำความร้อนถูกนำมาใช้ในเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ เป็นการให้พลังงานความร้อนต่อชิ้นงาน โดยไม่มีการสัมผัสกันระหว่างแหล่งจ่ายความร้อนกับชิ้นงาน อีกทั้งความร้อนยังเกิดที่ชิ้นงานโดยตรงทำให้เกิดความสูญเสียน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการให้ความร้อนแบบอื่น

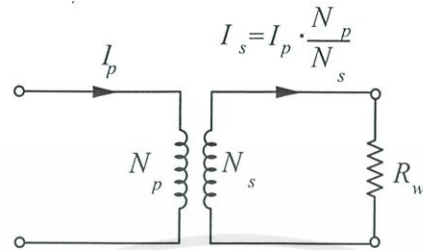
2.1.1 ความเป็นมาของการเหนี่ยวนำความร้อน

การให้ความร้อนด้วยวิธีเหนี่ยวนำ ได้ถูกพัฒนามาจากการเหนี่ยวนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Induction) ที่ค้นพบโดย ไมเคิล ฟาราเดย์ ในปี ค.ศ. 1831 โดยการเหนี่ยวนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ถูกนำมาใช้กับหม้อแปลง เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และมอเตอร์ ซึ่งในการใช้งานจะเกิดค่าความสูญเสียในรูปแบบของความร้อน และในการออกแบบอุปกรณ์ดังกล่าวจะออกแบบให้เกิดค่าความสูญเสียจากความร้อนน้อยที่สุดเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุด ในทางกลับกันค่าความสูญเสียจากความร้อนที่เกิดขึ้นในแนวคิดดังกล่าว จะถูกนำมาใช้ประโยชน์โดยเป็นเอาต์พุตหลักในการทำงานของการให้ความร้อนด้วยวิธีเหนี่ยวนำเพื่อให้ความร้อนกับชิ้นงาน

2.1.2 หลักการเหนี่ยวนำความร้อน

การให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำเป็นวิธีการหนึ่งในการถ่ายเทพลังงาน หลักการทำงานจะคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้า เป็นการให้กระแสไฟฟ้าสลับไหลผ่านขดลวด และก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กเมื่อใส่ชิ้นเหล็กเข้าไปในสนามแม่เหล็กนี้จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้น และทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในโลหะนั้น โดยทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะมีทิศตรงกันข้ามกับทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด เนื่องจากว่าโลหะทุกชนิดมีค่าความต้านทานไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าที่ไหลในโลหะ จึงทำให้เกิดความร้อนขึ้น ความร้อนที่เกิดขึ้นคือ พลังงานไฟฟ้าที่ถูกถ่ายเทออกไปเป็นความร้อนในชิ้นโลหะนั้นเอง

พิจารณาวจรหม้อแปลงเบื้องต้น ซึ่งไม่คิดค่าฟลักซ์ (Flux) ทำให้แม่เหล็กตกค้างที่กระแสไหลจะแปรผันโดยตรงกับกระแสด้านแหล่งจ่าย ซึ่งเปรียบเทียบได้โดยอัตราส่วนจำนวนรอบของทั้งสองด้าน และค่าความสูญเสียทางด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิจะแปรผันโดยตรงกับค่าความสูญเสียในขดลวด ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลของหม้อแปลงโดยทั่วไป

ความสัมพันธ์ของกระแสด้านขดทุติยภูมิ จะมีค่าเท่ากับ

$$I_s = \frac{N_p}{N_s} \cdot I_p \quad (2.1)$$

โดยที่ N_p คือ จำนวนรอบขดลวดขดปฐมภูมิ

N_s คือ จำนวนรอบขดลวดขดทุติยภูมิ

I_s คือ กระแสด้านขดทุติยภูมิ (A)

I_p คือ กระแสด้านขดปฐมภูมิ (A)

ซึ่งกำลังสูญเสียความร้อน มีค่าเท่ากับ

$$P_w = I_s^2 R_w \quad (2.2)$$

โดยที่ P_w คือ กำลังสูญเสียความร้อน (W)

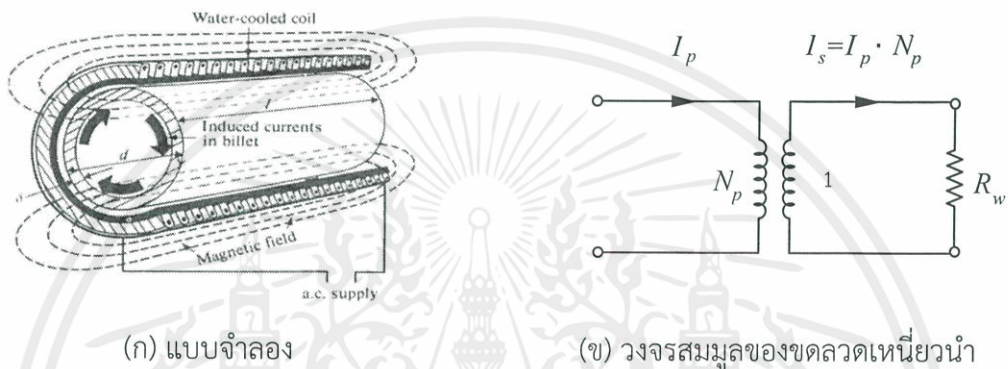
R_w คือ ความต้านทานสมมูล (Ω)

สำหรับหลักการเบื้องต้นของการเหนี่ยวนำความร้อน จะเหมือนกับหลักการของหม้อแปลง กล่าวคือ เมื่อพิจารณาการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำอย่างง่ายแสดงดังรูปที่ 2.2 กล่าวคือ ถ้าวางชิ้นงานไว้ในขดลวด หรือใกล้กับขดลวด ชิ้นงานนั้นจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลวนภายใน และเกิดความร้อนขึ้น ถ้าพิจารณาทั้งระบบจะพบว่าคล้ายกับเป็นหม้อแปลงชุดหนึ่ง ซึ่งขดลวดเหนี่ยวนำจะเปรียบเสมือนขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงที่มีจำนวนรอบเท่ากับจำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ ส่วนชิ้นงานที่เป็นโลหะที่ถูกให้ความร้อนจะเปรียบเสมือนขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงที่มี

จำนวนรอบเป็น 1 รอบเท่านั้น และไฟฟ้ากระแสสลับที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นในชิ้นงานจะไหลอยู่ภายในเนื้อโลหะ ซึ่งสามารถเปรียบได้เป็นภาระทางไฟฟ้าที่มีสภาพเกือบจะลัดวงจร เพราะว่าความต้านทานสมมูลของชิ้นงานโลหะค่อนข้างต่ำมาก จากรูปที่ 2.2 (ข) แสดงดังสมการที่ (2.3)

$$I_s = N_p I_p \quad (2.3)$$

โดยกำลังสูญเสียความร้อนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานอธิบายได้ดังสมการที่ (2.2) เช่นเดิม



(ก) แบบจำลอง

(ข) วงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำ

รูปที่ 2.2 การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำอย่างง่าย

2.1.3 กฎของแอมแปร์

กฎแอมแปร์ (Ampere's Law) เป็นกฎที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นกับกระแสคือ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำทองแดง จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก หรือที่เรียกว่าความเข้มสนามแม่เหล็กมีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อเมตร (A/m) ซึ่งกฎของแอมแปร์ได้กล่าวว่าการอินทิเกรตความเข้มสนามแม่เหล็กตามเส้นทางสนามแม่เหล็ก มีค่าเท่ากับผลรวมของกระแสไฟฟ้าที่ล้อมรอบโดยสนามแม่เหล็กนั้น แสดงดังสมการที่ (2.4)

$$\int \bar{B} \cdot d\bar{S} = \mu_0 I \quad (2.4)$$

โดยที่ \bar{B} คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กแรงแม่เหล็ก (Wb/m^2 หรือ Tesla T)

\bar{S} คือ ปริมาณเวกเตอร์ที่มีทิศทางเดียวกับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า

μ_0 คือ ค่าความซึมซาบทางแม่เหล็กของสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ $4\pi \cdot 10^{-7} (H/m)$

I คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำ (A)

2.1.4 หลักการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

หลักการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก กล่าวคือ เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดเหนี่ยวนำ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะเกิดขึ้นรอบ ๆ ขดลวด โดยสอดคล้องกับกฎของแอมแปร์ ซึ่งวัตถุที่ใส่เข้าไปในพื้นที่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเคลื่อนไหวของสนามแม่เหล็ก และความหนาแน่นต่อพื้นที่ โดยการเกิดสนามแม่เหล็กจะเกิดขึ้นที่บริเวณตรงกลางจากพื้นผิวมากที่สุด ซึ่งคล้ายกับกฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) คือ เมื่อจ่ายกระแสเข้ากับพื้นผิวของวัตถุที่สามารถนำไฟฟ้าได้ จะมีความสัมพันธ์กลับกันกับกระแสบนวงจรการเหนี่ยวนำ ดังสมการที่ (2.5) เกิดกระแสไหลวนบนพื้นผิวของวัตถุ

$$E = \frac{d\lambda}{dt} = N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.5)$$

โดยที่ λ คือ ความยาวคลื่นแม่เหล็ก
 ϕ คือ ฟลักซ์แม่เหล็กที่พุ่งผ่าน พื้นที่ของวงจรถัด (Wb)
 N คือ จำนวนรอบ

ดังนั้นจากกระแสไหลวนบนพื้นผิววัตถุทำให้เกิดพลังงานทางไฟฟ้า แปลงเป็นกำลังสูญเสียในรูปของความร้อนตามสมการที่ (2.2) ได้ดังสมการที่ (2.6)

$$P = I^2 R_w = \frac{E^2}{R_w} \quad (2.6)$$

ซึ่งค่าของตัวต้านทานได้จากค่าของความหนาแน่น และค่าความซึมซาบได้ของวัตถุที่นำไฟฟ้า ส่วนกระแสได้จากค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า พลังงานความร้อนจะเกิดขึ้นได้ โดยมีความสัมพันธ์กับค่าของความซึมลึกผิว (Skin Depth) ถ้าวัตถุที่นำไฟฟ้าได้พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากสนามแม่เหล็กจะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยพลังงานความร้อนที่ได้จะมากขนาดไหนขึ้นอยู่กับขนาดของวัตถุด้วย

2.1.5 ความซึมลึกผิว

ปรากฏการณ์ที่สัญญาณความถี่สูงไหลที่ผิว และความถี่ต่ำไหลลึกลงไปในผิวเรื่อย ๆ ตามความถี่ที่ลดลง ดังสมการที่ (2.7) และสมการที่ (2.8) เรียกว่าเกิดปรากฏการณ์ที่ผิว (Skin Effect)

$$i_x = i_0 e^{\frac{-x}{\delta}} \quad (2.7)$$

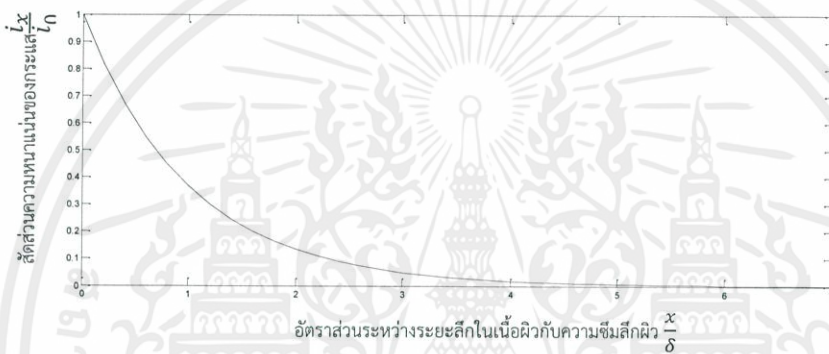
โดยที่ i_x คือ ความหนาแน่นของกระแสที่ระยะ x ใด ๆ จากผิว (A/m^2)
 i_0 คือ ความหนาแน่นของกระแสที่ผิว (A/m^2)
 δ คือ ความซึมลึกผิว (m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu\pi f}} \quad (2.8)$$

โดยที่ ρ คือ ความต้านทานจำเพาะของชิ้นงาน ($\Omega - m$)
 μ คือ ความซึมซาบได้ (H/m)
 f คือ ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟสลับ (Hz)

ความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.7) แสดงดังรูปที่ 2.3 ซึ่งจะเห็นว่าค่าความหนาแน่นของกระแสเหนี่ยวนำที่ระยะ x ที่มีค่าเท่ากับค่าความซึมลึกผิว จะเท่ากับ 0.368 เท่าของค่าความหนาแน่นของกระแสที่ผิว

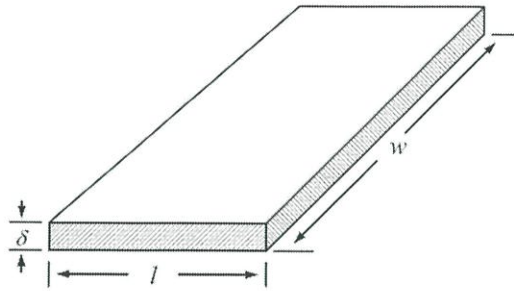


รูปที่ 2.3 อัตราส่วนระหว่างระยะลึกในเนื้อผิวต่อความซึมลึกผิวกับ สัดส่วนความหนาแน่นของกระแส

เนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำ และความต้านทานเปลี่ยนค่าไป เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการให้ความร้อน เพื่อไม่ให้อุณหภูมิของขดลวดเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงไป ส่วนมากจะใช้น้ำระบายความร้อนให้กับขดลวดเหนี่ยวนำ จึงถือได้ว่าค่าความเหนี่ยวนำ และค่าความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำคงที่ตลอดกระบวนการให้ความร้อน แต่อย่างไรก็ตามความต้านทานของชิ้นงานยังคงเปลี่ยนไป แนวทางในการคำนวณหาค่าความต้านทานของชิ้นงานรูปทรงกระบอกแสดงไว้ในรูปที่ 2.4 สามารถหาค่าความต้านทานได้ดังสมการที่ (2.9)

$$R_w = \frac{\rho l}{\delta w} \quad (2.9)$$

โดย l คือ ความยาวของความลึกผิวของชิ้นงาน
 w คือ ความกว้างของชิ้นงานที่เกิดความร้อน



รูปที่ 2.4 ชิ้นงานทรงกระบอกที่ถูกคลี่ออกเป็นแผ่น

2.2 อินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่เป็นอินพุต ให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งสามารถควบคุมแอมพลิจูด (Amplitude) และความถี่ได้ตามต้องการ มักใช้ในการขับมอเตอร์กระแสสลับ และระบบจ่ายไฟคงที่ (Uninterruptible Power Supplies) โดยการใช้สัญญาณควบคุมการปิด-เปิด ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เช่น ทรานซิสเตอร์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง มอสเฟต (MOSFET) อิเล็กทรอนิกส์กำลัง และไอจีบีที (Insulated-Gate Bipolar Transistor: IGBT) อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เป็นต้น ในกรณีเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ แรงดันอินพุตไฟฟ้ากระแสตรง จะได้จากวงจรเรียงกระแสผ่านฟิลเตอร์ ทำให้อินพุตแรงดันไฟฟ้าคงที่มากขึ้นแล้วจึงนำมาผ่านเข้าชุดอุปกรณ์กำลัง เพื่อเปลี่ยนเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ

2.2.1 หลักการพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบคือ การที่ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงผ่านเข้าวงจรอินเวอร์เตอร์ แล้วทำให้แรงดันด้านเอาต์พุตเป็นรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความสมมาตร มีขนาด และความถี่ตามต้องการ แรงดันด้านเอาต์พุตต้องสามารถทำให้คงที่หรือเปลี่ยนแปลงได้ และความถี่ก็สามารถทำให้คงที่หรือเปลี่ยนแปลงได้เช่นเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตสามารถทำได้โดย การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสทางด้านอินพุต และรักษาอัตราการขยายของวงจรของวงจรอินเวอร์เตอร์ให้คงที่ ในทางตรงข้ามกัน ถ้าอินพุตแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าคงที่ และไม่สามารถปรับได้ การเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตทำได้โดยเปลี่ยนแปลงอัตราการขยายของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งทำได้โดยใช้หลักการของพัลส์วิดท์มอดูเลชัน ไปควบคุมการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งนิยามของอัตราการขยายของวงจรอินเวอร์เตอร์คืออัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตต่อแรงดันไฟฟ้าอินพุต

แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ในอุดมคติจะมีรูปร่างเป็นสัญญาณรูปไซน์ (Sinusoidal Signal) แต่ในทางปฏิบัติจะไม่เป็นเช่นนั้น โดยมีฮาร์โมนิกส์ (Harmonic) เกิดขึ้นด้วย ในการใช้งานที่กำลังต่ำ หรือปานกลาง แรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Square Wave) หรือรูปคลื่นควอซีสแควร์เวฟ (Quasi Square Wave) สามารถยอมรับได้ แต่สำหรับที่กำลังสูงนั้น ต้องการความผิดเพี้ยนต่ำ

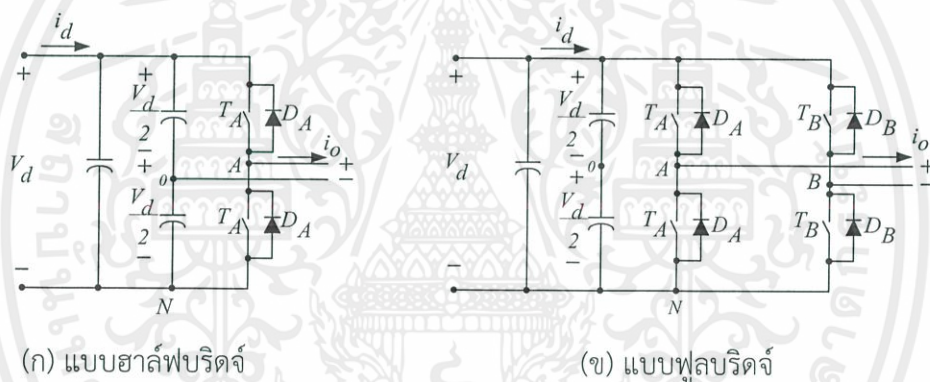
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณเอาต์พุตที่ออกมาจะต้องมีลักษณะใกล้เคียงสัญญาณรูปไซน์ให้มากที่สุด การเลือกใช้อุปกรณ์ประเภทสารกึ่งตัวนำที่มีความเร็วในการทำงานสูงขึ้น จะช่วยลดฮาร์มอนิกส์ที่แรงดันเอาต์พุตได้ดียิ่งขึ้น

2.2.2 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว

อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวจะแบ่งออกเป็นสองชนิดคือ แบบฮาล์ฟบริดจ์ (Half-Bridge) และแบบฟูลบริดจ์ (Full-Bridge) สำหรับฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ (Half-Bridge Inverter) จะมีตัวเก็บประจุสองตัวต่อกันอยู่ระหว่างแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และหากกำหนดให้ค่าตัวเก็บประจุสองตัวมีค่าเท่ากัน จะทำให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุแต่ละตัวจะมีค่าเท่ากันคือ จุดกึ่งกลางแรงดันไฟฟ้า จุด 0 จะมีค่าคงที่เมื่อเทียบกับบัสลบ (N) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ก) ส่วนวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ (Full-Bridge Inverter) เฟสเดียวจะประกอบไปด้วยสองกึ่งคือ กิ่ง A และกิ่ง B ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ข) โดยแบบฟูลบริดจ์จะมีกำลังไฟสูงกว่าแบบฮาล์ฟบริดจ์สองเท่า จึงเหมาะที่จะเลือกใช้เมื่อต้องการจ่ายกำลังไฟฟ้าโหลดสูงขึ้น



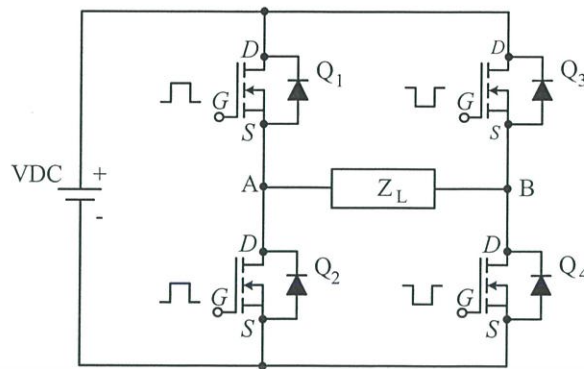
รูปที่ 2.5 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว

เงื่อนไขสำคัญของอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว ทั้งแบบฮาล์ฟบริดจ์และแบบฟูลบริดจ์ คือการทำงานของสวิตช์ (Switch) ต้องทำงานไม่พร้อมกันในทุกช่วงเวลา มิฉะนั้นแล้วจะเกิดการลัดวงจรระหว่างบัสบวกกับบัสลบ ในทางอุดมคติเวลาการสวิตช์ซึ่งจะตรงข้ามกัน แต่ในทางปฏิบัติต้องการช่วงเวลาที่สวิตช์ทั้งคู่ไม่นำกระแส ซึ่งจะเรียกว่า วงจรสร้างความเหลื่อมล้ำทางสัญญาณ (Dead Time) โดยวงจรสร้างความเหลื่อมล้ำทางสัญญาณจะอยู่ในช่วงเวลาก่อนจะเปลี่ยนสถานะการสวิตช์ จากนำกระแสเป็นไม่นำกระแส หรือจากไม่นำกระแสเป็นนำกระแส

2.2.3 ฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์

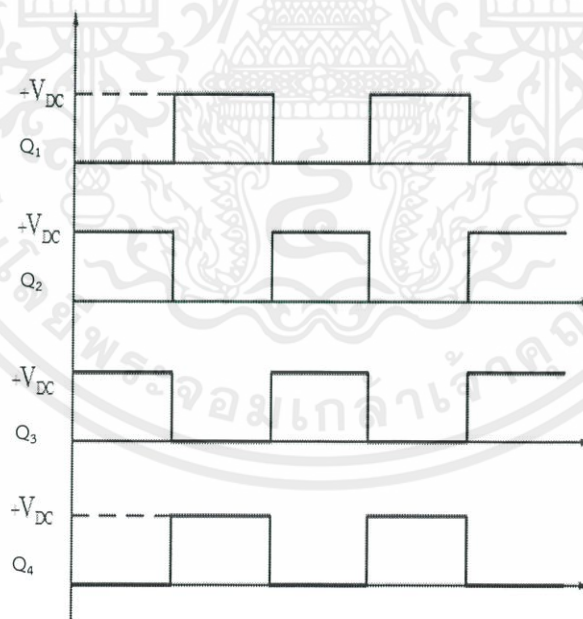
ฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ในรูปที่ 2.5 (ข) หากใช้มอสเฟตอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เป็นอุปกรณ์สวิตช์ทั้ง 4 ตัวคือ Q1, Q2, Q3 และ Q4 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.6 การทำงานของไอจีบีทีจะทำงานพร้อมกันเป็นคู่ คือ Q1, Q4 และ Q2, Q3 ทำงานสลับกันคู่ละครั้งคาบเวลาการสวิตช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์

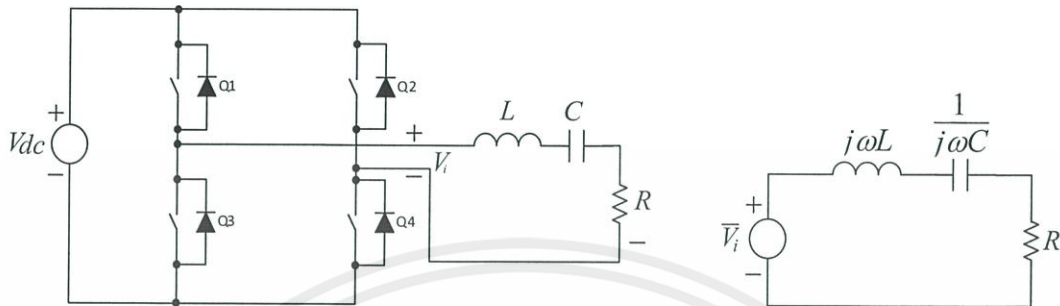
เมื่ออุปกรณ์สวิตช์ Q1, Q4 ทำงาน อุปกรณ์สวิตช์ทั้งสองตัวจะทำการปิดวงจรแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย VDC ต่อกะระอมโหลด Z_L วัดแรงดันไฟฟ้าที่จุด AB ได้ +VDC จากนั้นที่อุปกรณ์สวิตช์ Q1, Q4 หยุดทำงาน หรือกรณี Q2, Q3 ทำงานปิดวงจร แรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย VDC ต่อกะระอมโหลด Z_L วัดแรงดันไฟฟ้าที่จุด AB ได้ -VDC การทำงานจะสลับกันไปตามคาบสัญญาณการสวิตช์ ซึ่งตัวอย่างสัญญาณการทำงานฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 สัญญาณการทำงานฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์

2.2.4 อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรม

อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรม (Series Resonant Inverter) คือ วงจรอินเวอร์เตอร์ซึ่งมีตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุวางอนุกรมกันกับโหลดความต้านทาน ดังรูปที่ 2.8



(ก) วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรม

(ข) วงจรสมมูล R-L-C

รูปที่ 2.8 วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์

พิจารณาผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรสมมูล R-L-C ในรูปที่ 2.8 (ข) จะได้อัตราขยายแรงดันของวงจร ดังความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.10)

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \quad (2.10)$$

หรือจัดรูปได้ดังสมการที่ (2.11)

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega L}{R} - \frac{1}{\omega RC}\right)^2}} \quad (2.11)$$

โดยที่ V_i คือ แรงดันอินพุต (V)

V_o คือ แรงดันเอาต์พุต (V)

ω คือ ความถี่ (rad/s)

จากสมการที่ (2.11) อัตราขยายแรงดันของวงจร จะมีค่าสูงที่สุด ณ บางความถี่ ซึ่งเรียกว่า ความถี่เรโซแนนซ์ (Resonant Frequency) โดยพบว่ามีค่าดังสมการที่ (2.12)

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือมีความถี่เรโซแนนซ์ในหน่วย Hz ดังสมการที่ (2.11)

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.13)$$

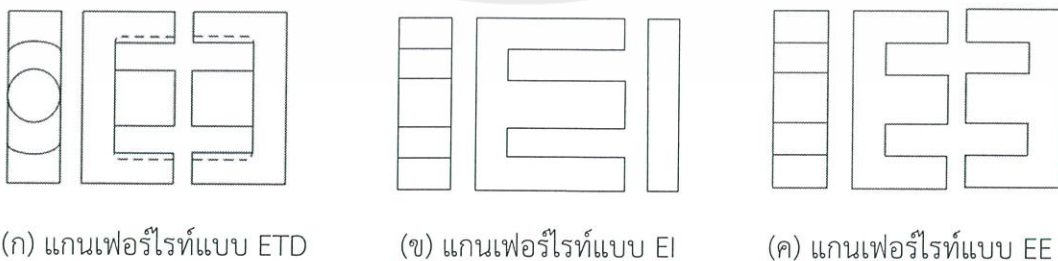
ที่ความถี่เรโซแนนซ์ ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุจะหักล้างกัน จึงมองเห็นเป็นโหลด มีค่าเฉพาะความต้านทานเท่านั้น เมื่อแรงดันไฟฟ้าด้านนอกเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ที่ความถี่ f_o ผลของ L-C จะทำหน้าที่คล้ายเป็นตัวกรองความถี่คือ ทำให้ความถี่หลักมูล (Fundamental Frequency) ผ่านไป และจะลดขนาดสัญญาณของฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ ทำให้รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมความต้านทานเป็นรูปคลื่นใกล้เคียงสัญญาณไซน์ ที่มีความถี่เดียวกับความถี่ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยม

2.3 หม้อแปลง

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้แปลงแรงดันไฟฟ้าสลับ ให้มีขนาดแรงดันตามความต้องการ หม้อแปลงไฟฟ้าถูกนำไปใช้ในงานหลายด้าน ประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลัก ได้แก่ แกน ขดลวด ด้านปฐมภูมิ และขดลวดด้านทุติยภูมิ

2.3.1 แกนเฟอร์ไรท์และการเลือกใช้

แกนเฟอร์ไรท์ (Ferrite Core) โดยทั่วไป จะถูกผลิตออกมาในขนาด และรูปทรงต่าง ๆ ตามมาตรฐานเดียวกัน เช่น แกนแบบ EI, EE, ETD หรือแกนแบบ POT เป็นต้น ปกติผู้ผลิตจะทำแกนเฟอร์ไรท์ออกมาในลักษณะของคู่ประกบ เพื่อความสะดวกในการประกอบเข้ากับบอบบิ้น (Bobbin) ซึ่งเป็นแกนสำหรับพันขดลวดเข้ากับหม้อแปลง การประกบแกนเฟอร์ไรท์บนบอบบิ้น จะทำให้ทางเดินของฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกนเฟอร์ไรท์มีลักษณะเป็นวงบรรจบได้ ลักษณะแกนเฟอร์ไรท์ที่นิยม เช่น ลักษณะแกนเฟอร์ไรท์แบบ ETD แสดงดังรูปที่ 2.9 (ก) ลักษณะแกนเฟอร์ไรท์แบบ EI แสดงดังรูปที่ 2.9 (ข) และลักษณะแกนเฟอร์ไรท์แบบ EE แสดงดังรูปที่ 2.9 (ค) และแสดงตัวอย่างการเลือกใช้งานแกนเฟอร์ไรท์แบบ ETD ดังตารางที่ 2.1 ตัวอย่างการเลือกใช้งานแกนเฟอร์ไรท์แบบ EI ดังตารางที่ 2.2 และตัวอย่างการเลือกใช้งานแกนเฟอร์ไรท์แบบ EE ดังตารางที่ 2.3



(ก) แกนเฟอร์ไรท์แบบ ETD

(ข) แกนเฟอร์ไรท์แบบ EI

(ค) แกนเฟอร์ไรท์แบบ EE

รูปที่ 2.9 ลักษณะแกนเฟอร์ไรท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย A_e คือ ขนาดพื้นที่หน้าตัดแกนเฟอร์ไรท์ (cm^2)

A_w คือ ขนาดพื้นที่ช่องพันขดลวดของบอบบิ้น (cm^2)

V_e คือ ปริมาตรของแกนเฟอร์ไรท์ (cm^3)

l_e คือ ระยะทางเดินฟลักซ์แม่เหล็กในแกนเฟอร์ไรท์ (mm)

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างการเลือกใช้งานแกนเฟอร์ไรท์แบบ ETD

CORD TYPE	$A_e(cm^2)$	$A_w(cm^2)$	$V_e(cm^3)$	$l_e(mm)$
ETD 34	0.917	1.22	7.64	78.6
ETD 39	1.25	1.74	11.5	92.2
ETD 44	1.74	2.13	18	103
ETD 49	2.11	2.71	24.2	114

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างการเลือกใช้งานแกนเฟอร์ไรท์แบบ EI

CORD TYPE	$A_e(cm^2)$	$A_w(cm^2)$	$V_e(cm^3)$	$l_e(mm)$
EI 19	0.24	0.517	0.950	39.6
EI 22/19	0.41	0.44	1.630	39.3
EI 25/19	0.42	0.819	2.02	48.6
EI 28/20	0.85	0.725	4.11	48.4
EI 30/26	1.11	0.791	6.45	58.1
EI 35/29	1.21	1.36	8.18	67.6
EI 40/35	1.48	1.08	11.3	109.7

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างการเลือกใช้งานแกนเฟอร์ไรท์แบบ EE

CORD TYPE	$A_e(cm^2)$	$A_w(cm^2)$	$V_e(cm^3)$	$l_e(mm)$
EE 20/20/5	0.31	0.35	1.34	43.0
EE 30/30/7	0.59	0.78	4.00	66.9
EE 42/42/15	1.82	1.78	17.6	97.0
EE 42/42/20	2.36	2.40	23.1	97.0
EE 42/54/20	2.36	3.40	28.8	122.0
EE 42/66/20	2.36	2.50	34.5	143.0
EE 55/55/21	3.54	2.50	43.7	123.0

การคำนวณหาค่าอุปกรณ์ต่าง ๆ ในหม้อแปลงจะพิจารณาเลือกขนาดของแกนเฟอร์ไรท์เป็นอันดับแรก ซึ่งการใช้แกนเฟอร์ไรท์ที่มีขนาดใหญ่เกินไปจะเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายโดยไม่จำเป็น ส่วนการใช้แกนเฟอร์ไรท์ที่มีขนาดเล็กเกินไป ขดลวด และแกนเฟอร์ไรท์จะร้อน ขนาดหน้าตัดของแกน A_e และขนาดช่องสำหรับพันขดลวดของบอบบิ้น A_w สัมพันธ์โดยตรงกับกำลังงานสูงสุดของหม้อแปลง ดังความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.14)

$$P = \frac{1.4\Delta B_{(\max)} f \cdot A_e \cdot A_w}{D} \times 10^{-3} \quad (2.14)$$

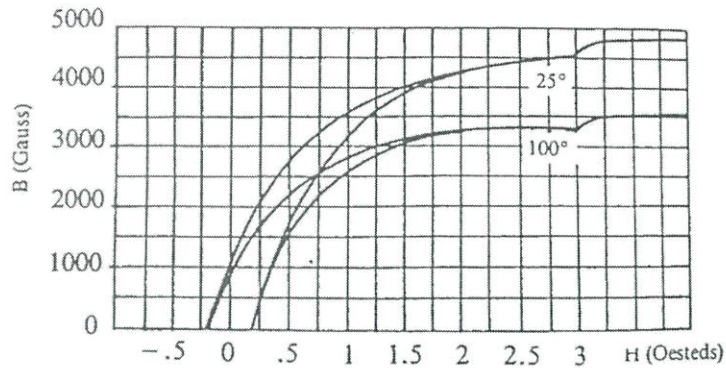
โดยที่	P	คือ กำลังงานสูงสุดที่ได้จากแกนเฟอร์ไรท์ (W)
	$\Delta B_{(\max)}$	คือ ค่าความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุดในแกนเฟอร์ไรท์ (G)
	f	คือ ค่าความถี่การทำงานของแกนเฟอร์ไรท์ (Hz)
	D	คือ ค่าความหนาแน่นกระแสในขดลวดทุติยภูมิ (cm/A)

2.3.1.1 ลักษณะสมบัติของเนื้อสารที่ใช้ทำแกนเฟอร์ไรท์

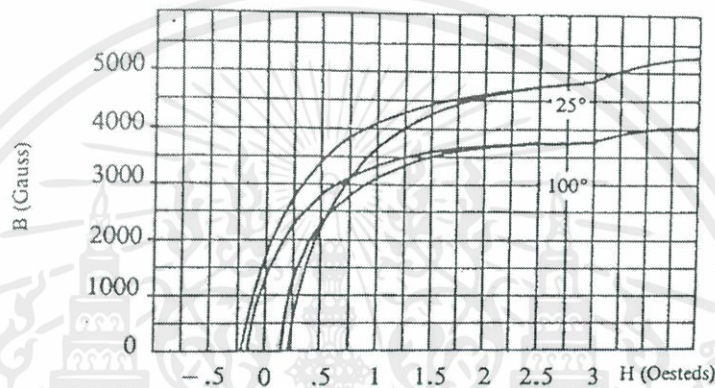
ชนิดของเนื้อสารแกนเฟอร์ไรท์ที่แตกต่างกัน ทำให้คุณสมบัติทางแม่เหล็กของแกนเฟอร์ไรท์แตกต่างกันด้วย ถึงแม้จะมีขนาดเท่ากันทุกประการ ในแผ่นข้อมูลเนื้อสารที่ให้มากับแกนเฟอร์ไรท์นั้น ต้องมีรายละเอียดคุณสมบัติเนื้อสารแสดงไว้เสมอ ข้อมูลสำคัญที่ควรทำความเข้าใจ และศึกษาไว้คือ เส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis Curve) และค่าการสูญเสียในแกนเฟอร์ไรท์

2.3.1.2 เส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิส

เส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิส แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (B) ที่เกิดขึ้นในแกนเฟอร์ไรท์กับความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) ที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำของขดลวดที่พันบนแกน รูปที่ 2.10 แสดงตัวอย่างลักษณะของเส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิสของเนื้อสารชนิด 3C8 และ 3C6A ซึ่งผลิตโดย FERROXCUBE



(ก) เนื้อสารชนิด 3C8

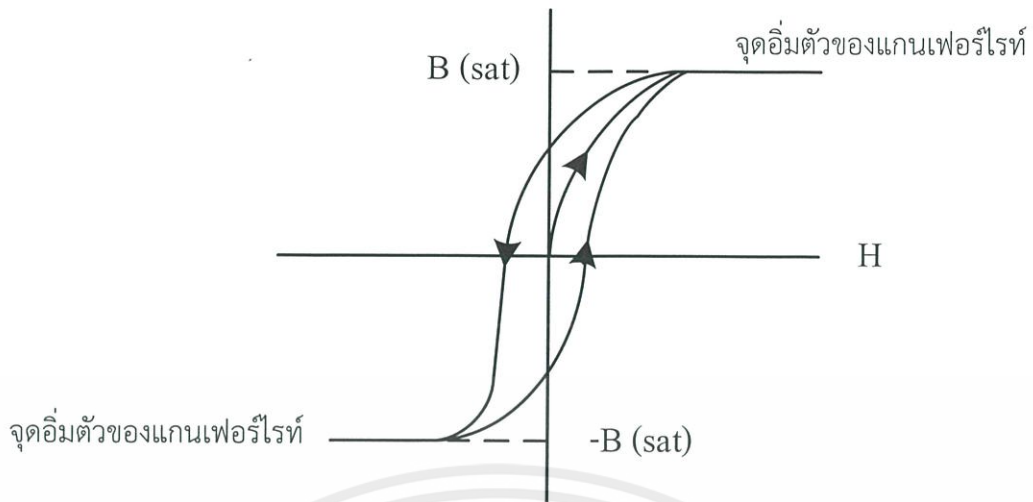


(ข) เนื้อสารชนิด 3C6A

รูปที่ 2.10 เส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิสของแกนเฟอร์ไรท์

จากรูปที่ 2.10 เห็นว่า ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (B) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) มีค่าเพิ่มขึ้น จนถึงจุดหนึ่ง ซึ่งค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (B) จะมีค่าเพิ่มขึ้นน้อยมาก แม้ว่ามีการเพิ่มขึ้นของสนามแม่เหล็ก (H) ก็ตาม จากจุดดังกล่าวเรียกว่า แกนเริ่มมีการอิ่มตัวของฟลักซ์แม่เหล็ก (Saturation)

โดยปกติผู้ผลิตแสดงกราฟของเส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิสเพียงครั้งเดียว เนื่องจากอีกครั้งหนึ่งของเส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิส มีลักษณะเหมือนกันทุกประการเพียงแต่มีลักษณะกลับทิศกันเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.11



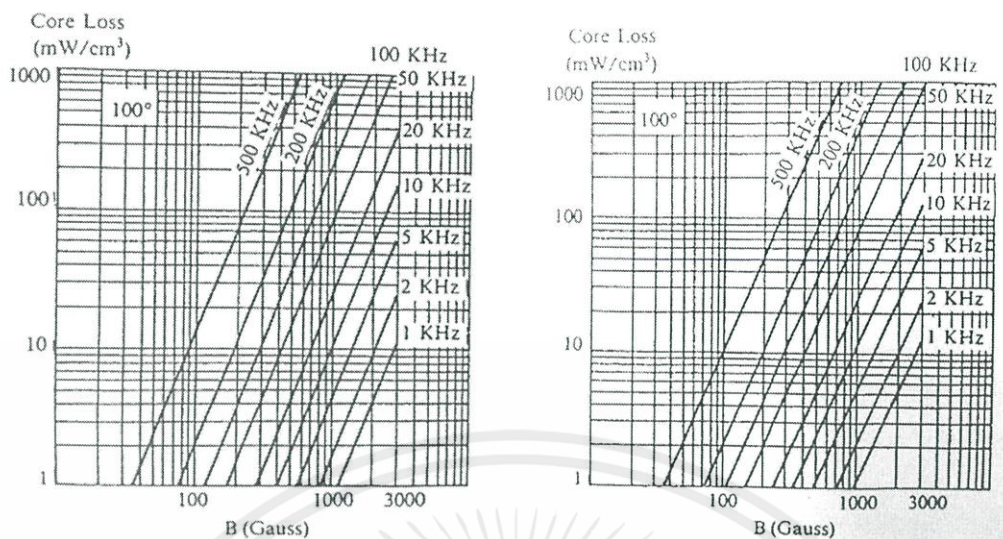
รูปที่ 2.11 ลักษณะสมมาตรของเส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิส

การใช้งานแกนเฟอร์ไรท์ในหม้อแปลง จะต้องระวังไม่ให้แกนเฟอร์ไรท์เกิดการอิ่มตัวขึ้นได้ ดังนั้นโดยทั่วไปในการออกแบบหม้อแปลง จึงควรกำหนดค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด ก่อนอิ่มตัวของแกนเพื่อความปลอดภัย

2.3.1.3 ค่าการสูญเสียในแกนเฟอร์ไรท์

การสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเฟอร์ไรท์ จะทำให้แกนเฟอร์ไรท์ร้อน ซึ่งมีสาเหตุหลัก 2 ประการ คือ การสูญเสียที่เกิดจากลักษณะฮิสเตอร์รีซิสของแกน และการสูญเสียจากการเกิดกระแสไหลวนภายในแกนเฟอร์ไรท์ โดยทั่วไปที่ความถี่ต่ำกว่า 10 kHz การสูญเสียจากการเกิดกระแสไหลวนในแกนจะมีค่าน้อยสำหรับแกนที่มีขนาดไม่ใหญ่มากนัก ดังนั้นการสูญเสียที่ก่อให้เกิดความร้อนในแกนอาจพิจารณาได้จากการสูญเสียทางฮิสเตอร์รีซิสเพียงอย่างเดียว

ค่าการสูญเสียนิยมระบุไว้ในหน่วยมิลลิวัตต์ต่อหนึ่งลูกบาศก์เซนติเมตร (mW/cm^3) และมีค่าขึ้นกับค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ความถี่การใช้งาน รวมถึงอุณหภูมิขณะใช้งานของแกนเฟอร์ไรท์ ตัวอย่างกราฟค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในแกนเฟอร์ไรท์เนื้อสารชนิด 3C8 และ 3C6A ณ อุณหภูมิ $100^\circ C$ แสดงดังรูปที่ 2.12 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



(ก) เนื้อสารชนิด 3C8

(ข) เนื้อสารชนิด 3C6A

รูปที่ 2.12 ค่าการสูญเสียในแกนเฟอร์ไรท์

2.3.2 การคำนวณหาขนาดของขดลวด

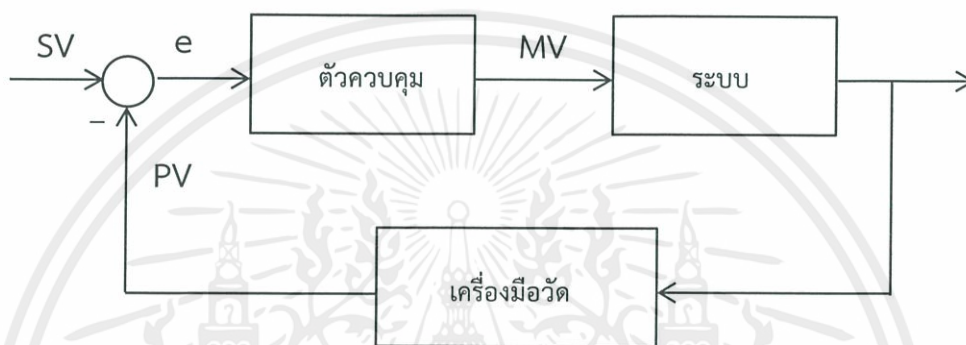
ขดลวด (Coil) ของหม้อแปลงนิยมใช้ลวดทองแดงในการนำมาพัน ซึ่งลวดทองแดงผลิตออกมาหลายขนาด การเลือกขนาดลวดทองแดงขึ้นอยู่กับการใช้งานและพิกัดกระแส โดยถ้าการใช้งานจำเป็นต้องใช้กระแสมากขึ้น ลวดทองแดงที่ใช้จำเป็นต้องทนกระแสได้มากขึ้นด้วย การเพิ่มพิกัดกระแสในการใช้งาน ทำได้โดยการใช้ขนาดของลวดทองแดงเท่าเดิมแต่เพิ่มจำนวนลวดทองแดงให้มากขึ้น หรือเพิ่มขนาดของลวดทองแดงให้ใหญ่ขึ้นโดยที่ใช้จำนวนลวดทองแดงเท่าเดิมหรืออาจน้อยลง ในบางกรณีการใช้งานที่มีกระแสสูงอาจใช้เป็นท่อทองแดงที่ใช้ระบบหล่อเย็นภายในท่อเพื่อให้ระบายความร้อนมากขึ้นการคำนวณขนาดขดลวดทำได้โดยกำหนดกำลังไฟฟ้า P และแรงดันไฟฟ้า V ดังแสดงในสมการที่ (2.15)

$$I = \frac{P}{V} \quad (2.15)$$

ซึ่งต้องนำมาพิจารณาทั้งขดลวดด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิ เมื่อทราบค่า I แล้วจะนำค่าที่ได้มาเทียบในตารางแสดงในภาคผนวก ก.4 ซึ่งทำให้ทราบถึงขนาดและจำนวนเส้นลวดทองแดงที่ต้องการใช้

2.4 การควบคุมแบบลูปเดี่ยว

การควบคุมแบบลูปเดี่ยวคือ การควบคุมโดยมีอุปกรณ์เครื่องมือวัด 1 ตัว และอุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย 1 ตัว เป็นหลักการพื้นฐานในระบบควบคุมป้อนกลับ มีลักษณะดังรูปที่ 2.13 ในกรณีนี้สังเกตว่าเป็นการป้อนกลับแบบลบเพราะสัญญาณจากเครื่องมือวัด PV (Process Variable) จะถูกนำไปหักล้างกับสัญญาณอ้างอิง SV (Setpoint Variable) ได้เป็นค่าความคลาดเคลื่อน e (Error) ซึ่งจะนำไปป้อนเข้าสู่ตัวควบคุม และตัวควบคุมจะสร้างสัญญาณควบคุม MV (Manipulated Variable) ส่งไปยังอุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย เพื่อให้ระบบที่ต้องการควบคุมมีค่าตามที่ต้องการ



รูปที่ 2.13 การควบคุมแบบลูปเดี่ยว

2.5 การควบคุมแบบพีไอดี

ตัวควบคุมในรูปที่ 2.13 มีหลายแบบ ซึ่งโดยทั่วไปตัวควบคุมจะพยายามลดค่าความคลาดเคลื่อน e ให้มีค่าน้อยที่สุดด้วยการปรับค่าสัญญาณควบคุม MV ตัวควบคุมแบบพีไอดีเป็นตัวควบคุมแบบป้อนกลับที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีโครงสร้างที่ง่าย และมีความสัมพันธ์เป็นเพียงการดำเนินการพื้นฐานทางคณิตศาสตร์

การควบคุมแบบพีไอดีได้ชื่อตามการรวมกันของเทอมของการควบคุมสามแบบคือ เทอมของตัวควบคุมแบบพี (Proportional Controller) เทอมของตัวควบคุมแบบไอ (Integral Controller) และเทอมของตัวควบคุมแบบดี (Derivative Controller) ตามสมการที่ (2.16)

$$MV(t) = P_{out} + I_{out} + D_{out} \quad (2.16)$$

2.5.1 ตัวควบคุมแบบพี

ตัวควบคุมแบบพี เอาต์พุตของตัวควบคุม $u(t)$ จะเป็นสัดส่วนกับอินพุตของตัวควบคุม และถ้ากำหนดสัญญาณอินพุตของตัวควบคุมเป็นค่าความคลาดเคลื่อน $e(t)$ จะได้เอาต์พุตของตัวควบคุมดังสมการที่ (2.16)

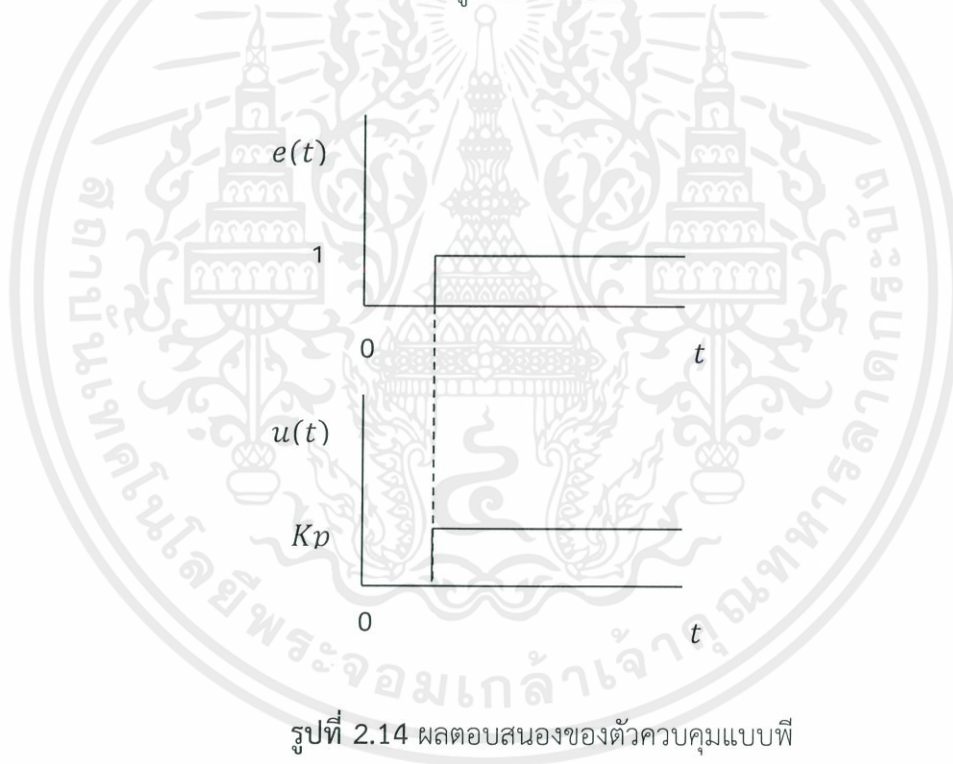
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u(t) = P_{out} = K_p e(t) \quad (2.17)$$

เมื่อ K_p คืออัตราขยายแบบสัดส่วน (Proportional Gain)

เนื่องจากเอาต์พุตของตัวควบคุมจะเป็นสัดส่วนกับอินพุต ดังนั้นถ้าหากอินพุตมีลักษณะเป็นสัญญาณระดับ (Step Signal) เอาต์พุตที่ได้ก็จะมีลักษณะเป็นสัญญาณระดับเช่นกัน โดยลักษณะของกราฟแสดงอินพุต และเอาต์พุตจะมีสัดส่วนที่แน่นอนค่าหนึ่งดังแสดงในรูปที่ 2.14

ดังนั้นการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีจะเป็นเพียงการขยายสัญญาณความคลาดเคลื่อนเท่านั้น การที่ได้สัญญาณความคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่ที่เวลาหนึ่ง ทำให้เกิดเอาต์พุตที่มีขนาดใหญ่จากตัวควบคุมในเวลานั้น อย่างไรก็ตาม เมื่อค่า PV เริ่มเข้าใกล้ SV ส่งผลให้ค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าลดลง สัญญาณควบคุม MV ก็จะมีค่าลดลงเช่นกัน ส่งผลให้การใช้ตัวควบคุมแบบพีเพียงอย่างเดียวอาจจะทำให้ระบบเกิดออฟเซตโดย PV จะไม่อยู่ที่ค่า SV พอดี



รูปที่ 2.14 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบพี

2.5.2 ตัวควบคุมแบบไอ

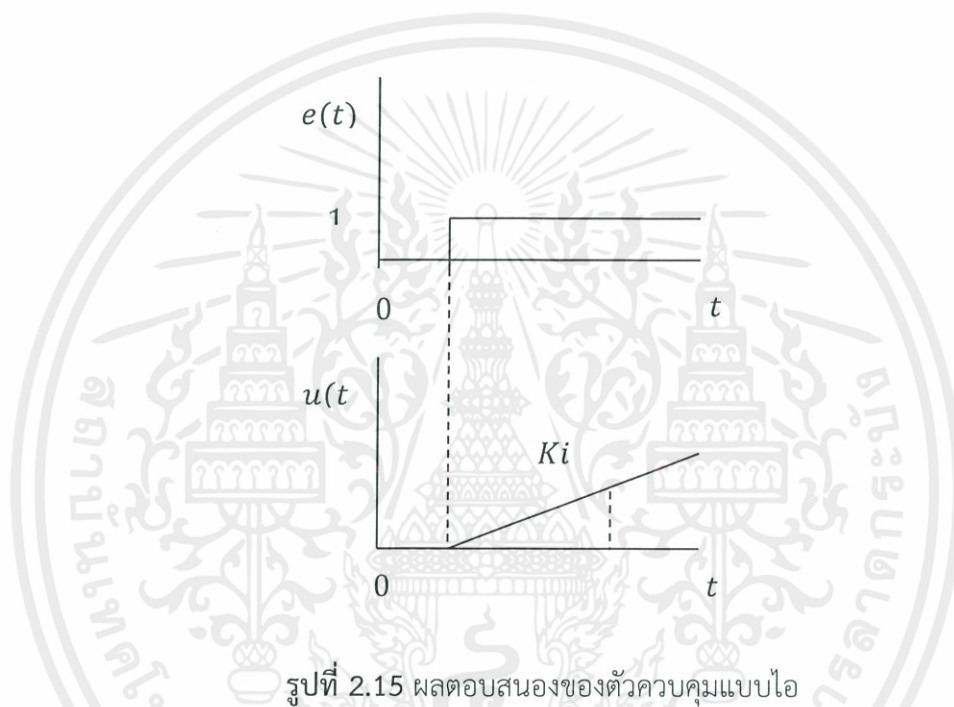
ตัวควบคุมแบบไอ เอาต์พุตของตัวควบคุมจะเป็นสัดส่วนกับการปริพันธ์สัญญาณของค่าความคลาดเคลื่อนเทียบเวลา ดังสมการที่ (2.18)

$$u(t) = I_{out} = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ K_i คือ อัตราขยายแบบปริพันธ์ (Integral Gain) ซึ่งมักมีหน่วยเป็น sec^{-1}

จากสมการที่ (2.17) สามารถอธิบายได้ว่าเทอมปริพันธ์เป็นอัตราส่วนของค่าความคลาดเคลื่อนสะสมในหนึ่งช่วงเวลา (ปัจจุบัน ย้อนไปอดีต) ค่า I_{out} เกิดจากผลคูณของค่าคงที่ K_i กับผลรวมของ $e(t)$ ตั้งแต่เริ่มปริพันธ์จนถึงเวลาปัจจุบัน รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะการตอบสนองของตัวควบคุมแบบไอ เมื่อได้รับสัญญาณอินพุตแบบระดับ ค่า $u(t)$ ณ เวลา t ใด ๆ หมายถึงพื้นที่ใต้กราฟของสัญญาณอินพุต จากเวลา 0 ถึง t คูณด้วยอัตราขยายแบบปริพันธ์ ดังนั้นเมื่อเริ่มมีค่าอินพุตแบบระดับ เอาต์พุตที่ออกจากตัวควบคุมจึงมีค่ามากขึ้นเรื่อย ๆ ด้วยอัตราคงที่ ในลักษณะรูปสัญญาณความชัน (Ramp Signal)



รูปที่ 2.15 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบไอ

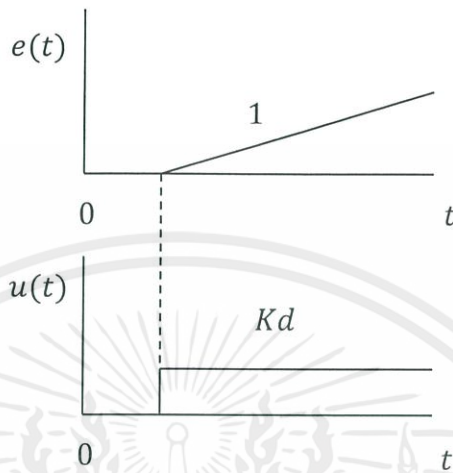
เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบไรร่วมกับตัวควบคุมแบบพี จะช่วยเร่งให้ระบบวิ่งเข้าหา SV เร็วขึ้น และช่วยกำจัดค่าออฟเซตอันอาจเกิดจากการใช้ตัวควบคุมแบบพีอย่างเดียว เนื่องจากเทอมปริพันธ์เกิดจากการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดในอดีตด้วย ซึ่งอาจส่งผลให้ระบบเกิดค่าพุ่งเกินสูงสุด (Maximum Overshoot) เกิน SV ในค่าปัจจุบัน อย่างไรก็ตามเทอมปริพันธ์อาจสะสมค่าความคลาดเคลื่อนถึงแม้สัญญาณควบคุมเกินระดับการอิมตัวแล้ว ซึ่งจะส่งผลให้ถึงแม้ว่า PV ถึงค่า SV แล้วสัญญาณควบคุม MV จะยังไม่ลดลงทันที ซึ่งสามารถแก้ไขได้ด้วยการระงับการปริพันธ์ (Anti-Windup) ซึ่งจะอธิบายโดยละเอียดในหัวข้อที่ 2.7.6

2.5.3 ตัวควบคุมแบบดี

ตัวควบคุมแบบดี เอาต์พุตของตัวควบคุมจะเป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงอินพุตความคลาดเคลื่อนเทียบกับต่อเวลา ดังสมการที่ (2.19)

$$u(t) = D_{out} = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.19)$$

เมื่อ K_d คือ อัตราขยายแบบอนุพันธ์ (Derivative Gain)



รูปที่ 2.16 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบดี

รูปที่ 2.16 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมแบบดี เมื่อสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณแบบความชัน จากสมการที่ (2.19) จะเห็นว่า ตัวควบคุมแบบดีจะให้สัญญาณออกจากตัวควบคุมมีค่ามากเมื่อค่าอินพุตความคลาดเคลื่อน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในอัตราที่สูงก่อนที่ความผิดพลาดจะเกิดขึ้นจริง ฉะนั้นเทอมอนุพันธ์จึงช่วยลดการเกิดค่าพุ่งเกินสูงสุด ซึ่งเกิดจากตัวควบคุมแบบพี หรือแบบไอได้

อย่างไรก็ตามหากค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าคงที่ตัวควบคุมแบบดีจะไม่มีการสะสมค่าความคลาดเคลื่อน แม้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนจะมีมากก็ตาม ทำให้การควบคุมแบบนี้ ไม่เปลี่ยนแปลงต่อค่าความผิดพลาดที่คงที่ หรือมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างช้า ๆ ดังนั้นการควบคุมแบบนี้จึงไม่นิยมใช้ตามลำพัง แต่มักใช้ร่วมกับการควบคุมแบบอื่น

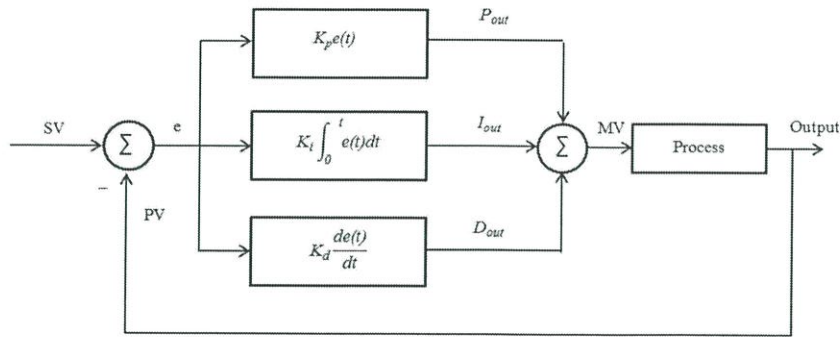
2.5.4 ตัวควบคุมแบบพีไอดี

สัญญาณขาออกของตัวควบคุมแบบพีไอดีในสมการ (2.16) เป็นผลจากการรวมของ เทอมของตัวควบคุมแบบพีดังสมการที่ (2.17) เทอมของตัวควบคุมแบบบไอดังสมการที่ (2.18) และเทอมของตัวควบคุมแบบดี ดังสมการที่ (2.19) เมื่อแทนค่าในสมการ (2.16) จะได้สัญญาณขาออก $MV(t)$ ดังสมการที่ (2.20)

$$MV(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.20)$$

โดยมีบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมที่สอดคล้องได้ดังรูปที่ 2.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบพีไอดี

โดยทั่วไปแล้ว ผลจากการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดี สามารถสรุปได้ดัง ตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ผลกระทบจากการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดี

พารามิเตอร์	ช่วงเวลาขึ้น (Rise Time)	ค่าพุ่งเกิน (Overshoot)	เวลาสู่สมดุล (Settling Time)	ความผิดพลาด ที่สถานะคงตัว
K_p	ลด	เพิ่ม	เปลี่ยนแปลง เล็กน้อย	ลด
K_i	ลด	เพิ่ม	เพิ่ม	ลดลงอย่าง มีนัยสำคัญ
K_d	ลดลงเล็กน้อย	ลดลงเล็กน้อย	ลดลงเล็กน้อย	ไม่มีผล

2.5.5 ตัวควบคุมแบบพีไอดีเวลาติดคริต

เนื่องจากการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เป็นระบบดิจิทัลในการประมวลผล ซึ่งระบบดิจิทัลไม่สามารถคำนวณแบบเวลาต่อเนื่องได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการประมาณการดำเนินการสัญญาณเวลาต่อเนื่อง จากข้อมูลที่ได้จากการซีกตัวอย่างทุกคาบเวลาการซีกตัวอย่าง T_s (Sampling Period)

การควบคุมแบบพีไอดีเวลาติดครีต (Discrete-Time PID Control) พิจารณาจากสมการการควบคุมแบบพีไอดีเวลาต่อเนื่องในสมการที่ (2.20) โดยอาศัยการประมาณเทอมปริพันธ์ และเทอมอนุพันธ์ด้วยวิธีเชิงเลข (Numerical Method) ซึ่งมีหลายวิธี โดยการประมาณอย่างง่ายและเป็นที่ยอมรับได้ดังนี้

สมการเทอมปริพันธ์

$$I_{out} = K_i \int_0^t e(t) d\tau = K_i T_s \sum_{i=0}^k e[i] \quad (2.21)$$

สมการเทอมอนุพันธ์

$$D_{out} = K_d \frac{de(t)}{dt} = K_d \frac{e[k] - e[k-1]}{T_s} \quad (2.22)$$

และสามารถเขียนสมการการควบคุมแบบพีไอดีเวลาติดครีตได้ดังสมการต่อไปนี้

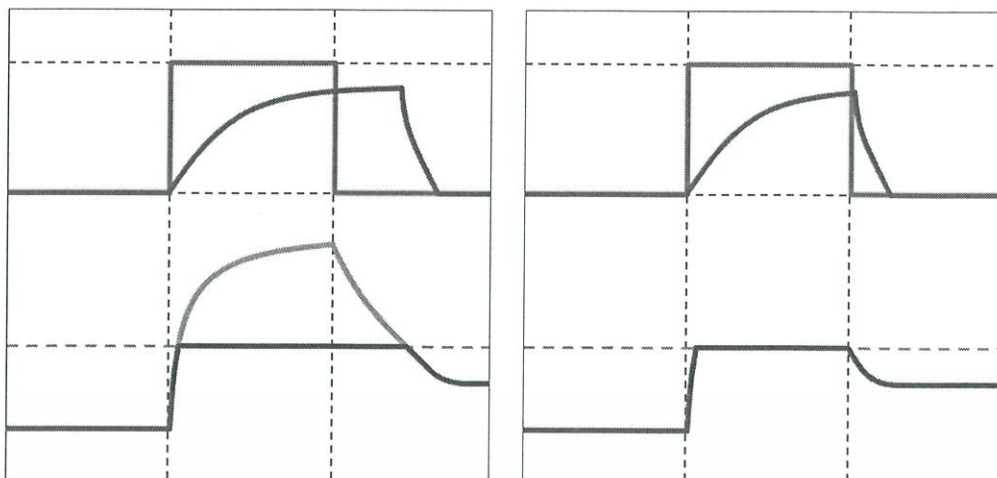
$$MV = u[k] = K_p e[k] + K_i T_s \sum_{i=0}^k e[i] + K_d \frac{e[k] - e[k-1]}{T_s} \quad (2.23)$$

สมการการควบคุมแบบพีไอดีเวลาติดครีตในสมการที่ (2.23) นี้สามารถที่จะนำมาใช้ในการเขียนโปรแกรมควบคุมในตัวควบคุมดิจิทัลได้โดยตรง

2.5.6 การระงับการปริพันธ์

ปรากฏการณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่พบได้ทั่วไปในทางปฏิบัติได้แก่การอิ่มตัวของการควบคุม ซึ่งปกติอุปกรณ์ควบคุมสุดท้ายจะมีขีดจำกัดทางกายภาพในการทำงาน ยกตัวอย่างเช่น มอเตอร์ที่มีขีดจำกัดในเรื่องความเร็ว หรือวาล์วที่ไม่สามารถทำงานได้มากกว่าการเปิด/ปิด เป็นต้น โดยสำหรับระบบควบคุมที่มีการทำงานเกินกว่าช่วงของเงื่อนไขอาจจะทำให้ค่าของสัญญาณควบคุมที่คำนวณได้มีค่าเกินกว่าขีดจำกัดของอุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย ซึ่งเป็นสาเหตุเสมือนให้การควบคุมแบบป้อนกลับหรือแบบปิดถูกทำลาย และระบบจะดำเนินการด้วยการควบคุมแบบเปิดแทน นั่นคือ อุปกรณ์ควบคุมสุดท้ายจะทำงานอยู่ที่ขีดจำกัดของอุปกรณ์ หรือเกิดการอิ่มตัวอยู่นั่นเอง แต่อย่างไรก็ตามการคำนวณตามเทอมปริพันธ์ และค่าสัญญาณควบคุม MV ที่คำนวณได้ ไม่ได้มีการอิ่มตัวตามไปด้วย โดยค่าทั้งสองจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากเทอมปริพันธ์ถูกสร้างขึ้นจากการสะสมค่าความคลาดเคลื่อนมาตั้งแต่เริ่มการใช้งานจนถึงปัจจุบัน โดยการเพิ่มขึ้นในส่วนที่เกินกว่าขีดจำกัดของอุปกรณ์จะไม่มีผลกระทบต่อกระบวนการเลย และจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการก็ต่อเมื่อค่าที่ส่งออกจากตัวควบคุมกลับมาอยู่ช่วงการทำงานของอุปกรณ์ ซึ่งต้องใช้ค่าความคลาดเคลื่อนที่มีเครื่องหมายตรงข้ามและเวลาที่ค่อนข้างมากในการชดเชยค่าที่สะสมในเทอมปริพันธ์ให้กลับสู่ช่วงการทำงาน จึงทำให้เกิดความล่าช้าของผลตอบสนอง หรือเอาต์พุตของกระบวนการ ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “การสะสมค่าเกินระดับจากการปริพันธ์ (Integral Windup)” ที่สามารถอธิบายได้จากรูปที่ 2.18 (ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) เมื่อไม่มีการระงับการปรีฟันซ์

(ข) เมื่อมีการระงับการปรีฟันซ์ปรีฟันซ์

รูปที่ 2.18 ผลตอบสนองเมื่อไม่มีและมีการระงับการปรีฟันซ์

โดยที่	เส้นสีเขียว	คือ	ค่าเป้าหมาย SV
	เส้นสีแดง	คือ	ค่าตัวแปรกระบวนการหรือผลตอบสนอง PV
	เส้นสีฟ้า	คือ	ค่าสัญญาณควบคุมจากตัวระบบควบคุม MV
	เส้นสีน้ำเงิน	คือ	การทำงานของอุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย
	เส้นประสีส้ม	คือ	ขีดจำกัดสูงสุดของอุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย

โดยในรูปที่ 2.18 (ก) ระบบมีการอิมิตัวของสัญญาณควบคุม และเกิดการสะสมค่าเกินระดับการอิมิตัวจากการปรีฟันซ์ โดยสังเกตว่าระบบมีการสะสมค่าความคลาดเคลื่อนในเทอมปรีฟันซ์มากกว่าขีดจำกัด ทำให้ค่าสัญญาณควบคุมมากกว่าขีดจำกัดด้วย ซึ่งแม้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนจะมีการกลับเครื่องหมายเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายแล้ว แต่ระบบก็ยังต้องใช้เวลาในการสะสมค่าความผิดพลาดให้สามารถชดเชยค่าเพื่อให้สัญญาณควบคุมกลับมาทำงานในช่วงที่ต่ำกว่าขีดจำกัดสูงสุดของอุปกรณ์จึงจะส่งผลให้ผลตอบสนองเกิดการเปลี่ยนแปลง

ปัญหาการสะสมค่าเกินระดับการอิมิตัวจากการปรีฟันซ์ที่กล่าวมาข้างต้นนั้นสามารถแก้ไขได้ด้วยการระงับการปรีฟันซ์ ดังรูปที่ 2.18 (ข) โดยจากสมการการประมาณการปรีฟันซ์ในเวลาติดคริตตามสมการที่ (2.21) ค่าเอาต์พุต I_{out} สามารถพิจารณาได้ดังสมการที่ (2.24)

$$I_{out}[k] = K_i T_s \sum_{i=0}^k e[i] = K_i T_s (e[k] + \sum_{i=0}^{k-1} e[i]) \quad (2.24)$$

ซึ่งเห็นว่าการสะสมความคลาดเคลื่อน $\sum_{i=0}^k e[i]$ ถูกจำแนกออกเป็น 2 ส่วนคือ ความคลาดเคลื่อนสะสมก่อนหน้า $\sum_{i=0}^{k-1} e[i]$ และความคลาดเคลื่อนปัจจุบัน $e[k]$ ดังนั้นการดำเนินการระงับการปรีฟันซ์สามารถทำได้โดยอาศัยเงื่อนไขขึ้นกับค่า MV และ $e[k]$ ดังต่อไปนี้

- ถ้า MV มีค่ามากกว่าขีดจำกัดสูงสุดของอุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย และความคลาดเคลื่อนปัจจุบันมีค่าบวก ($e[k] > 0$) จะกำหนดผลของการปรับตั้งค่าเดิม หรือเขียนในรูปสมการได้ตามสมการที่ (2.25)

$$I_{out}[k] = I_{out}[k-1] \quad (2.25)$$

- ถ้า MV มีค่าน้อยกว่าขีดจำกัดต่ำสุดของอุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย และความคลาดเคลื่อนปัจจุบันมีค่าลบ ($e[k] < 0$) จะกำหนดผลของการปรับตั้งค่าเดิมได้ตามสมการที่ (2.24) เช่นกัน

- ถ้า MV อยู่ในช่วงการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย จะกำหนดให้มีการปรับตั้งตามสมการที่ (2.24)

จากเงื่อนไขข้างต้นสามารถกล่าวอย่างสรุปตามสมการที่ (2.25)

$$I_{out}[k] = \begin{cases} I_{out}[k-1], & MV > \text{Maximum Limit and } e[k] > 0 \\ I_{out}[k-1], & MV < \text{Minimum Limit and } e[k] < 0 \\ I_{out}[k-1] + K_i T_s e[k], & MV \text{ in desired range} \end{cases} \quad (2.26)$$

โดยตัวอย่างผลจากการระงับการปรับตั้งในการควบคุมได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.19 (ข) ซึ่งสังเกตว่าผลตอบสนองมีการตอบสนองเร็วขึ้นทันต่อการเปลี่ยนสัญญาณเป้าหมาย เนื่องจากไม่ต้องมีการสะสมสัญญาณความผิดพลาดในทิศทางตรงกันข้ามเพื่อชดเชยค่าในเทอมปรับตั้ง ทำให้ไม่เกิดความล่าช้า อีกทั้งยังช่วยป้องกันการเกิดค่าพุ่งเกินของผลตอบสนองอีกด้วย

ปัญญานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้ตัวควบคุมพีไอดีและการระงับปรับตั้งในรูปแบบที่แตกต่างจากที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งเป็นรูปแบบในไลบรารี (Library) ซึ่งมีสำเร็จรูปของโปรแกรม Arduino [7] โดยตัวควบคุมภายในมีลักษณะเป็นพีไอดี และเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขของการระงับปรับตั้งจากเดิมตามสมการที่ (2.26) เป็นสมการที่ (2.27)

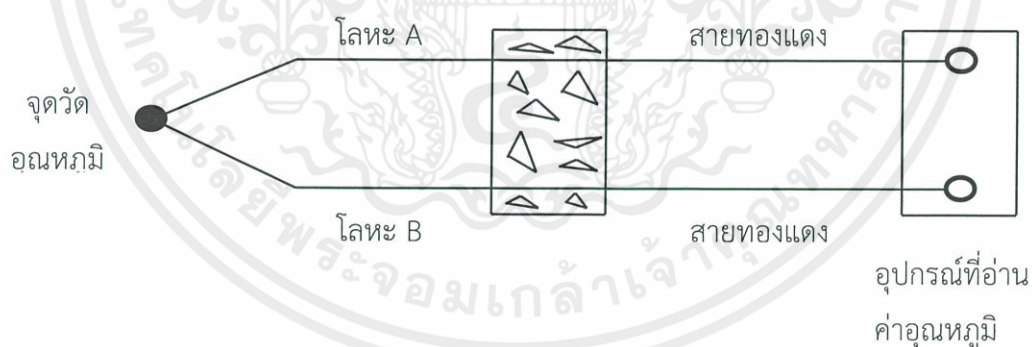
$$I_{out}[k] = \begin{cases} MV \text{ Maximum Limit}, & MV > \text{Maximum Limit and } e[k] > 0 \\ MV \text{ Minimum Limit}, & MV < \text{Minimum Limit and } e[k] < 0 \\ I_{out}[k-1] + K_i T_s e[k], & MV \text{ in desired range} \end{cases} \quad (2.27)$$

2.6 เทอร์โมคัปเปิล

เทอร์โมคัปเปิล คือ อุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ หรือความร้อนเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า เทอร์โมคัปเปิลทำมาจากโลหะตัวนำที่ต่างชนิดกัน 2 ตัว นำมาเชื่อมต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกันที่ปลายด้านหนึ่ง เรียกว่าจุดวัดอุณหภูมิ ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งปล่อยให้ว่าง เรียกว่าจุดอ้างอิง หากจุดวัดอุณหภูมิ และจุดอ้างอิงมีอุณหภูมิต่างกันก็จะทำให้มีการนำกระแสในวงจร เทอร์โมคัปเปิลทั้งสองข้าง โดยเรียกอุณหภูมิคงที่ที่ใช้อ้างอิงนี้ว่า จุดต่ออ้างอิง (Reference Junction) และได้มีการกำหนด จุดต่ออ้างอิงให้เป็น 0°C

2.6.1 หลักการทำงานของเทอร์โมคัปเปิล

หลักการทำงานของเทอร์โมคัปเปิลคือ อาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิในการสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้น การที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าค่าหนึ่งจะอ้างอิงเป็นอุณหภูมิค่าหนึ่งได้ แสดงว่าความแตกต่างของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นนั้นจะต้องอ้างอิงกับอุณหภูมิค่าคงที่ค่าหนึ่งเสมอ โดยเรียกจุดวัดอุณหภูมิคงที่ที่ใช้อ้างอิงนี้ว่า จุดต่ออ้างอิง และได้มีการกำหนด จุดต่ออ้างอิงให้เป็น 0°C เพื่อให้การวัดอุณหภูมิเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เป็นมาตรฐานเดียวกัน และกำหนดเป็นตารางมาตรฐานแสดงค่าอุณหภูมิเทียบกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่วัดได้ แต่โดยทั่วไปเทอร์โมคัปเปิลจะทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง (เช่น 25°C) นั่นคือ ไม่ได้เทียบกับ 0°C แสดงว่าค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้ยังไม่ถูกต้อง หากนำไปอ่านค่าอุณหภูมิจากตารางมาตรฐานจะผิดพลาด จึงจำเป็นต้องมีการรักษา จุดต่ออ้างอิงเพื่อให้การวัดอุณหภูมิเทียบกับ 0°C ตลอดเวลา การรักษาจุดต่ออ้างอิงด้วยน้ำแข็งบริสุทธิ์ ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 หลักการทำงานของเทอร์โมคัปเปิล

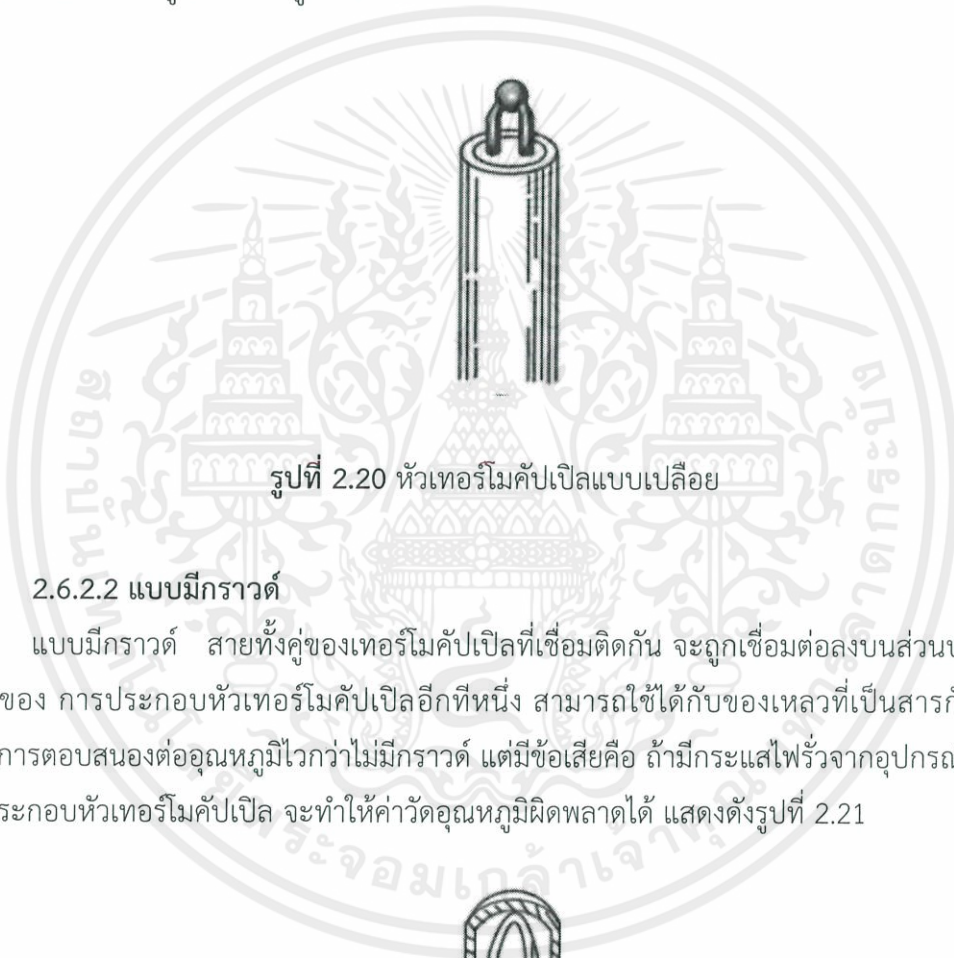
นำจุดต่อจุ่มลงในน้ำแข็งก่อนนำเข้าอุปกรณ์อ่านค่าอุณหภูมิ เพื่อให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้ เกิดจากการวัดอุณหภูมิเทียบกับ 0°C แต่วิธีนี้เหมาะสำหรับการทดลองในห้องปฏิบัติการ ควรถ่ายน้ำออกเป็นระยะ ๆ และเติมน้ำแข็งไปด้วย ไม่สามารถใช้งานอุตสาหกรรมเนื่องจากการวัดอุณหภูมิในอุตสาหกรรม เป็นการวัดที่ต่อเนื่องตลอดเวลา และวิธีนี้ไม่สามารถทำให้มั่นใจได้ว่าอุณหภูมิ ณ จุดต่อเป็น 0°C ได้ตลอด

2.6.2 การประกอบหัวเทอร์โมคัปเปิล

การประกอบหัวเทอร์โมคัปเปิลมีลักษณะเป็นปลอกโลหะ (Metal Sheath) มีทั้งหมด 3 รูปแบบคือ แบบเปลือย (Exposed Junction) แบบกราวด์ (Grounded Junction) และแบบสุดท้ายคือ แบบไม่มีกราวด์ (Ungrounded Junction) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.6.2.1 แบบเปลือย

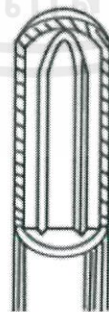
แบบเปลือย เป็นแบบที่ให้ผลการวัดที่ไวที่สุด จุดต่อสำหรับวัดสัมผัสกับของเหลว (Fluid) ที่ต้องการวัดโดยตรงผลเสียของแบบเปลือย คือ ชำรุดเสียหายง่าย และอายุการใช้งานสั้น ไม่เหมาะสำหรับงานความดันสูง แสดงดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 หัวเทอร์โมคัปเปิลแบบเปลือย

2.6.2.2 แบบมีกราวด์

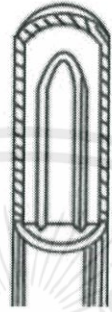
แบบมีกราวด์ สายทั้งคู่ของเทอร์โมคัปเปิลที่เชื่อมติดกัน จะถูกเชื่อมต่อลงบนส่วนปลายท่อโลหะของ การประกอบหัวเทอร์โมคัปเปิลอีกทีหนึ่ง สามารถใช้ได้กับของเหลวที่เป็นสารกัดกร่อน ให้ผลการตอบสนองต่ออุณหภูมิไวกว่าไม่มีกราวด์ แต่มีข้อเสียคือ ถ้ามีกระแสไฟรั่วจากอุปกรณ์อื่นมาที่ การประกอบหัวเทอร์โมคัปเปิล จะทำให้ค่าวัดอุณหภูมิผิดพลาดได้ แสดงดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 หัวเทอร์โมคัปเปิลแบบมีกราวด์

2.6.2.3 แบบไม่มีกราวด์

แบบไม่มีกราวด์ ใช้ได้กับของเหลวที่เป็นสารกึ่งกร้อน มีอายุการใช้งานยืนยาวที่สุด แต่มีข้อเสียคือ ให้ผลการวัดซ้ำ เหมาะกับงานที่อุณหภูมิไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง ในอุตสาหกรรมใช้แบบนี้เกือบทั้งหมด สำหรับการประกอบหัวเทอร์โมคัปเปิลที่เป็นเซรามิก (Ceramic) นั้นมักจะใช้ในกรณีที่อุณหภูมิใช้งานสูง เช่น $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ขึ้นไป หรือในบรรยากาศที่มีการกักความร้อนสูง แสดงดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 หัวเทอร์โมคัปเปิลแบบไม่มีกราวด์

2.6.3 คุณสมบัติของเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐาน

คุณสมบัติของเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐาน ประกอบไปด้วย 5 คุณสมบัติหลัก คือ ความไว โครงสร้าง ย่านการใช้งาน เวลาตอบสนอง และการปรับสภาพสัญญาณ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.6.3.1 ความไว

ความไว (Sensitivity) ความไวของเทอร์โมคัปเปิลขึ้นอยู่กับความหนาของท่อป้องกัน โดยถ้าท่อป้องกันมีความหนามาก ความไวจะน้อยกว่า ท่อที่มีความหนาน้อยกว่า และจะขึ้นอยู่กับการใช้งานวงจรปรับสภาพสัญญาณ และตัวเทอร์โมคัปเปิลเอง

2.6.3.2 โครงสร้าง

โครงสร้าง (Construction) ของเทอร์โมคัปเปิลมีลักษณะ ดังนี้คือ มีความต้านทานต่ำ ให้สัมประสิทธิ์อุณหภูมิสูง ด้านทานต่อการเกิดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูง ๆ ทนต่อสภาวะแวดล้อมที่นำไปใช้วัดค่า และเป็นเชิงเส้นสูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ตัวฝัก หรือท่อป้องกันส่วนมากจะทำจากสแตนเลส (Stainless) ความไวของเทอร์โมคัปเปิลขึ้นอยู่กับความหนาของท่อป้องกัน ทั้งเยอรมันเนียม (Germanium) และซิลิคอน (Silicon) ทำให้คุณสมบัติการเกิดเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric) จึงนิยมใช้กันอย่างมากในอุปกรณ์ทำความเย็น (Peltier Element) มากกว่าที่จะใช้เป็นเทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิ ขนาดของสายเทอร์โมคัปเปิลกำหนดได้จากการใช้งานแต่ละอย่าง และมีขนาดจาก #10 ในสภาวะแวดล้อมที่ไม่คงที่ จนถึงขนาด # 30 หรือแม้กระทั่ง 0.02 mm ซึ่งเป็นสายแบบไมโครไวร์ (Microwire) ที่ใช้กับการวัดอุณหภูมิการกลั่นในงานทางชีววิทยา

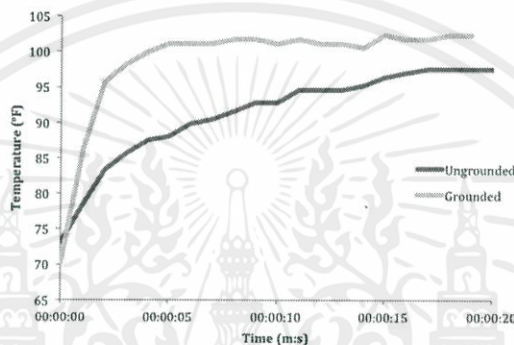
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.3.3 ย่านการใช้งาน

ย่านการใช้งาน (Range) แต่ละตัวจะแตกต่างกันตามแต่ละสมาคมจะกำหนด ในส่วนที่สำคัญคือ ค่าแรงเคลื่อนที่ออกมาจากแต่ละอุณหภูมิ จะต้องอ้างอิงกับตารางค่ามาตรฐานของแต่ละสมาคมที่ใช้ให้ถูกต้องเป็นเอกภาพเดียวกันหมดทั้งระบบ

2.6.3.4 เวลาตอบสนอง

เวลาตอบสนอง (Response Time) ของเทอร์โมคัปเปิลขึ้นอยู่กับขนาดของสาย และวัสดุที่นำมาทำท่อป้องกันตัวเทอร์โมคัปเปิล ตัวอย่างเวลาตอบสนองของเทอร์โมคัปเปิลแบบมีกราวด์และไม่มีกราวด์ แสดงดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 ตัวอย่างเวลาตอบสนองของเทอร์โมคัปเปิลแบบมีกราวด์และไม่มีกราวด์

2.6.3.5 การปรับสภาพสัญญาณ

การปรับสภาพสัญญาณ (Signal Conditioning) ปกติแรงเคลื่อนของเทอร์โมคัปเปิลจะมีขนาดเล็กน้อยมากจึงจำเป็นต้องขยายสัญญาณโดยใช้วงจรขยายสัญญาณ เพื่อขยายขนาดของสัญญาณให้สูงขึ้น

2.6.4 การเลือกใช้งานเทอร์โมคัปเปิล

เทอร์โมคัปเปิลมีหลายชนิด (Type) ให้เลือก แล้วแต่ย่านอุณหภูมิ และลักษณะการใช้งาน โดยความแตกต่างของแต่ละชนิด นี้เกิดจากการเลือกใช้คู่ของวัสดุ (Element) ของโลหะที่จะนำมาเชื่อมเข้าด้วยกันให้แตกต่างกัน เพราะโลหะแต่ละชนิดย่อมมีคุณสมบัติพิเศษเฉพาะตัวของมันอยู่แล้ว เมื่อโลหะชนิดต่าง ๆ กันมาจับคู่เชื่อมเข้าด้วยกัน จะทำให้คุณสมบัติของเทอร์โมคัปเปิล ที่ได้แตกต่างกันไป นอกจากนี้ ได้มีการทดลองผสมโลหะต่างชนิดเข้าด้วยกัน เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะเดิมให้ดีขึ้น หรือเพื่อใช้แทนโลหะบางชนิดที่ใช้ทำอยู่เดิม เช่น แพลทินัม (Platinum) เนื่องจากราคาสูง ตัวอย่างโลหะผสมที่เกิดขึ้น เช่น โครเมล (Cromel) คือ โลหะผสมของ นิกเกิล (Nickel) 90% และโครเมียม (Chromium) 10% อะลูเมล (Alumel) คือ โลหะผสมของ นิกเกิล 95% อะลูมิเนียม (Aluminium) 2% แมงกานีส (Manganese) 2% และซิลิคอน 1% และ คอนสแตนแตน (Constantan) คือ โลหะผสมของ ทองแดง 60% และ นิกเกิล 40% เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการเลือกใช้ควรเลือกให้เหมาะสมกับงานนั้น ๆ โดยสิ่งที่ควรพิจารณามีหลายข้อ เช่น ค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้งาน ราคา ความกักความร้อนของสารที่เทอร์โมคัปเปิลสัมผัส การเลือกใช้เทอร์โมเวล (Thermowell) ลักษณะบรรยากาศที่เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน ริดักชัน สารกลุ่มก๊าซเฉื่อย หรือสุญญากาศ เป็นต้น ชนิดของเทอร์โมคัปเปิลแสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ชนิดของเทอร์โมคัปเปิล

ชนิด	ส่วนผสม	ย่านอุณหภูมิใช้งาน (°C)	แรงเคลื่อนไฟฟ้า (mV)
B	แพลทินัม - 30% โรเดียม แพลทินัม - 6% โรเดียม	0 ถึง 1820	0 ถึง 13.814
R	แพลทินัม - 13% โรเดียมแพลทินัม	-50 ถึง 1768	-02.26 ถึง 21.108
S	แพลทินัม - 10% โรเดียมแพลทินัม	-50 ถึง 1768	-0.236 ถึง 18.698
J	เหล็ก/คอนสแตนแตน	-210 ถึง 760	-8.096 ถึง 42.922
K	โครเมล/อะลูเมล	-270 ถึง 1372	-6.458 ถึง 54.875
T	ทองแดง/คอนสแตนแตน	-270 ถึง 400	-6.258 ถึง 20.869
E	โครเมล/คอนสแตนแตน	-270 ถึง 1000	-9.835 ถึง 76.358

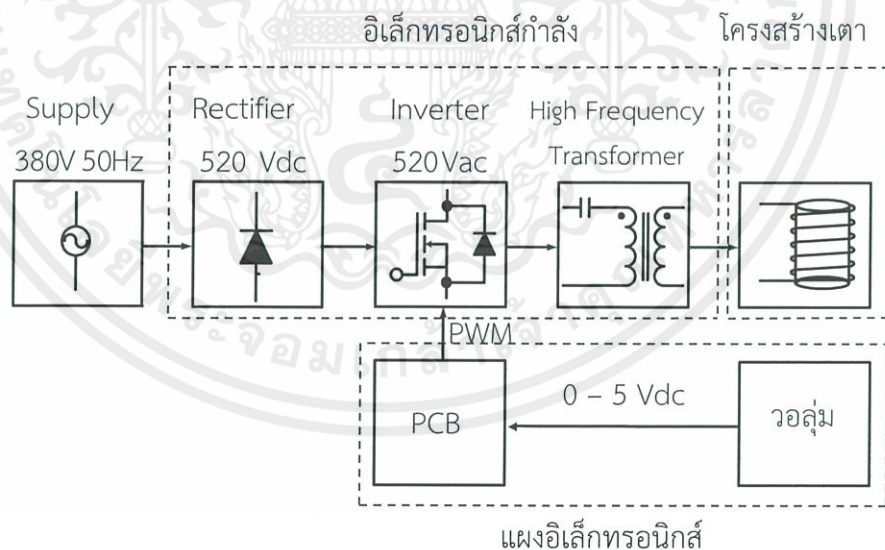
บทที่ 3

การออกแบบและโครงสร้าง

บทนี้จะแบ่งออกเป็นสองส่วนหลัก คือ รายละเอียดเกี่ยวกับเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่ใช้ในปริญญาโท และกล่องควบคุม หรือต้นแบบตัวควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวควบคุม โดยรับสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิล และส่งสัญญาณควบคุมไปยังบอร์ดวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 เตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

ปริญญาโทฉบับนี้ได้นำเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ จากบริษัท ซีอีพี อินดักชั่นฮีท จำกัด มาศึกษาและทดลอง ซึ่งในการใช้งานจะไม่เปลี่ยนแปลงโครงสร้างและอุปกรณ์ของเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำดังกล่าว อย่างไรก็ตามการใช้งานเดิมอาศัยการควบคุมแบบระบบวงเปิด โดยปรับอินพุตด้วยการปรับความต้านทานปรับค่าได้ ดังรูปที่ 3.1 แต่ในปริญญาโทฉบับนี้จะออกแบบและสร้างระบบควบคุมแบบวงปิดสำหรับเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำดังกล่าว เพื่อลดข้อจำกัดของระบบวงเปิด กล่าวคือ เตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำระบบวงปิดจะสามารถควบคุมอุณหภูมิให้มีอุณหภูมิตามที่ต้องการถึงแม้จะถูกรบกวนจากสิ่งแวดล้อม โดยจะกล่าวถึงระบบควบคุมแบบวงปิดในหัวข้อ 3.2



รูปที่ 3.1 เตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำอาศัยการควบคุมแบบระบบวงเปิด

รายละเอียดของเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่ศึกษา แบ่งออกเป็นสามส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนแรกคือแผงอิเล็กทรอนิกส์ทำหน้าที่ส่งสัญญาณควบคุม ส่วนที่สองคือส่วนอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และส่วนที่สามคือโครงสร้างเตา โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 แผงอิเล็กทรอนิกส์

แผงอิเล็กทรอนิกส์มีหน้าที่สำคัญคือ ส่งสัญญาณเอาต์พุตเป็นสัญญาณพัลส์วิตช์มอดูเลชันไปควบคุมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง นั่นคือ ไอจีบีที (Insulate Gate Bipolar Transistor) ซึ่งตัวไอจีบีทีจะทำหน้าที่แปลงความถี่ให้สูงขึ้นระดับ kHz โดยจะนำแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแส หัวข้อ 3.1.2 มาแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าที่มีความถี่สูงทำให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงถูกแปลงเป็นกระแสสลับ แผงอิเล็กทรอนิกส์จะรับอินพุตเป็นแรงดันกระแสตรง 0 ถึง 5 V โดยแรงดันอินพุตนี้จะแปรผันตามกระแสของเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ วงจรหลักของแผงอิเล็กทรอนิกส์มีทั้งหมด 3 วงจร วงจรแรกเป็นวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์วิตช์มอดูเลชันทำหน้าที่สร้างสัญญาณพัลส์วิตช์มอดูเลชันเพื่อส่งไปควบคุมไอจีบีที วงจรที่สองวงจรขับนำเกต ทำหน้าที่ขับนำเกตแยกส่วนระหว่างสัญญาณควบคุม และภาคกำลังออกจากกันทางไฟฟ้า วงจรที่สามวงจรป้องกันกระแสเกิน ทำหน้าที่ตรวจสอบกระแสที่หม้อแปลงความถี่สูง เมื่อกระแสเกินจะสั่งให้วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์วิตช์มอดูเลชันหยุดจ่ายสัญญาณ รายละเอียดของวงจรทั้งสามอธิบายดังต่อไปนี้

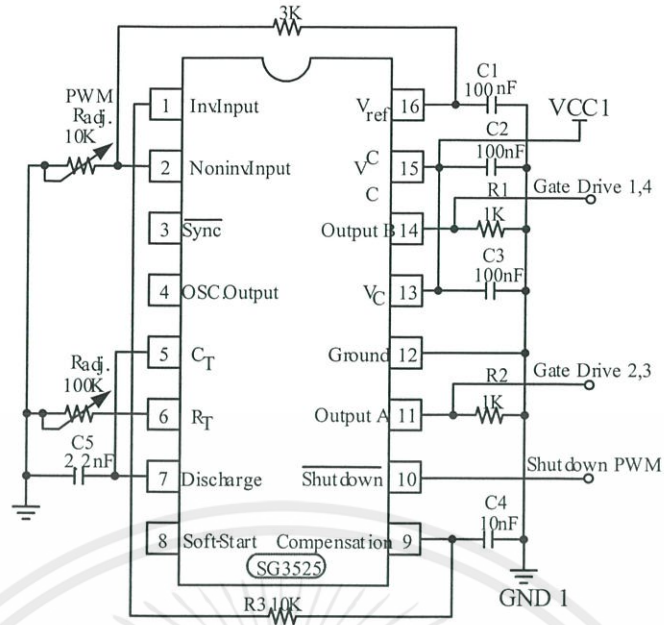
3.1.1.1 วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์วิตช์มอดูเลชัน

วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์วิตช์มอดูเลชันใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ SG3525 ต่อสัญญาณความถี่ในรูปแบบสัญญาณพULSE ซึ่งต้องการให้มีความถี่เริ่มต้นที่ $50 kHz$ เพื่อที่จะนำสัญญาณไปขับสวิทช์ให้กับไอจีบีที โดยการกำหนดค่าตัวเก็บประจุ และความต้านทานที่ขา 5 ขา 6 และขา 7 ของไอซี SG3525 ดังรูปที่ 3.2 เพื่อให้ได้ความถี่ที่ต้องการ โดยค่าความต้านทานที่ต้องใช้ เพื่อให้ได้ความถี่ที่ $50 kHz$ คือ $R_D = 3 k\Omega$ และ $R_{adj} = 1 \Omega$ ซึ่งจาก [8] จะคำนวณความถี่ได้ดังสมการที่ (3.1) ซึ่งพบว่าได้ค่าตามต้องการ

$$f = \frac{1}{C_s(0.7R_{adj} + 3R_D)}$$

$$f = \frac{1}{2.2nF(0.7 + 9k\Omega)} = 50.501 kHz \quad (3.1)$$

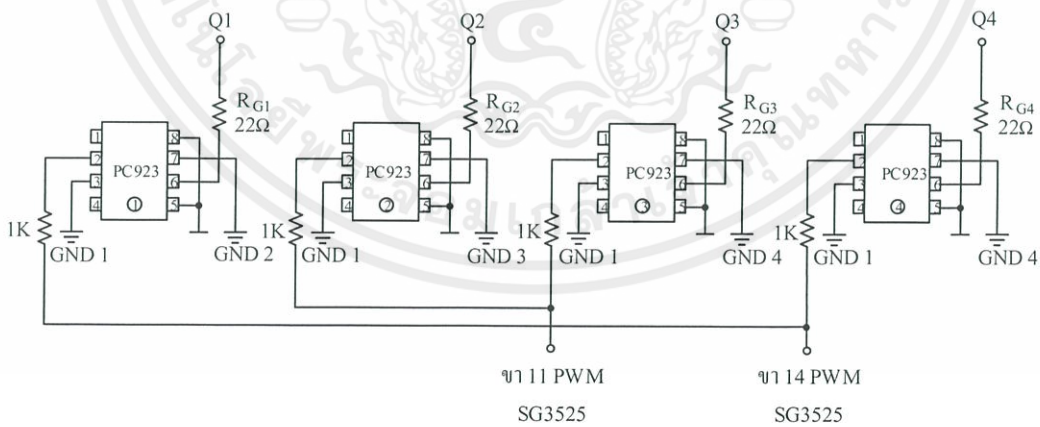
$$f \approx 50 kHz$$



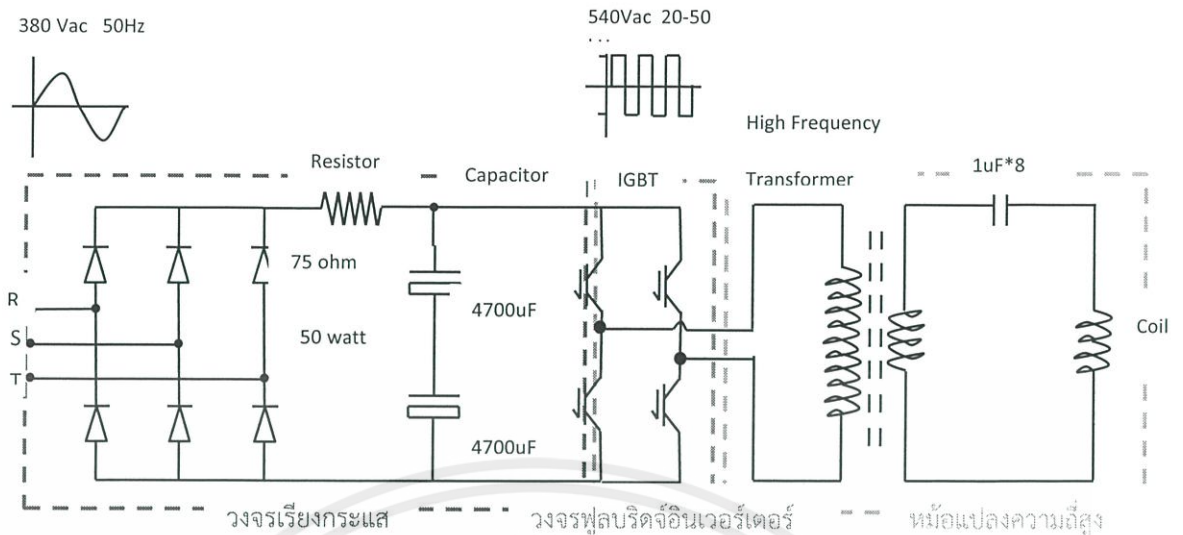
รูปที่ 3.2 วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชัน SG3525

3.1.1.2 วงจรขับนำเกต

วงจรถับนำเกตใช้ไอซี PC923 ทำหน้าที่ขับนำเกตแยกส่วนระหว่างสัญญาณควบคุมและภาคกำลังออกจากกันทางไฟฟ้า โดยใช้ตัวต้านทาน $1\text{ k}\Omega$ เป็นตัวต้านทานจำกัดกระแส โดยให้ออโต้สวิตช์ และใช้ความต้านทาน $22\ \Omega$ เป็นความต้านทานขาเกต (Gate) เพื่อให้แรงดันขาเกตของไอจีบีทีมีแรงดันที่เหมาะสมในการสวิตช์ แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรถับนำเกต PC923



รูปที่ 3.5 วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังของเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

3.1.2.1 วงจรเรียงกระแส

แหล่งจ่ายแรงดันของระบบใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ผ่านวงจรเรียงกระแสสามเฟส เพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับดังกล่าวเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จากนั้นผ่านตัวต้านทานขนาด 75Ω $50 W$ เพื่อลดแรงดันไฟฟ้าก่อนเข้าตัวเก็บประจุขนาด $4700 \mu F$ 6 ตัว โดยตัวเก็บประจุทำหน้าที่ลดการกระเพื่อมของแรงดันไฟกระแสตรงดังรูปที่ 3.6 ในที่นี้ใช้แรงดันแหล่งจ่ายไฟฟ้า $380 V$ และแรงดันตกคร่อมไดโอด $0.7 V$ โดยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงหลังจากผ่านวงจรเรียงกระแสหาได้จากสมการ (3.2)

$$V_{DC} = \sqrt{2}V_S - 2V_D \quad (3.2)$$

โดยที่ V_S คือ แรงดันแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้งาน (V)

V_D คือ แรงดันตกคร่อมไดโอด (V)

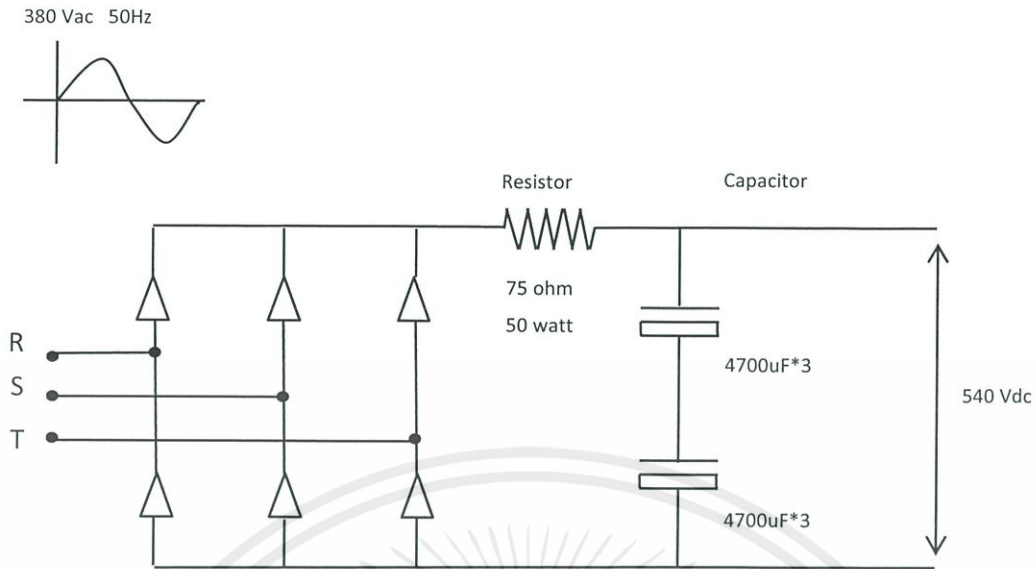
ดังนั้น

$$V_{DC} = \sqrt{2}(380) - 2(0.7)$$

$$V_{DC} = 531.801 V$$

$$\approx 540 V$$

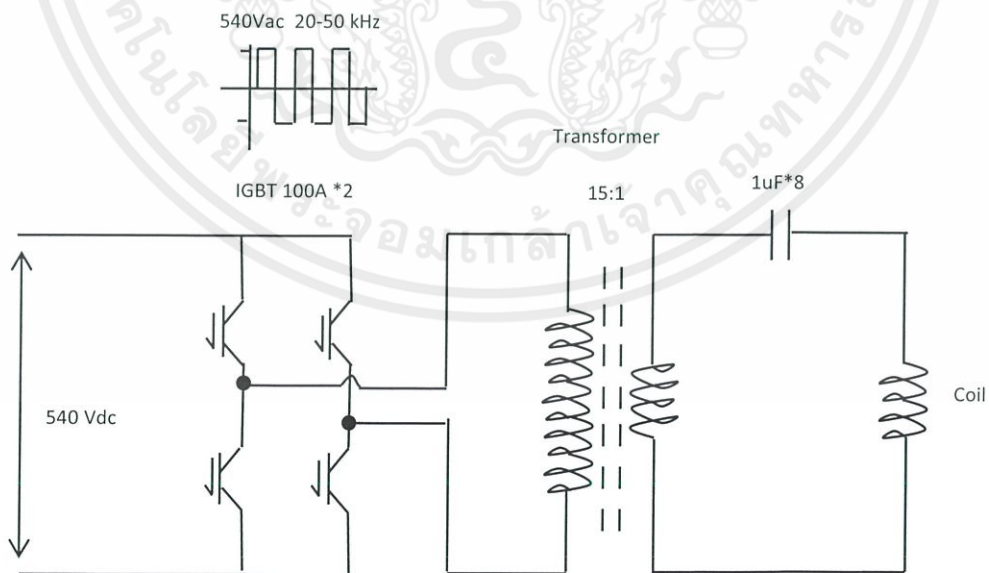
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 วงจรเรียงกระแสแบบสามเฟส

3.1.2.2 วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์

วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ แสดงดังรูปที่ 3.7 ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังไอจีบีทีที่ทั้ง 4 ตัวทำหน้าที่เป็นตัวสวิตช์ ทำงานโดยนำกระแสและหยุดนำกระแสสลับกันเป็นคู่ในแต่ครั้งคาบเวลาดังอธิบายในหัวข้อ 2.2.3 ไอจีบีทีแต่ละตัวสามารถทนกระแสสูงสุด 100 A 1200 V ส่วนตัวเก็บประจุทำหน้าที่ป้องกันการเกิดสมมาตรพลิกขั้วขึ้นในแกนเฟอร์ไรท์ในขณะที่หม้อแปลงทำงาน



รูปที่ 3.7 วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2.3 หม้อแปลงความถี่สูง

หม้อแปลงความถี่สูงในการเลือกใช้จะต้องคำนึงถึงการเลือกใช้อุปกรณ์ภายในหม้อแปลง เนื่องจากความถี่ในการทำงานของอินเวอร์เตอร์ มีค่าสูงเกินหลักจึงไม่เหมาะสมในการนำมาใช้กับ วงจรอินเวอร์เตอร์ เพราะจะเกิดกำลังสูญเสียอย่างมาก และ แกนเหล็กยังมีการตอบสนองต่อความถี่ สูงได้ไม่ดี ออกแบบหม้อแปลง และเรโซแนนซ์หม้อแปลงคือ หม้อแปลงความถี่สูงประกอบด้วยขดลวด 2 ขดด้านปฐมภูมิ และทางด้านทุติยภูมิ ประกอบด้วยด้านปฐมภูมิ 15 รอบ และ ด้านทุติยภูมิ 1 รอบ ได้อัตราส่วน (15 ต่อ 1) ของความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดัน และรอบคำนวณจากสมการดังนี้

$$n = \frac{E_p}{E_s} = \frac{N_p}{N_s} = \frac{I_p}{I_s} \quad (3.3)$$

$$n = \frac{15}{1} = 15$$

โดย n คือ อัตราส่วนจำนวนรอบ

3.1.3 โครงสร้างเตา

โครงสร้างของเตามีส่วนประกอบหลักอยู่สองส่วน ส่วนแรกเป็นโหลดประกอบไปด้วยขด ลวดทองแดง และตัวชิ้นงาน ซึ่งลวดทองแดงจะเหนี่ยวนำชิ้นงานให้เกินความร้อนโดยไม่มีการสัมผัส กัน ส่วนที่สองเป็นส่วนของโครงสร้างตู้ของเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำโดยภายนอกจะเป็นโลหะ ภายในใช้แผ่นเบกาไลท์ (Bakelite Sheet) และบริเวณชิ้นงานเป็นเซรามิก

3.1.3.1 โหลด

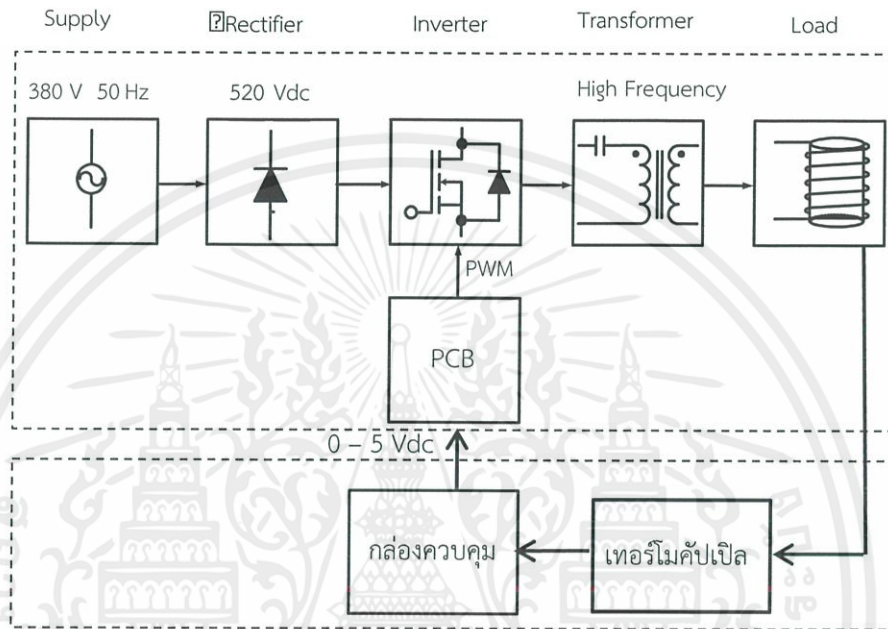
ในส่วนโหลดจะใช้คอยล์ให้ความร้อนโดยมีท่อทองแดงข้างในกลางขนาด $5/16$ in ความหนา 0.7 mm พันเป็นวงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 cm จำนวนรอบ 6 รอบ และส่วนของชิ้นงานเป็น ลักษณะของเบ้าหลอมภายในมีพื้นที่ในการหลอมขนาด 1 kg ลักษณะเป็นเบ้ากราไฟท์หุ้มด้วย เซรามิก อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ประมาณ 1351 °C ถ้าใช้มากกว่านี้จะทำให้เบ้าเกิดความเสียหายโดยจะ ค่อย ๆ บางลง

3.1.3.2 โครงสร้างตู้

โครงสร้างตู้มีลักษณะภายนอกเป็นโลหะมีขนาดความกว้าง 35 cm ความยาว 40 cm และความสูง 65 cm ภายในตู้ใช้วัสดุที่เป็นลักษณะเหมือนไม้เรียกว่า เบกาไลท์ ซึ่งไม่มีความเป็น โลหะ และสามารถทนอุณหภูมิสูงได้ เนื่องจากวัสดุภายในหากใช้วัสดุที่มีส่วนประกอบของโลหะจะถูก เหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนเป็นเหตุให้เกิดการสูญเสียพลังงาน และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อาจเสียหาย จากความร้อนได้ และส่วนที่อยู่ใกล้ชิ้นงานจะใช้วัสดุเป็นเซรามิกเนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีอุณหภูมิที่ สูงมาก

3.2 การออกแบบกล่องควบคุมอุณหภูมิ

วัตถุประสงค์ของการทำโครงการนี้คือ เพื่อสร้างต้นแบบตัวควบคุมอุณหภูมิหรือกล่องควบคุม สำหรับเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ เพื่อปรับโครงสร้างของระบบในรูปที่ 3.1 เดิมซึ่งเป็นระบบวงเปิด ให้เป็นระบบวงปิด ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ภาพรวมของโครงการ

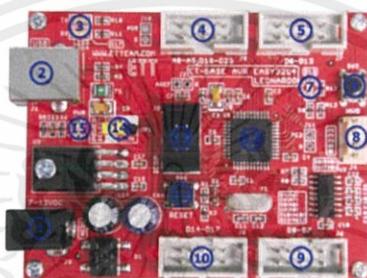
จากรูปที่ 3.8 กล่องควบคุมอุณหภูมิจะมีองค์ประกอบแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักคือ กล่องควบคุม และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิซึ่งใช้เทอร์โมคัปเปิล รายละเอียดอธิบายได้ดังต่อไปนี้

3.2.1 กล่องควบคุม

กล่องควบคุมจะทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ซึ่งภายในประกอบไปด้วย บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ บอร์ดสำหรับแปลงสัญญาณดิจิทัลให้เป็นสัญญาณแอนะล็อก บอร์ดสำหรับแปลงสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิล หน้าจอสัมผัส สำหรับรับและแสดงผลข้อมูล และโปรแกรมสำหรับกล่องควบคุม มีรายละเอียดดังนี้

3.2.1.1 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

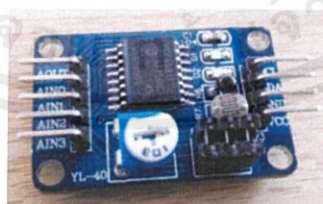
เลือกใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ET-BASE AVR EASY32U4 ของ บริษัท อีทีที จำกัด เป็นหน่วยประมวลผลหลักของโครงการ เนื่องจากบอร์ดมีพอร์ตที่ใช้เชื่อมต่อ และฟังก์ชันการทำงานเพียงพอต่อความต้องการในการดำเนินโครงการ ซึ่งบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ET-BASE AVR EASY32U4 มีโครงสร้างการทำงานเช่นเดียวกับกับ Arduino Leonardo โดยเป็นสถาปัตยกรรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ถูกนำไปใช้ในการพัฒนา และผลิตเป็นตัวประมวลผลอย่างมากในปัจจุบัน และยังเป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีราคาถูกอีกด้วย ดังนั้นจึงมีความน่าสนใจ และเป็นโอกาสที่ดีในเรียนรู้ และนำมาใช้ในโครงการนี้ แสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 บอร์ด ET-BASE AVR EASY32U4

3.2.1.2 บอร์ดสำหรับแปลงสัญญาณดิจิทัลให้เป็นสัญญาณแอนะล็อก

บอร์ดสำหรับแปลงสัญญาณดิจิทัลให้เป็นสัญญาณแอนะล็อก โดยเลือกใช้บอร์ดPCF8591 เนื่องจากมีพอร์ตสำหรับเชื่อมต่อกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่สะดวก และสามารถจ่ายสัญญาณในรูปแบบมาตรฐาน 0-5 V ซึ่งผู้ใช้สามารถใช้งาน หรือนำมาประยุกต์ใช้กับปริิณญาณิพนธ์ได้โดยง่าย ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 บอร์ด PCF8591

3.2.1.3 บอร์ดสำหรับแปลงสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิล

บอร์ดสำหรับแปลงสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิลเลือกใช้ บอร์ด MAX6675 สำหรับเชื่อมต่อกับเทอร์โมคัปเปิล ซึ่งจะทำหน้าที่รับสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิล แล้วแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลได้ค่าอินพุตส่งไปให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการประมวลผลต่อไป จะมีลักษณะดังรูปที่ 3.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 บอร์ด MAX6675

3.2.1.4 หน้าจอสัมผัส

เลือกใช้หน้าจอสัมผัส ET-TFT43-EVE ของบริษัท อีทีที จำกัด เนื่องจากมีฟังก์ชันการทำงานที่หลากหลาย มีพอร์ตเชื่อมต่อกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่สะดวกไม่ซับซ้อน ภายในจะประกอบไปด้วยชิป FT800 ซึ่งมีโปรแกรมตัวอย่างที่สามารถนำไปทดลอง และประยุกต์ใช้กับปริญญาพนธ์ได้ แสดงดังรูปที่ 3.12

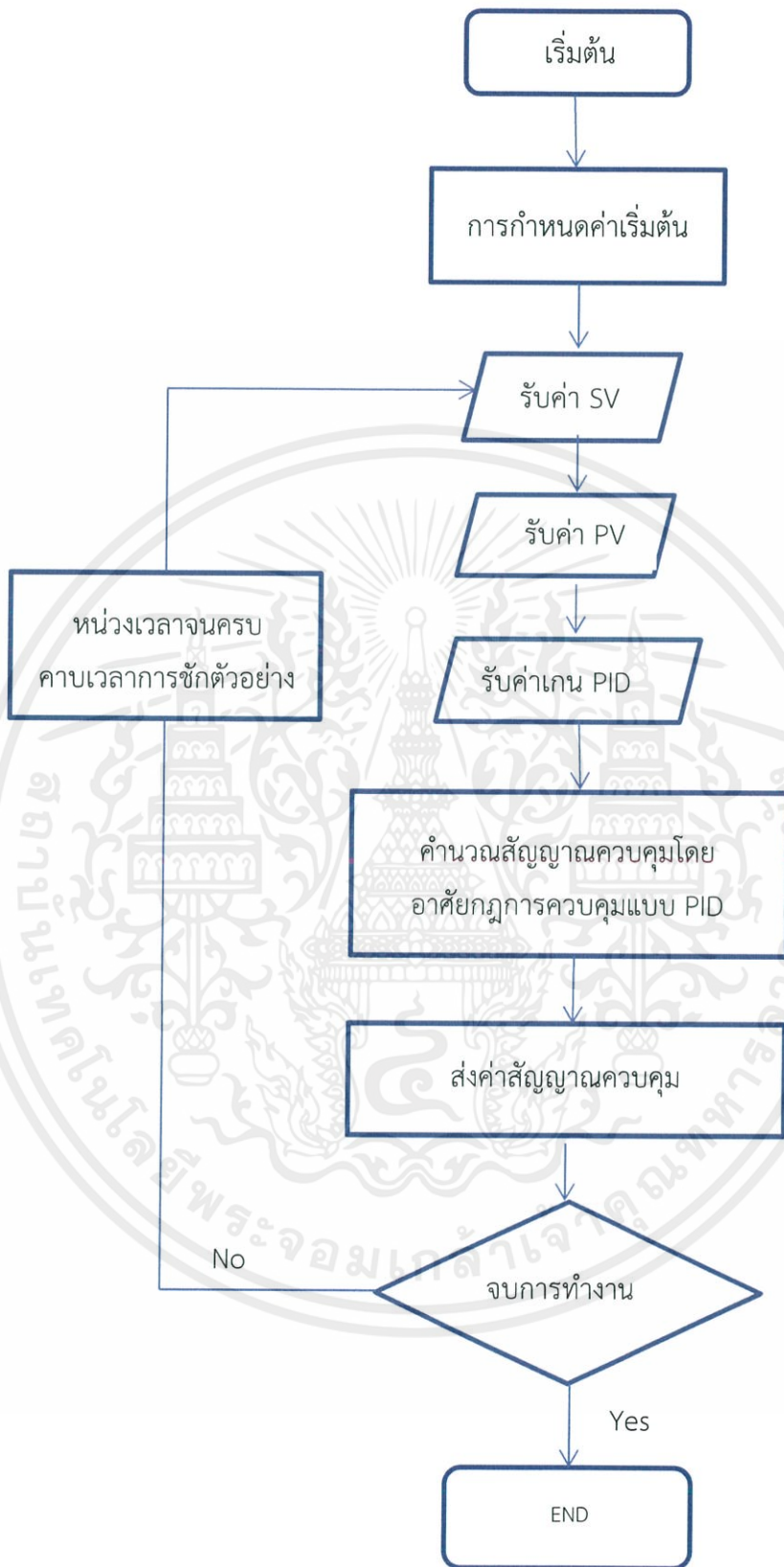


รูปที่ 3.12 หน้าจอสัมผัส ET-TFT43-EVE

3.2.1.5 โปรแกรมสำหรับกล่องควบคุม

จากการวางแผนการใช้งาน และฟังก์ชันภายในกล่องควบคุม ทำให้สามารถเขียนแผนผังการทำงานของโปรแกรมที่ใช้ภายในกล่องควบคุม ได้ดังรูปที่ 3.13

จากรูปที่ 3.13 อธิบายได้ดังนี้คือ เมื่อเริ่มต้นการทำงานก็จะมีการกำหนดตัวแปรต่าง ๆ และ กำหนดตำแหน่งขาเชื่อมต่อระหว่างบอร์ดต่าง ๆ เข้ากับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ เช่น การกำหนดสัญญาณเข้าออกไมโครคอนโทรลเลอร์ การกำหนดขาเชื่อมต่อของหน้าจอสัมผัสกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ หลังจากนั้นเป็นการรับค่าเป้าหมาย การรับค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ตามด้วยการรับค่าเกนพีไอดี เมื่อได้ค่าเกนพีไอดีก็จะทำการคำนวณตัวควบคุมโดยอาศัยกฎการควบคุมแบบพีไอดี เมื่อคำนวณเสร็จจะส่งค่าสัญญาณควบคุมไปยังเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ใช้ดีเลย์ในการหน่วงเวลา ซึ่งจะทำงานซ้ำไปเรื่อย ๆ จะหยุดการทำงานก็ต่อเมื่อปิดเครื่องเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ



รูปที่ 3.13 แผนผังการทำงานของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากแผนผังการทำงานของโปรแกรมจะมีการคำนวณสัญญาณควบคุมโดยอาศัยกฎการควบคุมแบบพีไอดี ซึ่งฟังก์ชันในการควบคุมโดยอาศัยกฎการควบคุมแบบพีไอดีจะแสดงดังรูปที่ 3.14

```
bool PID::compute()
{
  if(!inAuto) return false;
  unsigned long now = millis();
  unsigned long timeChange = (now - lastTime);
  if(timeChange>=SampleTime)
  {
    /*Compute all the working error variables*/
    double input = *myInput;
    double error = *mySetpoint - input;
    Iterm+= (ki * error);
    if(Iterm > outMax) Iterm= outMax;
    else if(Iterm < outMin) Iterm= outMin;
    double dInput = (input - lastInput);

    /*Compute PID Output*/
    double output = kp * error + Iterm- kd * dInput;

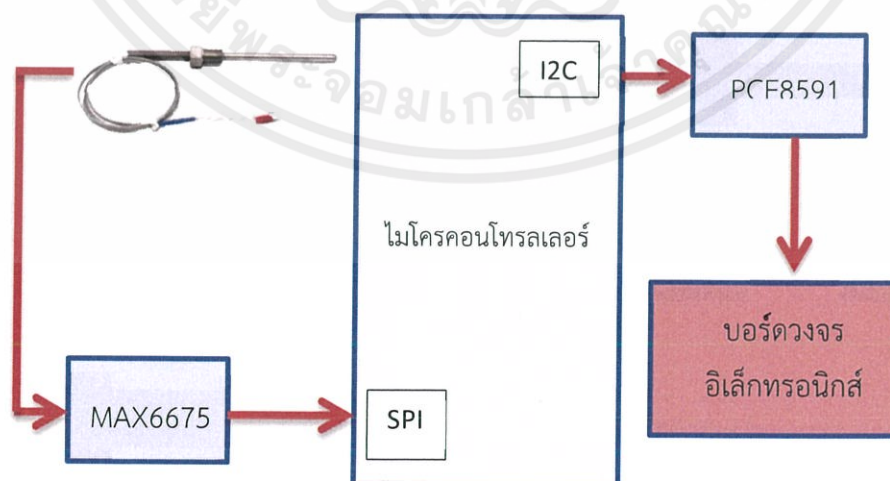
    if(output > outMax) output = outMax;
    else if(output < outMin) output = outMin;
    *myOutput = output;

    /*Remember some variables for next time*/
    lastInput = input;
    lastTime = now;
    return true;
  }
  else return false;
}
```

รูปที่ 3.14 ฟังก์ชันการควบคุมแบบพีไอดี

การสร้างกล่องควบคุมอุณหภูมิของเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำนี้ ได้ออกแบบให้สามารถรับอินพุตได้ 1 อินพุตจากเครื่องมือวัดคือ เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค ซึ่งใช้ MAX6675 เป็นโมดูลสำหรับแปลงอุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิลเป็นค่าดิจิทัล 0-4095 และส่งออกเอาต์พุตได้ 1 เอาต์พุตไปที่อุปกรณ์ควบคุมสุดท้ายคือ บอร์ดไอซี PCF8591 โดยสัญญาณที่ส่งออกนี้จะอยู่ในรูปของสัญญาณมาตรฐาน 0-5 V

จากการออกแบบข้างต้นจึงทราบพอร์ตของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในการรับอินพุตสัญญาณอินพุตคือ เชื่อมต่อแบบ SPI และในการส่งออกสัญญาณเอาต์พุตจะสื่อสารกับไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่าน I2C ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การเชื่อมต่อวงจรในการรับส่งสัญญาณข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยโปรแกรมที่ใช้ในการส่งสัญญาณเอาต์พุตสามารถเขียนเป็นฟังก์ชันได้ดังในรูปที่ 3.16 และโปรแกรมที่ใช้ในการรับสัญญาณอินพุตสามารถเขียนเป็นฟังก์ชันได้ดังรูปที่ 3.17

```
#include <Wire.h>
#define PCF8591 (0x90 >> 1) // I2C bus address
void setup()
{
  Wire.begin();
}
void loop()
{
  OUT = Output;
  if(OUT <= 55)
  {
    OUT = 55;
  }
  if(OUT >= 180)
  {
    OUT = 180;
  }
  Serial.print(" Output MAP = ");
  Serial.println(OUT);
  Wire.beginTransmission(PCF8591); // wake up PCF8591
  Wire.write(0x40); // control byte - turn on DAC (binary 1000000)
  Wire.write(OUT); // value to send to DAC
  Wire.endTransmission(); // end transmission
}
```

รูปที่ 3.16 ฟังก์ชันในการส่งสัญญาณเอาต์พุต

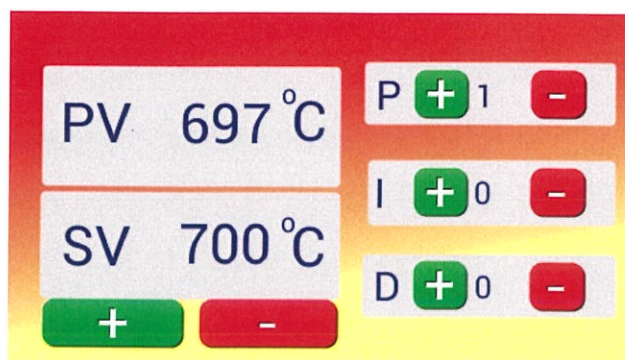
```
#include <max6675.h>
int ktcMISO = 14;
int ktcCS = 17;
int ktcSCLK = 15;
MAX6675 ktc(ktcSCLK, ktcCS, ktcMISO);

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  // give the MAX a little time to settle
  delay(500);
}

void loop() {
  // basic readout test
  Serial.print("\nDeg C = ");
  Serial.print(ktc.readCelsius());
  delay(500);
}
```

รูปที่ 3.17 ฟังก์ชันในการรับสัญญาณอินพุต

เมื่อนำอุปกรณ์ทั้งหมดดังกล่าวมาต่อใช้งานจริง และอัปโหลดโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นทั้งหมดลงไมโครคอนโทรลเลอร์จะได้หน้าจอแสดงผลดังรูปที่ 3.18 และกล่องควบคุมที่พัฒนาแล้วเสร็จพร้อมใช้งานดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.18 หน้าจอแสดงผล



รูปที่ 3.19 กล่องควบคุมที่พัฒนาแล้วเสร็จ

3.2.2 เทอร์โมคัปเปิล

เทอร์โมคัปเปิลที่ใช้เป็นของบริษัทรูทิมไลน์ รุ่น TKS/103 เป็นเทอร์โมคัปเปิลชนิดเค ย่าน วัดอุณหภูมิ -270 ถึง 1372 °C มีลักษณะหัวเป็นสแตนเลส 304 ซึ่งหัวสแตนเลสทนความร้อนได้ไม่สูงนักเมื่อนำไปวัดอุณหภูมิที่สูงกว่า 1000 °C ส่งผลให้หัววัดสแตนเลสเกิดเสียรูป ดังนั้นหัววัดที่เหมาะสมกับการวัดอุณหภูมิสูง ควรจะเป็นหัววัดเซรามิก เนื่องจากทนความร้อนได้สูงกว่า ซึ่งการประกอบหัวเข้ากับท่อเป็นลักษณะแบบไม่มีกราวด์ มีข้อดีคือ อายุการใช้งานยาวนาน และมีสัญญาณรบกวนน้อย แต่มีข้อเสียคือ เวลาการตอบสนองช้า ซึ่งผลให้กล่องควบคุมประมวลผลคลาดเคลื่อน ในการติดตั้งที่เตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำติดตั้งโดยการเพิ่มนอตตัวเมียที่ได้เข้าหลอมเพื่อใช้ยึดเทอร์โมคัปเปิล



รูปที่ 3.20 เทอร์โมคัปเปิลรุ่น TKS/103

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

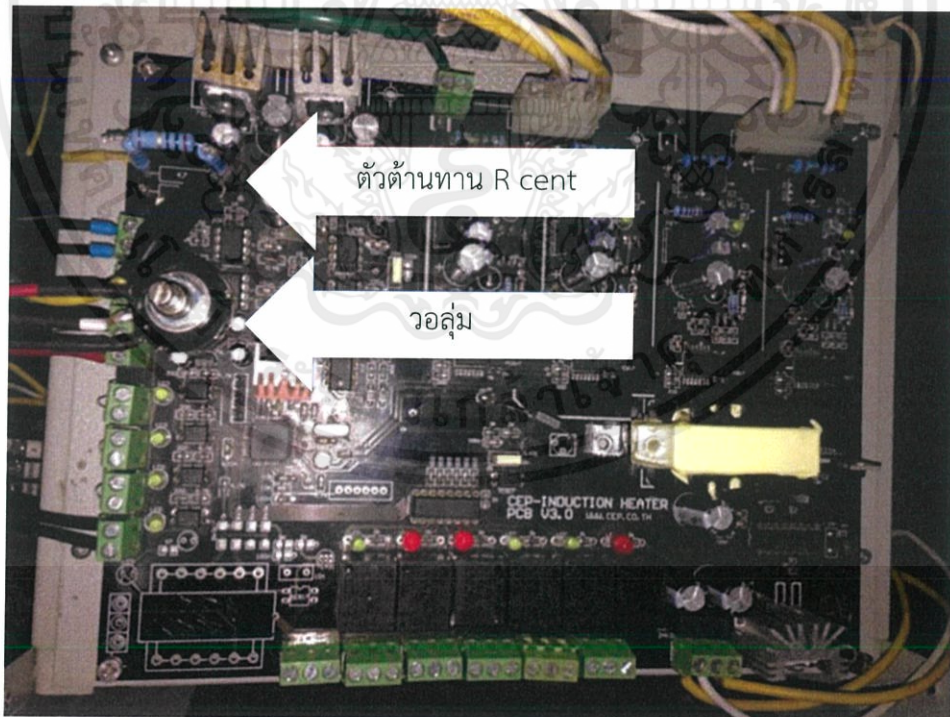
บทที่ 4

ผลการทดลอง

บทนี้นำเสนอการทดลองและผลการทดลองของปริญญานิพนธ์ ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 การทดลอง โดยการทดลองแรกเป็นการทดลองวงจรขับ การทดลองที่สองจะเป็นการวัดเทียบอุณหภูมิของเซนเซอร์ที่ใช้งาน การทดลองที่สามจะเป็นการทดลองการตอบสนองของเทอร์โมคัปเปิล การทดลองสุดท้ายเป็นการทดลองปรับค่าเกนของตัวควบคุมพีไอดี เพื่อควบคุมอุณหภูมิของเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ โดยรายละเอียดของการทดลองเป็นดังนี้

4.1 การทดลองวงจรขับ

ส่วนนี้เป็นการทดลองการปรับแรงดันที่ตกรวมวอลุ่มในเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ อาศัยการควบคุมแบบระบบวงเปิดเดิม ดังโครงสร้างในรูปที่ 3.1 เพื่อสังเกตความถี่และกระแสที่เปลี่ยนแปลง โดยวัดความถี่ของสัญญาณแรงดันที่ตกรวมจากตัวต้านทาน R cent ซึ่งเป็นสัญญาณเอาต์พุตของไอจีบีที ตามตำแหน่งดังรูปที่ 4.1 และวัดค่ากระแส โดยวัดจากแหล่งจ่ายไฟที่จ่ายให้กับเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำโดยใช้แคลมป์มิเตอร์ (Clamp Meter) ในการวัด ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.1



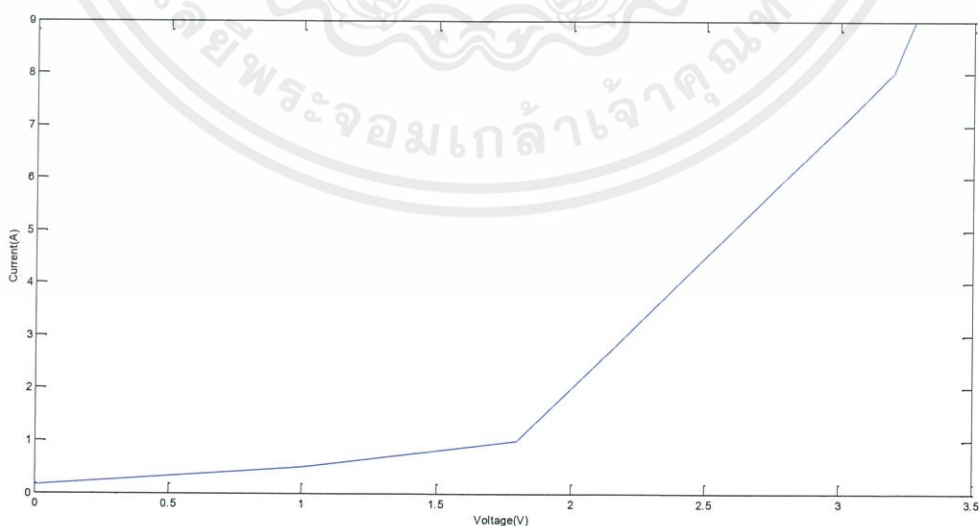
รูปที่ 4.1 บอร์ดเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองวงจรขับ

แรงดันตกคร่อมวอลุ่ม (V)	ความถี่ (kHz)	กระแส (A)
0	49.02	0.17
1	35.23	0.5
1.8	30.32	1
2	29.76	2
2.2	29.07	3
2.4	28.41	4
2.6	28.26	5
2.8	28.09	6
3	27.42	7
3.2	27.09	8
3.28	27.00	9

จากตารางจะเห็นว่าเมื่อปรับแรงดันเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความถี่น้อยลง ซึ่งความถี่ที่น้อยลงนี้ทำให้เข้าใกล้ความถี่เรโซแนนซ์มากขึ้น ส่งผลให้เกิดการไหลของกระแสสูงขึ้น ตามหลักการวงจรเรโซแนนท์ ส่วนการเปรียบเทียบระหว่างกระแสและแรงดัน พบว่ามีความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น แสดงดังรูปที่ 4.2 แต่ในการใช้งานจะเลือกใช้ย่านที่มีความเป็นเชิงเส้นเพื่อให้ง่ายสำหรับการควบคุม ซึ่งย่านที่เป็นเชิงเส้นมีแรงดันอยู่ในช่วง 1.8-3.2 V โดย 1.8 V จะคิดเป็น 0% และ 3.2 V คิดเป็น 100% ของสัญญาณควบคุมตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับกระแสในช่วง 1-8 A โดยจะใช้ค่าในย่านดังกล่าวในการควบคุมเตาเหนี่ยวนำความร้อนในระบบวงปิด



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสของเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การวัดเทียบอุณหภูมิ

หัวข้อนี้เป็นการวัดเทียบอุณหภูมิระหว่างค่าที่อ่านได้จากเทอร์โมคัปเปิล กับปืนวัดอุณหภูมิอินฟราเรดรุ่น AR872A เพื่อเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน โดยการวัดอุณหภูมิจะวัดเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว ซึ่งเป็นจุดที่สามารถวัดค่าอุณหภูมิได้แม่นยำที่สุด เนื่องจากการวัดค่าโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล มีผลตอบสนองเชิงเวลาที่ทำให้การอ่านค่ามีความล่าช้า กล่าวคือ อุณหภูมิที่อ่านได้ปัจจุบันยังไม่ใช่ค่าอุณหภูมิที่แท้จริง ดังกล่าวไว้ในหัวข้อ 2.6.3.4 โดยการทดลองวัดเทียบอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 4.3



(ก) การวัดเทียบอุณหภูมิด้วยปืนวัดอินฟราเรดอ่านค่าอุณหภูมิได้ $992.5\text{ }^{\circ}\text{C}$

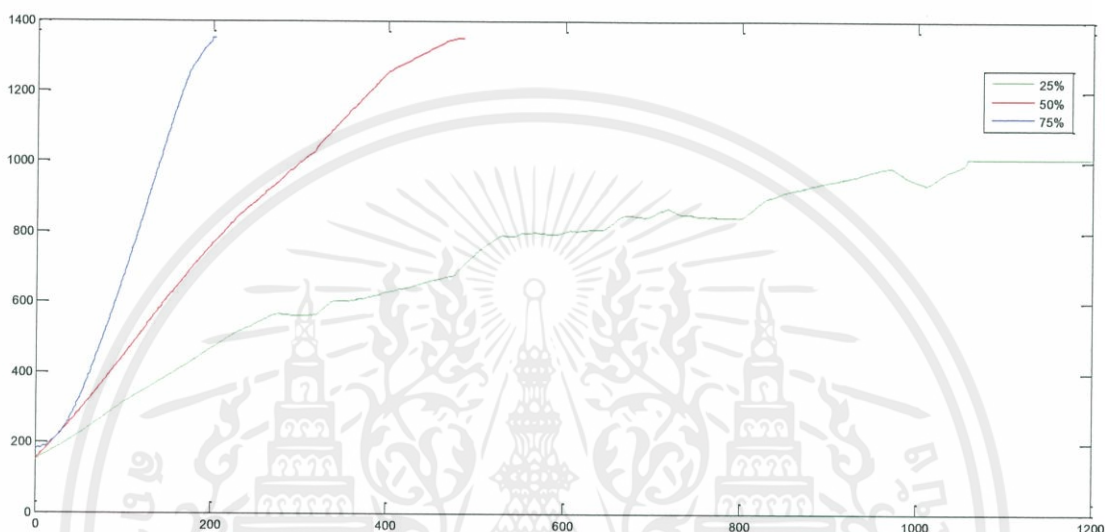


(ข) การวัดเทียบอุณหภูมิด้วยปืนอุณหภูมิอินฟราเรดอ่านค่าอุณหภูมิได้ $1361\text{ }^{\circ}\text{C}$

รูปที่ 4.3 การวัดเทียบอุณหภูมิด้วยปืนวัดอินฟราเรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าที่เทอร์โมคัปเปิลอ่านได้ยังกำลังเข้าสู่จุดอิ่มตัวอยู่ โดยสุดท้ายแล้วจะเข้าสู่จุดอิ่มตัวเช่นกัน การทดลองนี้เป็นการทดลองแบบวงเปิด เปรียบเทียบอินพุต 3 ค่า จะจ่ายอินพุตให้แผงวงจรที่ 25% 50% และ 75% ตามลำดับ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.4 ในช่วง 50% และ 75% เมื่อถึงจุดอิ่มตัวจะหยุดการทำงาน เพื่อเป็นการป้องกันอุณหภูมิที่สูงเกินพิกัดของเครื่อง และทำการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากปืนวัดอุณหภูมิแบบอินฟาเรด และค่าระดับสัญญาณดิจิตอล เพื่อนำมาหาค่าความละเอียดในการวัดอุณหภูมิสำหรับใช้กับเทอร์โมคัปเปิล แสดงดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.4 เอต์พุดอุณหภูมิที่อินพุต 25%, 50% และ 75%

ค่าเฉลี่ยค่าความละเอียดในการอ่านค่าของเทอร์โมคัปเปิลเท่ากับ $0.3284\text{ }^{\circ}\text{C}$ ต่อหนึ่งค่าระดับสัญญาณดิจิตอล หรือประมาณ $0.33\text{ }^{\circ}\text{C}$ ต่อหนึ่งค่าระดับสัญญาณดิจิตอล โดยปริณูณานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้ค่า $0.33\text{ }^{\circ}\text{C}$ ต่อหนึ่งค่าระดับสัญญาณดิจิตอล มาใช้เป็นค่าความละเอียดสำหรับแปลงค่าวัดจากเทอร์โมคัปเปิล ซึ่งจะทำให้ได้ค่าวัดอุณหภูมิจากปืนวัดอุณหภูมิอินฟาเรดดังตารางที่ 4.2 และได้ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน เท่ากับ -0.481%

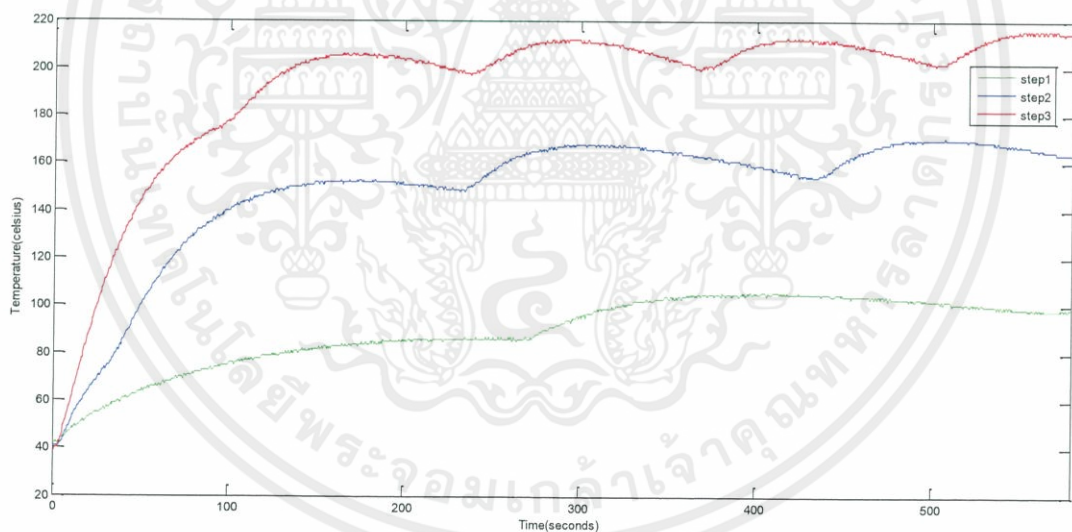
ตารางที่ 4.2 ค่าวัดอุณหภูมิจากปืนวัดอุณหภูมิอินฟาเรดและเทอร์โมคัปเปิล

ค่าระดับสัญญาณดิจิตอล	ค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากปืนวัดอุณหภูมิอินฟาเรด ($^{\circ}\text{C}$)	ค่าความละเอียด ($^{\circ}\text{C}$)	ค่าอุณหภูมิที่วัดจากเทอร์โมคัปเปิล ($^{\circ}\text{C}$)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน
3060	992.5	0.3243	1009.8	- 1.743%
4092	1361	0.3326	1350.36	0.781%

จากการทดลองพบว่าการจ่ายอินพุตทั้งสามระดับ จะได้อุณหภูมิที่สภาวะอยู่ตัวเพียงสองจุดเท่านั้น ยิ่งอินพุตมากกราฟก็จะยิ่งชันมาก ดังนั้นการวัดเทียบจะวัดที่อุณหภูมิที่สภาวะอยู่ตัวทั้งสองจุด โดยจุดแรกจะวัดเทียบที่เทอร์โมคัปเปิลวัดค่าอุณหภูมิได้ที่ $1009.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นวัดอุณหภูมิอินฟราเรดวัดค่าอุณหภูมิได้ที่ $992.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ได้เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ -1.743% และจุดที่สองวัดเทียบเทอร์โมคัปเปิลวัดค่าอุณหภูมิได้ที่ $1350.36\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นวัดอุณหภูมิอินฟราเรดวัดค่าอุณหภูมิได้ที่ $1361\text{ }^{\circ}\text{C}$ ได้เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.781% นำเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนทั้งสองค่ามาเฉลี่ยจะได้ค่าเท่ากับ -0.481% อยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้

4.3 การตอบสนองของเทอร์โมคัปเปิล

การทดลองนี้ทำเพื่อตรวจสอบการตอบสนองทางเวลาของเทอร์โมคัปเปิล ดังกล่าวไว้ในหัวข้อ 2.6.3.4 ซึ่งการทดลองนี้อาศัยเตารีดในการให้ความร้อน เนื่องจากสามารถทดลองได้ง่ายและมีความปลอดภัย โดยทำการทดลองวัดอุณหภูมิจากเตารีดใน 3 ระดับ ซึ่งจะรอนอุณหภูมิของเตารีดเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวก่อน โดยอาศัยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิตอลของบริษัท YOKOGAWA รุ่น 2455 วัดค่า จากนั้นจึงใช้เทอร์โมคัปเปิลเริ่มวัดค่าโดยวางให้สัมผัสกับเตารีดเพื่อวัดอุณหภูมิ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 การตอบสนองของเทอร์โมคัปเปิล

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.5 พบว่าเทอร์โมคัปเปิลต้องใช้เวลาการตอบสนองในการอ่านค่าอุณหภูมิ โดยสามารถประมาณค่าเวลาคงตัว (Time Constant) ของการตอบสนอง จากเวลาที่เริ่มวัดค่า ณ อุณหภูมิห้อง ขึ้นไปที่ 63% ของอุณหภูมิจริง ณ ค่าปลายของรูปสัญญาณ ซึ่งใช้เวลาประมาณ 1 นาที ณ ทั้ง 3 ระดับอุณหภูมิ

ดังนั้นเมื่อนำค่าอุณหภูมิที่อ่านได้นี้ไปเป็นสัญญาณอินพุตให้กล่องควบคุม อาจส่งผลให้ระบบเกิดค่าพุ่งเกินสูงสุด เนื่องจากเวลาตอบสนองที่เทอร์โมคัปเปิลอ่านได้ช้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การทดลองตัวควบคุมระบบวงปิด

การทดลองในส่วนนี้เป็นการทดลองการควบคุมวงปิด โดยทดลองปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดี โดยตั้งค่าเป้าหมายอยู่ที่ $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ และใช้อุณหภูมิเริ่มต้นอยู่ที่ $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ คาบเวลาการซีกตัวอย่าง T_s ประมาณ 0.5 วินาที ซึ่งจะแบ่งออกเป็น การปรับค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมแบบพี การปรับค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมแบบพีไอ การปรับค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมแบบพีดี และการปรับค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมแบบพีไอดี ซึ่งในการทดลองจะเริ่มจากเปิดเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ และวัดอุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิลให้เข้าใกล้ $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ แล้วทำการปิดเครื่อง หลังจากนั้นจึงเริ่มกระบวนการทำงานของทั้งเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ และกล่องควบคุม โดยการบันทึกผลเอาต์พุตค่าวัดอุณหภูมิ และสัญญาณควบคุม จะนำข้อมูลอุณหภูมิตั้งแต่เริ่มกระบวนการทำงานดังกล่าว ซึ่งอุณหภูมิเริ่มต้นจะมีค่าใกล้เคียง $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ แต่ไม่สามารถทำได้แม่นยำ และคงที่ในทุกการทดลอง

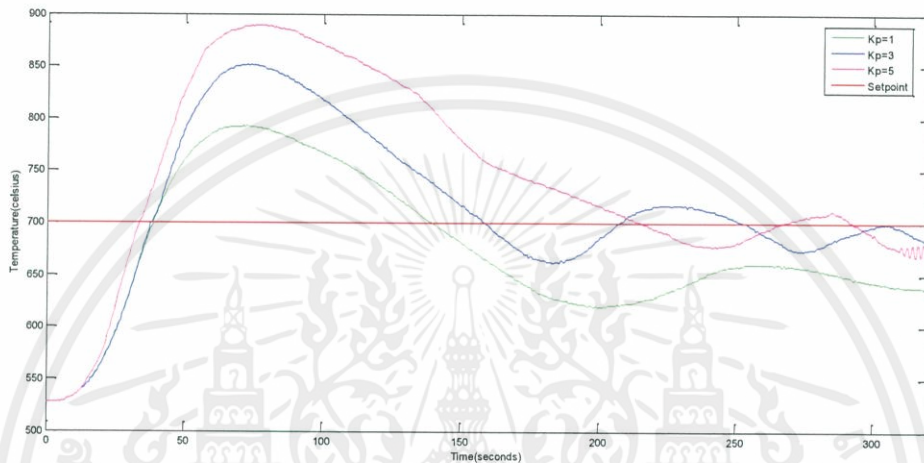


รูปที่ 4.6 การเตรียมการทดลองระบบวงปิด

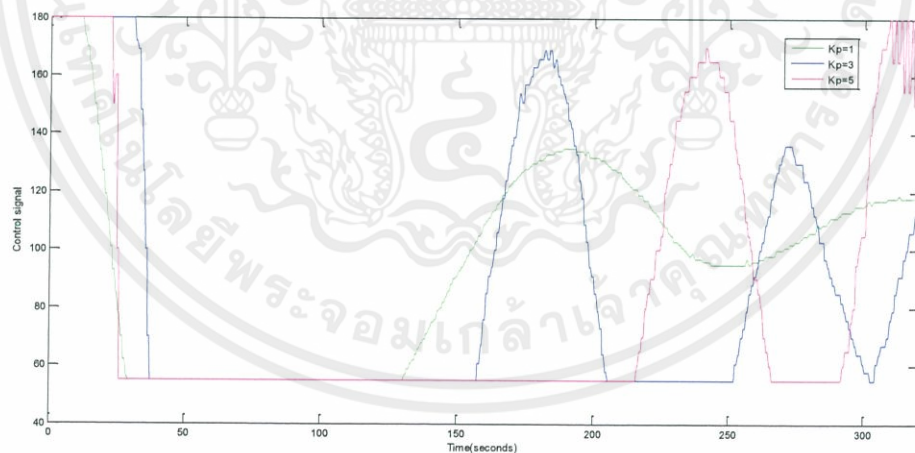
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1 ตัวควบคุมแบบพี

การทดลองเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำในระบบวงปิด โดยอาศัยตัวควบคุมแบบพี มีการปรับค่าพารามิเตอร์ 3 รูปแบบคือ $K_p = 1$ ดังเส้นสีเขียว $K_p = 3$ ดังเส้นสีน้ำเงิน และ $K_p = 5$ ดังเส้นสีชมพู แสดงสัญญาณเอาต์พุตค่าวัดอุณหภูมิดังรูปที่ 4.7 (ก) และสัญญาณควบคุมดังรูปที่ 4.7 (ข) ตามลำดับ



(ก) เอาต์พุตค่าวัดอุณหภูมิ



(ข) สัญญาณควบคุม

รูปที่ 4.7 การทดลองเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพี

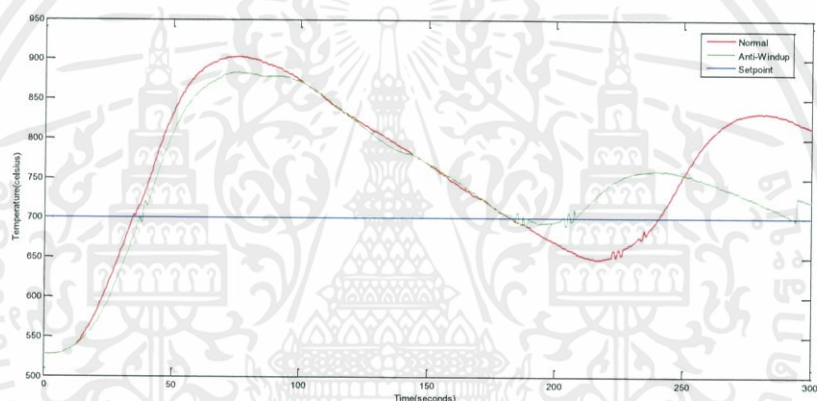
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 ตัวควบคุมแบบพีไอ

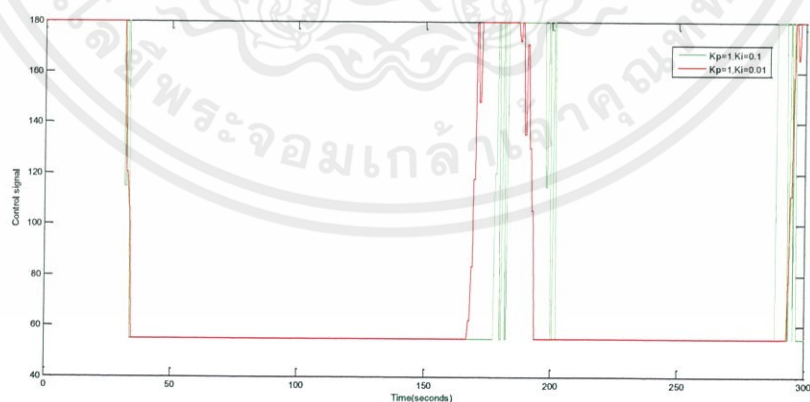
การทดลองในส่วนนี้เป็นการทดลองการควบคุมวงปิดโดยทดลองปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ โดยตั้งค่าอ้างอิงอยู่ที่ $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ ใช้อุณหภูมิเริ่มต้นอยู่ที่ $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ คาบเวลาการซีกตัวอย่างอยู่ที่ 0.5 วินาที ประกอบไปด้วยการเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมแบบพีไอที่ไม่มี การระงับปริพันธ์ และตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการระงับปริพันธ์ และผลเปรียบเทียบการปรับค่าเกน K_i ที่แตกต่างกัน

4.4.2.1 การระงับปริพันธ์

การทดลองเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำในระบบวงปิด โดยอาศัยตัวควบคุมแบบพีไอ ซึ่งประกอบไปด้วยตัวควบคุมพีไอแบบที่ไม่มีการระงับปริพันธ์ ดังเส้นสีแดง และตัวควบคุมพีไอที่มีการ ระงับปริพันธ์ ดังเส้นสีเขียว แสดงสัญญาณเอาต์พุตค่าวัดอุณหภูมิดังรูปที่ 4.8 (ก) และสัญญาณ ควบคุมดังรูปที่ 4.8 (ข) ตามลำดับ



(ก) เอาต์พุตค่าวัดอุณหภูมิ



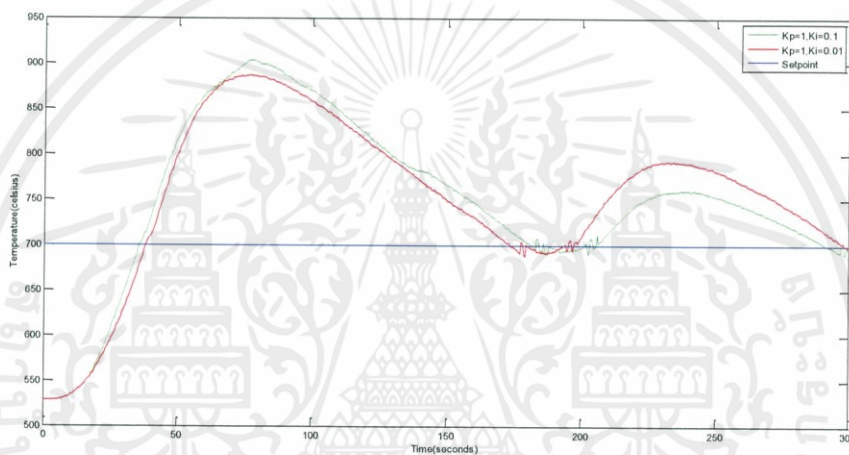
(ข) สัญญาณควบคุม

รูปที่ 4.8 การทดลองเปรียบเทียบเมื่อใช้ตัวควบคุมพีไอและพีไอแบบระงับปริพันธ์

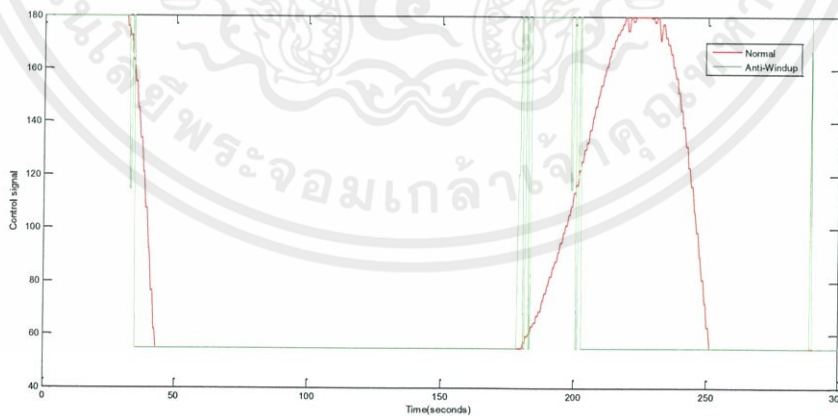
จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการระงับปริพันธ์สัญญาณควบคุมจะมีการลดลงก่อนถึงค่าเป้าหมายส่งผลให้เกิดค่าพุ่งเกินสูงสุดน้อยลง ดังนั้นในการทดลองอื่น ๆ ที่มีการใช้ตัวควบคุมแบบไอ จะใช้แบบที่มีการระงับปริพันธ์ เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ดีที่สุด

4.4.2.2 ตัวควบคุมแบบพีไอโดยปรับค่าเกน

การทดลองเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำในระบบวงปิด โดยอาศัยตัวควบคุมแบบพีไอ มีการปรับค่าพารามิเตอร์ 2 แบบ โดยจะคงค่าเกนของ $K_p = 1$ ซึ่งปรับเพียงค่าเกนของ K_i เพียงอย่างเดียว คือ $K_i = 0.01$ ดังเส้นสีแดง และ $K_i = 0.1$ ดังเส้นสีเขียว แสดงสัญญาณเอาต์พุตค่าวัตต์อุณหภูมิดังรูปที่ 4.9 (ก) และสัญญาณควบคุมดังรูปที่ 4.9 (ข) ตามลำดับ



(ก) เอาต์พุตค่าวัตต์อุณหภูมิ



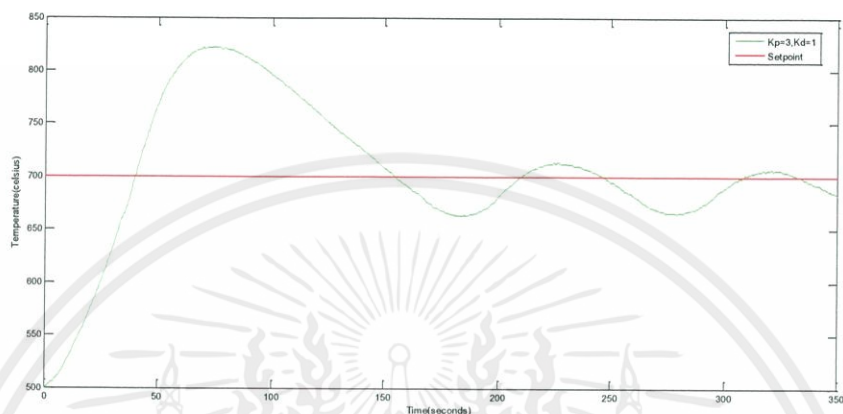
(ข) สัญญาณควบคุม

รูปที่ 4.9 การทดลองเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ

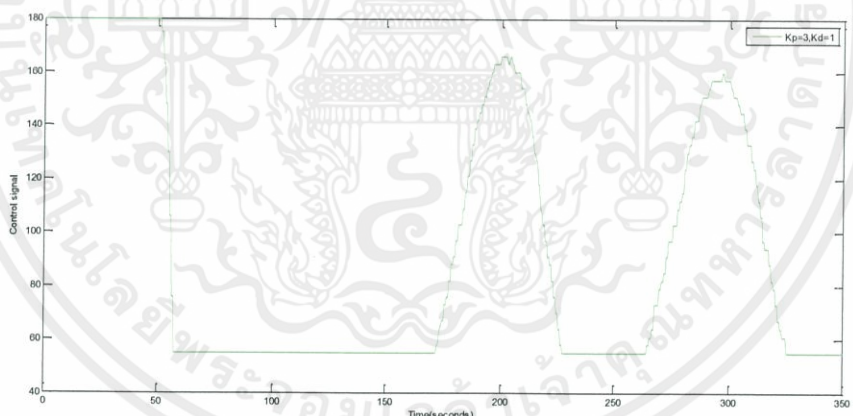
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 ตัวควบคุมแบบพีดี

การทดลองเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำในระบบวงปิด โดยอาศัยตัวควบคุมแบบพีดี มีการปรับค่าพารามิเตอร์ คือ $K_p = 3$ และ $K_d = 1$ ดังเส้นสีเขียว แสดงสัญญาณเอาต์พุตค่าวัดอุณหภูมิ ดังรูปที่ 4.10 (ก) และสัญญาณควบคุมดังรูปที่ 4.10 (ข) ตามลำดับ



(ก) เอาต์พุตค่าวัดอุณหภูมิ

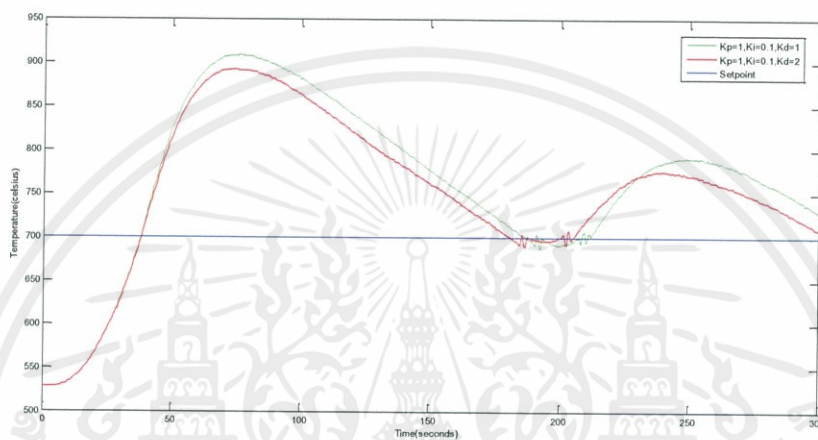


(ข) สัญญาณควบคุม

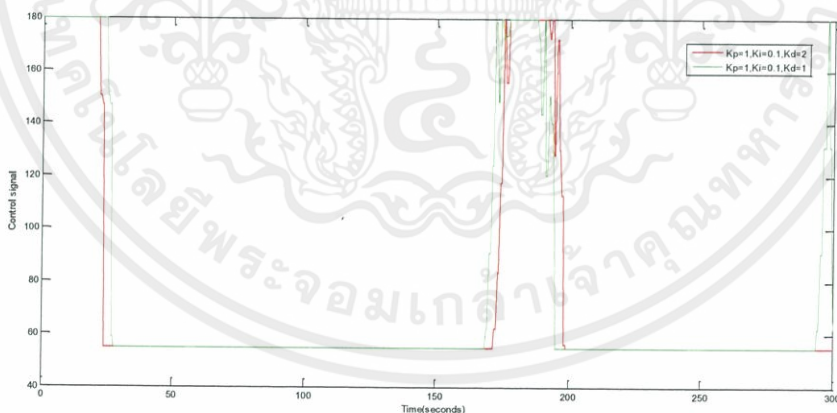
รูปที่ 4.10 การทดลองเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีดี

4.4.4 ตัวควบคุมแบบพีไอดี

การทดลองเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำในระบบวงปิด โดยอาศัยตัวควบคุมแบบพีไอดี มีการปรับค่าพารามิเตอร์ 2 แบบ โดยจะคงค่าเกินของ $K_p = 1$ และ $K_i = 0.1$ ซึ่งปรับเพียงค่าเกินของ K_d เพียงอย่างเดียว คือ $K_d = 1$ ดังเส้นสีเขียว และ $K_d = 2$ ดังเส้นสีแดง แสดงสัญญาณเอาต์พุตค่าวัตต์อุณหภูมิดังรูปที่ 4.11 (ก) และสัญญาณควบคุมดังรูปที่ 4.11 (ข) ตามลำดับทดลองการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดีดังรูปที่ 4.11



(ก) เอาต์พุตค่าวัตต์อุณหภูมิ



(ข) สัญญาณควบคุม

รูปที่ 4.11 การทดลองเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี

4.4.5 สมรรถนะของตัวควบคุม

จากผลการทดลองของตัวควบคุมแบบพี ตัวควบคุมแบบพีไอ ตัวควบคุมแบบพีดี และตัวควบคุมแบบพีไอดี สามารถนำมาเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุม แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สมรรถนะของตัวควบคุม

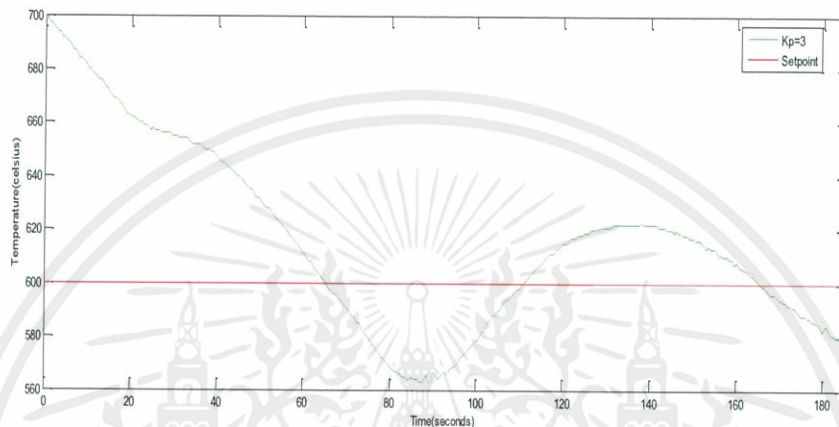
ค่าพารามิเตอร์พีไอดี			$t_r(s)$	M_p		$t_s(\pm 2\%)$	e_{ss}	
K_p	K_i	K_d		$^{\circ}C$	%		$^{\circ}C$	%
1	0	0	38.5	144	22.22	283	52	8.02
3	0	0	37.5	162.5	23.67	288.5	13.5	1.96
5	0	0	33.5	195	28.13	291.5	7	1.01
1	0.1	0	36	203	29	-	-	-
1	0.01	0	38	187	26.71	-	-	-
3	0	1	40	135	19.67	341	14	2.04
1	0.1	1	38	209	29.85	-	-	-
1	0.1	2	38.5	192	27.43	-	-	-

อนึ่ง ตารางที่ 4.3 ช่วงเวลาเข้าที่ t_s และค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัว e_{ss} เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ และแบบพีไอดี ไม่ได้ระบุค่าไว้เนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องของเวลาในการทดลอง และขีดจำกัดของเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ซึ่งจากตารางที่ 4.3 และผลการทดลอง การทดลองที่ 4.4.1 พบว่าเมื่อปรับค่าเกน K_p มากขึ้นจะทำให้ระบบถึงค่าเป้าหมายเร็วขึ้น และค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวก็น้อยลงเช่นเดียวกัน แต่จะมีค่าพุ่งเกินสูงสุด M_p เพิ่มมากขึ้น การทดลองที่ 4.4.2.1 พบว่าตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการระงับปริพันธ์สัญญาณควบคุมจะมีการลดลงก่อนถึงค่าเป้าหมายส่งผลให้เกิดค่าพุ่งเกินสูงสุดน้อยลง การทดลองที่ 4.4.2.2 พบว่าเมื่อปรับค่าเกน K_i เพิ่มมากขึ้นระบบจะถึงค่าเป้าหมายเร็วขึ้น แต่มีค่าพุ่งเกินสูงสุดเพิ่มมากขึ้น การทดลองที่ 4.4.3 พบว่าระบบถึงค่าเป้าหมายช้ากว่าการใช้ตัวควบคุมแบบพี แต่มีค่าพุ่งเกินสูงสุดน้อยกว่า และการทดลองที่ 4.4.4 พบว่าผลที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกับตัวควบคุมแบบพีไอ เมื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมทั้งหมด จึงเลือกใช้ตัวควบคุมแบบพี มีค่าเกน $K_p = 3$ $K_i = 0$ และ $K_d = 0$

4.4.6 การทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุม

การทดลองในส่วนนี้เป็นการทดลองการควบคุมวงปิด เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุมที่เลือกใช้ ดังสรุปในหัวข้อ 4.4.5 คือเมื่อเกน $K_p = 3$ $K_i = 0$ และ $K_d = 0$ ว่ายังสามารถใช้งานในได้ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายหรือไม่ โดยในการทดลองแรกใช้ค่าเป้าหมาย

600 °C จากอุณหภูมิเริ่มต้นที่ประมาณ 700 °C ได้สัญญาณเอาต์พุตค่าวัดอุณหภูมิดังรูปที่ 4.12 (ก) และสัญญาณควบคุมดังรูปที่ 4.12 (ข) และในการทดลองที่สองใช้ค่าเป้าหมาย 800 °C จากอุณหภูมิเริ่มต้นที่ประมาณ 700 °C ซึ่งจะได้สัญญาณเอาต์พุตค่าวัดอุณหภูมิดังรูปที่ 4.13 (ก) และสัญญาณควบคุมดังรูปที่ 4.13 (ข) ซึ่งพบว่าตัวควบคุมดังกล่าวสามารถควบคุมให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปยังค่าเป้าหมายได้ โดยยังคงมีสมรรถนะไม่เปลี่ยนแปลงจากเดิมมากเกินไปนั้น



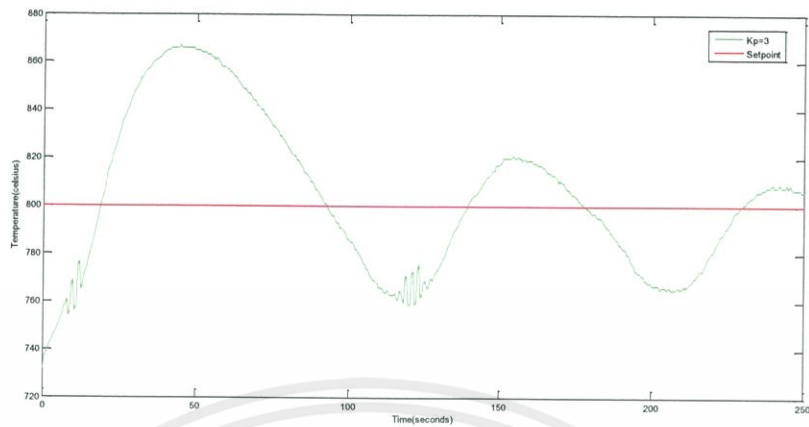
(ก) เอาต์พุตค่าวัดอุณหภูมิ



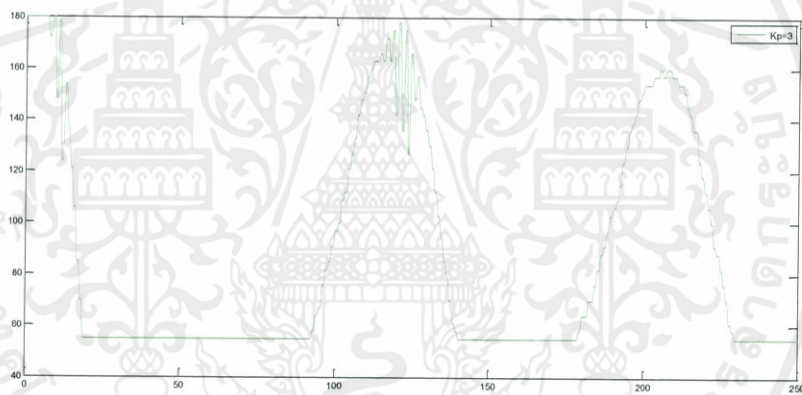
(ข) สัญญาณควบคุม

รูปที่ 4.12 การทดลองเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 700 °C เป็น 600 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) เอาต์พุตค่าวัดอุณหภูมิ



(ข) สัญญาณควบคุม

รูปที่ 4.13 การทดลองเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 700 °C เป็น 800 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทวิจารณ์และสรุปผล

5.1 สรุปการทดลอง

การทดลองแรก ผลการทดลองพบว่าเมื่อปรับแรงดันเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความถี่น้อยลง ซึ่งความถี่ที่น้อยลงนี้ทำให้เข้าใกล้ความถี่เรโซแนนท์มากขึ้นส่งผลให้เกิดการไหลของกระแสสูงขึ้น ตามหลักการวงจรเรโซแนนท์ ในส่วนของการเปรียบเทียบระหว่างกระแส และแรงดัน พบว่ามีความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น แต่ในการใช้งาน เลือกใช้เพียงย่านที่มีความเป็นเชิงเส้นเพื่อให้ง่ายสำหรับการควบคุม ซึ่งย่านที่เป็นเชิงเส้นมีแรงดันอยู่ในช่วง $1.8-3.2\text{ V}$ โดย 1.8 V คิดเป็น 0% และ 3.2 V คิดเป็น 100% และสอดคล้องกับกระแสในช่วง $1-8\text{ A}$

การทดลองที่สองเป็นการวัดเทียบอุณหภูมิพบว่า การจ่ายอินพุตทั้งสามค่าได้อุณหภูมิที่สถานะอยู่ตัวเพียงสองจุดเท่านั้น โดยยิ่งอินพุตมากกราฟก็ยิ่งชันมาก ซึ่งการวัดเทียบ วัดที่อุณหภูมิที่สถานะอยู่ตัวทั้งสองจุด โดยจุดแรกวัดเทียบที่เทอร์โมคัปเปิลวัดค่าอุณหภูมิได้ที่ $1009.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ และปืนวัดอุณหภูมิอินฟราเรดวัดค่าอุณหภูมิได้ที่ $992.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งได้ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ -1.743% และจุดที่สองวัดเทียบที่เทอร์โมคัปเปิลวัดค่าอุณหภูมิได้ที่ $1350.36\text{ }^{\circ}\text{C}$ และปืนวัดอุณหภูมิอินฟราเรดวัดค่าอุณหภูมิได้ที่ $1361\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งได้ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.781% ซึ่งค่าเฉลี่ยเท่ากับ -0.481% เป็นความคลาดเคลื่อนที่สามารถยอมรับได้

การทดลองที่สาม การตอบสนองของเทอร์โมคัปเปิล โดยใช้เตารีดในการให้ความร้อนวัดอุณหภูมิจากเตารีดใน 3 ระดับ พบว่าเทอร์โมคัปเปิลมีเวลาตอบสนองช้าในการอ่านค่าอุณหภูมิ โดยมีค่าเวลาคงตัวประมาณ 1 นาที ดังนั้นเมื่อนำค่าอุณหภูมิที่วัดได้โดยเทอร์โมคัปเปิลนี้ไปเป็นสัญญาณอินพุตให้กล่องควบคุมอุณหภูมิ อาจส่งผลให้ระบบเกิดค่าพุ่งเกินสูงสุดมาก

การทดลองสุดท้าย การทดลองตัวควบคุมระบบวงปิด เนื่องจากเทอร์โมคัปเปิลมีเวลาการตอบสนองช้าในการอ่านค่าอุณหภูมิ ทำให้เวลาที่จะเข้าสู่ค่าเป้าหมายนานและมีค่าพุ่งเกินสูงสุดค่อนข้างมากในทุกกรณี จากการทดลองพบว่าในกรณีตัวควบคุมแบบพี เมื่อมีการปรับค่าเกน K_p เพิ่มมากขึ้นทำให้ระบบเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้เร็วขึ้น และค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวลดน้อยลง แต่ค่าพุ่งเกินสูงสุดมากขึ้น ในกรณีตัวควบคุมแบบพีไอ มีการทดลองสองส่วนคือ ส่วนที่มีและไม่มี การระงับปริพันธ์ และส่วนการปรับค่าเกน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบตัวควบคุมพีไอที่มีการระงับปริพันธ์กับแบบที่ไม่มี การระงับปริพันธ์ พบว่าแบบที่มีการระงับปริพันธ์จะเกิดค่าพุ่งเกินสูงสุดน้อยกว่า ส่วนในการปรับค่าเกนพบว่าเมื่อปรับค่าเกน K_i เพิ่มขึ้นระบบก็จะมีค่าพุ่งเกินสูงสุดเพิ่มมากขึ้น ในกรณีตัวควบคุมแบบพีดี พบว่าระบบมีค่าเอาต์พุตคล้ายกับตัวควบคุมแบบพีแต่จะมีค่าพุ่งเกินสูงสุดน้อยลง แต่เวลาที่เข้าสู่ค่าเป้าหมายเพิ่มมากขึ้น กรณีสุดท้ายตัวควบคุมแบบพีไอดี เอาต์พุตมีลักษณะคล้ายกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ โดยเมื่อทำการลดค่าเกน K_d ระบบก็จะมีค่าพุ่งเกินสูงสุดลดน้อยลง เมื่อพิจารณาผลการทดลองทั้งหมดจึงเลือกใช้ตัวควบคุมแบบพี โดยเลือกค่าเกน $K_p = 3$ ซึ่งเมื่อนำตัวควบคุมที่เลือกมาทำการทดสอบประสิทธิภาพโดยเปลี่ยนค่าเป้าหมาย พบว่าระบบสามารถเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้โดยมีค่าความผิดพลาดที่สามารถยอมรับได้

5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข

1. เทอร์โมคัปเปิลที่ใช้วัดอุณหภูมิมีความล่าช้าในการวัด ทำให้ค่าที่วัดได้คลาดเคลื่อนกับค่าวัดจริง ซึ่งสามารถเปลี่ยนเป็นเซนเซอร์วัดอุณหภูมิชนิดอื่นที่มีผลตอบสนองที่รวดเร็ว อาทิ เลเซอร์วัดอุณหภูมิ
2. หัวเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้เป็นแอสตันเลส ซึ่งไม่ทนทานต่ออุณหภูมิที่สูง ซึ่งสามารถเปลี่ยนเป็นใช้หัวเซรามิกที่ทนความร้อนสูงแทน
3. โปรแกรมตัวควบคุมแบบพีไอดีของกล่องควบคุม ใช้การระงับปริพันธ์ แบบสำเร็จรูปของโปรแกรม Arduino ซึ่งไม่เหมือนกับการระงับปริพันธ์ทางทฤษฎี ซึ่งส่งผลให้ผลการทดลองที่ได้ไม่เป็นไปตามที่คาดไว้



เอกสารอ้างอิง

- [1] CEIA. 2017. Induction Heating Principles. [Online].Available : <http://www.ceia-power.com>.
- [2] John Davies and Peter Simpson. 1979. Induction Heating Handbook. New York : McGraw-Hill.
- [3] Oscar Lucía, Pascal Maussion, Enrique J. Dede and M. Burdío. “Induction Heating Tehnology and Its Applications: Past Developments, Current Technology, and Future Challenges.” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 61, no. 5, May. 2014. pp. 2509-2516.
- [4] Lei Lei Hnin, U Zaw Min Min Htun and Hla Myo Tun. “Fuzzy Logic Temperature Control System for the Induction Furnace.” International Journal of Scientific & Technology Research., Vol. 5, no. 6, June. 2016. pp. 130-134.
- [5] กัณฑ์ภณ วัชรเชียรสกุล, กิตติพัฒน์ มีศักดิ์ และณัฐวดี เทียมธรรมวงศ์. 2014. “การพัฒนาอุปกรณ์ควบคุมต้นทุ่นต่ำและการประยุกต์ใช้กับกระบวนการระดับ.” ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [6] FTDI Chip. 2017. FT800 - Display, Audio and Touch Graphics Controller IC. [Online].Available : <http://www.ftdichip.com/Products/ICs/FT800.html>.
- [7] Arduino. 2017. Examples from Libraries. [Online].Available : <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/LibraryExamples>.
- [8] ST. 2017. SG2525A SG3525A REGULATING PULSE WIDTH MODULATORS. [Online].Available : <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet>.
- [9] ปฐวี สนทอง, นัทรพล โภคาพันธ์. 2014. “การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์สำหรับเครื่องใช้ไฟฟ้ากำลังต่ำ.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [10] สถาพร สิทธิวงศ์, ประสิทธิ์ จันทรมนตรี. 2011. “การเหนี่ยวนำความร้อนสำหรับการเชื่อมท่อทองแดง.” ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คู่มือการใช้งานอุปกรณ์ในโครงการงาน

ก.1 คู่มือการใช้งานไอซี MAX6675

19-2235; Rev 1; 3/02



Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-to-Digital Converter (0°C to +1024°C)

General Description

The MAX6675 performs cold-junction compensation and digitizes the signal from a type-K thermocouple. The data is output in a 12-bit resolution, SPI™-compatible, read-only format.

This converter resolves temperatures to 0.25°C, allows readings as high as +1024°C, and exhibits thermocouple accuracy of 8LSBs for temperatures ranging from 0°C to +700°C.

The MAX6675 is available in a small, 8-pin SO package.

Features

- ◆ Direct Digital Conversion of Type -K Thermocouple Output
- ◆ Cold-Junction Compensation
- ◆ Simple SPI-Compatible Serial Interface
- ◆ 12-Bit, 0.25°C Resolution
- ◆ Open Thermocouple Detection

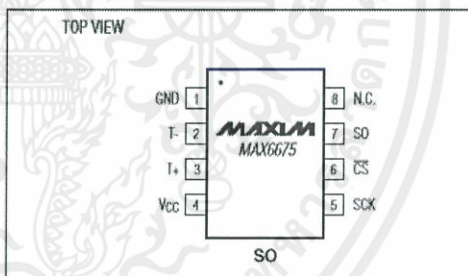
Ordering Information

PART	TEMP RANGE	PIN-PACKAGE
MAX6675ISA	-20°C to +85°C	8 SO

Applications

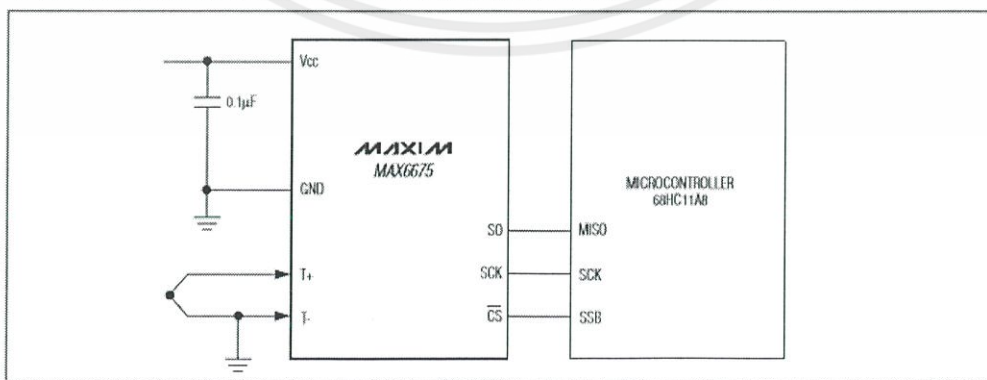
Industrial Appliances
HVAC
Automotive

Pin Configuration



SPI is a trademark of Motorola, Inc.

Typical Application Circuit



Maxim Integrated Products 1

For pricing, delivery, and ordering information, please contact Maxim/Dallas Direct! at 1-888-629-4642, or visit Maxim's website at www.maxim-ic.com.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-to-Digital Converter (0°C to +1024°C)

MAX6675

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Supply Voltage (V_{CC} to GND) -0.3V to +6V
 SO, SCK, CS, T-, T+ to GND -0.3V to V_{CC} + 0.3V
 SO Current 50mA
 ESD Protection (Human Body Model) $\pm 2000V$
 Continuous Power Dissipation ($T_A = +70^\circ C$)
 8-Pin SO (derate 5.88mW/ $^\circ C$ above +70 $^\circ C$) 471mW
 Operating Temperature Range -20 $^\circ C$ to +85 $^\circ C$

Storage Temperature Range -65 $^\circ C$ to +150 $^\circ C$
 Junction Temperature +150 $^\circ C$
 SO Package
 Vapor Phase (60s) +215 $^\circ C$
 Infrared (15s) +220 $^\circ C$
 Lead Temperature (soldering, 10s) +300 $^\circ C$

Stresses beyond those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated in the operational sections of the specifications is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

($V_{CC} = +3.0V$ to +5.5V, $T_A = -20^\circ C$ to +85 $^\circ C$, unless otherwise noted. Typical values specified at +25 $^\circ C$.) (Note 1)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	
Temperature Error		$T_{THERMOCOUPLE} = +700^\circ C$, $T_A = +25^\circ C$ (Note 2)	$V_{CC} = +3.3V$	-5		+5	LSB
			$V_{CC} = +5V$	-6		+6	
		$T_{THERMOCOUPLE} = 0^\circ C$ to $+700^\circ C$, $T_A = +25^\circ C$ (Note 2)	$V_{CC} = +3.3V$	-8		+8	
			$V_{CC} = +5V$	-9		+9	
		$T_{THERMOCOUPLE} = +700^\circ C$ to +1000 $^\circ C$, $T_A = +25^\circ C$ (Note 2)	$V_{CC} = +3.3V$	-17		+17	
			$V_{CC} = +5V$	-19		+19	
Thermocouple Conversion Constant				10.25		$\mu V/LSB$	
Cold-Junction Compensation Error		$T_A = -20^\circ C$ to +85 $^\circ C$ (Note 2)	$V_{CC} = +3.3V$	-3.0		+3.0	$^\circ C$
			$V_{CC} = +5V$	-3.0		+3.0	
Resolution				0.25		$^\circ C$	
Thermocouple Input Impedance				60		k Ω	
Supply Voltage	V_{CC}			3.0		5.5	V
Supply Current	I_{CC}				0.7	1.5	mA
Power-On Reset Threshold		V_{CC} rising		1	2	2.5	V
Power-On Reset Hysteresis					50		mV
Conversion Time		(Note 2)		0.17	0.22		s
SERIAL INTERFACE							
Input Low Voltage	V_{IL}					0.3 x V_{CC}	V
Input High Voltage	V_{IH}			0.7 x V_{CC}			V
Input Leakage Current	I_{LEAK}	$V_{IN} = GND$ or V_{CC}				± 5	μA
Input Capacitance	C_{IN}				5		pF
Output High Voltage	V_{OH}	$I_{SOURCE} = 1.6mA$				$V_{CC} - 0.4$	V
Output Low Voltage	V_{OL}	$I_{SINK} = 1.6mA$				0.4	V
TIMING							
Serial Clock Frequency	f_{SCL}					4.3	MHz
SCK Pulse High Width	t_{CH}			100			ns
SCK Pulse Low Width	t_{CL}			100			ns
CSB Fall to SCK Rise	t_{CSS}	$C_L = 10pF$		100			ns
CSB Fall to Output Enable	t_{DV}	$C_L = 10pF$			100		ns
CSB Rise to Output Disable	t_{TR}	$C_L = 10pF$			100		ns
SCK Fall to Output Data Valid	t_{DO}	$C_L = 10pF$			100		ns

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2 คู่มือการใช้งานไอซี PCF8591

8-bit A/D and D/A converter

PCF8591

1 FEATURES

- Single power supply
- Operating supply voltage 2.5 V to 6 V
- Low standby current
- Serial input/output via I²C-bus
- Address by 3 hardware address pins
- Sampling rate given by I²C-bus speed
- 4 analog inputs programmable as single-ended or differential inputs
- Auto-incremented channel selection
- Analog voltage range from V_{SS} to V_{DD}
- On-chip track and hold circuit
- 8-bit successive approximation A/D conversion
- Multiplying DAC with one analog output.

2 APPLICATIONS

- Closed loop control systems
- Low power converter for remote data acquisition
- Battery operated equipment
- Acquisition of analog values in automotive, audio and TV applications.

4 ORDERING INFORMATION

TYPE NUMBER	PACKAGE		
	NAME	DESCRIPTION	VERSION
PCA8591P	DIP16	plastic dual in-line package; 16 leads (300 mil); long body	SOT38-1
PCA8591T	SO16	plastic small outline package; 16 leads; body width 7.5 mm	SOT162-1



3 GENERAL DESCRIPTION

The PCF8591 is a single-chip, single-supply low power 8-bit CMOS data acquisition device with four analog inputs, one analog output and a serial I²C-bus interface. Three address pins A0, A1 and A2 are used for programming the hardware address, allowing the use of up to eight devices connected to the I²C-bus without additional hardware. Address, control and data to and from the device are transferred serially via the two-line bidirectional I²C-bus.

The functions of the device include analog input multiplexing, on-chip track and hold function, 8-bit analog-to-digital conversion and an 8-bit digital-to-analog conversion. The maximum conversion rate is given by the maximum speed of the I²C-bus.

8-bit A/D and D/A converter

PCF8591

6 PINNING

SYMBOL	PIN	DESCRIPTION
AINO	1	analog inputs (A/D converter)
AIN1	2	
AIN2	3	
AIN3	4	
A0	5	hardware address
A1	6	
A2	7	
V _{SS}	8	negative supply voltage
SDA	9	I ² C-bus data input/output
SCL	10	I ² C-bus clock input
OSC	11	oscillator input/output
EXT	12	external/internal switch for oscillator input
AGND	13	analog ground
V _{REF}	14	voltage reference input
AOUT	15	analog output (D/A converter)
V _{DD}	16	positive supply voltage

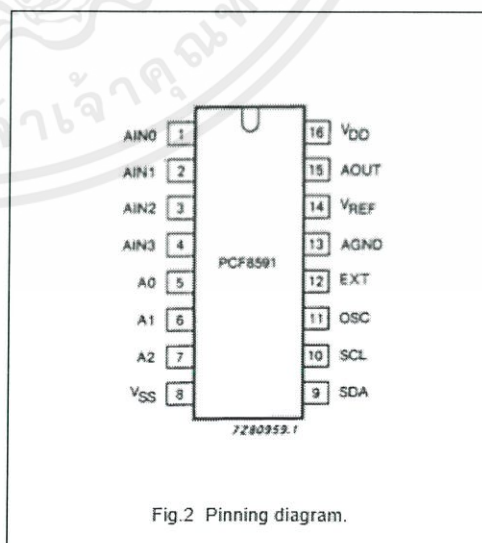


Fig.2 Pinning diagram.

LIMITING VALUES

In accordance with the Absolute Maximum Rating System (IEC 134).

SYMBOL	PARAMETER	MIN.	MAX.	UNIT
V _{DD}	supply voltage (pin 16)	-0.5	+8.0	V
V _I	input voltage (any input)	-0.5	V _{DD} + 0.5	V
I _I	DC input current	-	±10	mA
I _O	DC output current	-	±20	mA
I _{DD} , I _{SS}	V _{DD} or V _{SS} current	-	±50	mA
P _{tot}	total power dissipation per package	-	300	mW
P _O	power dissipation per output	-	100	mW
T _{amb}	operating ambient temperature	-40	+85	°C
T _{stg}	storage temperature	-65	+150	°C

11 DC CHARACTERISTICS

V_{DD} = 2.5 V to 6 V; V_{SS} = 0 V; T_{amb} = -40 °C to +85 °C unless otherwise specified.

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Supply						
V _{DD}	supply voltage (operating)		2.5	-	6.0	V
I _{DD}	supply current					
	standby	V _I = V _{SS} or V _{DD} ; no load	-	1	15	µA
	operating, AOUT off	f _{SCL} = 100 kHz	-	125	250	µA
	operating, AOUT active	f _{SCL} = 100 kHz	-	0.45	1.0	mA
V _{POR}	Power-on reset level	note 1	0.8	-	2.0	V
Digital inputs/output: SCL, SDA, A0, A1, A2						
V _{IL}	LOW level input voltage		0	-	0.3 × V _{DD}	V
V _{IH}	HIGH level input voltage		0.7 × V _{DD}	-	V _{DD}	V
I _L	leakage current A0, A1, A2	V _I = V _{SS} to V _{DD}	-250	-	+250	nA
		SCL, SDA	V _I = V _{SS} to V _{DD}	-1	-	+1
C _i	input capacitance		-	-	5	pF
I _{OL}	LOW level SDA output current	V _{OL} = 0.4 V	3.0	-	-	mA
Reference voltage inputs						
V _{REF}	reference voltage	V _{REF} > V _{AGND} ; note 2	V _{SS} + 1.6	-	V _{DD}	V
V _{AGND}	analog ground voltage	V _{REF} > V _{AGND} ; note 2	V _{SS}	-	V _{DD} - 0.8	V
I _{LI}	input leakage current		-250	-	+250	nA
R _{REF}	input resistance	pins V _{REF} and AGND	-	100	-	kΩ
Oscillator: OSC, EXT						
I _{LI}	input leakage current		-	-	250	nA
f _{OSC}	oscillator frequency		0.75	-	1.25	MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

D/A CHARACTERISTICS

$V_{DD} = 5.0 \text{ V}$; $V_{SS} = 0 \text{ V}$; $V_{REF} = 5.0 \text{ V}$; $V_{AGND} = 0 \text{ V}$; $R_L = 10 \text{ k}\Omega$; $C_L = 100 \text{ pF}$; $T_{amb} = -40 \text{ }^\circ\text{C}$ to $+85 \text{ }^\circ\text{C}$ unless otherwise specified.

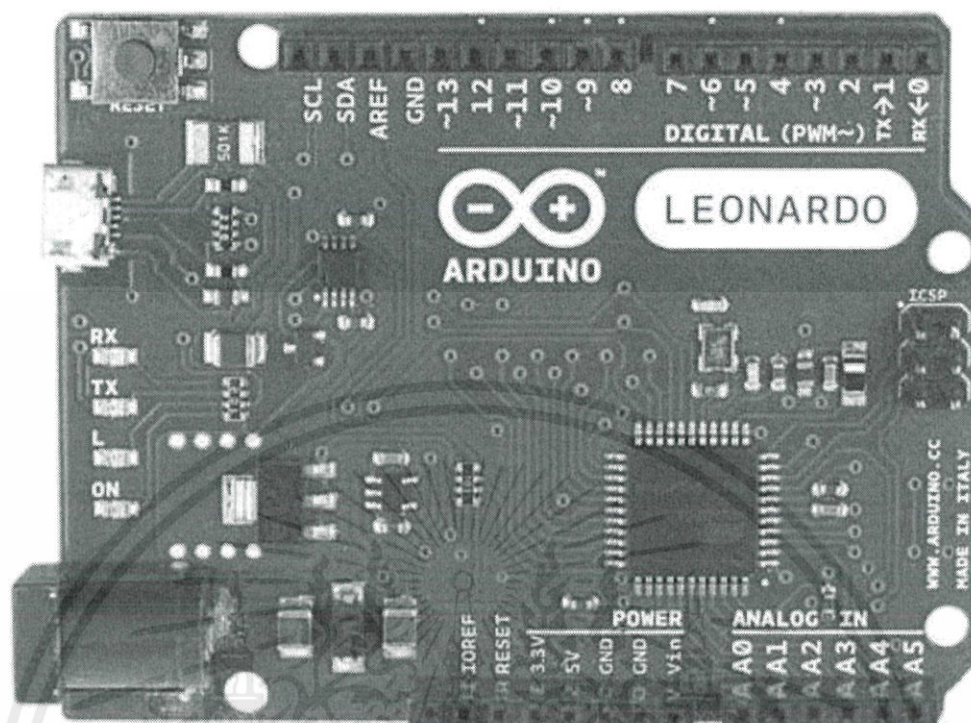
SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Analog output						
V_{OA}	output voltage	no resistive load	V_{SS}	-	V_{DD}	V
		$R_L = 10 \text{ k}\Omega$	V_{SS}	-	$0.9 \times V_{DD}$	V
I_{LO}	output leakage current	AOUT disabled	-	-	250	nA
Accuracy						
OS_e	offset error	$T_{amb} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	-	-	50	mV
L_e	linearity error		-	-	± 1.5	LSB
G_e	gain error	no resistive load	-	-	1	%
t_{DAC}	settling time	to $\frac{1}{2}$ LSB full scale step	-	-	90	μs
f_{DAC}	conversion rate		-	-	11.1	kHz
SNRR	supply noise rejection ratio	$f = 100 \text{ Hz}$; $V_{DDN} = 0.1 \times V_{PP}$	-	40	-	dB

A/D CHARACTERISTICS

$V_{DD} = 5.0 \text{ V}$; $V_{SS} = 0 \text{ V}$; $V_{REF} = 5.0 \text{ V}$; $V_{AGND} = 0 \text{ V}$; $R_S = 10 \text{ k}\Omega$; $T_{amb} = -40 \text{ }^\circ\text{C}$ to $+85 \text{ }^\circ\text{C}$ unless otherwise specified.

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Analog inputs						
V_{IA}	analog input voltage		V_{SS}	-	V_{DD}	V
I_{LIA}	analog input leakage current		-	-	100	nA
C_{IA}	analog input capacitance		-	10	-	pF
C_{ID}	differential input capacitance		-	10	-	pF
V_{IS}	single-ended voltage	measuring range	V_{AGND}	-	V_{REF}	V
V_{ID}	differential voltage	measuring range; $V_{FS} = V_{REF} - V_{AGND}$	$\frac{-V_{FS}}{2}$	-	$\frac{+V_{FS}}{2}$	V
Accuracy						
OS_e	offset error	$T_{amb} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	-	-	20	mV
L_e	linearity error		-	-	± 1.5	LSB
G_e	gain error		-	-	1	%
GS_e	small-signal gain error	$\Delta V_i = 16 \text{ LSB}$	-	-	5	%
CMRR	common-mode rejection ratio		-	60	-	dB
SNRR	supply noise rejection ratio	$f = 100 \text{ Hz}$; $V_{DDN} = 0.1 \times V_{PP}$	-	40	-	dB
t_{ADC}	conversion time		-	-	90	μs
f_{ADC}	sampling/conversion rate		-	-	11.1	kHz

ก.3 คู่มือการใช้งานบอร์ด Arduino Leonardo



Technical specs

Microcontroller	ATmega32u4
Operating Voltage	5V
Input Voltage (Recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	20
PWM Channels	7
Analog Input Channels	12
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega32u4) of which 4 KB used by bootloader
SRAM	2.5 KB (ATmega32u4)
EEPROM	1 KB (ATmega32u4)
Clock Speed	16 MHz
Length	68.6 mm
Width	53.3 mm
Weight	20 g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

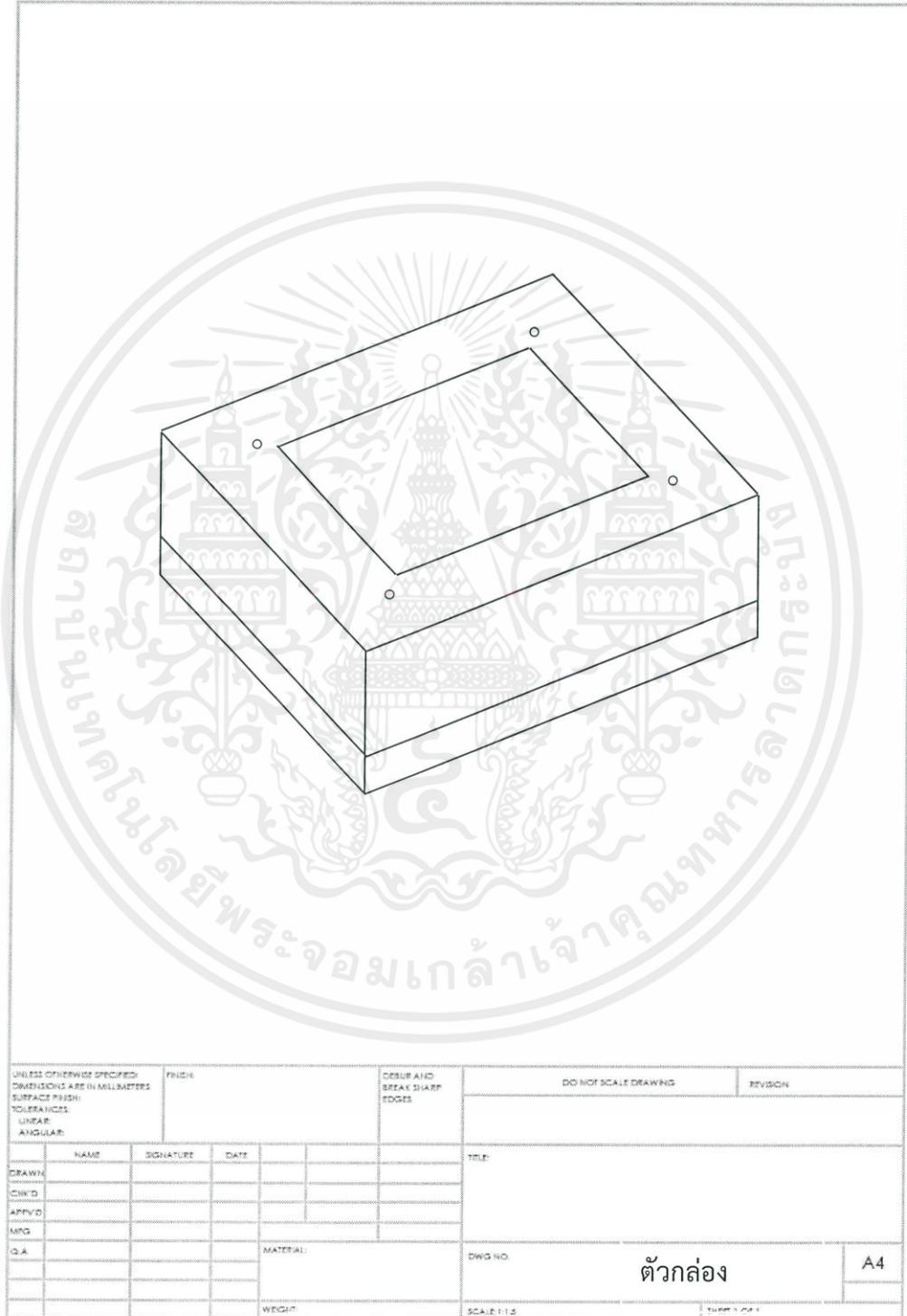
ก.4 ตารางลวดทองแดงมาตรฐาน AWG

AWG	Diameter [inches]	Diameter [mm]	Area [mm ²]	Resistance [Ohms / 1000 ft]	Resistance [Ohms / km]	Max Current [Amperes]	Max Frequency for 100% skin depth
0000 (4/0)	0.46	11.684	107	0.049	0.16072	302	125 Hz
000 (3/0)	0.4096	10.40384	85	0.0618	0.202704	239	160 Hz
00 (2/0)	0.3648	9.26592	67.4	0.0779	0.255512	190	200 Hz
0 (1/0)	0.3249	8.25246	53.5	0.0983	0.322424	150	250 Hz
1	0.2893	7.34822	42.4	0.1239	0.406392	119	325 Hz
2	0.2576	6.54304	33.6	0.1563	0.512664	94	410 Hz
3	0.2294	5.82676	26.7	0.197	0.64616	75	500 Hz
4	0.2043	5.18922	21.2	0.2485	0.81508	60	650 Hz
5	0.1819	4.62026	16.8	0.3133	1.027624	47	810 Hz
6	0.162	4.1148	13.3	0.3951	1.295928	37	1100 Hz
7	0.1443	3.66522	10.5	0.4982	1.634096	30	1300 Hz
8	0.1285	3.2639	8.37	0.6282	2.060496	24	1650 Hz
9	0.1144	2.90576	6.63	0.7921	2.598088	19	2050 Hz
10	0.1019	2.58826	5.26	0.9989	3.276392	15	2600 Hz
11	0.0907	2.30378	4.17	1.26	4.1328	12	3200 Hz
12	0.0808	2.05232	3.31	1.588	5.20864	9.3	4150 Hz
13	0.072	1.8288	2.62	2.003	6.56984	7.4	5300 Hz
14	0.0641	1.62814	2.08	2.525	8.282	5.9	6700 Hz
15	0.0571	1.45034	1.65	3.184	10.44352	4.7	8250 Hz
16	0.0508	1.29032	1.31	4.016	13.17248	3.7	11 k Hz
17	0.0453	1.15062	1.04	5.064	16.60992	2.9	13 k Hz
18	0.0403	1.02362	0.823	6.385	20.9428	2.3	17 kHz
19	0.0359	0.91186	0.653	8.051	26.40728	1.8	21 kHz
20	0.032	0.8128	0.518	10.15	33.292	1.5	27 kHz
21	0.0285	0.7239	0.41	12.8	41.984	1.2	33 kHz
22	0.0254	0.64516	0.326	16.14	52.9392	0.92	42 kHz
23	0.0226	0.57404	0.258	20.36	66.7808	0.729	53 kHz
24	0.0201	0.51054	0.205	25.67	84.1976	0.577	68 kHz
25	0.0179	0.45466	0.162	32.37	106.1736	0.457	85 kHz
26	0.0159	0.40386	0.129	40.81	133.8568	0.361	107 kHz
27	0.0142	0.36068	0.102	51.47	168.8216	0.288	130 kHz
28	0.0126	0.32004	0.081	64.9	212.872	0.226	170 kHz
29	0.0113	0.28702	0.0642	81.83	268.4024	0.182	210 kHz
30	0.01	0.254	0.0509	103.2	338.496	0.142	270 kHz
31	0.0089	0.22606	0.0404	130.1	426.728	0.113	340 kHz
32	0.008	0.2032	0.032	164.1	538.248	0.091	430 kHz
33	0.0071	0.18034	0.0254	206.9	678.632	0.072	540 kHz
34	0.0063	0.16002	0.0201	260.9	855.752	0.056	690 kHz
35	0.0056	0.14224	0.016	329	1079.12	0.044	870 kHz
36	0.005	0.127	0.0127	414.8	1360	0.035	1100 kHz
37	0.0045	0.1143	0.01	523.1	1715	0.0289	1350 kHz
38	0.004	0.1016	0.00797	659.6	2163	0.0228	1750 kHz
39	0.0035	0.0889	0.00632	831.8	2728	0.0175	2250 kHz
40	0.0031	0.07874	0.00501	1049	3440	0.0137	2900 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
แบบโครงสร้างกล่องควบคุม



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:	CORNER AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
NAME	SIGNATURE	DATE			TITLE:	
DRAWN						
CHECK'D						
APPROV'D						
MFG						
Q.A.			MATERIAL:		DWG NO.	ตัวกล่อง
			WEIGHT:		SCALE: 1:1.5	A4

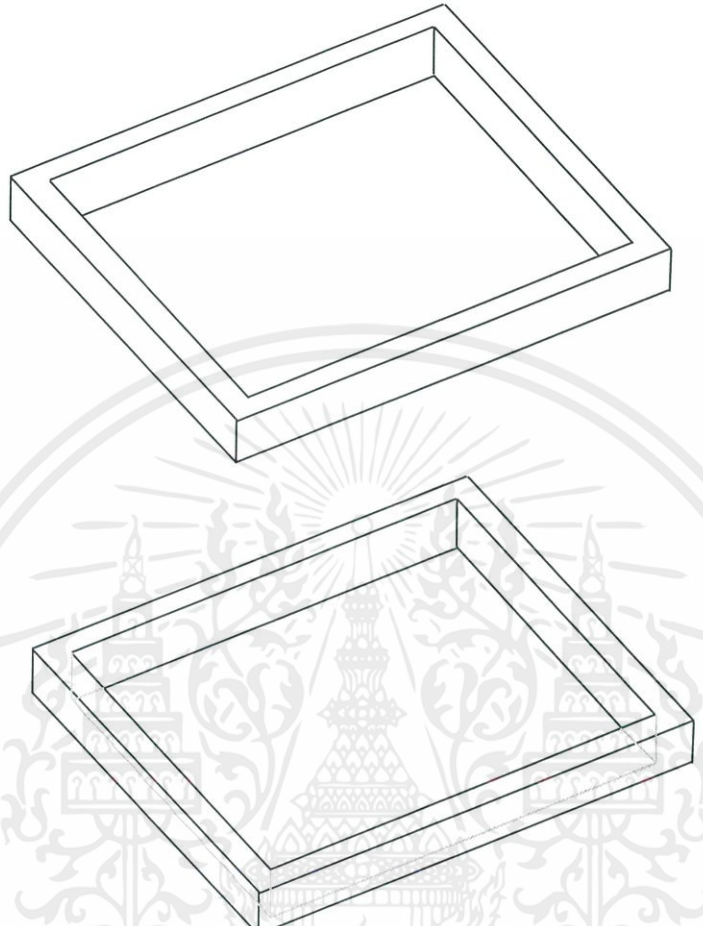
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:	DRESS AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE:			
DRAWN						
CHECK'D						
APP'VD						
MFG						
Q.A.			MATERIAL:	DWG NO.	ภาพฉาย	A4
			WEIGHT:	SCALE: 1:1.5	SHEET 1 OF 1	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH		DRESS AND DETAIL SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:									
NAME	SIGNATURE	DATE				TITLE:			
DRAWN									
CHECK'D									
APP'VD									
MFG									
C.A.				MATERIAL:		DWG NO.		ฝาบน	
								A4	
				WEIGHT:		SCALE: 1:1.5		SHEET 1 OF 1	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FRESH	DRESS AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
SURFACE FINISH:						
TOLERANCES:						
LINEAR:						
ANGULAR:						
NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE:			
DRAWN						
CHECK'D						
APP'D						
MFG						
C.A.			MATERIAL:	DWG NO.	ฝาล่าง	A4
			WEIGHT:	SCALE: 1:1.5		SHEET 1 OF 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้