

การจำลองการควบคุมอุณหภูมิระบบทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ
TEMPERATURE CONTROL SIMULATIONS OF AN INDUCTION
HEAT SYSTEM



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

การจำลองการควบคุมอุณหภูมิระบบทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

TEMPERATURE CONTROL SIMULATIONS OF AN INDUCTION
HEAT SYSTEM



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TEMPERATURE CONTROL SIMULATIONS OF AN INDUCTION
HEAT SYSTEM



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2559

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง


เรื่อง การจำลองการควบคุมอุณหภูมิระบบทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

TEMPERATURE CONTROL SIMULATIONS OF AN INDUCTION HEAT SYSTEM

ผู้จัดทำ นายจารุทัศน์ วัฒนกุลมณีชัย 56010165

นายณัฐพล มงคลสกุลฤทธิ 56010349




.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.ถาวร เบนญนราสุทธิ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำลองการควบคุมอุณหภูมิระบบทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

โดย

นายจารุทัศน์ วัฒนกุลมีชัย 56010165

นายณัฐพล มงคลสกุลฤทธิ์ 56010349

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร. ถาวร เภญจนราษฎร์

ปีการศึกษา 2559

บทคัดย่อ

ปัจจุบัน อุตสาหกรรมหลายด้าน เช่น งานโลหะ งานปรับปรุงคุณภาพอัญมณี มีการใช้งานเตา ความร้อนสูงเป็นจำนวนมาก ซึ่งการให้ความร้อนแก่วัสดุประเภทดังกล่าว ต้องให้ความร้อนที่เหมาะสมกับวัสดุนั้น โดยต้องไม่มากเกินไป และไม่น้อยเกินไป เช่น ในอุตสาหกรรมอัญมณี การให้ความร้อนแก่อัญมณี เพื่อปรับปรุงคุณภาพ เช่น สีและความสะอาด จะต้องอยู่ในช่วงที่เหมาะสม หากน้อยเกินไปก็ไม่สามารถทำให้คุณภาพสูงขึ้นได้ แต่หากมากเกินไปอาจทำให้อัญมณีนั้นเสียหายหรือกระทั่งหลอมละลายได้ ซึ่งในงานที่ต้องการความร้อนสูง นิยมใช้เตาความร้อนแบบเหนี่ยวนำ เนื่องจากสามารถสร้างความร้อนได้สูง แต่มีขนาดไม่ใหญ่ และไม่ใช้เชื้อเพลิงเผาไหม้

การควบคุมอุณหภูมิ จึงจำเป็นอย่างยิ่งในอุตสาหกรรม ทั้งเพื่อความปลอดภัย ความประหยัดพลังงานและเวลา เพื่อให้คุณภาพของชิ้นงานได้ออกมาตามความต้องการ ซึ่งปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ จะทำการจำลองระบบทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ เพื่อทราบพฤติกรรมของระบบ และสามารถควบคุมอุณหภูมิของระบบนั้น การจำลองจะปรับแต่งตัวควบคุมให้เหมาะสมเพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพ และมีสมรรถนะที่ยอมรับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TEMPERATURE CONTROL SIMULATIONS OF AN INDUCTION HEAT SYSTEM

By

Mr. Jarutad Wattanakulmeechai 56010165

Mr. Nathaphon Mongkolsakulrit 56010349

Advisor

Assoc. Prof. Dr. Tawon Benjanarasuth

Academic Year 2016

ABSTRACT

Nowadays, many industries such as steel fabrication and gemstone enhancements use many furnaces. Proper temperature is required to heat such materials. So it should not be too high or too low. For example, in gemstone industry, heating gemstones may enhance their qualities in terms of color and clarity; however, the temperature must be in a proper range. If it is too low, the quality of gemstones will not be enhanced. But, if it is too high, it might damage or melt the gemstones. For industries requiring high temperature, an induction heat furnace is recently a popular choice due to its efficiency despite its comparably small size and low pollution.

Temperature control, therefore, plays a significant role in these industries for the safety, energy and time saving reasons, and to deliver products that meet expectations. This thesis will simulate the induction heating system in order to study its behaviors and its temperature control. The simulations are conducted to adjust the controller that the system is stable with acceptable performance.

||

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ทางผู้เขียนต้องขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ถาวร เบญจนราสุทธิ อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูงที่ได้ให้ความรู้ คำปรึกษา แนวทางสำหรับการแก้ไขปัญหา การตรวจทานแก้ไขรูปเล่มของปริญญานิพนธ์ ตลอดจนการฝึกฝนให้ผู้เขียนมีความสามารถในการทำวิจัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงให้ความเอาใจใส่ดูแลสอบถามถึงความก้าวหน้าอย่างสม่ำเสมอ

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมกรรมวัดและควบคุม ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัย ตลอดจนอำนวยความสะดวก ให้แก่ผู้เขียนจนสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสิ้น

ขอขอบคุณ ผู้แต่งหนังสือและเอกสารอ้างอิงต่างๆ ที่ผู้เขียนได้นำมาใช้อ้างอิงเพื่อศึกษาและจัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ด้วย



ผู้จัดทำ

จารุทัศน์ วัฒนกุลมีชัย

ณัฐพล มงคลสกุลฤทธิ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 จุดประสงค์ของโครงการ	1
1.2 ขอบเขตของโครงการ	1
1.3 เนื้อหาปริญญานิพนธ์	2
บทที่ 2 การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ	3
2.1 หลักการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ	3
2.2 ปรัชญาการทางผิว	4
2.3 ผลของอุณหภูมิ	5
2.3.1 ความร้อนจำเพาะ	6
2.3.2 ความต้านทานจำเพาะ	6
2.4 ขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงาน	7
2.5 วงจรสมมูลขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงาน	10
2.6 สมการสำหรับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	12
2.7 สมการอุณหภูมิของชิ้นงาน	14
2.8 พารามิเตอร์ของวงจร	15
บทที่ 3 การจำลองระบบควบคุม	18
3.1 การควบคุมแบบลูปเดี่ยว	18
3.1.1 ระบบเตาความร้อนแบบเหนี่ยวนำ	19
3.1.2 ตัวควบคุม	21
3.1.3 เครื่องมือวัด	22
3.2 ตัวควบคุมแบบพีไอดี	22

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2.1 ตัวควบคุมแบบพี	22
3.2.2 ตัวควบคุมแบบพีไอ	23
3.2.3 ตัวควบคุมแบบพีดี	24
3.2.4 ตัวควบคุมแบบพีไอดี	25
3.2.5 ตัวควบคุมแบบพีไอดีเวลาติสคริต	27
3.2.6 การระงับปริพันธ์	27
บทที่ 4 ผลการจำลอง	31
4.1 การจำลองแบบวงเปิด	31
4.2 การจำลองโดยใช้การควบคุมแบบพีไอดี	32
4.2.1 ตัวควบคุมแบบพี	32
4.2.2 ตัวควบคุมแบบพีไอ	34
4.2.2.1 การระงับปริพันธ์	35
4.2.2.2 ตัวควบคุมแบบพีไอโดยปรับค่าเกน	36
4.2.3 ตัวควบคุมแบบพีดี	37
4.2.4 ตัวควบคุมแบบพีไอดี	38
4.3 การทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุม	39
บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุปผล	42
5.1 สรุปการจำลอง	42
5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข	42
เอกสารอ้างอิง	43
ภาคผนวก	44
ภาคผนวก ก. โปรแกรม MATLAB	45
*ก.1 แสดงระบบควบคุมอุณหภูมิของเตาความร้อนแบบเหนี่ยวนำ	45
ก.2 แสดงแบบจำลองเครื่องมือวัด	45
ก.3 แสดงส่วนของอินพุตที่เป็นกระแสไฟฟ้า	45
ก.4 แสดงส่วนของสมการจากกระแสไฟฟ้าเป็นความถี่	46
ก.5 แสดงส่วนของเอาต์พุตที่เป็นอุณหภูมิ	46

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
2.1	หลักการพื้นฐานการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ	3
2.2	วงจรสมมูลของหม้อแปลงและขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงาน	4
2.3	การกระจายความหนาแน่นของกระแสกับความถี่ผิว	5
2.4	ความจุความร้อนของโลหะชนิดที่แตกต่างกัน	6
2.5	ความต้านทานจำเพาะที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ	7
2.6	ผลการทดลองวัดค่าความเหนี่ยวนำ ความต้านทานกับอุณหภูมิ	8
2.7	ลักษณะของชิ้นงานที่ใช้ในการคำนวณหาความต้านทาน	9
2.8	เส้นแรงแม่เหล็กที่คล้อยผ่านขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงาน	10
2.9	สมมูลทางแม่เหล็กของขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงาน	11
2.10	วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำ	11
2.11	พิกัดทางเรขาคณิตและที่ใช้วิเคราะห์ในเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ	12
2.12	วงจรขับของระบบทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ	16
3.1	การควบคุมแบบลูบเดียว	18
3.2	ระบบเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ	19
3.3	ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพี	23
3.4	ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบไอ	24
3.5	ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบดี	25
3.6	บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบพีไอดี	26
3.7	ผลตอบสนองเมื่อไม่มีและมีการระงับการปรับตั้ง	28
4.1	ผลการจำลองอุณหภูมิของระบบวงเปิด	31
4.2	ผลการทดลองอ้างอิงของระบบทำความร้อนแบบวงเปิด	32
4.3	ผลการจำลองเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพี	33
4.4	สัญญาณควบคุมของกระแสไฟฟ้า	33
4.5	ผลการทดลองอ้างอิงเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพี	34
4.6	ผลการทดลองอ้างอิงของสัญญาณควบคุมของกระแสไฟฟ้า	34
4.7	ผลการจำลองเมื่อใช้ตัวควบคุมพีไอและพีไอแบบระงับปรับตั้ง	35

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 ผลการจำลองเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ	36
4.9 ผลการจำลองเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีดี	37
4.10 ผลการจำลองเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี	38
4.11 การทดลองเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 700 °C เป็น 600 °C	39
4.12 การทดลองเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 700 °C เป็น 800 °C	40
ก.1 ระบบควบคุมอุณหภูมิของเตาความร้อนเหนี่ยวนำ	45
ก.2 แบบจำลองเครื่องมือวัด	45
ก.3 อินพุตของระบบ	46
ก.4 กระแสไฟฟ้าเป็นความถี่	46
ก.4 กระแสไฟฟ้าเป็นความถี่	46
ก.5 เอาต์พุตของระบบ	47
ก.6 พารามิเตอร์	47

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ค่าพารามิเตอร์ของระบบเตาความร้อนแบบเหนี่ยวนำ	20
3.2 คุณสมบัติของแกรไฟต์ประเภท POCO	21
3.3 ผลกระทบจากการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดี	26



บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ (Induction heating) ได้รับความนิยมอย่างมากในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อาทิ อุตสาหกรรมรถยนต์ที่ใช้ในการหลอมชิ้นรูปขึ้นส่วน ที่ต้องใช้เตาทำความร้อนในกระบวนการผลิต อีกทั้งยังใช้ในการเผาปรับปรุงคุณภาพพลอย และการหลอมชิ้นรูป ซึ่งต้องใช้ความร้อนสูง และอุณหภูมิที่แม่นยำ ยิ่งไปกว่านั้น การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำมีข้อดีหลายประการ อาทิ เป็นการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ เป็นการให้ความร้อนที่ไม่อาศัยการเผาไหม้จึงทำให้ไม่เกิดมลพิษ

การศึกษาในวิศวกรรมระบบควบคุม เป็นการศึกษาและประยุกต์การใช้งานทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง เช่น การออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อควบคุมเสถียรภาพและมีสมรรถนะเป็นไปตามที่ต้องการหรือให้เป็นไปตามข้อกำหนด โดยก่อนการงานจริงเพื่อป้องกันความผิดพลาดและเป็นการยืนยันเสถียรภาพและสมรรถนะของระบบที่ออกแบบ การจำลองโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงนิยมดำเนินการ โดยในปริญญาโทฉบับนี้ได้ศึกษาการควบคุมอุณหภูมิของระบบทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ โดยการศึกษาทฤษฎีเรื่องการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำเพื่อหาแบบจำลองของเตาความร้อนแบบเหนี่ยวนำและศึกษาแบบจำลองการควบคุมอุณหภูมิของระบบทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

1.1 จุดประสงค์การทำโครงการ

1. ศึกษาทฤษฎีเรื่องการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ
2. จำลองการควบคุมอุณหภูมิของระบบทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

1.2 ขอบเขตของการทำโครงการ

1. ศึกษาข้อมูลการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำจากหนังสือและเอกสารทางวิชาการ
2. สร้างแบบจำลองระบบเตาความร้อนแบบเหนี่ยวนำ
3. สร้างแบบจำลองระบบควบคุมอุณหภูมิของเตาความร้อนแบบเหนี่ยวนำ
4. บันทึกผล วิเคราะห์ผล สรุปผล และจัดทำปริญญานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 เนื้อหาปริญญาานิพนธ์

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งออกเป็น 5 บท ซึ่งมีเนื้อหา ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงจุดประสงค์ ขอบเขตของโครงการ พร้อมทั้งรายละเอียดของปริญญาานิพนธ์ ของแต่ละบทในปริญญาานิพนธ์

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโครงการ กล่าวถึงหลักการ และทฤษฎีในการจัดทำโครงการ หลักการเหนี่ยวนำความร้อน สมการอุณหภูมิจากชั้นงาน

บทที่ 3 ระบบควบคุมอุณหภูมิ อธิบายแบบจำลองของระบบควบคุมสำหรับเตาความร้อนแบบเหนี่ยวนำ และตัวควบคุม ซึ่งใช้ในปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 4 ผลการจำลอง แสดงค่าอุณหภูมิต่อเวลาที่ได้จากการจำลองของเตาความร้อนแบบเหนี่ยวนำ และการควบคุมอุณหภูมิโดยใช้ตัวควบคุมตามทฤษฎี

บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุปผล ซึ่งจะสรุปผลการดำเนินงานในโครงการทั้งหมด ปัญหาที่พบ และแนวทางการปรับปรุงแก้ไขรวมไปถึงการพัฒนาโครงการนี้ต่อไป

ในส่วนท้ายของปริญญาานิพนธ์ประกอบด้วยภาคผนวก ซึ่งอธิบายแบบจำลองการควบคุมอุณหภูมิระบบทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำโดยอาศัยโปรแกรม MATLAB

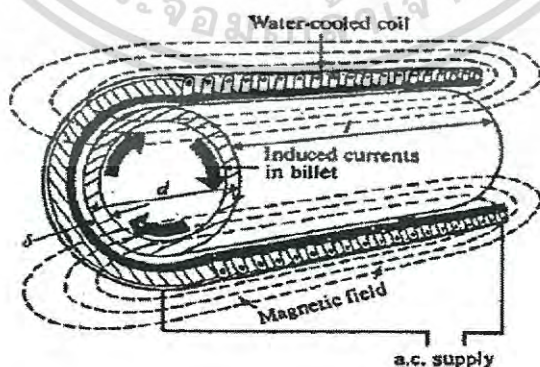
บทที่ 2

การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำเป็นวิธีการให้ความร้อนกับชิ้นงานโดยการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า ซึ่งไม่มีการสัมผัสกันระหว่างชิ้นงานกับขดลวด ซึ่งในบทนี้ จะอธิบายเกี่ยวกับหลักการทำงานของเตา ความร้อนแบบเหนี่ยวนำโดยอาศัยการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า อุณหภูมิของเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ซึ่งเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ (Induction furnace) จะประกอบด้วย 3 ส่วนใหญ่ๆ คือขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงานที่จะให้ความร้อน (Work-coil and Work-piece) อินเวอร์เตอร์ (Inverter) และแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง โดยมีเนื้อหาดังหัวข้อต่อไปนี้

2.1 หลักการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

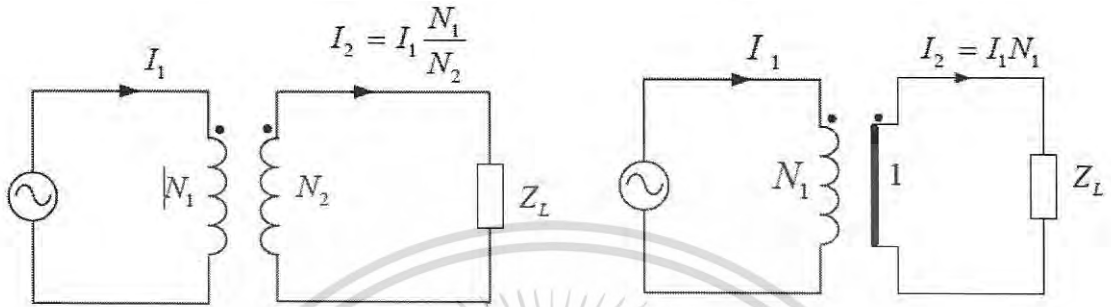
การเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นหลักการพื้นฐานของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำหลักการนี้ได้นำมาใช้ในมอเตอร์เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้า เป็นต้น จากหลักการนี้ชิ้นงานจะเกิดความร้อนขึ้นซึ่งมีผลมาจากกระแสซึ่งเรียกว่ากระแสไหลวน (Eddy current) ในปัจจุบันได้นำหลักการเกิดความร้อนจากการเกิดกระแสไหลวนดังกล่าวมาใช้เพื่อให้ความร้อนกับชิ้นงานที่เรียกว่า เตาความร้อนแบบเหนี่ยวนำ การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าให้ขดลวดที่พันรอบชิ้นงาน โดยไม่สัมผัสกัน กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านขดลวด ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กตามแกนของชิ้นงาน เหนี่ยวนำทำให้เกิดความร้อนกับชิ้นงาน และใช้น้ำหล่อเย็นไหลผ่านในขดลวดเพื่อลดความร้อน ซึ่งอาจทำให้เครื่องเสียหายได้ ดังรูปที่ 2.1 [2]



รูปที่ 2.1 หลักการพื้นฐานการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยหลักการทำงานพื้นฐานคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.2 (ก) ซึ่งชิ้นงานเปรียบเสมือนขดลวดทุติยภูมิ (Secondary winding) ที่ลัดวงจร และขดลวดปฐมภูมิ (Primary winding) ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กค้ำผ่านชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ข)



(ก) วงจรสมมูลอย่างง่ายของหม้อแปลง

(ข) วงจรสมมูลของขดเหนี่ยวนำกับชิ้นงาน

รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของหม้อแปลงและขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงาน

สนามแม่เหล็กที่ค้ำผ่านชิ้นงานจะเหนี่ยวนำทำให้เกิดกระแสไหลวนที่ชิ้นงานและจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ชิ้นงาน ขึ้นอยู่กับปริมาณของกระแสไหลวน และความต้านทานของชิ้นงาน โดยที่กระแสจะหาได้จากความเข้มของสนามแม่เหล็ก ความต้านทานหาได้จากค่าความต้านทานจำเพาะ (Resistivity) และความซึมซาบแม่เหล็กของชิ้นงาน (Permeability, μ)

2.2 ปรากฏการณ์ทางผิว

ปรากฏการณ์ทางผิวเกิดขึ้นโดยเมื่อกระแสเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้กระแสที่เหนี่ยวนำชิ้นงานมีความเข้มสูงขึ้นที่บริเวณรอบผิวของชิ้นงาน และจะลดลงเมื่อลึกเข้ามาในเนื้อผิวตามแนวรัศมีดังสมการที่ (2.1)

$$i_x = i_0 e^{-\frac{x}{\delta}} \quad (2.1)$$

โดยที่ i_x คือ ความหนาแน่นของกระแสที่ลึกจากผิวเข้ามา x (A/m^2)

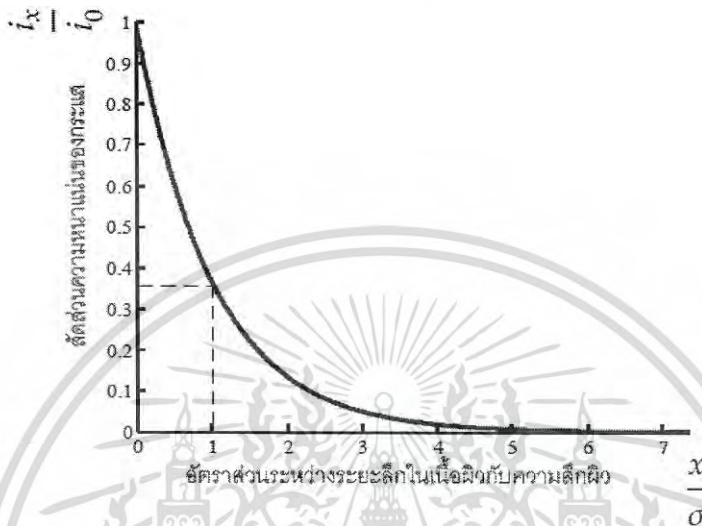
i_0 คือ ความหนาแน่นของกระแสที่ผิว (A/m^2)

δ คือ ความลึกผิว (Skin depth) (m)

x คือ ระยะลึกเข้าไปในเนื้อผิว (m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.1) กระแสไหลที่วันจะมีความหนาแน่นมากที่สุดที่บริเวณผิวของชิ้นงาน จากนั้นความหนาแน่นของกระแสจะลดลงมาเหลือประมาณ 0.368 เท่าของค่าความหนาแน่นกระแสที่ผิวของชิ้นงาน จนเข้าใกล้ศูนย์ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 2.3 [2]



รูปที่ 2.3 การกระจายความหนาแน่นของกระแสกับความลึกผิว

ความลึกผิวจะขึ้นอยู่กับความถี่ และความต้านทานจำเพาะของชิ้นงาน สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (2.2)

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu f \pi}} \quad (2.2)$$

โดยที่ ρ คือ ความต้านทานจำเพาะของชิ้นงาน ($\Omega - m$)

μ คือ ความซึมซาบแม่เหล็กของชิ้นงาน (H/m)

f คือ ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟสลับ (Hz)

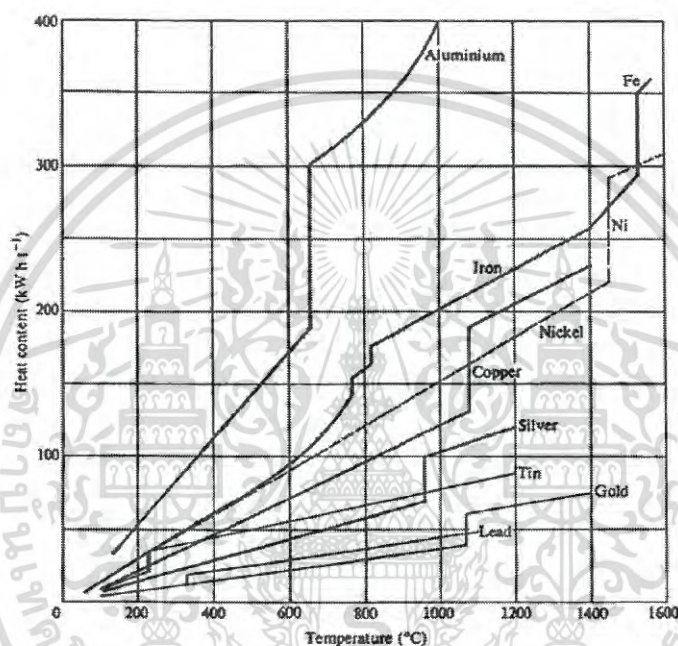
2.3 ผลของอุณหภูมิ

ผลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในชิ้นงานเกิดจากระหว่างกระบวนการให้ความร้อน พลังงานความร้อนที่ให้กับชิ้นงานแต่ละชนิดที่อุณหภูมิเดียวกันจะไม่เท่ากันเนื่องจากค่าความต้านทานจำเพาะและค่าความซึมซาบของชิ้นงานแต่ละชนิดที่นำมาให้ความร้อนไม่เท่ากัน นอกจากนั้นเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงส่งผลให้ค่าความต้านทานจำเพาะและค่าความซึมซาบของชิ้นงานเปลี่ยนแปลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 ความร้อนจำเพาะ

เมื่อต้องการทำให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิตามต้องการ จะต้องให้พลังงานจำนวนหนึ่งซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและน้ำหนักของชิ้นงาน โดยพลังงานที่ใช้สามารถคำนวณจากความร้อนจำเพาะ (Specific heat) ของชิ้นงาน แต่ในปัจจุบันจะใช้การคำนวณจากความจุความร้อน (Heat content) ดังรูปที่ 2.4 หน่วยเป็นกิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตัน (Kilowatt-hours per tonne) แสดงดังรูปที่ 2.4 [2]



รูปที่ 2.4 ความจุความร้อนของโลหะชนิดที่แตกต่างกัน

2.3.2 ความต้านทานจำเพาะ

ความต้านทานจำเพาะของโลหะนั้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ โดยในย่านอุณหภูมิใช้งานที่ไม่สูงเกินไปจะมีความสัมพันธ์ประมาณได้โดยสมการแบบเชิงเส้น ซึ่งค่าของความต้านทานจำเพาะเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป อธิบายได้ดังสมการที่ (2.3)

$$\rho_{\theta} = \rho_1 [1 + \alpha(\theta - \theta_1)] \quad (2.3)$$

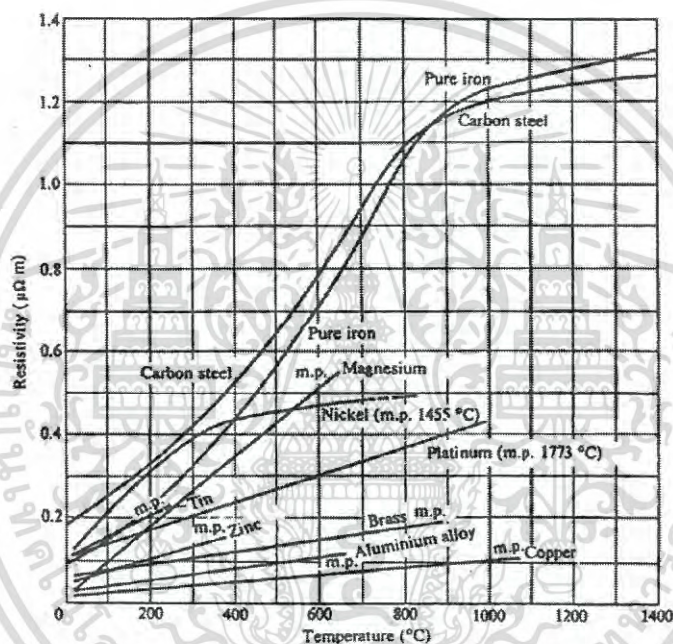
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ ρ_θ คือ ค่าความต้านทานจำเพาะที่อุณหภูมิ θ ใดๆ

ρ_1 คือ ค่าความต้านทานจำเพาะที่อุณหภูมิ θ_1

α คือ สัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากอุณหภูมิ θ

ค่าของความต้านทานจำเพาะของวัสดุเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จะมีค่าไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุ ดังรูปที่ 2.5 [2] ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปของวัสดุแต่ละชนิด ซึ่งสังเกตเห็นว่ามีความสัมพันธ์ลักษณะเป็นเชิงเส้นในช่วงอุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 2.5 ความต้านทานจำเพาะที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ

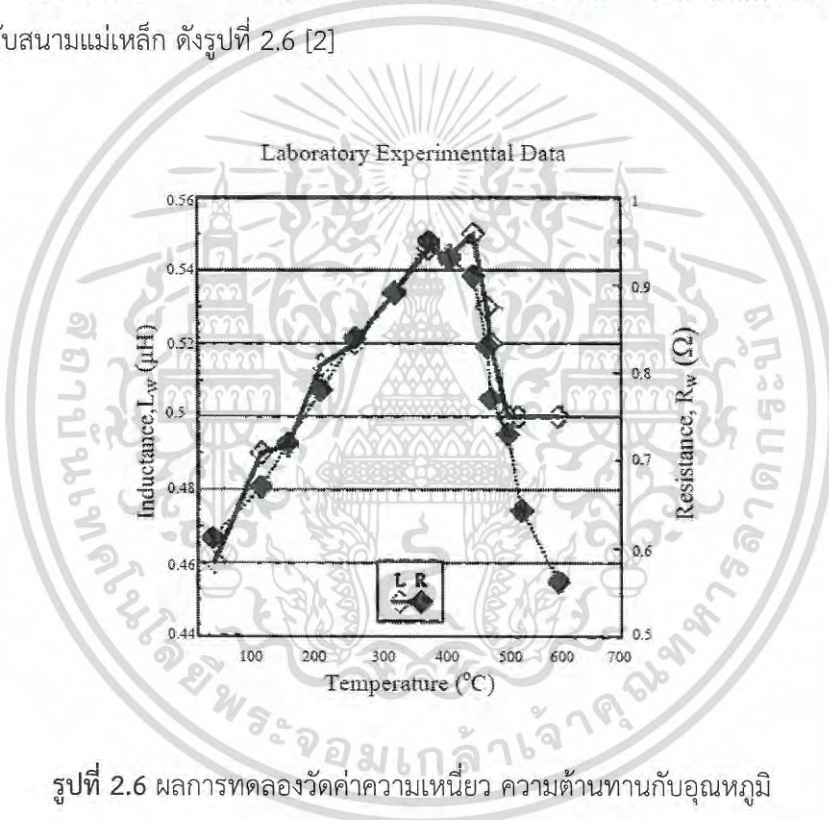
2.4 ขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงาน

โดยทั่วไปจะแทนที่ขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงานด้วยตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมร่วมกับตัวต้านทาน ขณะให้ความร้อน อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความเหนี่ยวนำและค่าความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงานมีค่าสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงจุดคูรี (Curie point) ชิ้นงานบางชนิดอาจมีค่าความเหนี่ยวนำและค่าความต้านทานลดลงอย่างรวดเร็วซึ่งมีค่าต่ำกว่าขณะที่มีอุณหภูมิต่ำ เนื่องจาก มีชิ้นงานที่เป็นสารแม่เหล็กซึ่งมีค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ (μ_r) สูงมากประมาณ 5,000-15,000 ขึ้นอยู่กับชนิดของชิ้นงาน แต่เมื่ออุณหภูมิของชิ้นงานสูงถึงจุดคูรีค่าความซึมซาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมพัทธ์ของชิ้นงานลดลงเหลือเพียงหนึ่ง ซึ่งหมายถึงค่าความชื้นซาบของชิ้นงานจะเท่ากับอากาศในขณะนั้น ส่งผลให้ค่าความเหนียวและความต้านทานลดลงอย่างรวดเร็ว

ค่าความเหนียวของขดลวดเหนียวขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ขนาดของขดลวดที่มาเหนียว รูปร่างและขนาดของชิ้นงาน คุณสมบัติของชิ้นงาน อุณหภูมิและความชื้นของสนามแม่เหล็ก ตัวแปรที่กล่าวมานั้นไม่สามารถแสดงด้วยสมการอย่างง่ายได้ ในปัจจุบันได้ทำการวิเคราะห์ผลการออกแบบโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element) เป็นโปรแกรมการศึกษาพฤติกรรมของชิ้นงานระหว่างกระบวนการให้ความร้อน เนื่องจากสนามแม่เหล็กจากขดลวดเหนียวที่คล้องผ่านชิ้นงานจะมีจำนวนลดลงเป็นฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential function) ตามความลึกของผิว มีผลทำให้กระแสไหลวนมีมากบริเวณพื้นผิวงานและจะลดลงเมื่อลึกลงในเนื้อผิวงานคล้ายกับสนามแม่เหล็ก ดังรูปที่ 2.6 [2]



รูปที่ 2.6 ผลการทดลองวัดค่าความเหนียว ความต้านทานกับอุณหภูมิ

เนื่องจากค่าความเหนียวและความต้านทานเปลี่ยนค่าไปเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ในระหว่างกระบวนการให้ความร้อน เพื่อไม่ให้อุณหภูมิของขดลวดเหนียวเปลี่ยนแปลงไปมาก จะใช้น้ำระบายความร้อนให้กับขดลวด ซึ่งจะได้ค่าความเหนียวและค่าความต้านทานของขดลวดเหนียวคงที่ตลอดกระบวนการให้ความร้อน แต่อย่างไรก็ตามความต้านทานของชิ้นงานยังคงเปลี่ยนไป ในการคำนวณหาความต้านทานของชิ้นงานรูปทรงกระบอกดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.7 (ก) และจะพิจารณาชิ้นงานแบบแผ่นคลี่ดังแสดงในรูปที่ 2.7 (ข) ซึ่งสามารถหาความต้านทานของชิ้นงานรูปทรงกระบอกตั้งต้นได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

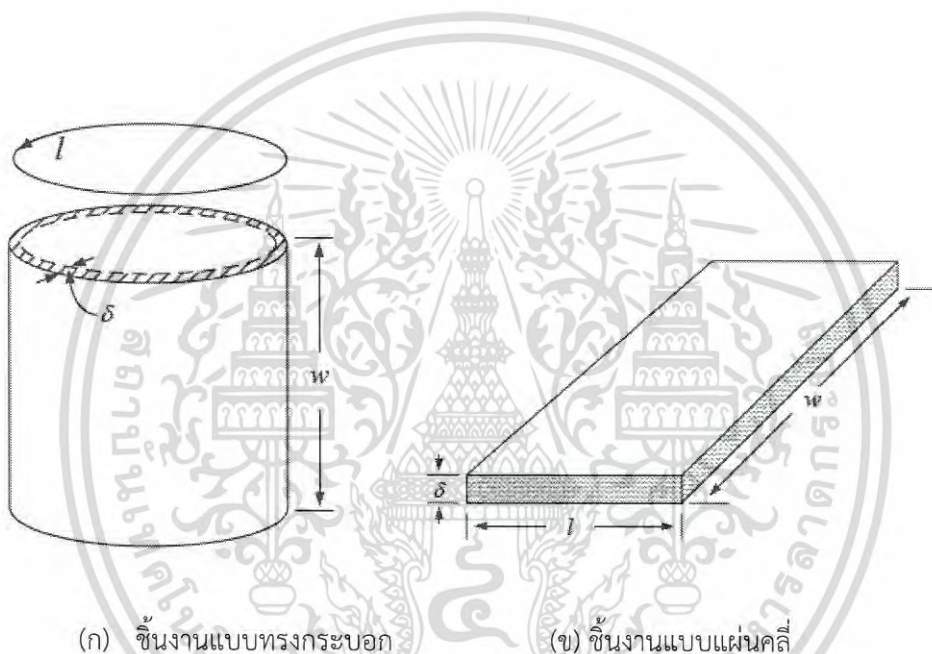
$$R_w \approx \frac{\rho l}{\delta w} \quad (2.4)$$

โดยที่ R_w คือ ความต้านทานของชิ้นงาน (Ω)

l คือ ความยาวของชิ้นงาน (m)

w คือ ความกว้างของชิ้นงาน (m)

ρ คือ ความหนาแน่นของชิ้นงาน (kg/m^3)



(ก) ชิ้นงานแบบทรงกระบอก

(ข) ชิ้นงานแบบแผ่นคล้

รูปที่ 2.7 ลักษณะของชิ้นงานที่ใช้ในการคำนวณหาความต้านทาน

ค่าผลคูณของระหว่าง δ กับ w คือพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานที่มีกระแสไหล เมื่อนำสมการที่ (2.2) แทนลงในสมการที่ (2.4) จะได้เป็นสมการที่ (2.5)

$$R_w \approx \frac{1}{w} \sqrt{\rho \mu f} \quad (2.5)$$

จะเห็นได้ว่าค่าของความต้านทานของชิ้นงานจะเปลี่ยนเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยน เนื่องจากค่าความต้านทานจำเพาะของชิ้นงานเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 วงจรสมมูลขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงาน

ขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงานสามารถเขียนวงจรสมมูลด้วยตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน ขดลวดเหนี่ยวนำส่วนใหญ่จะพันขดลวดชั้นเดียว (Single layer) โดยจะระบายความร้อนด้วยน้ำในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนเพื่อลดกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียและความร้อนที่ได้รับมาจากชิ้นงาน นอกจากนี้ยังทำให้ให้ค่าความเหนี่ยวนำและความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำคงที่ ซึ่งเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน ได้แก่ เส้นแรงแม่เหล็กที่คล้อยชิ้นงาน (Work flux, φ_w) จะทำให้เกิดกระแสไหลวนที่ชิ้นงาน กระแสที่ไหลในชิ้นงานส่งผลให้เกิดความร้อนขึ้น เส้นแรงแม่เหล็กที่คล้อยช่องว่างอากาศ (Air-gap flux, φ_g) โดยปกติช่องว่างระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงานจะมีระยะห่างค่อนข้างมากเพื่อความสะดวกในการป้อนหรือนำชิ้นงานออก นอกจากนี้ยังเป็นฉนวนความร้อนให้กับขดลวดเหนี่ยวนำ ส่วนที่สามเป็นเส้นแรงแม่เหล็กที่คล้อยขดลวดเหนี่ยวนำ (Coil flux, φ_c) ดังรูปที่ 2.8 [2]



รูปที่ 2.8 เส้นแรงแม่เหล็กที่คล้อยผ่านขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงาน

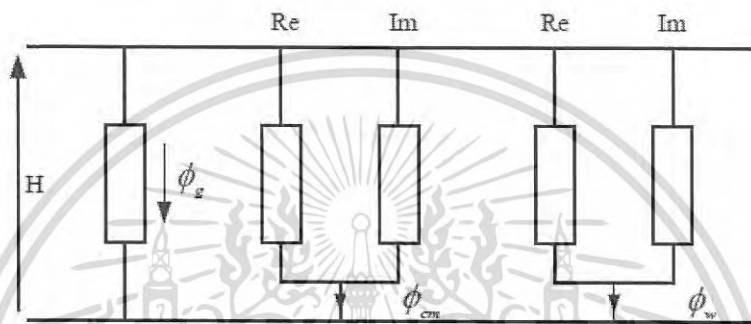
ซึ่งเส้นแรงในส่วนนี้ที่ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ทางผิวเช่นเดียวกับที่เกิดที่ชิ้นงาน ผลรวมของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นทั้งหมด (φ_0) แสดงไว้ในสมการที่ (2.6)

$$\varphi_0 = \varphi_w + \varphi_g + \varphi_c \quad (2.6)$$

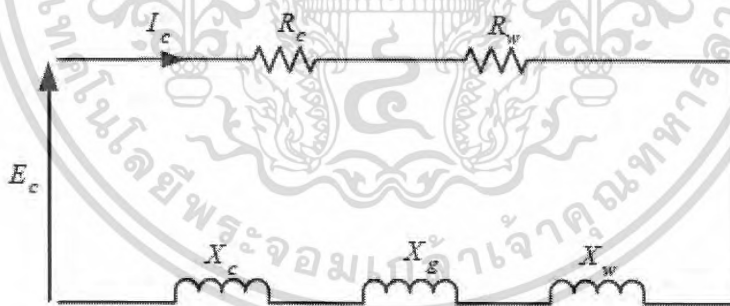
ประสิทธิภาพของขดลวดเหนี่ยวนำขึ้นอยู่กับความต้านทานของชิ้นงานและความต้านทานของขดลวด (R_C) แสดงดังสมการที่ (2.7)

$$\eta = \frac{R_w}{R_w + R_c} \quad (2.7)$$

เมื่อนำไปเขียนเป็นวงจรสมมูลทางแม่เหล็กและทางไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2.9 และ 2.10



รูปที่ 2.9 สมมูลทางแม่เหล็กของขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงาน



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำ

ตัวประกอบกำลังของขดลวดเหนี่ยวนำเขียนได้เป็นสมการที่ (2.8)

$$\cos \theta = \frac{R_w + R_c}{Z} \quad (2.8)$$

โดยที่ Z คือ ความต้านทานรวมในวงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำ (Ω)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

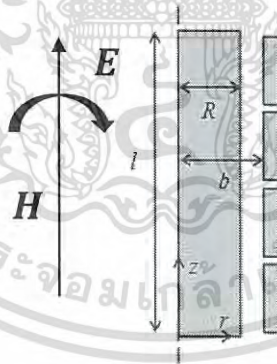
กำลังของงานที่ขดลวดเหนี่ยวนำ ขึ้นอยู่กับกำลังของงานที่ขึ้นงาน (P_w) และค่าประสิทธิภาพของขดลวดเหนี่ยวนำ ได้เป็นดังสมการที่ (2.9)

$$P_c = \frac{P_w}{\eta} \quad (2.9)$$

จากสมการข้างต้นจะพบว่า ประสิทธิภาพของขดลวดเหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับชนิดของขึ้นงานที่ต้องการให้ความร้อนโดยหากค่าความต้านทาน R_w กับ R_c มีค่าใกล้เคียงกัน จะทำให้มีประสิทธิภาพประมาณ 50% ถ้ากำหนดขนาดขึ้นงานที่เท่ากัน ขึ้นงานที่มีความต้านทานจำเพาะที่สูงกว่าจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพของขดเหนี่ยวนำมีค่าสูงกว่า และการที่มีช่องว่างระหว่างขึ้นงานกับขดลวดเหนี่ยวนำที่มาก จะทำให้ค่าความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำมีค่าสูง ซึ่งมีผลทำให้ตัวประกอบกำลังของขดเหนี่ยวนำมีค่าต่ำ ดังนั้นช่องว่างระหว่างขึ้นงานกับขดลวดควรมีค่าที่เหมาะสม

2.6 สมการสำหรับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

สนามแม่เหล็กจะเกิดตามแกน $\mathbf{H} = H\mathbf{e}_z$ ขณะที่สนามไฟฟ้าจะเกิดเป็นเส้นรอบวง $\mathbf{E} = E\mathbf{e}_\theta$ ดังนั้นจึงให้สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าจึงได้รับการนิยามโดยใช้เป็นปริมาณทางสเกลาร์เป็น H และ E และแสดงทิศทางเรขาคณิตของขึ้นงานและขดลวด ดังรูปที่ 2.11 [3]



รูปที่ 2.11 ทิศทางเรขาคณิตและที่ใช้วิเคราะห์ในเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

พฤติกรรมของสนามแม่เหล็กในวัตถุทรงกระบอกดังรูปที่ 2.11 เมื่อถูกให้ความร้อนโดยขดลวด สามารถอธิบายได้โดยสมการที่ (2.10)

$$\frac{d^2H}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dH}{dr} - j\omega\mu\sigma H = 0 \quad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ r คือ รัศมีของชิ้นงาน (m)

ω คือ ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ (rad/s)

μ คือ ค่าคงที่ของความซึมซาบเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ (H/m)

σ คือ ค่าความนำไฟฟ้า (Ω^{-1})

j คือ จำนวนจินตภาพเท่ากับ $\sqrt{-1}$

ซึ่งสนามไฟฟ้าในทรงกระบอกสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.11)

$$E = -\frac{1}{\sigma} \frac{dH}{dr} \quad (2.11)$$

การประมาณโดยการกำหนดสนามแม่เหล็กที่เหมาะสมที่ผิวด้านนอกสุดของชิ้นงาน สนามแม่เหล็กจะสมมาตรกับแกน r และจะถูกกำหนดที่ผิวของทรงกระบอกจากสมการที่ (2.12)

$$H(r=R) = H_s \text{ และ } \left. \frac{dH}{dr} \right|_{r=0} = 0 \quad (2.12)$$

สนามแม่เหล็กที่อยู่ด้านนอกสุดของชิ้นงาน ซึ่ง H_s จะเท่ากับสนามแม่เหล็กในช่องว่างระหว่างขดลวดกับชิ้นงานที่เป็นแผ่นงานรูปทรงกระบอกสั้น ดังสมการที่ (2.13)

$$H_s = nlK_n \quad (2.13)$$

โดยที่ n คือ จำนวนรอบของขดลวด

l คือ ความยาวของชิ้นงาน (m)

ซึ่ง K_n เป็นค่าสัมประสิทธิ์ หาได้จากสมการที่ (2.14)

$$K_n = \overline{K}_n \left(1 - \frac{R^2}{b^2}\right) + \frac{R^2}{b^2} \quad (2.14)$$

เมื่อ \overline{K}_n เป็นสัมประสิทธิ์สำหรับขดลวดที่เป็นแกนกลวง ได้ดังสมการที่ (2.15)

$$\overline{K}_n = \frac{1+1.535604\beta^2+0.273728\beta^2}{1+1.035808\beta^2} - \frac{8\beta}{3\pi} \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยกำหนดให้ $\beta = b/l$ ซึ่งจากสมการที่ (2.15) จะมีผลเมื่อความยาวของขดลวดมีขนาดใหญ่กว่าเส้นผ่าศูนย์กลางหรือ $2\beta \leq 1$ และการกำหนดความลึกของผิว $\delta = \sqrt{2/(\omega\mu\sigma)}$ พร้อมด้วยตัวแปรที่ไม่มีมิติ $H^* = \frac{H}{H_s}$, $\eta = r/R$ และ $\varepsilon = \delta/R$ ซึ่งสามารถจัดสมการใหม่ได้เป็นสมการที่ (2.16)

$$\frac{d^2 H^*}{d\eta^2} + \frac{1}{\eta} \frac{dH^*}{d\eta} - j \frac{2}{\varepsilon^2} H^* = 0 \quad (2.16)$$

เมื่อ $H^*(\eta = 1) = 1$ และ $\left. \frac{dH^*}{d\eta} \right|_{\eta=0} = 0$

2.7 สมการอุณหภูมิของชิ้นงาน

สมการพลังงานที่คำนวณขึ้นเพื่อกำหนดอุณหภูมิของชิ้นงาน โดยกำหนดให้ได้รับพลังงานที่ผิวด้านนอกมากที่สุด เนื่องจากกระแสไหลวนที่สร้างขึ้นโดยการเหนี่ยวนำ การสูญเสียพลังงานโดยการถ่ายเทความร้อนด้วยรังสีจากพื้นผิวด้านนอก ด้านบนและด้านล่าง จะลดความซับซ้อนของการคำนวณ จึงให้ค่าการนำความร้อนของชิ้นงานมีขนาดใหญ่พอที่จะใช้แบบจำลอง lumped-parameter model ได้ โดยทรงกระบอกที่ถูกให้ความร้อนจะประมาณว่าจะเป็นแบบอุณหภูมิสม่ำเสมอในแต่ละพื้นที่และเวลา สามารถอธิบายได้ตั้งสมการที่ (2.17)

$$\rho c \pi R^2 l \frac{dT}{dt} = q - 2\pi R l \left(1 + \frac{R}{l}\right) \varepsilon_R \sigma_B (T^4 - T_\infty^4) \quad (2.17)$$

โดยที่ T_∞ คือ อุณหภูมิห้อง (K)

σ_B คือ ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann

และกำหนดให้ $T(0) = T_\infty$

โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ ณ จุดใด ๆ ในทรงกระบอกจะใช้ค่าเฉลี่ยของอัตราการส่งผ่านพลังงานต่อพื้นที่ (Poynting vector) ในช่วงหนึ่งรอบ อธิบายได้ตั้งสมการที่ (2.18)

$$q'' = \frac{1}{2} \text{Re}(P) = \frac{n^2 l^2}{2\sigma R \varepsilon} K_n^2 (1 - \varepsilon/2) \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดไปยังพื้นผิวด้านนอกสุดจะได้เป็นสมการที่ (2.19)

$$q = q'' 2\pi Rl = \frac{\pi n^2 l^2 I}{\sigma \varepsilon} K_n^2 (1 - \varepsilon/2) \quad (2.19)$$

เพื่อลดความซับซ้อนของสมการ ตัวแปรต่อไปนี้เป็นตัวแปรที่กำหนดไว้ใช้ในการคำนวณ

$$\text{โดยที่ } \theta = \frac{T}{T_\infty}, \tau = \frac{t \sigma_B T_\infty^3}{(\rho c)_\infty R}, \sigma^* = \frac{\sigma \sigma_B R T_\infty^4}{n^2 l^2 K_n^2}$$

$$\omega^* = \frac{\omega \mu R n^2 l^2 K_n^2}{2 \sigma_B T_\infty^4}, C_p^* = (\rho c) / (\rho c)_\infty$$

ซึ่ง $(\rho c)_\infty$ คือความสามารถในการทำความร้อนของชิ้นงานที่อุณหภูมิห้องซึ่งเป็นค่าคงที่ โดยสามารถเปลี่ยนความละเอียดของพื้นผิวให้ลึกขึ้นได้ดังสมการที่ (2.20)

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{\omega^* \sigma^*}} \quad (2.20)$$

เมื่อนำสมการที่ (2.19) และสมการที่ (2.20) แทนในสมการที่ (2.17) ได้เป็น

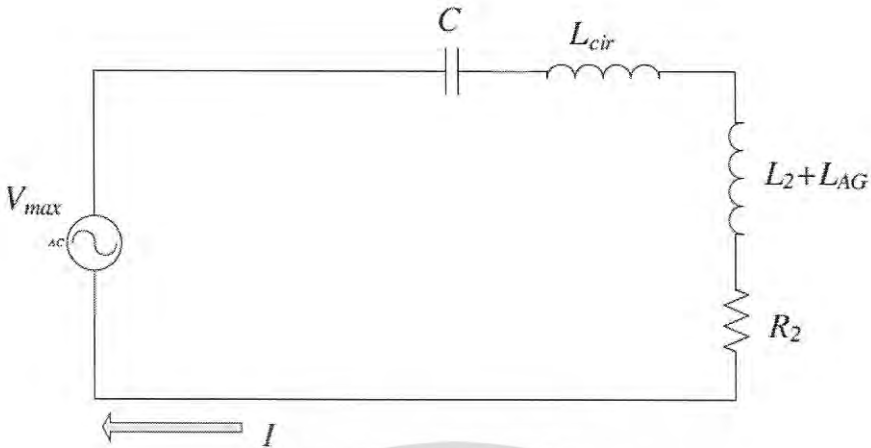
$$C_p^* \frac{d\theta}{d\tau} = \frac{1}{\sigma^*} \left(\sqrt{\sigma^* \omega^*} - \frac{1}{2} \right) - 2\varepsilon_R \left(1 + \frac{R}{l} \right) (\theta^4 - 1) \quad (2.21)$$

$$\text{โดยที่ } \theta(\tau = 0) = 1$$

2.8 พารามิเตอร์ของวงจรถวายไฟ

ขั้นตอนนี้จะเป็นการจัดหาแหล่งจ่ายไฟเพื่อกำหนดความถี่ในการทำงาน ใช้ตัวแปลงแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้าแบบเรโซแนนซ์และการควบคุมการทำงานทำได้โดยการควบคุมความถี่ของอินเวอร์เตอร์ เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้าชนิดนี้ถูกใช้ในการทดลองการตรวจสอบที่จะอธิบายไว้ในส่วนต่อไป แหล่งจ่ายไฟจะใช้ในโหมดควบคุมกระแสที่ความถี่เอาต์พุตของแหล่งจ่ายไฟ และส่งผลให้ความต้านทานรวมมีค่าเท่ากับของแหล่งจ่ายไฟ จะถูกปรับเพื่อให้ค่ากระแสของวงจรถวายไฟอยู่ในระดับคงที่ วงจรถวายไฟ แสดงในรูปที่ 2.12 [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 วงจรขั้วของระบบทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

กระแสไฟฟ้าถูกป้อนผ่านตัวเก็บประจุที่ตรงกับความจุคงที่ C ความต้านทานต่อชิ้นงานจะแสดงเป็นความต้านทาน R_2 และในชุดที่มีการเหนี่ยวนำของชิ้นงาน $L_2 + L_{AG}$ โดยที่ L_2 เป็นส่วนประกอบของความต้านทานเชิงเหนี่ยวนำและประจุ ซึ่ง L_{AG} คือการเหนี่ยวนำค่าคงที่ของช่องว่างระหว่างชิ้นงานกับขดลวด โดยไม่สนใจความต้านทานของตัวนำระหว่างแหล่งจ่ายไฟและขดลวด ขณะที่ตัวเหนี่ยวนำและตัวนำมีค่าคงที่ด้วยตัวเหนี่ยวนำ L_{cir} จะได้ขนาดของความต้านทานรวมทั้งหมดที่เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟในสมการที่ (2.22)

$$|Z_{tot}| = \sqrt{R^2 + \left[\omega(L_2 + L_{AG} + L_{cir}) - \frac{1}{\omega C} \right]^2} \quad (2.22)$$

ซึ่งค่าความต้านทาน Z_{tot} นี้ กำหนดให้เท่ากับความต้านทานที่กระแสเริ่มต้นจากแหล่งจ่ายไฟที่มีแรงดันไฟฟ้า V_{max} โดยกำหนดค่าคงที่ $Z_{set} = V_{max}/I$ นั่นคือให้ $|Z_{tot}| = Z_{set}$ โดยกำหนดตัวแปรสำหรับความต้านทาน ความเหนี่ยวนำและความจุเป็นดังสมการที่ (2.23)

$$Z^* = \frac{ZI^2}{\sigma_B R I T_\infty^4}, L^* = \frac{2L}{\mu n^2 R^2 I K_n^2} \text{ และ } C^* = \frac{2C \sigma_B^2 I T_\infty^8}{\mu n^2 I^4 K_n^2} \quad (2.23)$$

จากสมการที่ (2.22) สามารถอธิบายเป็นความถี่ของค่ารากที่เป็นบวกได้ดังสมการที่ (2.24)

$$\omega^* = \frac{\sqrt{Z_{set}^{*2} - R_2^{*2}} + \sqrt{Z_{set}^{*2} - R_2^{*2} + 4(L_2^* + L_{AG}^* + L_{cir}^*) / C^2}}{2(L_2^* + L_{AG}^* + L_{cir}^*)} \quad (2.24)$$

ซึ่งความถี่ในการทำงานจะเกิดจากแทนตัวแปร R_2^* , L_2^* , L_{cir}^* และ L_{AG}^* โดยตัวเหนี่ยวนำของช่องว่างระหว่างชิ้นงานกับขดลวด สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (2.25)

$$L_{AG} = \mu n l A \frac{dH_s / dt}{dl / dt} = \mu n^2 l A K_n \quad (2.25)$$

โดย A คือพื้นที่ตัดขวางของชิ้นงาน ซึ่ง $A = \pi R^2 (b^2 / R^2 - 1)$ ดังนั้นค่าการเปลี่ยนแปลงเหนี่ยวนำช่องว่างระหว่างชิ้นงานกับขดลวด สามารถอธิบายเป็นสมการที่ (2.26)

$$L_{AG}^* = \frac{2\pi}{K_n} \left[\beta^2 \left(\frac{l}{R} \right)^2 - 1 \right] \quad (2.26)$$

และสามารถหาค่าความต้านทานรวมของชิ้นงานจากสมการที่ (2.27)

$$Z_2 = R_2 + j\omega L_2 = \frac{2\pi R l P}{I^2} \quad (2.27)$$

โดยที่ $R_2^* = \frac{2\pi}{\sigma^*} \left(\sqrt{\sigma^* \omega^*} - \frac{1}{2} \right)$ และ $L_2^* = \frac{2\pi}{\sqrt{\sigma^* \omega^*}}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ระบบควบคุมอุณหภูมิ

3.1 การควบคุมแบบลูปเดียว

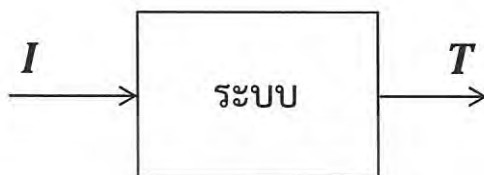
การควบคุมแบบลูปเดียว คือ การควบคุมโดยมีอุปกรณ์เครื่องมือวัด 1 ตัว และอุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย 1 ตัว เป็นหลักการพื้นฐานในระบบควบคุมป้อนกลับ มีลักษณะดังรูปที่ 3.1 ในกรณีนี้สังเกตว่าเป็นการป้อนกลับแบบลบเพราะสัญญาณจากเครื่องมือวัด PV (Process variable) จะถูกนำไปหักล้างกับสัญญาณอ้างอิง SV (Setpoint variable) ได้เป็นค่าความคลาดเคลื่อน e (Error) ซึ่งจะนำไปป้อนเข้าสู่ตัวควบคุม และตัวควบคุมจะสร้างสัญญาณควบคุม MV (Manipulated variable) ส่งไปยังอุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย เพื่อให้ระบบที่ต้องการควบคุมมีค่าตามที่ต้องการ



รูปที่ 3.1 การควบคุมแบบลูปเดียว

3.1.1 ระบบเตาความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

จากหัวข้อที่ 3.1 ระบบในแบบจำลองคือระบบของเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ โดยมี อินพุตเป็นกระแสไฟฟ้า ซึ่งเป็นสัญญาณควบคุมที่ให้แก่ระบบ และเอาต์พุตเป็นอุณหภูมิตั้งรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ระบบเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

จากสมการที่ (2.24) สามารถทำการประมาณค่า ซึ่งอธิบายได้ดังสมการที่ (3.1)

$$\omega^* = \omega_0^* + \varepsilon \omega_1^* + \varepsilon^2 \omega_2^* + O(\varepsilon^3) \quad (3.1)$$

โดยที่

$$\omega_0^* = \frac{Z_{set}^*}{2(L_{AG}^* + L_{cir}^*)} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{4(L_{AG}^* + L_{cir}^*)}{C^* Z_{set}^{*2}}} \right]$$

$$\omega_1^* = -\frac{2\pi}{(L_{AG}^* + L_{cir}^*)} \omega_0^* + \frac{2\pi}{\left[2C^* (L_{AG}^* + L_{cir}^*)^2 \omega_0^* - C^* Z_{set}^* (L_{AG}^* + L_{cir}^*) \right]}$$

$$\omega_2^* = -\frac{2\pi}{(L_{AG}^* + L_{cir}^*)} \omega_1^* - \frac{\pi^2 \omega_0^{*2}}{Z_{set}^* (L_{AG}^* + L_{cir}^*)} - \frac{\pi^2 \omega_0^{*2}}{\left[2(L_{AG}^* + L_{cir}^*)^2 \omega_0^* - Z_{set}^* (L_{AG}^* + L_{cir}^*) \right]}$$

นำค่า ω^* ที่ได้ไปแทนในสมการที่ (2.21) จัดเทอมของ R ให้อยู่ในรูปของ I และจัดเทอมของ θ ให้อยู่ในรูปของ T ได้เป็นสมการที่ (3.2)

$$C_p^* \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{\sigma^*} \left(\sqrt{\sigma^* \omega^*} - \frac{1}{2} \right) - 2\varepsilon_R \left(1 + \frac{V_{max}}{H} \right) \left(\left(\frac{T}{T_\infty} \right)^4 - 1 \right) \quad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากสมการนี้ติดอยู่ในรูปของ $\frac{d\theta}{d\tau}$ ซึ่งต้องแทนค่า θ และ τ ให้อยู่ในรูปของ T และ t โดยการคำนวณจะใช้หน่วยของ SI ทั้งหมด ดังนั้นค่าของอุณหภูมิที่ใช้คำนวณจึงเป็นเคลวิน แต่การอ่านค่าและวัดผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะเป็นองศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ ดังตารางที่ 3.1 และ 3.2

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของระบบเตาความร้อนแบบเหนี่ยวนำ [3]

พารามิเตอร์	ค่า
T_∞	293.15 K
R	4.3 cm
b	4.5 cm
l	3.95 cm
N	11
$I (RMS)$	$44\%I^*1063A$
$V_{max} (RMS)$	47.1 V
L_{cir}	$0.87 \mu H$
C	$15.41 \mu F$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของแกรไฟต์ประเภท POCO [3]

$T(K)$	$\sigma(1/\Omega m)$	$c(J/kgK)$	$k(W/mK)$	$\rho(kg/m^3)$
293.15	75,250	721	120	1720
393.15	86,417	1026	108	1720
493.15	96,585	1269	68	1720
593.15	105,001	1424	88	1720
693.15	111,244	1549	80	1720
793.15	115,292	1645	75	1720
893.15	117,437	1712	70	1720
993.15	118,124	1763	66	1720
1093.15	117,807	1809	62	1720
1193.15	116,860	1855	60	1720
1293.15	115,549	1892	57	1720
1393.15	114,035	1926	56	1720
1493.15	112,396	1959	55	1720

จากระบบของเตาความร้อนแบบเหนี่ยวนำข้างต้นนี้ เป็นระบบแบบวงเปิด เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าไป จะได้ค่าของอุณหภูมิที่ออกมา ซึ่งจะแปรผันตรงกัน ถ้ากระแสไฟฟ้าสูง อุณหภูมิก็จะสูงด้วยเช่นกัน จากการจำลองนี้จะทราบพฤติกรรมของระบบ นำไปสู่การหาตัวควบคุมอุณหภูมิจากระบบดังกล่าวนี้ได้

3.1.2 ตัวควบคุม

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเตาความร้อนแบบเหนี่ยวนำ เมื่อทราบพฤติกรรมของระบบ การควบคุมอุณหภูมิให้อุณหภูมิอยู่ในช่วงที่ต้องการ ซึ่งจะใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีในการควบคุมอุณหภูมิ โดยจะใช้ตัวควบคุมทั้งหมด 3 ตัวควบคุม คือตัวควบคุมแบบพี ตัวควบคุมแบบไอ และตัวควบคุมแบบดี เนื่องจากเป็นระบบที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ไม่ยุ่งยากและไม่ซับซ้อนมากเกินไป ซึ่งการควบคุมเตาความร้อนแบบเหนี่ยวนำ เมื่อค่าของอุณหภูมิที่ออกมาจากระบบ จะทำการป้อนคืนไปที่ตัวควบคุม เพื่อทำการควบคุมอุณหภูมิให้ได้ตามค่าที่ต้องการ ป้อนต่อไปยังตัวควบคุม ซึ่งตัวควบคุมจะ

ควบคุมกระแสไฟฟ้าที่จะให้กับระบบ เมื่ออุณหภูมิสูงเกินค่าที่ต้องการ ตัวควบคุมจะหยุดปล่อยกระแสไฟฟ้า และเมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่าค่าเริ่มต้น ตัวควบคุมจะทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ระบบอีกครั้ง

3.1.3 เครื่องมือวัด

เครื่องมือวัดที่ใช้ในการจำลองระบบควบคุมเตาความร้อนแบบเหนี่ยวนำ จะใช้เทอร์โมคัปเปิลรุ่น TKS/103 เป็นเทอร์โมคัปเปิลชนิดเค ซึ่งย่านการวัดอุณหภูมิอยู่ที่ -270 ถึง 1372 °C มีลักษณะหัวเป็นสแตนเลส 304 ซึ่งหัวสแตนเลสทนความร้อนได้ไม่สูงนักเมื่อนำไปวัดอุณหภูมิที่สูงกว่า 1000 °C ส่งผลให้หัววัดสแตนเลสเกิดเสียรูป ดังนั้นหัววัดที่เหมาะสมกับการวัดอุณหภูมิสูง ควรจะเป็นหัววัดเซรามิก เนื่องจากทนความร้อนได้สูงกว่า ซึ่งการประกอบหัวเข้ากับท่อเป็นลักษณะแบบไม่มีกราวด์ มีข้อดีคือ อายุการใช้งานยาวนาน และมีสัญญาณรบกวนน้อย แต่มีข้อเสียคือ เวลาการตอบสนองช้า ดังนั้นในแบบจำลองระบบควบคุมนี้ จะนำเสนอเครื่องมือวัดดังกล่าวด้วยแบบจำลองอันดับหนึ่งล่าช้า (First-order lag) ซึ่งมีค่าเวลาคงตัว (Time constant) 30 วินาที

3.2 ตัวควบคุมแบบพีไอดี

การควบคุมโดยทั่วไปจะพยายามลดค่าความคลาดเคลื่อน e ให้มีค่าน้อยที่สุดด้วยการปรับค่าสัญญาณควบคุม MV ในประเภทตัวควบคุมแบบต่างกัน ตัวควบคุมแบบพีไอดีเป็นตัวควบคุมแบบป้อนกลับที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน เนื่องจากมีโครงสร้างที่ง่าย และมีความสัมพันธ์เป็นเพียงการดำเนินการพื้นฐานทางคณิตศาสตร์ การควบคุมแบบพีไอดีเป็นการรวมกันของเทอมของการควบคุมสามแบบคือ เทอมของตัวควบคุมแบบพี เทอมของตัวควบคุมแบบไอ และเทอมของตัวควบคุมแบบดี ตามสมการที่ (3.3)

$$MV(t) = P_{out} + I_{out} + D_{out} \quad (3.3)$$

3.2.1 ตัวควบคุมแบบพี

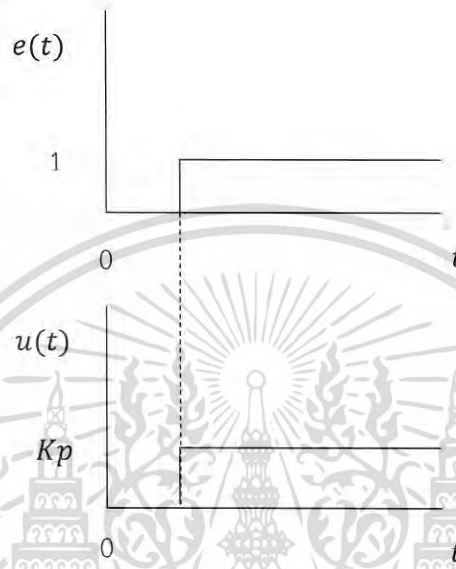
ตัวควบคุมแบบพี (Proportional control) เอาต์พุตของตัวควบคุม $u(t)$ จะเป็นสัดส่วนกับอินพุตของตัวควบคุม และถ้ากำหนดสัญญาณอินพุตของตัวควบคุมเป็นค่าความคลาดเคลื่อน $e(t)$ จะได้เอาต์พุตของตัวควบคุมดังสมการที่ (3.4)

$$u(t) = P_{out} = K_p e(t) \quad (3.4)$$

เมื่อ K_p คืออัตราขยายแบบสัดส่วน (Proportional gain)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากเอาต์พุตของตัวควบคุมจะเป็นสัดส่วนกับอินพุต ดังนั้นถ้าอินพุตมีลักษณะเป็นสัญญาณระดับ (Step signal) เอาต์พุตที่ได้ก็จะมีลักษณะเป็นสัญญาณระดับเช่นกัน โดยลักษณะของกราฟแสดงอินพุต และเอาต์พุตจะมีสัดส่วนที่แน่นอนค่าหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพี

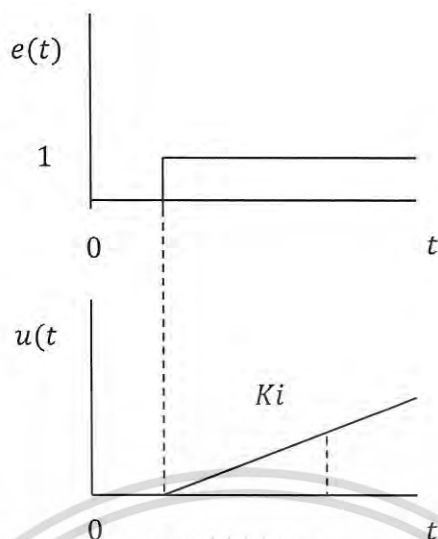
3.2.2 ตัวควบคุมแบบไอ

ตัวควบคุมแบบไอ (Integral control) เอาต์พุตของตัวควบคุมจะเป็นสัดส่วนกับการปริพันธ์สัญญาณของค่าความคลาดเคลื่อนเทียบเวลา ดังสมการที่ (3.5)

$$u(t) = I_{out} = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (3.5)$$

เมื่อ K_i คือ อัตราขยายแบบปริพันธ์ (Integral gain)

จากสมการที่ (3.5) สามารถอธิบายได้ว่าเทอมปริพันธ์เป็นอัตราส่วนของค่าความคลาดเคลื่อนสะสมในหนึ่งช่วงเวลา ค่าของ I_{out} เกิดจากผลคูณของค่าคงที่ K_i กับผลรวมของ $e(t)$ ตั้งแต่เริ่มปริพันธ์จนถึงเวลาปัจจุบัน รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะการตอบสนองของตัวควบคุมแบบไอ



รูปที่ 3.4 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบไอ

เมื่อได้รับสัญญาณอินพุตแบบระดับ ค่า $u(t)$ ณ เวลา t ใดๆ หมายถึงพื้นที่ใต้กราฟของสัญญาณอินพุต จากเวลา 0 ถึง t คูณด้วยอัตราขยายแบบปริพันธ์ ดังนั้นเมื่อเริ่มมีค่าอินพุตแบบระดับ เอาต์พุตที่ออกจากตัวควบคุมจึงมีค่ามากขึ้น ด้วยอัตราคงที่ ในลักษณะรูปสัญญาณความชัน (Ramp signal) เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบไอร่วมกับตัวควบคุมแบบพี จะช่วยเร่งให้ระบบวิ่งเข้าหา SV เร็วขึ้น และช่วยกำจัดค่าออฟเซตที่เกิดจากการใช้ตัวควบคุมแบบพีอย่างเดียว เนื่องจากเทอมปริพันธ์เกิดจากการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดในอดีตด้วย ซึ่งอาจส่งผลให้ระบบเกิดค่าพุ่งเกินสูงสุด (Maximum overshoot) เกิน SV ในค่าปัจจุบัน อย่างไรก็ตามเทอมปริพันธ์อาจสะสมค่าความคลาดเคลื่อนถึงแม้สัญญาณควบคุมเกินระดับการอิมิตัวแล้ว ซึ่งส่งผลค่า PV เมื่อถึงค่า SV แล้วสัญญาณควบคุม MV จะยังไม่ลดลงทันที สามารถแก้ไขได้ด้วยการระงับการปริพันธ์ (Anti-windup) ซึ่งจะอธิบายโดยละเอียดในหัวข้อที่ 3.2.6

3.2.3 ตัวควบคุมแบบดี

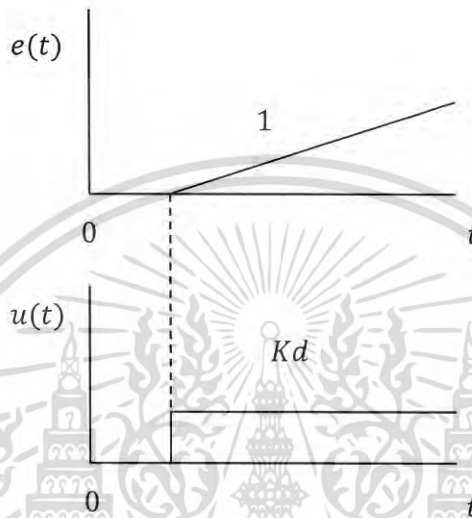
ตัวควบคุมแบบดี (Derivative control) เอาต์พุตของตัวควบคุมจะเป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงอินพุตความคลาดเคลื่อนเทียบกับเวลา ดังสมการที่ (3.6)

$$u(t) = D_{out} = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.6)$$

เมื่อ K_d คือ อัตราขยายแบบอนุพันธ์ (Derivative gain)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลตอบสนองของระบบควบคุมแบบตี เมื่อสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณแบบความชัน จากสมการที่ (3.6) จะเห็นว่า ตัวควบคุมแบบตีจะให้สัญญาณออกจากตัวควบคุมมีค่ามากเมื่อค่าอินพุตความคลาดเคลื่อน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในอัตราที่สูงก่อนที่จะความผิดพลาดจะเกิดขึ้นจริง ดังนั้นเทอมอนุพันธ์จึงช่วยลดการเกิดค่าพุ่งเกินสูงสุด ซึ่งเกิดจากตัวควบคุมแบบพี หรือแบบไอได้ ดังรูปที่ (3.5)



รูปที่ 3.5 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบตี

ซึ่งหากค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าคงที่ตัวควบคุมแบบตีจะไม่มีการสะสมค่าความคลาดเคลื่อน ทำให้การควบคุมแบบนี้ ไม่เปลี่ยนแปลงต่อค่าความผิดพลาดที่คงที่ หรือมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างช้า ดังนั้นการควบคุมแบบนี้จึงไม่นิยมใช้เพียงตัวควบคุมเดียว แต่มักใช้ร่วมกับการควบคุมแบบอื่น

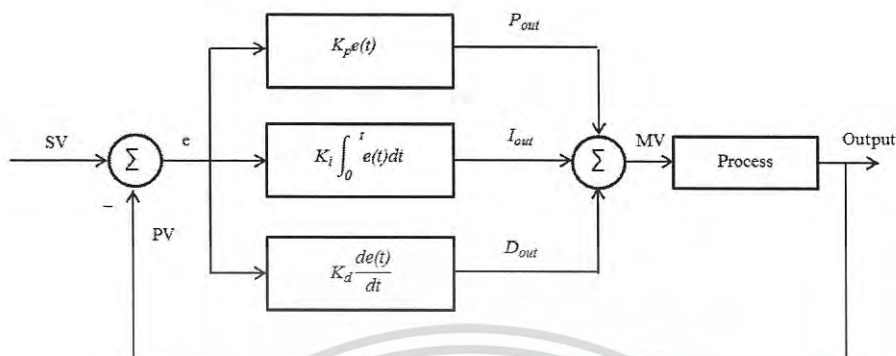
3.2.4 ตัวควบคุมแบบพีไอดี

สัญญาณขาออกของตัวควบคุมแบบพีไอดีในสมการ (3.3) เป็นผลจากการรวมของ เทอมของตัวควบคุมแบบพีดังสมการที่ (3.4) เทอมของตัวควบคุมแบบไอดังสมการที่ (3.5) และเทอมของตัวควบคุมแบบตี ดังสมการที่ (3.6) เมื่อแทนค่าในสมการที่ (3.3) จะได้สัญญาณขาออก $MV(t)$ ดังสมการที่ (3.7)

$$MV(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยมีบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมที่สอดคล้องได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบพีไอดี

ซึ่งโดยทั่วไป ผลจากการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดีสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ผลกระทบจากการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดี

พารามิเตอร์	ช่วงเวลาขึ้น (Rise time)	ค่าพุ่งเกิน (Overshoot)	เวลาเข้าสู่สถานะคงตัว (Settling time)	ความผิดพลาด ที่สถานะคงตัว (Steady-state error)
K_p	ลด	เพิ่ม	เปลี่ยนแปลง เล็กน้อย	ลด
K_i	ลด	เพิ่ม	เพิ่ม	ลดลงอย่าง มีนัยสำคัญ
K_d	ลดลงเล็กน้อย	ลดลงเล็กน้อย	ลดลงเล็กน้อย	ไม่มีผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.5 ตัวควบคุมแบบพีไอทีเวลาติสคริต

เนื่องจากการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เป็นระบบดิจิทัลในการประมวลผล ซึ่งระบบดิจิทัลไม่สามารถคำนวณแบบเวลาต่อเนื่องได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการซักร้อยอย่างสัญญาณต่อเนื่อง T_s (Sampling period) โดยนิยมซักร้อยอย่างทุก ๆ เวลาคงที่

การควบคุมแบบพีไอทีเวลาติสคริต (Discrete-time PID control) พิจารณาจากสมการการควบคุมแบบพีไอทีที่เป็นเวลาต่อเนื่องในสมการที่ (3.7) โดยอาศัยการประมาณเทอมปริพันธ์ และเทอมอนุพันธ์ด้วยวิธีเชิงเลข (Numerical method) ซึ่งมีหลายวิธี โดยมีการประมาณอย่างง่าย ได้เป็นดังสมการที่ (3.8)

$$I_{out} = K_i \int_0^t e(t) dt = K_i T_s \sum_{i=0}^k e[i] \quad (3.8)$$

ในเทอมของสมการเทอมอนุพันธ์ดังนี้

$$D_{out} = K_d \frac{de(t)}{dt} = K_d \frac{e[k] - e[k-1]}{T_s} \quad (3.9)$$

และสามารถเขียนสมการการควบคุมแบบพีไอทีเวลาติสคริตได้ดังสมการที่ (3.10)

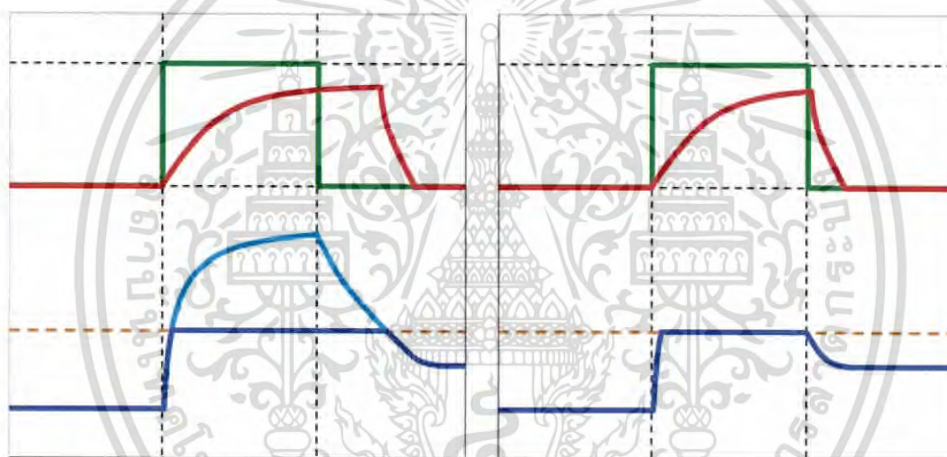
$$MV = u[k] = K_p e[k] + K_i T_s \sum_{i=0}^k e[k] + K_d \frac{e[k] - e[k-1]}{T_s} \quad (3.10)$$

สมการการควบคุมแบบพีไอทีเวลาติสคริตในสมการที่ (3.10) นี้สามารถที่จะนำมาใช้ในการเขียนโปรแกรมควบคุมในตัวควบคุมดิจิทัลได้โดยตรง

3.2.6 การระงับการปริพันธ์

การระงับการปริพันธ์เป็นการทำให้ ปรากฏการณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่พบได้ทั่วไปในทางปฏิบัติ ได้แก่ การอิ่มตัวของ การควบคุม ซึ่งปกติอุปกรณ์ควบคุม จะมีขีดจำกัดทางกายภาพในการทำงาน ยกตัวอย่างเช่น มอเตอร์ที่มีขีดจำกัดในเรื่องความเร็ว หรือวาล์วที่ไม่สามารถทำงานได้มากกว่าการเปิดหรือปิด เป็นต้น โดยสำหรับระบบควบคุมที่มีการทำงานเกินกว่าช่วงของเงื่อนไขนี้จะทำให้ค่าของสัญญาณควบคุมที่คำนวณได้มีค่าเกินกว่าขีดจำกัดของอุปกรณ์ควบคุม ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้การควบคุมแบบป้อนกลับ หรือแบบปัดประสิทธิภาพลดลง และระบบจะดำเนินการด้วยการควบคุมแบบ

เปิดแทน คือ อุปกรณ์ควบคุมจะทำงานอยู่ที่ขีดจำกัดของอุปกรณ์ หรือเกิดการอิมิตัวอยู่ อย่างไรก็ตาม การคำนวณตามเทอมปริพันธ์ และค่าสัญญาณควบคุม MV ที่คำนวณได้ ไม่ได้มีการอิมิตัวตามไปด้วย โดยค่าทั้งสองจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเทอมปริพันธ์ถูกสร้างขึ้นจากการสะสมค่าความคลาดเคลื่อนมาตั้งแต่เริ่มการใช้งานจนถึงปัจจุบัน โดยการเพิ่มขึ้นในส่วนที่เกินกว่าขีดจำกัดของอุปกรณ์นั้นจะไม่มีผลต่อกระบวนการเลย แต่จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการก็ต่อเมื่อค่าที่ส่งออกจากตัวควบคุมกลับมาอยู่ช่วงการทำงานของอุปกรณ์ ซึ่งต้องใช้ค่าความคลาดเคลื่อนที่มีเครื่องหมายตรงข้าม และเวลาที่ค่อนข้างมากในการชดเชยค่าที่สะสมในเทอมปริพันธ์ให้กลับสู่ช่วงการทำงาน จึงทำให้เกิดความล่าช้าของผลตอบสนอง หรือเอาต์พุตของกระบวนการ ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “การสะสมค่าเกินระดับจากการปริพันธ์ (Integral windup)” ที่สามารถอธิบายได้จากรูปที่ 3.7



(ก) เมื่อไม่มีการระงับการปริพันธ์

(ข) เมื่อมีการระงับการปริพันธ์

รูปที่ 3.7 ผลตอบสนองเมื่อไม่มีและมีการระงับการปริพันธ์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในรูปที่ 3.7 (ก) ระบบมีการอิมิตัวของสัญญาณควบคุม และเกิดการสะสมค่าเกินระดับการอิมิตัวจากการปรีฟันซ์ โดยสังเกตว่าระบบมีการสะสมค่าความคลาดเคลื่อนในทอมปรีฟันซ์มากกว่าขีดจำกัด ทำให้ค่าสัญญาณควบคุมมากกว่าขีดจำกัดด้วย ซึ่งแม้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนจะมีการกลับเครื่องหมายเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายแล้ว แต่ระบบยังต้องใช้เวลาในการสะสมค่าความผิดพลาดให้สามารถชดเชยค่าเพื่อให้สัญญาณควบคุมกลับมาทำงานในช่วงที่ต่ำกว่าขีดจำกัดสูงสุดของอุปกรณ์ จึงส่งผลให้ผลตอบสนองเกิดการเปลี่ยนแปลง ปัญหาการสะสมค่าเกินระดับการอิมิตัวจากการปรีฟันซ์ที่กล่าวมาข้างต้นนั้นสามารถแก้ไขได้ด้วยการระงับการปรีฟันซ์ ดังรูปที่ 3.7 (ข) โดยจากสมการการประมาณการปรีฟันซ์ในเวลาดิสครีตตามสมการที่ (3.8) ค่าเอาต์พุต I_{out} สามารถพิจารณาได้ดังสมการที่ (3.11)

$$I_{out}[k] = K_i T_s \sum_{i=0}^k e[i] = K_i T_s (e[k] + \sum_{i=0}^{k-1} e[i]) \quad (3.11)$$

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 มีความมากกว่าขีดจำกัดสูงสุดของอุปกรณ์ควบคุม และความคลาดเคลื่อนปัจจุบันมีค่าบวก ($e[k] > 0$) จะกำหนดผลของการปรีฟันซ์คงค่าเดิม หรือเขียนในรูปสมการได้ตามสมการที่ (3.12)

$$I_{out}[k] = I_{out}[k-1] \quad (3.12)$$

- ถ้า MV มีค่าน้อยกว่าขีดจำกัดต่ำสุดของอุปกรณ์ควบคุม และความคลาดเคลื่อนปัจจุบันมีค่าลบ ($e[k] < 0$) จะกำหนดผลของการปรีฟันซ์คงค่าเดิมได้ตามสมการที่ (3.11)

- ถ้า MV อยู่ในช่วงการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย จะกำหนดให้มีการปรีฟันซ์ตามสมการที่ (3.11) เช่นกัน

จากเงื่อนไขข้างต้นสามารถกล่าวอย่างสรุปตามสมการที่ (3.13)

$$I_{out}[k] = \begin{cases} I_{out}[k-1], & MV > \text{Maximum Limit and } e[k] > 0 \\ I_{out}[k-1], & MV < \text{Minimum Limit and } e[k] < 0 \\ I_{out}[k-1] + K_i T_s e[k], & MV \text{ in desired range} \end{cases} \quad (3.13)$$

โดยตัวอย่างผลจากการระงับการปรับหนี้ในการควบคุมได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.7 (ข) ซึ่งสังเกตว่า ผลตอบสนองมีการตอบสนองเร็วขึ้นทันต่อการเปลี่ยนสัญญาณเป้าหมาย เนื่องจากไม่ต้องมีการสะสม สัญญาณความผิดพลาดในทิศทางตรงกันข้ามเพื่อชดเชยค่าในเทอมปรับหนี้ ทำให้ไม่เกิดความล่าช้า อีกทั้งยังช่วยป้องกันการเกิดค่าพุ่งเกินของผลตอบสนองได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

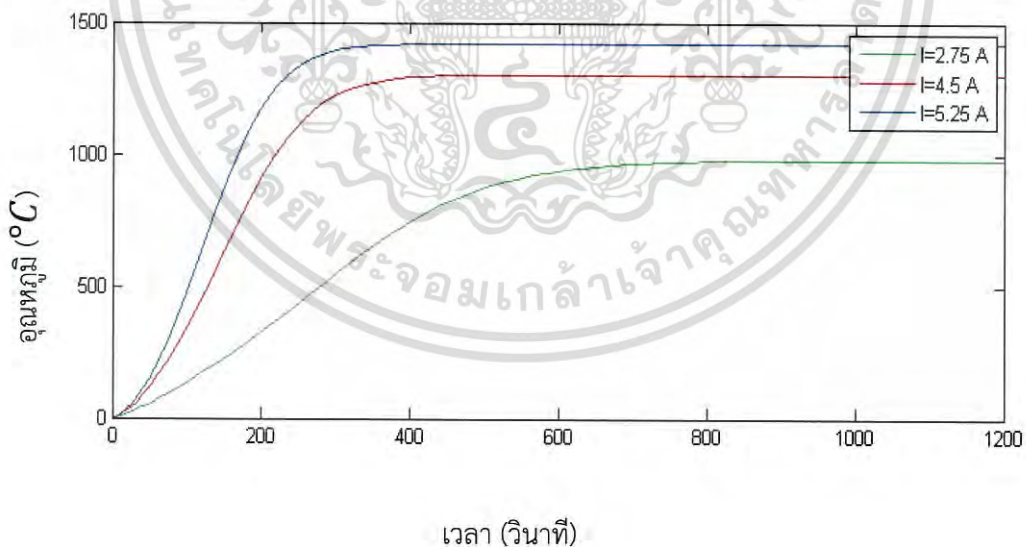
บทที่ 4

ผลการจำลอง

บทนี้นำเสนอการจำลองการควบคุมอุณหภูมิของเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 การทดลอง โดยการทดลองแรกเป็นการจำลองอุณหภูมิแบบวงเปิด การทดลองที่สองเป็นการจำลองการควบคุมอุณหภูมิแบบวงปิดโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี การทดลองสุดท้ายเป็นการทดลองประสิทธิภาพตัวควบคุม เพื่อควบคุมอุณหภูมิของเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ในทุกการทดลองผลอุณหภูมิมีการบันทึกค่าจากเครื่องมือวัด ซึ่งเป็นค่า PV เปรียบเทียบกับค่าที่กำหนด ซึ่งเป็นค่าจากการทดลองตามแบบจำลอง จากหัวข้อที่ 3.1 โดยกำหนดช่วงเวลาชักตัวอย่าง 0.5 วินาที ซึ่งรายละเอียดของการทดลองเป็นดังนี้

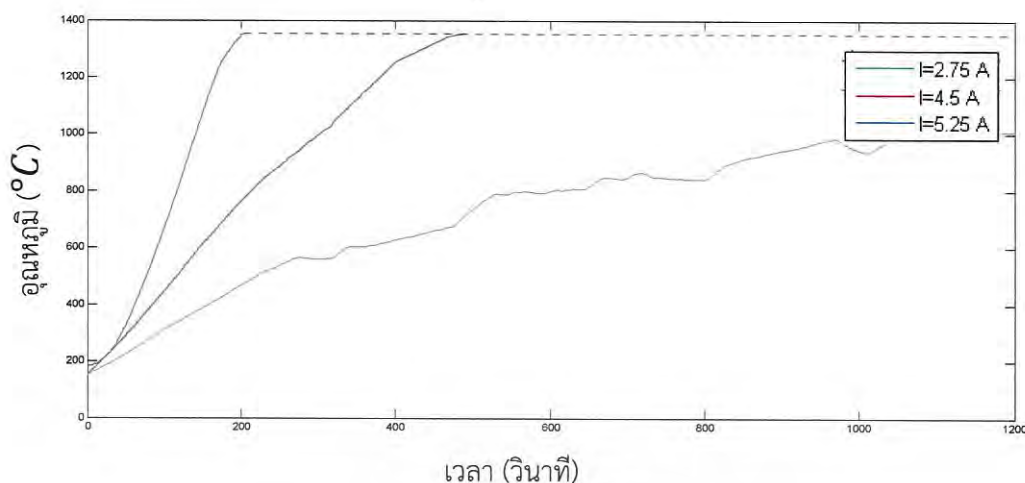
4.1 ผลการจำลองอุณหภูมิแบบวงเปิด

การจำลองอุณหภูมิแบบวงเปิดเป็นการจำลองเพื่อเปรียบเทียบแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับผลการทดลองจริง เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง ในการจำลองอาศัยการจ่ายอินพุตกระแสไฟฟ้า 3 ค่าคือ 2.75 A , 4.5 A และ 5.25 A ได้ผลตอบสนองดังรูปที่ 4.1 และเปรียบเทียบกับผลการทดลองอ้างอิงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 ผลการจำลองอุณหภูมิของระบบวงเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ผลการทดลองอ้างอิงของระบบทำความร้อนแบบวงเปิด [5]

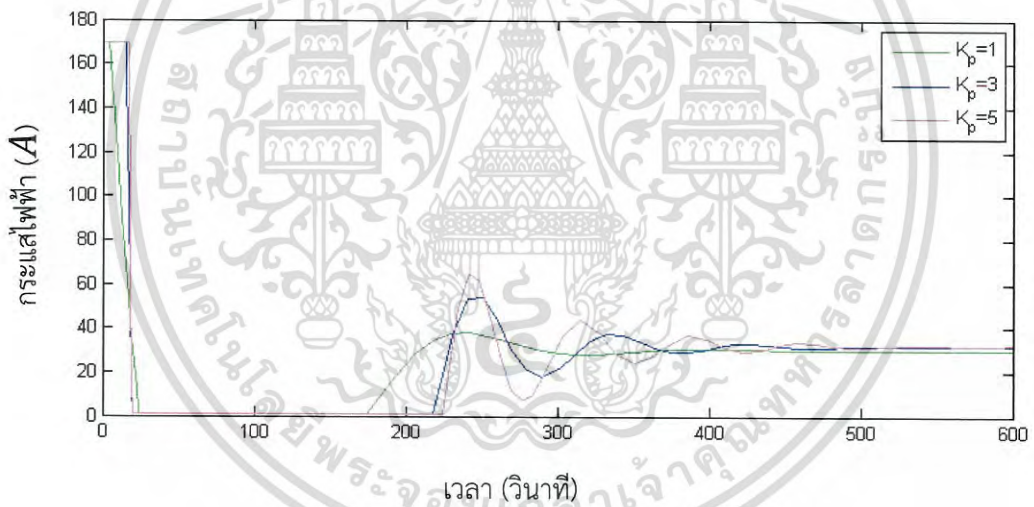
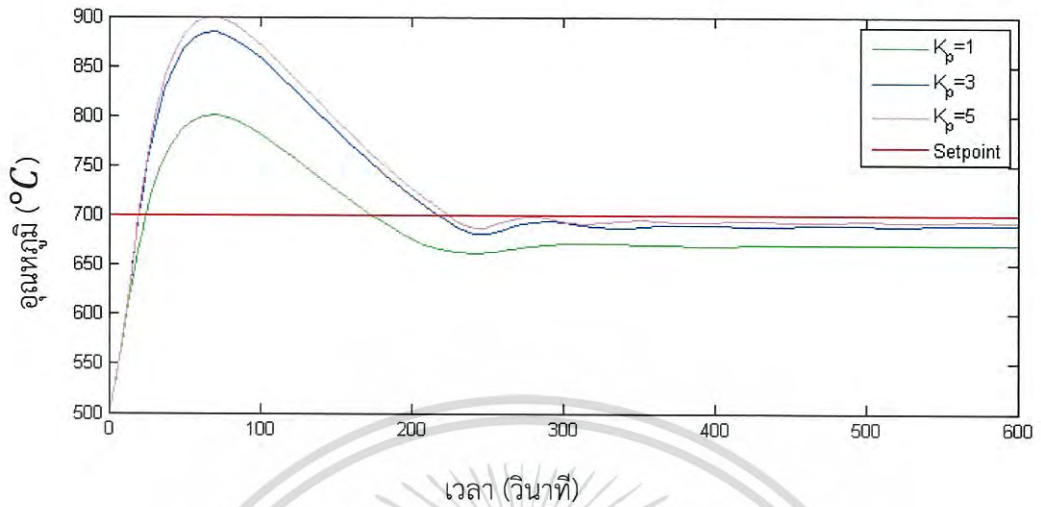
ผลระหว่างการจำลองและการทดลองอ้างอิงนั้น มีค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งกราฟจากการทดลองที่อ้างอิง ค่าของอุณหภูมิสูงสุดจะอยู่ที่ประมาณ $1350.36\text{ }^{\circ}\text{C}$ เนื่องมาจากการวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิล จากหัวข้อที่ 3.1.3 จึงได้อุณหภูมิที่สถานะอยู่ตัวจากการทดลองจริงเพียงสองจุด ถึงกระแสไฟฟ้าจะมากขึ้นค่าที่อ่านได้จะไม่เกินจากนี้ ดังนั้นจากการจำลองดังกล่าว สามารถใช้ศึกษาระบบควบคุมอุณหภูมิได้ ในหัวข้อถัดไป

4.2 ระบบควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมพีไอดี

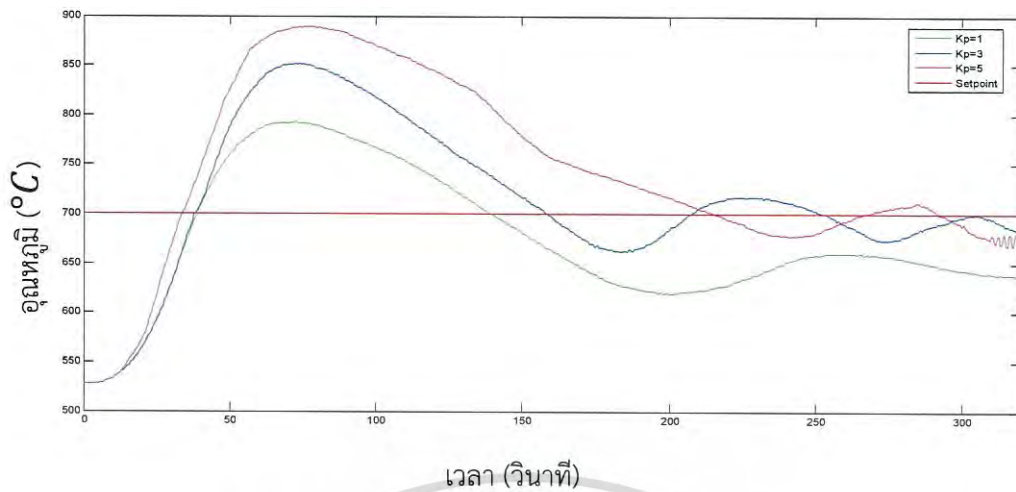
การควบคุมอุณหภูมิของเตาความร้อนแบบเหนียวนำแบบ ของหัวข้อที่ 4.1 เป็นการควบคุมอุณหภูมิให้เข้าสู่ค่าที่ต้องการ แบ่งออกเป็น 4 การควบคุม คือ การควบคุมแบบพี การควบคุมแบบพีไอ การควบคุมแบบพีดี และการควบคุมแบบพีไอดี ซึ่งการควบคุมแต่ละแบบจะให้ประสิทธิภาพที่แตกต่างกัน ดังนั้นจะต้องเลือกค่าที่ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงที่สุด สามารถลดระยะเวลา หรือทรัพยากรที่จำเป็นลงได้ ในงานอุตสาหกรรม

4.2.1 ระบบควบคุมแบบพี

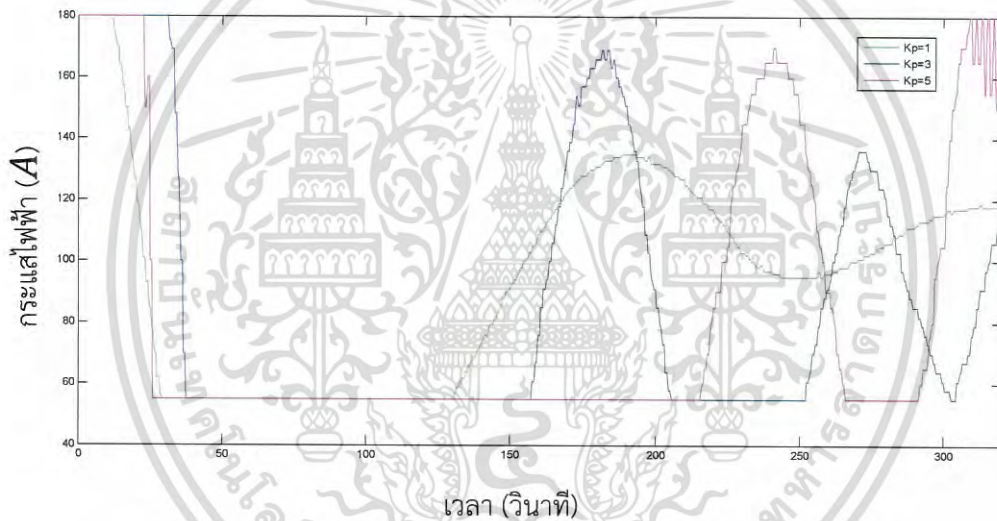
การจำลองการควบคุมอุณหภูมิของเตาความร้อนแบบเหนียวนำในระบบวงปิด โดยอาศัยตัวควบคุมแบบพี ตั้งค่าอุณหภูมิอ้างอิงอยู่ที่ $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ ใช้อุณหภูมิเริ่มต้นอยู่ที่ $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีการปรับค่าพารามิเตอร์ 3 รูปแบบคือ $K_p = 1$ ตั้งเส้นสีเขียว $K_p = 3$ ตั้งเส้นน้ำเงิน และ $K_p = 5$ ตั้งเส้นสีชมพู แสดงสัญญาณเอาต์พุตค่าอุณหภูมิดังรูปที่ 4.3 และแสดงกระแสไฟฟ้าควบคุมดังรูปที่ 4.4 เพื่อเทียบกับผลการทดลองอ้างอิงที่สอดคล้อง ดังรูปที่ 4.5 และ รูปที่ 4.6 ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ผลการทดลองอ้างอิงเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพี [5]



รูปที่ 4.6 ผลการทดลองอ้างอิงของสัญญาณควบคุมของกระแสไฟฟ้า [5]

4.2.2 ระบบควบคุมแบบพีโอ

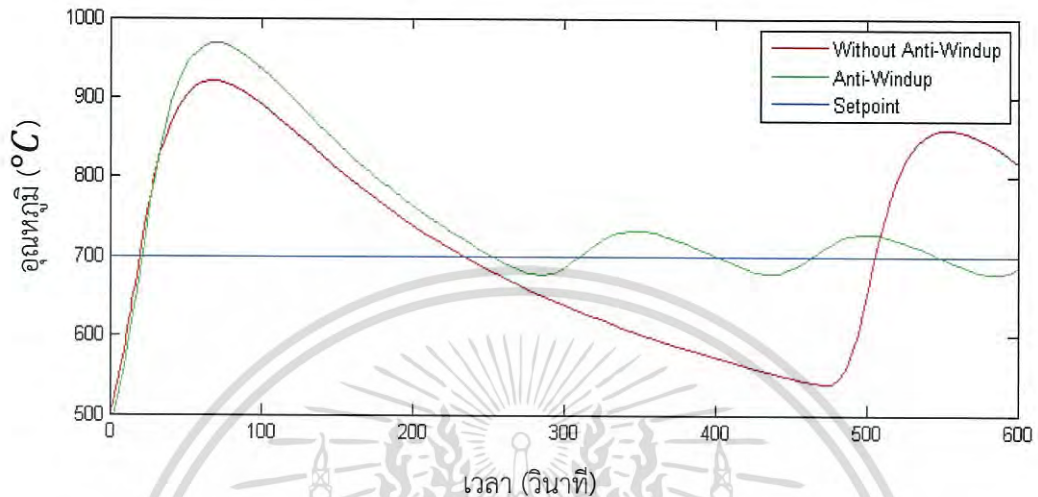
การทดลองในส่วนนี้เป็นการจำลองการควบคุมวงปิดโดยทดลองปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีโอ โดยอุณหภูมิอ้างอิงอยู่ที่ $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ ใช้อุณหภูมิเริ่มต้นอยู่ที่ $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งประกอบไปด้วยการเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมแบบพีโอที่ไม่มีการระงับปริพันธ์ และตัวควบคุมแบบพีโอที่มีการระงับปริพันธ์ และผลเปรียบเทียบการปรับค่าเกน K_i ที่แตกต่างกัน

4.2.2.1 การจำลองเมื่อไม่มีและมีการระงับปริพันธ์

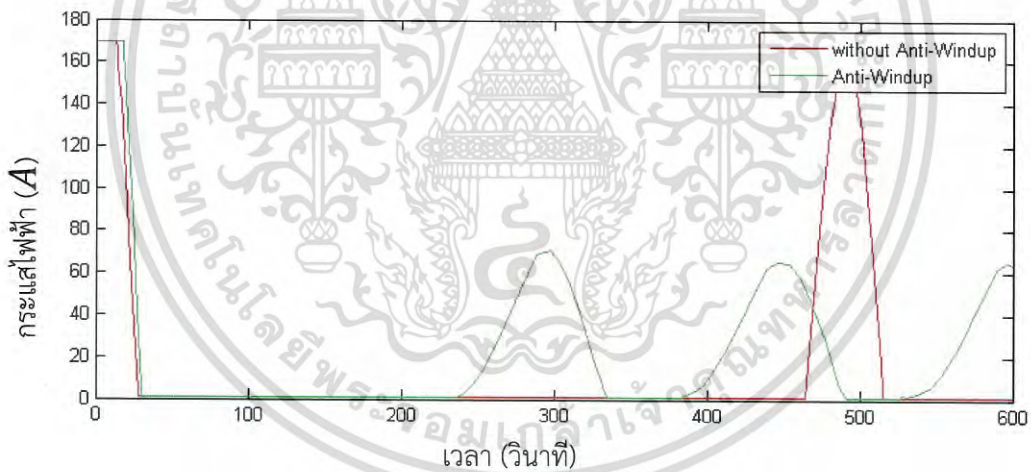
การจำลองเตาทำความร้อนแบบเหนียวในในระบบวงปิด โดยอาศัยตัวควบคุมแบบพีโอ ซึ่งประกอบไปด้วยตัวควบคุมพีโอแบบที่ไม่มีการระงับปริพันธ์และตัวควบคุมพีโอที่มีการระงับปริพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ผลการจำลองเอาต์พุตค่าวัตต์อุณหภูมิ และสัญญาณควบคุมของกระแสไฟฟ้าควบคุมดังรูปที่ 4.7 (ก) และ 4.7 (ข) ตามลำดับ โดยเส้นสีแดงนำเสนอผลการจำลองอาศัยตัวควบคุมแบบพีไอแบบไม่มีการระงับปริพันธ์ และเส้นสีเขียวนำเสนอผลการจำลองอาศัยตัวควบคุมแบบพีไอแบบมีการระงับปริพันธ์



(ก) เอาต์พุตค่าวัตต์อุณหภูมิ



(ข) สัญญาณควบคุมของกระแสไฟฟ้า

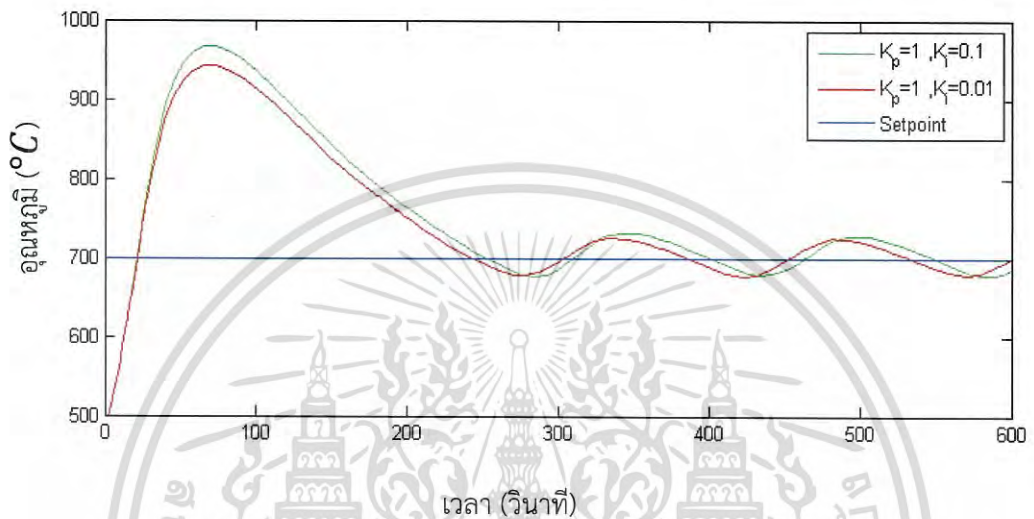
รูปที่ 4.7 ผลการจำลองเมื่อใช้ตัวควบคุมพีไอและพีไอแบบระงับปริพันธ์

จากผลการจำลองพบว่าเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการระงับปริพันธ์สัญญาณควบคุมจะมีการแกว่งน้อยกว่า ดังนั้นในการทดลองที่มีการใช้ตัวควบคุมแบบไอ จะใช้แบบที่มีการระงับปริพันธ์ เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ดีที่สุด

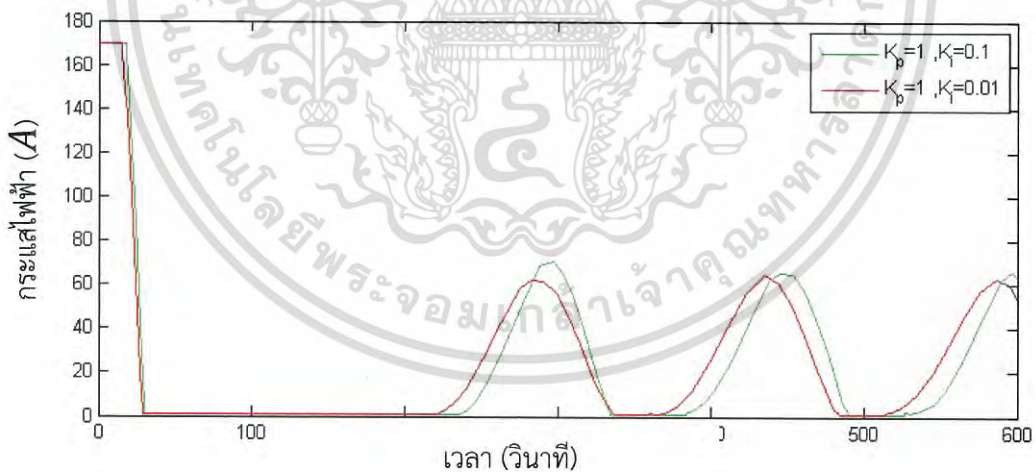
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2.2 การจำลองโดยปรับค่าเกน

การจำลองเตาทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำในระบบวงปิด โดยอาศัยตัวควบคุมแบบพีไอ มีการปรับค่าพารามิเตอร์ 2 แบบ โดยจะคงค่าเกนของ $K_p = 1$ ซึ่งปรับเพียงค่าเกนของ K_i เพียงอย่างเดียว คือ $K_i = 0.1$ ดังเส้นสีเขียว และ $K_i = 0.01$ ดังเส้นสีแดง แสดงสัญญาณเอาต์พุตค่าวัตต์อุณหภูมิ และสัญญาณควบคุมของกระแสไฟฟ้ารูปที่ 4.8 (ก) และรูปที่ 4.8 (ข)



เวลา (วินาที)
(ก) เอาต์พุตค่าวัตต์อุณหภูมิ



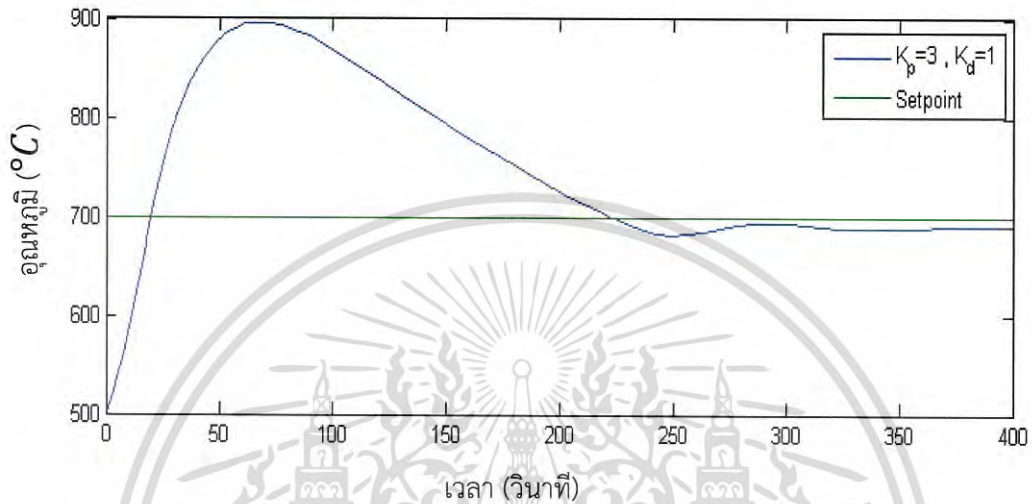
(ข) สัญญาณควบคุมของกระแสไฟฟ้า

รูปที่ 4.8 ผลการจำลองเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ

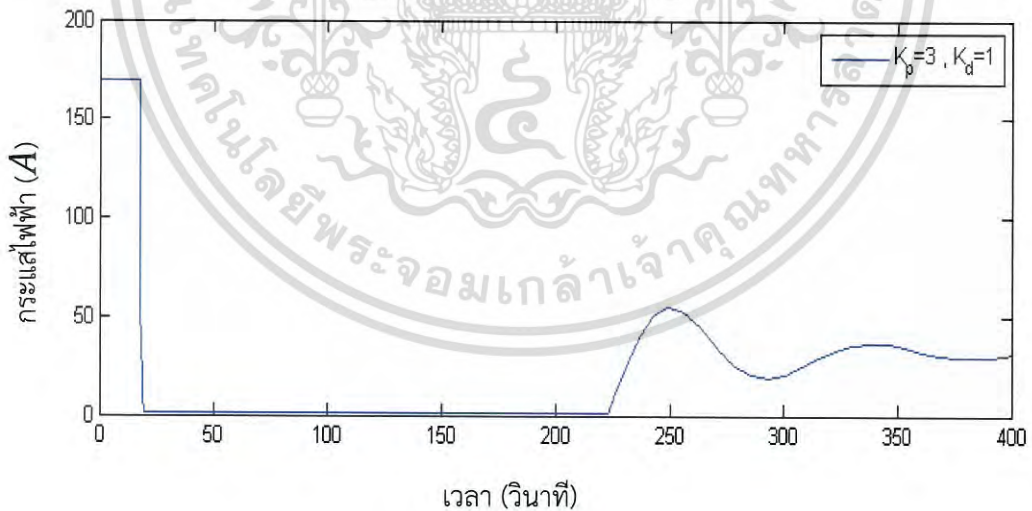
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ระบบควบคุมแบบพีดี

การจำลองการควบคุมอุณหภูมิของเตาความร้อนแบบเหนี่ยวนำในระบบวงปิด โดยอาศัยตัวควบคุมแบบพีดี มีการปรับค่าพารามิเตอร์ คือ $K_p = 3$ และ $K_d = 1$ ดังเส้นสีน้ำเงิน แสดงสัญญาณเอาต์พุตค่าวัดอุณหภูมิ และสัญญาณควบคุมของกระแสไฟฟ้าดังรูปที่ 4.9 (ก) และรูปที่ 4.9 (ข)



(ก) เอาต์พุตค่าวัดอุณหภูมิ



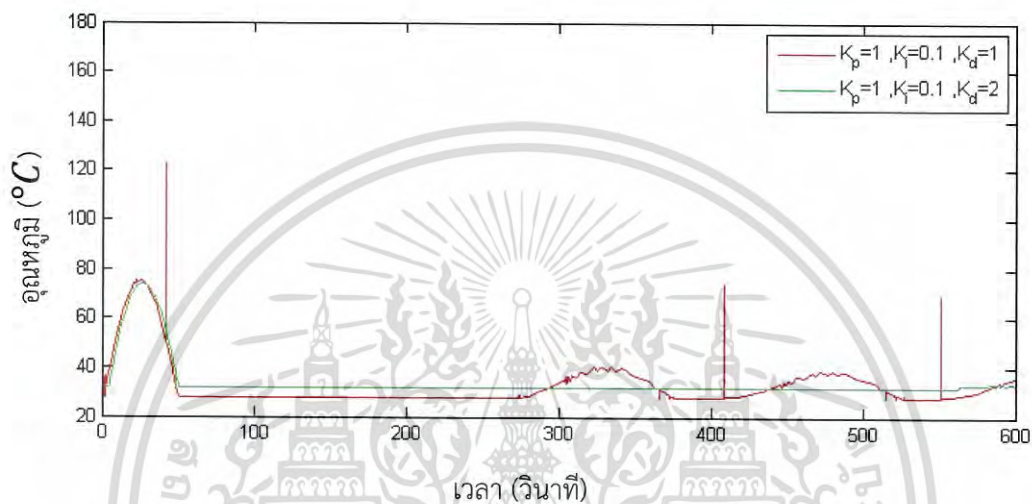
(ข) สัญญาณควบคุมของกระแสไฟฟ้า

รูปที่ 4.9 ผลการจำลองเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีดี

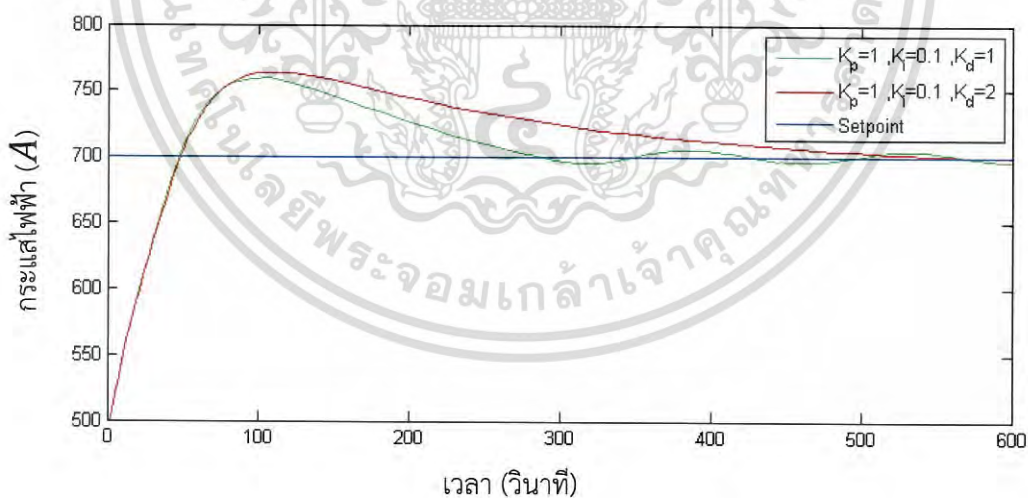
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 ระบบควบคุมแบบพีไอดี

การจำลองการควบคุมอุณหภูมิของเตาความร้อนแบบเหนี่ยวนำในระบบวงปิด โดยอาศัยตัวควบคุมแบบพีไอดี มีการปรับค่าพารามิเตอร์ 2 แบบ โดยจะคงค่าเกน $K_p = 1$ และ $K_i = 0.1$ ซึ่งปรับเพียงค่าเกนของ K_d เพียงอย่างเดียว คือ $K_d = 1$ ดังเส้นสีเขียว และ $K_d = 2$ ดังเส้นสีแดง แสดงสัญญาณเอาต์พุตค่าวัตต์อุณหภูมิ และสัญญาณควบคุมของกระแสไฟฟ้าดังรูปที่ 4.10 (ก) และรูปที่ 4.10 (ข)



(ก) เอาต์พุตค่าวัตต์อุณหภูมิ



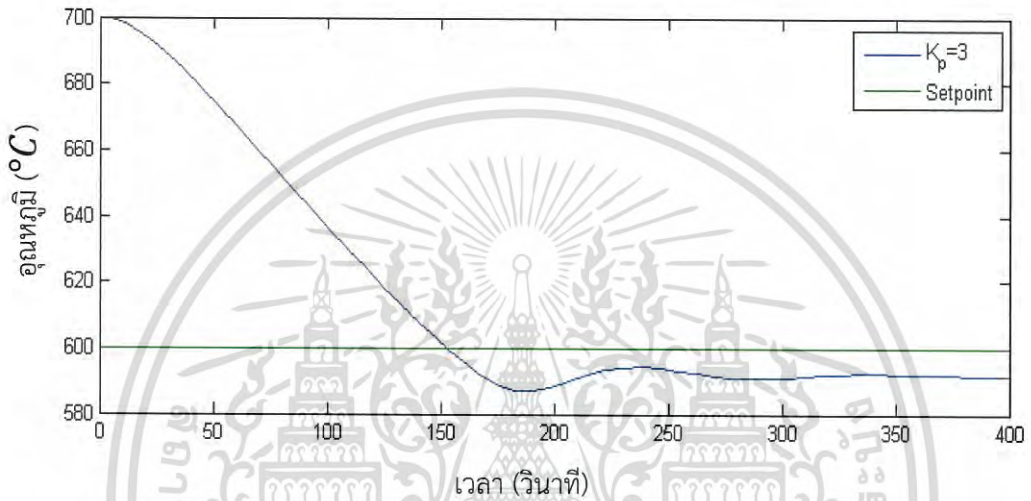
(ข) สัญญาณควบคุมของกระแสไฟฟ้า

รูปที่ 4.10 ผลการจำลองเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี

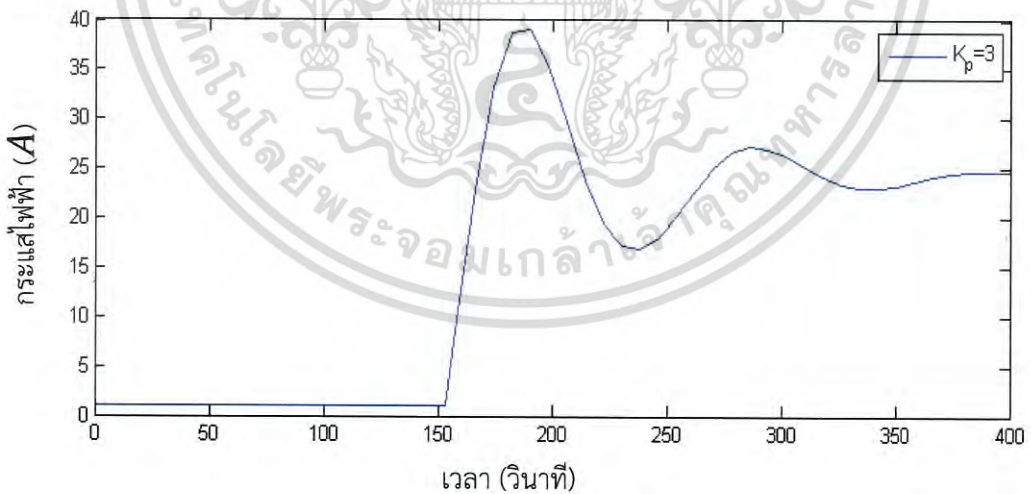
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุม

การทดลองในส่วนนี้เป็นการทดลองการควบคุมวงปิด เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุมที่เลือกใช้ คือเมื่อเกน $K_p = 3$, $K_i = 0$ และ $K_d = 0$ ว่ายังสามารถใช้งานในได้ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายหรือไม่ โดยในการทดลองแรกใช้ค่าอุณหภูมิอ้างอิง $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ จากอุณหภูมิเริ่มต้นที่ประมาณ $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ได้สัญญาณเอาต์พุตค่าวัตต์อุณหภูมิ และสัญญาณควบคุมของกระแสไฟฟ้างดรูปที่ 4.11 (ก) และรูปที่ 4.11 (ข)



(ก) เอาต์พุตค่าวัตต์อุณหภูมิ

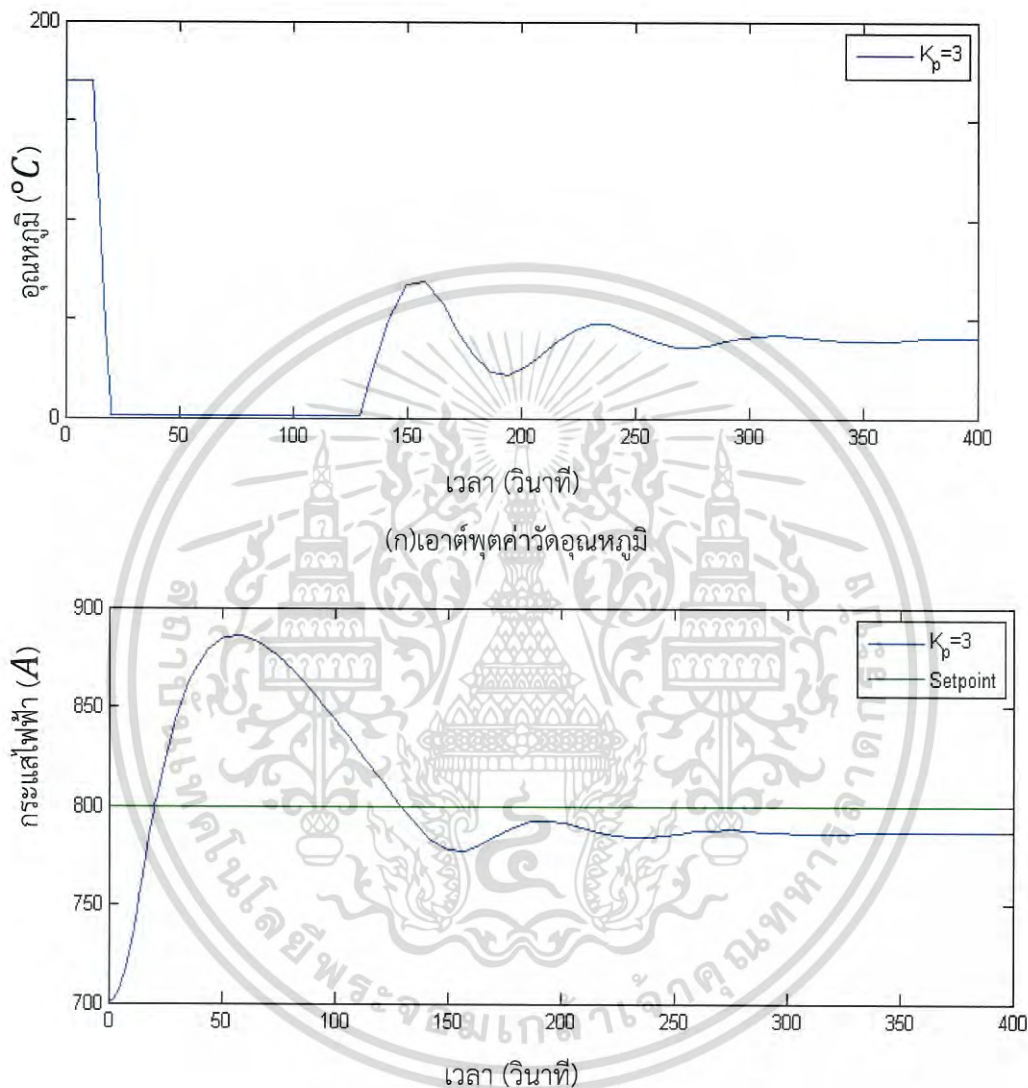


(ข) สัญญาณควบคุมของกระแสไฟฟ้า

รูปที่ 4.11 ผลจำลองเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็น $600\text{ }^{\circ}\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และในการทดลองที่สองใช้ค่าอุณหภูมิอ้างอิง $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ จาก อุณหภูมิเริ่มต้นที่ประมาณ $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งจะได้สัญญาณเอาต์พุตค่าวัดอุณหภูมิ และกระแสไฟฟ้าควบคุมดังรูปที่ 4.12 (ก) และรูปที่ 4.12 (ข) ซึ่งพบว่าตัวควบคุมดังกล่าวสามารถควบคุมให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปยังค่าเป้าหมายได้



(ข) สัญญาณควบคุมของกระแสไฟฟ้า

รูปที่ 4.12 ผลจำลองเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็น $800\text{ }^{\circ}\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทวิจารณ์และสรุปผล

5.1 สรุปการจำลอง

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาการควบคุมอุณหภูมิของเตาความร้อนแบบเหนี่ยวนำ จากแบบจำลอง โดยในเบื้องต้น ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเตาความร้อนแบบเหนี่ยวนำ เพื่อใช้ในการจำลองการควบคุมอุณหภูมิระบบทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ซึ่งปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี และรวมแบบจำลองของเครื่องมือวัดซึ่งใช้เทอร์โมคัปเปิลในการวัด

จากผลการจำลองของอุณหภูมิของเตาความร้อนแบบเหนี่ยวนำในหัวข้อที่ 4.1 เมื่อพิจารณาพฤติกรรมของระบบวงเปิด เทียบกับผลการทดลองอ้างอิง [5] ซึ่งผลที่ได้มีความคลาดเคลื่อน โดยจากผลการจำลองที่ระดับกระแสอินพุตต่ำ ($2.75 A$ และ $4.5 A$) ความเร็วของอุณหภูมิที่ได้ขึ้นเร็วกว่าผลการทดลองอ้างอิง และพบว่าที่ระดับกระแสอินพุต $2.75 A$ ให้ค่าอุณหภูมิที่สภาวะอยู่ตัวใกล้เคียงกันที่ประมาณ $1000\text{ }^{\circ}C$ แต่ผลการจำลองที่ระดับกระแสอินพุตสูง ($5.25 A$) ความเร็วของอุณหภูมิที่ได้ขึ้นช้ากว่าผลการทดลองอ้างอิง อย่างไรก็ตามแนวโน้มของผลการจำลองใกล้เคียงกับผลการทดลองอ้างอิงในระดับที่ยอมรับได้ จึงสามารถใช้แบบจำลองที่ศึกษาในการจำลองการควบคุมอุณหภูมิระบบทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ โดยในการจำลองระบบควบคุมอุณหภูมิแรกในหัวข้อ 4.2.1 อาศัยตัวควบคุมแบบพี โดยทดลองปรับค่า K_p เพิ่มขึ้น ค่าฟังก์ชันจะสูงขึ้น แต่ค่าความผิดพลาดที่สภาวะอยู่ตัวน้อยลง อย่างไรก็ตามที่ K_p เท่ากับ 3 และ 5 พบว่าลักษณะผลตอบสนองใกล้เคียงกัน โดยมีค่าฟังก์ชันเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ที่ K_p เท่ากับ 5 โดยเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง [5] พบว่ามีความสอดคล้องคือ เมื่อ K_p เพิ่มขึ้น ค่าฟังก์ชันจะสูงขึ้น และค่าความผิดพลาดที่สภาวะอยู่ตัวน้อยลง โดยรวมมีค่าฟังก์ชันและเวลาเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวใกล้เคียงกับการจำลอง แต่ที่ K_p เท่ากับ 3 และ 5 จากการทดลองจริง ให้ผลตอบสนองแตกต่างกันคือ ที่เกน K_p เท่ากับ 3 ผลตอบสนองมีค่าฟังก์ชันน้อยกว่าแต่ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวเร็วกว่า ซึ่งแตกต่างจากผลการจำลอง จากหัวข้อที่ 4.2.2 ในกรณีใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ มีการจำลองสองส่วน คือในหัวข้อที่ 4.2.2.1 พิจารณากรณีมีการระงับปริพันธ์และไม่ระงับปริพันธ์ พบว่าผลตอบสนองของระบบควบคุมแบบมีการระงับปริพันธ์จะเกิดค่าฟังก์ชันมากกว่าเล็กน้อย แต่มีการแกว่งรอบค่าอุณหภูมิอ้างอิงที่สภาวะอยู่ตัวน้อยกว่ามากและระบบเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้เร็วกว่าการควบคุมแบบไม่ระงับปริพันธ์ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาสัญญาณควบคุม พบว่ากรณีไม่ระงับปริพันธ์ เมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิอ้างอิง สัญญาณควบคุมกระแสไฟฟ้ายังไม่ถูกจ่าย เนื่องจากมีการสะสมความผิดพลาด จึงต้องรอให้อุณหภูมิลดลงจนการสะสมความผิดพลาดหักล้างกัน สัญญาณควบคุมกระแสไฟฟ้าจึงเริ่มจ่ายอีกครั้ง ส่วนในหัวข้อที่ 4.2.2.2 ทดลองปรับค่าเกน K_i พบว่า

เมื่อปรับค่า K_i เพิ่มขึ้นระบบจะมีค่าพุ่งเกินสูงกว่าเล็กน้อย โดยผลการจำลองในกรณีใช้ตัวควบคุมแบบพีไอทั้งสองส่วน พบว่าไม่มีค่าความผิดพลาดที่สภาวะอยู่ตัว ในหัวข้อที่ 4.2.3 กรณีใช้ตัวควบคุมแบบพีดี ใช้ค่า K_p เท่ากับ 3 และใช้ค่า K_d เท่ากับ 1 พบว่ามีค่าลักษณะผลตอบแทนคล้ายกับตัวควบคุมแบบพี ที่ K_p เท่ากับ 3 โดยเวลาที่เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวเร็วกว่าเล็กน้อย แต่จะมีค่าพุ่งเกินสูงกว่าเล็กน้อย และค่าความผิดพลาดที่สภาวะอยู่ตัวเท่าเดิม จากหัวข้อที่ 4.2.4 ในกรณีใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี ใช้ค่า K_p เท่ากับ 1 และ K_i เท่ากับ 0.1 โดยเมื่อเพิ่มค่า K_d จะพบว่า มีค่าพุ่งเกินใกล้เคียงกัน แต่ระบบเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวช้ากว่า โดยไม่มีค่าความผิดพลาดที่สภาวะอยู่ตัวทั้งสองกรณี เมื่อเทียบกับควบคุมอื่น พบว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีให้ผลตอบแทนดีกว่า แต่ในทางปฏิบัติจริง [5] พบว่าต่างจากผลการจำลอง โดยมีค่าพุ่งเกินสูง และเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวนาน และมีการแกว่งของอุณหภูมิที่สภาวะอยู่ตัว จึงไม่เหมาะใช้ในทางปฏิบัติจริง ดังนั้นในหัวข้อที่ 4.3 การทดสอบสมรรถนะของระบบ จึงเลือกใช้ตัวควบคุมแบบพี ที่ K_p เท่ากับ 3 เพื่อทดสอบสมรรถนะ โดยจำลองการปรับอุณหภูมิอ้างอิง จากอุณหภูมิ $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็น $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ และจากอุณหภูมิ $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็น $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ พบว่าผลตอบแทนติดตามอุณหภูมิอ้างอิงใหม่ได้ โดยมีความผิดพลาดที่สภาวะอยู่ตัวไม่มาก โดยในกรณีเพิ่มอุณหภูมิอ้างอิงผลตอบแทนมีค่าพุ่งเกินสูง แต่ในกรณีลดอุณหภูมิอ้างอิง ผลตอบแทนมีค่าพุ่งเกินน้อย

5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข

1. ค่าพารามิเตอร์บางค่าไม่สามารถวัดค่าหรือหาค่าได้โดยตรง จึงต้องสุ่มค่าแบบลองผิดลองถูกเพื่อให้ได้ผลตอบแทนระหว่างการจำลองและการทดลองใกล้เคียงกัน
2. แบบจำลองที่ใช้ยังไม่รวมอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองจริง ดังนั้นหากต้องการให้ผลการจำลองสอดคล้องกับระบบทางกายภาพจริง ควรหาแบบจำลองของอุปกรณ์เหล่านั้นเพื่อรวมในแบบจำลองต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Zinn, S.L. Semiatin, **Elements of Induction Heating**, ASM International, Metals Park, OH, 1988.
- [2] J.D. Verhoeven, H.L. Downing, E.D. Gibson, **Induction case hardening of steel**, *J. Heat Treat.* 4 (3) (1986) 253–264.
- [3] F. Cajner, B. Smoljan, D. Landek, Computer simulation of induction hardening, *J. Mater. Process. Technol.* 157-158 (2004) 55–60.
- [4] J. Nerg, K. Tolsa, P. Silventoinen, J. Partanen, J. Pyrhonen, A dynamic model for the simulation of induction heating devices, *IEEE Trans. Magn.* 35 (5) (1999)3592–3594.
- [5] Jirakit Chailnakom ,Chittaphon Sitthidamrong, **TEMPERATURE CONTROLLER PROTOTYPE FOR AN INDUCTION HEAT FURNACE**, KMITL control engineering, 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

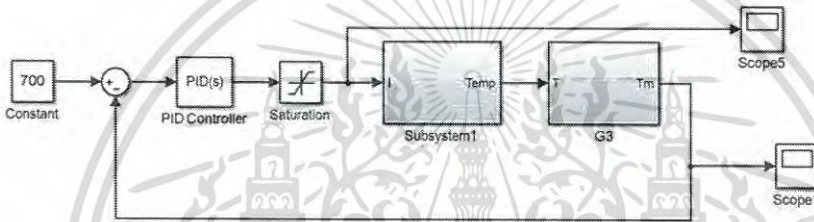


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก โปรแกรม MATLAB

ก.1 ระบบควบคุมอุณหภูมิของเตาความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

ระบบนี้ใช้จำลองการควบคุมอุณหภูมิ โดยกำหนดอุณหภูมิอ้างอิง ที่ $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่บล็อก Constant ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี และมีการกำหนดกระแสไฟฟ้าที่จ่าย ในบล็อก Saturation ให้ระบบของเตาความร้อนเหนี่ยวนำ ที่บล็อก Subsystem1 โดยมีเครื่องมือวัดที่บล็อก G3 วัดอุณหภูมิ เพื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิอ้างอิง ดังรูปที่ ก.1

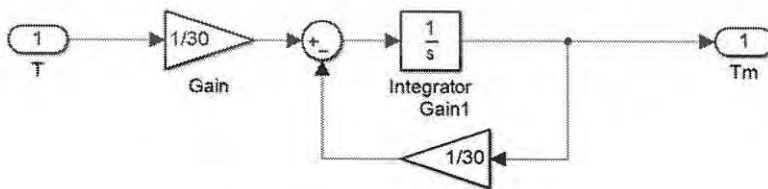


รูปที่ ก.1 ระบบควบคุมอุณหภูมิของเตาความร้อนเหนี่ยวนำ

ซึ่งรายละเอียดของบล็อกที่กล่าวมาข้างต้น จะอธิบายในหัวข้อ ก.2 ถึง ก.5

ก.2 แบบจำลองเครื่องมือวัด

เครื่องมือวัดที่ใช้เป็นแบบจำลองอันดับหนึ่งล่าช้า ซึ่งมีค่าเวลาคงตัว 30 วินาที ที่บล็อก G3 จากหัวข้อที่ ก.1 โดยมีลักษณะ ดังรูปที่ ก.2

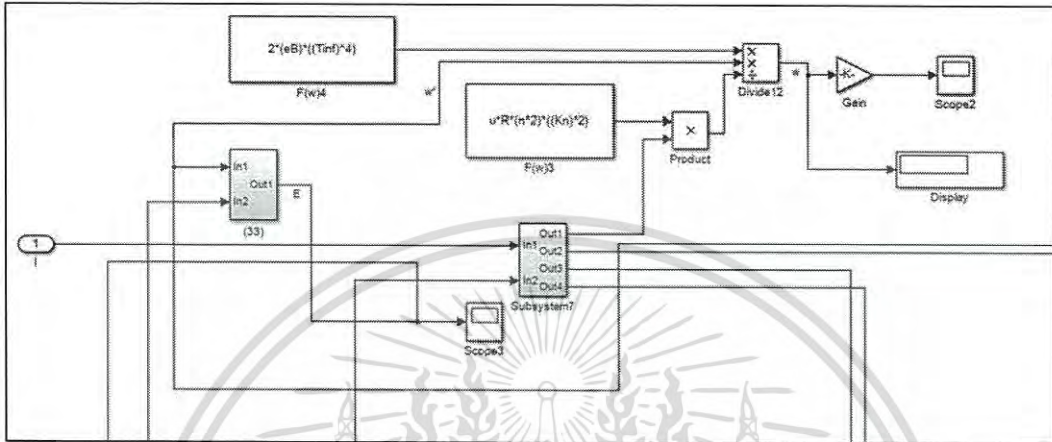


รูปที่ ก.2 แบบจำลองเครื่องมือวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.3 ส่วนของอินพุตกระแสไฟฟ้า

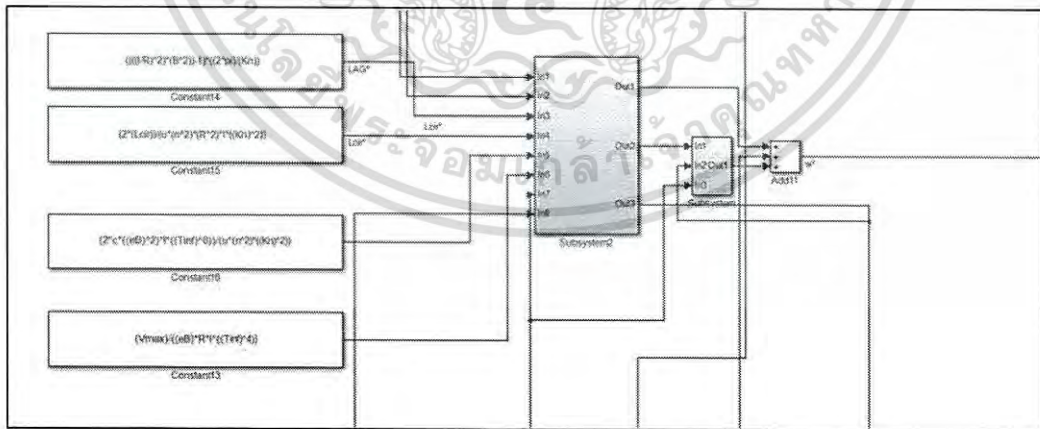
อินพุตที่บล็อก 1 คือกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบ ผ่านบล็อกที่เป็นสมการที่เกี่ยวข้องกับเตาความร้อนแบบเหนี่ยวนำ แสดงลักษณะ ดังรูปที่ ก.3



รูปที่ ก.3 อินพุตของระบบ

ก.4 ส่วนของสมการจากกระแสไฟฟ้าเป็นความถี่

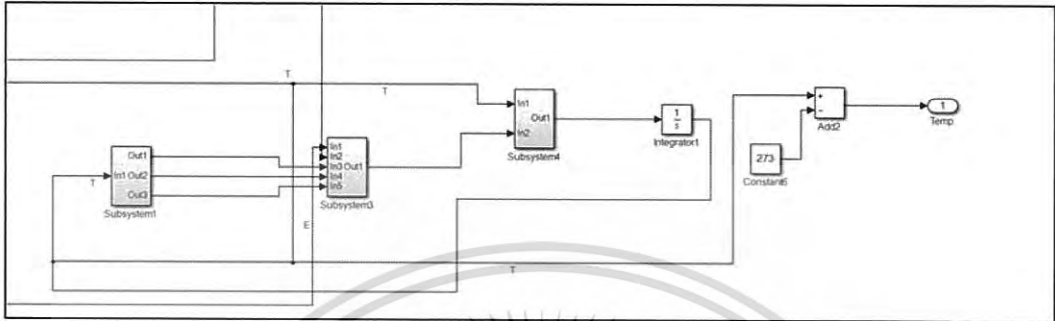
ความถี่จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบ ที่บล็อก Add11 ผ่านบล็อกสมการของเตาความร้อนเหนี่ยวนำ แสดงลักษณะ ดังรูปที่ ก.4



รูปที่ ก.4 กระแสไฟฟ้าเป็นความถี่

ก.5 ส่วนของเอาต์พุตอุณหภูมิ

เอาต์พุตอุณหภูมิ ที่บล็อก Temp วัดค่าอุณหภูมิของระบบที่มากจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับระบบ ผ่านสมการของเตาความร้อนเหนี่ยวนำ แสดงลักษณะ ดังรูปที่ ก.5



รูปที่ ก.5 เอาต์พุตของระบบ

ก.6 พารามิเตอร์

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบควบคุมอุณหภูมิของเตาความร้อนเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ ก.6

```

Editor - C:\Users\Janna\Desktop\parameter.m
parameter.m  parameter2.m  +
1 - Vmax=540/sqrt(2)/15;
2 - I=5.25*15*sqrt(2); %*15 67.5 41.25 5.25*15
3 - l=0.0395; %85; 0.05
4 - ER=0.12; %0.16; 0.22
5 - Lcir=0.690*4e-6;
6 - b=0.045;
7 - R=0.043;
8 - c=8e-6;
9 - B=b/l;
10 - A=pi*(R^2)*((b^2/R^2)-1);
11 - Rna=((1+1.535604*(B^2))+0.273728*(B^4))/(1+1.035803*(B^2))-((9*B)/(3*pi));
12 - Rn=(Rna)*(1-((R^2)/(b^2)))+(R^2)/(b^2);
13 - n=N/l;
14
15
16
    
```

รูปที่ ก.6 พารามิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้