

การพัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิในเตาปลูกผลึกโดยใช้แบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์

THE DEVELOPMENT OF TEMPERATURE CONTROL IN  
CRYSTAL GROWTH FURNACE USING MATHEMATIC MODEL

ประชา เหล่าอวยพร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การพัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิในเตาปลุกผลึกโดยใช้แบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์



ประชา เหล่าอวยพร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิในเตาปลูกผลึกโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ The Development of Temperature Control in Crystal Growth Furnace using Mathematic Model
ชื่อ - นามสกุล	นายประชา เหล่าอวยพร
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า (วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม)
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. จักรี ศรีนนท์ฉัตร
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร. ศิริพร ลาภเกียรติถาวร
ปีการศึกษา	2554

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ณรงค์ บวบทอง)

.....กรรมการ  
(ดร. อำนวย เรืองวารี)

..... กรรมการ  
(ดร. บุญยิ่ง นบนอบ)

.....กรรมการ  
(ดร. จักรี ศรีนนท์ฉัตร)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมหมาย ผิวสะอาด)

วันที่ 9 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2554

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิในเตาปลูกผลึกโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์
ชื่อนักศึกษา	นายประชา เหล่าอวยพร
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. จักรี ศรีนนท์นัทร
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร. ศิริพร ลาภเกียรติถาวร
ปีการศึกษา	2554

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการพัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิในเตาปลูกผลึกโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ทั้งนี้การหลอมวัสดุด้วยเตาปลูกผลึกเป็นวิธีการหนึ่งในการสร้างวัสดุผลึกเดี่ยว ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนคือส่วนระบบควบคุมอุณหภูมิและระบบควบคุมการเคลื่อนที่ เตาเผาที่มีคุณภาพต้องสามารถสร้างการไล่ระดับอุณหภูมิที่มีประสิทธิภาพ โดยจะต้องควบคุมการเคลื่อนที่อย่างช้าๆ ของเตาเผาผ่านชิ้นงาน ซึ่งจะทำให้เกิดการไล่ระดับของอุณหภูมิและมีการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตลอดการใช้งาน

ในการทดลองนี้ได้ออกแบบเตาปลูกผลึกต้นแบบโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS51 ควบคุมการเคลื่อนที่ของเตาเผาและใช้สเต็ปปีงมอเตอร์เป็นต้นกำลัง ควบคุมอุณหภูมิด้วยระบบพีไอดี วัดและวิเคราะห์การไล่ระดับอุณหภูมิที่ระดับความเร็ว 1, 5 และ 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง โดยการทดสอบระบบด้วยระบบการควบคุมแบบเปิดโดยใช้สัญญาณฟังก์ชันหนึ่งหน่วย วิเคราะห์ผลนำมาหาค่าพารามิเตอร์สำหรับสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบให้ความร้อน เปรียบเทียบผลระหว่างแบบจำลองกับระบบจริง และทำการเปรียบเทียบในระบบปิดควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอดี

ผลการทดลองพบว่าระบบให้ความร้อนที่ทดสอบเป็นระบบอันดับหนึ่ง เมื่อใช้ค่าอัตราขยายเฉลี่ย แบบจำลองจะให้ผลใกล้เคียงระบบจริงที่ 58 เปอร์เซ็นต์ ปรับเปลี่ยนใช้ค่าอัตราขยายที่ได้จากการจัดการแบบถดถอยเชิงเส้นจะให้ผลใกล้เคียงระบบจริงที่ 81 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้การควบคุมแบบพีไอดี แบบจำลองจะมีค่าผิดพลาดที่ 2.4 เปอร์เซ็นต์

**คำสำคัญ:** แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ฟังก์ชันถ่ายโอน เตาปลูกผลึก การควบคุมอุณหภูมิ

<b>Thesis Title</b>	The Development of Temperature Control in Crystal Growth Furnace using Mathematic Model
<b>Name - Surname</b>	Mr. Pracha Lao-Auyporn
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Dr. Jakkree Srinonchat
<b>Thesis Co-advisor</b>	Dr. Siriporn Larпкиattaworn
<b>Academic Year</b>	2011

## ABSTRACT

This thesis presents the development of temperature control in crystal growth furnace using mathematic model. According to melting material with crystal growth furnace is one of method to synthesis single crystal material. The compositions of this furnace can be divided into two parts: temperature control system and movement control system. The qualities of furnace must be capable of creating efficient gradient temperature by control the movement slowly of furnace through sample which will operate level of temperature and can control stabilities of temperature.

This experiment firstly designs the crystal growth furnace model using MCS51 microcontroller as movement controller and stepping motor as power generator. PID system is used as temperature control system. The measurement and analysis of gradient temperature are tested at speeds of 1, 5 and 10 mm/hr. The experiments are tested with open loop system by using unit step function. The results analyzes are used to control parameter for create mathematical model of heat system, it is then compared the results between model and real system. The final comparison and analysis is used in closed loop control.

The results show that the heat system is the first order system. Using the gain averaged on simulation model provides yield similar real system at 58%. The gain derives from the linear regression that provides similar real system at 81%. By using PID controller, the model provides an error 2.4%

**Keywords:** Math model, Transfer function, Crystal grown furnace, Temperature control

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก ดร. จักรี ศรีนนท์ฉัตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร. ศิริพร ลากเกียรติถาวร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการซึ่งประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ณรงค์ บวบทอง ประธานกรรมการ ดร. อำนาจ เรืองวาริ ดร. บุญยิ่ง นบนอบ และ ดร.จักรี ศรีนนท์ฉัตร ที่สละเวลาอันมีค่า ให้ความอนุเคราะห์ประเมินรับรองงานวิจัยและให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์เป็นผลให้ งานวิจัยมีความชัดเจน ครบถ้วนและสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้จริง และขอขอบใจนักศึกษาในห้องปฏิบัติการประมวลผลสัญญาณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีทุกคน ที่ให้ความร่วมมืออดทนในการดำเนินกิจกรรมวิจัยร่วมกันจนได้ความสมบูรณ์ของงาน ขอขอบคุณบุคลากร บัณฑิต วิทยาลัยทุกคนที่เป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือตลอดช่วงเวลาของการศึกษาและทำการวิจัย

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา บ่มเพาะจนผู้วิจัยสามารถนำเอาหลักการมาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้ นอกเหนือจากนี้ขอขอบคุณกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่มอบทุนสนับสนุนในโครงการความร่วมมือในการผลิตนักวิจัยและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ตลอดระยะเวลาในการศึกษาของผู้วิจัย

คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

ประชา เหล่าอวยพร

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ง
กิตติกรรมประกาศ .....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง .....	ช
สารบัญภาพ .....	ณ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย .....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย .....	3
1.4 ข้อยกเว้นของการวิจัย .....	3
1.5 ขั้นตอนการวิจัย .....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	4
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	5
2.1 หลักการทำงานของเตาปลูกผลึก .....	5
2.2 ตัวกำเนิดความร้อน .....	7
2.3 คุณสมบัติของก๊าซเฉื่อย .....	10
2.4 เทอร์โมคัปเปิล .....	11
2.5 การจ่ายพลังงาน .....	16
2.6 ฉนวนความร้อน .....	16
2.7 ระเบียบวิธีการทดลองแบบเชิงเส้น .....	18
2.8 ระบบอันดับหนึ่ง .....	19
2.9 การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ .....	21
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	25

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3 วิธีดำเนินการวิจัย .....	28
3.1 การออกแบบและสร้างเตาปลูกผลึกต้นแบบ .....	30
3.2 การทดลองการทำงานของเตาปลูกผลึกต้นแบบ .....	35
3.3 การทดสอบระบบให้ความร้อนด้วยสัญญาณฟังก์ชันหนึ่งหน่วย .....	35
3.4 การสร้างแบบจำลองของระบบให้ความร้อน .....	36
4 ผลการวิจัย .....	41
4.1 การสร้างเตาปลูกผลึกต้นแบบ .....	41
4.2 ผลการทดสอบเตาปลูกผลึกต้นแบบ .....	43
4.3 ผลการทดสอบระบบด้วยสัญญาณฟังก์ชันหนึ่งหน่วย .....	46
4.4 ผลการทดลองสร้างแบบจำลอง .....	49
4.5 ผลเอาต์พุตแบบจำลองที่ใช้ค่าเฉลี่ยอัตราขยายกับระบบจริง .....	49
4.6 ผลเอาต์พุตแบบจำลองที่ใช้ค่าอัตราขยายใหม่กับระบบจริง .....	55
4.7 ผลการทดลองแบบจำลองที่ถูกควบคุมด้วยพีไอดีกับระบบจริง .....	62
5 สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผลและข้อเสนอแนะ .....	67
5.1 เตาปลูกผลึกต้นแบบและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบให้ความร้อน .....	67
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	68
รายการอ้างอิง .....	69
ภาคผนวก .....	71
ภาคผนวก ก เตาปลูกผลึกต้นแบบที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย.....	72
ภาคผนวก ข ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	74
ประวัติผู้เขียน .....	110



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ขนาดมาตรฐานของลวดความร้อนแบบ โมลิบดีนัม ไดซัลไฟด์ .....	9
2.2 ค่าคงที่การนำความร้อนของก๊าซ .....	10
4.1 ค่าตลาดเคลื่อนที่ระยะทาง 300 มิลลิเมตร .....	43
4.2 การไล่ระดับอุณหภูมิโดยใช้ความเร็วที่ 1, 5 และ 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง .....	45
4.3 ค่าคุณลักษณะของระบบที่ระดับอินพุตต่างๆ .....	48
4.4 ค่าผิดพลาดเฉลี่ยของอุณหภูมิเอาต์พุตจากการใช้ค่าอัตราขยายเฉลี่ยที่อินพุต 5, 10, 15, 20, 25, 30 และ 35 เปอร์เซ็นต์ .....	55
4.5 ค่าผิดพลาดเฉลี่ยของอุณหภูมิเอาต์พุตจากการใช้ค่าอัตราขยายเฉลี่ยที่อินพุต 40, 45, 50, 55, 60, 65 และ 70 เปอร์เซ็นต์ .....	55
4.6 ค่าผิดพลาดเฉลี่ยของอุณหภูมิเอาต์พุตจากการใช้ค่าอัตราขยายใหม่ที่อินพุต 5, 10, 15, 20, 25, 30 และ 35 เปอร์เซ็นต์ .....	60
4.7 ค่าผิดพลาดเฉลี่ยของอุณหภูมิเอาต์พุตจากการใช้ค่าอัตราขยายใหม่ที่อินพุต 40, 45, 50, 55, 60, 65 และ 70 เปอร์เซ็นต์ .....	61



## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 ลักษณะของเตาปลุกผลึก .....	1
1.2 การทำงานของส่วนควบคุมอุณหภูมิ .....	2
2.1 ลักษณะของเตาปลุกผลึกแบบใช้การเคลื่อนที่ของเตาเผา .....	6
2.2 ไดอะแกรมการทำงานของส่วนควบคุมอุณหภูมิ .....	6
2.3 ไดอะแกรมการทำงานของส่วนควบคุมการเคลื่อนที่เตาเผา .....	6
2.4 ลวดนิโครม .....	7
2.5 ลวดความร้อนแบบซิลิกอนคาร์ไบด์ .....	8
2.6 ลวดความร้อนแบบ โมลิบดีนัม ไดซัลไฟด์ .....	8
2.7 ลวดความร้อนแบบ โมลิบดีนัม ไดซัลไฟด์ แบบต่างๆ .....	9
2.8 ช่วงทำความร้อนช่วงเย็นของลวดความร้อน .....	9
2.9 โครงสร้างของเทอร์โมคัปเปิล .....	11
2.10 ทิศทางการนำความร้อน .....	17
2.11 วงจรสมมูลการนำความร้อน .....	17
2.12 การประกบผนังแต่ละชั้น .....	18
2.13 ระบบควบคุมแบบเปิด .....	20
2.14 การตอบสนองของระบบอันดับหนึ่ง .....	21
2.15 องค์ประกอบของเตาปลุกผลึกที่พัฒนาระบบการยกเตา .....	26
2.16 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมมอเตอร์และแผ่นดิสก์ที่ใช้ทำอบติคอลเอ็นโค้ดเดอร์ .....	26
2.17 บอร์ดทดลองระบบให้ความร้อน .....	27
3.1 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย .....	28
3.2 ความกว้างสัญญาณที่ความเร็ว 0.1 และ 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง .....	30
3.3 ชุดกำเนิดสัญญาณควบคุมความเร็ว .....	31
3.4 ไดอะแกรมระบบควบคุมการเคลื่อนที่ .....	31
3.5 โปรแกรมควบคุมการจ่ายสัญญาณขับเคลื่อนมอเตอร์ .....	32
3.6 แบบเตาเผาที่สร้าง .....	33
3.7 เตาเผาที่ประกอบขึ้น .....	34

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.8 ไดอะแกรมระบบควบคุมอุณหภูมิ .....	34
3.9 วงจรการควบคุมอุณหภูมิ .....	35
3.10 สัญญาณฟังก์ชันหนึ่งหน่วยที่กำลังไฟฟ้า 20 เปอร์เซ็นต์ .....	36
3.11 คาบเวลาการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ระดับต่างๆ .....	36
3.12 การกำหนดค่า STEP .....	37
3.13 อุปกรณ์ Scope .....	37
3.14 อุปกรณ์ Transfer Fcn .....	38
3.15 อุปกรณ์ Constant .....	38
3.16 อุปกรณ์ Gain .....	39
3.17 อุปกรณ์ To File .....	39
4.1 ระบบให้ความร้อน .....	41
4.2 การติดตั้งระบบให้ความร้อน 2 ชั้น .....	42
4.3 การติดตั้งชุดควบคุมระบบของเตาปลุกผลึกต้นแบบ .....	42
4.4 การวัดค่าระยะทางเคลื่อนที่ .....	43
4.5 การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลที่ตำแหน่งการวัด .....	44
4.6 การกำหนดอุณหภูมิที่ตัวควบคุมอุณหภูมิ .....	44
4.7 กราฟการไล่ระดับอุณหภูมิ .....	46
4.8 กราฟอุณหภูมิที่จ่ายกำลังไฟฟ้า 5, 10, 15, 20, 25, 30 และ 35 เปอร์เซ็นต์ .....	47
4.9 กราฟอุณหภูมิที่จ่ายกำลังไฟฟ้า 40, 45, 50, 55, 60, 65 และ 70 เปอร์เซ็นต์ .....	47
4.10 แผนภาพแบบจำลองระบบให้ความร้อน .....	49
4.11 กราฟเปรียบเทียบแบบจำลองที่ใช้ค่าเฉลี่ยกับระบบจริงที่ระดับอินพุต 5% .....	50
4.12 กราฟเปรียบเทียบแบบจำลองที่ใช้ค่าเฉลี่ยกับระบบจริงที่ระดับอินพุต 10% .....	50
4.13 กราฟเปรียบเทียบแบบจำลองที่ใช้ค่าเฉลี่ยกับระบบจริงที่ระดับอินพุต 15% .....	50
4.14 กราฟเปรียบเทียบแบบจำลองที่ใช้ค่าเฉลี่ยกับระบบจริงที่ระดับอินพุต 20% .....	51
4.15 กราฟเปรียบเทียบแบบจำลองที่ใช้ค่าเฉลี่ยกับระบบจริงที่ระดับอินพุต 25% .....	51
4.16 กราฟเปรียบเทียบแบบจำลองที่ใช้ค่าเฉลี่ยกับระบบจริงที่ระดับอินพุต 30% .....	51
4.17 กราฟเปรียบเทียบแบบจำลองที่ใช้ค่าเฉลี่ยกับระบบจริงที่ระดับอินพุต 35% .....	52



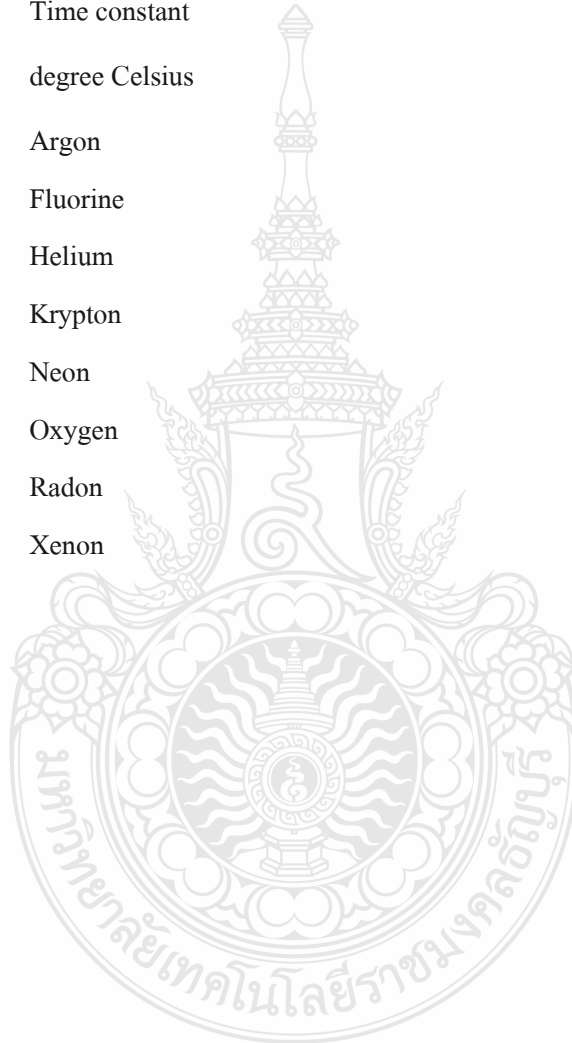
## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.45 กราฟค่าผิดพลาดที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส .....	64
4.46 กราฟเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส .....	65
4.47 กราฟเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส .....	66



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$\Delta$	Difference operator
$\Omega$	Resistance
$\rho$	Static resistivity
$\tau$	Time constant
$^{\circ}\text{C}$	degree Celsius
Ar	Argon
F	Fluorine
He	Helium
Kr	Krypton
Ne	Neon
O	Oxygen
Rn	Radon
Xe	Xenon



# บทที่ 1

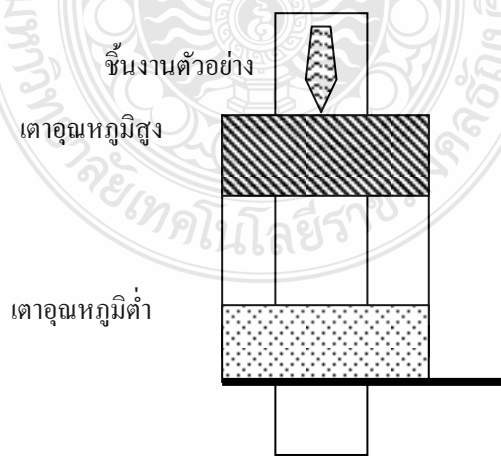
## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การสร้างวัสดุผลึกเดี่ยวที่มีคุณสมบัติที่ดี ต้องมีกระบวนการหลอมวัสดุและทำให้เกิดการเย็นตัว จากด้านหนึ่ง ไปยังอีกด้านหนึ่งอย่างช้าๆ ซึ่งเตาเผาที่ใช้จะเป็นเตาปลูกผลึกแบบ 2 ส่วน โดยการสร้างอุณหภูมิสูงในส่วนแรกและอุณหภูมิต่ำในส่วนที่สอง ควบคุมอุณหภูมิต่างโดยการบังคับการเคลื่อนที่อย่างช้าๆ ให้เหมาะสมกับวัสดุแต่ละชนิดที่ใช้ เช่น Growth of lead molybdate crystals ส่วนสำคัญคือการควบคุมอุณหภูมิให้มีความถูกต้อง ซึ่งการพัฒนาการควบคุมอุณหภูมิของระบบจะต้องหาค่าฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบนั้นมากำหนดตัวแปรควบคุมต่างๆ

การควบคุมเตาปลูกผลึกประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนที่ 1 ควบคุมอุณหภูมิ ใช้อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) ส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์จ่ายกำลังไฟฟ้า (Thyristor) จ่ายกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมให้กับอุปกรณ์ให้ความร้อน มีการวัดอุณหภูมิส่งสัญญาณป้อนกลับให้แก่อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิโดยเทอร์โมคัปเปิล ซึ่งการควบคุมอุณหภูมิจะใช้ 2 ชุด สำหรับอุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ

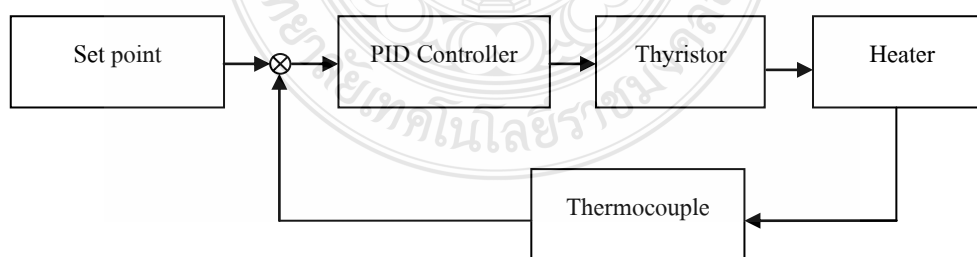
ส่วนที่ 2 ควบคุมการเคลื่อนที่ให้วัสดุผ่านทั้งส่วนอุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำทำให้เกิดอุณหภูมิไล่ระดับขึ้นดังภาพที่ 1.1



ภาพที่ 1.1 ลักษณะของเตาปลูกผลึก

เตาปลุกผลึกแบบ 2 ส่วนสำหรับหลอมและทำให้เย็นตัวของวัสดุ เกิดจากการให้ความร้อนในส่วนที่ 1 และ 2 ไม่เท่ากัน โดยส่วนที่ 1 (ด้านบน) จะให้ความร้อนสูงกว่าส่วนที่ 2 (ด้านล่าง) ทำให้เกิดการสร้าง Gradient Temperature เตาปลุกผลึกมี 2 ลักษณะ ลักษณะแรกจะใช้การเคลื่อนที่ของวัสดุผ่านเตาเผา จากส่วนที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่ส่วนที่มีอุณหภูมิต่ำ ซึ่งจะทำให้วัสดุเกิดการหลอมตัวและจากนั้นค่อยๆ เย็นตัวตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในขณะที่วัสดุเคลื่อนที่ ลักษณะแบบที่ 2 กำหนดให้วัสดุคงที่และให้เตาเผาเคลื่อนที่ผ่านวัสดุแทน โดยให้เตาเผาในส่วนบนมีอุณหภูมิสูง ส่วนล่างมีอุณหภูมิต่ำ เมื่อเตาเผาส่วนบนเคลื่อนที่ผ่านวัสดุจะทำให้วัสดุเกิดการหลอมตัว และเมื่อเตาเผาเคลื่อนที่ที่ยกขึ้นเรื่อยๆ วัสดุก็จะค่อยๆ เย็นตัวลงจากเตาส่วนล่างที่มีอุณหภูมิต่ำ

บล็อกไดอะแกรมควบคุมการทำงาน แบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนควบคุมอุณหภูมิและส่วนควบคุมการเคลื่อนที่ ส่วนควบคุมอุณหภูมิประกอบด้วย ตัวควบคุมอุณหภูมิ ตัวจ่ายกำลังไฟฟ้า อุปกรณ์ให้ความร้อนและเทอร์โมคัปเปิลดังภาพที่ 2 ตัวควบคุมอุณหภูมิที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายคือ ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller) ซึ่งประกอบด้วย 3 เทอม ได้แก่ P (Proportional Controller), I (Integral Control) และ D (Derivative Control) ตัวจ่ายกำลังไฟฟ้า มีทั้งแบบ On-Off control, Cycle control และ Phase control อุปกรณ์ให้ความร้อนมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ต้องการใช้งาน ที่อุณหภูมิสูงส่วนใหญ่มักใช้แกรไฟต์ (Graphite) หรือโมลิบดีนัม (Molybdenum) ที่อุณหภูมิต่ำรองลงมาคือ ซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide) และสุดท้ายคือแบบลวดความร้อน (Wire Heater) ส่วนเทอร์โมคัปเปิลแบ่งตามชนิดการใช้งาน เช่น ชนิดเค (Type K) ชนิดอาร์ (Type R) ส่วนของการควบคุมการเคลื่อนที่ ประกอบด้วย ตัวประมวลผลควบคุม ชุดขับกำลังไฟฟ้า มอเตอร์ ตัวควบคุมประมวลผลทำหน้าที่ประมวลผลสัญญาณจากโปรแกรมที่ตั้งไว้ แล้วส่งสัญญาณให้ชุดขับจ่ายกำลังไฟไปยังมอเตอร์ให้เคลื่อนที่ตามความเร็วที่กำหนด



ภาพที่ 1.2 การทำงานของส่วนควบคุมอุณหภูมิ



## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1.2.1 สร้างเตาปลุกผลึกแบบ 2 ส่วน
- 1.2.2 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบให้ความร้อนในเตาปลุกผลึกที่สร้างขึ้น

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ออกแบบและสร้างเตาปลุกผลึกต้นแบบ โดยใช้ชุดความร้อน 2 ส่วน
- 1.3.2 กำหนดอุณหภูมิด้านสูงที่ 600 องศาเซลเซียสและด้านต่ำที่ 250 องศาเซลเซียส
- 1.3.3 ใช้วิธีการถดถอยแบบเชิงเส้น (Linear regression) ในการวิเคราะห์อุณหภูมิเอาต์พุต
- 1.3.4 ใช้โปรแกรม Simulink ในการสร้างแบบจำลองระบบให้ความร้อนของเตาปลุกผลึกต้นแบบ
- 1.3.5 แบบจำลองระบบให้ความร้อนของเตาปลุกผลึกต้นแบบที่สร้างขึ้นมีค่าผิดพลาดของอุณหภูมิเปรียบเทียบกับระบบจริงไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์

## 1.4 ข้อจำกัดของการวิจัย

- 1.4.1 แบบจำลองที่ทำการวิจัยนี้ จะเทียบเคียงเฉพาะเตาปลุกผลึกต้นแบบที่สร้างขึ้น
- 1.4.2 เตาปลุกผลึกที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบใช้การเคลื่อนที่ของเตาเผา
- 1.4.3 ทดสอบระบบด้วยสัญญาณฟังก์ชันหนึ่งหน่วย
- 1.4.4 ใช้การควบคุมอุณหภูมิแบบพีไอดี

## 1.5 ขั้นตอนการวิจัย

- 1.5.1 ศึกษาทฤษฎีและการทำงานของระบบควบคุม
- 1.5.2 ศึกษาวิธีการออกแบบเตาปลุกผลึก
- 1.5.3 ศึกษาการใช้งาน โปรแกรม Simulink
- 1.5.4 สร้างเตาปลุกผลึกต้นแบบ
- 1.5.5 ทำการทดสอบระบบเตาปลุกผลึกที่สร้างขึ้น
- 1.5.6 วิเคราะห์ผลลัพธ์อุณหภูมิด้วยวิธีการถดถอยแบบเชิงเส้น (Linear regression)
- 1.5.7 ออกแบบจำลองระบบให้ความร้อนของเตาปลุกผลึกต้นแบบโดยใช้โปรแกรม Simulink
- 1.5.8 ทำการทดสอบเปรียบเทียบอุณหภูมิเอาต์พุตของแบบจำลองระบบให้ความร้อนของเตาปลุกผลึกต้นแบบกับระบบจริง

1.5.9 พัฒนาออกแบบจำลองระบบให้ความร้อนของเตาปลูกผลึกต้นแบบให้เกิดค่าผิดพลาด  
เปรียบเทียบระบบจริงไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 เตาปลูกผลึกต้นแบบที่ใช้ในการปลูกสารสำหรับเทอร์โมอิเล็กทริก

1.6.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิ

1.6.3 เป็นแนวทางในการพัฒนาทั้งระบบของเตาปลูกผลึก



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ศึกษาการทำงานและออกแบบสร้างเตาปลูกผลึกต้นแบบ ซึ่งเน้นส่วนสำคัญของการสร้างอุณหภูมิในระบบ โดยจะออกแบบส่วนให้ความร้อนเป็น โมเดลทางคณิตศาสตร์ ศึกษา งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อให้การพัฒนาเป็นไปอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะทำให้ได้ผลการวิจัยที่มีประสิทธิภาพ และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จริงในอนาคต

#### 2.1 หลักการทำงานของเตาปลูกผลึก

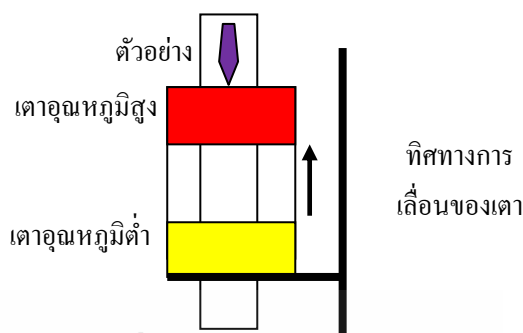
การสร้างวัสดุผลึกเดี่ยวที่มีคุณสมบัติที่ดี ต้องมีกระบวนการหลอมวัสดุและทำให้เกิดการเย็นตัว จากด้านหนึ่ง ไปยังอีกด้านหนึ่งอย่างช้าๆ ซึ่งเตาเผาที่ใช้จะเป็นเตาปลูกผลึกแบบ 2 ส่วน โดยการสร้างอุณหภูมิสูงในส่วนแรกและอุณหภูมิต่ำในส่วนที่สอง ควบคุมอุณหภูมิต่าง โดยการบังคับการเคลื่อนที่อย่างช้าๆ ให้เหมาะสมกับวัสดุแต่ละชนิดที่ใช้เช่น Growth of lead molybdate crystals [1]

เตาปลูกผลึกที่ดีจะต้องประกอบด้วยคุณสมบัติดังนี้

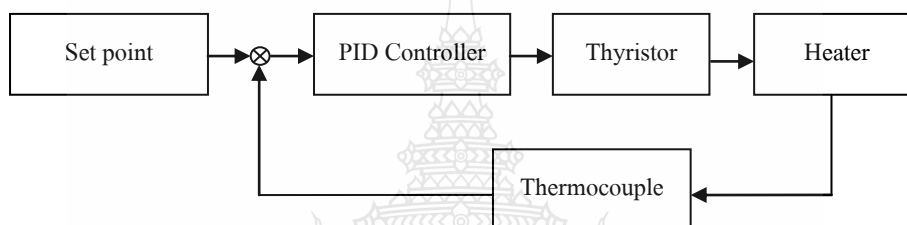
- 2.1.1 สามารถควบคุมอุณหภูมิให้มีความคงที่
- 2.1.2 บังคับการไล่ระดับของอุณหภูมิให้มีความเป็นเชิงเส้น
- 2.2.3 สามารถควบคุมความเร็วการเคลื่อนที่ได้ถูกต้องและแม่นยำ

เตาปลูกผลึกประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกควบคุมอุณหภูมิ ใช้อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) ส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์จ่ายกำลังไฟฟ้า (Thyristor) จ่ายกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมให้กับอุปกรณ์ให้ความร้อน มีการวัดอุณหภูมิส่งสัญญาณป้อนกลับให้แก่อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิโดยเทอร์โมคัปเปิล ซึ่งการควบคุมอุณหภูมิจะใช้ 2 ชุด สำหรับอุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ

ส่วนที่ 2 ควบคุมการเคลื่อนที่ให้วัสดุผ่านทั้งส่วนอุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำทำให้เกิดอุณหภูมิต่างขึ้น แสดงดังภาพที่ 2.1 ประสิทธิภาพของเตาปลูกผลึกที่ดีนั้น จะต้องควบคุมการเคลื่อนที่ได้อย่างแม่นยำ ซึ่งจะส่งผลให้ได้ผลึกต่างที่เหมาะสม บล็อกไดอะแกรมควบคุมการทำงาน แบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนควบคุมอุณหภูมิและส่วนควบคุมการเคลื่อนที่



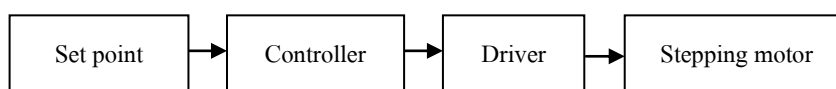
ภาพที่ 2.1 ลักษณะของเตาปลุกผลึกแบบใช้การเคลื่อนที่ของเตาเผา



ภาพที่ 2.2 ไลอะแกรมการทำงานของส่วนควบคุมอุณหภูมิ

ส่วนควบคุมอุณหภูมิประกอบด้วย ตัวควบคุมอุณหภูมิ ตัวจ่ายกำลังไฟฟ้า อุปกรณ์ให้ความร้อนและเทอร์โมคัปเปิล แสดงดังภาพที่ 2 ตัวควบคุมอุณหภูมิที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller) ซึ่งประกอบด้วย 3 เทอม ได้แก่ P (Proportional Controller), I (Integral Control) และ D (Derivative Control) ตัวจ่ายกำลังไฟฟ้า มีทั้งแบบ On-Off control, Cycle control และ Phase control อุปกรณ์ให้ความร้อนมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิสูงส่วนใหญ่มักใช้แกรไฟต์ (Graphite) หรือ โมลิบดีนัม (Molybdenum) ที่อุณหภูมิต่ำรองลงมาคือ ซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide) และสุดท้ายคือแบบลวดความร้อน (Wire Heater) ส่วนเทอร์โมคัปเปิลแบ่งตามชนิดการใช้งาน เช่น ชนิด เค (Type K) ชนิด อาร์ (Type R)

ส่วนของการควบคุมการเคลื่อนที่ ประกอบด้วย ตัวประมวลผลควบคุม, ชุดขับกำลังไฟฟ้า, มอเตอร์ แสดงดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 ไลอะแกรมการทำงานของส่วนควบคุมการเคลื่อนที่เตาเผา

## 2.2 ตัวกำเนิดความร้อน

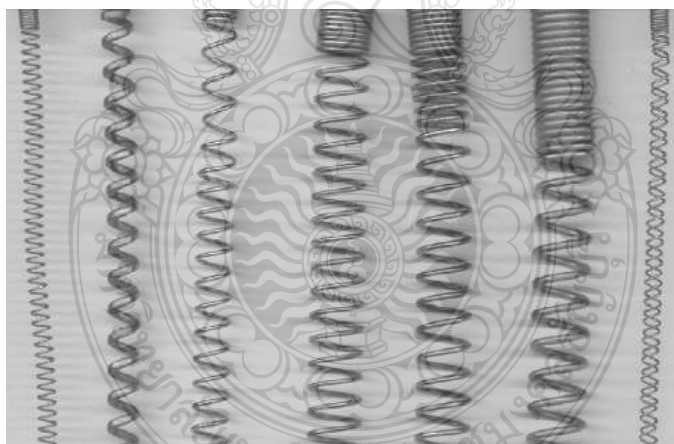
การเพิ่มอุณหภูมิด้วยตัวกำเนิดความร้อนโดยการใช้งานที่ที่บรรยากาศปกติทั่วไปมี 3 ลักษณะ คือ

### 2.2.1 ตัวกำเนิดความร้อนจากลวดนิโครม

ลวดนิโครม มีลักษณะเป็นเส้นลวดทั้งแบบแบนและแบบกลม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน นำมาขดเป็นแบบสปริงให้มีขนาดตามต้องการ ลวดชนิดนี้ใช้งานที่อุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 1,400 องศาเซลเซียส การใช้งานลวดชนิดนี้ต้องทราบค่าความต้านทานสำหรับกำหนดขนาดความยาว

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (2.1)$$

โดยที่  $l$  คือความยาว และ  $A$  คือพื้นที่หน้าตัด ของเส้นลวด  $\rho$  คือความต้านทานของวัสดุ มีหน่วย โอห์ม-เมตร



ภาพที่ 2.4 ลวดนิโครม

### 2.2.2 ตัวกำเนิดความร้อนจากซิลิกอนคาร์ไบด์

ตัวกำเนิดความร้อนที่ทำจากซิลิกอนคาร์ไบด์ มีลักษณะเป็นแท่ง ใช้งานที่อุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 1,500 องศาเซลเซียส จุดต่อไฟฟ้ามักเคลือบด้วยเงิน ใช้งานที่ขนาดแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 40 โวลต์ขึ้นไป ทั้งนี้ต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับพลังงานที่ใช้และอุณหภูมิที่ต้องการ



ภาพที่ 2.5 ลวดความร้อนแบบซิลิกอนคาร์ไบด์

### 2.2.3 ตัวกำเนิดความร้อนจากโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์

ตัวกำเนิดความร้อนแบบ โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ สามารถทำอุณหภูมิได้สูงถึง 1,800 องศาเซลเซียสที่บรรยากาศปกติ และติดตั้งได้ง่าย ควรใช้แบบที่เป็นตัวยูเนื่องจากรูปแบบนี้ขณะติดตั้งภายในเตาเผาสามารถถอดประกอบได้โดยง่าย มีขนาดมาตรฐานคือ เส้นผ่านศูนย์กลาง 3/6 4/9 6/12 9/18 และ 12/24 ซึ่งเป็นขนาดบ่งบอกเส้นผ่านศูนย์กลางช่วงทำความร้อนของลวดความร้อนต่อเส้นผ่านศูนย์กลางช่วงเย็นของลวดความร้อน



ภาพที่ 2.6 ลวดความร้อนแบบโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์



ภาพที่ 2.7 ลวดความร้อนแบบโมลิบดีนัม-ไดซลิไซด์แบบต่างๆ



ภาพที่ 2.8 ช่วงทำความร้อนช่วงเย็นของลวดความร้อน

ตารางที่ 2.1 ขนาดมาตรฐานของลวดความร้อนแบบโมลิบดีนัม-ไดซลิไซด์

เบอร์ลวดความร้อน	เส้นผ่านศูนย์กลาง ช่วงทำความร้อน	เส้นผ่านศูนย์กลาง ช่วงเย็น	ระยะระหว่างขั้ว
3/6	3	6	25
4/9	4	8	25
6/12	6	12	50
9/18	9	18	60
12/24	12	24	80

## 2.3 คุณสมบัติของก๊าซเฉื่อย

เตาเผาปลูกผลึกขณะใช้งานจะต้องให้ความร้อนในบรรยากาศปิด ซึ่งภายในบรรยากาศนั้น จำเป็นต้องใช้ก๊าซเฉื่อยเพื่อป้องกันการทำปฏิกิริยากับวัสดุที่ทำการเผา โดยสารประกอบของธาตุ 20 ธาตุแรก เรียงตามมวลอะตอม พบว่า ก๊าซฮีเลียม นีออน และอาร์กอน ไม่ทำปฏิกิริยากับคลอรีนและออกซิเจน จึงเรียกธาตุกลุ่มนี้ว่า ก๊าซเฉื่อย ปัจจุบันพบว่า Kr และ Xe สามารถทำปฏิกิริยาโดยตรงกับฟลูออรีน เกิดเป็นสารประกอบฟลูออไรด์ เช่น  $KrF_2$ ,  $XeF_2$ ,  $XeF_4$ ,  $XeF_6$  นอกจากนี้ยังพบสารประกอบออกไซด์ของซีนอน เช่น  $XeO_3$  และ  $XeO_4$

### 2.3.1 คุณสมบัติของก๊าซเฉื่อย

ก. เป็นก๊าซที่ไม่ค่อยทำปฏิกิริยากับก๊าซอื่นๆ ทั้งนี้เพราะ มีอิเล็กตรอนชั้นนอกสุด ครอบ 8 อะตอม ( ยกเว้น He ที่มีแค่ 2 อะตอม )

ข. มีสถานะเป็นก๊าซทั้งหมด เป็นพวกโมเลกุลอะตอมเดี่ยว (monoatomic molecule) คือ ในหนึ่งโมเลกุลของก๊าซเฉื่อยจะมีเพียงหนึ่งอะตอมเท่านั้น ได้แก่ He , Ar , Ne , Kr , Xe และ Rn

ค. ปัจจุบันพบก๊าซเฉื่อยบางชนิด เช่น Kr และ Xe สามารถทำปฏิกิริยากับ F และ O ได้

ง. ก๊าซเฉื่อยเป็นวันเดอ์วาลส์จึงทำให้มีจุดเดือด จุดหลอมเหลวต่ำ

### 2.3.2 คุณสมบัติค่าคงที่ของการนำความร้อนของก๊าซ

ตารางที่ 2.2 ค่าคงที่การนำความร้อนของก๊าซ

ก๊าซ	$K=Wm^{-1}K^{-1}$
Air	0.024
Ammonia	0.022
Argon	0.016
Carbon Dio	0.015
Carbon Mon	0.023
Helium	0.142
Hydrogen	0.168
Methane	0.030
Nitrogen	0.024
Oxygen	0.024
Water Vap	0.016



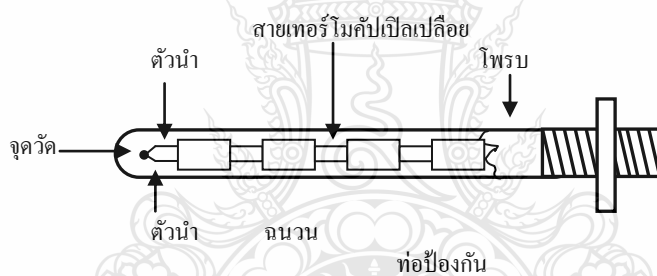
## 2.4 เทอร์โมคัปเปิล

เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) คืออุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความร้อนเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า เทอร์โมคัปเปิลทำมาจากโลหะตัวนำที่ต่างชนิดกัน 2 ตัว (แตกต่างกันทางโครงสร้างของอะตอม) นำมาเชื่อมต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกันที่ปลายด้านหนึ่ง เรียกว่าจุดวัดอุณหภูมิ ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งปล่อยให้เปิดไว้ เรียกว่าจุดอ้างอิง หากจุดวัดอุณหภูมิและจุดอ้างอิงมีอุณหภูมิต่างกันก็จะทำให้มีการนำกระแสในวงจรเทอร์โมคัปเปิลทั้งสองข้าง [2]

### 2.4.1 คุณสมบัติเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐาน (Characteristic of Standard Thermocouples)

มีคุณสมบัติที่เป็นมาตรฐานดังนี้

1. ความไว (Sensitivity) ย่านของแรงเคลื่อนจากเทอร์โมคัปเปิลจะมีค่าน้อยกว่า 100 มิลลิโวลต์ แต่ความไวที่แท้จริงในการใช้งานจะขึ้นอยู่กับการใช้งานวงจรปรับสภาพสัญญาณและตัวเทอร์โมคัปเปิลเอง



ภาพที่ 2.9 โครงสร้างของเทอร์โมคัปเปิล [2]

2. โครงสร้าง (Construction) โครงสร้างของเทอร์โมคัปเปิล มีความต้านทานต่ำ ให้สัมประสิทธิ์อุณหภูมิสูง ต้านทานต่อการเกิดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงๆ ทนต่อสถานะแวดล้อมที่นำไปใช้วัดค่า และเป็นเชิงเส้นสูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ตัวฝักหรือท่อป้องกันส่วนมากจะทำจากสเตนเลส ความไวของเทอร์โมคัปเปิลขึ้นอยู่กับความหนาของท่อป้องกันทั้งเยอรมันเนียมและซิลิคอนจะทำให้คุณสมบัติการเกิดเทอร์โมอิเล็กทริกจึงใช้กันมากในอุปกรณ์ทำความเย็น (Peltier element) มากกว่าที่จะใช้เป็นเทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิ

ขนาดของสายเทอร์โมคัปเปิลกำหนดได้จากการใช้งานแต่ละอย่าง และมีขนาดจากเบอร์ 10 ในสภาวะแวดล้อมที่ไม่คงที่ จนถึงขนาดเบอร์ 30 หรือแม้กระทั่ง 0.02 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นสายแบบไมโครไวร์ (Micro wire) ที่ใช้กับการวัดอุณหภูมิการกลั่นในงานทางชีววิทยา

3. ย่านการใช้งาน (Range) ย่านอุณหภูมิการใช้งานและความไวในการวัดของเทอร์โมคัปเปิล แต่ละตัว จะแตกต่างกันตามแต่ละสมาคมจะกำหนด ในส่วนที่สำคัญคือค่าแรงเคลื่อนที่ออกมาจากแต่ละอุณหภูมิ จะต้องอ้างอิงกับตารางค่ามาตรฐานของแต่ละสมาคมที่ใช้ให้ถูกต้องเป็นเอกภาพเดียวกันหมดทั้งระบบ

4. เวลาตอบสนอง (Time Response) เวลาตอบสนองของเทอร์โมคัปเปิลขึ้นอยู่กับขนาดของสายและวัสดุที่นำมาทำท่อป้องกันตัวเทอร์โมคัปเปิล

5. การปรับสภาพสัญญาณ (Signal Conditioning) ปกติแรงเคลื่อนของเทอร์โมคัปเปิลจะมีขนาดน้อยมากจึงจำเป็นต้องมีการขยายสัญญาณ โดยใช้อปแอมป์ขยายความแตกต่างที่มีอัตราขยายสูงๆ

2.4.2 การใช้งานเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐาน (Characteristic in Application of Thermocouple Standard Type)

เทอร์โมคัปเปิลมาตรฐาน มีอยู่ 7 ชนิดตามมาตรฐานของ ANSI และ ASTM โดยการจำแนกตามประเภทของวัสดุที่ใช้ทำได้แก่

#### 1. เทอร์โมคัปเปิลแบบเอส

ข้อดีของแบบเอส

- 1) เหมาะกับการใช้งานในสภาวะที่เกิดปฏิกิริยาเคมีแบบออกซิไดซิง(oxidizing)
- 2) เหมาะกับการใช้งานในสภาวะใช้ก๊าซเฉื่อย
- 3) นิยมใช้กับงานวัดตัวแปรที่มีอุณหภูมิสูง เช่น เตาหลอมเหล็ก
- 4) วัดอุณหภูมิต่อเนื่องได้จากช่วง 0 ถึง 1,550 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิช่วงสั้นได้
- 5) จากช่วงประมาณ -50 ถึงประมาณ 1,700 องศาเซลเซียส
- 6) หากอยู่ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมจะให้ความเที่ยงตรงสูงที่สุด
- 7) ใช้ในการสอบเทียบ ตั้งแต่จุดแข็งตัวของแอนติโมนี (630.74 องศาเซลเซียส) จนถึงจุดแข็งตัวของทองแดง (1,064.43 องศาเซลเซียส) ตามมาตรฐาน IPTS 68

ข้อเสียของแบบเอส

- 1) ต้องใช้ท่อป้องกันในทุกสภาวะบรรยากาศ
- 2) ไม่เหมาะกับการงานที่มีปฏิกิริยาแบบรีดิวซิง (reducing)

- 3) ไม่เหมาะกับงานที่เป็นสุญญากาศ (vacuum)
- 4) ไม่เหมาะกับงานที่มีไอโลหะ เช่น สังกะสี ตะกั่ว
- 5) ไม่เหมาะกับงานที่มีไอของโลหะ เช่น จำพวก อาเซนิก ซัลเฟอร์ ฟอสฟอรัส เพราะจะมีอายุการใช้งานสั้นลง

## 2. เทอร์โมคัปเปิลแบบอาร์

### ข้อดีของแบบอาร์

- 1) ให้แรงเคลื่อนทางค่านเอาท์พุทสูงกว่าแบบเอส
- 2) วัดอุณหภูมิต่อเนื่องได้จากช่วง 0 ถึง 1,600 องศาเซลเซียส
- 3) วัดอุณหภูมิช่วงสั้นได้จากช่วง-50 ถึงประมาณ 1,700 องศาเซลเซียส
- 4) เหมาะกับการวัดอุณหภูมิสูงๆ เช่น ในเตาหลอมเหล็ก อุตสาหกรรมแก้ว
- 5) ทนทานต่อการกัดกร่อน และให้เสถียรภาพของอุณหภูมิที่ดี

ข้อเสียของแบบอาร์เช่นเดียวกับแบบเอสแต่ส่วนที่เพิ่มเติมคือ ให้ความเป็นเชิงเส้นต่ำเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า  $540^{\circ}\text{C}$

## 3. เทอร์โมคัปเปิลแบบบี

### ข้อดีของแบบบี

- 1) วัดอุณหภูมิต่อเนื่องได้จากช่วงประมาณ 100 ถึงประมาณ 1,600 องศาเซลเซียส
- 2) วัดอุณหภูมิช่วงสั้นได้จากช่วงประมาณ 50 ถึงประมาณ 1,750 องศาเซลเซียส
- 3) แข็งแรงกว่าแบบเอสและแบบอาร์
- 4) เหมาะกับการใช้งานในสภาวะที่มีปฏิกิริยาแบบออกซิไดซิงและสภาวะเฉื่อย

### ข้อเสียของแบบบี

- 1) ให้แรงเคลื่อนของไฟฟ้าน้อยกว่าแบบอื่น ๆ เมื่อวัดอุณหภูมิที่เสถียรเหมือนกัน
- 2) ไม่เหมาะกับสภาวะที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาแบบรีดิวซิง
- 3) ไม่เหมาะกับสภาวะที่เป็นสุญญากาศ
- 4) ไม่เหมาะกับสภาพงานที่มีไอของโลหะและไอโลหะ
- 5) ให้ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าสองค่า (double value region)
- 6) ให้ความชันของสัญญาณต่ำกว่าแบบอื่น ๆ

## 4. เทอร์โมคัปเปิลแบบเจ

### ข้อดีของแบบเจ

- 1) ให้อัตราการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ออุณหภูมิได้ดี

- 2) มีราคาถูกกว่าแบบที่ทำจากธาตุบริสุทธิ์
- 3) ตามมาตรฐาน BS 7937 Part 30 วัดอุณหภูมิได้ต่อเนื่องจากช่วงประมาณ -210 ถึง 1,200 องศาเซลเซียส
- 3) เหมาะกับสภาพงานที่เป็นสุญญากาศ งานที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิไดซิง และงานที่อยู่ในสภาพเฉื่อย เมื่ออุณหภูมิไม่เกิน 760 องศาเซลเซียส
- 4) นิยมใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติก

ข้อเสียของแบบเจ

- 1) วัดอุณหภูมิได้ต่ำกว่าแบบที
- 2) ไม่เหมาะสมมากนักกับงานที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส
- 3) หากวัดที่อุณหภูมิสูงกว่า 538 องศาเซลเซียสจะเกิดปฏิกิริยาออกซิไดซิงที่สายซึ่งทำจากเหล็กด้วยอัตราสูง
- 4) หากใช้งานนานเกินช่วง 20 ปี ส่วนผสมทางเคมี คือ แมงกานีสในเหล็กจะเพิ่มขึ้น 0.5 เปอร์เซ็นต์ ทำให้คุณสมบัติของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

#### 5. เทอร์โมคัปเปิลแบบเค

ย่านการทำงานและความแน่นอนของเทอร์โมคัปเปิลในงานอุตสาหกรรม ที่กำหนดโดยมาตรฐาน IEC 584 (รหัสสำหรับการวัดอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล) ช่วงในการวัดอุณหภูมิต่อเนื่องของเทอร์โมคัปเปิลแบบนี้จะเป็น -270 องศาเซลเซียส ถึง +1,370 องศาเซลเซียส โดยมีระดับความแน่นอนซึ่งกำหนดโดยมาตรฐาน IEC584 เป็นดังนี้

- 1) Class 1 = -40 ถึง + 1,000 องศาเซลเซียส  $\pm 0.004 \times t$  หรือ  $\pm 1.5$  องศาเซลเซียส
- 2) Class 2 = -40 ถึง + 1,200 องศาเซลเซียส  $\pm 0.0075 \times t$  หรือ  $\pm 2.5$  องศาเซลเซียส
- 3) Class 1 = -200 ถึง + 40 องศาเซลเซียส  $\pm 0.05 \times t$  หรือ  $\pm 2.5$  องศาเซลเซียส

เมื่อ t คืออุณหภูมิจริงที่ทำการวัด

ข้อดีของแบบเค

- 1) เป็นแบบที่นิยมใช้แพร่หลายมากที่สุด
- 2) สำหรับการวัดอุณหภูมิช่วงสั้น ๆ จะวัดได้จาก -180 องศาเซลเซียส ถึงประมาณ 1,350 องศาเซลเซียส
- 3) สามารถใช้วัดในงานที่มีปฏิกิริยาออกซิไดซิง หรือสภาวะแบบเฉื่อย ได้ดีกว่าแบบอื่น
- 4) สามารถใช้กับสภาพงานที่มีการแผ่รังสีความร้อนได้ดี

- 5) ให้อัตราการเปลี่ยนแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ออุณหภูมิดีกว่าแบบอื่นๆ และมีความเป็นเชิงเส้นมากที่สุด ในบรรดาเทอร์โมคัปเปิลด้วยกัน

ข้อเสียของแบบเค

- 1) ไม่เหมาะกับการวัดที่ต้องสัมผัสกับปฏิกริยารีดิวซิงและออกซิไดซิงโดยตรง
- 2) ไม่เหมาะกับการงานที่มีไอของซัลเฟอร์
- 3) ไม่เหมาะกับการสภาพงานที่เป็นสุญญากาศ
- 4) หลังการใช้งานไป 30 ปี ทำให้ส่วนผสมทางเคมีเปลี่ยนไป เป็นผลทำให้คุณสมบัติของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเปลี่ยนไป

#### 6. เทอร์โมคัปเปิลแบบที

ข้อดีของแบบที

- 1) ดีกว่าแบบเค ตรงที่สามารถวัดอุณหภูมิได้ต่ำกว่า นั่นคือเหมาะกับการวัดอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ
- 2) ให้ความแน่นอนในการวัดดีกว่าแบบเค (ช่วงที่ต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส ความแน่นอนจะเป็น  $\pm 1$  เปอร์เซ็นต์)
- 3) มีเสถียรภาพในการวัดอุณหภูมิ
- 4) การวัดสภาพงานที่เป็นสุญญากาศงานที่มีปฏิกริยาแบบออกซิไดซิงรีดิวซิงและงานที่มีปฏิกริยาแบบเฉื่อยจะทำได้
- 5) วัดอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องได้จากช่วง  $-185$  ถึง  $300$  องศาเซลเซียส และวัดอุณหภูมิแบบช่วงสั้นๆ ได้จากช่วง  $-250$  ถึง  $400$  องศาเซลเซียส
- 6) ทนต่อบรรยากาศที่มีการกัดกร่อนได้ดี

ข้อเสียของแบบที

- 1) เป็นแบบที่วัดอุณหภูมิช่วงบวกได้น้อยกว่าแบบอื่น
- 2) หากใช้วัดอุณหภูมิที่สูงกว่า  $370$  องศาเซลเซียสจะทำให้เกิดออกไซด์มาก
- 3) ไม่เหมาะกับการวัดอุณหภูมิที่สัมผัสกับการแผ่รังสีความร้อนโดยตรง
- 4) เมื่อใช้งานไปนาน ๆ ในช่วง 20 ปี ส่วนผสมของนิเกิลและสังกะสี จะเพิ่มประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปเช่นกัน
- 5) คุณสมบัติของแรงเคลื่อนต่ออุณหภูมิไม่เป็นเชิงเส้น

#### 7. เทอร์โมคัปเปิลชนิดอี

ข้อดีของแบบอี

- 1) ให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงสุดเมื่อวัดอุณหภูมิเทียบกับแบบอื่น ๆ ในสภาวะเดียวกัน
- 2) วัดอุณหภูมิต่อเนื่องได้จากช่วง 0 ถึง 800 องศาเซลเซียส  
คุณสมบัติอื่น ๆ คล้ายกับแบบเค

## 2.5 การจ่ายพลังงาน

การจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้ตัวกำเนิดความร้อนแบ่งออกเป็น

### 2.5.1 แม็กเนติกคอนแทคเตอร์ (Magnetic contactor)

แม็กเนติกคอนแทคเตอร์ ใช้ตัดต่อเพื่อควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ในวงจรไฟฟ้า เช่น มอเตอร์คอมเพรสเซอร์ มอเตอร์พัดลม มอเตอร์ปั้มน้ำ เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ช่วยลดกระแสที่จะผ่านหน้าสัมผัสของอุปกรณ์ควบคุมต่างๆ ได้แก่ สวิตช์ควบคุม เทอร์โมสตัด การเลือกใช้แม็กเนติกคอนแทคเตอร์ มีข้อกำหนดต่างๆ ดังนี้

1. ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก เช่น 24V, 220V, 380V เป็นต้น
2. ความสามารถในการรับกระแสของหน้าสัมผัสหลัก (Main contact) เช่น 20A, 30A, 60A เป็นต้น
3. ความต้องการในการใช้งานของหน้าสัมผัสช่วย (Auxiliary contact) มีทั้งแบบปกติปิดและแบบปกติเปิด
4. จำนวนขั้วของหน้าสัมผัสหลักที่ต้องการใช้งาน เช่น 2 ขั้ว สำหรับระบบไฟฟ้า 220V หรือ 3 ขั้ว สำหรับระบบไฟ 380 V

### 2.5.2 โซลิดสเตตรีเลย์ (Solid state relay)

เป็นอุปกรณ์จ่ายพลังงานไฟฟ้าโดยใช้เซมิคอนดักเตอร์จำพวกไทรแอก ใช้การควบคุมแบบเปิดปิด สำหรับทดแทนแม็กเนติกคอนแทคเตอร์ เนื่องจากข้อดีของโซลิดสเตตรีเลย์คือไม่มีส่วนหน้าสัมผัส

### 2.5.3 ไทริสเตอร์ (Thyristor)

ตัวจ่ายกำลังไฟฟ้าที่เป็นไทริสเตอร์นั้นสามารถจ่ายกระแสได้ค่อนข้างละเอียดและสามารถควบคุมการจ่ายตามมุมมองสาขาไฟฟ้า ซึ่งการจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบนี้ทำให้การไต่ระดับและการคงค่าอุณหภูมิค่อนข้างนิ่ง

## 2.6 ฉนวนความร้อน

ฉนวนความร้อนแต่ละชนิด เช่น ไฟเบอร์บอร์ด (Fiber board) มีลักษณะเป็นแผ่นสีขาวก่อนเผาจะนิ่ม สามารถตัดทำเป็นตัวเตาเผาได้ง่าย หลังการเผาจะแข็งในระดับหนึ่งและค่อนข้างเปราะ เป็น

ฉนวนความร้อนที่ดีไม่ดูดซับความร้อนมากนักทำให้ประหยัดพลังงานแต่ราคาค่อนข้างสูงตามขนาด  
 ทนอุณหภูมิต่างๆ เซรามิกไฟเบอร์ (Ceramic fiber) ขนาดทนอุณหภูมิมีตั้งแต่ 600 องศาเซลเซียสขึ้นไป  
 มีลักษณะเป็นแผ่นใยสีขาวไม่สามารถตั้งได้ด้วยตัวเอง ก่อนเผาและหลังเผาสภาพภายนอกใกล้เคียง  
 กัน ต้องใช้อุปกรณ์ในการจับยึดกับผนังโลหะเตาเผาเป็นฉนวนความร้อนที่ดีพอใช้ อิฐทนความร้อน  
 สามารถใช้ได้ทุกสภาพการเผา มีลักษณะเป็นก้อนสี่เหลี่ยมค่อนข้างแข็ง ใช้งานก่อนเป็นตัวเตาเผาได้ง่าย  
 ราคาถูก แต่ขณะใช้งานจะสิ้นเปลืองพลังงานมากเนื่องจากอิฐทนความร้อนจะดูดซับความร้อนมาก ซึ่ง  
 ค่าการนำความร้อนคำนวณได้จาก

$$q = kA \frac{\Delta T}{L} \quad (2.2)$$

โดย

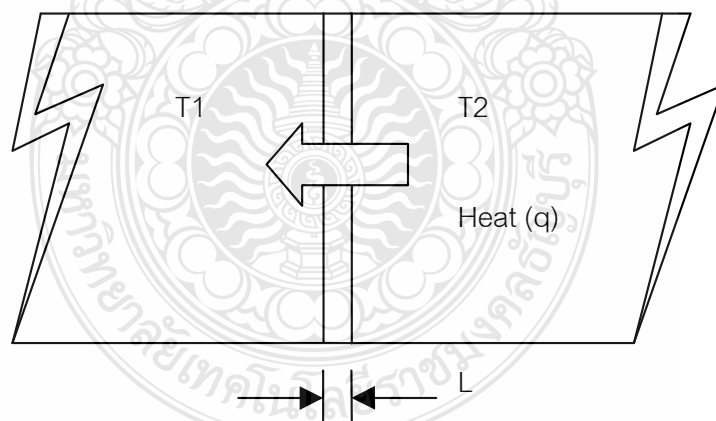
$q$  = กำลังงานที่ใช้

$k$  = ค่า Thermal Conductivity ของวัสดุ

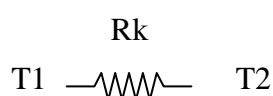
$A$  = พื้นที่ของวัสดุ

$L$  = ความหนาของวัสดุ

$\Delta T$  = ผลต่างของอุณหภูมิ



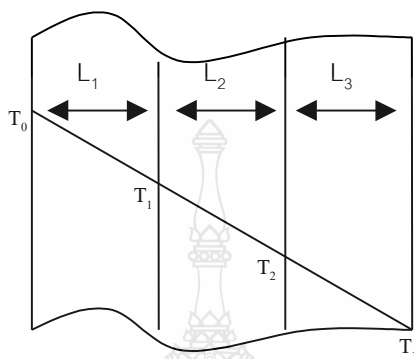
ภาพที่ 2.10 ทิศทางการนำความร้อน



ภาพที่ 2.11 วงจรสมมูลการนำความร้อน

คิดเป็นค่าความต้านทานการนำความร้อนได้จาก

$$R_k = \frac{L}{kA} \text{ จะได้ } q = \frac{\Delta T}{Rk} \quad (2.3)$$



ภาพที่ 2.12 การประกอบผนังแต่ละชั้น

เมื่อมีการประกอบผนังหลายชั้นคำนวณได้ดังสมการ

$$q_1 = \frac{k_1 A}{L_1} (T_0 - T_1) = \frac{(T_0 - T_1)}{Rk_1} \quad (2.4)$$

$$q_2 = \frac{(T_1 - T_2)}{Rk_2} \quad (2.5)$$

$$q_3 = \frac{(T_2 - T_3)}{Rk_3} \quad (2.6)$$

## 2.7 ระเบียบวิธีการถดถอยแบบเชิงเส้น (Linear regression)

การถดถอยแบบเชิงเส้น (Linear regression) เป็นระเบียบวิธีที่ใช้ในการสร้างฟังก์ชันเส้นตรงสำหรับชุดของข้อมูล ประกอบด้วย  $x_i, y_i$  โดยที่  $i = 1, 2, \dots, n$  ซึ่งจะสร้างสมการเส้นตรงในรูปของ

$$Y = AX + B \quad (2.7)$$



ค่าความผิดพลาดทั้งหมดที่เกิดจากข้อมูล  $n$  ข้อมูล จะได้

$$E = \sum [Y_i - Y(X_i)]^2 \quad (2.8)$$

แทนค่า  $y(x_i)$  จาก (2.7) ลงใน (2.8)

$$E = \sum [Y_i - (AX_i + B)]^2 \quad (2.9)$$

หาค่า  $A$  และ  $B$  ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด โดยการหาค่าต่ำสุดของค่าความผิดพลาด คือ  $\frac{\partial E}{\partial A} = 0$   
และ  $\frac{\partial E}{\partial B} = 0$  ในสมการที่ 2.9 จะได้

$$nB + (\sum X_i)A = \sum Y_i \quad (2.10)$$

$$(\sum X_i)B + (\sum X_i^2)A = \sum X_i Y_i \quad (2.11)$$

ดังนั้น

$$A = \frac{n(\sum X_i Y_i) - (\sum X_i)(\sum Y_i)}{n(\sum X_i^2) - (\sum X_i)^2} \quad (2.12)$$

$$B = \frac{(\sum Y_i)(\sum X_i^2) - (\sum X_i Y_i)(\sum X_i)}{n(\sum X_i^2) - (\sum X_i)^2} \quad (2.13)$$

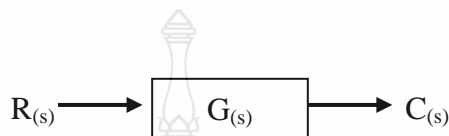
## 2.8 ระบบอันดับหนึ่ง

ระบบอันดับหนึ่ง เมื่อกำหนดสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณฟังก์ชันขั้นหนึ่งหน่วย (Unit Step Function) [3] ซึ่งมีสมการในโดเมนของลาปลาซเป็น

$$R(s) = \frac{1}{s} \quad (2.14)$$

และฟังก์ชันการถ่ายโอนของระบบคือ

$$G(s) = \frac{a}{(s+a)} \quad (2.15)$$



ภาพที่ 2.13 ระบบควบคุมแบบเปิด

ทรานเฟอ์ฟังก์ชันคือ  $G(s)$  และ  $R(s)$  เป็นอินพุตแบบสัญญาณฟังก์ชันหนึ่งหน่วย สามารถหาสมการทางเอาต์พุตดังสมการที่ 2.16

$$C(s) = G(s)R(s) = \frac{a}{s(s+a)} \quad (2.16)$$

จากสมการที่ 2.16 แยกเศษส่วนย่อยจะได้

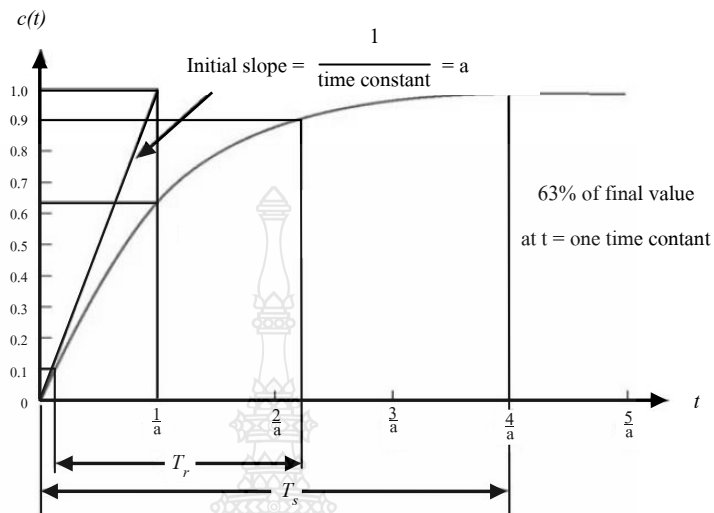
$$C(s) = \frac{1}{s} - \frac{a}{(s+a)} \quad (2.17)$$

แปลงลาปลาซผกผันจากสมการที่ 2.17 จะได้

$$C(t) = 1 - e^{-at} \quad (2.18)$$

การตอบสนองของระบบอันดับหนึ่งแสดงไว้ดังภาพที่ 2.14 การตอบสนองของระบบที่น่าสนใจประกอบด้วย ช่วงเวลาไต่ขึ้นของกราฟ (Rise Time) และช่วงเวลาค่าคงตัว (Settling Time) ถ้ายิ่งค่าคงที่ของเวลา (Time Constant)  $\tau=1/a$  น้อยลง ระบบจะเข้าสู่เป้าหมายได้เร็ว ระบบอันดับหนึ่งใช้

เวลาค่อนข้างน้อยในการเข้าสู่ภาวะคงตัว ที่จุด  $t = \tau$  จะได้ค่าของ  $C(t)$  เท่ากับ 0.632 หรือ 63.2% ของการเปลี่ยนแปลงทั้งหมด ลักษณะความชันของระบบจะมีค่าเท่ากับ  $1/\tau$  ในที่นี้คือ  $a$



ภาพที่ 2.14 การตอบสนองของระบบอันดับหนึ่ง [4]

สัญญาณความคลาดเคลื่อน (error) หาได้จาก

$$e(t) = r(t) - c(t) \quad (2.19)$$

$$e(t) = e^{-at} \quad (2.20)$$

เมื่อ  $t$  เข้าสู่อนันต์แล้ว ค่า  $e^{-at}$  จะเข้าสู่ศูนย์นั่นคือทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับศูนย์

## 2.9 การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ได้เข้ามามีส่วนช่วยทำให้การแก้ปัญหาทางวิศวกรรมได้ใช้ประโยชน์จากคณิตศาสตร์อย่างเต็มรูปแบบในการจำลองระบบทางพลศาสตร์ใดๆ โดยไม่ต้องอาศัยการทดลองจากระบบทางกายภาพจริง โดยการจำลองการทำงานของระบบพลศาสตร์ (Dynamic System Simulation) ดังกล่าวนั้นได้รับการพิสูจน์แล้วว่ามีความมีประสิทธิภาพในการทำงานทางวิศวกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานทางด้านการออกแบบระบบ (System Design) และงานการ

ออกแบบระบบควบคุม (Controller System Design) ทั้งนี้เนื่องจากการจำลองปัญหาช่วยประหยัดทั้งงบประมาณและเวลา [5]

Simulink เป็นโปรแกรมที่เป็นส่วนที่เพิ่มเติมเข้ามาในโปรแกรม MATLAB ซึ่งเป็นโปรแกรมที่พัฒนาโดยบริษัท The Mathworks โดยเป็นโปรแกรมที่มีความสามารถในการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ที่มีประสิทธิภาพสูง ในส่วนของ Simulink นั้นเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมเพื่อหาคำตอบของสมการทางคณิตศาสตร์ โดยใช้ลักษณะการโปรแกรมในรูปแบบของ Block Diagram เป็นหลัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบสมการเชิงอนุพันธ์ซึ่งมักจะพบปัญหาในการหา Closed Form Solution หรือการหาคำตอบเมื่อเทียบกับเวลาในช่วงเวลาใดๆ และเนื่องด้วยระบบทางวิศวกรรมโดยส่วนใหญ่จะสามารถอธิบายด้วยระบบสมการเชิงอนุพันธ์เช่นกัน ดังนั้น Simulink จะเข้ามามีบทบาทในการทำให้การจำลองการตอบสนองของระบบมีความสะดวกมากยิ่งขึ้น[6]

สำหรับองค์ประกอบของโปรแกรมนั้น ไม่ว่าจะเป็นวงจรทางตรรกศาสตร์ ไปจนถึงระบบควบคุมสำหรับระบบพลศาสตร์ที่ซับซ้อน จะสามารถสร้างแบบจำลองได้โดยอาศัยเพียง Building Blocks พื้นฐานที่มีมาให้จาก Simulink Libraries นอกเหนือจากนั้นยังมีเครื่องมือในส่วนอื่นๆ ที่ในปัจจุบันได้เพิ่มเติมเข้ามาเพื่อให้การใช้งานมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เช่น Fuzzy Logic Toolbox, Neural Network Toolbox, Digital Signal Processing (DSP) Toolbox หรืออื่นๆ ซึ่งในปัจจุบันพบว่าเครื่องมือต่างๆ ที่มีให้ สามารถทำให้การจำลองหรือวิเคราะห์การทำงานของระบบสามารถทำได้ตั้งแต่ระบบที่มีความง่าย จนถึงระบบที่มีความซับซ้อนอย่างมากโดยไม่ต้องมีการเขียนโปรแกรมเพิ่มเติมแต่อย่างใด

### 2.9.1 หลักการของสัญญาณและการไหลของตรรก (Signal and Logic Flow)

ในโปรแกรม Simulink นั้น การจำลองปัญหาจะอาศัยการสร้างแผนภูมิ (Simulation Diagram) เพื่อการกำเนิด การรับ หรือส่งผ่านสัญญาณ หรือข้อมูลที่ต้องการทราบในแผนภูมิที่ถูกสร้างขึ้น ข้อมูลจากบล็อกประเภทต่างๆ จะถูกส่งผ่านไปสู่อบล็อกอื่นๆ โดยเส้นสัญญาณที่เชื่อมต่อระหว่างบล็อกนั้นๆ สัญญาณสามารถที่จะถูกสร้างและส่งไปสู่อบล็อกอื่นๆ ทั้งแบบสถิตย์และแบบแปรผัน ข้อมูลสามารถป้อนให้แก่ฟังก์ชันเพื่อการกระทำทางตรรกศาสตร์หรือทางคณิตศาสตร์ ข้อมูลสามารถที่จะถูกส่งไปสู่อแหล่งทิ้งข้อมูล (Sink) ซึ่งสามารถที่จะแสดงให้เห็นในลักษณะของ Oscilloscope หรือ Display หรือแม้กระทั่งเก็บในรูปแบบของไฟล์คอมพิวเตอร์ (Save to Files) สิ่งที่ต้องพึงระวังในการจำลองปัญหานั้น ข้อมูลต่างๆ จะถูกดำเนินการ รับและส่ง ในลักษณะเป็นช่วงเวลา (Discrete Times) เท่านั้น ดังนั้น Step Time หรือ Simulation Time Step หรือ Integration Time Step ที่กำหนดเพื่อการจำลอง

ปัญหานั้นจะเป็นส่วนที่สำคัญอย่างยิ่ง โดยการเลือกใช้ Step Time ที่เหมาะสมจะถูกกำหนดโดยระบบย่อยที่มีการตอบสนองเร็วที่สุดในแผนภูมิที่กำหนดขึ้น

## 2.9.2 กลุ่มของบล็อกที่ใช้งานบ่อยในเบื้องต้น

### 1. แหล่งกำเนิดสัญญาณ (Sources) และแหล่งทิ้งสัญญาณ (Sinks)

กลุ่มบล็อกแหล่งกำเนิดสัญญาณ (Sources) ที่กำหนดมาให้ ประกอบด้วย แหล่งกำเนิดข้อมูลหรือสัญญาณ ที่มักใช้บ่อยในการวิเคราะห์ระบบทางพลศาสตร์ เช่น แหล่งกำเนิดค่าคงที่ (Constant) แหล่งกำเนิดสัญญาณคลื่น (Sinusoidal Wave) แหล่งกำเนิดสัญญาณแบบ Step หรืออื่นๆ นอกจากนี้ยังมีแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ทำหน้าที่เสมือน Signal Generator ทางกายภาพที่ใช้ในการทดลองทางวิศวกรรมอื่นๆ หรือแหล่งกำเนิดสัญญาณนาฬิกา (Clock) ที่มักจะใช้บ่อยเพื่อจับเวลาของการจำลองปัญหา หรืออื่นๆ กลุ่มบล็อกแหล่งทิ้งสัญญาณ กลุ่มบล็อกแหล่งทิ้งสัญญาณ (Sinks) เป็นกลุ่มบล็อกที่มักจะใช้ในการเก็บสัญญาณ โดยทั่วไปแล้วบล็อกที่จะใช้บ่อยคือบล็อกของ Scope ประเภทต่างๆ เพื่อตรวจสอบลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณในจุดใดๆ ของระบบที่กำลังถูกจำลองในขณะที่กำลังทำการจำลอง หรือบล็อกที่เก็บสัญญาณ (To Workspace) เพื่อใช้ในการดำเนินการอื่นๆ ที่พื้นที่ทำงานของ MATLAB

### 2. ระบบต่อเนื่อง (Continuous) และระบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete)

กลุ่มบล็อกของระบบต่อเนื่อง (Continuous System) หรือระบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete System) เป็นอีกกลุ่มหนึ่งที่มีการใช้ในการจำลองปัญหาบ่อย ระบบพลศาสตร์ทุกระบบสามารถที่จะถูกวิเคราะห์ในลักษณะของระบบต่อเนื่อง (Continuous System) หรือระบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete System) ซึ่งไม่ว่าระบบจะถูกจำลองในลักษณะใด โปรแกรม Simulink นั้นสามารถตอบสนองต่อลักษณะรูปแบบของระบบได้ในหลายลักษณะ เช่น Transfer Function หรือ Integration Blocks หรือ Delay Blocks หรืออื่นๆ

### 3. การดำเนินการทางคณิตศาสตร์ (Math Operations)

กลุ่มบล็อกการดำเนินการทางคณิตศาสตร์ เป็นอีกกลุ่มหนึ่งที่มีการใช้ในการจำลองปัญหาบ่อย กลุ่มบล็อกนี้จะประกอบไปด้วยบล็อกย่อยๆ ที่มีหน้าที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินการต่างๆ ทางคณิตศาสตร์ เช่น การนำสัญญาณมาบวกกัน การคูณสัญญาณด้วยค่าคงที่ (Gain) หรืออื่นๆ

### 4. ความไม่ต่อเนื่อง (Discontinuities)

ข้อได้เปรียบข้อหนึ่งของโปรแกรม Simulink คือความสามารถในการจำลองระบบแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear System Simulation) ซึ่งในการหาคำตอบด้วยมือ หรือการหา Closed Form Solution โดยทั่วไปจะเป็นการยาก ฟังก์ชันหรือลักษณะของความไม่เป็นเชิงเส้นที่พบ

บ่อยคือ Saturation, Signum, Limited Slew Rate หรืออื่นๆ กลุ่มบ่อย Discontinuities ซึ่งแสดงควมไม่เป็นเชิงเส้น สามารถใช้ในการจำลองปรากฏการณ์ทางวิศวกรรมได้หลายเหตุการณ์ เช่น การใช้ Saturation บ่อยมักจะใช้แทนข้อจำกัดทางกายภาพ เช่น จิตจำกัดของแรงดันทางเข้ามอเตอร์ไฟฟ้า หรือระดับแรงดันสูงสุดในระบบไฮดรอลิกส์ บ่อย Switches เป็นอีกบ่อยหนึ่งที่ใช้บ่อย เป็นบ่อยที่ใช้ในการจำลองปัญหา IF-THEN เช่นเดียวกับที่พบในการเขียนโปรแกรมโดยทั่วไป บ่อย Slew Rates ใช้ในการจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าทางกายภาพเช่น ความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรง เป็นต้น

#### 5. ตาราง (Lookup Tables)

บ่อยที่แสดงควมสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ในบางครั้งไม่สามารถกำหนดได้ เป็นสมการ หรือได้มาจากการทดลอง เช่น ค่าควมสัมพันธ์ระหว่างอัตราการใช้เชื้อเพลิงต่อความเร็วของรถยนต์ ซึ่งมักจะได้จากการทดลอง หรืออื่นๆ

#### 6. ฟังก์ชันที่กำหนดโดยผู้ใช้ (User-defined Functions)

ฟังก์ชันที่เขียนขึ้นโดยใช้ MATLAB โปรแกรม (m-file) หรือเขียนจากภาษา C หรือ Fortran สามารถที่จะนำมาใช้ร่วมกับโปรแกรม Simulink โดยใช้บ่อยในหมวด User-defined Functions โปรแกรมไฟล์ที่เขียนด้วยภาษา C หรือด้วย m-file นั้นเมื่อถูกเรียกใช้โดยบ่อยที่เกี่ยวข้อง จะถูก Executed ทุก Step Size ของการจำลองปัญหาซึ่งจะมีผลทำให้การจำลองปัญหาที่มีความล่าช้า แต่จะสะดวกในการเขียนโปรแกรม S-Functions จะเป็น Dynamic Linked Libraries (DLL) ซึ่งสามารถเขียนด้วยภาษา C เช่นเดียวกันและเมื่อผ่านการ Compiled แล้วจะเป็นไฟล์ที่ชื่อว่า MEX-file ซึ่งจะมีผลทำให้การจำลองปัญหาที่มีความรวดเร็วมากขึ้น

#### 7. ทางเดินสัญญาณ (Signal Routing)

ในการจำลองระบบที่มีความซับซ้อน บางครั้งมีความจำเป็นที่จะต้องมีการรับส่งสัญญาณจากส่วนหนึ่งของระบบ ไปสู่อีกส่วนหนึ่งของระบบ ซึ่งการใช้เส้นเชื่อมอาจจะไม่สะดวกในการทำงาน ซึ่งบ่อยในชุดนี้เป็นประเภท GOTO บ่อยหรือ FROM บ่อย บ่อยประเภท Multiplexing จะมีประโยชน์ในการจัดระเบียบของแผนภูมิให้มีความเป็นระเบียบมากขึ้น

#### 2.9.3 การกำหนดค่าคงที่ในการจำลองปัญหา (Parameters Configuration)

การจำลองปัญหาบนคอมพิวเตอร์ จะต้องอาศัยเทคนิคของระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) ในการแก้ปัญหาและหาคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์ สำหรับโปรแกรม Simulink นั้น ระบบในรูปแบบต่างๆ สามารถที่จะจำลองทั้งในแบบของระบบต่อเนื่อง (Continuous System) หรือระบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete System) ขึ้นอยู่กับลักษณะองค์ประกอบของระบบย่อย การ

จำลองสามารถที่จะถูกกำหนดให้เริ่ม หรือหยุดในช่วงเวลา หรือส่วนหนึ่งของเวลาได้ตามกำหนดข้อสังเกตที่ต้องพึงระวังคือระยะเวลาที่สนใจในการจำลองปัญหา กับระยะเวลาที่ใช้ในการจำลองปัญหา หรือระยะเวลาที่คอมพิวเตอร์ใช้ในการหาคำตอบของปัญหาที่สนใจจะไม่ตรงกัน เช่น คอมพิวเตอร์อาจจะใช้ระยะเวลาในการจำลองการตอบสนองในช่วง 10 นาที ของระบบที่สนใจเพียง 1 วินาที เป็นต้น ในการจำลองแบบปัญหาโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขประเภทที่ Step Size มีค่าไม่คงที่นั้น (Variable Step Size) Step Size ที่มากที่สุดและน้อยที่สุดสามารถกำหนดได้ อย่างไรก็ตาม ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขประเภท Step Size คงที่ (Fixed Step Size) เป็นวิธีที่มักจะนิยมใช้ในการจำลองปัญหา ทั้งนี้เนื่องจากสามารถระบุช่วงเวลา หรือจุดของเวลาที่สนใจได้อย่างแม่นยำ Step Size ที่ใช้ในการจำลองปัญหาจะต้องมีการกำหนดและจะมีค่าขึ้นอยู่กับลักษณะของระบบพลศาสตร์ที่สนใจ เช่น ในระบบทางความร้อน Step Size อาจอยู่ประมาณ 2-3 วินาที ในขณะที่ระบบควบคุมมอเตอร์อาจจำเป็นต้องใช้ Step Size ที่มีค่าน้อยถึง 0.002 – 0.003 วินาที โดยทั่วไป กฎที่ใช้ในการเลือก Step Size จะอยู่ที่ประมาณอย่างน้อย 4 – 20 เท่าของระบบที่มีการตอบสนองที่เร็วที่สุด

## 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เตาปลูกผลึกถูกใช้ในงานสร้างวัสดุให้มีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับงานที่ใช้ เช่น เทอร์โมอิเล็กทริก โมดูลสำหรับเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นความร้อนและความเย็น วัสดุที่ใช้ภายในเทอร์โมอิเล็กทริก โมดูล เกิดจากการปลูกโดยใช้เตาปลูกผลึก เป็นต้น ปัจจุบันมีการพัฒนาเตาปลูกผลึกทั้งด้านการควบคุมอุณหภูมิและการควบคุมการเคลื่อนที่

### 2.10.1 การปลูกผลึกของ Lead molybdate โดยเตาปลูกผลึกแนวตั้ง

งานวิจัยของ Hongbing Chen, Ccongxin Ge, Rongsheng Li, Jinhao Wang, Changgen Wu and Xianling Eng [1] ได้ทำการพัฒนาวัสดุด้วยการปลูก Lead molybdate ( $PbMoO_4$ , PMO) โดยใช้เตาปลูกผลึกแบบแนวตั้งโดยใช้เงื่อนไขการเผาที่อุณหภูมิ 1,140 – 1,200 องศาเซลเซียส ได้การไล่ระดับอุณหภูมิอยู่ที่ 20 – 40 องศาเซลเซียส ใช้การเคลื่อนที่ 1.2 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

### 2.10.2 คุณสมบัติของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก $Bi_{0.48}Sb_{1.52}Te_3$ จากการเตรียมโดยใช้เตาปลูกผลึก

งานวิจัยของ J. Laopaiboon, R. Laopaiboon, J. Intara-prasurt, S. Pencharee1, C. Eamchot-chawalit [7] ได้ทำการปลูกผลึกเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้เตาปลูกผลึก ซึ่งเตาที่ใช้ประกอบด้วยชุดสร้างอุณหภูมิ 2 ชุด สำหรับชุดอุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ ชุดควบคุมการเคลื่อนที่และชุดท้ายชุดควบคุมบรรยากาศในการเผา ในการเผาจะใช้บรรยากาศที่มีแต่ก๊าซเฉื่อย มีการใช้ความเร็วการเคลื่อนที่ที่ 3.6, 6 และ 12 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

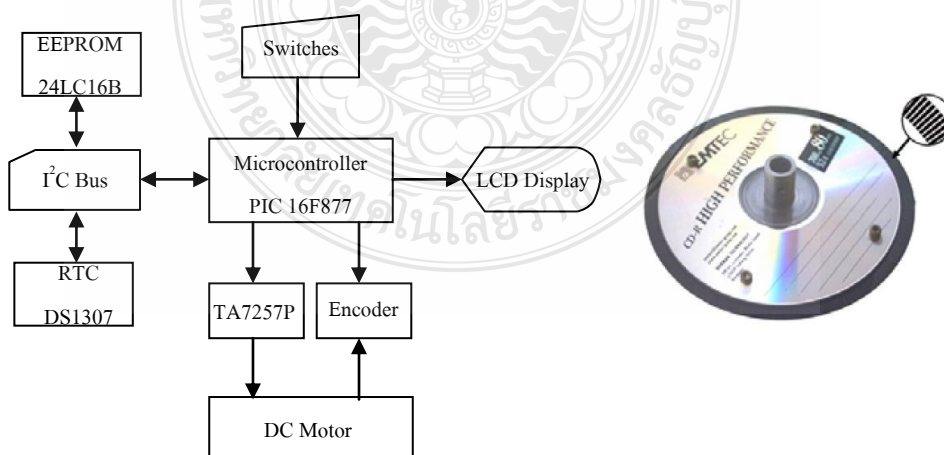
2.10.3 การพัฒนาเครื่องยกเตาหลอมสำหรับการปลูกผลึกเดี่ยว

งานวิจัยของ กวิน เชื้อมกลาง และ รศ. จินตนา เหล่าไพบุลย์ [8] ได้ทำการพัฒนาเครื่องยกเตาหลอมสำหรับการปลูกผลึกเดี่ยวของวัสดุ



ภาพที่ 2.15 องค์ประกอบของเตาปลูกผลึกที่พัฒนาระบบการยกเตา [8]

งานวิจัยนี้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ PIC16F877 ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ ซึ่งมีการทำงานควบคู่กับการรับข้อมูลจากระบบออปติคอลลีเนียร์ โค้ดเดอร์และไอซีฐานเวลา สื่อสารกับผู้ใช้ผ่านสวิทช์และจอแสดงผลแบบแอลซีดี บล็อกไดอะแกรมและออปติคอลลีเนียร์ โค้ดเดอร์ แสดงดังภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.16 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมมอเตอร์และแผ่นดิสก์ที่ใช้ทำออปติคอลลีเนียร์ โค้ดเดอร์ [8]



การทำงานของเครื่องยกสามารถยกเตาหลอมที่มีน้ำหนัก 1 - 10 กิโลกรัมได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถเปลี่ยนแปลงความเร็วของการยกได้ตั้งแต่ 0.5 - 3.0 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ยกได้สูงเป็นระยะทาง 25 เซนติเมตร ผู้วิจัยได้ทดสอบการปลูกผลึกเดี่ยวของวัสดุเทียมฟลูออไรด์โดยใช้ความเร็วการเคลื่อนที่ 2 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ใช้งานเป็นเวลา 10 ชั่วโมง พบว่า เครื่องยกเตาหลอมสามารถควบคุมความเร็วได้เป็นอย่างดี

#### 2.10.4 การสร้างชุดทดลองทางไกลทดสอบระบบความร้อนด้วยสัญญาณฟังก์ชันหนึ่งหน่วย

งานวิจัยของ Kannan M. Moudgaly, Inderpreet Arora [9] ได้ทำการสร้างชุดทดลองทางไกล ทำการทดสอบระบบความร้อนด้วยสัญญาณฟังก์ชันหนึ่งหน่วย หาพารามิเตอร์ของระบบซึ่งเป็นระบบอันดับหนึ่ง ประกอบด้วยอัตราขยายและค่าเวลาคงที่ การทดลองใช้บอร์ดสร้างระบบให้ความร้อนมีชุดความร้อน พัดลม อุปกรณ์วัดอุณหภูมิและชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ในการติดต่อกับคอมพิวเตอร์ดังภาพที่ 2.17 ใช้โปรแกรม LabVIEW ในการติดต่อรับส่งข้อมูลกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำการกำหนดการทดสอบระบบโดยให้ Heater current ที่ 2 ช่วงคือ 25 และ 50 PWM unit รอแต่ละช่วงให้อุณหภูมิคงที่ พัดลมกำหนด 100 หน่วย ผลการทดสอบได้ค่าเวลาคงที่ 40 วินาทีและอัตราขยายที่ 0.52

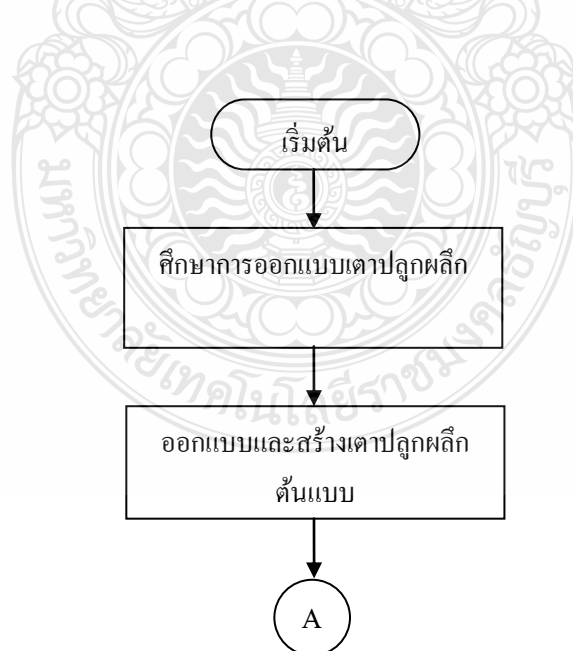


ภาพที่ 2.17 บอร์ดทดลองระบบให้ความร้อน [9]

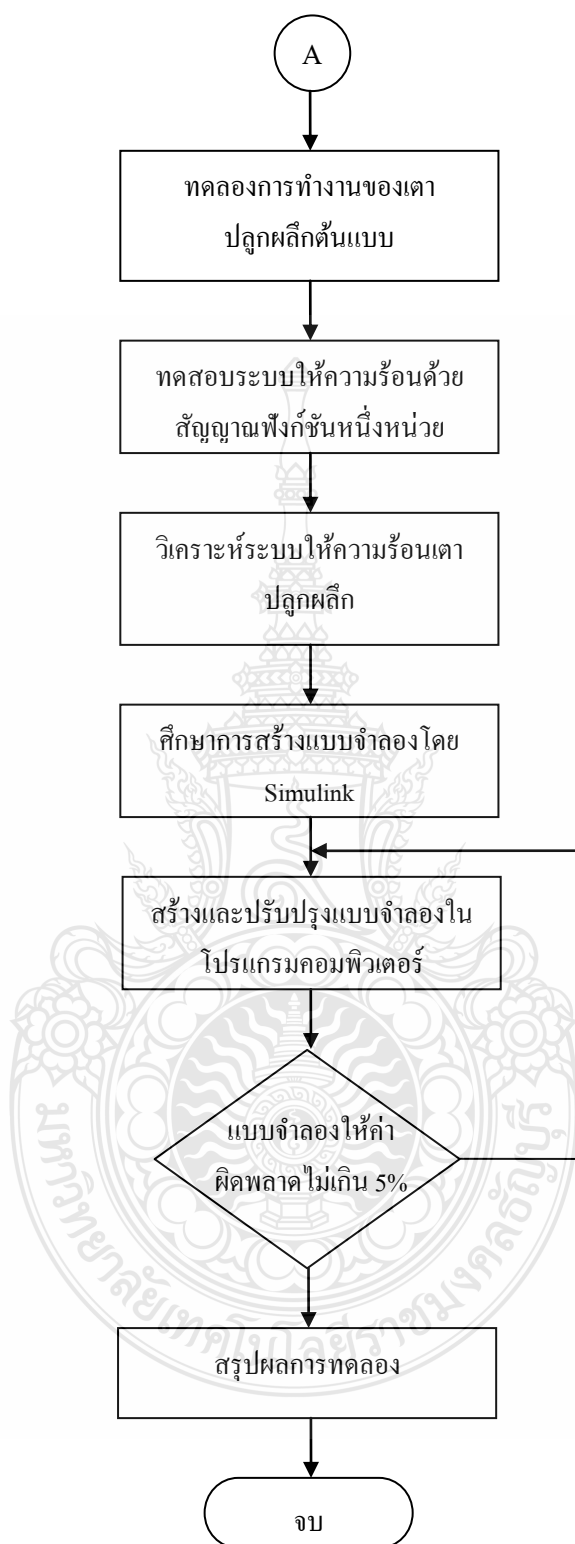
### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

เตาปลูกผลึกเป็นเตาเผาที่มีส่วนให้ความร้อนอุณหภูมิต่าง ๆ กัน โดยจะมีช่วงอุณหภูมิสูงสำหรับหลอมวัสดุและมีช่วงอุณหภูมิลดลงมาจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งอย่างช้าๆ [1] โดยอุณหภูมิแต่ละช่วงจะต้องถูกกำหนดให้เหมาะสมกับวัสดุนั้นๆ มีงานวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาเตาชนิดนี้ เช่น มีการพัฒนาให้เตาทำอุณหภูมิได้สูงถึง 1,150 องศาเซลเซียสสามารถเคลื่อนที่ได้ 0.5 ถึง 50 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง [10] มีการพัฒนาโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ PIC16F877 ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ ซึ่งมีการทำงานควบคู่กับการรับข้อมูลจากระบบอปติคัลเอ็นโค้ดเดอร์และไอซีฐานเวลา สามารถเปลี่ยนแปลงความเร็วของการยกได้ตั้งแต่ 0.5 ถึง 3.0 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ยกได้สูงเป็นระยะทาง 25 เซนติเมตร [8] การใช้เตาชนิดนี้ที่ความเร็ว 1 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ในการปลูกผลึกสาร Lead fluoride chloride (PbFCl) crystal [11] นอกจากนี้ยังมีการสร้างสารเทอร์โมอิเล็กทริกด้วยเตาชนิดนี้โดยใช้ที่ความเร็ว 3.6, 6 และ 12 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง อุณหภูมิที่ 700 องศาเซลเซียส ข้อสำคัญของเตาคืออุณหภูมิที่กำหนดจะต้องมีการควบคุมให้คงที่ ซึ่งในการควบคุมนั้นจะต้องมีการหาคุณลักษณะของระบบให้ความร้อน [12] สำหรับกำหนดค่าพารามิเตอร์ควบคุมที่เหมาะสมต่อไป



ภาพที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย



ภาพที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย(ต่อ)

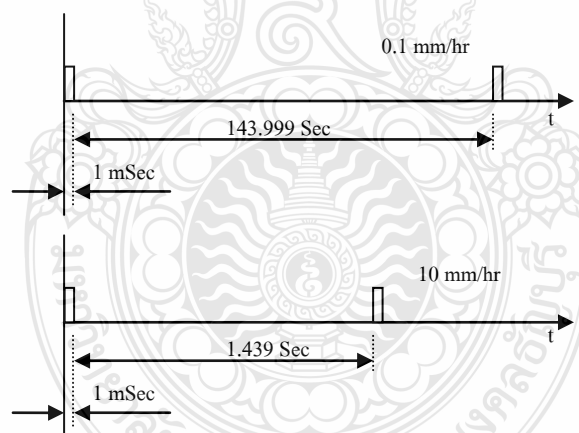
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยในเรื่องการพัฒนากระบวนการควบคุมอุณหภูมิในเตาปลูกผลึกโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีลำดับขั้นตอนการดำเนินงานไว้ดังภาพที่ 3.1

### 3.1 การออกแบบและสร้างเตาปลูกผลึกต้นแบบ

แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนควบคุมการเคลื่อนที่ของเตากับส่วนควบคุมอุณหภูมิเตา การเคลื่อนที่จะใช้สเต็ปปีงมอเตอร์หมุนสกรูให้ยกเตาเผาขึ้นลงได้ โดยกำหนดความเร็วจากสัญญาณกระตุ้นที่ส่งให้ชุดขับเคลื่อน ส่วนควบคุมอุณหภูมิจะใช้ 2 ชุด อุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ

#### 3.1.1 การออกแบบและสร้างชุดควบคุมการเคลื่อนที่เตา

การควบคุมความเร็วการเคลื่อนที่ของเตา ควบคุมการทำงานของระบบโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 เบอร์ AT89C2052 ทำหน้าที่ประมวลผล ส่งสัญญาณกระตุ้น (Pulse) ไปยังชุดขับเคลื่อนสเต็ปปีงมอเตอร์ KR-55MC เลือกรูปแบบการควบคุมเป็นแบบพัลส์สเต็ป ดันกำลังใช้สเต็ปปีงมอเตอร์ A4K-M564 เป็นตัวขับเคลื่อนส่งผลให้ในหนึ่งสเต็ปหรือหนึ่งสัญญาณกระตุ้น สามารถเคลื่อนที่ได้ 0.72 องศา



ภาพที่ 3.2 ความกว้างสัญญาณที่ความเร็ว 0.1 และ 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

ออกแบบโปรแกรมควบคุมความเร็วโดย ในจำนวนหนึ่งรอบหรือ 360 องศาจะเคลื่อนที่ได้ระยะทาง 2 มิลลิเมตร ดังนั้นจะต้องใช้สัญญาณกระตุ้นจำนวน 500 ลูกในการเคลื่อนที่ได้ 2 มิลลิเมตร กล่าวอีกนัยหนึ่งคือสัญญาณกระตุ้นหนึ่งลูกจะเคลื่อนที่ได้ระยะทาง 0.004 มิลลิเมตร ถ้ากำหนดความเร็วที่ 0.1 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง หมายความว่าสัญญาณกระตุ้นจะมีความถี่ประมาณ 0.007 เฮิรตซ์ ดังนั้นจึงให้สัญญาณกระตุ้นแบบช่วง High แคมช่วง Low กว้าง ที่ระดับความเร็วที่ 0.1

มิลลิเมตรต่อชั่วโมงใน 1 คาบเวลาจะกว้าง 144 วินาทีให้ระดับ High กว้าง 1 มิลลิวินาที ระดับ Low กว้าง 143.999 วินาทีและที่ระดับความเร็วที่ 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงระดับ High กว้าง 1 มิลลิวินาที ระดับ Low จะกว้าง 1.439 วินาทีสัญญาณแสดงดังภาพที่ 3.2

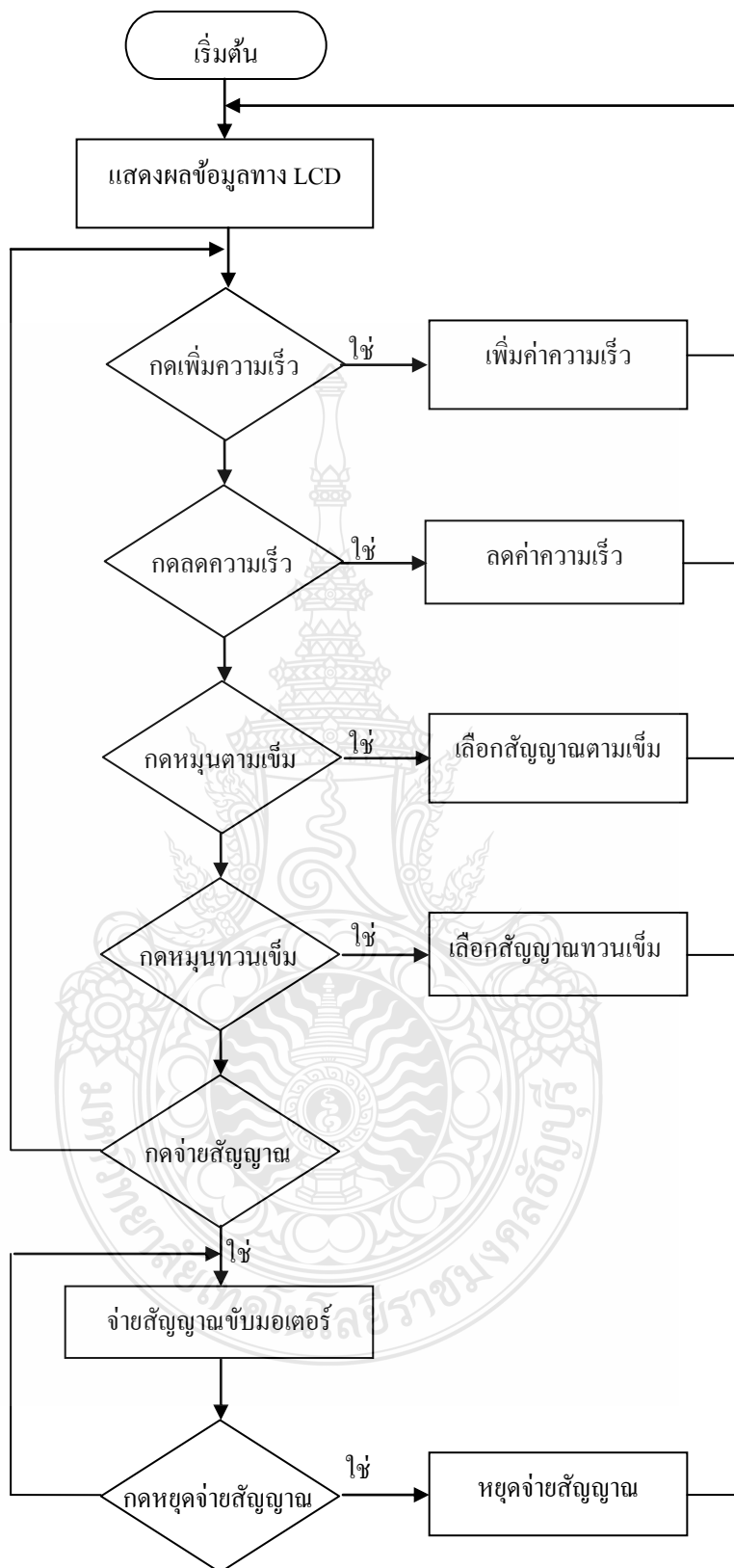


ภาพที่ 3.3 ชุดกำเนิดสัญญาณควบคุมความเร็ว

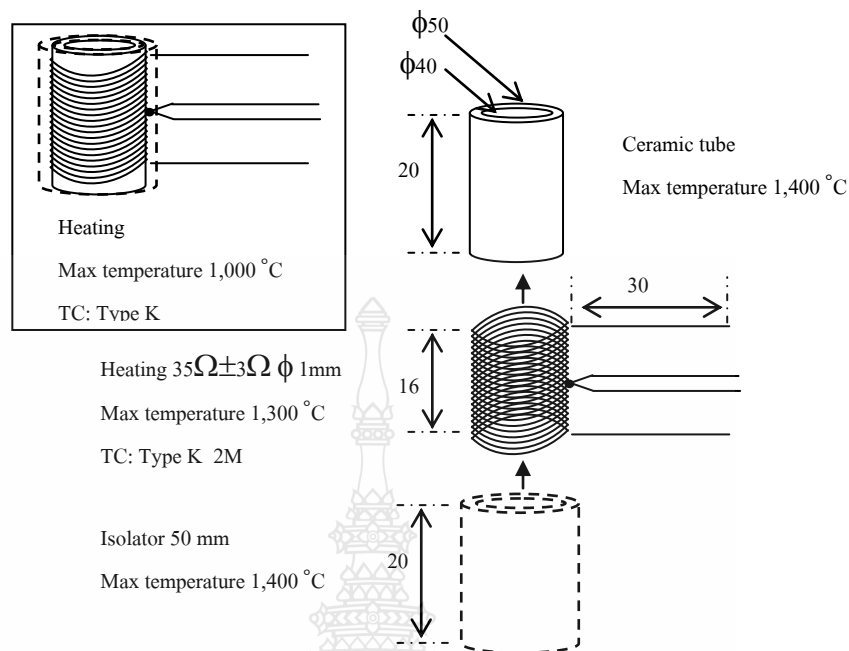


ภาพที่ 3.4 ไดอะแกรมระบบควบคุมการเคลื่อนที่

ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ในการกำเนิดสัญญาณควบคุมความเร็ว โดยสร้างสัญญาณกระตุ้นที่คาบเวลาต่างๆ กัน ซึ่งคาบเวลานี้จะสัมพันธ์กับความเร็วและการทำงานของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ มีส่วนแสดงผลเป็นจอ LCD รับการสั่งงานจากผู้ใช้โดยสัญญาณจากการกดสวิทช์ และส่งสัญญาณกระตุ้นสำหรับวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ทั้งแบบหมุนตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา การขับเคลื่อนใช้สเต็ปมอเตอร์รุ่น A4K-M564 ของ Autronics ซึ่งเป็นมอเตอร์ที่ประกอบไปด้วยขดลวด 4 ชุดมาประกอบจัดเรียงลำดับกันภายในมอเตอร์ ลักษณะการทำงานจะมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังขดลวดแต่ละขดที่จัดเรียงกันไปตามลำดับ เพื่อให้ขดลวดภายในมอเตอร์สร้างสนามแม่เหล็กหมุนไปตามทิศทางการจ่ายกำลังไฟฟ้าจนครบทั้ง 4 ขด ซึ่งจะสามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์ได้จากความเร็วในการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังขดลวดต่างๆ ของมอเตอร์ โดยการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าใช้ชุดขับของ Autronics รุ่น KR5MC เลือกรูปแบบควบคุมแบบเต็มสเต็ป



ภาพที่ 3.5 โปรแกรมควบคุมการจ่ายสัญญาณขับเคลื่อนมอเตอร์

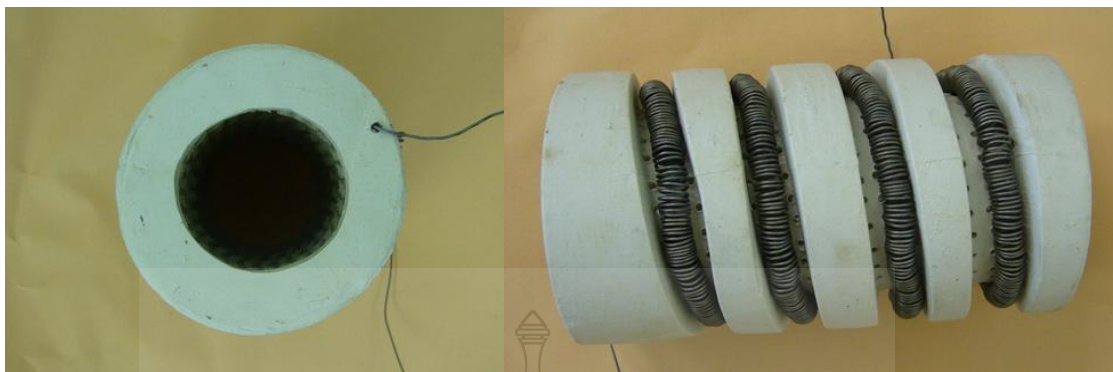


ภาพที่ 3.6 แบบเตาเผาที่สร้าง

การออกแบบโปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานของเครื่อง เป็นการวางลำดับการทำงานของโปรแกรม เพื่อร่างเป็นแบบของการเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานของคอลโทรลเลอร์ ให้สามารถตั้งค่าความเร็วการเคลื่อนที่ได้ ตั้งค่าการหมุนของมอเตอร์ เป็นต้น การออกแบบโปรแกรมควบคุมจะใช้การเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ลงในชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 และป้อนข้อมูลผ่านทางสวิทช์ มีการแสดงผลตอบโต้ด้วย LCD

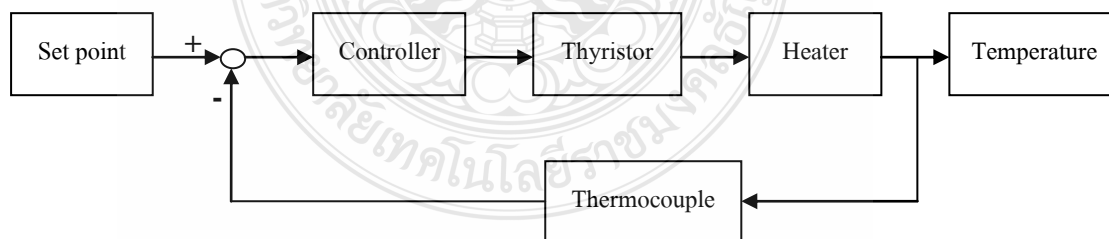
### 3.1.2 การออกแบบและสร้างระบบควบคุมอุณหภูมิของเตา

สร้างระบบให้ความร้อนโดยทดลองสร้างเตาเผา จากหลอดความร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ทนความร้อนได้สูงสุด 1,300 องศาเซลเซียส นำมาขดเป็นลักษณะแบบสปริง จากนั้นนำมาพันรอบท่อเซรามิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตร ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลชนิดเค หุ้มด้วยฉนวนความร้อนหนา 150 มิลลิเมตร ปิดทับรอบนอกสุดท้ายด้วยแผ่นโลหะแอสแตนเลส



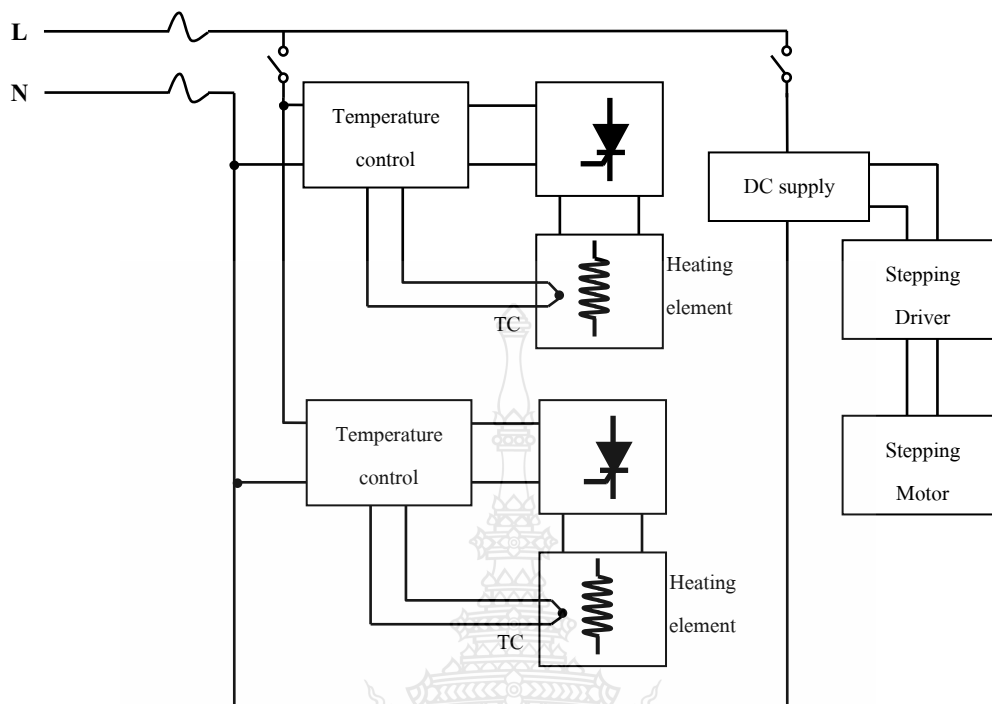
ภาพที่ 3.7 เตาเผาที่ประกอบขึ้น

ระบบควบคุมอุณหภูมิประกอบไปด้วยตัวควบคุมอุณหภูมิ ตัวจ่ายกำลังไฟ ลวดความร้อนและตัววัดอุณหภูมิ อุปกรณ์ที่ใช้ประกอบด้วย ตัวควบคุมอุณหภูมิรุ่น DB5090 ซึ่งเป็นตัวควบคุมอุณหภูมิแบบพีไอดี รับสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิลผ่านเข้าในส่วนในตัวควบคุมประมวลผลแบบพีไอดีเทียบกับอุณหภูมิที่กำหนดไว้ จากนั้นส่งสัญญาณเอาต์พุตมาตรฐาน 4-20 มิลลิแอมป์ ต่อไปยังไทรสเตอร์รุ่น SPC1-35 ใช้กับระบบไฟฟ้า 1 เฟส ควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ 3 แบบคือ แบบ Phase control, แบบ Cycle control และ On/Off control สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 35 แอมป์ ทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังลวดความร้อน มีการวัดอุณหภูมิป้อนกลับตัวควบคุมอุณหภูมิ โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค ส่งสัญญาณป้อนกลับไปยังตัวควบคุมอุณหภูมิเพื่อทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิ ซึ่งระบบนี้จะเป็นการควบคุมแบบปิด



ภาพที่ 3.8 ไลอะแกรมระบบควบคุมอุณหภูมิ





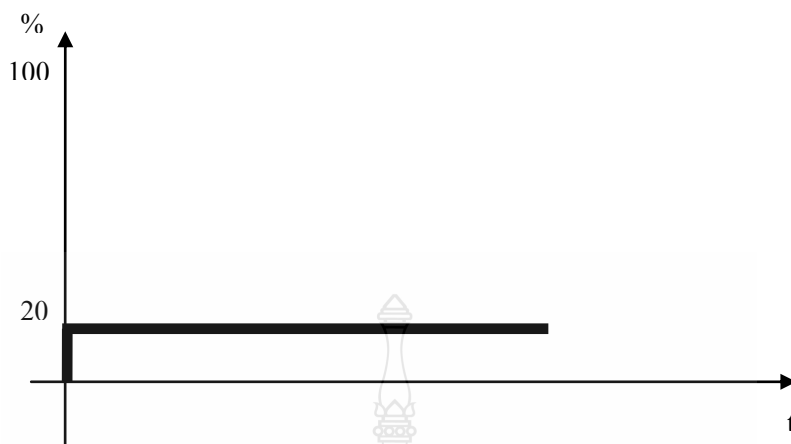
ภาพที่ 3.9 วงจรการควบคุมอุณหภูมิ

### 3.2 การทดลองการทำงานของเตาปลุกผลึกต้นแบบ

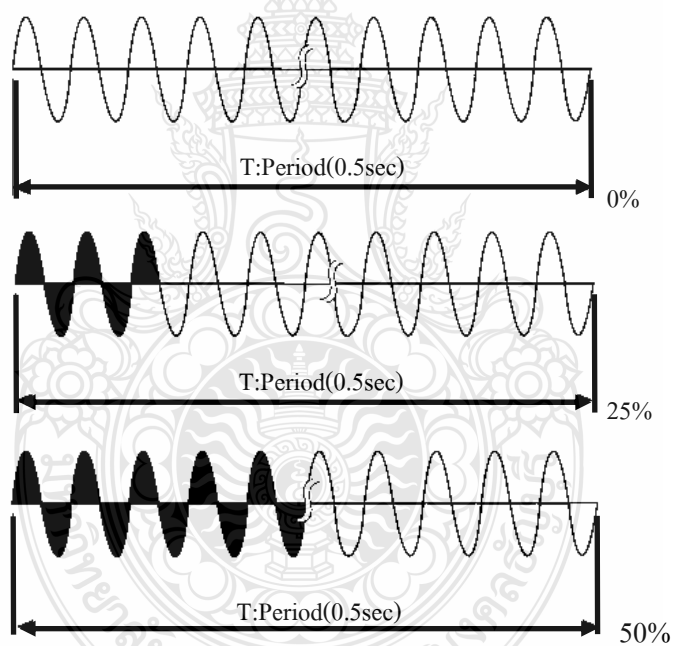
กำหนดให้เตาเผาปลุกผลึกเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง เคลื่อนที่ในระยะทาง 300 มิลลิเมตร ทำการวัดค่าระยะทาง ตั้งค่าอุณหภูมิเตาด้านอุณหภูมิสูงเป็น 600 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของเตาด้านอุณหภูมิต่ำเป็น 250 องศาเซลเซียส ทดสอบระบบโดยกำหนดความเร็วการเคลื่อนที่เท่ากับ 1, 5 และ 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง วัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นเป็นสัญญาณเอาต์พุตทุกๆ 10 วินาที เป็นเวลา 40 นาที

### 3.3 การทดสอบระบบให้ความร้อนด้วยสัญญาณฟังก์ชันหนึ่งหน่วย

ทดสอบโดยการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ระดับต่างๆ โดย 1 คาบเวลาที่มีความกว้าง 500 มิลลิวินาที กำหนดเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ ถ้าจ่ายกำลังไฟฟ้า 50 เปอร์เซ็นต์ใน 1 คาบเวลาจะต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าให้ระบบ 250 มิลลิวินาทีและหยุดจ่าย 250 มิลลิวินาที หรือจ่ายกำลังไฟฟ้า 25 เปอร์เซ็นต์ใน 1 คาบเวลาจะต้องจ่ายกำลังไฟฟ้า 125 มิลลิวินาทีและหยุดจ่าย 375 มิลลิวินาที



ภาพที่ 3.10 สัญญาณฟังก์ชันหนึ่งหน่วยที่กำลังไฟฟ้า 20 เปอร์เซ็นต์



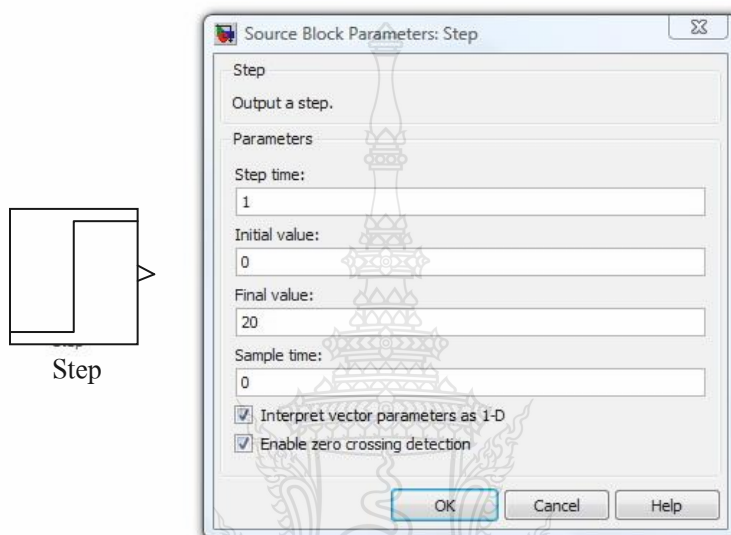
ภาพที่ 3.11 คาบเวลาการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ระดับต่างๆ

### 3.4 การสร้างแบบจำลองของระบบให้ความร้อน

ออกแบบจำลองระบบให้ความร้อนโดยใช้โปรแกรม Simulink โดยใช้ผลลัพธ์จากการทดสอบระบบด้วยสัญญาณฟังก์ชันหนึ่งหน่วย อุปกรณ์พื้นฐานของระบบควบคุมประกอบด้วย

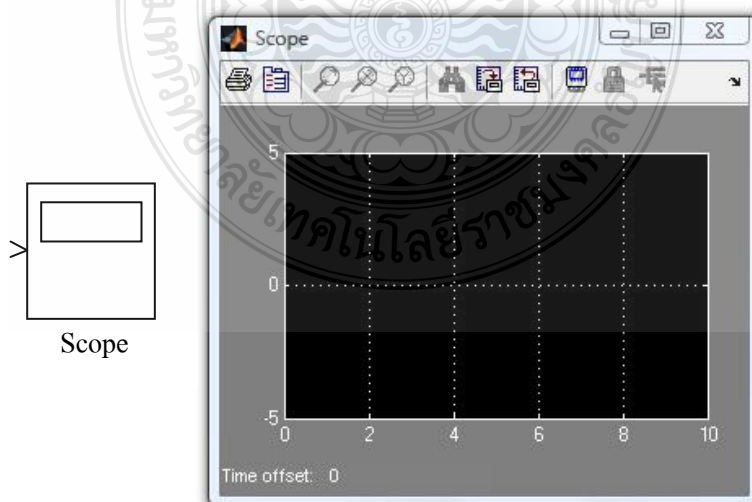
### 3.4.1 อุปกรณ์ Step

อยู่ในบล็อกของแหล่งกำเนิดสัญญาณใช้กำเนิดสัญญาณอินพุต ในการทดสอบระบบ ด้วยสัญญาณฟังก์ชันหนึ่งหน่วย จะกำหนดตามค่าเปอร์เซ็นต์กำลังไฟฟ้าที่ระดับต่างๆ โดยกำหนดให้ Step time มีค่าเป็นหนึ่ง Initial value มีค่าเป็นศูนย์ และ Final value มีค่าตามค่าเปอร์เซ็นต์ที่ใช้ทดสอบระบบเช่นที่อินพุตกำลังไฟฟ้า 20 เปอร์เซ็นต์ ใสค่า Final value เท่ากับ 20



ภาพที่ 3.12 การกำหนดค่า STEP

### 3.4.2 อุปกรณ์ Scope

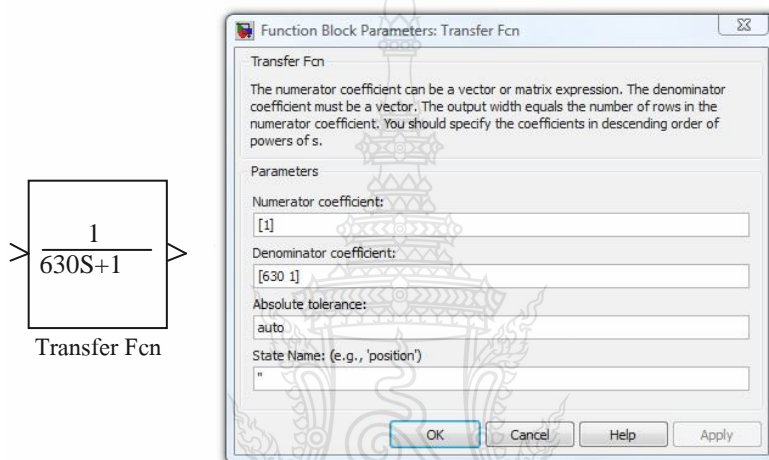


ภาพที่ 3.13 อุปกรณ์ Scope

อยู่ในบล็อกของแหล่งที่สัญญาณใช้รับสัญญาณเอาต์พุต เมื่อทำการประมวลผลการทำงานของแบบจำลอง สัญญาณที่ต่ออยู่กับ Scope จะถูกแสดงผลด้วยกราฟ

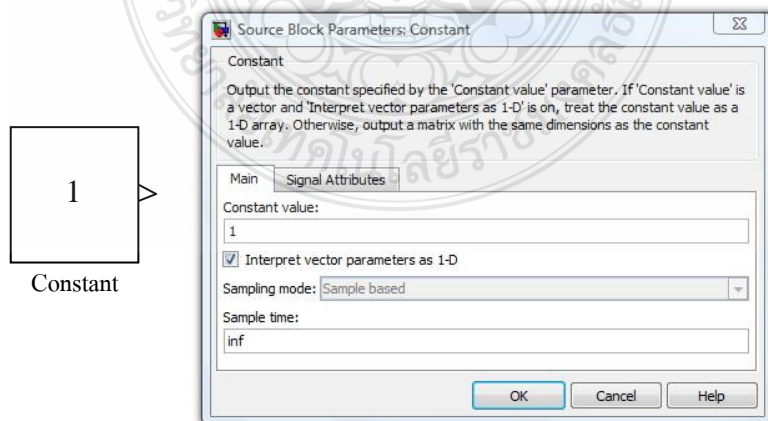
### 3.4.3 อุปกรณ์ Transfer Fcn

อยู่ในบล็อกของระบบต่อเนื่อง กำหนดค่าตามระบบที่ต้องการทดสอบในโดเมนลาปลาซ มีช่องรับสัญญาณเข้าและออกจากระบบ โดยมีพารามิเตอร์ที่ใช้งานคือ Numerator coefficient หมายถึงสัมประสิทธิ์ของซีโร (Zero) ในระบบและ Denominator coefficient หมายถึงสัมประสิทธิ์ของโพล (Pole) ในระบบ



ภาพที่ 3.14 อุปกรณ์ Transfer Fcn

### 3.4.4 อุปกรณ์ Constant

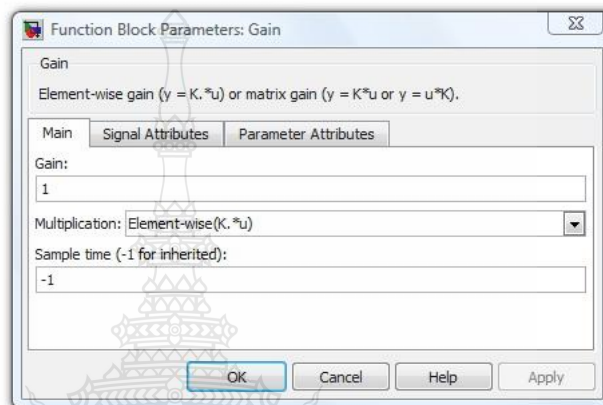
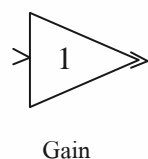


ภาพที่ 3.15 อุปกรณ์ Constant

อยู่ในบล็อกของแหล่งกำเนิดสัญญาณ เป็นการกำเนิดสัญญาณค่าคงที่ให้กับระบบ  
ปรับเปลี่ยนค่าที่ Constant value

### 3.4.5 อุปกรณ์ Gain

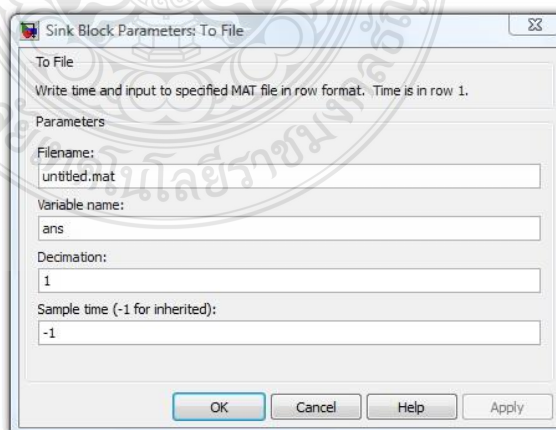
อยู่ในบล็อกของการดำเนินการทางคณิตศาสตร์ สามารถป้อนค่า Gain ของระบบที่  
ต้องการได้ การทำงานเป็นการคูณของพารามิเตอร์ Gain กับสัญญาณที่เข้ามายังอุปกรณ์



ภาพที่ 3.16 อุปกรณ์ Gain

### 3.4.6 อุปกรณ์ To File

อยู่ในบล็อกของแหล่งทิ้งสัญญาณ สำหรับนำข้อมูลออกมาใช้ในรูปแบบของไฟล์  
กำหนดชื่อไฟล์ที่ Filename และตัวแปรที่ Variable name



ภาพที่ 3.17 อุปกรณ์ To File

### 3.4.7 อุปกรณ์เชื่อมต่อต่างๆ

อยู่ในบล็อกของทางเดินสัญญาณ สำหรับเชื่อมต่อสัญญาณเข้าอุปกรณ์ต่างๆ

ทำการออกแบบระบบจำลอง เชื่อมต่อสัญญาณอุปกรณ์ต่างๆเข้าด้วยกัน กำหนดค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์แต่ละตัว โดยค่าของอุปกรณ์ Transfer Fcn และ Gain จะถูกกำหนดจากระบบจริงที่ถูกทดสอบด้วยสัญญาณฟังก์ชันหนึ่งหน่วย

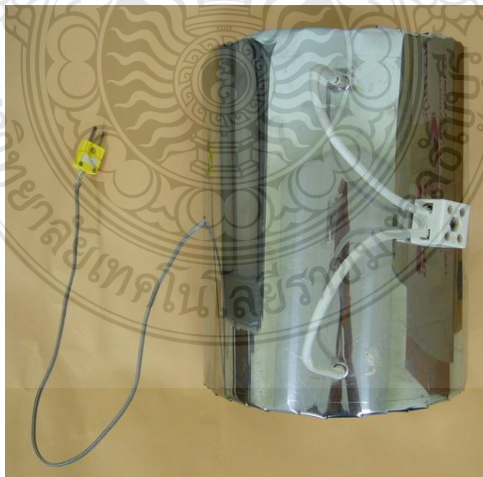


## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

การทำงานของเตาปลูกผลึกประกอบด้วยกระบวนการเคลื่อนที่และการควบคุมอุณหภูมิ สร้างอุณหภูมิจากเตาเผาใช้ลวดความร้อนแบบนิโครม ชุดสร้างและควบคุมอุณหภูมิจะมี 2 ชุดนำมาวางซ้อนกัน กำหนดและควบคุมอุณหภูมิให้ต่างกัน โดยเตาบนจะมีอุณหภูมิสูง เตาล่างจะมีอุณหภูมิต่ำ เมื่อนำสารตัวอย่างมาหลอมในเตาอุณหภูมิสูงแล้วบังคับให้เกิดการเคลื่อนที่ของเตาทั้งสองอย่างช้าๆ ผ่านสารตัวอย่าง ส่งผลให้เกิดการไล่ระดับของอุณหภูมิที่ชันงาน การควบคุมอุณหภูมิที่ถูกต้องจะต้องทราบค่าคุณลักษณะของระบบให้ความร้อน ซึ่งงานวิจัยนี้จะเป็นการสร้างเตาปลูกผลึกต้นแบบ ทำการทดสอบวัดค่าการไล่ระดับอุณหภูมิ ทดสอบระบบให้ความร้อนด้วยสัญญาณฟังก์ชันหนึ่งหน่วย ที่ระดับต่างๆ โดยวิธีแรกจะใช้ค่าเฉลี่ยของคุณลักษณะของระบบให้ความร้อนที่ระดับต่างๆเป็นค่าคุณลักษณะของระบบให้ความร้อนนี้ วิธีที่สองใช้การถดถอยเชิงเส้นในการกำหนดค่าอัตราขยายระบบ ทดสอบค่าคุณลักษณะของระบบที่ได้ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่าผลการทดสอบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของวิธีที่สองให้ค่าอุณหภูมิใกล้เคียงระบบจริงมากกว่า

#### 4.1 การสร้างเตาปลูกผลึกต้นแบบ



ภาพที่ 4.1 ระบบให้ความร้อน

สร้างระบบให้ความร้อน จากหลอดความร้อนแบบนิโครม นำมาขดเป็นลักษณะแบบสปริง ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลชนิดเค หุ้มด้วยฉนวนความร้อน ปิดทับรอบนอกสุดทำด้วยแผ่นโลหะสแตนเลส ดังภาพที่ 4.1 นำระบบให้ความร้อนที่ประกอบแล้ว 2 ชุดซ้อนกันเป็น 2 ชั้นสำหรับการไล่ระดับอุณหภูมิดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 การติดตั้งระบบให้ความร้อน 2 ชั้น

ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมและเดินสายไฟระบบดังภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 การติดตั้งชุดควบคุมระบบของเตาปลุกผลึกต้นแบบ



## 4.2 ผลการทดสอบเตาปลูกผลึกต้นแบบ

### 4.2.1 ผลการทดสอบระบบเคลื่อนที่ของเตาปลูกผลึกต้นแบบ

กำหนดให้เตาเผาปลูกผลึกเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ในระยะทาง 300 มิลลิเมตร ทำการวัดค่าระยะทางแสดงดังภาพที่ 4.4 ค่าคลาดเคลื่อนแสดงดังตารางที่ 4.1



ภาพที่ 4.4 การวัดค่าระยะทางเคลื่อนที่

ตารางที่ 4.1 ค่าคลาดเคลื่อนที่ระยะทาง 300 มิลลิเมตร

ครั้งที่	ค่าที่วัดได้(มิลลิเมตร)	ค่าผิดพลาด(เปอร์เซ็นต์)
1	302.75	0.92
2	302.45	0.82
3	298.10	0.63
4	300.65	0.22
5	297.70	0.77
6	301.80	0.60

จากการทดลองพบว่าที่ความเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงได้ค่าความผิดพลาดจากการเคลื่อนที่ไม่เกิน 1%

#### 4.2.2 ผลการทดสอบระบบให้ความร้อนของเตาปลูกผลึกต้นแบบ

ทำการวัดค่าอุณหภูมิโดยการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลชนิดเค ที่ตำแหน่งวัสดุที่เผา ดังภาพที่ 4.5 ตั้งค่าอุณหภูมิเตาด้านบนเป็น 600 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเตาด้านล่างเป็น 250 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 4.7 ควบคุมความเร็วการเคลื่อนที่ของเตาเท่ากับ 1, 5 และ 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ผลดังตาราง 4.2 และกราฟดังภาพที่ 4.6



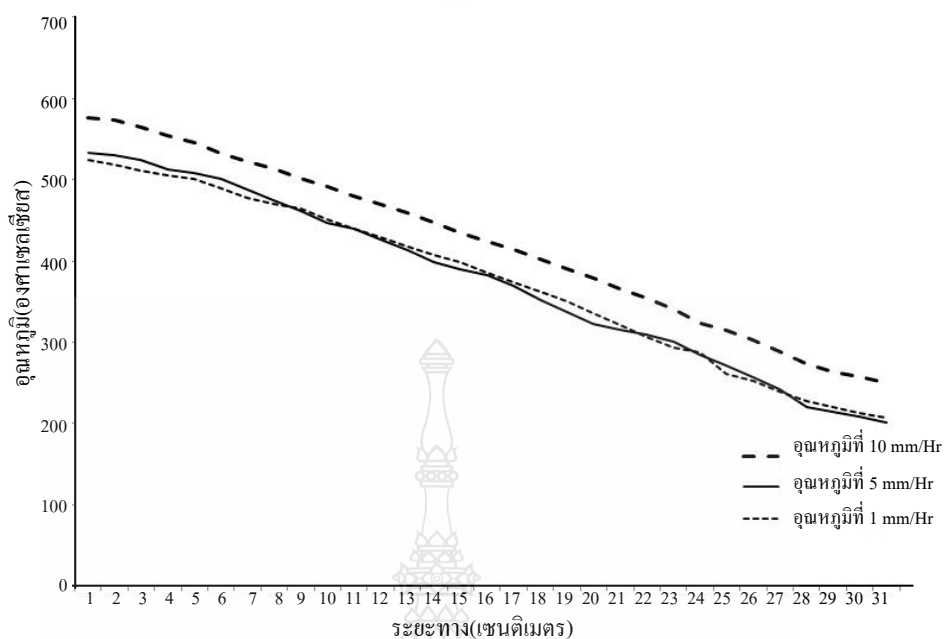
ภาพที่ 4.5 การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลที่ตำแหน่งการวัด



ภาพที่ 4.6 การกำหนดอุณหภูมิที่ตัวควบคุมอุณหภูมิ

ตารางที่ 4.2 การไล่ระดับอุณหภูมิโดยใช้ความเร็วที่ 1, 5 และ 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

ระยะทาง	1 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง	5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง	10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง
0	525	533	576
10	519	530	573
20	512	525	564
30	506	513	554
40	501	508	545
50	589	501	533
60	478	488	523
70	470	475	513
80	464	461	502
90	451	447	491
100	439	440	480
110	430	426	469
120	418	414	459
130	407	399	447
140	398	390	435
150	386	382	425
160	374	370	414
170	362	352	403
180	350	338	391
190	336	322	379
200	321	315	366
210	306	309	354
220	293	301	341
230	287	285	323
240	261	272	315
250	252	257	303
260	240	242	288
270	227	221	274
280	220	214	263
290	213	209	258
300	207	202	251



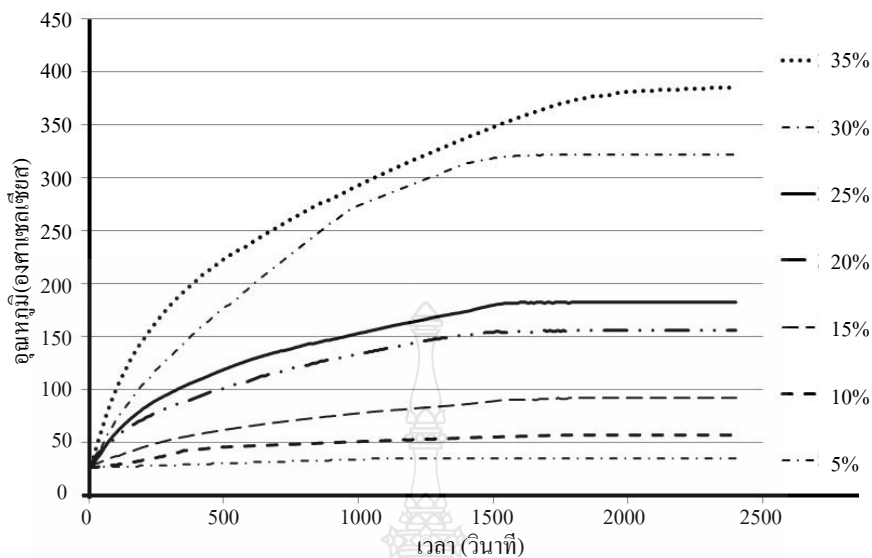
ภาพที่ 4.7 กราฟการไล่ระดับอุณหภูมิ

จากการทดลองพบว่า การไล่ระดับอุณหภูมิภายในเตาปลูกผลึกต้นแบบ มีค่าประมาณ 10 องศาเซลเซียสต่อเซนติเมตร เส้นกราฟที่ดีที่สุดคือเส้นที่มีความเป็นเชิงเส้นดีที่สุด ซึ่งวิเคราะห์ข้อมูลโดยระเบียบวิธีเชิงเส้น จะได้ว่าที่ความเร็ว 1 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง จะสามารถสร้างสมการเส้นตรง  $Y = -1.13X + 546.16$  มีค่าผิดพลาดมาตรฐาน (Standard Error) ที่ 9.08 ที่ความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง จะได้สมการเส้นตรง  $Y = -1.18X + 551.93$  และจะมีค่าผิดพลาดมาตรฐาน (Standard Error) ที่ 6.47 ที่ความเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง จะได้สมการเส้นตรง  $Y = -1.14X + 590.72$  และจะมีค่าผิดพลาดมาตรฐาน (Standard Error) ที่ 5.24

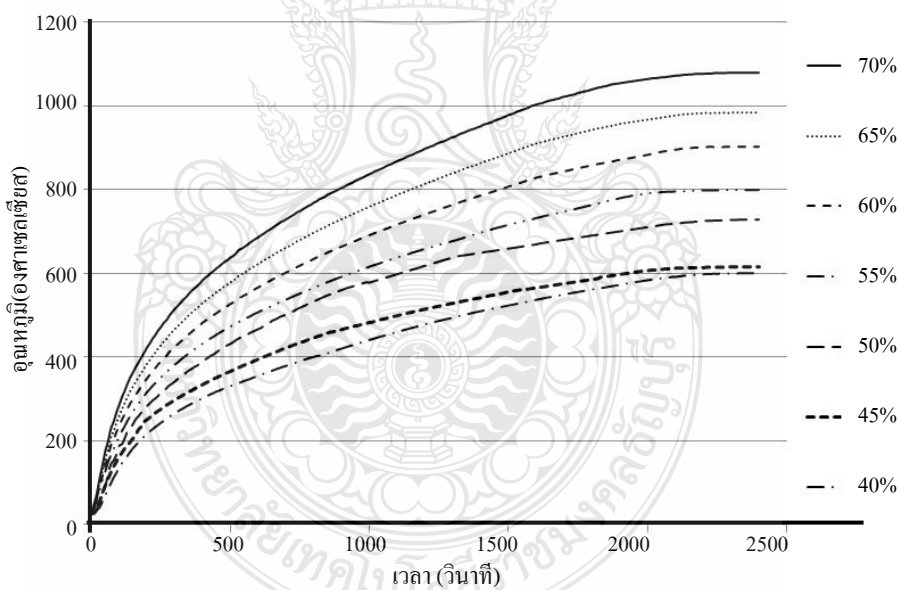
ดังนั้นกราฟที่ให้ความเป็นเชิงเส้นดีที่สุดคือกราฟที่ความเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งให้ค่าผิดพลาดมาตรฐานน้อยกว่ากราฟที่ความเร็ว 1 และ 5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

#### 4.3 ผลการทดสอบระบบด้วยสัญญาณฟังก์ชันหนึ่งหน่วย

จ่ายสัญญาณแบบฟังก์ชันหนึ่งหน่วย โดยการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับหลอดความร้อนที่ 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65 และ 70 เปอร์เซ็นต์ วัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นซึ่งเป็นสัญญาณเอาต์พุตทุกๆ 10 วินาที เป็นเวลา 40 นาที นำค่าอุณหภูมิที่วัดได้แสดงดังกราฟภาพที่ 4.8 และภาพที่ 4.9



ภาพที่ 4.8 กราฟอุณหภูมิที่จ่ายกำลังไฟฟ้า 5, 10, 15, 20, 25, 30 และ 35 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4.9 กราฟอุณหภูมิที่จ่ายกำลังไฟฟ้า 40, 45, 50, 55, 60, 65 และ 70 เปอร์เซ็นต์

เมื่อพิจารณาจากกราฟพบว่าระบบมีลักษณะเป็นแบบระบบอันดับหนึ่ง ซึ่งมีพารามิเตอร์ของระบบที่สำคัญคือค่าเวลาคงที่หาได้จากค่าอุณหภูมิสุดท้ายคูณด้วย 0.632 และอัตราขยายจากอุณหภูมิสุดท้ายหารด้วยระดับอินพุต การทดสอบด้วยฟังก์ชันหนึ่งหน่วยที่ระดับต่าง ๆ กัน เป็นการ

ปรับเปลี่ยนขนาดของกำลังไฟฟ้าเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้พารามิเตอร์อัตราขยาย เป็นอัตราส่วนระหว่างเอาต์พุต(อุณหภูมิ) ต่อกำลังไฟฟ้า (เปอร์เซ็นต์กำลังไฟฟ้า) ดังสมการที่ 4.1 และมีหน่วยเป็นองศาเซลเซียสต่อเปอร์เซ็นต์กำลังไฟฟ้า คำนวณหาค่าเฉลี่ยของค่าเวลาคงที่และอัตราขยาย ผลลัพธ์ดังตารางที่ 4.3

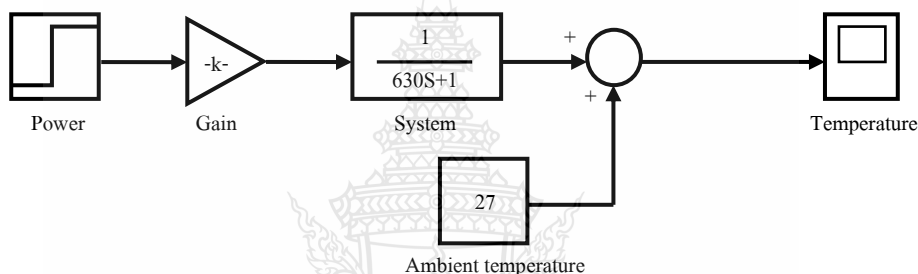
$$Gain = \frac{Output\_Temperature}{\% power} \quad (4.1)$$

ตารางที่ 4.3 ค่าคุณลักษณะของระบบที่ระดับอินพุตต่างๆ

ระดับอินพุต (เปอร์เซ็นต์)	ค่าเวลาคงที่ (วินาที)	อัตราขยาย (องศาเซลเซียสต่อ เปอร์เซ็นต์กำลังไฟฟ้า)	ค่าอุณหภูมิสุดท้าย (องศาเซลเซียส)
5	680	7.00	35
10	490	5.80	58
15	660	6.13	92
20	600	7.80	156
25	570	7.32	183
30	670	10.73	322
35	690	10.23	358
40	740	15.00	600
45	610	13.68	616
50	610	14.54	727
55	630	14.53	799
60	640	14.58	875
65	620	15.15	985
70	610	15.01	1051
ค่าเฉลี่ย	630	11.25	-

#### 4.4 ผลการทดลองสร้างแบบจำลอง

จากผลที่ได้พบว่าเป็นระบบอันดับหนึ่ง นำค่าเฉลี่ยของค่าเวลาคงที่และอัตราขยายที่คำนวณได้มาออกแบบแบบจำลองด้วยโปรแกรม Simulink ซึ่งแสดงด้วยสมการคณิตศาสตร์ทาง S-domain สมการที่ 4.2 และแปลงลาปลาซเป็นสมการทางเวลาดังสมการที่ 4.3 โดยประกอบด้วยอุปกรณ์ Step, Scope, Gain มีค่า 11.25, อุปกรณ์ Transfer Fcn กำหนดเป็นอันดับหนึ่ง ใช้ค่าเวลาคงที่เท่ากับ 630, อุปกรณ์ Constant กำหนดตามอุณหภูมิห้องค่าเป็น 27 ต่ออุปกรณ์ในโปรแกรม simulink ดังภาพที่ 4.8 ทดลองโดยการกำหนดค่าอุปกรณ์ Step เป็น 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65 และ 70 ตามลำดับแล้วนำเอาต์พุตมาเปรียบเทียบกับระบบจริง



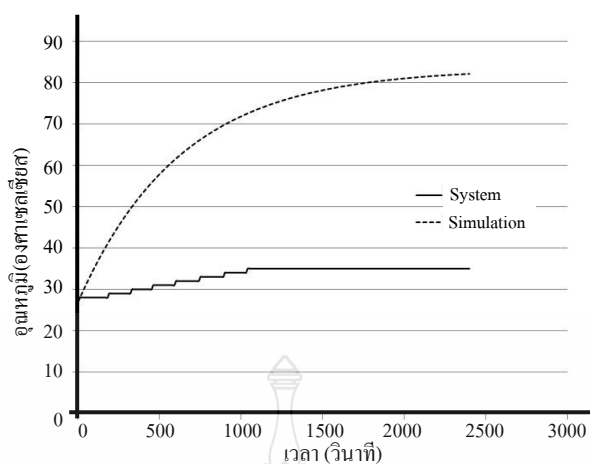
ภาพที่ 4.10 แผนภาพแบบจำลองระบบให้ความร้อน

$$Temperature_{(s)} = \frac{Power}{S} * k * \frac{1}{(630S + 1)} + \frac{ambient\_temperature}{S} \tag{4.2}$$

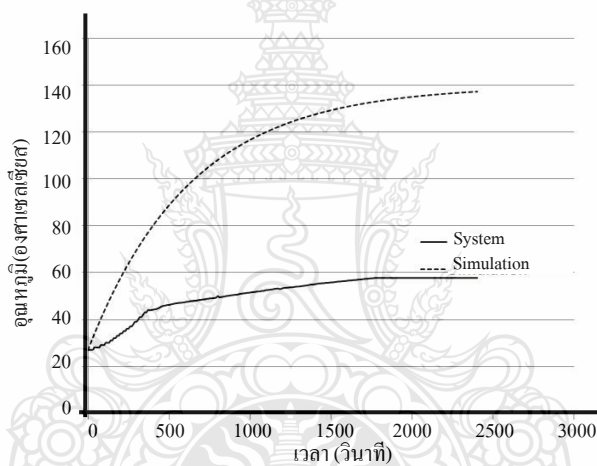
$$Temperature_{(t)} = Power * k \left( 1 - e^{-\frac{t}{630}} \right) + ambient\_temperature \tag{4.3}$$

#### 4.5 ผลเอาต์พุตแบบจำลองที่ใช้ค่าเฉลี่ยอัตราขยายกับระบบจริง

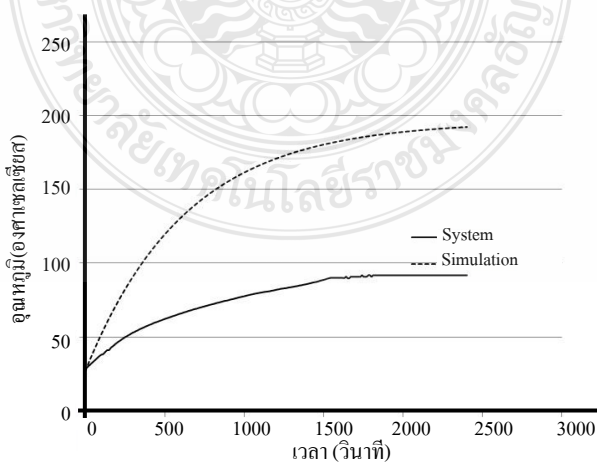
ทำการเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลของระบบจริงที่ระดับอินพุตต่างๆ



ภาพที่ 4.11 กราฟเปรียบเทียบแบบจำลองที่ใช้ค่าเฉลี่ยกับระบบจริงที่ระดับอินพุต 5%

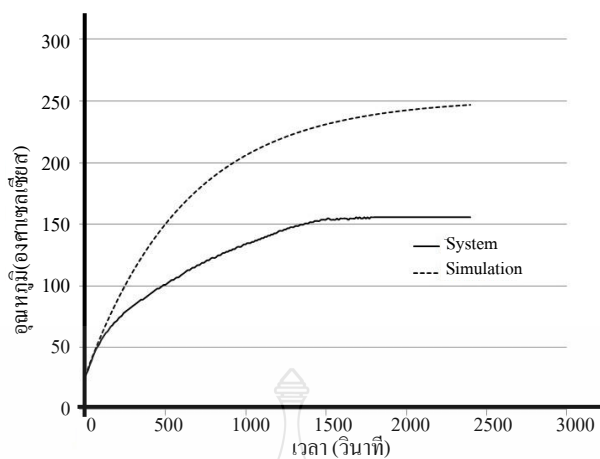


ภาพที่ 4.12 กราฟเปรียบเทียบแบบจำลองที่ใช้ค่าเฉลี่ยกับระบบจริงที่ระดับอินพุต 10%

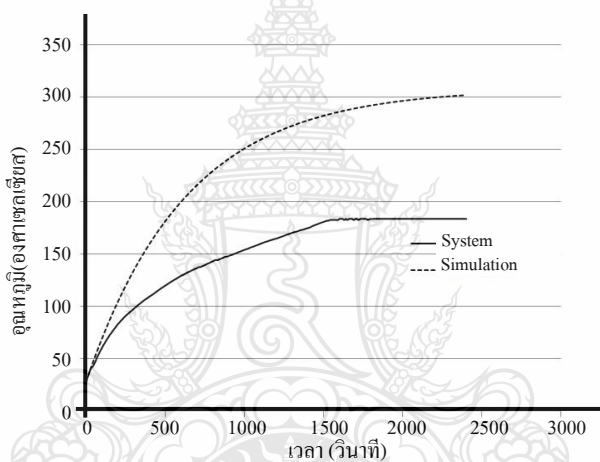


ภาพที่ 4.13 กราฟเปรียบเทียบแบบจำลองที่ใช้ค่าเฉลี่ยกับระบบจริงที่ระดับอินพุต 15%

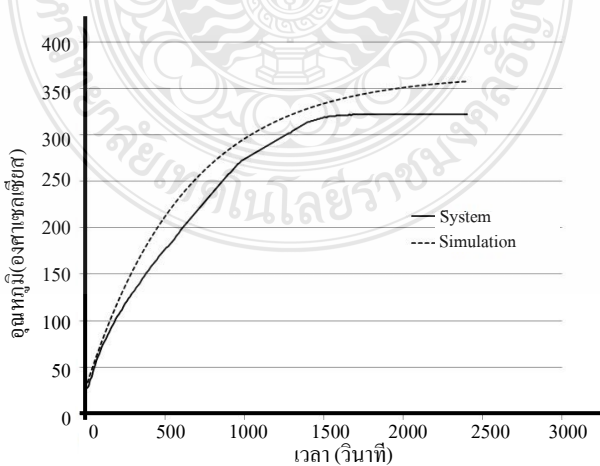




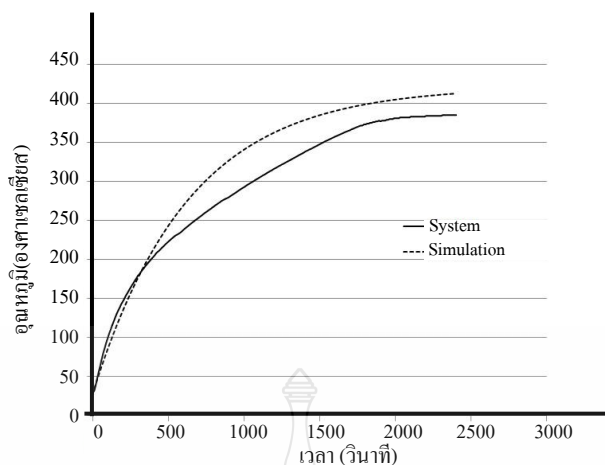
ภาพที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบแบบจำลองที่ใช้ค่าเฉลี่ยกับระบบจริงที่ระดับอินพุต 20%



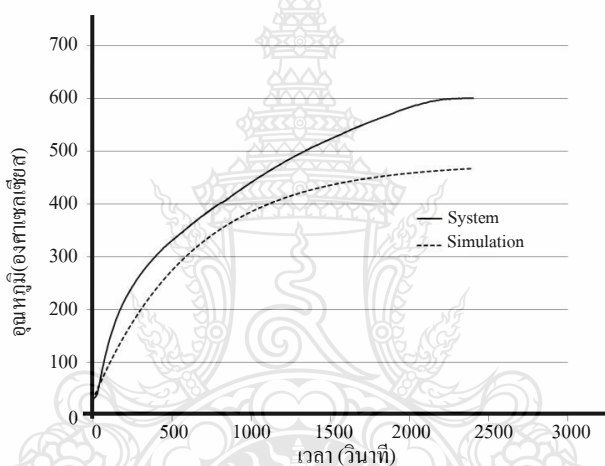
ภาพที่ 4.15 กราฟเปรียบเทียบแบบจำลองที่ใช้ค่าเฉลี่ยกับระบบจริงที่ระดับอินพุต 25%



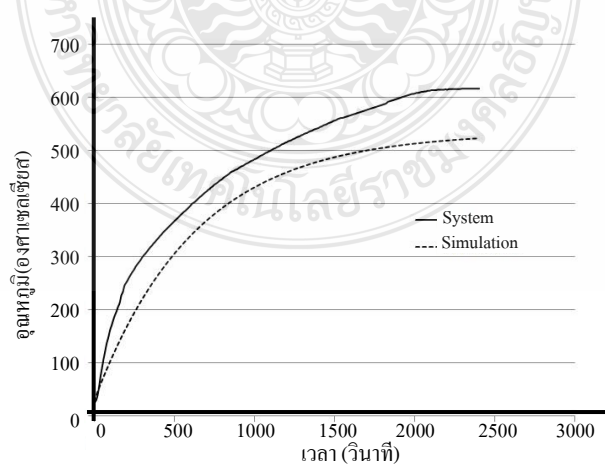
ภาพที่ 4.16 กราฟเปรียบเทียบแบบจำลองที่ใช้ค่าเฉลี่ยกับระบบจริงที่ระดับอินพุต 30%



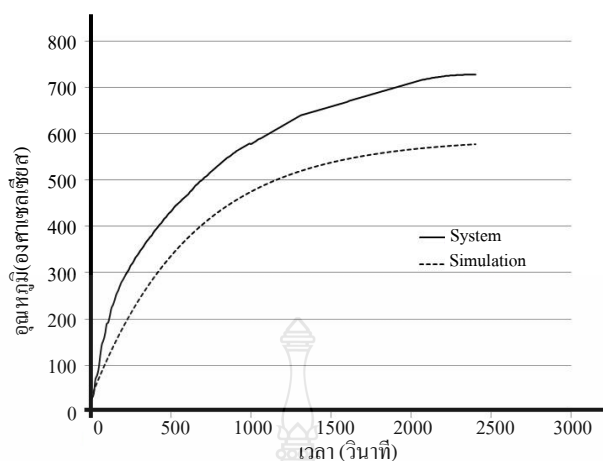
ภาพที่ 4.17 กราฟเปรียบเทียบแบบจำลองที่ใช้ค่าเฉลี่ยกับระบบจริงที่ระดับอินพุต 35%



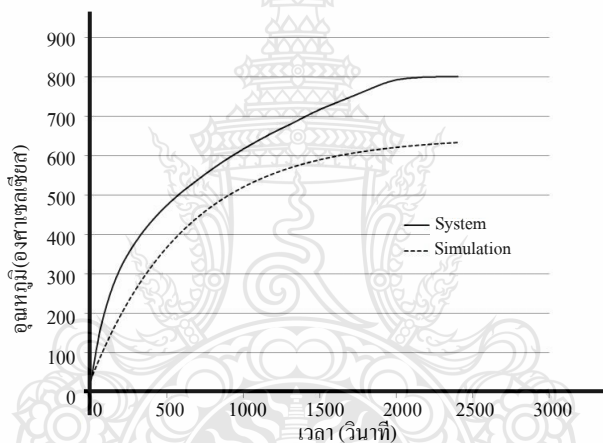
ภาพที่ 4.18 กราฟเปรียบเทียบแบบจำลองที่ใช้ค่าเฉลี่ยกับระบบจริงที่ระดับอินพุต 40%



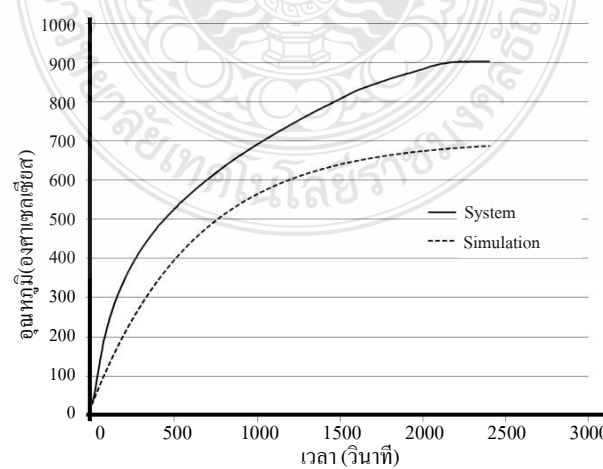
ภาพที่ 4.19 กราฟเปรียบเทียบแบบจำลองที่ใช้ค่าเฉลี่ยกับระบบจริงที่ระดับอินพุต 45%



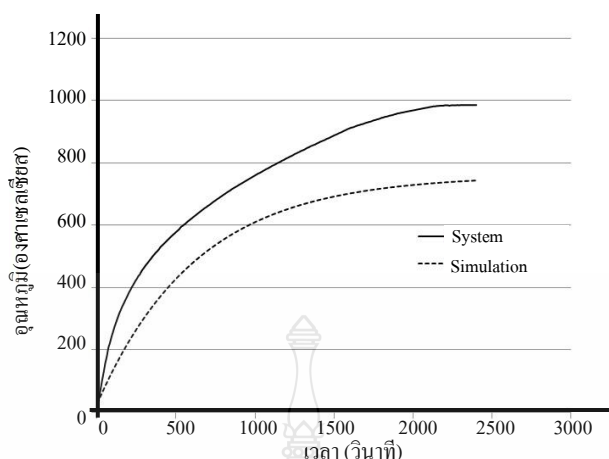
ภาพที่ 4.20 กราฟเปรียบเทียบแบบจำลองที่ใช้ค่าเฉลี่ยกับระบบจริงที่ระดับอินพุต 50%



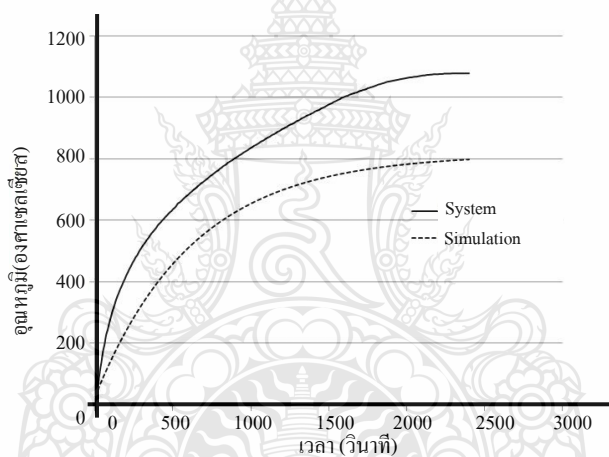
ภาพที่ 4.21 กราฟเปรียบเทียบแบบจำลองที่ใช้ค่าเฉลี่ยกับระบบจริงที่ระดับอินพุต 55%



ภาพที่ 4.22 กราฟเปรียบเทียบแบบจำลองที่ใช้ค่าเฉลี่ยกับระบบจริงที่ระดับอินพุต 60%



ภาพที่ 4.23 กราฟเปรียบเทียบแบบจำลองที่ใช้ค่าเฉลี่ยกับระบบจริงที่ระดับอินพุต 65%



ภาพที่ 4.24 กราฟเปรียบเทียบแบบจำลองที่ใช้ค่าเฉลี่ยกับระบบจริงที่ระดับอินพุต 70%

จากภาพที่ 4.11 ถึง ภาพที่ 4.15 เป็นอุณหภูมิเอาต์พุตที่เกิดจากระดับอินพุต 5, 10, 15, 20 และ 25 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ พบว่าเมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิเอาต์พุตระหว่างแบบจำลองกับระบบจริง เกิดค่าผิดพลาดสูง อุณหภูมิจากแบบจำลองมีค่าสูงกว่าระบบจริงค่อนข้างมาก ภาพที่ 4.16 และ 4.17 เป็นอุณหภูมิเอาต์พุตที่เกิดจากระดับอินพุต 30 และ 35 เปอร์เซ็นต์ให้ผลของอุณหภูมิจากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงระบบจริง และภาพที่ 4.18 ถึง ภาพที่ 4.24 เป็นอุณหภูมิเอาต์พุตที่เกิดจากระดับอินพุต 40, 45, 50, 55, 60, 65 และ 70 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิจากแบบจำลองมีค่าน้อยกว่าระบบจริงค่าผิดพลาดเฉลี่ยของแต่ละระดับอินพุตแสดงดังตารางที่ 4.4 และตารางที่ 4.5

**ตารางที่ 4.4** ค่าผิดพลาดเฉลี่ยของอนุกรมมิเออร์ตู้ตจากการใช้ค่าอัตราขยายเฉลี่ยที่อินพุต 5, 10, 15, 20, 25, 30 และ 35 เปอร์เซ็นต์

ระดับอินพุต (เปอร์เซ็นต์)	5	10	15	20	25	30	35
ค่าผิดพลาดเฉลี่ย	105	114	95	48	54	11	10

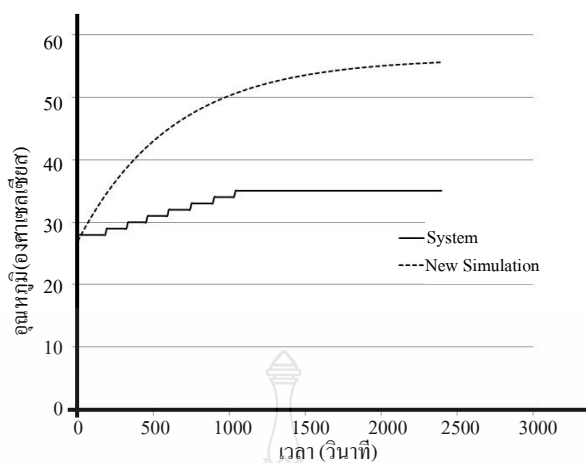
**ตารางที่ 4.5** ค่าผิดพลาดเฉลี่ยของอนุกรมมิเออร์ตู้ตจากการใช้ค่าอัตราขยายเฉลี่ยที่อินพุต 40, 45, 50, 55, 60, 65 และ 70 เปอร์เซ็นต์

ระดับอินพุต (เปอร์เซ็นต์)	40	45	50	55	60	65	70
ค่าผิดพลาดเฉลี่ย	18	16	21	22	24	26	27

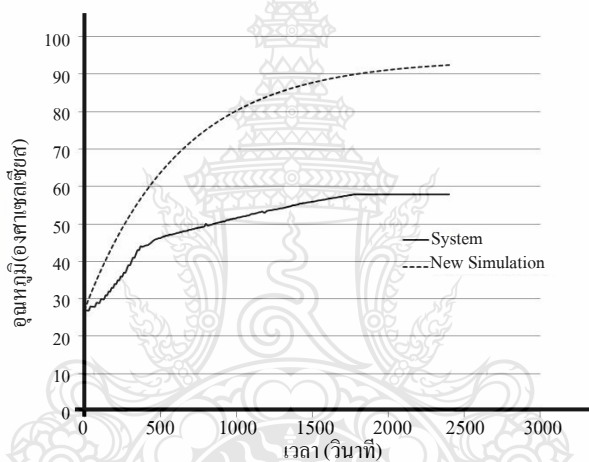
#### 4.6 ผลเออร์ตู้ตแบบจำลองที่ใช้ค่าอัตราขยายใหม่กับระบบจริง

ใช้การจัดการข้อมูลด้วยระเบียบวิธีถดถอยแบบเชิงเส้นในส่วนของค่าอัตราขยาย นำข้อมูลเออร์ตู้ตทุกระดับอินพุตคำนวณหาค่าอัตราขยายใหม่ได้ว่า  $Y=0.17X+4.99$  โดย  $Y$  คือค่าอัตราขยายใหม่และ  $X$  คือค่าระดับอินพุต ใช้ค่านี้แทนลงในอัตราขยายของแบบจำลอง ทดลองประมวลผลและทำการเปรียบเทียบเออร์ตู้ตอีกครั้ง แสดงดังภาพที่ 4.25 ถึงภาพที่ 4.38

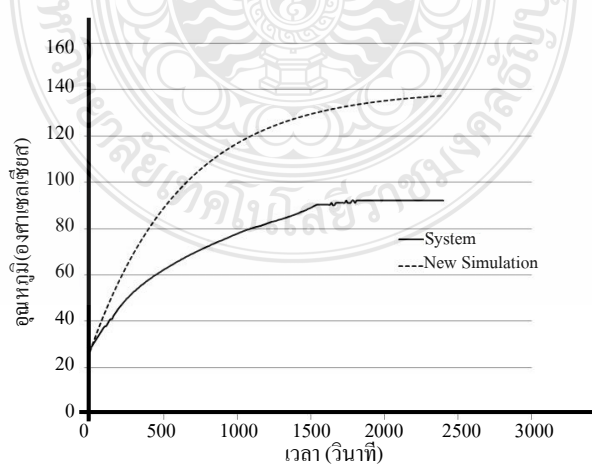
จากภาพที่ 4.25 ถึง ภาพที่ 4.29 เป็นอนุกรมมิเออร์ตู้ตที่เกิดจากระดับอินพุต 5, 10, 15, 20 และ 25 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ พบว่าเมื่อเปรียบเทียบอนุกรมมิเออร์ตู้ตระหว่างแบบจำลองกับระบบจริง ยังคงเกิดค่าผิดพลาดค่อนข้างสูง แต่ค่าผิดพลาดที่เกิดจากการใช้ค่าอัตราขยายใหม่ลดน้อยลงกว่าอัตราขยายที่ใช้ค่าเฉลี่ยประมาณครึ่งหนึ่ง ภาพที่ 4.30 ถึงภาพที่ 4.38 เป็นอนุกรมมิเออร์ตู้ตที่เกิดจากระดับอินพุต 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ผลของอนุกรมมิเออร์ตู้ตจากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงระบบจริงค่าผิดพลาดเฉลี่ยประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยค่าผิดพลาดเฉลี่ยของแต่ละระดับอินพุตแสดงดังตารางที่ 4.6 และตารางที่ 4.7



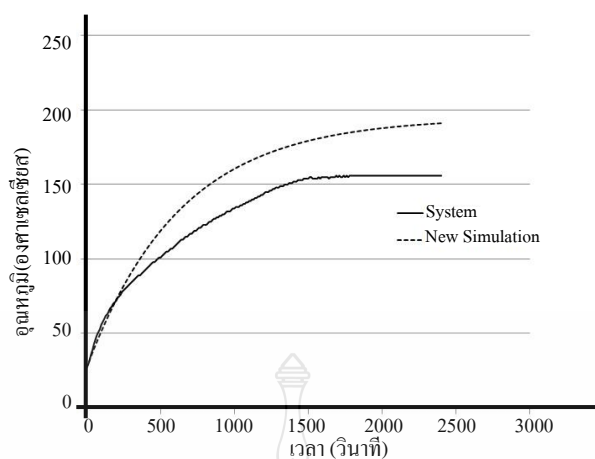
ภาพที่ 4.25 กราฟเปรียบเทียบแบบจำลองอัตราขยายใหม่กับระบบจริงที่ระดับอินพุต 5%



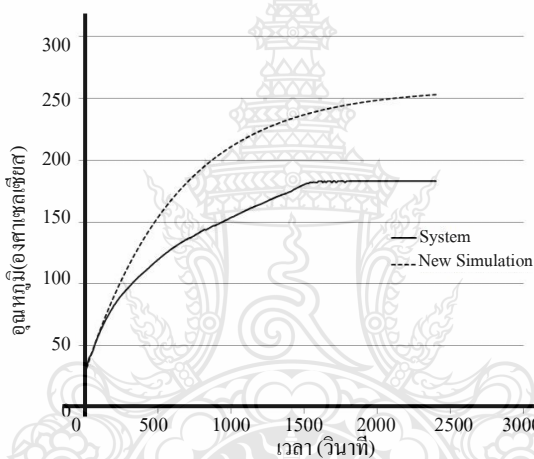
ภาพที่ 4.26 กราฟเปรียบเทียบแบบจำลองอัตราขยายใหม่กับระบบจริงที่ระดับอินพุต 10%



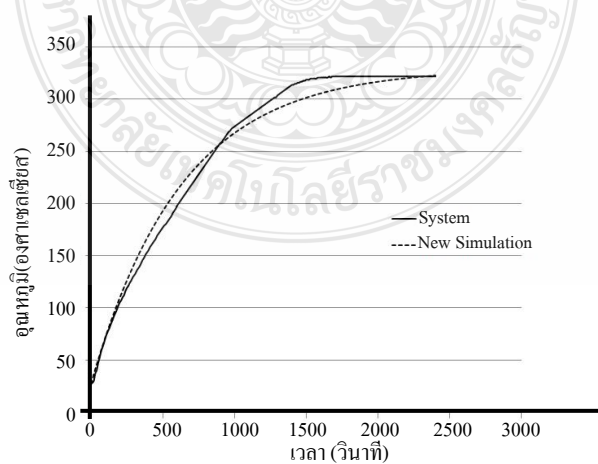
ภาพที่ 4.27 กราฟเปรียบเทียบแบบจำลองอัตราขยายใหม่กับระบบจริงที่ระดับอินพุต 15%



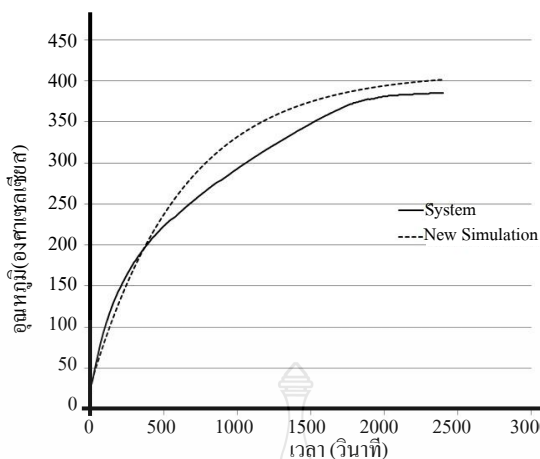
ภาพที่ 4.28 กราฟเปรียบเทียบแบบจำลองอัตราขยายใหม่กับระบบจริงที่ระดับอินพุต 20%



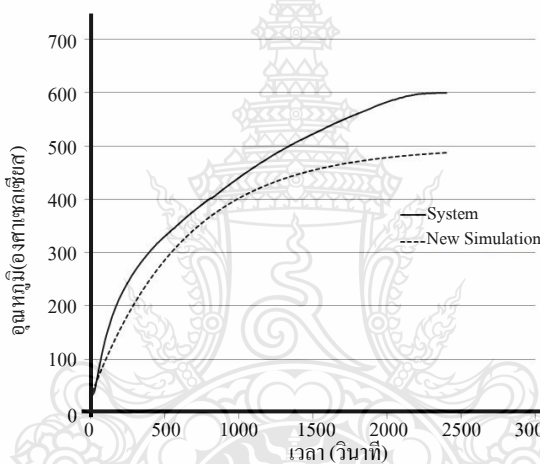
ภาพที่ 4.29 กราฟเปรียบเทียบแบบจำลองอัตราขยายใหม่กับระบบจริงที่ระดับอินพุต 25%



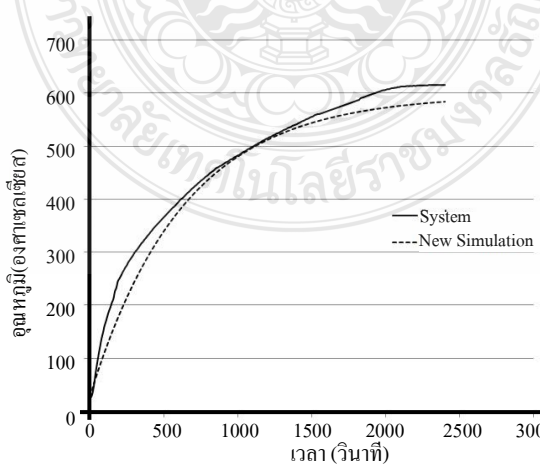
ภาพที่ 4.30 กราฟเปรียบเทียบแบบจำลองอัตราขยายใหม่กับระบบจริงที่ระดับอินพุต 30%



ภาพที่ 4.31 กราฟเปรียบเทียบแบบจำลองอัตราขยายใหม่กับระบบจริงที่ระดับอินพุต 35%

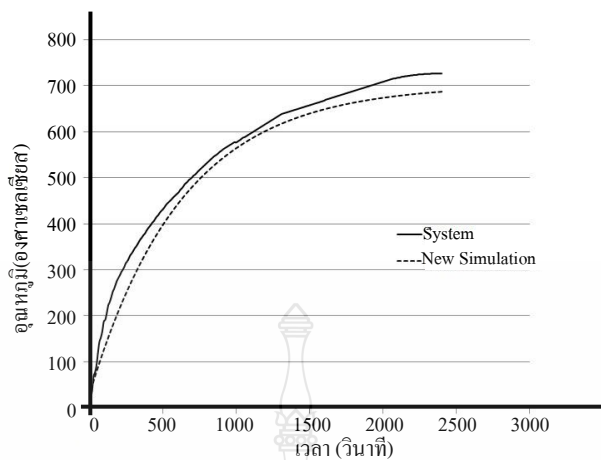


ภาพที่ 4.32 กราฟเปรียบเทียบแบบจำลองอัตราขยายใหม่กับระบบจริงที่ระดับอินพุต 40%

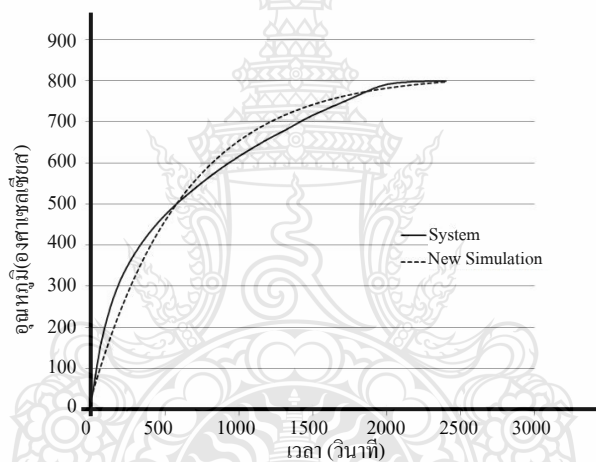


ภาพที่ 4.33 กราฟเปรียบเทียบแบบจำลองอัตราขยายใหม่กับระบบจริงที่ระดับอินพุต 45%

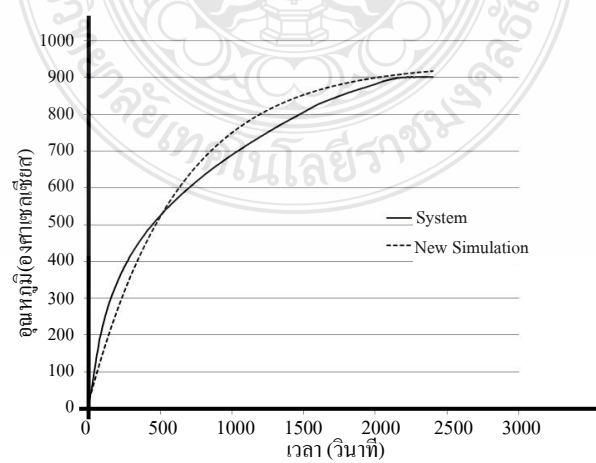




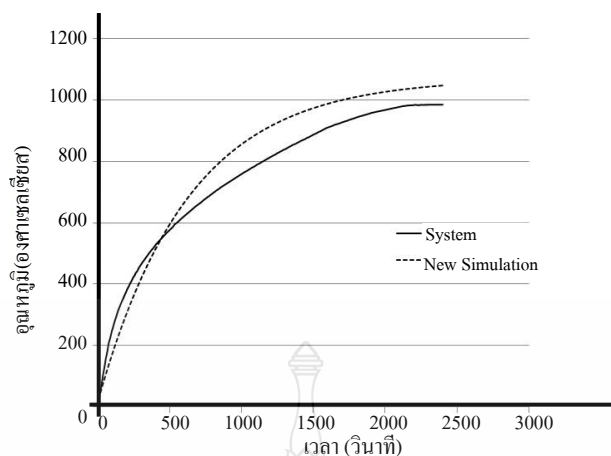
ภาพที่ 4.34 กราฟเปรียบเทียบแบบจำลองอัตราขยายใหม่ระบบจริงที่ระดับอินพุต 50%



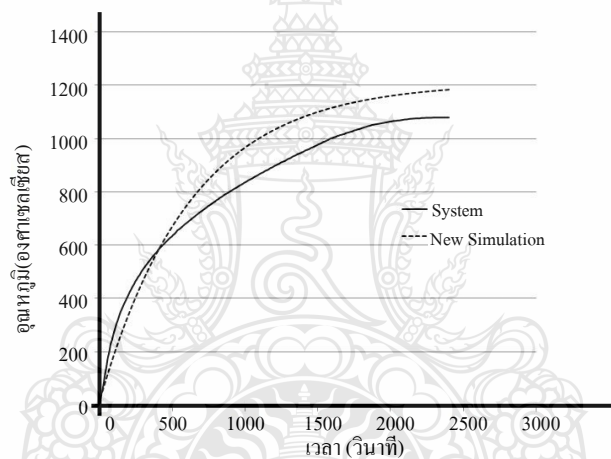
ภาพที่ 4.35 กราฟเปรียบเทียบแบบจำลองอัตราขยายใหม่กับระบบจริงที่ระดับอินพุต 55%



ภาพที่ 4.36 กราฟเปรียบเทียบแบบจำลองอัตราขยายใหม่กับระบบจริงที่ระดับอินพุต 60%



ภาพที่ 4.37 กราฟเปรียบเทียบแบบจำลองอัตราขยายใหม่กับระบบจริงที่ระดับอินพุต 65%



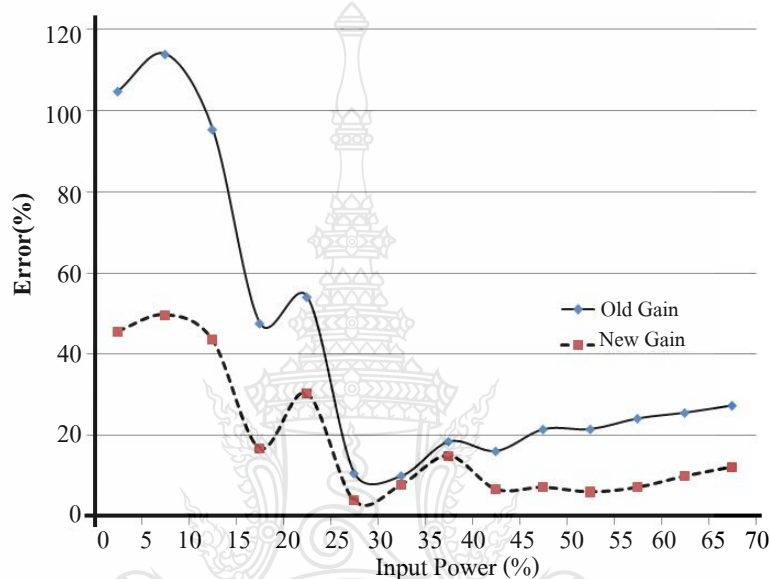
ภาพที่ 4.38 กราฟเปรียบเทียบแบบจำลองอัตราขยายใหม่กับระบบจริงที่ระดับอินพุต 70%

ตารางที่ 4.6 ค่าผิดพลาดเฉลี่ยของอุณหภูมิแฮตฟูดจากการใช้ค่าอัตราขยายใหม่ที่อินพุต 5, 10, 15, 20, 25, 30 และ 35 เปอร์เซ็นต์

ระดับอินพุต (เปอร์เซ็นต์)	5	10	15	20	25	30	35
ค่าผิดพลาดเฉลี่ย	46	50	44	17	30	4	8

ตารางที่ 4.7 ค่าผิดพลาดเฉลี่ยของอุณหภูมิเอาต์พุตจากการใช้ค่าอัตราขยายใหม่ที่อินพุต 40, 45, 50, 55, 60, 65 และ 70 เปอร์เซ็นต์

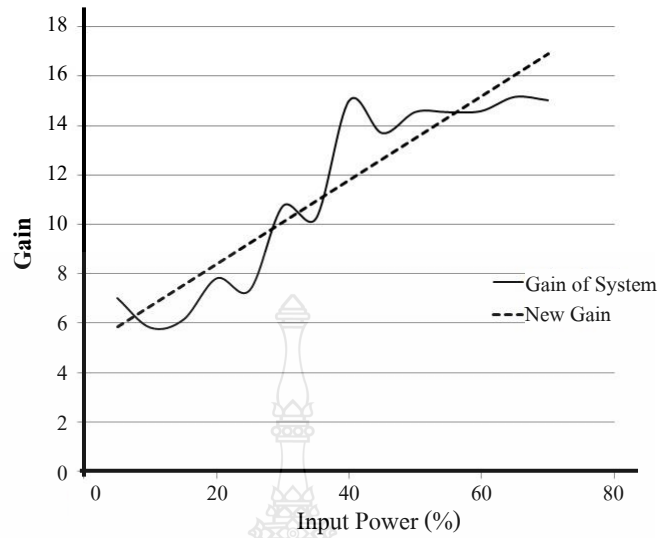
ระดับอินพุต (เปอร์เซ็นต์)	40	45	50	55	60	65	70
ค่าผิดพลาดเฉลี่ย	15	7	7	6	7	10	12



ภาพที่ 4.39 กราฟค่าผิดพลาดเปรียบเทียบระหว่างอัตราขยายเก่ากับใหม่

ภาพที่ 4.39 แสดงให้เห็นว่าการใช้ค่าอัตราขยายจากการใช้วิธีลดรอยแบบเชิงเส้น (New Gain) ให้ค่าผิดพลาดลดลงกว่าการใช้อัตราขยายจากค่าเฉลี่ย (Old Gain) นำค่าเฉลี่ยที่ระดับอินพุตต่างๆมาหาค่าเฉลี่ยของระบบ ส่งผลให้ระบบที่ใช้ค่าอัตราขยายเฉลี่ยมีค่าอุณหภูมิเอาต์พุตใกล้เคียงระบบจริงที่ 58 เปอร์เซ็นต์และระบบที่ใช้ค่าอัตราขยายใหม่โดยวิธีลดรอยแบบเชิงเส้นให้ค่าอุณหภูมิเอาต์พุตใกล้เคียงระบบจริงที่ 81 เปอร์เซ็นต์

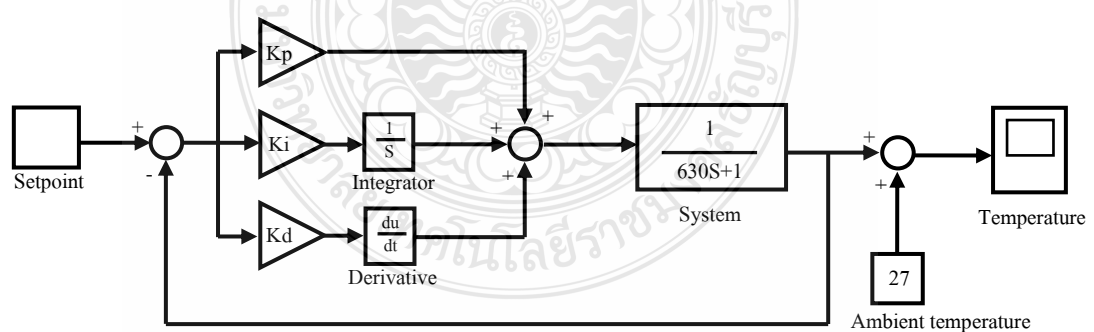
นำค่าอัตราขยายใหม่มาแสดงเป็นกราฟเปรียบเทียบกับอัตราขยายระบบจริงดังภาพที่ 4.40 จะยังเห็นได้ชัดว่าค่าอัตราขยายใหม่นี้ให้ค่าใกล้เคียงกับอัตราขยายระบบจริงในทุกะดับอินพุต



ภาพที่ 4.40 กราฟฟังก์ชันอัตราขยายใหม่ (New Gain) กับอัตราขยายจริง (Gain of System)

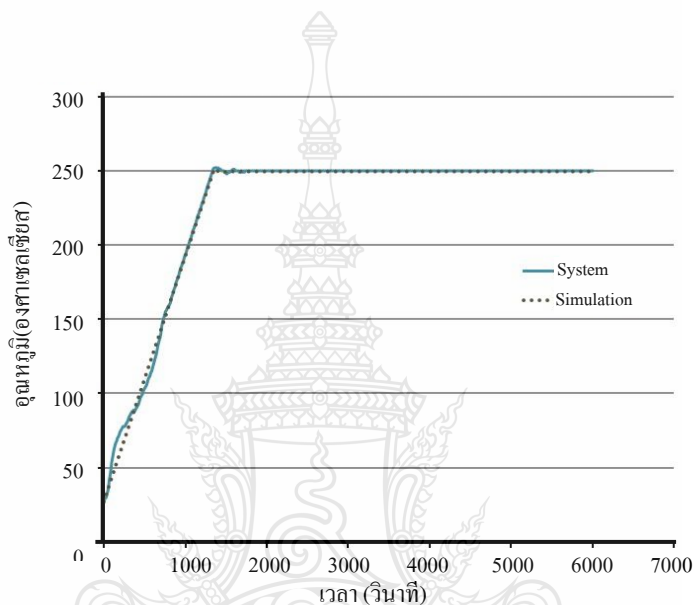
#### 4.7 ผลการทดลองแบบจำลองที่ถูกควบคุมด้วยพีไอดีกับระบบจริง

ใส่อุปกรณ์ควบคุมแบบพีไอดีในแบบจำลองดังภาพที่ 4.41 แสดงสมการคณิตศาสตร์ทาง S-domain ดังสมการที่ 4.4 โดยเลือกใช้ค่าพี ไอและดี จากระบบควบคุมจริง กำหนดรูปแบบอนุภูมิแบบเดียวกับการใช้งานจริง โดยใช้ค่าอนุภูมิสูงที่ 600 องศาเซลเซียสและอนุภูมิต่ำที่ 250 องศาเซลเซียส การได้ระดับอนุภูมิที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ได้ผลลัพธ์ดังภาพที่ 4.41 ถึงภาพที่ 4.44

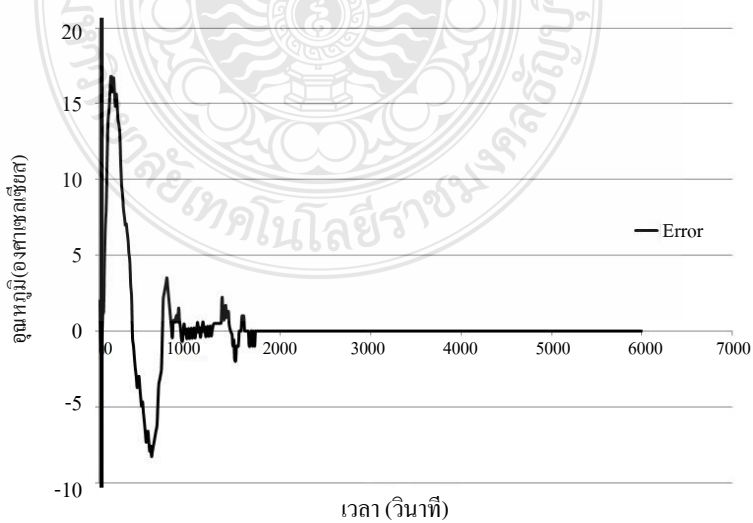


ภาพที่ 4.41 แผนภาพแบบจำลองระบบควบคุมแบบพีไอดี

$$\text{Temperature}_{(S)} = \text{Setpoint}_{(S)} \frac{\left( K_p + \frac{K_i}{S} + K_d S \right)}{1 + \frac{\left( K_p + \frac{K_i}{S} + K_d S \right)}{(630S + 1)}} + \frac{\text{ambient\_temperature}}{S} \quad (4.4)$$

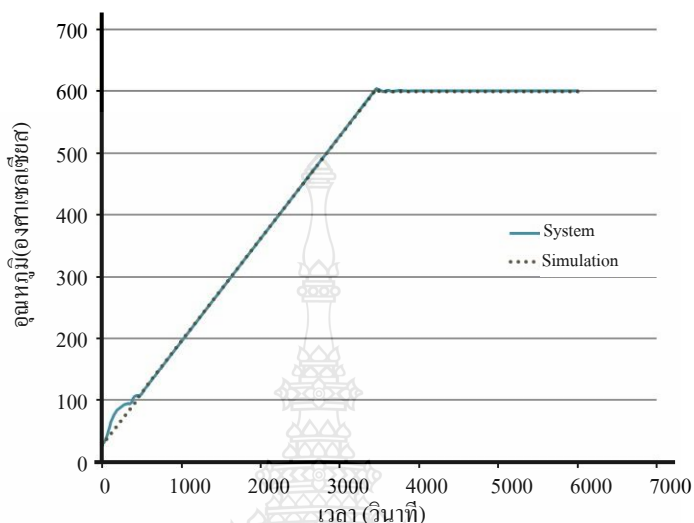


ภาพที่ 4.42 กราฟเปรียบเทียบแบบจำลองกับระบบจริงที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

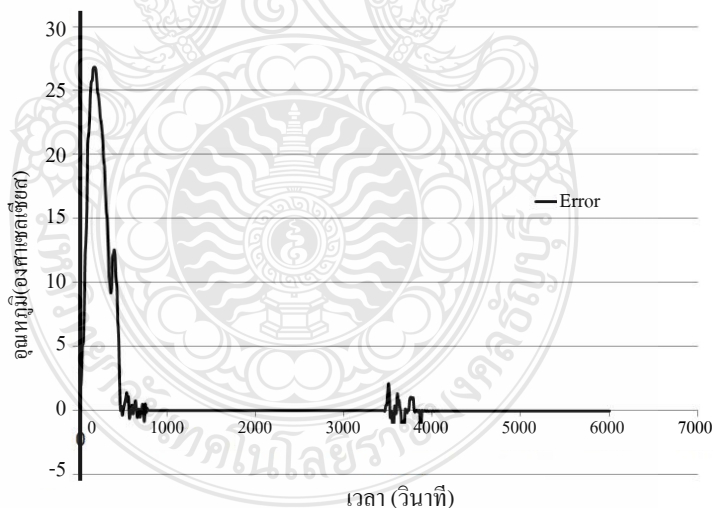


ภาพที่ 4.43 กราฟค่าผิดพลาดที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 4.41 เป็นการผลเปรียบเทียบแบบจำลองกับระบบจริงที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส พิจารณาเทียบกับภาพที่ 4.42 จะเห็นได้ว่าในช่วงแรกจะเกิดค่าผิดพลาดมาก ต้องใช้เวลาระยะหนึ่งเพื่อให้ระบบใกล้เคียงกัน



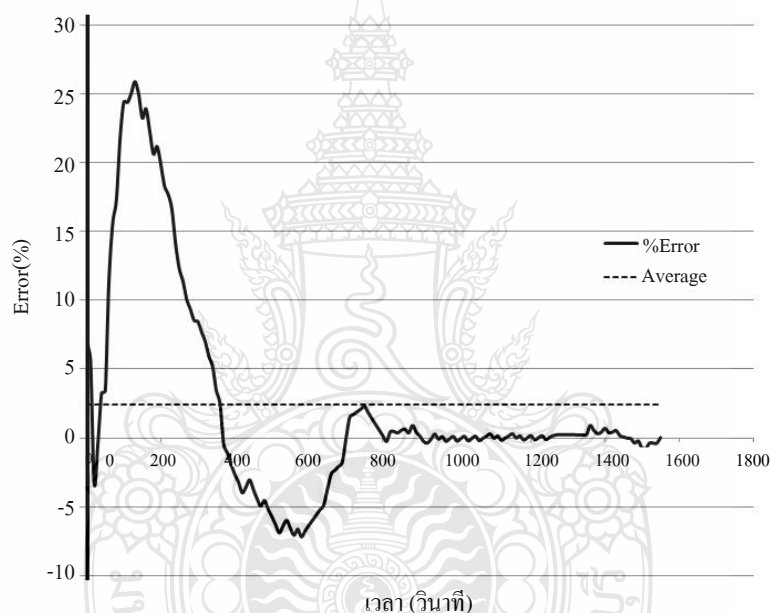
ภาพที่ 4.44 กราฟเปรียบเทียบแบบจำลองกับระบบจริงที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส



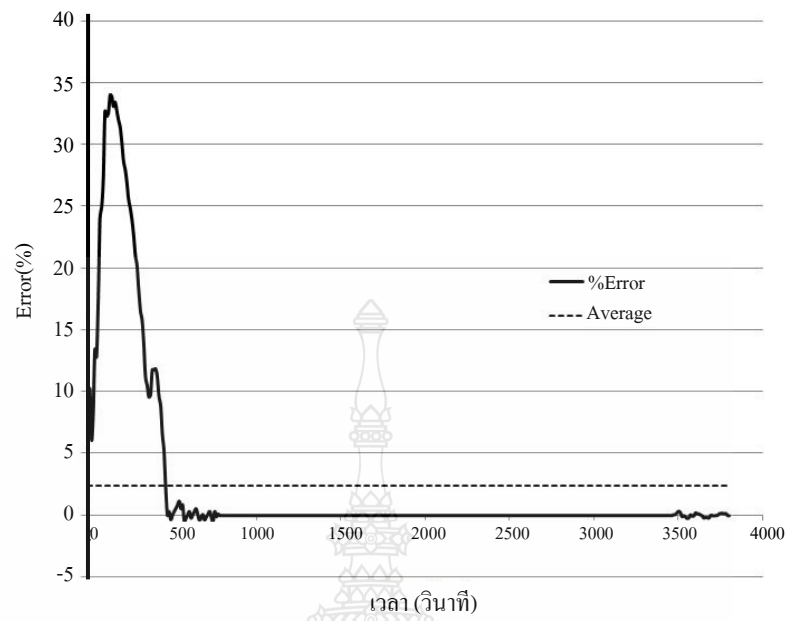
ภาพที่ 4.45 กราฟค่าผิดพลาดที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 4.43 เป็นการผลเปรียบเทียบแบบจำลองกับระบบจริงที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส พิจารณาเทียบกับภาพที่ 4.44 ผลลัพธ์เป็นไปในทิศทางเดียวกับที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ระบบจะเกิดค่าผิดพลาดมากในช่วงเริ่มต้นและช่วงเกิด over shoot

คำนวณเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดจากเริ่มต้นจนถึงค่าเวลาคงตัว (Steady state) ทั้ง 2 อุณหภูมิ จะได้ว่าที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ระบบจะเข้าสู่สภาวะคงตัวเมื่อใช้เวลาประมาณ 1,550 วินาที มีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดที่ 2.4 เปอร์เซ็นต์ ค่าผิดพลาดสูงสุดโดยระบบจริงมีค่ามากกว่าแบบจำลองอยู่ที่ 25.87 เปอร์เซ็นต์และค่าผิดพลาดสูงสุดโดยระบบจริงมีค่าน้อยกว่าแบบจำลองอยู่ที่ 7.21 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังภาพที่ 4.45 และที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ระบบจะเข้าสู่สภาวะคงตัวเมื่อใช้เวลา ประมาณ 3,800 วินาที มีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดที่ 2.4 เปอร์เซ็นต์ ค่าผิดพลาดสูงสุดโดยระบบจริงมีค่า มากกว่าแบบจำลองอยู่ที่ 33.99 เปอร์เซ็นต์ และค่าผิดพลาดสูงสุดโดยระบบจริงมีค่าน้อยกว่า แบบจำลองอยู่ที่ 0.55 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังภาพที่ 4.46



ภาพที่ 4.46 กราฟเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.47 กราฟเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส





## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและออกแบบสร้างเตาปลูกผลึก มีการจำลองการทำงานในส่วนของระบบให้ความร้อนโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จากการทดสอบระบบด้วยสัญญาณฟังก์ชันหนึ่งหน่วย พบว่าระบบให้ความร้อนเป็นระบบอันดับหนึ่ง มีค่าเวลาคงที่เฉลี่ย 630 วินาทีได้ทำการจำลองระบบในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในขั้นต้นใช้ค่าอัตราขยายเฉลี่ยมีค่า 11.25 องศาเซลเซียสต่อเปอร์เซ็นต์กำลังไฟฟ้า ผลการจำลองระบบให้เอาต์พุตใกล้เคียงระบบจริงเฉลี่ยที่ 58 เปอร์เซ็นต์ ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาปรับปรุงโดยการปรับปรุงค่าอัตราขยายใหม่โดยใช้การจัดการถดถอยแบบเชิงเส้นส่งผลให้แบบจำลองมีค่าใกล้เคียงระบบจริง 81 เปอร์เซ็นต์ เมื่อจำลองการทำงานโดยการควบคุมแบบพีไอดีพบว่าแบบจำลองมีค่าผิดพลาดเฉลี่ย 2.4 เปอร์เซ็นต์

#### 5.1 เตาปลูกผลึกต้นแบบและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบให้ความร้อน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ คือแบบจำลองของระบบจริง สามารถจำลองการทำงานของระบบจริงได้โดยการประมวลผลจากกระบวนการและสมการทางคณิตศาสตร์ ทำให้ทราบหรือทำนายผลลัพธ์เอาต์พุตของระบบจริงได้ ซึ่งจะช่วยในเรื่องของระยะเวลาการพัฒนาที่เร็วขึ้นและยังช่วยลดค่าใช้จ่ายให้น้อยลง

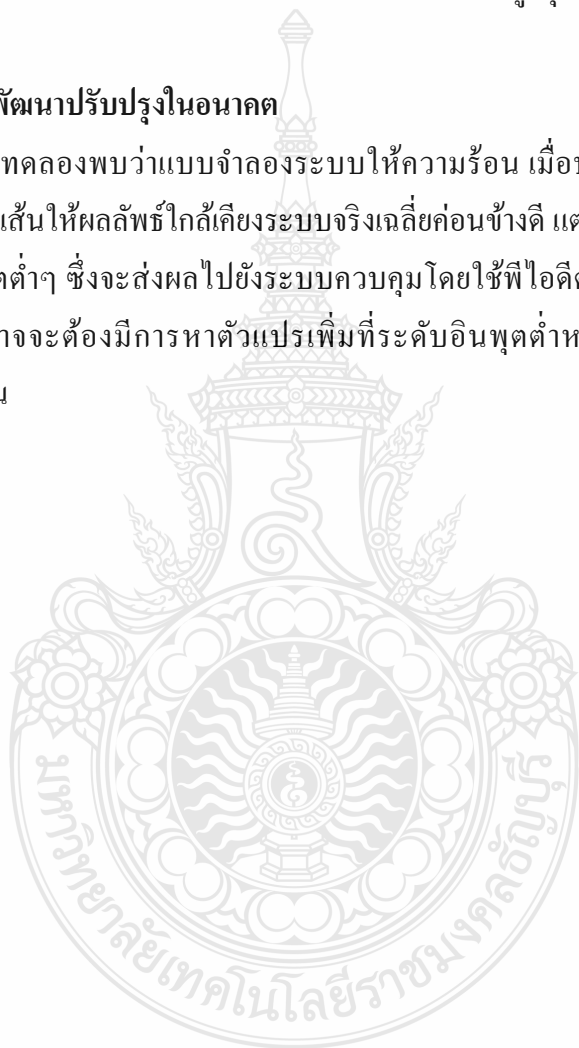
เตาเผาปลูกผลึกต้นแบบที่สร้างขึ้นสามารถทำความเร็วได้ที่ 1 ถึง 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง โดยที่ความเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงมีความผิดพลาดจากการเคลื่อนที่ไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์ สามารถสร้างอุณหภูมิไต่ระดับได้ประมาณ 10 องศาเซลเซียสต่อเซนติเมตร และที่ความเร็วที่ 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงมีความเป็นเชิงเส้นดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วที่ 1 และ 5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงโดยมีค่าผิดพลาดมาตรฐานอยู่ที่ 5.24 อุณหภูมิเอาต์พุตของระบบให้ความร้อนที่ถูกทดสอบระบบด้วยสัญญาณฟังก์ชันหนึ่งหน่วย ที่ระดับสัญญาณ 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65 และที่ 70 เปอร์เซ็นต์ พบว่าเป็นระบบอันดับหนึ่ง หากค่าพารามิเตอร์ของระบบและจำลองระบบโดยใช้ค่าเฉลี่ยของค่าเวลาคงที่ 630 และอัตราขยายที่ 11.25 องศาเซลเซียสต่อเปอร์เซ็นต์กำลังไฟฟ้า เปรียบเทียบอุณหภูมิเอาต์พุตของระบบจริงกับแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกัน 58 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการปรับปรุงระบบโดยใช้การจัดการถดถอยแบบเชิงเส้นสร้างฟังก์ชันอัตราขยายใหม่เป็น  $Gain = 0.17$

x Input Power + 4.99 พบว่าแบบจำลองที่ใช้อัตราขยายใหม่นี้ช่วยให้แบบจำลองมีค่าใกล้เคียงระบบจริง 81 เปอร์เซ็นต์

เมื่อใช้การควบคุมแบบพีไอดีทำการควบคุมอุณหภูมิ พบว่าที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ระบบจะเข้าสู่สภาวะคงตัวใช้เวลา 1,550 วินาที มีค่าผิดพลาดเฉลี่ยที่ 2.4 เปอร์เซ็นต์และค่าผิดพลาดสูงสุดอยู่ที่ 25.87 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ระบบจะเข้าสู่สภาวะคงตัวใช้เวลา 3,800 วินาที โดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยที่ 2.4 เปอร์เซ็นต์และค่าผิดพลาดสูงสุดอยู่ที่ 33.99 เปอร์เซ็นต์

## 5.2 ข้อเสนอแนะการพัฒนาปรับปรุงในอนาคต

จากผลการทดลองพบว่าแบบจำลองระบบให้ความร้อน เมื่อปรับปรุรงค่าอัตราขยายด้วยวิธีการถอดอยแบบเชิงเส้นให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงระบบจริงเฉลี่ยค่อนข้างดี แต่จะเกิดค่าผิดพลาดค่อนข้างสูงที่ระดับกำลังอินพุตต่ำๆ ซึ่งจะส่งผลไปยังระบบควบคุมโดยใช้พีไอดีด้วย ที่สภาวะแรกจะเกิดค่าผิดพลาดสูง ดังนั้นอาจจะต้องมีการหาตัวแปรเพิ่มที่ระดับอินพุตต่ำหรือที่อุณหภูมิต่ำๆ เพื่อให้แบบจำลองสมบูรณ์ขึ้น



### รายการอ้างอิง

- [1] Chen H. and others, "Growth of lead molybdate crystals by vertical Bridgman method," **Indian Academy of Sciences**, Vol. 28, No. 6, 2005. pp. 555–560.
- [2] เกศภูมทานิชยม, **Thermocouple** (Online), Available: <http://student.nu.ac.th/electronic/00008.doc> , (8 June 2009).
- [3] Computer Engineering Department., **Introduction to control systems** (Online), 2004. Available: <http://fivedots.coe.psu.ac.th/Software.coe/240-209/vcrcontrol.pdf>, (10 January 2010).
- [4] Ogata, K., **Modern Control Engineering**. Fourth Edition. New Jersey: Prentice Hall, 2001.
- [5] Watechagit S., **Computer Simulation for Engineering Problems** (Online), 2011. Available: [http://www.sw-academy.net/files/EGME\\_309.pdf](http://www.sw-academy.net/files/EGME_309.pdf), (25 July 2011).
- [6] Liu J., Chen K. and Deng Y., "Simulation of the Atmosphere-temperature Decoupling System on Grey Predicting PID Control of the Gas-burning Roller Ceramic Kilns in SIMULINK," **The Ninth International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI)**, 16-19 August 2009, Chengdu China, 2009. pp. 742–746.
- [7] Laopaiboon and others, "Thermoelectric properties of Bi<sub>0.48</sub> Sb<sub>1.52</sub> Te<sub>3</sub> materials prepared by Bridgman method," **การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย, ครั้งที่ 3, 23-25 พฤษภาคม 2550, โรงแรมไบฮอกสกาย กรุงเทพฯ, 2550. pp. ENETT-2550-039 1/4 – 4/4.**
- [8] กวิน เชื้อมกลาง และ รศ. จินตนา เหล่าไพบุลย์, "การพัฒนาเครื่องยกเตาหลอมสำหรับการปลูกผลึกเดี่ยว," **สมาคมวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2008.** Available: <http://www.scisoc.or.th> (2 พฤษภาคม 2554).
- [9] Moudgalya K.M. and Arora I., "A virtual laboratory for distance education," **International Conference on Technology for Education (T4E)**, 1-3 July 2010, Mumbai, 2010. pp. 190-193
- [10] LeCroy J.E. and Popok D.P., "Design of a High Thermal Gradient Bridgman Furnace," **32<sup>nd</sup> Aerospace Sciences Meeting & Exhibit**, 10-13 January 1994, Washington D.C., 1994
- [11] Chen J. and others, "Crystal growth of PbFCl by modified Bridgman method," **Journal of Crystal Growth**, November 2002, Available: Science Direct (16 June 2010).

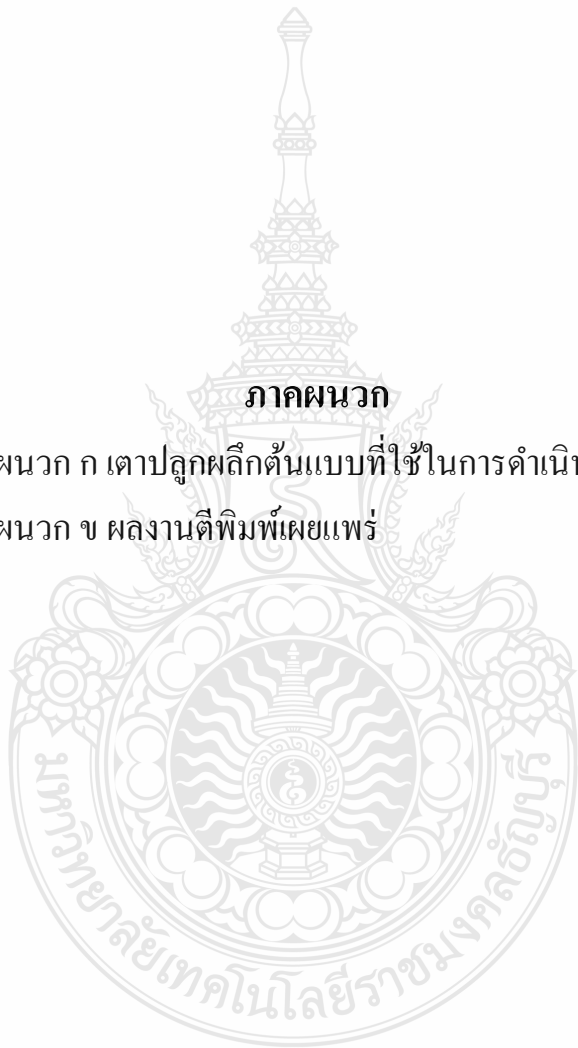
- [12] Emine Dogru Bolat, Kadir Erkan and Seda Postalçoglu, “Experimental Autotuning PID Control of Temperature Using Microcontroller,” **EUROCON 2005**, November 22-24 2005, Serbia & Montenegro Belgrade, 2005. pp. 266-269.



**ภาคผนวก**

ภาคผนวก ก เตาปลุกผลึกต้นแบบที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

ภาคผนวก ข ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



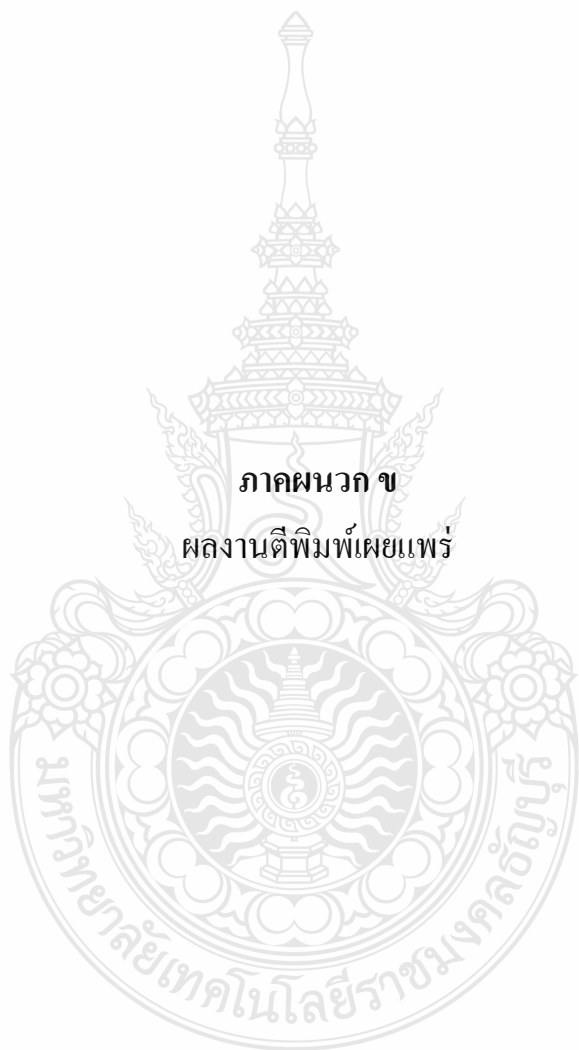
ภาคผนวก ก

เตาปลุกผลึกต้นแบบที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย





เตาปลูกผลึกต้นแบบที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย



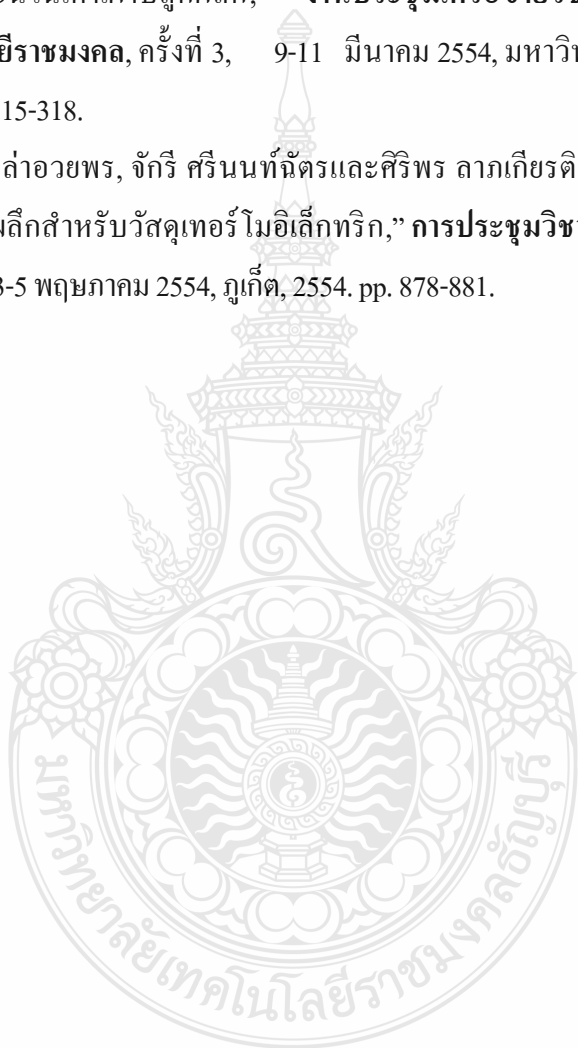
ภาคผนวก ข  
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



1. Pracha Lao-Auyporn, Jakree srinonchat, Siriporn Larпкиattaworn. “Development of Controllable Temperature Gradient Single Crystal Growth Furnace,” **The 3rd Technology and Innovation for Sustainable Development International Conference (TISD2010)**, ครั้งที่ 3, 4-6 March 2010, Nong khai, Thailand, 2010. pp. 225-228.

2. ประชา เหล่าอวยพร, จักรี ศรีนนท์ฉัตรและศิริพร ลากเกียรติถาวร. “การศึกษาฟังก์ชันถ่ายโอนระบบให้ความร้อนในเตาเผาปลูกผลึก,” งานประชุมเครือข่ายวิชาการด้านวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล, ครั้งที่ 3, 9-11 มีนาคม 2554, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ, 2554. pp. 315-318.

3. ประชา เหล่าอวยพร, จักรี ศรีนนท์ฉัตรและศิริพร ลากเกียรติถาวร. “การศึกษาระบบให้ความร้อนในเตาปลูกผลึกสำหรับวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก,” การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย, ครั้งที่ 7, 3-5 พฤษภาคม 2554, ภูเก็ต, 2554. pp. 878-881.

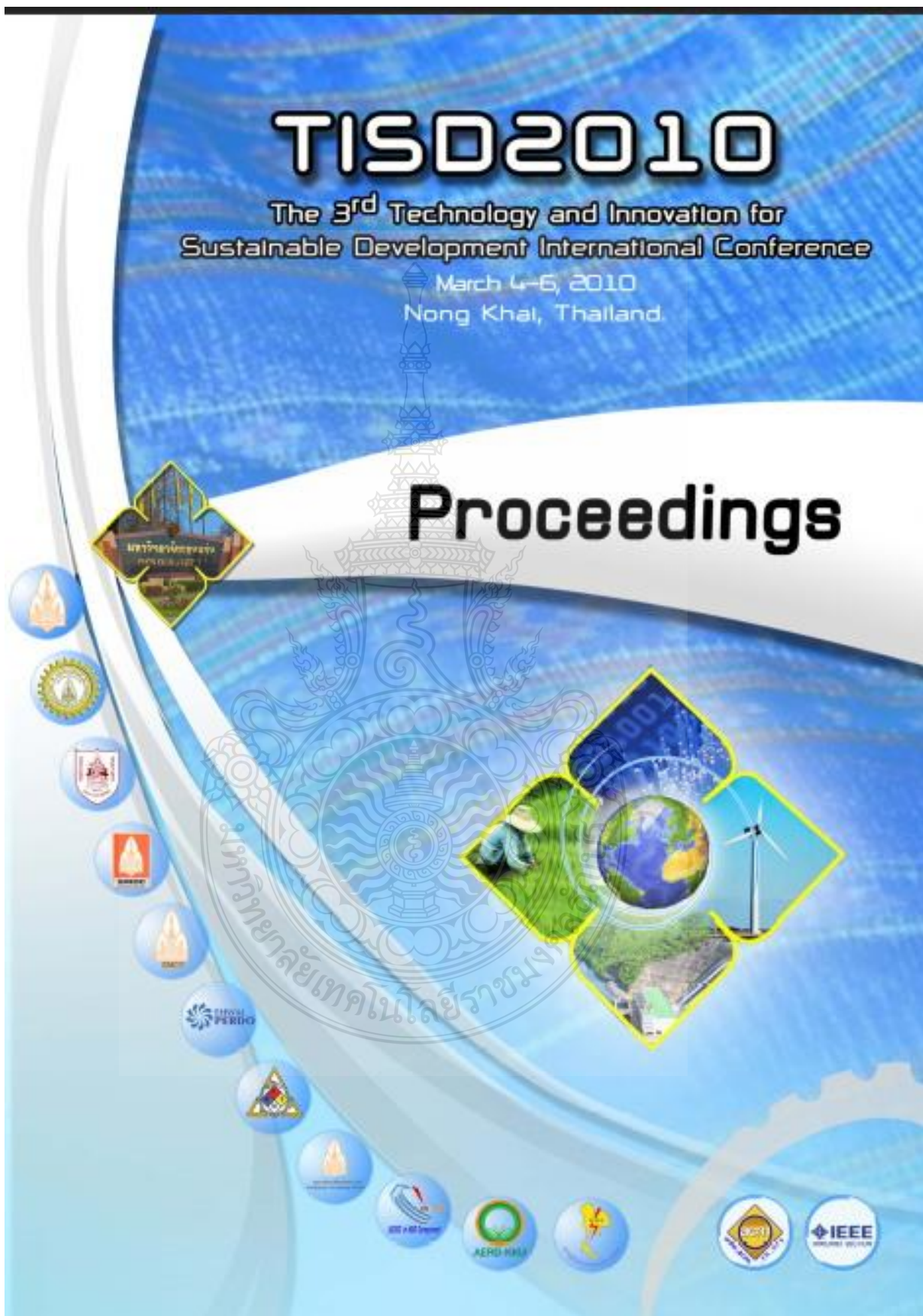


# TISD2010

The 3<sup>rd</sup> Technology and Innovation for Sustainable Development International Conference

March 4-6, 2010  
Nong Khai, Thailand.

## Proceedings



## Committee

### International Advisory Committee

- ❖ Prof. Dr. Donald C. Slack, The University of Arizona, USA
- ❖ Prof. Dr. Afshin J. Ghajar, Oklahoma State University, USA
- ❖ Prof. Dr. Toby J. Teorey, University of Michigan, USA
- ❖ Prof. Dr. Rod Adams, The University of Hertfordshire, UK
- ❖ Prof. Dr. Paul W. Goldberg, The University of Liverpool, UK
- ❖ Prof. Dr. Franz Nestmann, University of Karlsruhe, Germany
- ❖ Prof. Dr. Michael A P Taylor, University of South Australia, Australia
- ❖ Prof. Dr. Atsushi FUKUDA, Nihon University, Japan
- ❖ Prof. Dr. Harald S. Müller, University of Karlsruhe, Germany
- ❖ Prof. Dr. Luigi Benedicenti, University of Regina, Canada
- ❖ Assoc. Prof. Dr. Chokchai Leangsuksun, Louisiana Tech University, USA
- ❖ Assoc. Prof. Dr. Soontorn Orantara, The University of Texas Arlington, USA

### General Chair

- ❖ Assoc. Prof. Dr. Somrak Theerakulpinit, KCU

### Organizing Chair

- ❖ Assoc. Prof. Dr. Sumantha Kingpaiboon, KCU

### Secretary

- ❖ Dr. Pattarawit Polpinit, KCU

### Organizing Committee

- ❖ Assoc. Prof. Patcharee Hovichit, KCU
- ❖ Asst. Prof. Dr. Panitern Peerapattana, KCU
- ❖ Dr. Nawapak Eua-anant, KCU
- ❖ Asst. Prof. Dr. Ratchaphon Suntivarakorn, KCU
- ❖ Dr. Mudjalim Peongprasit, KCU
- ❖ Asst. Prof. Rajchai Ung-aranyawee, KCU
- ❖ Assoc. Prof. Dr. Somjai Kajorncheappunngam, KCU
- ❖ Asst. Prof. Dr. Netnapid Tantomsapya, KCU
- ❖ Mr. Surat Pramsakdikul, KCU
- ❖ Dr. Ladda Tanwanichkul, KCU
- ❖ and Staffs of the Faculty of Engineering, KCU



## Committee

### ❖ Technical Program Committee

Agricultural Engineering	
Prof. Dr. Surin Phongsupasmit	Chulalongkorn University
Assoc. Prof. Dr. Sirwe Chaiseri	Kasetsart University
Assoc. Prof. Dr. Chockchai Theerakulkait	Kasetsart University
Asst. Prof. Dr. Sudsai Trevanich	Kasetsart University
Dr. Sirichai Songserupong	Kasetsart University
Dr. Weerachet Jittanit	Kasetsart University
Dr. Saipin Thanachasai	Kasetsart University
Dr. Chitsiri Rachtanapun (Thongsou)	Kasetsart University
Dr. Sasitorn Tongchitpakdee	Kasetsart University
Assoc. Prof. Dr. Weerasak Saksirint	Khon Kaen University
Assoc. Prof. Dr. Pattana Laopuiboon	Khon Kaen University
Assoc. Prof. Dr. Sungcom Techawongstien	Khon Kaen University
Assoc. Prof. Dr. Vidhaya Treloges	Khon Kaen University
Assoc. Prof. Dr. Boonmee Sin	Khon Kaen University
Assoc. Prof. Dr. Pornthap Thanonkeo	Khon Kaen University
Assoc. Prof. Dr. Singhanat Phoungchandang	Khon Kaen University
Assoc. Prof. Dr. Sittisak Uparivong	Khon Kaen University
Assoc. Prof. Dr. Patma Vityakon	Khon Kaen University
Assoc. Prof. Dr. Sirinda Yunchalard	Khon Kaen University
Asst. Prof. Dr. Ann Hirasalee	Khon Kaen University
Asst. Prof. Dr. Thanakorn Rojanakorn	Khon Kaen University
Asst. Prof. Dr. Wichian Woraputhaporn	Khon Kaen University
Asst. Prof. Dr. Darnee Jothityangkoon	Khon Kaen University
Asst. Prof. Dr. Araya Ahromrit	Khon Kaen University
Asst. Prof. Dr. Pakawadee Kaewkauntra	Khon Kaen University
Asst. Prof. Sukanda Vichitphan	Khon Kaen University
Asst. Prof. Dr. Vichai Leelavatcharansri	Khon Kaen University
Asst. Prof. Dr. Kamit Vichitphan	Khon Kaen University
Asst. Prof. Dr. Roengsak Katawatin	Khon Kaen University
Asst. Prof. Dr. Mallika Boonmee	Khon Kaen University
Asst. Prof. Dr. Supawan Thawonchinsombut	Khon Kaen University
Asst. Prof. Dr. Sawang Ruaysoongnern	Khon Kaen University
Asst. Prof. Dr. Sere Wongpichet	Khon Kaen University
Assoc. Prof. Dr. Sunantha Kingpaiboon	Khon Kaen University
Dr. Mongkon Ta-orn	Khon Kaen University
Dr. Jirawan Apirakakorn	Khon Kaen University
Dr. Amporn Sae-Eaw	Khon Kaen University
Dr. Supasit Konyai	Khon Kaen University
Assoc. Prof. Dr. Panmasut Srisomboon	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Prof. Dr. Somchart Soponrommarit	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Asst. Prof. Dr. Sopit Vetsyasuporn	Maharakham University
Asst. Prof. Dr. Rumpai Gaensakoo	Maharakham University
Asst. Prof. Dr. Paryaporn Itsaramwat	Maharakham University
Dr. Bussagon Thongbai	Maharakham University



## Committee

### Technical Program Committee

Chemical Engineering	
Asst. Prof. Dr. Piyachai Yimsiri	Burapha University
Assoc. Prof. Dr. Siriporn Damrongsakkul	Chulalongkorn University
Assoc. Prof. Dr. Ura Pancharoen	Chulalongkorn University
Assoc. Prof. Dr. Supakamol Thongyai	Chulalongkorn University
Assoc. Prof. Dr. Tawatchai Charinpanitkul	Chulalongkorn University
Asst. Prof. Dr. Bunjerd Jongsoojit	Chulalongkorn University
Asst. Prof. Dr. Artiwan Shotasuk	Chulalongkorn University
Asst. Prof. Dr. Sarawut Rindusit	Chulalongkorn University
Assoc. Prof. Dr. Paisan Kongkachnichay	Kasetart University
Asst. Prof. Dr. Kantis Sudsakorn	Kasetart University
Asst. Prof. Dr. Nanthiya Hansupalak	Kasetart University
Assoc. Prof. Dr. Somjai Kajorncheppungram	Khon Kaen University
Assoc. Prof. Dr. Kanyarat Holasut	Khon Kaen University
Asst. Prof. Dr. Vittaya Amornkitbamrung	Khon Kaen University
Asst. Prof. Dr. Chaiwat Raksakulpiwat	Khon Kaen University
Asst. Prof. Pannokorn Khoahong	Khon Kaen University
Asst. Prof. Dr. Sutasinee Neramittagapong	Khon Kaen University
Asst. Prof. Dr. Prasong Wongvicha	Khon Kaen University
Asst. Prof. Dr. Paveena Khamswai	Khon Kaen University
Asst. Prof. Dr. Arthit Neramittagapong	Khon Kaen University
Dr. Tunakorn Kumsaen	Khon Kaen University
Dr. Yuvarat Ngarnvan	Khon Kaen University
Dr. Atip Luangphairojana	Khon Kaen University
Prof. Dr. Ratana Jiraratmanon	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Assoc. Prof. Dr. Wanna Kanchanasayoon	Maharakham University
Assoc. Prof. Dr. Jarrun Bunkarn	Prince of Songkla University Hat Yai Campus
Asst. Prof. Dr. Luponng Kawwichan	Prince of Songkla University Hat Yai Campus
Asst. Prof. Dr. Jasadee Kaewurichan	Prince of Songkla University Hat Yai Campus
Dr. Pornsiri Kasuapradit	Prince of Songkla University Hat Yai Campus
Assoc. Prof. Dr. Sutin Kularuangrong	Suranaree University of Technology
Asst. Prof. Dr. Kasama Jarakamjorn	Suranaree University of Technology
Asst. Prof. Dr. Yasporn Raksakulpiwat	Suranaree University of Technology
Asst. Prof. Dr. Utai Meejum	Suranaree University of Technology
Assoc. Prof. Dr. Nurak Grisdanrak	Thammasat University Rangsit Campus
Asst. Prof. Dr. Wanwisa Skolpap	Thammasat University Rangsit Campus
Civil Engineering	
Assoc. Prof. Dr. Chitchai Anantasech	Chiang Mai University
Assoc. Prof. Dr. Banjerd Phalakorn	Chulalongkorn University
Assoc. Prof. Dr. Tansit Tongthong	Chulalongkorn University
Assoc. Prof. Dr. Chalermchon Satirapod	Chulalongkorn University
Asst. Prof. Dr. Sauphet Chinnithipaisan	Chulalongkorn University
Asst. Prof. Dr. Tirawat Boonyaste	Chulalongkorn University
Prof. Dr. Chalong Kirdpitugua	Information Construction Co., Ltd. (iCONS)
Assoc. Prof. Dr. Korchoke Chantawarangul	Kasetart University
Assoc. Prof. Dr. Warakorn Mairaing	Kasetart University
Asst. Prof. Dr. Wanchai Yodsudjai	Kasetart University
Assoc. Prof. Dr. Pongsak Suriyananagul	Kasetart University Chalermphrakiat Sakon Nakhon Province Campus



## Committee

### # Technical Program Committee

Civil Engineering	
Assoc. Prof. Chinawat Muktebbant	Khon Kaen University
Asst. Prof. Dr. Jarusk Teerawong	Khon Kaen University
Asst. Prof. Dr. Krob Srinavin	Khon Kaen University
Asst. Prof. Dr. Pongsakorn Purnratanasin	Khon Kaen University
Asst. Prof. Dr. Chalermchai Pawatana	Khon Kaen University
Asst. Prof. Prakob Maneevate	Khon Kaen University
Asst. Dr. Thaned Satiennam	Khon Kaen University
Dr. Ladda Tamwanichkul	Khon Kaen University
Dr. Tanyada Pannachet	Khon Kaen University
Dr. Ratamase Nantasarn	Khon Kaen University
Dr. Vanchai Sata	Khon Kaen University
Dr. Dolrudee Hormdee	Khon Kaen University
Asst. Prof. Laemthong Leekhongthavorn	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Assoc. Prof. Dr. Supornchai Utanaramol	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Asst. Prof. Dr. Smith Songpuriyakij	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Assoc. Prof. Anek Siripanchigorn	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Prof. Dr. Pichai Tanwananon	Prince of Songkla University
Asst. Prof. Dr. Suksum Hoopibulook	Suranaree University of Technology
Asst. Prof. Dr. Sittichai Seangathit	Suranaree University of Technology
Assoc. Prof. Dr. Sarintip Tantane	Naresuan University
Assoc. Prof. Dr. Kritiya Lertpocasonbut	Thammasat University Rangsit Campus
Assoc. Prof. Dr. Uruya Weesakul	Thammasat University Rangsit Campus
Asst. Prof. Dr. Sirtha Jaensirikak	Ubon Ratchathani University
Computer Engineering	
Assoc. Prof. Dr. Pornsiri Muechaisri	Chulalongkorn University
Asst. Prof. Dr. Puchong Uthayopas	Kasetsart University
Assoc. Prof. Dr. Wanida Kanarkard	Khon Kaen University
Assoc. Prof. Wiroj Taneeproradej	Khon Kaen University
Asst. Prof. Dr. Kanda Saikaw	Khon Kaen University
Asst. Prof. Phichate Chiewthanukul	Khon Kaen University
Asst. Prof. Rajchai Ung-arunyauee	Khon Kaen University
Dr. Pattarawit Polpinit	Khon Kaen University
Dr. Watis Leelapatra	Khon Kaen University
Dr. Warin Suwanwisoot	Khon Kaen University
Dr. Kitt Tientanopajai	Khon Kaen University
Dr. Nawpak Eus-anant	Khon Kaen University
Dr. Chatchai Kimboe	Khon Kaen University
Asst. Prof. Dr. Suthera Puntheranurak	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Asst. Prof. Dr. Pourndee Nettisapak	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Assoc. Prof. Dr. Vara Varavithya	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Assoc. Prof. Dr. Yaowadee Tamtanapat	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Assoc. Prof. Dr. Yongyuth Pempoonanarp	King Mongkut's University of Technology Thonburi



## Committee

### Technical Program Committee

Computer Engineering	
Dr. Phatthanaphong Wanchanthuek	Maharakham University
Dr. Manasawee Kasanampornpan	Maharakham University
Dr. Somrak Puangprompitag	Maharakham University
Assoc. Prof. Dr. Chantana Phongsensri	Silpakorn University Sanam Chandra Palace Campus
Asst. Prof. Dr. Rangsan Tongta	Soransee University of Technology
Electrical Engineering	
Assoc. Prof. Dr. Songhol Kanjanachchai	Chulalongkorn University
Assoc. Prof. Dr. Bundhit Eua-Arporn	Chulalongkorn University
Assoc. Prof. Dr. David Banjerdpongchai	Chulalongkorn University
Assoc. Prof. Dr. Somchai Katsanathamaphan	Chulalongkorn University
Assoc. Prof. Dr. Virasit Intawil	Khon Kaen University
Assoc. Prof. Supawadee Swatdiponphallop	Khon Kaen University
Assoc. Prof. Kitipong Tannit	Khon Kaen University
Assoc. Prof. Mongkol Leeprakobbon	Khon Kaen University
Asst. Prof. Dr. Boonying Charoen	Khon Kaen University
Assoc. Prof. Anmart Sukuri	Khon Kaen University
Asst. Prof. Dr. Sunrit Hungsaratra	Khon Kaen University
Asst. Prof. Dr. Chiranut Sa-ngiamsak	Khon Kaen University
Dr. Pramit Artrit	Khon Kaen University
Dr. Nantakan Wongkasem	Khon Kaen University
Dr. Kittipong Meesawat	Khon Kaen University
Dr. Napat Triroj	Khon Kaen University
Dr. Ampap Meesomboon	Khon Kaen University
Asst. Prof. Dr. Siripun Thongchai	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Assoc. Prof. Bocalert Suechoy	South-East Asia University
Assoc. Prof. Rawat Loupaiboon	Ubon Ratchathani University
Asst. Prof. Dr. Mongkol Putsyatanont	Ubon Ratchathani University
Environmental Engineering	
Assoc. Prof. Dr. Seni Kamchanwong	Chiang Mai University
Assoc. Prof. Senjai Kamchanwong	Chiang Mai University
Assoc. Prof. Dr. Khajomsak Sopajitree	Chiang Mai University
Asst. Prof. Dr. Phapbon Kommedaunrong	Chiang Mai University
Asst. Prof. Dr. Suraphong Wattanachira	Chiang Mai University
Asst. Prof. Dr. Jitthap Prasitvongsil	Chiang Mai University
Asst. Prof. Dhiti Cheocharvit	Chiang Mai University
Assoc. Prof. Dr. Thares Srisatit	Chulalongkorn University
Assoc. Prof. Dr. Petchora Chawakitcharoen	Chulalongkorn University
Assoc. Prof. Dr. Wanpen Wirojanagud	Khon Kaen University
Assoc. Prof. Patcharee Horichit	Khon Kaen University
Asst. Prof. Dr. Puthita Mungkarndee	Khon Kaen University
Asst. Prof. Dr. Netnapid Tuntemsup	Khon Kaen University
Dr. Chatchaval Iyathiti	Khon Kaen University
Dr. Kulyakorn Khannar	Khon Kaen University
Dr. Pairaya Choetisi	Khon Kaen University
Dr. Mudjalim Poomprasit	Khon Kaen University
Assoc. Prof. Dr. Damporn Tonnyopas	Prince of Songkla University Hat Yai Campus



## Committee

### # Technical Program Committee

Industrial Engineering	
Assoc. Prof. Dr. Nivit Charoensai	Chiang Mai University
Assoc. Prof. Dr. Gobboon Lothongkum	Chulalongkorn University
Asst. Prof. Dr. Eksit Nisara	Chulalongkorn University
Asst. Prof. Dr. Panitarn Pheerapattana	Khon Kaen University
Asst. Prof. Dr. Weerapat Sessomboon	Khon Kaen University
Asst. Prof. Dr. Srikarin Sookto	Khon Kaen University
Asst. Prof. Dr. Charnarong Saikaw	Khon Kaen University
Asst. Prof. Dr. Danupong Chetchoisak	Khon Kaen University
Dr. Raknoi Akararungruangkul	Khon Kaen University
Dr. Papot Jaroenapibal	Khon Kaen University
Assoc. Prof. Dr. Athakon Kangpol	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Asst. Prof. Dr. Tuanjai Sombocuwat	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Asst. Prof. Nithi Buransant	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Assoc. Prof. Dr. Asa Prateepsan	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Assoc. Prof. Dr. Bovornchok Poopat	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Mechanical Engineering	
Prof. Dr. Pradit Terdoon	Chiang Mai University
Assoc. Prof. Dr. Kavit Wattanavichas	Chulalongkorn University
Assoc. Prof. Kiatkrai Ayuwat	Kasetsart University
Assoc. Prof. Dr. Boonrang Direcksatiporn	Khon Kaen University
Assoc. Prof. Dr. Tanakorn Wongwattanasatia	Khon Kaen University
Assoc. Prof. Dr. Surasith Privasin	Khon Kaen University
Assoc. Prof. Dr. Sujin Bureerat	Khon Kaen University
Asst. Prof. Dr. Supattra Piamkamon	Khon Kaen University
Asst. Prof. Dr. Sirivit Teachajedadarungri	Khon Kaen University
Asst. Prof. Dr. Ratchaphon Suntivarakorn	Khon Kaen University
Asst. Prof. Dr. Kiatfa Tangchaihit	Khon Kaen University
Asst. Prof. Dr. Jalsorn Benjapivaporn	Khon Kaen University
Dr. Chanokorn Sookkumard	Khon Kaen University
Assoc. Prof. Dr. Pongjet Promvongse	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Assoc. Prof. Dr. Srisak Harnchoewong	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Prof. Dr. Sunreang Jujai	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Prof. Dr. Somschai Wongwises	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Assoc. Prof. Dr. Surachate Chuntima	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Assoc. Prof. Dr. Wanchai Asunpocairkul	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Assoc. Prof. Bantwng Suwantragul	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Assoc. Prof. Dr. Somschai Chanchoana	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Assoc. Prof. Dr. Pongpan Kaswatitip	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Assoc. Prof. Dr. Ditt Laowattana	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Asst. Prof. Dr. Sathys Songchon	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Asst. Prof. Dr. Seney Sirichai	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Asst. Prof. Dr. Anak Khantachawana	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Asst. Prof. Dr. Sontipoo Aimmasee	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Asst. Prof. Dr. Chawalit Thinwongpink	Ubon Ratchathani University





## Contents

### B: Electrical Engineering and Telecommunication

Page

B1_002_2010S	Optimal Load Shedding Scheme under Contingency Condition Considering Voltage Stability Problem.....	146
B1_004_2010S	Early Streamer Emission Air Terminal Compared with Franklin Rod Air Terminal for Wind Turbine Protection.....	151
B1_005_2010S	Capacitor Placement for Loss Reduction in a Distribution Feeder.....	155
B2_001_2010N	Stability Criterion of the OTA-Based Floating Inductor.....	161
B2_002_2010N	Electronically Tunable Voltage-mode Quadrature Oscillator Using Simple CMOS OTAs.....	165
B2_003_2010N	CDBA-based CMOS Four-quadrant Analog Multiplier.....	169
B2_004_2010N	CMOS Precision Half-wave Rectifier with Dual Output Voltage.....	173
B2_005_2010S	Digitally Programmable Gm-C Current-mode Multifunction Biquadratic Filter.....	178
B2_006_2010S	Current-mode Biquad with Single Current Follower.....	183
B2_007_2010S	High-frequency and Temperature-insensitive Multi-stage Rectifier Circuit Operating in Low Voltage $\pm 1.5$ Volt Current Mode.....	188
B3_002_2010N	Design of PID Controller with Set-point Weighting for Process with Time Delay Using Adaptive Tabu Search.....	194
B3_003_2010S	DSP Based Embedded Controller for Real Time Flight Control of an Autonomous Underactuated Aerial Robot.....	200
B3_004_2010S	Classifying a Steel Bar Size of Reinforced Concrete Structure Using Electromagnetic Field.....	207
B3_005_2010N	Microcontroller-based Smart Home Terminal Unit by Interfacing with Public Switched Telephone Network (PSTN).....	211
B4_001_2010S	Automatic LED Emergency Light System: Thai Standard.....	217
B4_002_2010S	Using of Madder-horn Fluorescent Lamp Model with 14-Watt-T5 Lamp at 26 kHz in Code-based Simulation.....	220
B4_003_2010S	Development of Controllable Temperature Gradient Single Crystal Growth Furnace.....	225
B4_004_2010N	The Design and Develop of Capacitor Discharge Ignition (CDI) for Motorcycle Engine via the Use of Passive Elements.....	229



## Development of Controllable Temperature Gradient Single Crystal Growth Furnace

Pracha Lao-Auyyorn<sup>1,2</sup> Jakree srinonchat<sup>1</sup> Siriporn Larpkiattaworn<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Electronic and telecommunication, Faculty of engineering,  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi 12110

E-mail: pracha@tistr.or.th, jakkree\_s@hotmail.com

<sup>2</sup> Material Innovation Department, Thailand Institute of Scientific and Technological Research,  
Khlong Luang, Pathum Thani 12120  
E-mail: sirapkaia@yahoo.com

### Abstract

Moving-temperature gradient is one of the main crucial factors for growth single crystal of materials. The efficient of temperature gradient must be control the moving of furnace. The main aim of this paper is to develop the controllable temperature gradient single crystal growth furnace. The motor controller is controlled by MCS51 microcontroller. The furnace is moved by drive force of stepping motor. The result shown at the speed of 10 millimeters per hour can be performs gradient temperature control in equation  $Temperature = 590.87 - (2.28 \times distance)$ . The temperature can be maintained to a precision of + or - 4 degree C and percent error of distance at 1%.

**Keywords:** Gradient temperature

### 1. Introduction

The qualities of single crystal growth must have process to melt and gradual cooling material. The furnace must has two zones. The different temperature is controlled by determination speed of moving a furnace that is proper with each material such as lead molybdate crystal [2].

The compositions of single-crystal growth furnace controller system can be divided into two systems: temperature control system and movement control system. The temperature controller will transfer signal to thyristor for supply electric power to heater. The systems will measure temperature and then transfer feedback signal to temperature controller by thermocouple. Temperature control systems must have two sets for control hot zone and lower zone.

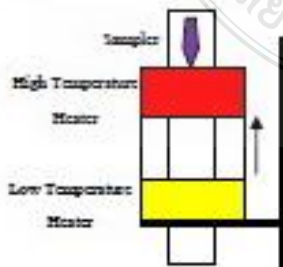


Figure 1. Two zones of furnace

The movement control systems will control the movement of materials through both zones as show in Figure 1.

The efficiency of single crystal growth furnace must has high precision movement control systems.

### 2. Principle

Two zones of single-crystal growth furnace for melt and freezing materials were designed to control difference temperature of two zone furnace. This systems will make gradient temperature. Single-crystal growth furnace has two types. The first type will be used the movement of materials though furnace from high temperature to low temperature. The materials will be melt and gradual cooling. The second type will be used moving a furnace along the growing area.

The block diagrams of controller system have two parts such as temperature controller and movement controller.



Figure 2. Diagram of temperature control part

The compositions of temperature controller are PID controller, thyristor, heater and thermocouple (shown in Figure 2). PID controller is feedback control. It uses feedback from the control sensor to calculate and adjust the control (heater) output. The control algorithm used is called PID. The PID control equation has three variable terms: proportional (P), integral (I), and derivative (D). The PID equation is:

$$U(t) = P + I + D$$

Where:

Proportion term

$$P = K_p e(t)$$

Integral term

$$I = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$$

Derivative term

$$D = K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

The error ( $e$ ) is defined as:

$$e = \text{Setpoint} - \text{Feedback Reading}$$

Thyristor has three types such as On-off control, Cycle control and phase control. Heater has many kinds which different maximum temperature such as molybdenum, graphite, silicon carbide and wire, respectively. Two types of thermocouple are type K and type R.

The compositions of movement controller are evaluation controller, driver, motor and encoder as shown in Figure 3.

The evaluation controller evaluate signal from program and then compare with signal encoder, after that transfer signal to driver. The driver is power supply to moving motor.

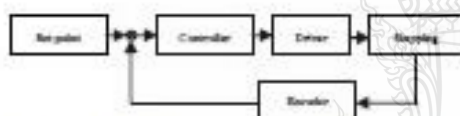


Figure 3. Diagram of moving furnace control part

### 3. Experiments and Results

This experiment is to develop single-crystal growth furnace that can move through materials. Part of temperature control systems; wire heater ( $\phi$  1mm) was used as heater that can operate the temperature up to maximum of 1350 °C. These wire heaters were made like helical spring and then bind around ceramic tube which has diameter 50 millimeter and length 200 millimeter. After that thermocouple (Type K) was set inside ceramic tube and cover with insulator layer that has thickness 150 millimeter and stainless plate, respectively as shown in Figure 4. This experiment is to develop single-crystal growth furnace that can move through materials.



Figure 4. Show wire heating elements



Figure 5. Two hot zones connected

Two sets of wire heater were ordered like as shown in Figure 6 for design gradient temperature [1].

The temperature controller was controlled by DB5090 which detect signal transfer to PID controller. PID controller will transfer signal to thyristor SPC-35 for supply electric power to wire heater. The feedback signal was detected by thermocouple and transfer to controller for measures temperature.

The speed controller of furnace was controlled by AT89C52 microcontroller which will evaluate and transfer pulse signal to stepping motor KR-55MC. The control system of this experiment was full step. The stepping motor A4K-M564 was used as moving driver. One step or one pulse can move 0.72 degree. The design of speed control program at 360 degree can move 2 millimeter. So it must be used pulse signal 500 loops to move 2 millimeter. One pulse signal will move 0.004 millimeter. If the determination of speed at 0.1 millimeter per hour, pulse signal will has frequency 0.007 Hz. So at speed 0.1 millimeter per hour, one period will be wide 144 Sec that long term will be wide 1ms and 143.999 sec at short term as shown in Figure 6.

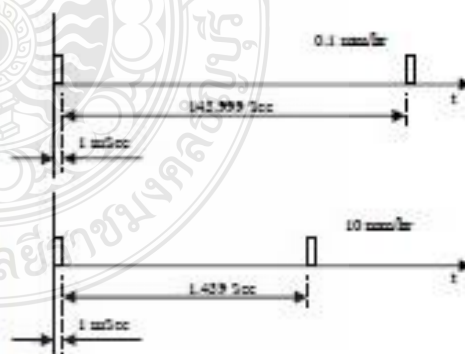


Figure 6. Period of signal at speed 0.1 and 10 millimeter

The results of distance measurement and percent error when determine the movement of single-crystal furnace 300 millimeter with speed at 10 millimeter per hour that shown in figure 7 and table 1.



Figure 7. Distance of moving

The results of temperature measurement by setup thermocouple type K at growing area (Figure 8) when set value in the furnace upper zone at 600 °C and lower zone at 250°C as shown in Figure 9 and vary speed such as 1, 5 and 10 millimeter per hour that shown in table 2 and figure 10.

distance	1 mm/hr	5 mm/hr	10 mm/hr
260	240	242	288
270	227	221	274
280	220	214	263
290	213	209	258
300	207	202	251



Figure 8. Show the install thermocouple at measurement position

Table 1 Error of moving at 300 millimeter

No.	measurement	Error(%)
1	302.75	0.92
2	302.45	0.82
3	298.10	0.63
4	300.65	0.22
5	297.70	0.77
6	301.80	0.60

Table 2 Temperature at speed 1, 5 and 10 millimeter per hour

distance	1 mm/hr	5 mm/hr	10 mm/hr
0	525	533	578
10	519	530	573
20	512	525	564
30	506	513	554
40	501	508	545
50	589	501	533
60	478	488	525
70	470	475	513
80	464	461	502
90	451	447	491
100	439	440	480
110	430	426	469
120	418	414	459
130	407	399	447
140	398	390	435
150	386	382	425
160	374	370	414
170	362	352	403
180	350	338	391
190	336	322	379
200	321	315	366
210	306	309	354
220	293	301	341
230	287	285	323
240	261	272	315
250	252	257	303



Figure 9. Value of temperature control

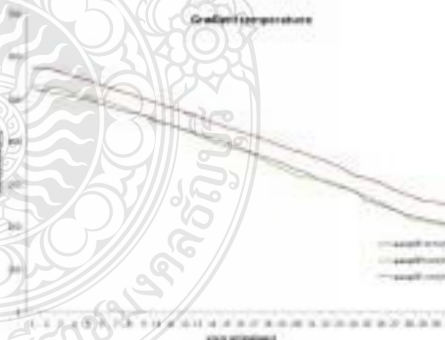


Figure 10. The result of gradient temperature

#### 4. Conclusions

Temperature control system and movement control system in these experiments were controlled in closed loop system. Thermocouple and encoder were used as feedback sensor. Part of gradient temperature generation system was controlled in open loop system. The controllable temperature gradient single crystal growth furnace was designed and constructed. At the speed of 10 millimeters per hour can perform gradient temperature control in equation

P. Lao-Aunporn et al. / TISD2010, Thailand, 4-6 March 2010

$$y = 590.87 - (2.28 x)$$

Where:  $x$  = distance

$y$  = temperature

The temperature can be maintained to a precision of + or -4 degree C and percent error of distance at 1%.

The model of two zone single crystal growth furnace was shown in figure 11.



Figure 11. The model of two zone single crystal growth furnace

#### References

- [1] J.E. LeCroy and D.P. Popok, "Design of a High Thermal Gradient Bridgman Furnace", ALAA 94-0741, 32<sup>nd</sup> Aerospace Sciences, January 10-13, 1994.
- [2] Hongbing Chen, Congxin Ge, Rongheng Li, Junhao Wang, Changgen Wu and Xianling Eng, "Growth of lead molybdate crystals by vertical Bridgman method", Indian Academy of Sciences, Vol. 28, No. 6, pp. 553-560 October 2005.
- [3] M. J. Barrett, "Estimator/regulator Performance at Slow Speed", IET Conference Proceeding, Page(s):3/1 - 3/4, November 4, 1992.
- [4] J. Laoaunporn, R. Laoaunporn, J. Intara-prawart, S. Panchareel, C. Eamchot-charwalit, "Thermoelectric properties of Bi<sub>0.48</sub>Sb<sub>1.52</sub>Te<sub>3</sub> materials prepared by Bridgman method", *Journal of Science and Technology*, Vol. 3, No. 1, pp. 23-25, 2550.

**Group 1** Power Electronics, Electric Machines, Motor Control and Drive, Measurement, Control and Robotics.

**Group 2** Power System, Transmission and Distribution, High Voltage and Electrical Energy Generating Systems.

**Group 3** Renewable Energy, Energy Saving Technologies, Industry Specific Energy Conversion and Conditioning Technologies.

**Group 4** Telecommunication, Electronics, Information and Communication Technologies, Antennas, Microwave Theory and Techniques.

**Group 5** Computer Technologies and Network, Computer Graphics, Machine Learning and Human-Computer Interaction.

**Group 6** Education in Electrical Engineering, Simulation Software and Design tools, Related Topics in Electrical Engineering.

**Between 9-11 March 2011**  
 At ARIT Nonthaburi Campus  
 (North Zone) Rajamangala University  
 of Technology Suvarnabhumi

**EENET3+**

**ELECTRICAL ENGINEERING NETWORK 2011**

**UTSB**



เกรียงไกร เหลืองอำพล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
กิจจา ลักขณ์อำนวยพร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
กิตติวงศ์ สุธรรมโน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ศูนย์กลาง
กิตติวุฒิ จีนนะบุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ศูนย์กลาง
เกษม เนื้อแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
โกศล นิธิโสภาก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
โกศล โอพาโรไฟโรจน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
จงเจริญ คุ้มบุญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
จตุรงค์ จตุรเชิดชัยสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
จรินทร์ จุลวานิช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
จัดคุฤทธิ ทองปรอน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
เจนศักดิ์ เอกบูรณะวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตศาลายา
เจษฎา พรหมเกษ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
จักรชัย สุคพิทักษ์สกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
เฉลิมชาติ มานพ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง
เฉลิมพล เรื่องพัฒนาวิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
เฉลิมเว เกตุแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ชลากร สุวรรณสิทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ชัยณรงค์ วิเศษศักดิ์วิชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ชาญชัย เศรษฐมรงค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ชาญวิทย์ ตั้งสิริวรกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ชูศักดิ์ กมลขันดิธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ไชยยันต์ บุญมี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ณัฐภัทร พันธุ์คง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ณรงค์ นันทกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ณรงค์ฤทธิ์ พิมพ์ล่าวังศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ดาก
ณัฐพงศ์ สนองคุณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ



ณัฐพงษ์ พันธุณะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
ณัฐพล หาอุปละ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คนุพล คำปัญญา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
คุณย์พิเชษฐ์ ฤกษ์ปรีดาพงศ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
คุณิต อุทิศสุนทร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
คะวัน ขุนอาสา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
เดิมศักดิ์ แสนเพียง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
เดือนใจ อาชีวะพานิช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ทอง ลานธารทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
ทัสนะ ถมทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก
ธงชัย คล้ายคลัง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ศูนย์กลาง
ธนวัฒน์ ฉลาดสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
ธวัช เกิดชื่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ศูนย์กลาง
ธานี สมวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ธีรพล เหมือนขาว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นกร ทองเล็ก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
นครินทร์ ศรีปัญญา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นพพร พัชรประทีติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
นภัทร วัฒนเทพินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
นราวิทย์ กิจเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นรินทร์ หล้าทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นาตยา คล้ายเรือง	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ศรีราชา
นิติพงศ์ ปานกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นิติพงษ์ สมไชยวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
นิธิโรจน์ พรสุวรรณเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นิพนธ์ วงศ์ท่า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
นิพนธ์ สุนทรหุด	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
นิพนธ์ เกตุอ้อย	มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
นิลมิต นิลาส	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ





นิวัตร จารุวาระกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
บุญช่วย เจริญผล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
บุญยัง ปลั่งกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปฎิวัติ บุญมา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ประกาศิต ศรีทะแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
ประดิษฐ์ เตือนหมื่นไวย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ศูนย์กลาง
ประดิษฐ์ แสงยศ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ประทีป แสงคิ้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ประมุข อุณหเลขกะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ประวิช เปรียบเหมือน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ปราโมทย์ อนันต์วรพงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ปรีชา สาคะรังษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ศส.ณัฐวุฒิ โสมเกษตรินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
พร้อมศักดิ์ อภิตกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
พันธ์ พิริยะวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
พิชัย เฟ่งพันธุ์พัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
พิชัย อยู่เปล้า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
พินิจ ศรีธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ศูนย์กลาง
พินิจ จิตจริง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
พิสัทธิ วิสุทธิเมธีกร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
พิสิษฐ์ ลีวัฒนกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
พีรพล จิราพงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
พูนศรี วรรณการ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
ภัทวัฒน์ จันทร์ตรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ภก.บุษมาศ แสนพวง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
ภก.ดล คำนำรุ่งตระกูล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ศูนย์กลาง
ภักกร ทวีจันทร์ชื่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ภก.เทพ ณะคำดี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
ภก.ณิชา ตั้งจิตเจษฎา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ



มิชัช แจ่มใส	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
ยุทธนา กันทะพะยา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ยุทธนา ขำสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รัก สกุดพงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
เววัต ธรรมสนธิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
วณพันธ์ วิษุฒิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
วรรณรีย์ วงศ์ไทรรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ศูนย์กลาง
วิษชัย สิมมา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
วันชัย ทพยีสังห์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
วารุณี กรุดพันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
วารุณี ศรีสงคราม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
วิจิตร กิมเรศ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
วิชัย ผดุงศิลป์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
วิชา จันทิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
วิจิต สุทธิพร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
วิเชียร ทรัพย์รัตน์ศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
วิฑูรย์ พรหมมี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
วินัย เมธาวิทิต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
วิบูลย์ ชื่นแมวก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
วิรัตน์ นักรองดี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
วิโรจน์ เพชรพันธุ์ศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
วิวัฒน์ ทิพจร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
วิวัฒน์ เจริญสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
วีระ รัตนยารักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
วีระชัย จรบูรมย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
วีระยุทธ รัตนคุณศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
วุฒิชัย สง่างาม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ศูนย์กลาง
วุฒิพล ธาราธิ์เศรษฐ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ศรีศักดิ์ น้อยไร่ภูมิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ



ศักดิ์ชัย ระวีกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ศิริชัย แดงเอม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ศิริชัย ลาภาสรณ้อย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ศูนย์กลาง
ศุภลักษณ์ ศรีตา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ศุภวดี เนตรโพธิ์แก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
สมเกียรติ อุดมบรรษากุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
สมเกียรติ ทองแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
สมชัย หิรัญวโรคม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
สมชาย เบียนสูงเนิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
สมนึก เกรือสอน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ดาก
สมพร ศรีวัฒนพล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
สยาม ประจูดะศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
สรรพลล คุ้มทรัพย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
สราวุธ ทองกุลภัทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
สันติ อัสวศรีพงษ์ศรี	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
สันติภาพ โคตทะเล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ดาก
สาคร ปันตา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
สาริต รุ่งสว่าง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
สายชล ชูคเจ็จเงิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
สำริง อินท่าไม้	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
สุภูมิ จุฬางตุรศิริรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
สุชาติ จันทร์จรมานิตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
สุทธินันท์ คันโพธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ศูนย์กลาง
สุพจน์ จันทร์วิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
สุรเชษฐ์ เดชฟูง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
สุรพันธ์ ไส้ห้เพชร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
สุรศักดิ์ อยู่สวัสดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
สุรสิทธิ์ แสันทอน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ดาก



สุรินทร์ แห่งมงาม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
สุริยา แก้วอาษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
สุวัลยา ศิริศิลป์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
องอาจ แสกลใหม่	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อนนท์ นานิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
อนันต์ โสภณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อโนชา รุ่งโรจน์วัฒนศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อัศวิน แก้วสิงห์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ชอบคุณ ไชยวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
อากาศพล มหาวีระ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
อิชญา บุญญาอรุณเนตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
อุดม เครือเทพ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ดาก
อุเทน คำน่าน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา วิทยาเขตภาคพายัพ
อุรา ดันมีแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
เอกชัย ชัยดี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
เอกวิทย์ หายักวงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร





สารบัญ



การประชุมเครือข่ายวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 3

ET4_3	การศึกษาการแยกแยะสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจภายนอกร่างกายสำหรับทารกในครรภ์	308
ET4_4	การศึกษาการออกแบบ โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อพัฒนาระบบการวินิจฉัยสภาวะตัวเหลืองในทารก	312
ET4_5	การออกแบบและสร้างเครื่องรับส่ง 16 QAM-OFDM ต้นแบบบนบอร์ด FPGA	316
ET4_6	การศึกษาฟังก์ชันถ่ายโอนระบบให้ความร้อนในตาปลาปลุกผลึก	320
ET4_7	การศึกษาเบื้องต้นสำหรับการคัดกรองภาวะเซลล์ก่อนมะเร็ง โดยวิธีอิมมูโนฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปี	324
ET4_8	ระบบแจ้งอุบัติเหตุรถยนต์ผ่านทางโทรศัพท์มือถือ	328
ET4_9	สายอากาศช่องเปิดแถบความถี่กว้างมากที่กระตุ้นด้วยสายส่งแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม	332
ET4_10	ชุดควบคุมการเปิด-ปิด อุปกรณ์ไฟฟ้าบนไร้สายผ่านทางไมโครคอนโทรลเลอร์	336
ET4_11	การวิเคราะห์และเปรียบเทียบเทคนิคการสกัดคุณลักษณะของสัญญาณที่เป็นเสียงและเสียงรบกวน	340
ET4_12	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบีบอัดเสียงพูดโดยใช้เทคนิคเวฟเล็ต	344
ET4_13	เครื่องต้นแบบรบกวนสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่	348
ET4_14	สายอากาศแพนรูปตัว G ย่านความถี่แถบคู่ที่ป้อนสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วม	352
ET4_15	เปรียบเทียบคุณลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดรูปเลขเก้าสำหรับการใช้งานในเครือข่ายไร้สาย โดยใช้วัสดุฐานรองแบบ RT-Duroid และ FR4	356
ET4_16	The current density effect on plasma parameters	362
CP5_1	Home Electrical Device Control System with Wireless Low Rate Network	365
CP5_2	การศึกษาการตรวจจับสัญญาณกล้ามเนื้อหัวใจสำหรับใช้เชื่อมค้อมนุษย์กับคอมพิวเตอร์	369
CP5_3	การรู้จำตัวอักษรอังกฤษ-ไทย โดยใช้วิธีทางสถิติร่วมกับซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน	373
CP5_4	การเพิ่มประสิทธิภาพเทคนิคการประมวลผลภาพในการตรวจหาป้ายจำกัดความเร็วในเงื่อนไขที่ถูกสภาพแวดล้อมบดบัง	377
CP5_5	การหาคุณสมบัติของรูปภาพด้วยแฟร็กทัลไดเมนชันสำหรับระบบ CBIR	381
CP5_6	การทำเหมืองความรู้เพื่อหา นายระดับคะแนน	385

## การศึกษาฟังก์ชันถ่ายโอนระบบให้ความร้อนในเตาเผาปลูกผลึก

## The study of transfer function of heating system in crystal growth furnace

ประชา เหล่าอวยพร<sup>1,2</sup> จักรี ศรีนนท์ฉัตร<sup>1</sup> และ ศิริพร ลามเกียรติฉัตร<sup>2</sup><sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 12110

E-mail: pracha@tistr.or.th, jakkree\_s@hotmail.com

<sup>2</sup>สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย เทคโนธานี ปทุมธานี

E-mail: slarpkia@yahoo.com

## บทคัดย่อ

ฟังก์ชันถ่ายโอนระบบให้ความร้อนในเตาเผาปลูกผลึก ซึ่งเตาเผาปลูกผลึกเป็นเตาที่ใช้ในการหลอมสารให้มีความบริสุทธิ์ ประกอบด้วยส่วนของตัวกำเนิดและตัวควบคุมอุณหภูมิความร้อน โดยทำการกำเนิดความร้อนใช้หลอดความร้อน เมื่อทำการทดสอบระบบเพื่อหาค่าฟังก์ชันถ่ายโอน โดยการใช้อินพุตเป็นฟังก์ชันขั้นบันไดที่ระดับกำลัง 50% พบว่าอุณหภูมิเอาต์พุตเป็นระบบอันดับหนึ่ง มีค่าเวลาคงที่เท่ากับ 635 วินาที ซึ่งเมื่อใช้ค่านี้ในการจำลองระบบและใช้อินพุตเป็นฟังก์ชันขั้นบันไดเดียวกัน ได้ผลลัพธ์ใกล้เคียงระบบจริงมีค่าผิดพลาด 3.99% การทดสอบเพื่อหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ ทำให้การพัฒนากระบวนการควบคุมง่ายขึ้นและสามารถทดสอบได้ด้วยโปรแกรม Simulink จากกราฟทดลองโดยเลือกใช้ตัวควบคุมแบบ PID พบว่าเอาต์พุตที่ได้ใกล้เคียงอินพุต

คำสำคัญ : ฟังก์ชันถ่ายโอน, การลดล้อยแบบเชิงเส้น, การแบ่งชั้นอุณหภูมิ

## Abstract

The transfer function of heating system in crystal growth furnace. Crystal growth furnace is used to melt material for synthesis single crystal. The system is composed of generator and temperature controller. Wire heating element was used as heating generator. The experiments were carried out with unit step function as input. It was found that at 50% of power, the temperature output was the first order system. Time constant was equal to 635 second. When used these values in model system, the final values were close to valuable from real system. It can be maintained to a precision of 3.99%. Transfer function of testing system will be easy to develop control system and can be tested by using Simulink program. Using PID as controller, it was found that the output was close to input.

Keyword : Transfer function, Linear regression, Gradient temperature

## 1. บทนำ

เตาเผาปลูกผลึกถูกใช้ในงานหลอมสารให้มีความบริสุทธิ์ มีลักษณะการให้ความร้อนกับชิ้นงานตัวอย่าง ทำให้ชิ้นงานตัวอย่างเกิดการหลอมตัว จากนั้นทำให้ชิ้นงานตัวอย่างเกิดการเย็นตัวอย่างช้าๆ จากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งของชิ้นงาน เตาเผาปลูกผลึกแบ่งส่วนให้ความร้อนออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนให้อุณหภูมิสูงและส่วนที่ให้อุณหภูมิต่ำ [1], [4] ทั้ง 2 ส่วนนี้นำมาต่อกันส่งผลให้เกิดอุณหภูมิไล่ลงจากอุณหภูมิสูงไปหาอุณหภูมิต่ำ อุณหภูมิที่แตกต่างกันต่อระยะทางของเตาเผา (Gradient temperature) จะบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของเตาเผาปลูกผลึก ซึ่งการควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาชนิดนี้ถือได้ว่ามีส่วนสำคัญถึง

ตั้งแต่อดีตมีการพัฒนาการควบคุมอุณหภูมิอย่างต่อเนื่อง หนึ่งในวิธีการควบคุมที่มีการวิจัยอย่างมากเป็นการควบคุมแบบพีไอดี (PID Control) เช่น ในปี 2004 มีการนำเสนอการควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาแบบสูญญากาศ มีการแก้ปัญหาในการได้ระดับของอุณหภูมิและความเฉื่อย โดยการควบคุม adaptive immune genetic algorithm [6] ปี 2005 มีการทดลองควบคุมอุณหภูมิของเตาอบโดย ทำการทดสอบเป็น FOPDT (First Order Plus Dead Time) ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นการควบคุมแบบดิจิทัลเพื่อหาจุดที่เหมาะสมในการควบคุมแบบ PI และ PID [7] ปี 2007 มีการนำเสนอ PID self-tuning control algorithm โดยวิธีการ Recursion Least Squares และประเมินการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์แบบออนไลน์ [8] ในปัจจุบันมีการใช้โปรแกรม Matlab Simulink ในการจำลองระบบการควบคุม ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้สามารถใช้งานได้เหมือนการควบคุมระบบจริง โดยจะต้องใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบในการประมวลผล

เตาเผาปลูกผลึกนี้ เป็นการพัฒนาในส่วนของการให้ความร้อนมีความจำเป็นที่ต้องทราบคุณลักษณะของระบบ ประกอบไปด้วย ตัวควบคุมอุณหภูมิ คุณลักษณะหลอดความร้อนและการป้อนกลับ ในงานวิจัยนี้จะเป็นการนำเสนอการหาฟังก์ชันการถ่ายโอนของระบบให้ความร้อน ซึ่งแบบจำลองที่ได้นี้จะทำให้พัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

การประชุมเครือข่ายวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 3 วันที่ 9 - 11 มีนาคม 2554 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

2. ทฤษฎี

การถดถอยแบบเชิงเส้น (Linear regression) เป็นระเบียบวิธีที่ใช้ในการสร้างฟังก์ชันเส้นตรงสำหรับชุดของข้อมูล ประกอบด้วย  $x_i, y_i$  โดยที่  $i = 1, 2, \dots, n$  ซึ่งจะสร้างสมการเส้นตรงในรูปของ

$$Y = AX + B$$

ค่าความผิดพลาดทั้งหมดที่เกิดจากข้อมูล  $n$  ข้อมูล จะได้

$$E = \sum [Y_i - Y(X_i)]^2$$

แทนค่า  $y(x)$  จาก (1) ลงใน (2)

$$E = \sum [Y_i - (AX_i + B)]^2$$

หาค่า  $A$  และ  $B$  ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด โดยการหาค่าต่ำสุดของความผิดพลาด คือ  $\frac{\partial E}{\partial A} = 0$  และ  $\frac{\partial E}{\partial B} = 0$  ในสมการที่ 3 จะได้

$$nB + (\sum X_i)A = \sum Y_i$$

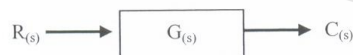
$$(\sum X_i)B + (\sum X_i^2)A = \sum Y_i X_i$$

ดังนั้น

$$A = \frac{n(\sum X_i Y_i) - (\sum X_i)(\sum Y_i)}{n(\sum X_i^2) - (\sum X_i)^2}$$

$$B = \frac{(\sum Y_i)(\sum X_i^2) - (\sum X_i Y_i)(\sum X_i)}{n(\sum X_i^2) - (\sum X_i)^2}$$

ระบบอันดับหนึ่ง (First Order System) โค้ดแอมระบบควบคุมแสดงดังรูปที่ 1 สามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ 8



รูปที่ 1 โค้ดแอมระบบควบคุม

$$C(s) = G(s)R(s)$$

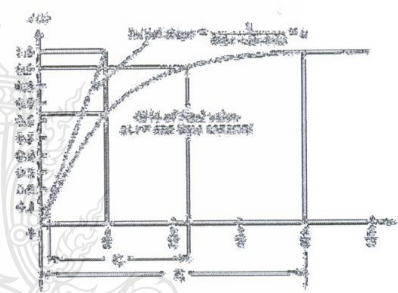
กำหนดให้อินพุตของระบบเป็นฟังก์ชันขั้นบันได (Unit Step Function) ซึ่งมีโดเมนของลาปลาซดังสมการที่ 9

$$R(s) = \frac{1}{s} \tag{9}$$

(1) ระบบเป็นอันดับหนึ่งมีโดเมนของลาปลาซดังสมการที่ 10

$$G(s) = \frac{a}{s+a} \tag{10}$$

(2) ถ้า  $a = \frac{1}{\tau}$  มีค่ามกรระบบจะเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) เร็วขึ้น โดย  $\tau$  คือค่าเวลาคงที่ (Time constant) ที่จุด  $t = \tau$  จะบ่งบอกสภาวะของระบบที่จะเข้าสู่เป้าหมาย จะมีค่าเท่ากับ 0.632 ของค่าสภาวะคงตัว (Final Value) [2] แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ผลตอบสนองระบบอันดับหนึ่งต่อสัญญาณขั้นบันได

สัญญาณเอาต์พุตของระบบอันดับหนึ่งต่อสัญญาณขั้นบันไดที่ได้แสดงในโดเมนของลาปลาซดังสมการที่ 11

$$C(s) = \frac{a}{s(s+a)} \tag{11}$$

ผลของการแปลงลาปลาซสัญญาณเอาต์พุตจะได้

$$C(t) = 1 - e^{-at} \tag{12}$$

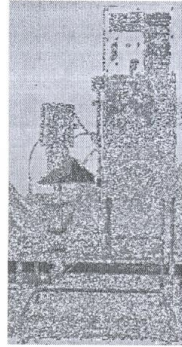
3. การทดลองและผลการทดลอง

เตาเผาถูกฝึกดังรูปที่ 3 ทำการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบให้ความร้อน โดยทดสอบระบบด้วยการป้อนสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได [3] โดยการตั้งขนาดกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหลอดความร้อนที่ 50% วัตถุประสงค์ที่เกิดขึ้นซึ่งเป็นสัญญาณเอาต์พุตทุกๆ 15 วินาที แสดงเป็นกราฟดังรูปที่ 4

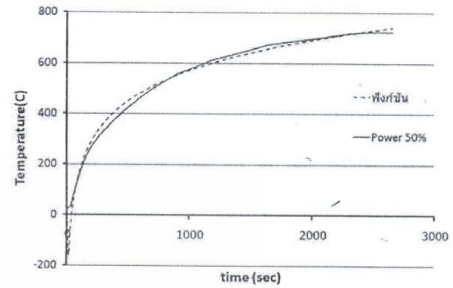
ET4\_6

การประชุมเครือข่ายวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 3 วันที่ 9 - 11 มีนาคม 2554 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

ET4\_6

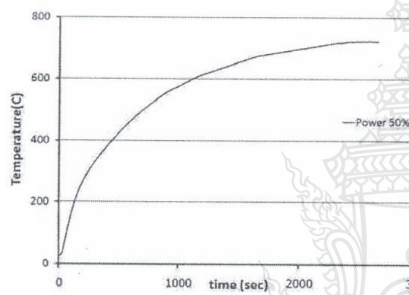


รูปที่ 3 เตาเผาที่ใช้ทดสอบ



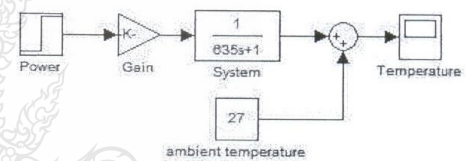
รูปที่ 5 กราฟเอาต์พุตเปรียบเทียบกับฟังก์ชัน

ค่าที่ได้เพิ่มจากอุณหภูมิห้องที่ 27 องศาเซลเซียสจะได้ค่า 477.62 องศาเซลเซียส จากกราฟจะได้ค่าเวลาที่จุดนี้ประมาณ 635 วินาที ซึ่งค่านี้จะเป็นค่าเวลากลางที่ของระบบ (T) ค่าอัตราขยายคำนวณได้จากอัตราส่วนเอาต์พุตต่ออินพุต



รูปที่ 4 กราฟเอาต์พุตที่ กำลัง 50%

$$\text{Gain} = \frac{\text{Final value}}{\text{Power input}} \quad (15)$$



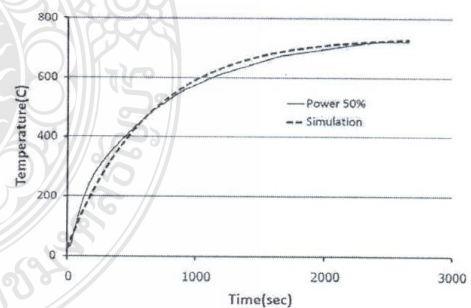
รูปที่ 6 ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ

จัดการข้อมูลด้วยระเบียบวิธีเชิงเส้นจากกราฟมีลักษณะเป็นฟังก์ชันลอการิทึมดังสมการที่ 13

$$y = A \ln x + B \quad (13)$$

ให้  $Y = y$  และ  $X = x$  จะอยู่ในรูปของสมการที่ 1 ใช้ข้อมูลจากกราฟที่จุดต่างๆ แทนลงในสมการที่ 6 และ 7 จะได้ฟังก์ชันแสดงชุดข้อมูลดังสมการที่ 14

$$y = 173.775 \ln x + 629.554 \quad (14)$$



รูปที่ 7 กราฟเปรียบเทียบระบบจริงกับฟังก์ชันถ่ายโอน

สมการที่ได้นำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบกับค่าจริงแสดงดังรูปที่ 5 พิจารณา จากกราฟพบว่าระบบอยู่ในฟังก์ชันลอการิทึมในรูปแบบระบบอันดับหนึ่ง จากอุณหภูมิห้อง 27 องศาเซลเซียสถึงค่าสถานะคงตัวอยู่ที่ 740 องศาเซลเซียส ค่าเวลากลางที่ได้จาก

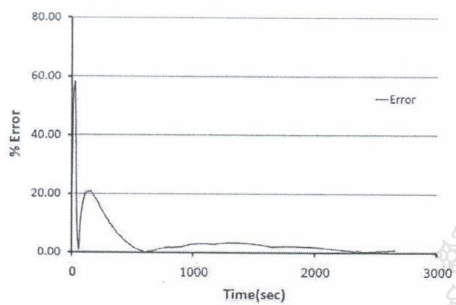
$$C_{(T)} = 0.632 \times (740 - 27) = 450.62 \text{ } ^\circ\text{C}$$

อุณหภูมิที่สถานะคงตัวของระบบเท่ากับ 713 องศาเซลเซียส ค่ากำลังอินพุตเท่ากับ 50 อัตราขยายจะได้ 14.26 เท่า ใช้ค่าต่างๆที่ได้มาสร้างแบบจำลองในโปรแกรม Simulink ของ Matlab [5] ซึ่งจะทำได้ง่ายต่อการพัฒนา ดังรูปที่ 6 เปรียบเทียบอุณหภูมิจากระบบจริงกับระบบฟังก์ชัน



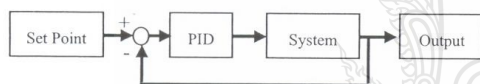
การประชุมเครือข่ายวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้าพื้นมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 3 วันที่ 9 - 11 มีนาคม 2554 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

ถ่ายโอน ซึ่งจำลองจากโปรแกรม Simulink ดังรูปที่ 7 และค่าผิดพลาดระบบจริงกับฟังก์ชันถ่ายโอนดังรูปที่ 8 ทดสอบการควบคุมระบบ โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีดังสมการที่ 16 ซึ่งพีไอดีเป็นการนำคุณสมบัติของระบบควบคุมแบบ พี, พีดีและพีไอมารวมกัน โดยสามารถกำหนดค่าอัตราขยายทั้ง 3 ชุดคือ พี, ไอและดีได้อย่างอิสระ



รูปที่ 8 กราฟค่าผิดพลาดระบบจริงกับฟังก์ชันถ่ายโอน

$$PID = K_p + \frac{K_i}{S} + K_d S \quad (16)$$



รูปที่ 9 ไลอเนกรรระบบควบคุม

ใช้บล็อกควบคุมระบบแบบพีไอดีแสดงดังรูปที่ 9 โดยใช้ค่า PID เหมือนกับระบบจริงและกำหนดรูปแบบควบคุมอุณหภูมิโดยให้สภาวะแรกเป็นสัญญาณ RAMP มีค่าอัตราเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสต่อนาทีอุณหภูมิสุดท้ายที่ 700 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบอุณหภูมิเอาต์พุตระหว่างระบบจริงและระบบจำลองพบว่าแบบจำลองนี้ให้ผลใกล้เคียงระบบจริง 93.72%

#### 4. สรุปการทดลอง

ระบบให้ความร้อนที่ใช้ในเตาเผาปลุกผลึก เมื่อทำการทดสอบระบบด้วยสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดที่กำลังไฟที่ 50% พบว่าเอาต์พุตที่ได้อยู่ในรูปของระบบอนุพันธ์อันดับหนึ่ง การตอบสนองของฟังก์ชันอินพุตได้ค่าเวลาที่ 635 วินาที นำค่าที่ได้มาสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม Simulink ทดสอบระบบด้วยฟังก์ชันขั้นบันได สัญญาณเอาต์พุตที่ได้ใกล้เคียงกับระบบจริงจากนั้นทดสอบด้วยการควบคุมแบบพีไอดี พบว่าสามารถควบคุมสัญญาณเอาต์พุตตามสัญญาณอินพุตได้ใกล้เคียงระบบจริง 93.72%

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Hongbing Chen, Ccongxin Ge, Rongsheng Li, Jinhao Wang, Changgen Wu and Xianling Eng, "Growth of lead molybdate crystals by vertical Bridgman method", Indian Academy of Sciences, Vol. 28, No. 6, pp. 555-560 October 2005.
- [2] Katsuhiko Ogata, "Modern Control Engineering", Prentice-Hall, Fourth Edition, 2001.
- [3] Kannan M. Moudgaly, "Identification of transfer function of a single board heater system through step response experiments", 2009.
- [4] Pracha Lao-Auyporn, Jakree srinonchat, Siriporn Larpiattaworn, "Development of controllable temperature gradient single crystal growth furnace", The 3<sup>rd</sup> Technology and Innovation for Sustainable Development International Conference (TISD2010), Thailand, March 4-6, 2010.
- [5] Jiayou Liu, Kun Chen, Yi Deng, "Simulation of the Atmosphere-temperature Decoupling System on Grey Predicting PID Control of the Gas-burning Roller Ceramic Kilns in SIMULINK", The Ninth International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI), pp. 742-746, 2009.
- [6] Xiao-Bin LI, Ding Liu, Shang-Bin Jiao, Jun-Xian Guo, "Intelligent PID Control System for Vacuum Annealing Furnace Workpieces Temperature", Proceedings of the Third International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Shanghai, 26-29 August 2004.
- [7] Emine Dogru Bolat, Kadir Erkan and Seda Postalcluglu, "Experimental Autotuning PID Control of Temperature Using Microcontroller", EUROCON 2005, Serbia & Montenegro, Belgrade, November 22-24, 2005
- [8] Su Zhong Kang Chunpeng Zhang Weina Xu Dawei, "Research of PID Parameter Self-Tuning Applied in Temperature Control System", The Eighth International Conference on Electronic Measurement and Instruments ICEMI'2007

ET4\_6

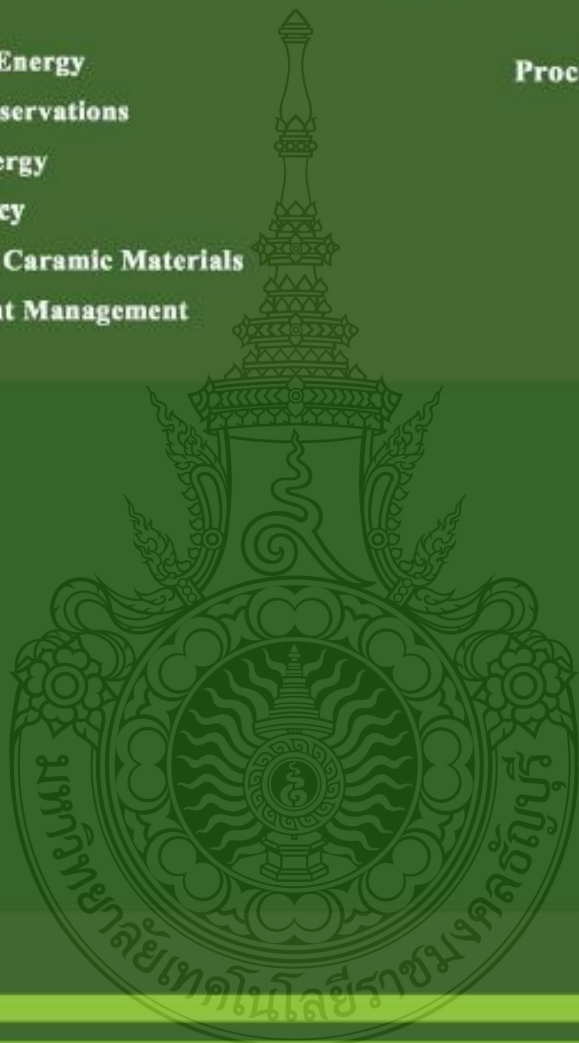
# E-NETT 2011

## การประชุมวิชาการ เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7 7<sup>th</sup> Conference on Energy Network of Thailand

- Renewable Energy
- Energy Conservations
- Applied Energy
- Energy Policy
- Energy and Caramic Materials
- Environment Management

Proceeding Volume II

Main Menu



3-5 พฤษภาคม 2554

ณ Phuket Orchid Resort and Spa หาดกะรน จังหวัดภูเก็ต

ดำเนินการโดย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



- มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- มหาวิทยาลัยศิลปากร
- มหาวิทยาลัยรังสิต
- มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- มหาวิทยาลัยพระนคร
- มหาวิทยาลัยพระนคร (วิทยาลัยพลังงานทดแทน)
- มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
- มหาวิทยาลัยทักษิณ
- มหาวิทยาลัยแม่โจ้
- มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย
- มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
- มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
- มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
- มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
- มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- มหาวิทยาลัยสยาม

ผู้ทรงคุณวุฒิเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย



ชื่อ	นามสกุล	มหาวิทยาลัย/สถาบันองค์กร
ศ.ดร.บดินทร์	เอื้ออากรณ์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศ.ดร.บดินทร์	เอื้ออากรณ์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศ.ดร.ทองเกียรติ	เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศ.ดร.ผดุงศักดิ์	รัตนะเดโช	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
ศ.ดร.สมชาติ	โรจนรณฤทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.วิวัฒน์พงศ์	รักขวิเชียร	มหาวิทยาลัยเกษตร
รศ.ดร.นภาพร	สงค์ธนาพิทักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.ชูวิทย์	ดวงเดือน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.อุบลเกียรติ	นพเทแก้ว	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.ธนาคม	สุนทรชัยนาคแสง	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.สินชัย	ฉันทวิทย์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.พิณ	งามสม	มหาวิทยาลัยรังสิต
รศ.ดร.วิภา	บงเจริญ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.คณิต	วิวัฒน์จิตร	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.วราวุฒ	เศียร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.พงษ์เจต	พรหมวงษ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.ชาวุฒ	เจริญสุข	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.สมเกียรติ	เอี่ยมผลอด	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
รศ.ดร.เสริม	จิฬหิธราม	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
รศ.ดร.สมวีร์	เกิดสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รศ.ดร.ธนาชัย	ภูธรวรรณพงษ์	มหาวิทยาลัยสุรนารี
รศ.ดร.สุภาวดี	จงใหญ่ชัยพัฒน์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
รศ.ดร.อติศักดิ์	นาถกรณภัก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.ธัชชา	ศักดิ์ภักดิ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รศ.ดร.ลักขมณ	เทพทัศน ๗ ธนธนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.สุรชัย	มีจฉายิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.สมวีร์	เกิดสุวรรณ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.ศิริชัย	เทพา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.เวทิน	ปิยทัศน์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผศ.ดร.สมชัย	กิติยวโรจน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สมหมาย	ผิวธาดา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ทองเกียรติ	นาคะวิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.ภาวดี	ศักดิ์สุนทรศิริ	มหาวิทยาลัยบูรพา
ผศ.ดร.เจริญพร	เอื้อศักดิ์ธนากร	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร.ณัฐพร	ภูมิระชา	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผศ.ดร.กุลเชษฐ์	เพ็ญทอง	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผศ.ดร.ฮาพิทักษ์	ทิบุญมา	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผศ.ดร.ชวดี	ธินวงศ์พิทักษ์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผศ.ประชาตินิติ	โคตรสุทธิ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผศ.ดร.นภาพ	อ่วมไทรพัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ชื่อ	นามสกุล	มหาวิทยาลัย/สถาบันองค์กร
ผศ.ดร.ศิกะ	บุญภาค	มหาวิทยาลัยสุโขทัยวังคังคีย์
ผศ.ดร.ไชยอนรงค์	จักรธรรมาพันธ์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์วังคังคีย์
ผศ.ดร.อนิษฐา	ศศิธราวุฒินันท์	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรคังคีย์
ผศ.ดร.ณัฐวุฒิ	คุงุญ	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ผศ.ดร.สุชาติ	พระเมือง	มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย
ผศ.ดร.สุนทรวีพร	ควงใหญ่	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
ผศ.ดร.สมบุญ	สารสิทธิ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.สมชาย	มณีวรรณ	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผศ.ดร.นวิศ	ประทีปทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.มัยอังกิ	เนืองมณี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.ชัยอนท	ธงชัยสุริยศักดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.สุธรรม	ปทุมสวัสดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.มัญญา	คังคังคัง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผศ.เกียรติชัย	รักษาชาติ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผศ.ดร.กิตติ	สถาพรประสาธน์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผศ.ดร.กัญญาณา	กัญญา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.ศิวะ	อังกุญชรวิริยะ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผศ.ดร.กมลชวัญ	นามสิงวน	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผศ.ดร.อัครชัย	นิลเมธ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.ณัฐ	ภาคย์มณีพันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.นิพนธ์	เกตุชัย	วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผศ.ดร.วราวุฒิ	อรรษวิริยะนันท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.อาทิตย์	โศภร์โษณ	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
ดร.กมลศักดิ์	ศิริประภา	สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
ดร.อนุสรณ์	แสงประจักษ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ดร.ประภาพงษ์	วางทุกชัย	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
ดร.พิสิษฐิ	มณีใจดี	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.ประทีปชัย	ธนาวิทย์	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.มัญญา	วิเศษไช	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์วังคังคีย์
ดร.วิภา	องประอร	มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลัง
อ.อรรค	วิเชียรณัฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อ.วิภา	พวงสนมณี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ดร.สุชฉติ	สุขใจ	วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.วรส	วิระชัย	คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.จันทนา	กัญชรวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.ศิริษฐ	จินดาวิทย์	คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.นพวัฒน์	นางคณนง	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ
ดร.ชนากานต์	ธนาสุจริศ	มหาวิทยาลัยสยาม
ดร.อัมพร	กัญชรวรรณ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

## ผู้ทรงคุณวุฒิเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย

E-NETT 2011

Main Menu

ชื่อ	นามสกุล	มหาวิทยาลัย/สถาบัน/องค์กร
อ.วิศนากร	ระวีงกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อ.บริสุทธิ	สุทธิรงค์	สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
ดร.วิรัช	โรจนรินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.สถาพร	ทองวิศ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.กฤษณ์จันทน์	ภูมิภักดิ์พิชญ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.สุรินทร์	แพงมงาม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.วินัย	จันทร์เพ็ญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.สโรชา	เจริญชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.ฉวีทิพย์	อัครวิมล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.ฉวีทิพย์	ศานวณทิพย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.ฉวีชัย	วิระนิตยกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.สุนนภาภรณ์	เนืองกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.จักรี	ศรีนพหัตถ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
อ.ประจุม	คำหุต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.ณรงค์ชัย	โรเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.พงษ์ศักดิ์	ฮาภา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.อำนาจ	เรืองวารี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.ณัฐภัทร	พันธ์สง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.ศิริชัย	ศอศกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.บุญนิง	ปัสถ์กลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.สราภรณ์	ภาสุภีย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.ภักดิ์	สถาพรประสาธน์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ดร.วิษณุกร	จารศิริ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ดร.ธานีณี	ตม่อม	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ดร.ธำชรี	ศุภสิริกุล	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ดร.ณภัทร	คัมภีร์วงกุล	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ดร.ฉวีพนา	พันธ์เชือก	มหาวิทยาลัยเกษตร
ดร.วรัทัศน์	นิลประกร	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ดร.วิศิษฐ์	อิตาณาศกุล	มหาวิทยาลัยสยาม
ดร.พิริยะ	รักความสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.ณรงค์	อังกนิมาน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.ชาอุณวงศ์	อัศวเตจนาภา	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ดร.ชลธิศ	เอี่ยมวรพัตกุล	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ดร.วรรณิ	เอกศิณี	มหาวิทยาลัยศรีวิไล
ดร.ประชา	บุญยวานิชกุล	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ดร.ธานีณี	ตม่อม	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
อ.อำนาจ	ผลุงศิณี	มหาวิทยาลัยสุโขทัย
นายอำนาจ	องคศิณี	กระทรวงพลังงาน
ดร.บุษผา	ชาสุพรรณ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

## สารบัญ

หน้า

Session ประเภท เวลา ห้องบรรยาย	Energy Conservations 04 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สลิททิพย์ สีนุสนธิชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร 14:00-15:45 วันพุธ ที่ 4 พฤษภาคม 2554 Orchid D	
DEN25	การศึกษาระบบให้ความร้อนในเตาปลูกผลึกสำหรับวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ประเภท เซลล์อวพร' จักริ ศรีเนห์ฉัตร ศิพร สาเกษรติถาวร' มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย เทคโนธานี	878
DEN26	การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเตาอาร์คไฟฟ้าโดยการปรับปรุง ส่วนประกอบทางเคมีของสแลก ณัฐเดช เพ็ญจวงษ์ ศะวิเนภาพจน์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	880
DEN27	การวิเคราะห์ผลกระทบของตำแหน่งการเปิดปิดประตูยั้งเหล็กที่มีต่อความดัน ภายในเตาเผาเหล็ก จิตสัน แสงท้อย สันนพท จันทราวรัตน์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	888
DEN28	การควบคุมระบบจัดการพลังงานเพื่อประหยัดพลังงานของเครื่องปรับอากาศ สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 ธานี ใจประติษฐิธรรม' อีรพันธ์ สุทธิเทพ' สุรัชย์ วงษ์เกียรติ' มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา	894
DEN29	ระบบควบคุมและจัดการพลังงานสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน สมพล โคศิริ บุญยัง ปดิ่งกลาง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	899
DEN30	การศึกษาแนวทางการอนุรักษ์พลังงานสำหรับเครื่องทำน้ำเย็น สมพล สุขชนะ ชัยวัฒน์ ใจบุญมา สุรัชย์ ทรัพย์ธนาบุรณ์ กฤษฎากร แก่นดา มหาวิทยาลัยปทุมธานี	903

### การศึกษาระบบให้ความร้อนในเตาปลูกผลึกสำหรับวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

### The study of heating system in crystal growth furnace for thermoelectric material

ประชา เสงี่ยมพร<sup>1,2</sup> จักร ศรีพงษ์ดี<sup>1</sup> และ ศิพร ธาภิเกียรติ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

E-mail: pracha@itb.tu.ac.th, jaksree\_s@hotmail.com

<sup>2</sup>สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย เทคโนธานี ตำบลคลองห้า อำเภอกองกระหวาง จังหวัดปทุมธานี 12120

E-mail: slarpkia@yahoo.com

Go Back

#### บทคัดย่อ

กระบวนการสร้างวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกต้องใช้เตาปลูกผลึกสำหรับปลูกผลึกเดี่ยว คุณสมบัติของวัสดุที่สังเคราะห์มาจากกระบวนการดังกล่าว ซึ่งต้องมีการควบคุมอุณหภูมิที่เหมาะสม การทำงานแบบจำลองระบบจริงจะช่วยให้การควบคุมอุณหภูมิถูกต้องยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้ เป็นการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์แบบจำลองของระบบให้ความร้อนของเตาปลูกผลึกด้วยโปรแกรม Simulink โดยทดสอบระบบจริงด้วยสัญญาณ Unit step function ซึ่งให้ผลตอบสนองเป็นแบบ First Order System มีค่าเวลาคงที่และอัตราขยายที่ 630 วินาที และ 11.25 สหคูณตามลำดับ เมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่โปรแกรมจำลองช่วยแก้ไขค่าพารามิเตอร์ของโมเดลได้ใกล้เคียงค่าพารามิเตอร์ของระบบจริง 58% เมื่อทำการปรับปรุงระบบโดยการสร้างฟังก์ชันอัตราขยายใหม่โดยใช้ Linear regression พบว่าแบบจำลองที่ใช้อัตราขยายใหม่ช่วยให้ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองใกล้เคียงค่าพารามิเตอร์ของระบบจริง 81 %

คำสำคัญ: ฟังก์ชันถ่ายโอน, การทดลองแบบจริง, ระบบอันดับหนึ่ง

#### Abstract

The process of thermoelectric material building must use single crystal growth furnace. The temperature control of melting is one of the main factors on determining the perfect properties of material. The modeling of the actual system will help control the temperature more accurate. This research is to improve the parameter model of heating system of single crystal growth furnace by Simulink Program. The actual system was tested by using Unit step function signals which can operate output as first order system with a time constant and gain at 630 seconds and 11.25 times, respectively. When used this parameters in model system, the output of model system will be close to the output of the actual system 58%. Besides, the system was improved by creating a new gain function by using

the linear regression. It was found that the output of the model system will be close to the actual 81%.

Keyword: Transfer function, Linear regression, First order system

#### 1. คำนำ

วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก เป็นอุปกรณ์ Transducer ใช้เปลี่ยนแปลงพลังงานจากพลังงานไฟฟ้าเป็นอุณหภูมิหรือเป็น และ สามารถเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ การสร้างวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ต้องมีการควบคุมการอุณหภูมิและทำให้เกิดการขึ้นตัว จากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งอย่างช้าๆ [6] กระบวนการนี้จำเป็นต้องใช้เตาปลูกผลึกที่มีการสร้างและควบคุมอุณหภูมิที่ถูกต้อง และเหมาะสม เตาปลูกผลึกประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกควบคุมอุณหภูมิ ใช้อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิสังสัญญาณไปยังอุปกรณ์จ่ายกำลังไฟฟ้า ให้จ่ายกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมให้กับอุปกรณ์ให้ความร้อน มีการวัดอุณหภูมิสังสัญญาณย้อนกลับให้แก่อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิโดยเทอร์โมคัปเปิล เตาปลูกผลึกแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 เตาปลูกผลึก

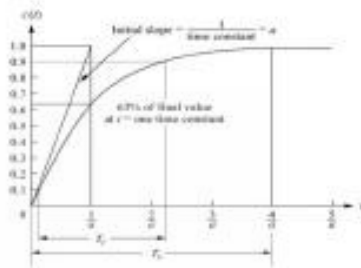
มีงานวิจัยการควบคุมอุณหภูมิเกิดขึ้นอย่างกว้างขวาง ในปี 2004 มีการนำเสนอการควบคุมอุณหภูมิของเตาแบบสัญญาณการควบคุม adaptive โดย genetic algorithm [4] ปี 2005 มีการทดลองควบคุมอุณหภูมิของเตาอบโดย ฟังก์ชันการทดสอบเป็น FOPDT

DEN25



Go Back

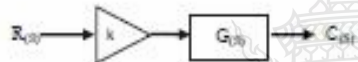
(First Order Plus Dead Time) ใช้โมเดลอนุกรมอันดับหนึ่งในการควบคุมแบบสัดส่วนเพื่อหาจุดที่เหมาะสมในการควบคุมแบบ PI และ PID [5] ปี 2007 มีการนำเสนอ PID self-tuning control algorithm โดยวิธีการRecursive Least Squares และประเมินการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์แบบออนไลน์ [2] การพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติให้รวดเร็วจำเป็นต้องทราบพารามิเตอร์เฉพาะของระบบนั้น โดยการทดสอบระบบด้วยการจ่ายสัญญาณขั้นบันไดในวิธีต่างๆ วิธีการทดสอบระบบด้วยสัญญาณขั้นบันได Unit Step Function [3] เป็นอีกวิธีการหนึ่งในการหาพารามิเตอร์ของระบบและในปัจจุบันมีการใช้โปรแกรม Matlab Simulink ในการจำลองระบบ ทำให้สามารถพัฒนาระบบควบคุมได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว โดยค่าผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองสามารถใช้งานได้เหมือนระบบจริง



รูปที่ 2 ผลตอบสนองระบบอันดับหนึ่งต่อสัญญาณขั้นบันได

2. ทฤษฎี

ระบบอันดับหนึ่ง (First Order System) โดยสมการระบบควบคุมแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 โดยสมการระบบควบคุม

สามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ 1

$$C(s) = G(s)R(s) \tag{1}$$

กำหนดให้อินพุตของระบบเป็นฟังก์ชันขั้นบันได (Unit Step Function) ซึ่งมีโพลของระบบอยู่ที่สมการที่ 2

$$R(s) = \frac{1}{s} \tag{2}$$

ระบบเป็นอันดับหนึ่งมีโพลของระบบอยู่ที่สมการที่ 3

$$G(s) = \frac{k}{s+a} \tag{3}$$

ค่าอัตราขยาย (k) สามารถได้จากอัตราส่วนเกาต์ของอินพุต

$$k = \frac{\text{Final Value}}{\text{Input}} \tag{4}$$

ถ้า  $a = \frac{1}{T}$  มีค่าการตอบสนองเข้าสู่ภาวะคงตัว (Steady state) เร็วขึ้น โดย T คือค่าเวลาคงที่ (Time constant) ของปฏิกิริยาของระบบที่เข้าสู่อุปสรรค ที่จุด  $T = T$  จะมีค่าเท่ากับ 0.632 ของค่าการคงตัว (Final Value) [1] แสดงดังรูปที่ 2

สัญญาณเกาต์ของระบบอันดับหนึ่งต่อสัญญาณขั้นบันไดที่ได้แสดงในโดเมนของเวลาปรากฏดังสมการที่ 5

$$C(s) = k \frac{1}{s(s+a)} \tag{5}$$

ผลของการแบ่งรณาสัญญาณเกาต์จะได

$$C(s) = k(1 - e^{-st}) \tag{6}$$

การทดสอบแบบเชิงเส้น (Linear regression) เป็นระเบียบวิธีที่ใช้ในการสร้างฟังก์ชันเส้นตรงสำหรับชุดของข้อมูล ประกอบด้วย x,y โดยที่ i = 1, 2, ..., n ซึ่งจะสร้างสมการเส้นตรงในรูปของ

$$Y = AX + B \tag{7}$$

ค่าความผิดพลาดทั้งหมดที่เกิดจากข้อมูล n ข้อมูล จะได้

$$E = \sum (Y_i - F(X_i))^2 \tag{8}$$

แทนค่า y(x) จาก (7) ลงใน (8)

$$E = \sum (Y_i - (AX_i + B))^2 \tag{9}$$

หาค่า A และ B ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด โดยการหาค่าต่ำสุดของค่าความผิดพลาด คือ  $\frac{\partial E}{\partial A} = 0$  และ  $\frac{\partial E}{\partial B} = 0$  ในสมการที่ 9 จะได้

$$nB + (\sum X_i)A = \sum Y_i \tag{10}$$

$$(\sum X_i)B + (\sum X_i^2)A = \sum Y_i X_i \tag{11}$$

ดังนั้น

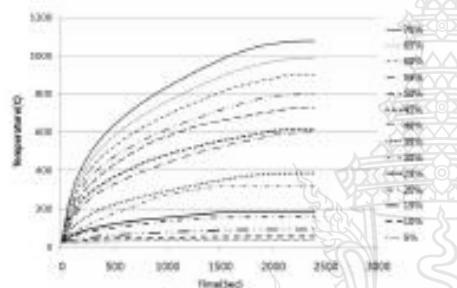
Go Back

$$A = \frac{n(\sum X_i Y_i) - (\sum X_i)(\sum Y_i)}{n(\sum X_i^2) - (\sum X_i)^2} \quad (12)$$

$$B = \frac{(\sum Y_i)(\sum X_i^2) - (\sum X_i Y_i)(\sum X_i)}{n(\sum X_i^2) - (\sum X_i)^2} \quad (13)$$

3. การทดลองและผลการทดลอง

ทดสอบระบบให้ความร้อน ด้วยการจ่ายสัญญาณ Unit Step Function ที่กำลังระดับ 5 ถึง 70 % โดยเพิ่มกำลังครั้งละ 5% เมื่อถึงอุณหภูมิเสถียรทุกๆ 10 วินาที ได้ผลดังรูปที่ 3



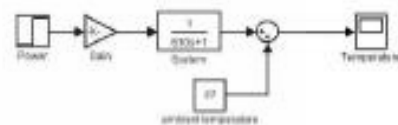
รูปที่ 3 การให้อุณหภูมิเสถียรที่สุด

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของระบบ

Power Input (%)	Final Value	Time Constant	Gain
5	8	670	7.00
10	31	490	5.80
15	65	660	6.18
20	129	600	7.80
25	156	570	7.32
30	205	670	10.73
35	358	800	10.23
40	573	740	15.00
45	589	610	13.68
50	700	610	14.54
55	772	630	14.53
60	875	640	14.58
65	958	620	15.15
70	1051	610	15.01
Average	-	630	11.25

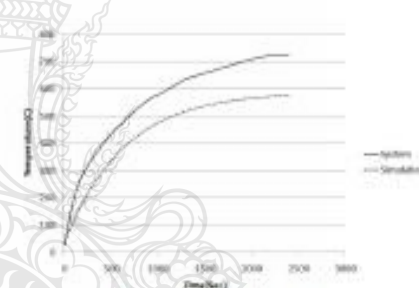
จากการให้อุณหภูมิเสถียรที่สุดพบว่า สัญญาณคอนสแตนท์ของระบบคือ สัญญาณ Unit Step Function มีลักษณะเป็นแบบ First Order System เมื่อระบบเข้าสู่ภาวะคงตัว (Steady state) จะพบค่าสุดท้าย (Final

Value) ในแต่ละระดับของการทดลอง ใน First Order System มีพารามิเตอร์ที่สำคัญคือค่าเวลาคงตัวของระบบ (Time constant) หาได้จากเวลาที่ให้ผลอุณหภูมิเสถียรที่สุดมีค่า 0.632 ของอุณหภูมิค่าสุดท้าย และค่าอัตราขยาย ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนระหว่างอุณหภูมิสุดท้ายต่อค่ากำลังอินพุตของตัวตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยของค่าเวลาคงที่และค่าอัตราขยายของระบบนี้จะได้ 630 วินาที และ 11.25 เท่าตามลำดับ ใช้ค่านี้ใส่ลงในแบบจำลอง First Order System ใน Simulink Program ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แบบจำลองของระบบ

ทำการทดลอง Simulation ที่ 50% input power ให้อุณหภูมิเสถียรที่สุดเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิจริงกับอุณหภูมิของแบบจำลองดังรูปที่ 5



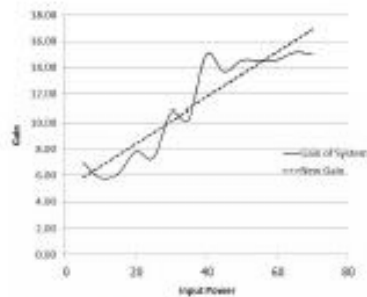
รูปที่ 5 อุณหภูมิเสถียรที่สุดที่ 50% input power

พบว่ากราฟที่ได้ผลพลออกจากระบบจริงเฉลี่ย 21% ส่วนหนึ่งเกิดจากอัตราขยายที่ระดับ 50% กับอัตราขยายเฉลี่ยแตกต่างกันมาก จึงนำผลการคำนวณค่าพหุนามฟังก์ชันค่าอัตราขยายใหม่โดยใช้ Linear regression โดยนำ  $x = \text{input power}$  และ  $y = \text{gain}$  ใช้สมการที่ 10 ถึง 13 ในการหาค่าตัวแปร A และ B ทำให้ได้สมการที่ 7 จะได้ตัวสมการที่ 14 และกราฟเปรียบเทียบอัตราขยายใหม่กับอัตราขยายจริงดังรูปที่ 6

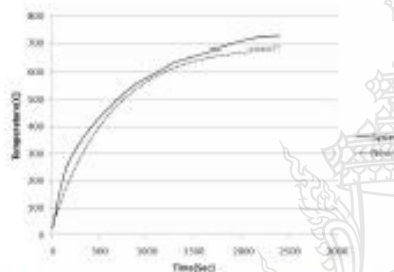
$$7 = 0.17X + 4.99 \quad (14)$$

ใช้ค่าอัตราขยายใหม่แทนลงในแบบจำลองรูปที่ 4 แล้วทำการ Simulation อีกครั้งได้ผลดังรูปที่ 7 ค่าผิดพลาดของอุณหภูมิเสถียรที่สุดจากแบบจำลองก่อนและหลังปรับรู้อัตราขยายเปรียบเทียบกัน อุณหภูมิจากระบบจริงดังรูปที่ 8

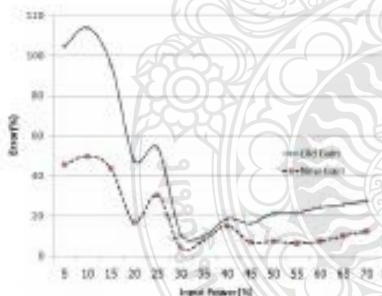
Go Back



รูปที่ 6 กราฟเปรียบเทียบอัตราขยายใหม่กับอัตราขยายจริง



รูปที่ 7 อุณหภูมิเข้าสู่จุดที่ 50% Input power โดยใช้อัตราขยายใหม่



รูปที่ 8 ค่าผิดพลาดของระบบก่อนและหลังปรับปรุงอัตราขยาย  
 เปรียบเทียบกับอุณหภูมิจากระบบจริง

**4. สรุป**

อุณหภูมิเข้าสู่จุดของระบบให้ความร้อนตัวอย่าง ถูกทดสอบระบบด้วย สัญญาณ Unit step function พบว่าเป็น First Order System เมื่อทำการจำลองระบบและจำลองระบบไปนแกรม อินฟีนิตี้ โดยใช้ค่าเฉลี่ยของค่าเวลาคงที่และอัตราขยายที่ 830 วินาที และ 11.25 เท่าตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิเข้าสู่จุดของระบบจริงกับแบบจำลองเกิดค่าผิดพลาดเฉลี่ย 42% เมื่อทำการปรับปรุงระบบโดย

การใช้ Least square regression สร้างฟังก์ชันอัตราขยายใหม่เป็น  $Gain = 0.17 \times Input\ Power + 4.99$  พบว่าแบบจำลองที่ใช้มีอัตราขยายใหม่ใช้ควบคุมค่าผิดพลาดเฉลี่ยถึงเหลือ 19 %

**เอกสารอ้างอิง**

- [1] Katsuhiko Ogata, "Modern Control Engineering", Prentice-Hall, Fourth Edition, 2001.
- [2] Su Zhong Kang Chungpeng Zhang Weihs Xu Dawei, "Research of PID Parameter Self-Tuning Applied in Temperature Control System", The Eighth International Conference on Electronic Measurement and Instruments ICEM'2007
- [3] Kannan M. Moudgaly, Indrepreet Arora, "A virtual laboratory for distance education", Technology for Education (T4E) 2010 International Conference on, Mumbai, 1-3 July 2010
- [4] Xiao-Bin Li, Ding Liu, Shang-Bin Jiao, Jun-Qian Guo, "Intelligent PID Control System for Vacuum Annealing Furnace Workpiece Temperature", Proceedings of the Third International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Shanghai, 26-29 August 2004.
- [5] Emine Dogru Bolat, Kadir Erkan and Seda Postalcioglu, "Experimental Autotuning PID Control of Temperature Using Microcontroller", EUROCON 2005, Serbia & Montenegro, Belgrade, November 22-24, 2005
- [6] J. Laoaboon, R. Laoaboon, J. Intara-prasut, S. Pancharee, C. Eamchai-chewell, "Thermoelectric properties of Bi<sub>0.48</sub>Sb<sub>1.52</sub>T<sub>63</sub> materials prepared by Bridgman method", การประชุมเชิงวิชาการระดับชาติเพื่อพัฒนาระบบนิเทศศาสตร์ ปีที่ 7, โรงแรมนิคมพัฒนา กรุงเทพมหานคร 23-25 พฤษภาคม 2554

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	นายประชา เหล่าอวยพร
วัน เดือน ปีเกิด	7 มิถุนายน 2522
ที่อยู่	199/39 หมู่ 4 ต.รังสิต อ.ธัญบุรี จ. ปทุมธานี
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการวัดและระบบวัดคุม จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปี พ.ศ.2544
ประสบการณ์การทำงาน	พ.ศ. 2545-ปัจจุบัน นักทดลองวิทยาศาสตร์วิจัย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

