

เตาอบชุบโลหะแบบความต้านทาน

Resistance Heating Furnace



นาย พรชัย ตังจิตปรารณา

Mr. Pornchai Tangchitprattana

เลขที่.....
เลขทะเบียน... 45797
วัน, เดือน, ปี... 18 ก.พ. 2546

b.....
i.....

ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์ เตาอบชุบโลหะแบบความต้านทาน
Resistance Heating Furnace
นักศึกษา นายพรชัย ตั้งจิตปรารถนา
รหัสประจำตัว 41014688
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา 2544
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์

(ผศ.พรศักดิ์ อรรถวานิช)

(อ.พลชัย โชติปราชญ์กุล)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	เตาอบชุบโลหะแบบความดันทาน
นักศึกษา	นายพรชัย ตั้งจิตปรารถนา
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
ปีการศึกษา	2544
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	ผศ.พรศักดิ์ อรรถวานิช อาจารย์ พลชัย โชติปราชญกุล

บทคัดย่อ

การออกแบบสร้าง เตาอบชุบโลหะแบบความดันทานซึ่งนิยมใช้กันอยู่ในอุตสาหกรรม เตาอบที่สร้างขึ้นใช้ลดความดันทานเป็นแหล่งกำเนิดความร้อน โดยการเปลี่ยนจากพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับความต่างศักย์ 220 โวลต์ 3 เฟส โดยใช้ฮีตติ้งไฟและเซรามิกไฟเบอร์บุผนังของเตา สำหรับป้องกันการสูญเสียความร้อน อุณหภูมิใช้งานสูงสุดเท่ากับ 1000 องศาเซลเซียส โดยการควบคุมผ่านวงจรควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิตอล และใช้เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K

การทำงานของเตาที่จัดสร้างขึ้นสามารถทำอุณหภูมิได้ถึงตามที่ต้องการ จากการทดสอบโดยอัตราการให้ความร้อนต่อหน่วยเวลาอยู่ที่ 6.56 กิโลวัตต์และมีประสิทธิภาพของฉนวนความร้อนขณะสภาวะคงตัว 36.31 เปอร์เซ็นต์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Resistance Heating Furnace
Student	Mr. Pornchai Tangchitprattana
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Industrial Engineering
Year	2001
Thesis Advisor	Asst. Prof. Pomsak Attavanich Mr. Pholachai Chotipraynakul

ABSTRACT

This article deals with designed construction of a Resistance Heating Furnace. The resisting coil generates heat by using 3 phase 220 volt electric energy. The insulating bricks and ceramic fiber are applied to protect heat loss. The maximum temperature produced 1000 °C. The Resistance Heating Furnace is controlled by Digital temperature controller and measured with thermocouple type K.

The performance of the Resistance Heating Furnace is designed to control temperature as required. According to tests utilizing condition at 6.56 kilowatt heating rate, it provides insulation efficiency equivalent to 36.31 percent at 800 °C steady state.

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำปฏิญานិพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยการได้รับความเมตตาอย่างยิ่งจากอาจารย์ผู้ควบคุมปฏิญานิพนธ์ ศ.ศ.พรศักดิ์ อรรถวานิช และ อาจารย์ พลชัย โชติปราชญ์กุล ในการให้คำแนะนำและการช่วยเหลือปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆจนเป็นที่เรียบร้อย ผู้จัดทำรู้สึกได้ถึงความหวังดีและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณท่านอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาอุตสาหกรรมที่คอยเอาใจใส่ เป็นห่วงและคอย ตักเตือน ให้คำแนะนำเรื่องการทำงานของผู้จัดทำ

ขอขอบคุณ นางสาวกุลลดา จันทร์คุปต์ และ นายอนุศาสตร์ เทบตาม เพื่อนนักศึกษาที่คอยให้ความช่วยเหลือกันอย่างจริงใจและขอขอบคุณเพื่อนนักศึกษาทุกคนที่ฝ่าฟันอุปสรรคมาด้วยกัน

ขอขอบคุณ คุณพิชิต เกิดहित วิศวกรบริษัทอัลลายด์เทค(ประเทศไทย)จำกัดที่ให้คำปรึกษาและแนะนำในการสร้างเตาอบ

ขอขอบคุณ คุณพิชิต มุกดา ช่างเทคนิคสาขาไฟฟ้า บริษัท ทีแอลเอช เอนจิเนียริง ที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับระบบควบคุมของเตาอบ

ขอขอบคุณบิดา มารดา พี่ชาย และพี่สาวของข้าพเจ้าที่ได้สั่งสอน อบรม และให้การศึกษามาถึงทุกวันนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาอุตสาหกรรมอีกครั้ง และอาจารย์ผู้ที่เคยให้ความรู้ ความรัก และการเอาใจใส่ข้าพเจ้าในวัยเยาว์ตั้งแต่สมัยอนุบาล ประถมศึกษา มัธยมศึกษา อุดมศึกษา ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

นาย พรชัย ตังจิตปรารณา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญภาพ	VIII
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตการศึกษา	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	1
บทที่ 2 ทฤษฎี และหลักการที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน	2
2.1.1 การพาความร้อน	2
2.1.2 การนำความร้อน	3
2.1.3 การแผ่รังสี	6
2.1.4 การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อนรวมกัน	7
2.2 ระบบไฟสามเฟส	11
2.2.1 การต่อแบบวาย	11
2.2.2 การต่อแบบเดลตา	12
2.2.3 กำลังบนระบบ 3 เฟส	12
2.3 การควบคุมแบบอัตโนมัติ	13
2.3.1 การควบคุมแบบ ON-OFF	14
2.4 เทอร์โมคัปเปิล	16
2.4.1 หลักการของเทอร์โมคัปเปิล	16
2.4.2 กฎการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากความร้อน	17
2.4.2.1 กฎของวงจร โลหะชนิดเดียว	17
2.4.2.2 กฎของโลหะแทรก	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2.3	กฎของอุณหภูมิแทรก	17
2.4.3	เทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐาน	17
2.4.4	Reference Junction	19
2.4.5	การเชื่อมหัวเทอร์โมคัปเปิล	20
2.4.6	การประกอบหัวเทอร์โมคัปเปิลเข้ากับท่อ	21
2.4.6.1	แบบเปลือย	21
2.4.6.2	แบบ Ground Junction	21
2.4.6.3	แบบ Ungrounded Junction	21
2.4.7	สายสำหรับต่อกับหัววัดเทอร์โมคัปเปิลและอาร์ทีดี	23
2.5	หลักการของฮีตเตอร์	25
2.6	การออกแบบเตาอบชุบไฟฟ้า	26
2.6.1	หลักเกณฑ์ทั่วไป	26
2.6.2	อุณหภูมิของเตาอบชุบโลหะไฟฟ้า	26
2.6.3	ปริมาตรภายในเตาอบ	27
2.6.4	กำลังไฟฟ้า	27
2.6.5	แรงเคลื่อนไฟฟ้า	27
2.6.6	ภาระที่ผนังเตา	27
2.6.7	ภาระที่ผิวของตัวต้านทาน	28
2.6.8	ช่วงอายุใช้งานและอุณหภูมิสูงสุด	31
2.6.9	รูปร่างของตัวต้านทาน	32
2.6.10	การเปลี่ยนแปลงความต้านทานกับอุณหภูมิ	32
2.6.11	การออกแบบขดลวด	33
2.6.11.1	สูตรในการหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดที่เหมาะสม	33
2.6.11.2	การออกแบบลวดชนิดขดเป็นขดลวด	33
2.6.11.3	การคำนวณขนาดขดลวด D	33
2.6.11.4	สำหรับสูตรหาจำนวนขดลวด เมื่อทราบความยาว	34
2.6.12	การต่อระบบไฟฟ้า	34
2.6.13	การสูญเสียความร้อนในเตาอบ	34
2.6.13.1	การสูญเสียความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม	34
2.6.13.2	สูญเสียไปกับผนังซึ่งเป็นฉนวนกันความร้อน	34
2.6.13.3	การสูญเสียความร้อนที่สภาวะสมดุล	35
2.6.13.4	การสูญเสียความร้อนซึ่งผ่านมาจากผนังเตา	36
2.6.13.5	การสูญเสียความร้อนขณะทำงานเป็นช่วง	36
2.6.13.6	การสูญเสียความร้อนเนื่องจากการลัดทางวงจร	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.13.7	ความร้อนที่สูญเสียไปกับวัสดุที่ยื่นออกมานอกเตา	37
2.6.13.8	ความร้อนที่สูญเสียไปทางช่องเปิดต่าง ๆ ของเตา	37
บทที่ 3 การดำเนินงาน		
3.1	การวางแผนการดำเนินงาน	38
3.2	การออกแบบสร้างเตาอบ	38
3.2.1	กำลังไฟฟ้าที่ใช้กับเตาอบไฟฟ้า	38
3.2.2	ขนาดของลวดต้านทาน	39
3.2.3	ร่องใส่ลวดต้านทาน	39
3.2.4	การออกแบบประตูเตา	40
3.3	วัสดุส่วนประกอบของโครงเตา	40
3.3.1	อิฐทนไฟขนาดมาตรฐาน	40
3.3.2	จนวนกันความร้อนเซรามิกไฟเบอร์	42
3.3.2.1	เซรามิกไฟเบอร์แบบกระดานแข็ง	42
3.3.2.2	เซรามิกไฟเบอร์แบบฟีน	43
3.3.2.3	เซรามิกไฟเบอร์แบบก้อนฝอย	44
3.3.3	ปูนทนไฟ	45
3.3.3.1	ประเภทของปูนทนไฟ	45
3.3.3.2	การเตรียมปูนทนไฟ	45
3.3.3.3	การทดสอบความเหนียว	46
3.3.3.4	การใช้งาน	46
3.3.3.5	การเปิดเตาครั้งแรก	46
3.3.3.6	การเก็บรักษาปูนทนไฟ	46
3.3.4	เหล็ก	47
3.3.5	เทอร์โมคัปเปิล	47
3.3.6	ลวดต้านทาน	48
3.4	การสร้างเตาอบไฟฟ้า	48
3.5	การเลือกชนิดของการควบคุม	48
3.6	เครื่องวัดและควบคุมอุณหภูมิ รุ่น CAL 9900	49

บทที่ 4 ผลการทดลองและสรุปผล

4.1	การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ	51
4.1.1	ทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่อุณหภูมิ 500 °C	51
4.1.2	ทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่อุณหภูมิ 600 °C	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3	ทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่อุณหภูมิ 700 °C	57
4.1.4	ทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่อุณหภูมิ 800 °C	60
4.2	การหาประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิใดๆ	
4.2.1	หาประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 500 °C	63
4.2.2	หาประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 600 °C	66
4.2.3	หาประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 700 °C	68
4.2.4	หาประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 800 °C	70
4.3	สรุปผลการทดลอง	72

บทที่ 5 สรุปของโครงการ

5.1	สรุปผลที่ได้จากโครงการ	73
5.2	การบรรลุวัตถุประสงค์จากการทำโครงการ	73
5.3	ปัญหาที่พบระหว่างการปฏิบัติงาน	73
5.4	แนวทางการพัฒนาและปรับปรุง	73
บรรณานุกรม		75
ภาคผนวก ก	รายละเอียดต่างๆในการทำเตาอบไฟฟ้า	ก 1 - 21
ภาคผนวก ข	ภาคการคำนวณ	ข 1 - 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

	หน้า	
รูปที่ 2.1	การนำความร้อนผ่านผนังraithที่ค่าการนำความร้อนมีขนาดสม่ำเสมอ	4
รูปที่ 2.2	ผนัง 3 ชั้น และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามความลึกของผนังซึ่งมีความหนาและค่า k ต่างกัน	4
รูปที่ 2.3	การเปลี่ยนแปลงค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของสารต่าง ๆ กับอุณหภูมิ	5
รูปที่ 2.4	แสดงการต่อขดลวดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าวงจรไฟ3เฟสแบบวาย	11
รูปที่ 2.5	แสดงการต่อขดลวดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าวงจรไฟ3เฟสแบบเดลตา	12
รูปที่ 2.6	แสดงถึงการควบคุมแบบป้อนกลับ	13
รูปที่ 2.7	แสดงการควบคุมแบบ ON-OFF	14
รูปที่ 2.8	แสดงการควบคุมแบบ ON-OFF โดยมี Hysteresis	15
รูปที่ 2.9	แสดง Seeback Voltage	16
รูปที่ 2.10	อธิบายถึงกฎของโลหะแทรก	17
รูปที่ 2.11	อธิบายถึงแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยเทอร์โมคัปเปิล	17
รูปที่ 2.12	แสดงส่วน Reference Junction และ Measuring Junction	20
รูปที่ 2.13	แสดงรอยเชื่อมของหัวเทอร์โมคัปเปิล	20
รูปที่ 2.14	แสดงการเชื่อมโดยใช้เครื่องจักรอัตโนมัติและแสดงการเชื่อมโดยใช้มือ	21
รูปที่ 2.15	แสดงการประกอบหัวเทอร์โมคัปเปิลเข้ากับท่อแบบต่างๆ	22
รูปที่ 2.16	แสดงลักษณะของสายเทอร์โมคัปเปิล	23
รูปที่ 2.17	แสดงถึงรูปแบบของฮีตเตอร์ต่างๆ	26
รูปที่ 2.18	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและปริมาตรที่อุณหภูมิต่างๆของเตาอบโลหะ	27
รูปที่ 2.19	แสดงถึงภาวะที่ผนังเตาสูงที่สุดกับโลหะชนิดต่างๆที่หลายอุณหภูมิ	28
รูปที่ 2.20	หลักการวางเส้นลวดต้านทาน Nabertherm ของบริษัทNabertherm	29
รูปที่ 2.21	แสดงถึงภาวะที่ผิวตัวต้านทานสูงสุดของโลหะต้านทานในอุตสาหกรรม	30
รูปที่ 2.22	แสดงถึงการเปรียบเทียบอายุการใช้งานของลวดKanthalและNikrothal ที่อุณหภูมิ 1200 °C	32
รูปที่ 3.1	แสดงแบบเตาอบไฟฟ้าที่ได้ออกแบบ	39
รูปที่ 3.2	แสดงแบบร่องใส่ลวดความต้านทานของเตาอบ	40
รูปที่ 3.3	แสดงอิฐทนไฟชนิดต่างๆ	40
รูปที่ 3.4	แสดงอิฐทนไฟขนาดต่างๆและมีมิติของอิฐทนไฟ	41
รูปที่ 3.5	แสดงเซรามิกไฟเบอร์แบบกระดานแข็ง	42
รูปที่ 3.6	แสดงเซรามิกไฟเบอร์แบบผืน	43
รูปที่ 3.7	แสดงเซรามิกไฟเบอร์แบบก้อนฝอย	44
รูปที่ 3.8	แสดงเทอร์โมคัปเปิลแบบต่างๆ	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.9	แสดงเครื่องวัดและควบคุมอุณหภูมิ รุ่น CAL 9900	49
รูปที่ 3.10	แสดงถึงภาพวงจรควบคุมของเตาอบ ไฟฟ้า	49
รูปที่ 4.1	แสดงแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส	53
รูปที่ 4.2	แสดงแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส	56
รูปที่ 4.3	แสดงแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส	59
รูปที่ 4.4	แสดงแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส	62
รูปที่ 4.5	แสดงแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับเวลาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส	65
รูปที่ 4.6	แสดงแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับเวลาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส	67
รูปที่ 4.7	แสดงแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับเวลาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส	69
รูปที่ 4.8	แสดงแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับเวลาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส	71



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 2.1	ประมาณค่าของการนำความร้อนสำหรับวัสดุชนิดต่าง ๆ	6
ตารางที่ 2.2	คุณสมบัติที่เกี่ยวกับความร้อนของ โลหะชนิดต่าง ๆ	8
ตารางที่ 2.3	คุณสมบัติที่เกี่ยวกับความร้อนของอโลหะที่สำคัญ ๆ	9
ตารางที่ 2.4	ค่าการแผ่รังสีความร้อน (E) ของผิวของวัสดุชนิดต่าง ๆ	10
ตารางที่ 2.5	แสดงคุณสมบัติเปรียบเทียบเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐานTypeต่างๆโดยแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้จากการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่วัดกับจุดเยือกแข็งของน้ำ (0 °C)	18
ตารางที่ 2.6	แสดงสภาวะแวดล้อม ในการใช้งานเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐาน โดยไม่ต้องใช้ Thermowell	18
ตารางที่ 2.7	ตารางแสดง ประเภท เส้นผ่านศูนย์กลาง และย่านอุณหภูมิการใช้งานของเทอร์โมคัปเปิล	19
ตารางที่ 2.8	เปรียบเทียบคุณสมบัติเทอร์โมคัปเปิล และ อาร์ทีดี (Pt100)	23
ตารางที่ 2.9	แสดงสายต่อเทอร์โมคัปเปิลรุ่นและสายต่ออาร์ทีดี(Pt 100) ชนิดต่างๆ	24
ตารางที่ 2.10	แสดงค่าอุณหภูมิของเส้นลวดชนิดต่างๆในหลายๆสภาวะ	30
ตารางที่ 2.11	อุณหภูมิสูงสุดของลวดแต่ละชนิดที่ขนาดต่าง	31
ตารางที่ 2.12	แสดงค่าความต้านทานความร้อนของผนังเตา	35
ตารางที่ 3.1	แสดงคุณสมบัติเซรามิกไฟเบอร์แบบกระดานแข็ง	43
ตารางที่ 3.2	แสดงคุณสมบัติเซรามิกไฟเบอร์แบบผืน	44
ตารางที่ 3.3	แสดงคุณสมบัติเซรามิกไฟเบอร์แบบก้อนผอย	45
ตารางที่ 3.4	แสดงคุณสมบัติต่างๆของปูนทนไฟ	47
ตารางที่ 4.1	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาขณะเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องไปที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสที่สภาวะไม่คงตัว (Transient State)	51
ตารางที่ 4.2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาขณะสภาวะคงตัว(Steady State) ในช่วงการทำงาน 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส	52
ตารางที่ 4.3	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาขณะเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องไปที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสที่สภาวะไม่คงตัว (Transient State)	54
ตารางที่ 4.4	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาขณะสภาวะคงตัว(Steady State) ในช่วงการทำงาน 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส	55
ตารางที่ 4.5	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาขณะเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องไปที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสที่สภาวะไม่คงตัว (Transient State)	57
ตารางที่ 4.6	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาขณะสภาวะคงตัว(Steady State) ในช่วงการทำงาน 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส	58
ตารางที่ 4.7	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาขณะเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องไปที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสที่สภาวะไม่คงตัว (Transient State)	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการ

การปรับคุณสมบัติของโลหะ ให้ได้โลหะที่มีคุณสมบัติตามต้องการทำได้โดยผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อที่จะนำโลหะนั้นไปใช้ประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรม เตาอบโลหะเป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่มีหน้าที่ปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะให้ได้ตามต้องการ โดยเตาอบที่ใช้กันทั่วไปนั้นมีแบบที่ใช้ น้ำมัน ก๊าซ และไฟฟ้าซึ่งขึ้นอยู่กับความเหมาะสมต่อการใช้งาน เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดทั้งในด้านประสิทธิภาพและทางเศรษฐศาสตร์

เตาอบโลหะที่ให้พลังงานด้วยไฟฟ้านั้นมีข้อได้เปรียบหลายด้านเมื่อเทียบกับเตาอบโลหะที่ให้พลังงานด้วยน้ำมันหรือก๊าซ เช่น พลังงานที่ถูกกว่า สะอาดกว่า ติดตั้งได้ง่ายกว่า การต้องการซ่อมบำรุงน้อยกว่าซ่อมแซมได้ง่ายกว่า มีคุณภาพสูง และที่สำคัญมีความปลอดภัยสูง

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาทฤษฎีทางความร้อน
2. เพื่อศึกษาระบบควบคุมของเตาอบไฟฟ้า
3. เพื่อศึกษาหลักการทำงานของเตาอบไฟฟ้า
4. เพื่อศึกษาการออกแบบสร้างเตาอบไฟฟ้า
5. เพื่อสร้างเตาอบไฟฟ้าสำหรับใช้งาน

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ใช้วัดความต้านทานเป็นตัวกำเนิดความร้อนโดยใช้กระแสไฟฟ้า 3 เฟส 220 โวลท์
2. อุณหภูมิในเตาสูงสุด 1000 องศาเซลเซียส
3. ขนาดของช่องภายในเตาปริมาตร $300 \times 300 \times 400 \text{ mm}^3$
4. ควบคุมอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) type K และอุปกรณ์ควบคุมทางไฟฟ้าเป็นตัวควบคุมการทำงาน
5. การเปิด-ปิดประตูจะใช้สวิตช์ตัดกระแสไฟฟ้า (Limit Switch) เพื่อความปลอดภัยในการนำชิ้นงานเข้าออกจากเตา
6. ประตูเตาจะใช้แบบสวิง (Swing Door) ในการเปิด-ปิดประตูและล็อกด้วยมือหมุนเร็ว

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รับประสบการณ์ทางด้านงานวิศวกรรม
2. เพื่อให้รู้จักการวางแผน การทำงานและการดำเนินงาน
3. เพื่อสร้างทักษะทางด้านเศรษฐศาสตร์ ในการใช้งบประมาณที่มีอยู่จำกัดให้ได้ประสิทธิภาพมากที่สุดในงานวิศวกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารวิสัญญีวิศวกรรมสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี และหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน

ความร้อนเคลื่อนที่จากจุด ๆ หนึ่งไปยังอีกจุด ๆ หนึ่งได้ 3 วิธีด้วยกันคือ การนำ การพา และการแผ่รังสี การเคลื่อนที่ของความร้อนทั้ง 3 วิธีนี้ จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิเกิดขึ้น แต่กลไกในการที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อนแต่ละวิธีแตกต่างกัน สำหรับวิศวกรนั้นนอกจากจะต้องเข้าใจถึงกลไกการเคลื่อนที่ของความร้อนเป็นอย่างดีแล้ว ยังต้องรู้วิธีการที่จะคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนทั้ง 3 วิธี เพื่อประโยชน์ในการออกแบบเครื่องมือและเครื่องจักรต่าง ๆ

2.1.1 การพาความร้อน (Convection) [1 : P 16]

การพาความร้อน คือ การให้ความร้อนแก่ตัวกลาง (โดยมากเป็นของไหลเช่น อากาศหรือน้ำ) จากนั้นก็พาตัวกลางที่ถูกทำให้ร้อนเคลื่อนที่ไปสู่วัตถุเป้าหมาย ข้อเสียของวิธีนี้คือ ความร้อนของวัตถุเป้าหมายจะขึ้นช้า (ซึ่งหมายถึงจะต้องพึ่งระบบหมุนเวียน ตัวกลางเช่น พัดลมหรือใบพัดกวนของเหลว ในกรณีที่ตัวกลางเป็นของเหลว) และจะมีการสูญเสียความร้อนมาก อย่างไรก็ตามวิธีนี้ยังคงเป็นที่นิยมที่สุด เนื่องจากเป็นระบบที่ง่ายแก่การเข้าใจ สามารถหาแหล่งความร้อนได้ง่าย เช่น น้ำมัน ก๊าซ หรือฮีตเตอร์ต่างๆไป

2.1.1.1 การพาโดยบังคับ (Force convection)

การพาโดยบังคับ คือ การเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยที่ของไหลถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวของแข็ง โดยกลไกภายนอกเช่น พัดลม หรือเครื่องสูบน้ำ

2.1.1.2 การพาตามธรรมชาติ (Natural หรือ Free convection)

การพาตามธรรมชาติ คือ การเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยที่ไม่มีกลไกใด ๆ ที่ทำให้ของไหลเคลื่อนที่ แต่ของไหลที่อยู่ใกล้ผิวของของแข็งก็อาจเคลื่อนที่ได้โดยแรงลอยตัวของของไหลเอง แรงลอยตัวนี้เกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นของของไหล เมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิในชั้นของของไหลขึ้น

การคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพานั้นเป็นสิ่งยุ่งยาก เมื่อพิจารณาแล้วมีหลายสิ่งหลายอย่างที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของความร้อนแบบการพานี้ เป็นต้นว่า คุณสมบัติต่าง ๆ ของของไหล เช่น ความหนาแน่น ความร้อนจำเพาะ ความหนืด ฯลฯ ความเร็วของของไหล ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของพื้นผิวของของแข็ง และของไหล เป็นต้น นิวตัน (Newton) ได้ตัดปัญหาความยุ่งยากเหล่านี้ โดยเสนอสมการสำหรับคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อน โดยการพาดังนี้คือ

$$q = h_c A (T_n - T_c) \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$$\begin{aligned} q &= \text{อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่} && (\text{W/m}^2) \\ h_c &= \text{สัมประสิทธิ์การพาความร้อน} && (\text{W/m}^2\text{K}) \\ T_c &= \text{อุณหภูมิที่เย็นกว่า} && (^\circ\text{K}) \\ T_h &= \text{อุณหภูมิที่ร้อนกว่า} && (^\circ\text{K}) \end{aligned}$$

2.1.2 การนำความร้อน (Conduction) [1 : P 11]

การนำความร้อน จะคล้ายกับการพาความร้อนแต่จะใช้ตัวกลางที่มีการนำความร้อนได้ดี ซึ่งมักจะเป็น โลหะความร้อนจะถูกนำจากปลายข้างหนึ่งของตัวกลางไปสู่ปลายอีกข้างหนึ่ง โดยที่ตัวกลางเองจะไม่เคลื่อนที่ (การพาความร้อนนั้นตัวกลางจะเคลื่อนที่จากแหล่งความร้อนไปสู่วัตถุเป้าหมาย)

หลักการคำนวณเกี่ยวกับการนำความร้อนถูกตั้งขึ้นโดย โจเซฟ โฟริเออร์ (Joseph Fourier) นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส โฟริเออร์ ได้เสนอสมการที่ใช้สำหรับการคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อน โดยการนำ ในปี ค.ศ. 1822 โดยอาศัยข้อมูลจากการทดลองดังนี้คือ

$$Q = -kA \left[\frac{dT}{dx} \right] \quad (2.2)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} Q &= \text{อัตราการถ่ายเทความร้อน} && (\text{W}) \\ K &= \text{ค่าการนำความร้อนของสารที่มีความร้อนเคลื่อนที่} && (\text{W/mK}) \\ A &= \text{พื้นที่ที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของความร้อน} && (\text{m}^2) \\ DT/dx &= \text{เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับระยะทาง} \end{aligned}$$

2.1.2.1 การนำความร้อนผ่านผนังราบชั้นเดียว

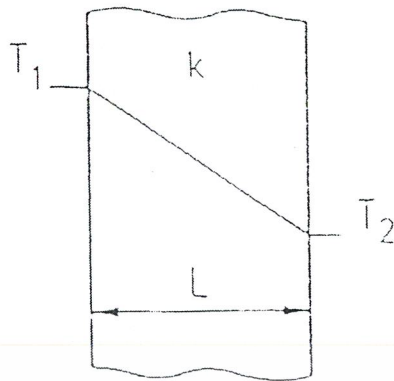
เราพิจารณาเฉพาะการเคลื่อนที่ของความร้อนในทิศทาง x หรืออาจกล่าวได้ว่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงเฉพาะในทิศทาง x เท่านั้น อุณหภูมิมีค่าคงที่ในทิศทาง y และ z และในผนังก็ไม่มีแหล่งพลังงานอื่น จากเงื่อนไขเหล่านี้ และจากสถานะสม่ำเสมอเราได้ว่า

$$Q = \left[\frac{kA}{l} \right] (T_1 - T_2) \quad (2.3)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} Q &= \text{อัตราการถ่ายเทความร้อน} && (\text{W}) \\ K &= \text{ค่าการนำความร้อน} && (\text{W/mK}) \\ A &= \text{พื้นที่ที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของความร้อน} && (\text{m}^2) \\ (T_1 - T_2) &= \text{ความแตกต่างของอุณหภูมิ} && (^\circ\text{K}) \\ l &= \text{ความยาวหรือความหนา} && (\text{m}) \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

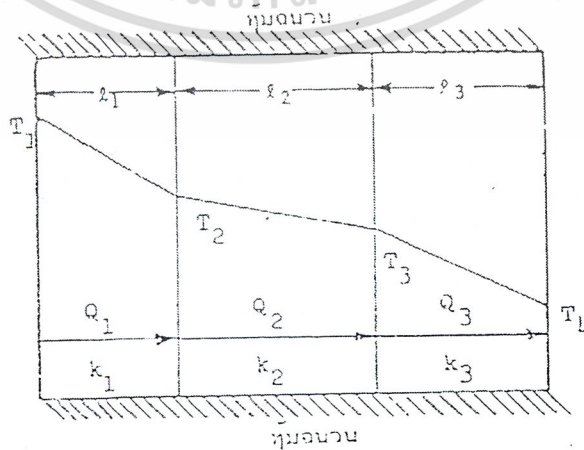


รูปที่ 2.1 การนำความร้อนผ่านผนังราบที่ค่าการนำความร้อนมีขนาดสม่ำเสมอ

ถึงแม้ว่าสมการที่ 2.3 จะได้จากการสมมติว่าการเคลื่อนที่ของความร้อนเป็นการเคลื่อนที่แบบมิตติเดียว และในสถานะสม่ำเสมอ ซึ่งเป็นกรณีที่ยากที่สุด แต่สมการดังกล่าวก็สามารถที่จะใช้ทำนายอัตราการถ่ายเทความร้อนในกรณีง่าย ๆ ที่เกิดขึ้นในชีวิตประจำวัน ได้หลายกรณีด้วยกัน กรณีที่สำคัญที่พบบ่อยก็คือ การเคลื่อนที่ของความร้อนผ่านผนังตึก เนื่องจากว่าอุณหภูมิทั้งภายในและภายนอกของผนังมีค่าเกือบคงที่ อุณหภูมิบนพื้นผิวของผนังที่ตั้งฉากกับแกน x จะถูกประมาณว่าเป็นค่าคงที่ได้ดังสมการที่ 2.3 จึงมีประโยชน์มาก

2.1.2.2 การนำความร้อนผ่านผนังหลายชั้น

โดยปกติแล้วเรามักจะต้องการให้มีการสูญเสียความร้อนน้อยที่สุด ซึ่งก็จะทำได้โดยการใช้ผนังที่ทำด้วยวัสดุที่เป็นฉนวนความร้อน นั่นก็คือ วัสดุที่มีค่า k ต่ำ แต่วัสดุที่มีค่า k ต่ำมากมักจะไม่แข็งแรง ไม่เหมาะที่จะใช้เป็น โครงสร้าง ในทางปฏิบัติมักใช้วัสดุฉนวนมากกว่า 1 ชนิด ในการสร้างผนังซึ่งมักจะประกอบด้วยวัสดุที่แข็งแรง เช่น โลหะ แล้วบุด้วยฉนวนความร้อน ดังนั้นจึงควรมีสมการที่จะใช้คำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังที่มีหลายชั้น



เอกสารนี้เป็นรูปที่ 2.2 ผนัง 3 ชั้น และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามความลึกของผนังซึ่งมีความหนาและค่า k ต่างกัน ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q = \frac{A[T_i - T_f]}{\sum \frac{l_i}{k_i}} \quad (2.4)$$

เมื่อ

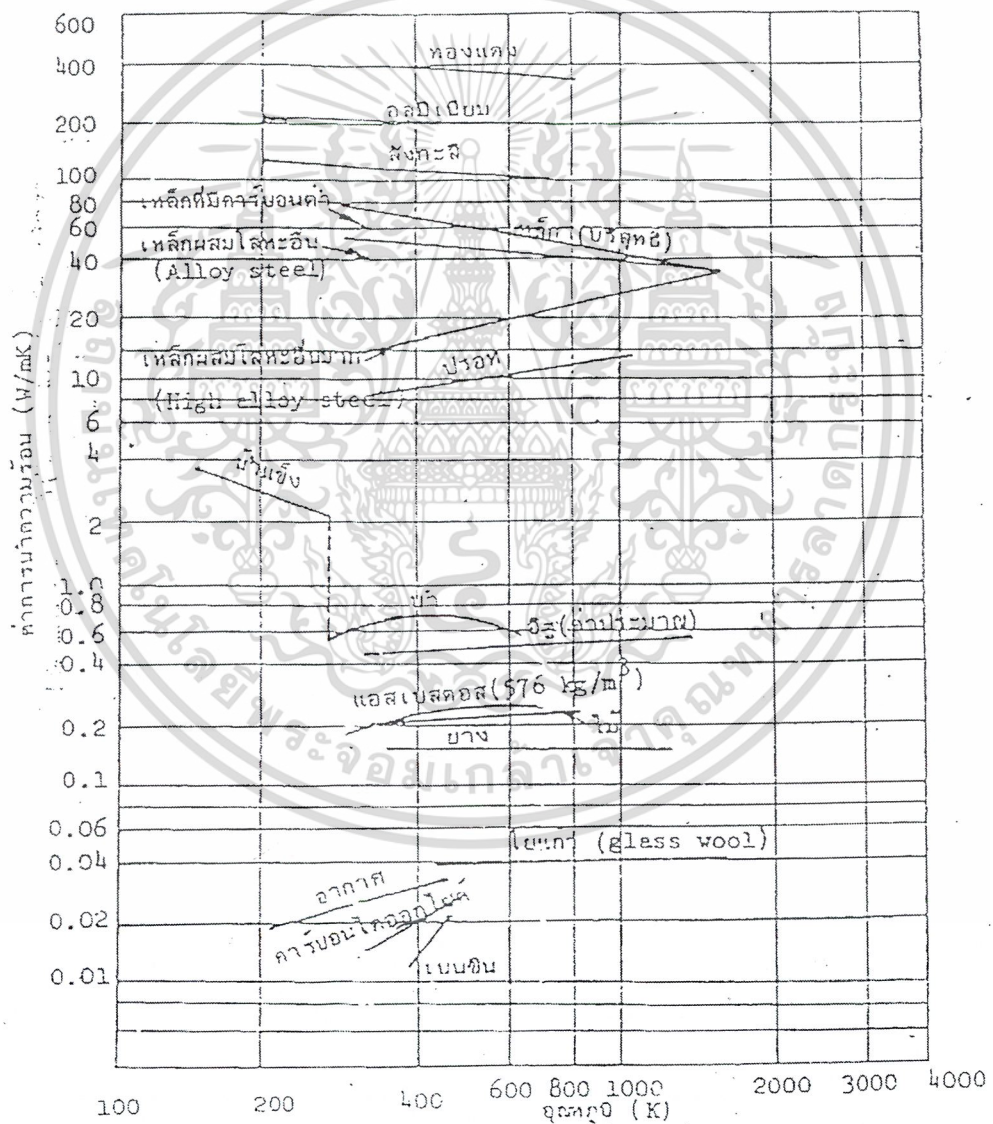
A = พื้นที่ที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของความร้อน(m²)

T₁ = อุณหภูมิที่ผิวของผนังชั้นแรก (°K)

T₂ = อุณหภูมิของผิวชั้นที่ 4 (°K)

K = ค่าการนำความร้อน (W/mk)

L = ความยาวหรือความหนา (m)



รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของสารต่าง ๆ กับอุณหภูมิ
 เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ประมาณค่าของการนำความร้อนสำหรับวัสดุชนิดต่าง ๆ

วัสดุ	ค่าการนำความร้อน (°K)
โลหะบริสุทธิ์	35-430
โลหะผสม	20-200
โลหะเหลว	9-90
ของเหลว(อโลหะ)	0.2-2.0
ของแข็ง(อโลหะ)	0.02-20
ฉนวน	0.02-0.40
ก๊าซ	0.002-0.2

2.1.3 การแผ่รังสี (Radiation) [1 : P 21]

การแผ่รังสีจะเป็นการแผ่แสงที่มีคลื่นยาวไปยังวัตถุเป้าหมาย ซึ่งแสงคลื่นยาวจะทำให้โมเลกุลของวัตถุเป้าหมายสั่น ซึ่งส่งผลให้เกิดความร้อนขึ้น วิธีการนี้เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดถ้าเลือกวัตถุเป้าหมายที่เหมาะสมเนื่องจากพลังงานความร้อนประเภทนี้จะอยู่ในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วแสงมายังวัตถุ(แบบเดียวกับการที่ดวงอาทิตย์ส่งความร้อนมายังโลก)

สำหรับวิศวกร วิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่โดยการแผ่รังสี อาจจะไม่มีความสำคัญเท่ากับที่จะรู้วิธีคำนวณหาอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการแผ่รังสี ในปี ค.ศ. 1884 สตีเฟน และ โบลซ์แมน (Stefen and Boltzmann) ได้เสนอสมการในการคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนสูงสุดในการแผ่รังสีจากวัตถุที่มีพื้นที่ A และอุณหภูมิ T ดังนี้

$$Q = \epsilon \sigma A T^4 \quad (2.5)$$

เมื่อ

Q = อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)

σ = ค่าคงที่ของ สตีเฟนและโบลซ์ (5.67×10^{-8})(W/m²k⁴)

ϵ = ค่าการแผ่รังสี (Emissivity)

A = พื้นที่ผิวของตัวแผ่รังสี (m²)

T = อุณหภูมิที่ผิวของตัวแผ่รังสี (°K)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนรวมกัน

(Combined Convection and Radiation) [1 : P 28]

เมื่อการถ่ายเทความร้อนเกิดจากการพาและการแผ่รังสีความร้อนพร้อมกัน และอัตราการถ่ายเทความร้อน โดยการพาและการแผ่รังสีความร้อนไม่ต่างกันมากนัก การวิเคราะห์หาค่าของการถ่ายเทความร้อนยุ่งยากมาก แต่ในบางกรณี เราอาจจะประมาณค่าของการถ่ายเทความร้อน โดยการรวมอัตราการถ่ายเทความร้อน โดยการพาและการแผ่รังสีความร้อนเข้าด้วยกัน เช่น การไหลของก๊าซที่ได้จากการสันดาป ซึ่งประกอบด้วย CO₂ และ H₂O ซึ่งอุณหภูมิ T_h ซึ่งในท่อมี่อุณหภูมิผนัง T_c การถ่ายเทความร้อนจากก๊าซไปสู่ผนังท่อ จะเกิดขึ้นทั้งในการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน หากอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนที่ค่าไม่มากนัก อัตราการถ่ายเทความร้อนรวมจะหาได้โดยประมาณ จากการรวมอัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งสองวิธีเข้าด้วยกันดังนี้

$$\begin{aligned} Q &= h(T_h - T_c) + h_r(T_h - T_c) \\ &= (h + h_r)(T_h - T_c) \\ &= h_{cr}(T_h - T_c) \end{aligned} \quad (2.6)$$

เมื่อ

q	=	อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่	(W/m ²)
h	=	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน	(W/m ² °K)
h _r	=	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน	(W/m ² °K)
h _{cr}	=	สัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนรวมของการพาและการแผ่รังสีความร้อน	(W/m ² °K)
T _c	=	อุณหภูมิที่เย็นกว่า	(°K)
T _h	=	อุณหภูมิที่ร้อนกว่า	(°K)

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับความร้อนของโลหะชนิดต่างๆ

ชนิดของโลหะ	คุณสมบัติที่ 20 °C				k (W/mK)				
	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kgK)	k (W/mK)	$\alpha \times 10^6$ (m ² /s)	อุณหภูมิ (°C)				
					100	200	300	400	600
อลูมิเนียมบริสุทธิ์	2070	896	2.04	8.42	206	215	229	249	-
ตะกั่ว	11370	130	34.6	2.34	33.4	31.5	29.8	-	-
เหล็กบริสุทธิ์	7879	452	72.7	2.03	67.5	62.3	55.4	48.5	39.8
เหล็กกล้า (c < 0.5%)	7549	460	58.9	1.63	57.1	51.9	48.0	45.0	36.4
เหล็กหล่อ (c-4%)	7272	419	51.9	1.70	-	-	-	-	-
เหล็กกล้า (C-5%)	7833	465	53.7	1.47	51.9	48.5	45.0	41.5	34.6
เหล็กกล้า (C1=1.5%)	7753	486	36.4	0.97	36.3	36.3	34.6	32.9	31.2
เหล็กผสมนิกเกิล 10 %	7945	460	26.0	0.72	-	-	-	-	-
เหล็กผสมนิกเกิล 30 %	8073	460	12.1	0.33	-	-	-	-	-
เหล็กผสมนิกเกิล 50 %	8266	460	13.8	0.36	-	-	-	-	-
เหล็กผสมนิกเกิล 70 %	8506	460	26.0	0.67	-	-	-	-	-
เหล็กผสมนิกเกิล 90 %	8762	460	46.7	1.16	-	-	-	-	-
เหล็กผสมโครเมียม 1%	7865	460	60.6	1.67	55.4	51.9	46.7	41.5	36.4
เหล็กผสมโครเมียม 5%	7833	460	39.8	1.11	38.1	36.4	36.4	32.9	29.4
เหล็กผสมโครเมียม 10%	7785	460	31.2	0.87	31.2	31.2	29.4	29.4	31.2
เหล็กผสมนิกเกิล 8%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
โครเมียม 18 %	7817	460	16.3	0.44	17.3	17.3	19.0	19.0	22.6
เหล็กผสมนิกเกิล 20 %	-	-	-	-	-	-	-	-	-
โครเมียม 15%	7865	460	14.0	0.39	15.1	15.1	16.3	17.3	19.0
เหล็กผสมแมงกานีส 2 %	7865	460	38.1	1.05	36.4	36.4	34.6	32.9	-
เหล็กผสมลิเทียม 2 %	7673	460	31.2	0.89	-	-	-	-	-
ทองแดงบริสุทธิ์	8954	383	386	11.2	379	374	369	364	353
ทองแดง (ทองแดง 70 % เงิน 30 %)	8522	355	111	3.41	128	144	147	147	-
เงินบริสุทธิ์	10520	234	407	16.6	415	374	362	360	-
สังกะสีบริสุทธิ์	7144	384	112	4.11	109	106	100	93.6	-
ดีบุกบริสุทธิ์	7304	227	64.0	3.88	58.9	57.1	-	-	-
ทองสัมฤทธิ์ (ทองแดง 75 % สังกะสี 25 %)	8660	343	26.0	0.86	-	-	-	-	-
ทังสเตน	19350	134	163	4.57	151	142	133	126	113
แมกนีเซียมบริสุทธิ์	1746	1013	171	9.71	168	163	158	-	-
โซลิวดีนัม	10220	251	123	4.79	118	114	111	109	106

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับความร้อนของโลหะที่สำคัญๆ

ชนิดของโลหะ	อุณหภูมิ (°C)	C_p (J/kgK)	ρ (kg/m ³)	k (W/mK)	$\alpha \times 10^5$ (m ² /s)
คอนกรีต	20	879	1900-2300	0.814-1.40	0.0490-0.0697
อิฐ	20	837	1600	0.692	0.0516
	20	837	2050	1.320	-
	200	837	3010	2.32	0.0929
แก้ว	20	837	2700	0.792	0.0330
พลาสติก	20	837	1442	0.485	0.0413
หินอ่อน	20	808	2499-2707	2.751	0.0394
หินแกรนิต	20	816	2643	1.73-3.98	0.080-0.183
ไม้เนื้ออ่อน	30	2500	400-600	0.100	
ไม้เนื้อแข็ง	30		481-650	0.140-0.170	
แอสเบสตอส	0	816	577	0.151	
	100	816	577	0.192	
ผ้า	20	1298	80.1	0.0589	0.194
ไม้ค๊อก	30		160	0.0433	
ขนแกะ	30		330	0.0519	
ใยแก้ว	20	670	200	0.0398	0.0284
ไหม	20	1382	57.7	0.0363	0.0439
ดิน	20	1842	2050	0.519	0.0189
น้ำแข็ง	0	1926	913	2.22	0.124

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 ค่าการแผ่รังสีความร้อน (E) ของผิวของวัสดุชนิดต่างๆ

ชนิดวัสดุ	อุณหภูมิ	ค่าการแผ่รังสีความร้อน(ε)
อลูมิเนียม		
ผิวขัดมันมาก	237-576	0.039-0.057
ผิวหยาบ	100	0.18
เป็นแผ่นที่ขยทั่วไป	100	0.09
ทองเหลือง ขัดมันปกติ	100	0.06
ตะกั่ว ผิวมีสนิมจับ	24	0.28
เงินบริสุทธิ์ ขัดมัน	227-627	0.02-0.032
ดีบุก	23	0.043
สังกะสี ผิวเคลือบด้วยเหล็ก	28	0.23
เหล็ก		
เหล็กกล้าผิวขัดสะอาด	100	0.066
เหล็กหล่อผิวขัดสะอาด	200	0.21
เหล็กหล่อเหนียวผิวขัดสะอาด	38-249	0.28
แผ่นเหล็กหล่อ ผิวมีสนิมมาก	19	0.69
เหล็กกันสนิมผิวขัดมัน	100	0.074
แผ่นแอสเบสตอส	23	0.96
อิฐ		
สีแดงและผิวหยาบ	21	0.93
ใช้ในการก่อสร้าง	1000	0.45
คอนกรีต	1000	0.63
กระจกใส	22	0.94
ผนังทาสีน้ำมัน	100	0.92-0.96
ผนังทาสีอลูมิเนียม	100	0.27-0.67
ผิวน้ำ	0-100	0.95-0.963

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

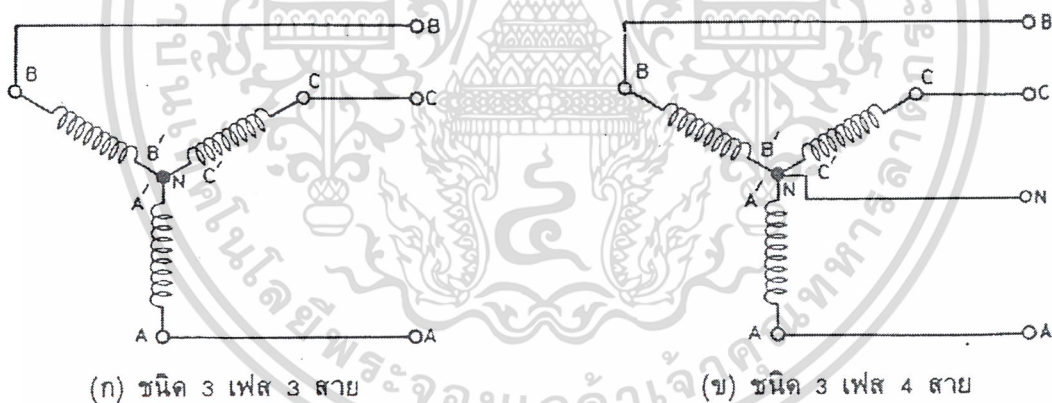
2.2 ระบบไฟสามเฟส [6 : P 596]

การส่งพลังงานไฟฟ้าไปยังบ้านเรือนที่อาศัยขนาดเล็กมักจะเป็นวงจรไฟฟ้าเฟสเดียว(single phase) แต่การส่งไฟฟ้าไปยังที่อยู่อาศัยขนาดใหญ่หรือโรงงานอุตสาหกรรม จะเป็นวงจรไฟฟ้าระบบ 3 เฟส(three phase systems) ทั้งนี้เนื่องจากระบบไฟฟ้า 3 เฟสมีข้อดีกว่าระบบไฟฟ้าเฟสเดียว ไฟฟ้า 3 เฟสจะให้กำลังได้สูงกว่าชนิดเฟสเดียว กำลังไฟฟ้าระบบ 3 เฟสไม่แปรตามเวลาดังนั้นการจ่ายกระแสจะเป็นไปอย่างราบเรียบ การแปลงระบบ 3 เฟสให้เป็นแรงดันไฟตรงได้ง่าย ประหยัด และได้กระแสตรงที่เรียกว่า การส่งจ่ายไฟฟ้าระบบ 3 เฟสจากโรงงานไฟฟ้าไปยังสถานที่ต่างๆจะทำให้ประหยัดกว่าไฟฟ้าเฟสเดียว ข้อค้อยของระบบ 3 เฟสเมื่อเทียบกับระบบเฟสเดียวก็จะมีเพียงระบบเฟสเดียวมีความซับซ้อนในการติดตั้งเดินสายไฟน้อยกว่าเท่านั้น

การต่อขดลวดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส การนำสายไฟฟ้า 3 เฟสไปใช้งาน โดยการส่งพลังงานจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปยังสถานที่ต่างๆผ่านสายไฟนั้น มีวิธีต่อขดลวดได้หลายวิธี แต่ที่นิยมใช้กันมากมี 2 วิธีคือ การต่อแบบวาย (Y connected generator) และการต่อแบบเดลตา (Δ connected generator)

2.2.1 การต่อแบบวาย

ชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การต่อแบบดาวหรือสตาร์(star connection) ซึ่งการต่อแบบนี้จะมีลักษณะการต่อสอดคล้องกับชื่อ คือ แบบของการต่อจะเหมือนตัว Y หรือเหมือนรูปดาวนั้นคือจะต่อปลายขดลวดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสามเข้าด้วยกันที่ปลายขั้วหนึ่งแล้วให้ปลายขั้วที่เหลือเป็นแรงดันแต่ละเฟสตามรูป



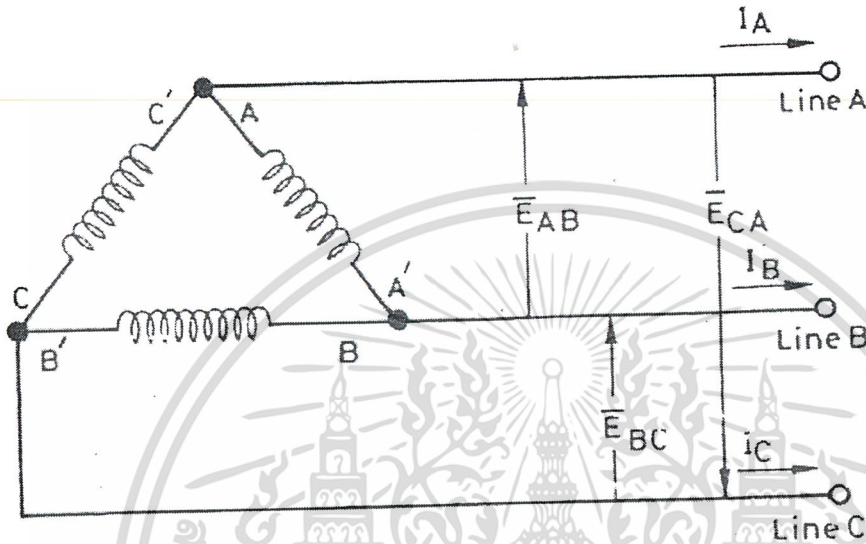
รูปที่ 2.4 แสดงการต่อขดลวดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าวงจร 3 เฟสแบบวาย

รูป 2.4 ก นั้นเป็นวงจร 3 เฟสชนิด 3 สายหมายความว่าสายไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปยังโหลดจะมีเพียง 3 สาย ส่วน รูป 2.4 ข นั้นจะมี 4 สายโดยเพิ่มจากจุดที่นำขดลวดมาต่อร่วมกันอีก 1 สาย สายที่สี่นี้เรียกว่านิวทรัล (neutral wire) โดยจะใช้อักษร N กำกับในแผนแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 การต่อแบบเดลตา

การต่อแบบสามเหลี่ยม (Δ) จะมีลักษณะสอดคล้องตามชื่อ คือจะมีโครงสร้างวงจรเป็นรูปสามเหลี่ยม โดยนำปลายของขดลวดทั้งสามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออนุกรมกันเป็นบ่วงรูปสามเหลี่ยม ได้แรงดันออกมาจากจุดต่อระหว่างขั้วของขดลวดทั้งสามตามรูป 2.5 การต่อแบบเดลตา (Δ) จะได้สายออกมาเพียง 3 สายเท่านั้น โดยไม่มีสายนิวทรัล



รูปที่ 2.5 แสดงการต่อขดลวดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าวงจรสามเฟสแบบเดลตา

2.2.3 กำลังในระบบ 3 เฟส

กำลังรวมหรือกำลังทั้งหมดบน โหลด 3 เฟส (power in three-phase systems) ทั้งกรณี โหลดสมดุลและ โหลดไม่สมดุล หาได้จากผลรวมของกำลังในแต่ละเฟสตามสมการ

$$P_T = P_a + P_b + P_c \quad (2.7)$$

ในกรณีที่ เป็น โหลดแบบสมดุลกำลังบนแต่ละเฟสจะมีค่าเท่ากัน

$$P_a = P_b = P_c = P_p \quad (2.8)$$

ดังนั้น

$$P_T = 3P_p \quad (2.9)$$

โดยที่ P_T คือ กำลังรวมทั้งหมด และ P_p คือกำลังของแต่ละเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การควบคุมแบบอัตโนมัติ (Automatic Control) [5 : P T-14]

การควบคุมแบบดั้งเดิมที่เป็น Manual Control คือใช้มนุษย์เป็นผู้ควบคุมทั้งหมดเช่น ปิด – เปิด วาล์วเอง, กดสวิทช์หรือปุ่มจ่ายเอง ในปัจจุบันได้ถูกแทนที่ด้วยการควบคุมแบบอัตโนมัติแล้วทั้งสิ้นเนื่องจากมีต้นทุนต่ำกว่า และมีเสถียรภาพสูงกว่าการควบคุมดังกล่าวจะเป็นลักษณะการควบคุมแบบป้อนกลับ(Feedback Control) คือมีการวัด และส่งค่าที่วัดกลับมายังส่วนควบคุม เพื่อคำนวณและจ่ายสัญญาณที่เหมาะสมไปยังอุปกรณ์ใช้งาน จากที่กล่าวมาการควบคุมแบบอัตโนมัติ จะต้องประกอบด้วย 3 ภาคเสมอ คือ

- 1.การวัด เช่น เทอร์โมคัปเปิล , หัววัดความชื้นมีหน้าที่วัดค่าโพเทนเชียลแล้วส่งมายังภาคควบคุม
- 2.การควบคุม เช่น เครื่องควบคุมอุณหภูมิมีหน้าที่รับค่าจากการวัด นำมาคำนวณ แล้วส่งให้ภาคจ่าย
- 3.ภาคจ่าย เช่น ในระบบทำความร้อน ตัวจ่าย คือ ฮีตเตอร์, ในระบบควบคุมอัตราไหล ตัวจ่ายคือ วาล์ว

เป็นต้นมีหน้าที่เพิ่มหรือลดค่าที่ควบคุมอยู่ บางครั้งก็เรียกตัวจ่ายเหล่านี้ว่า Final Element

กำหนดให้

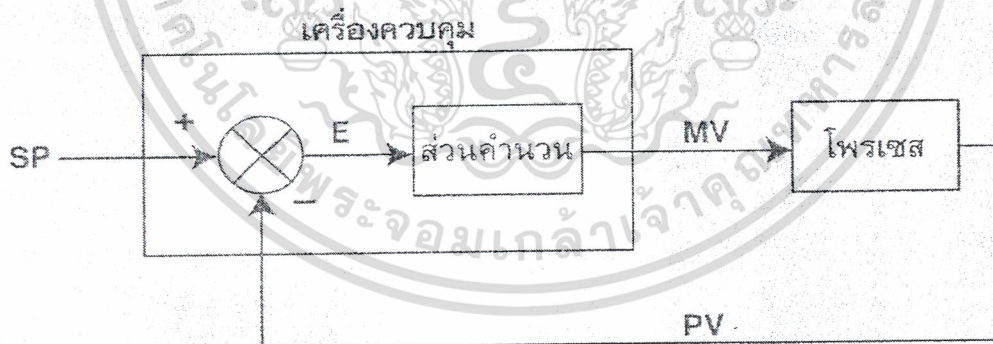
SP คือ Setpoint หรือค่าที่ต้องการควบคุม เช่น ต้องการค่าน้ำที่ 100 °C

PV คือ Process Variable หรือค่าที่วัดมาจากโพเทนเชียลเช่น อุณหภูมิในเตาอบที่อุณหภูมิปกติเป็น 30 °C

MVคือ Mainpulated Variable หรือสัญญาณควบคุมที่เครื่องควบคุมคำนวณ ได้มีหน่วยเป็น% (0-100%)

E คือ Error หรือผลต่างระหว่างค่าที่ต้องการควบคุมที่วัดได้ ($E = SP - PV$)

จากรูปจะเห็นว่าเครื่องควบคุมจะได้รับอินพุต 2 ค่า คือ PV (ค่าที่วัดได้จากโพเทนเชียล) และ SP (ค่าต้องการควบคุมโดยผู้ใช้งานเป็นผู้ป้อน)และมีเอาต์พุต 1 ค่า คือ MV ส่งไปที่โพเทนเชียลเพราะฉะนั้น สิ่งที่ทำให้เครื่องควบคุมแต่ละตัวแตกต่างกัน คือ ส่วนคำนวณของเครื่องควบคุมที่อยู่ภายใน ซึ่งซึ่งถึงรูปแบบการควบคุมที่แตกต่างกัน รูปแบบที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ การควบคุมแบบ ON-OFF , PID และ Fussy Control



รูปที่ 2.6 แสดงถึงการควบคุมแบบป้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

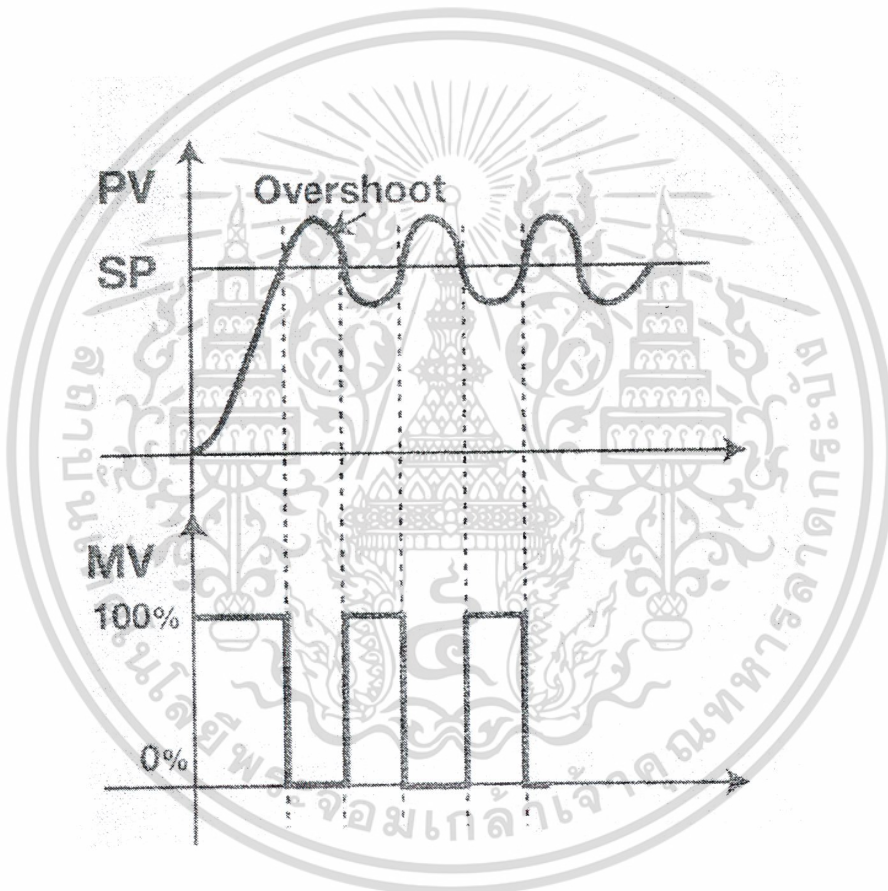
2.3.1 การควบคุมแบบ ON-OFF หรือ Two – position Control

ในระบบการควบคุมแบบ ON-OFF เครื่องควบคุมจะสั่งเอาต์พุตทำงานเพียง 2 สถานะเท่านั้น คือ ON และ OFF เป็นการควบคุมแบบง่าย ๆ และราคาไม่แพง ดังนั้น จึงนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในงานควบคุมทางอุตสาหกรรม ในกรณีที่ผลจากการแกว่งอุณหภูมิเป็นที่ยอมรับได้

กำหนดให้สัญญาณเอาต์พุตของเครื่องควบคุมเป็น MV และผลต่างระหว่าง SP กับ PV เป็น E (Error) ฉะนั้นในการควบคุมแบบ ON-OFF สัญญาณ MV จะมีค่าเป็น 100% (ON) หรือ 0% (OFF) เท่านั้น โดยจะขึ้นอยู่กับว่า E มีค่าเป็น + หรือเป็น - นั่นคือ

$$MV = 100\% \text{ (ON) เมื่อ } E > 0 \text{ (PV < SP)}$$

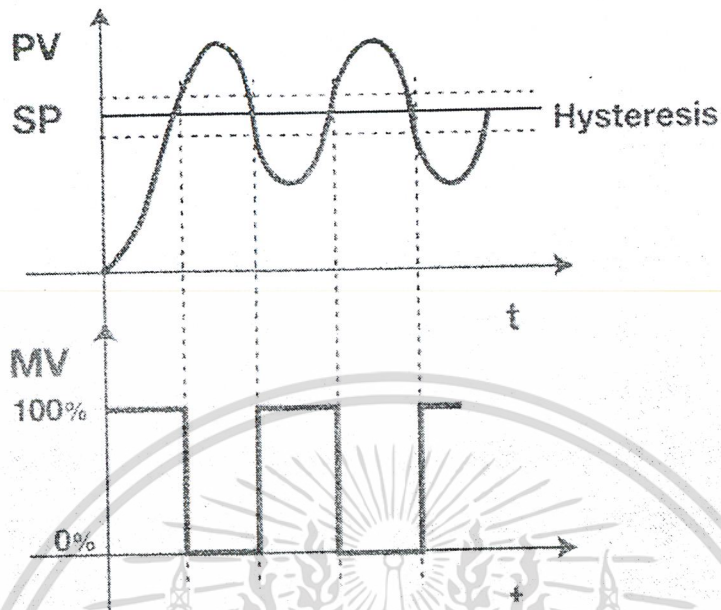
$$= 0\% \text{ (OFF) เมื่อ } E < 0 \text{ (PV > SP)}$$



รูปที่ 2.7 แสดงการควบคุมแบบ ON-OFF

ในกรณีที่โปรเซสมีการกระเพื่อมที่ Setpoint จะมีผลทำให้เอาต์พุตของเครื่องควบคุม ON และ OFF อยู่ตลอดเวลา ซึ่งแก้ไขได้โดยกำหนด Hysteresis หรือ Differential gap หรือ Dead band เพื่อการลดการตัด-ต่อที่เกิดขึ้น แต่ผลเสียคือจะทำให้เกิด ค่าผิดพลาด (Overshoot) มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แสดงการควบคุมแบบ ON-OFF โดยมี Hysteresis

ลักษณะของ ON-OFF Control คือจะเกิดการแกว่งของอุณหภูมิ (Oscillation) อยู่ตลอดเวลาโดยในกรณีที่มี Hysteresis ความถี่ในการตัดต่อจะลดลงแต่ค่าผิดพลาด (Overshoot) จะมากขึ้น ในระบบที่ช้าคาบในการแกว่งจะยาวกว่าในระบบที่เร็วกว่า

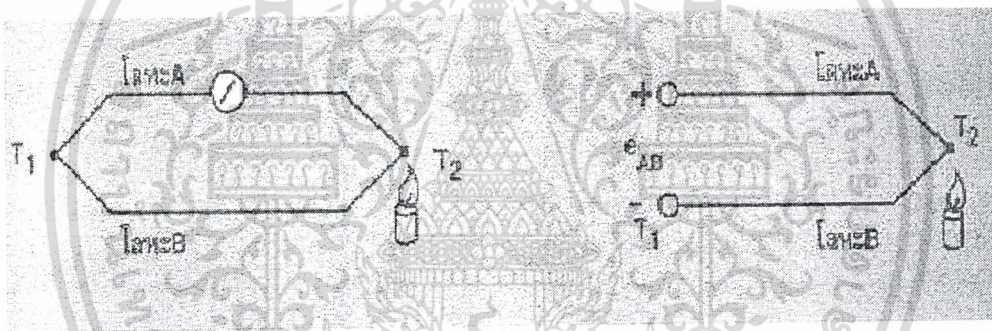
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 เทอร์โมคัปเปิล [5 : P T-1]

เทอร์โมคัปเปิล คือ โลหะ 2 ชนิดต่างกัน ที่นำมาเชื่อมปลายเข้าด้วยกันที่ด้านหนึ่งซึ่งเป็นด้านที่ใช้วัดอุณหภูมิ ส่วนอีกด้านหนึ่งต่ออุปกรณ์ใช้งาน เช่น เครื่องควบคุมอุณหภูมิ, เครื่องบันทึกอุณหภูมิ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้งานได้ นอกจากขึ้นอยู่กับชนิดของเทอร์โมคัปเปิลแล้วยังขึ้นอยู่กับชนิดของปลอก (Metal sheath) และขนาดของขดลวดเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple Wirest)

2.4.1 หลักการของเทอร์โมคัปเปิล

ในปี ค.ศ. 1821 โทมัส ซีเบ็ค (Thomas Seebeck) นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมัน ได้ทำการทดลองและค้นพบว่า เมื่อทำการเชื่อมปลายโลหะ 2 เส้นที่เป็นโลหะต่างชนิดกันเข้าด้วยกัน ถ้าอุณหภูมิที่ปลายทั้ง 2 ด้านไม่เท่ากัน จะเกิดกระแสไหลในโลหะทั้ง 3 เส้นนั้น แสดงว่า ถ้าเปิดปลายจุดต่อด้านหนึ่งออกแล้ว นำ Voltmeter ไปวัดจะได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างโลหะ 2 เส้นค่าหนึ่ง (ค่านี้มีปริมาณน้อยมาก หน่วยเป็น mV) เรียกค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้านี้ว่า Seebeck Voltage



รูปที่ 2.9 แสดง Seebeck Voltage

ปริมาณของแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะแปรผันโดยตรงกับผลต่างอุณหภูมิของปลายจุดทั้งสองโดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

- e_{AB} : $\propto DT$
- e_{AB} : Seebeck Voltage
- \propto : ค่าสัมประสิทธิ์ของ Seebeck มีหน่วยเป็น Volt / K
- DT : ผลต่างอุณหภูมิของปลายจุดทั้งสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

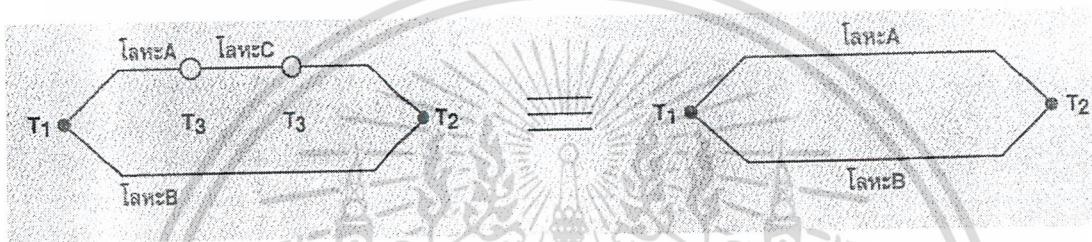
2.4.2 กฎการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากความร้อน (Thermoelectric Laws)

2.4.2.1 กฎของวงจรโลหะชนิดเดียว (Law of the Homogeneous Circuit)

ในวงจรที่ประกอบด้วยโลหะชนิดเดียวกัน 2 เส้น ถึงแม้อุณหภูมิที่ปลายจุดต่อทั้ง 2 ข้างจะไม่เท่ากันก็จะไม่เกิดกระแสไฟฟ้าไหล

2.4.2.2 กฎของโลหะแทรก (Law of Intermediate Metals)

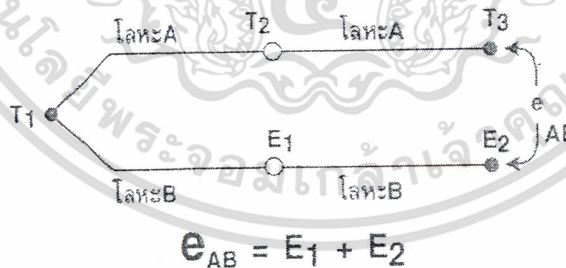
ถ้ามีโลหะแทรกอยู่ในส่วนหนึ่งส่วนใดของวงจร หากอุณหภูมิของจุดต่อที่ปลายของโลหะแทรกทั้งสองเท่ากันแล้ว โลหะแทรกนี้จะไม่มีส่วนต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.10 อธิบายถึงกฎของโลหะแทรกซึ่งอุณหภูมิของจุดต่อที่ปลายของโลหะแทรกทั้งสองเท่ากันแล้วจะไม่มีผลต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

2.4.2.3 กฎของอุณหภูมิแทรก (Law of Intermediate Temperature)

แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยเทอร์โมคัปเปิลหลายชุดต่อกัน โดยมีอุณหภูมิที่จุดต่อต่างกันจะมีค่าเท่ากับผลบวกทางพีชคณิตของแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเทอร์โมคัปเปิลเท่านั้น



รูปที่ 2.11 อธิบายถึงแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยเทอร์โมคัปเปิลหลายชุดต่อกันจะมีค่าเท่ากับผลบวกทางพีชคณิตของแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเทอร์โมคัปเปิลเท่านั้น

2.4.3 เทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐาน

เทอร์โมคัปเปิลมีหลาย Type ให้เลือก แล้วแต่ย่านอุณหภูมิ และลักษณะการใช้งาน โดยความแตกต่างของแต่ละชนิด นี้ เกิดจากการเลือกใช้วัสดุ (Element) ของโลหะที่จะนำมาเชื่อมเข้าด้วยกันให้แตกต่างกัน เพราะโลหะแต่ละชนิดย่อมมีคุณสมบัติพิเศษเฉพาะตัวของมันอยู่แล้ว เมื่อนำโลหะชนิดต่างๆกันมาจับคู่เข้าด้วยกัน จะทำให้คุณสมบัติของเทอร์โมคัปเปิลที่ได้แตกต่างกันไป นอกจากนี้ ได้มีการทดลองผสมโลหะต่างชนิดเข้า

ด้วยกัน เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะเดิมให้ดีขึ้น หรือเพื่อใช้แทนโลหะบางชนิดที่ใช้ทำอยู่เดิม เช่น แพลทินัม เนื่องจากมีราคาสูง ตัวอย่างโลหะผสมที่เกิดขึ้น เช่น โครเมล (Cromel) คือ โลหะผสมของนิกเกิล 90% และ โครเมียม 10% , อลูเมล(Alumel) คือ โลหะผสมของ นิกเกิล 95% อลูมิเนียม 2% แมงกานีส 2% และซิลิกอน 1%, คอนสแตนแตน(Constantan) คือ โลหะผสมของ ทองแดง 60%และ นิกเกิล 40% เป็นต้น

การใช้งานเทอร์โมคัปเปิล ควรเลือกใช้ให้ถูกต้องและเหมาะสมกับงานนั้นๆ โดยสิ่งที่ควรพิจารณา มีหลายข้อ เช่น ค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้งาน,ราคา,ความถี่คร่อนของสารที่มีเทอร์โมคัปเปิลสัมผัส,ต้องใช้ Thermowell หรือไม่,ลักษณะบรรยากาศที่เป็นOxidizing,Reducing,Inert หรือ Vacuum เป็นต้น

ตารางที่ 2.5 แสดงคุณสมบัติเปรียบเทียบเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐานชนิดต่างๆโดยแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้จากการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่วัดกับจุดเยือกแข็งของน้ำ(0 °C)

Type	ส่วนผสม	อุณหภูมิใช้งาน		แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้ mV
		C	F	
B	แพลทินัม - 30% โรเดียม แพลทินัม - 6% โรเดียม	0 ถึง 1820	32 ถึง 3310	0 ถึง 18.814
R	แพลทินัม - 13% โรเดียม แพลทินัม	0 ถึง 1768	60 ถึง 3210	0.236 ถึง 21.108
S	แพลทินัม - 10% โรเดียม แพลทินัม	50 ถึง 1768	60 ถึง 3210	0.236 ถึง 18.698
J	เหล็ก/คอนสแตนแตน	210 ถึง 760	350 ถึง 1400	8.096 ถึง 42.922
K	โครเมล/อะลูเมล	270 ถึง 1372	450 ถึง 2500	6.458 ถึง 54.875
T	ทองแดง/คอนสแตนแตน	270 ถึง 400	450 ถึง 750	6.258 ถึง 20.869
E	โครเมล/คอนสแตนแตน	270 ถึง 1000	450 ถึง 1830	9.835 ถึง 76.358

ตารางที่ 2.6 แสดงสถานะแวดล้อมในการใช้งานเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐานโดยไม่ต้องใช้ Thermowell

ความเหมาะสมในการใช้งาน							
TC Type	บรรยากาศ Oxidizing	บรรยากาศ Reducing	บรรยากาศ Inert	Vacuum	บรรยากาศ Sulferous	อุณหภูมิ < 0 C	มีไอของ Iar
B	ได้	ไม่ได้	ได้	ได้ในช่วงสั้น ๆ	ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้
R	ได้	ไม่ได้	ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้
S	ได้	ไม่ได้	ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้
J	ได้	ได้	ได้	ได้	ไม่ได้ถ้า > 500 °C	ไม่ได้	ได้
K	ได้	ไม่ได้	ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ได้	ได้
T	ได้	ได้	ได้	ได้	ไม่ได้	ได้	ได้
E	ได้	ไม่ได้	ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ได้	ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

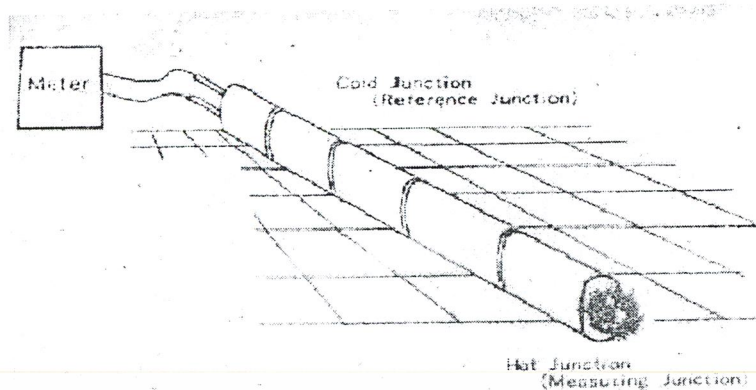
ตารางที่ 2.7 ตารางแสดง ประเภท เส้นผ่านศูนย์กลาง และย่านอุณหภูมิการใช้งานของเทอร์โมคัปเปิลชนิดต่างๆ

เทอร์โมคัปเปิล Type	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)		JIS C 1602		ANSI
	JIS (ญี่ปุ่น)	ANSI (อเมริกา)	อุณหภูมิใช้งานสูงสุด ในขณะทั่วไป (°C)	อุณหภูมิสูงสุดในงาน Overheat (°C)	อุณหภูมิใช้งานสูงสุด (°C)
B	0.50	0.50	1,500	1,700	1,700
	0.50	0.50	1,400	1,600	1,400
	0.50	0.50			
K	3.2	3.2	1000	1200	1260
	2.3	-	900	1100	-
	1.6	1.6	850	1050	1090
	1.0	-	750	950	-
	-	0.8	-	-	980
	0.65	-	650	850	-
	-	0.5	-	-	870
	-	0.32	-	-	870
E	3.2	3.2	700	800	870
	2.3	-	600	750	-
	1.6	1.6	550	650	650
	1.0	-	500	550	-
	-	0.8	-	-	540
	0.65	-	450	550	-
	-	0.5	-	-	430
	-	0.32	-	-	430
J	3.2	3.2	600	750	750
	2.3	-	550	750	-
	1.6	1.6	500	650	590
	1.0	-	450	550	-
	-	0.8	-	-	460
	0.65	-	400	500	-
	-	0.5	-	-	370
	-	0.32	-	-	370
T	1.6	1.6	300	350	370
	1.0	-	250	300	-
	-	0.8	-	-	260
	0.65	-	200	250	-
	-	0.5	-	-	200
	0.32	0.32	450	250	200

2.4.4 Reference Junction

หลักการการทำงานของเทอร์โมคัปเปิล คือ อาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิในการสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้น การที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าค่าหนึ่งจะอ้างอิงเป็นอุณหภูมิค่าหนึ่งได้ แสดงว่าค่าความแตกต่างของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นนั้นจะต้องอ้างอิงถึงอุณหภูมิค่าหนึ่งคงที่ค่าหนึ่งเสมอ โดยเรียกอุณหภูมิคงที่ที่ใช้อ้างอิงนี้ว่า Reference Junction และได้มีการกำหนด Reference Junction ให้เป็น 0 °C เพื่อให้เกิดการวัดอุณหภูมิเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เป็นมาตรฐานเดียวกัน และกำหนดเป็นมาตรฐานแสดงค่าอุณหภูมิเทียบกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่วัดได้ แต่โดยทั่วไป เทอร์โมคัปเปิลจะทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง เช่น (25 °C) นั่นคือไม่ได้เทียบกับ 0 °C แสดงว่าค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้ยังไม่ถูกต้อง หากนำไปอ่านค่าอุณหภูมิจากมาตรฐานจะผิดพลาด จึงจำเป็นต้องมีการรักษา Reference Junction เพื่อให้เกิดการวัดอุณหภูมิเทียบกับ 0 °C ตลอดเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

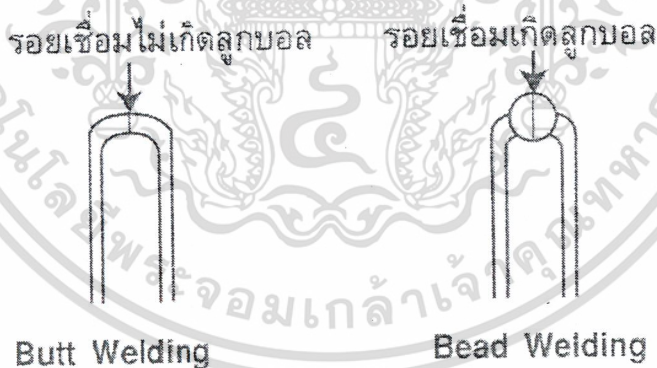


รูปที่ 2.12 แสดงส่วน Reference Junction และ Measuring Junction

2.4.5 การเชื่อมหัวเทอร์โมคัปเปิล

มีความสำคัญมาก ต้องเชื่อมให้ถูกต้องตามต้องการ เพื่อให้ได้การวัดแม่นยำและมีอายุการใช้งานยาว การเชื่อมหัวเทอร์โมคัปเปิลมีการแบ่งตามขนาดของลวดดังนี้

1. ลวดโตที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดตั้งแต่ประมาณ 2 Sq.mm. ขึ้นไป ใช้เครื่องเชื่อมแบบใช้มือธรรมดา โดยมี ก๊าซอาร์กอนซึ่งเป็นก๊าซเฉื่อยไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับสารใดชนิดปกคลุมบริเวณเชื่อมเพื่อไม่ให้เกิดออกไซด์ (oxide) ขึ้นตรงรอยต่อของขดลวด เรียกว่าการเชื่อมแบบ Butt ซึ่งกว่าการเชื่อมลวดขนาดเล็ก



รูปที่ 2.13 แสดงรอยเชื่อมของหัวเทอร์โมคัปเปิล

2. ลวดที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กกว่า 2 Sq.mm. การเชื่อมด้วยมือจะมีความผิดพลาดจากคนทำ (Human error) ได้มาก เพราะขึ้นอยู่กับทักษะ และสมาธิ ซึ่งต้องผ่านการฝึกฝนมาอย่างดี จึงควรใช้เครื่องจักรเชื่อมอัตโนมัติ เพื่อให้ได้รอยต่อที่สนิท, สมมาตรและไม่มีค่าความผิดพลาด การเชื่อมลวดขนาดเล็ก เรียกว่าการเชื่อมแบบ Bead Welding ซึ่งเครื่องจักรอัตโนมัติจะเชื่อมให้เกิดรอยต่อที่เป็นลูกบอลครึ่งลูก 2 ชิ้น เชื่อมต่อกันสนิทตลอดรอยต่อ ดังรูป 2.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก



ข

รูปที่ 2.14 แสดงการเชื่อมโดยใช้เครื่องจักรอัตโนมัติและแสดงการเชื่อมโดยใช้มือ

รูป 2.14 ก. แสดงการเชื่อมโดยใช้เครื่องจักรอัตโนมัติมีระยะห่างระหว่างขั้วทั้งสองและระยะจากหัวเชื่อมเท่ากันทุกครั้งทำให้รอยเชื่อมเกิดอุณหภูมิตดสนิทและสมมาตรกันทำให้วัดได้แม่นยำและอายุการใช้งานนานกว่า

รูป 2.14 ข. แสดงการเชื่อมโดยใช้มือแน่นอนรอยเชื่อมอาจจะไม่ตดสนิท ไม่สมมาตรอายุการใช้งานสั้นและค่าผิดพลาดมากกว่า

2.4.6 การประกอบหัวเทอร์โมคัปเปิลเข้ากับท่อหรือ Metal sheath มี 3 ลักษณะคือ

2.4.6.1 แบบเปลือย (Exposed Junction)

ให้ผลการวัดไวที่สุด(Minimum Response Time)จุดต่อสำหรับวัดสัมผัสกับของเหลว(Fluid) ที่ต้องการวัดโดยตรงผลเสียของแบบเปลือยคือ ขำรูดเสียหายง่ายและอายุการใช้งานสั้น ไม่เหมาะสำหรับงานความดันสูงหรือ ของเหลวที่มีการกลั่นตัว

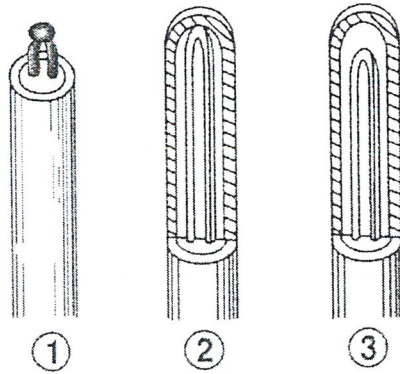
2.4.6.2 แบบ Ground Junction

สายทั้งคู่ของเทอร์โมคัปเปิลที่เชื่อมติดกัน จะถูกเชื่อมต่อลงบนส่วนปลายท่อของโลหะของ Metal Sheath อีกที่หนึ่ง สามารถใช้ได้กับของเหลวที่เป็นสารกัดกร่อน ให้ผลการตอบสนองต่ออุณหภูมิไวกว่าแบบ Ungrounded Junction แต่มีข้อเสียคือ ถ้ามีกระแสไฟรั่วจากอุปกรณ์อื่นมาที่ Metal Sheath จะทำให้ค่าวัดอุณหภูมิผิดพลาดได้

2.4.6.3 แบบ Ungrounded Junction

ใช้ได้กับของเหลวที่เป็นสารกัดกร่อน มีอายุการใช้งานยืนยาวที่สุด แต่มีข้อเสียคือ ให้ผลการวัดช้าเหมาะกับงานที่อุณหภูมิที่ไม่เปลี่ยนแปลง ในอุตสาหกรรมใช้แบบนี้เกือบทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 แสดงการประกอบหัวเทอร์โมคัปเปิลเข้ากับท่อแบบต่างๆ

สำหรับ Metal Sheath ที่เป็นเซรามิกนั้นมักจะใช้ในกรณีที่อุณหภูมิใช้งานสูง เช่น 800 °C ขึ้นไปหรือบรรยากาศที่มีการกัดกร่อนสูง

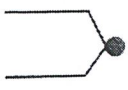



จิตเทอร์โมคัปเปิล (Sheath Thermocouple) คือตัวเทอร์โมคัปเปิลที่มีตัว Metal Sheath ผลิตสำเร็จรูปมาพร้อมกับตัวเทอร์โมคัปเปิลเลย จึงทำให้อุณหภูมิสูงกว่าแบบธรรมดาเพราะฉนวนไฟฟ้าที่อยู่ระหว่างลวดเทอร์โมคัปเปิลกับ Metal Sheath จะถูกบีบอัดแน่นกว่าปกติหลายเท่า ท่อ Metal Sheath มักทำจากโลหะเหนียวและยืดหยุ่น สามารถตัดต่อองได้ตามความเหมาะสมกับงาน

ฉนวนของเทอร์โมคัปเปิล (Insulation) เป็นส่วนที่ใช้กั้นระหว่างเทอร์โมคัปเปิลกับ Metal Sheath ส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบแมกนีเซียมออกไซด์, อลูมิเนียมออกไซด์หรือเบริลเลียมออกไซด์

เทอร์โมเวล (Thermowell) เป็นอุปกรณ์เสริม (accessory) ใช้ป้องกันไม่ให้เทอร์โมคัปเปิลสัมผัสกับสารที่ต้องการวัดอุณหภูมิโดยตรง เช่น สารที่กัดกร่อน, มีความดันสูง หรือในบางกรณี ที่ต้องการถอดตัวเทอร์โมคัปเปิลเพื่อซ่อมบำรุงโดยไม่รบกวนการทำงานของระบบจำเป็นต้องใช้ Thermowell เป็นตัวกลางด้วยเช่นกัน

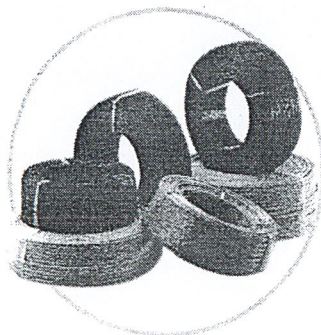
สายต่อเทอร์โมคัปเปิล (Extension Wire) คือสายที่ใช้ในการเชื่อมต่อที่เทอร์โมคัปเปิลมีอยู่แล้ว ในกรณีที่อยู่วัดอุณหภูมิและจุดที่ต้องการรับสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิลอยู่ห่างกัน มี 2 แบบ คือ แบบที่ทำจากสารประเภทเดียวกับ เทอร์โมคัปเปิล (เช่น Type E , J , K , T) และแบบที่ทำจากโลหะต่างชนิดกับเทอร์โมคัปเปิลเช่น (Type R , S , B) เนื่องจากวัสดุที่ใช้ทำสายคือแพลทินัม มีราคาแพง

ตารางที่ 2.8 เปรียบเทียบคุณสมบัติเทอร์โมคัปเปิล และ อาร์ทีดี (Pt100)

หัววัด	เทอร์โมคัปเปิล	อาร์ทีดี (Pt100)
สัญลักษณ์		
ลักษณะกราฟเอาต์พุต		
ข้อดี	<ul style="list-style-type: none"> ■ ไม่ต้องใช้ไฟเลี้ยง ■ ง่าย ■ ไม่แพง ■ ใช้งานได้หลากหลาย ■ ช่วงการวัดอุณหภูมิกว้าง 	<ul style="list-style-type: none"> ■ เสถียรภาพสูง ■ เทียงตรงที่สุด ■ มีความเป็นลิเนียร์มากกว่าเทอร์โมคัปเปิล
ข้อเสีย	<ul style="list-style-type: none"> ■ ไม่มีลักษณะเส้นตรง ■ แรงดันต่ำ ■ ไม่ค่อยเสถียร ■ ความไวต่ำสุด 	<ul style="list-style-type: none"> ■ แพง ■ ต้องการไฟเลี้ยง ■ มีความร้อนเกิดขึ้นที่ตัวมันเอง
ช่วงการวัดมากที่สุด	-270 ถึง 1820 °C	-250 ถึง 600 °C
Repeatability	1.1 °C ถึง 8.25 °C	0.0275 °C ถึง 0.055 °C
เสถียรภาพการใช้งานที่อาจเปลี่ยนแปลงได้	0.55 °C ถึง 1.1 °C ต่อปี	น้อยกว่า 0.10% ภายใน 5 ปี
ความไวในการวัด	10-50 $\mu\text{V} / ^\circ\text{C}$	0.2 ถึง 10 $\Omega / ^\circ\text{C}$
Interchangeability	+ 0.75%	+ 0.5%

2.4.7 สายสำหรับต่อกับหัววัดเทอร์โมคัปเปิลและอาร์ทีดี

สายสำหรับต่อกับหัววัดเทอร์โมคัปเปิล ไปยังเครื่องวัดและควบคุมอุณหภูมิ มีหลายชนิดตามความเหมาะสมกับการใช้งาน และให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมบริเวณที่ติดตั้งสายสำหรับต่อ จึงไม่ทำให้ค่าอุณหภูมิวัดผิดพลาดไปมาก ห้ามใช้สายไฟธรรมดาต่อเป็นอันขาดทำให้อุณหภูมิที่วัดได้มีการผิดพลาด หนึ่งวิธีสุดที่ใช้ทำลวดของสายต่อกับหัววัดเทอร์โมคัปเปิลจะมีคุณสมบัติคล้ายกับโลหะของลวดเทอร์โมคัปเปิลมาก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับที่ 2.16 แสดงลักษณะของสายเทอร์โมคัปเปิลญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.9 แสดงสายต่อเทอร์โมคัปเปิลรุ่นและสายต่ออาร์ทีดี (Pt 100) ชนิดต่างๆ (นำมาจาก คู่มือ เทคโนโลยี อุปกรณ์วัดและควบคุมทางอุตสาหกรรม 2002)

■ สายต่อเทอร์โมคัปเปิล

รูป	ชนิด	รุ่น	ขนาดสายตัวนำ	ขนาดพื้นที่หน้าตัด	ฉนวน	ทนอุณหภูมิได้
	K (CA)	WCA-G	4/0.32x2	0.3	พี.วี.ซี	-20 - 90 °C
		WCA-G	7/0.32x2	0.5		
		WCA-G	4/0.65x2	1.3		
		WCA-G	7/0.65x2	2.3		
	K (CA)	WCA-H	4/0.32x2	0.3	สายไฟเบอร์กลาส	0 - 270 °C
		WCA-H	7/0.32x2	0.5		
		WCA-H	4/0.65x2	1.3		
		WCA-H	7/0.65x2	2.3		
	K (CA)	WCA-H (SOS)	4/0.32x2	0.3	ข้างใน : สายไฟเบอร์กลาส ข้างนอก : สแตนเลสซีลด์	0 - 270 °C
	K (CA)	TC-CA	1/0.65x2	0.3	สแตนเลสซีลด์	0 - 270 °C
	J (IC)	WIC-G	7/0.32x2	0.3	พี.วี.ซี	-20 - 90 °C
		WIC-G	7/0.65x2	2.3		
	J (IC)	WIC-H	4/0.65x2	0.3	สายไฟเบอร์กลาส	0 - 270 °C
		WIC-H	7/0.65x2	2.3		
		WIC-H	4/0.65x2	1.3		
	J (IC)	WIC-H (SOS)	4/0.65x2	1.3	ข้างใน : สายไฟเบอร์กลาส ข้างนอก : สแตนเลสซีลด์	0 - 270 °C
	J (IC)	TC-IC	1/0.65x2	0.3	สแตนเลสซีลด์	0 - 270 °C
	R/S (PR)	WPR-H	7/0.32x2	0.5	สายไฟเบอร์กลาส	0 - 270 °C
		WPR-H	4/0.65x2	1.3		
		WPR-H	7/0.65x2	2.3		
	R/S (PR)	WPR-H (SOS)	4/0.65x2	1.3	ข้างใน : สายไฟเบอร์กลาส ข้างนอก : สแตนเลสซีลด์	0 - 270 °C

■ สายต่ออาร์ทีดี (Pt100)

รูป	ชนิด	รุ่น	ขนาดสายตัวนำ	ฉนวน	ทนอุณหภูมิได้
	Pt100	PVC (Pt100)	3/0.5 x 3	พี.วี.ซี	-20 - 90 °C
	Pt100	PVC (Pt100)	4/0.5 x 4		พี.วี.ซี
	Pt100	TEFLON (Pt100)	0.37 x 3	เทฟลอน	0 - 250 °C
	Pt100	TEFLON (Pt100)	0.37 x 3	ข้างใน : สแตนเลสซีลด์ ข้างนอก : เทฟลอน	0 - 250 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 หลักการของฮีตเตอร์ [5 : P 17]

ฮีตเตอร์ เป็นอุปกรณ์ทำความร้อนในอุตสาหกรรม ที่มีหลักการพื้นฐานคือ เมื่อมีกระแสไหลผ่านลวดตัวนำที่มีค่าความต้านทานสูง ลวดตัวนำจะร้อน ดังนั้นลวดที่ใช้ผลิตฮีตเตอร์จะต้องมีคุณสมบัติเหนียวและทนอุณหภูมิได้สูงสำหรับลวด Kanthal (นิกเกิล : โครเมียม / 80:20)ทนอุณหภูมิได้ถึง 1250 C โดยทั่วไปแล้วโลหะ Kanthal จะมีคุณสมบัติดีกว่าโลหะ Nikrothal และอายุการใช้งานนานกว่าซึ่งปัจจุบันเป็นมาตรฐานที่นิยมจะนำมาทำเตาอบสำหรับอุตสาหกรรมซึ่งข้อได้เปรียบกล่าวพอสังเขปดังนี้

- รองรับอุณหภูมิที่สูงกว่า
- อายุการใช้งานนานกว่า
- รับภาระที่ผิวของตัวต้านทานได้มากกว่า
- ความหนาแน่นน้อยกว่า

นอกจากฮีตเตอร์แบบเส้นลวดแล้วยังมีฮีตเตอร์ซึ่งแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆตามลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกันดังนี้

ฮีตเตอร์แท่ง (Cartridge Heater) ใช้ให้ความร้อนกับวัสดุที่เป็นของแข็ง เช่น เหล็ก โลหะ ต่างๆ ตัวอย่างการใช้งาน เช่น งานบรรจุหีบห่อ งานขึ้นรูปพลาสติก

ฮีตเตอร์ครีป (Finned Heater) และฮีตเตอร์ท่อกลม ใช้ให้ความร้อนกับอากาศ เช่น ใช้ในห้องอบแห้งในเตาอบ

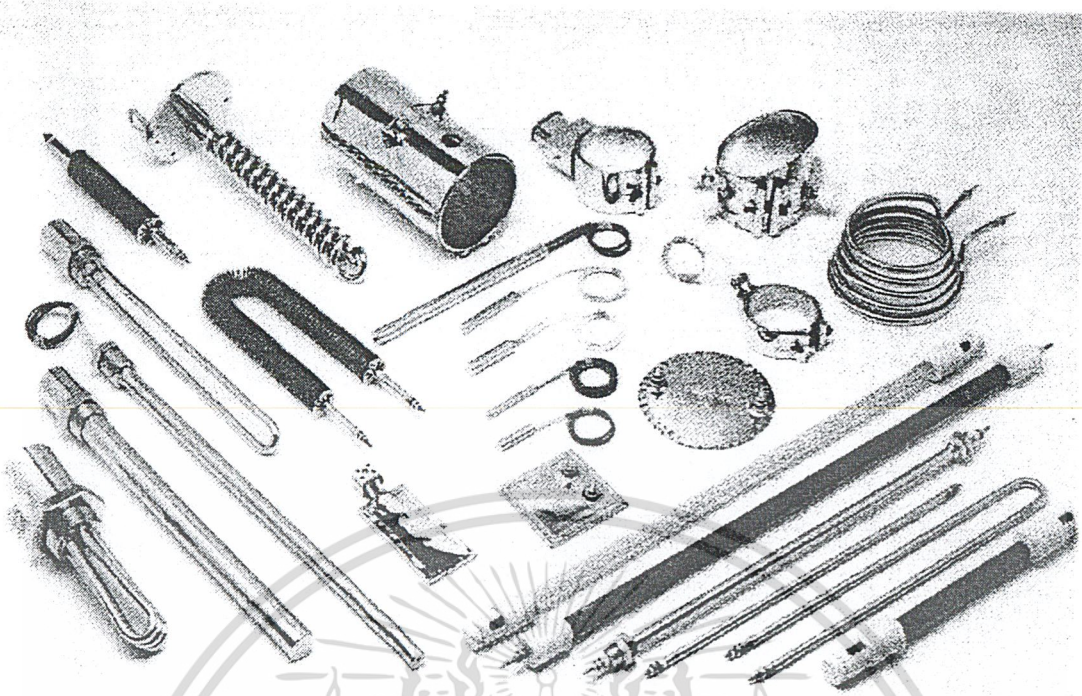
ฮีตเตอร์จุ่ม (Immersion Heater) หรือบางทีเรียกว่า ฮีตเตอร์ดัมพ์น้ำ ใช้ให้ความร้อนกับของเหลวทุกชนิด ตัวอย่างการใช้งานเช่น งานต้มน้ำ ต้มน้ำมัน งานผสมสาร

บอบบินฮีตเตอร์ (Bobbin Heater) ใช้ให้ความร้อนของเหลวเหมือนฮีตเตอร์จุ่ม

ฮีตเตอร์อินฟราเรด (Infrared Heater) ใช้ให้ความร้อนกับวัตถุโดยไม่ต้องสัมผัสโดยตรง ไม่เหมาะกับวัสดุที่มีลักษณะมันวาวเนื่องจากวัตถุมันวาว จะมีคุณสมบัติสะท้อนแสง ทำให้ไม่สามารถดูดซับรังสีอินฟราเรดได้อย่างเต็มที่ ใช้ติดตั้งในเตาอบ หรือ คอนเวเยอร์ได้

ฮีตเตอร์รัดท่อ (Band Heater) ใช้ให้ความร้อนกับของเหลวที่อยู่ในท่อหรือถึงรูปทรงกระบอกโดยรัดจากด้านนอก

ฮีตเตอร์แผ่น (Strip Heater) ใช้ให้ความร้อนโดยแนบกับวัตถุโดยตรงสามารถออกแบบให้เป็นรูปทรงใดๆก็ได้



รูปที่ 2.17 แสดงถึงรูปแบบของฮีตเตอร์ต่างๆ

2.6 การออกแบบเตาอบชุบไฟฟ้า

แบ่งองค์ประกอบที่ใช้ในการออกแบบเตาอบชุบโลหะด้วยไฟฟ้าได้ 13 หัวข้อดังนี้

2.6.1 หลักเกณฑ์ทั่วไป

ในการปรับปรุงคุณสมบัติทางโลหะวิทยาของชิ้นงานที่ผลิตขึ้นมาเช่นแม่พิมพ์ตัดแม่พิมพ์ขึ้นรูป ปัจจุบันนิยมใช้วิธีการทางความร้อน และควบคุมการเย็นตัวของชิ้นงาน เครื่องมือที่ใช้ในการให้ความร้อนและสามารถควบคุมอุณหภูมิได้และนิยมใช้กันในปัจจุบันคือ เตาอบชุบ

เมื่อทำการออกแบบเตาต้องคำนึงถึงอุณหภูมิสูงสุดที่ต้องการก่อน แล้วเลือกวัสดุที่ทำให้ได้ความร้อนตามต้องการ ในที่นี้จะใช้ลวดความต้านทานที่ทำจากบริษัท Kanthal และ Nikrothal เป็นเกณฑ์ในการพิจารณา ลวดความต้านทาน Kanthal จะใช้อุณหภูมิสูงสุดได้ 1375 องศาเซลเซียส ซึ่งเหมาะสมสำหรับสร้างเตาอบชุบที่ต้องการอุณหภูมิเพียง 1000 องศาเซลเซียส ในการออกแบบลวดความต้านทานจะต้องมีข้อมูลเกี่ยวกับสภาพการใช้งาน เช่น อุณหภูมิที่ต้องการ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ และ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไป รายละเอียดการคำนวณจะกล่าวโดยละเอียดต่อไป

2.6.2 อุณหภูมิของเตาอบชุบโลหะไฟฟ้า

ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ต้องการใช้ของวัสดุ เวลาที่จะอบ และ อุณหภูมิแตกต่างระหว่างตัวกำเนิดความร้อนและวัสดุ โดยทั่วไปจะให้อุณหภูมิของเตาสูงกว่าอุณหภูมิที่ต้องการอบประมาณ 2-10%

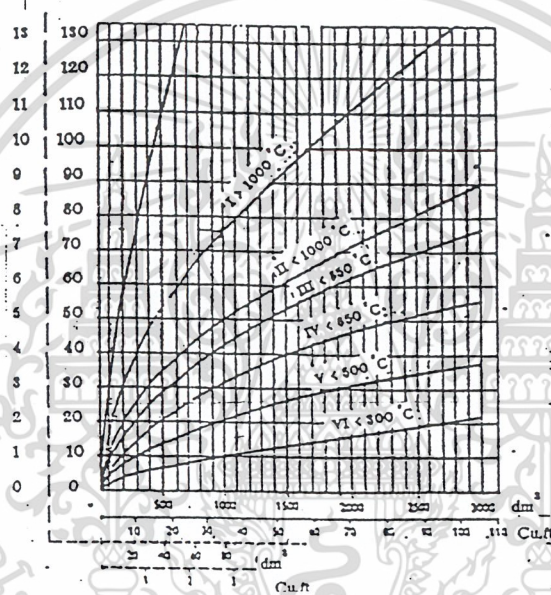
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.3 ปริมาตรภายในเตาอบ

ปริมาตรใช้สอยของเตามีความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและกำลังไฟฟ้าจะต้องออกแบบให้ถูกหลักการคำนวณเพราะจะมีผลต่ออายุการใช้งานของลวดต้านทาน

2.6.4 กำลังไฟฟ้า

กำลังไฟฟ้านำมาคำนวณได้จากความร้อนที่ต้องการใช้ต่อหน่วยเวลารวมทั้ง ความร้อนที่สูญเสียการคำนวณค่าความร้อน ที่ต้องการจะหาจากความต้องการความร้อนจากวัสดุทั้งหมดในเตาพิจารณาพร้อมกับประสิทธิภาพของเตา จะต้องเพื่อการสูญเสียความร้อนด้วย เพื่อให้ได้ความร้อนตามที่ต้องการทั้งหมด



รูปที่ 2.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและปริมาตรที่อุณหภูมิต่างๆของเตาอบโลหะ

2.6.5 แรงเคลื่อนไฟฟ้า

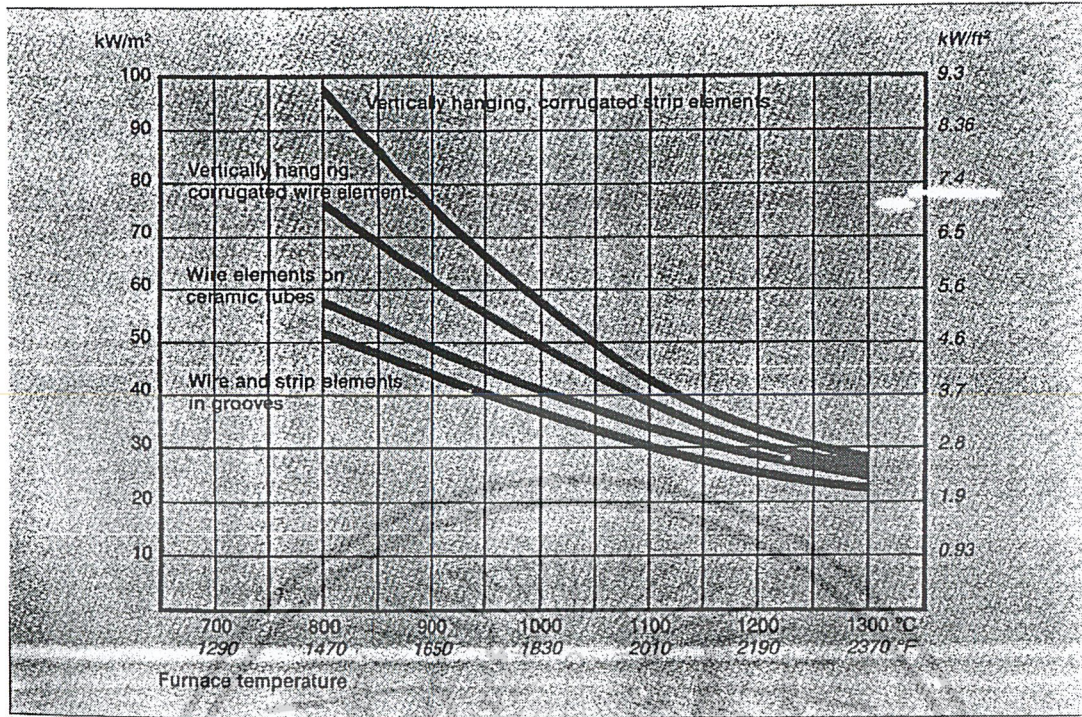
เตาอบไฟฟ้าอุณหภูมิสูงขนาดเล็ก ปกติจะใช้แรงเคลื่อนต่ำ โดยต่อกับหม้อแปลงก่อนแต่ส่วนใหญ่จะต่อตรงได้เลย

2.6.6 ภาระที่ผิวนิ่งเตา

เมื่อเลือกโลหะต้านทาน ปัจจัยที่สำคัญที่ควรคำนึงถึงคืออุณหภูมิสูงสุดของโลหะต้านทานและขนาดพื้นที่หน้าตัดซึ่งส่งผลโดยตรงต่ออายุการใช้งาน

จากรูป 2.19 แสดงถึงภาระที่ผิวนิ่งเตาสูงสุดที่แนะนำซึ่งเป็นฟังก์ชันหนึ่งของอุณหภูมิของเตาสำหรับโลหะชนิดต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเตาอบอุณหภูมิสูงผิวนิ่งที่มีพื้นผิวกว้างจะสามารถกระจายอุณหภูมิได้ดีกว่า และถูกคืองกว่า และสิ่งที่จะต้องระวังคือเมื่อวางโลหะในเตาแล้วต้องระวังการเกิด Overheating

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 แสดงถึงภาระที่ผนังเตาสูงสุดกับโลหะชนิดต่างๆที่หลายอุณหภูมิ

2.6.7 ภาระที่ผิวของตัวต้านทาน (Element Surface Load)

การเพิ่มอุณหภูมิของโลหะต้านทานนั้นจะทำให้เพิ่มภาระที่ผิวมากขึ้น(ยิ่งมากยิ่งไม่ดี) อุณหภูมิสูงสุดของโลหะต้านทานนั้นมีความสัมพันธ์ต่อภาระที่ผิวด้วย เนื่องจากมีผลต่ออายุการใช้งาน ความแข็งแรงของ โลหะต้านทานจะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิภายในเตาสูงขึ้น และสัมพันธ์กับอุณหภูมิสูงสุดของโลหะต้านทาน การผิดรูปร่าง และขนาดของกระแส ปริมาณกระแส ฯลฯ

ภาระที่ผิวของตัวต้านทานมีผลต่อการออกแบบโลหะ 2 ทาง ทางหนึ่งหากลดภาระที่ผิวตัวต้านทาน จะต้องใช้ขนาดของโลหะต้านทานที่ใหญ่ขึ้น สิ้นเปลืองมากขึ้น ในอีกทางหนึ่ง ต้องการให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน เป้าหมายที่สำคัญคือการเลือกค่าภาระที่ผิวของตัวต้านทานที่ให้ค่าที่สมดุลที่สุดระหว่างอายุการใช้งานและค่าใช้จ่าย

$$\rho = P/Ac$$

ρ คือ ภาระที่ผิวของตัวต้านทาน

P คือ กำลังที่ใช้

Ac พื้นที่ผิวของโลหะต้านทาน

ในหน่วยเมตริกซ์ ค่าภาระที่ผิวตัวต้านทานมีหน่วยเป็น W/cm^2 อุณหภูมิของโลหะต้านทานเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่ออายุการใช้งานของโลหะต้านทานและเป็นตัวกำหนดอุณหภูมิที่แผ่ออกมาและภาระที่ผิวของตัวต้านทาน และนับตั้งแต่โลหะKanthalสามารถใช้งานในอุณหภูมิที่สูงกว่าโลหะNikrothal ทำให้รองรับภาระที่ผิวของตัวต้านทานได้สูงขึ้นและอายุการใช้งานได้นานกว่าโลหะNikrothal

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีบรรทัดฐาน 3 ประการสำหรับการกำหนดค่าภาระที่ผิวของตัวต้านทานสูงสุด

-อุณหภูมิของโลหะต้านทาน

-รูปแบบที่เสถียร

-ขนาดของกระแส

การแผ่รังสีได้อย่างอิสระของโลหะจะทำให้มีสภาพการรับภาระที่ผิวของตัวต้านทานสูงสุดสูงขึ้น ซึ่งโลหะต้านทานที่อยู่บน R O B (Rod Over Bend) จะสามารถรับภาระที่ผิวของตัวต้านทานได้มากที่สุด รองลงมาคือโลหะแผ่นและขดลวดของตัวต้านทานที่อยู่บนแท่ง tube และสามารถรองรับภาระที่ผิวของตัวต้านทานได้มากกว่าขดลวดต้านทานที่อยู่ในร่อง

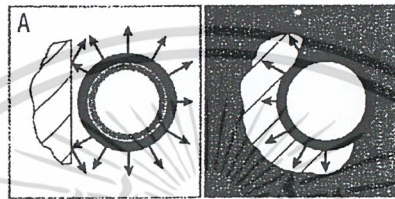


Fig. A)

The Nabertherm Principle:

Unobstructed heat radiation = long service life

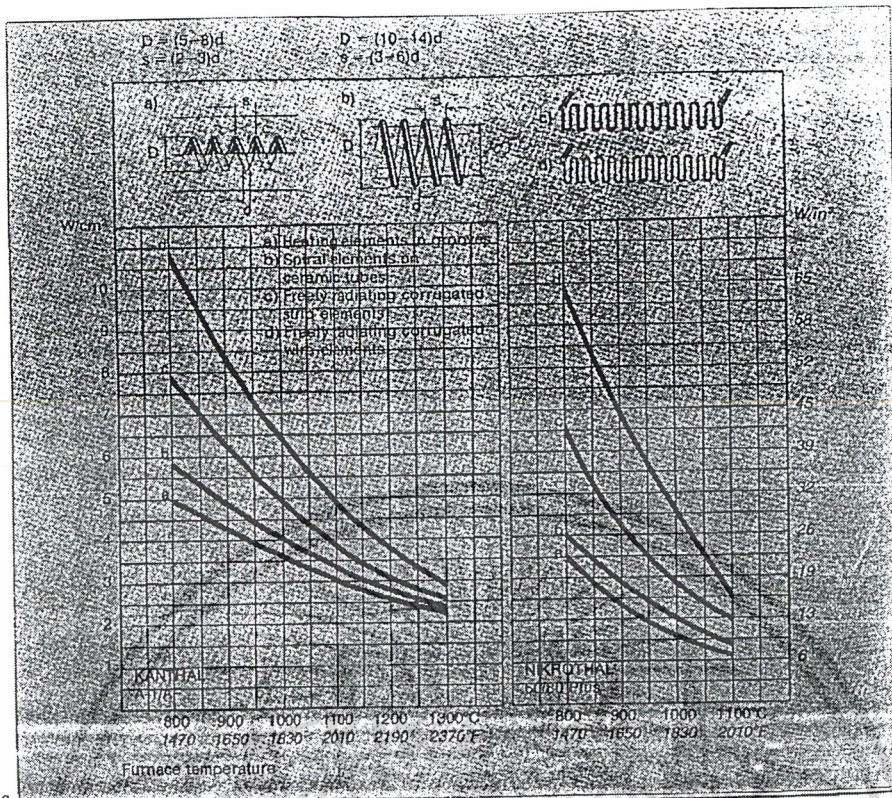
Heating elements of high-grade heating wire internally supported on ceramic tubes

Fig. B)

Heating accumulation = short service life

รูปที่ 2.20 หลักการวางเส้นลวดต้านทาน Nabertherm ของบริษัทNabertherm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 แสดงถึงภาวะที่ผิวต้านทานสูงสุดของโลหะต้านทานในเตาอุตสาหกรรม

ตารางที่ 2.10 แสดงค่าอุณหภูมิของเส้นลวดชนิดต่างๆในหลายๆสภาวะ

	KANTHAL A-1		KANTHAL AF		KANTHAL D		NIKROTHAL 80 Plus		NIKROTHAL 60 Plus		NIKROTHAL 40 Plus	
	°C	°F	°C	°F	°C	°F	°C	°F	°C	°F	°C	°F
Oxidizing:												
Air, dry	1400	2550	1400*	2550	1500	2370	1200	2190	1150	2100	1100	2010
Air, moist	1200	2190	1200	2190	1200	2190	1150	2100	1100	2010	1050	1920
Neutral:												
N ₂ , Nitrogen	1200	2190	1250	2280	1300	2370	1250	2280	1200	2190	1150	2100
Ar, Argon	1400	2550	1400	2550	1300	2370	1250	2280	1200	2190	1150	2100
Exothermic:												
10 CO, 15 H ₂												
5 CO, 70 N ₂	1150	2100	1150	2100	1100	2010	1100	2010	1100	2010	1100	2010
Reducing:												
Endothermic:												
20 CO, 40 H ₂												
40 N ₂	1050	1920	1050	1920	1000	1830	1100	2010	1100	2010	1100	2010
H ₂ , Hydrogen	1400	2550	1400	2550	1300	2370	1250	2280	1200	2190	1150	2100
Cracked ammonia												
75 H ₂ , 25 N ₂	1200	2190	1200	2190	1100	2010	1250	2280	1200	2190	1150	2100
Vacuum:												
10 ⁻⁵ Torr	1150	2100	1200	2190	1100	2010	1000	1830	900	1650	900	1650

* The higher values apply for pre-oxidized material.
 ** For maximum element life above 1900°C (2370°F) we recommend KANTHAL A-1 due to better oxide properties.
 *** Please note risk of "green rot" formation in carburizing atmospheres. Use KANTHAL AF or NIKROTHAL 80 Plus.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 2.21 แสดงถึง ค่าภาระที่ผิวของ โลหะต้านทานสูงสุดที่แนะนำ ภายใต้สภาวะต่างๆ

โลหะ a เส้นลวดและโลหะแบบแผ่นในร่อง

โลหะ b เส้นลวดที่พันบนแท่นแกนเซรามิก (ceramic tube)

ความยาว loop สูงสุดที่แนะนำ

≤ 900 °C 1650 °F 400 mm 15.8 in

1000 °C 1830 °F 350 mm 13.8 in

1100 °C 2010 °F 300 mm 11.8 in

1200 °C 2190 °F 250 mm 9.8 in

1300 °C 2370 °F 150 mm 5.9 in

สำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางที่ควรเลือกค่าภาระต้านทานต่างๆและความยาว loop ที่สั้น เพื่อหลีกเลี่ยงการเสียหายและอายุการใช้งานที่สั้น

2.6.8 ช่วงอายุใช้งานและอุณหภูมิสูงสุด

ข้อแนะนำการใช้โลหะต้านทานให้นานที่สุดเท่าที่เป็นไปได้

-หลีกเลี่ยงการใช้งานในลักษณะ การแกว่งอุณหภูมิช่วงอายุการใช้งานของโลหะต้านทานจะลดลงเมื่อมีการเพิ่มและลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว

-เลือกวัสดุที่มีความหนา วัสดุที่มีความหนาจะสัมพันธ์กับช่วงอายุการใช้งานเช่นการเพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดความต้านทานการเพิ่มพื้นที่ผิวต่อหน่วย สายที่หนากว่าจะให้อายุการใช้งานที่นานกว่า

-ปรับอุณหภูมิโลหะความต้านทานให้สอดคล้องกับบรรยากาศของเตาจากตารางแสดงถึงแบบบรรยากาศต่างๆ ภายในเตาซึ่งส่งผลต่ออุณหภูมิการใช้งานสูงสุดของโลหะความต้านทาน

-หลีกเลี่ยงการเกิดสนิมจากของแข็ง ของเหลว ก๊าซความไม่บริสุทธิ์ของบรรยากาศภายในเตา เช่น การมีละอองน้ำมัน ฟุ้ง ไอ หรือคาร์บอนจะส่งผลเสียหายให้กับโลหะต้านทาน ซัลเฟอร์เป็นสารที่อันตรายมากต่อโลหะนิกเกิล คลอรีน เป็นสารที่อันตรายมากต่อโลหะKanthalและโลหะNikrothal ที่ 1200 °C

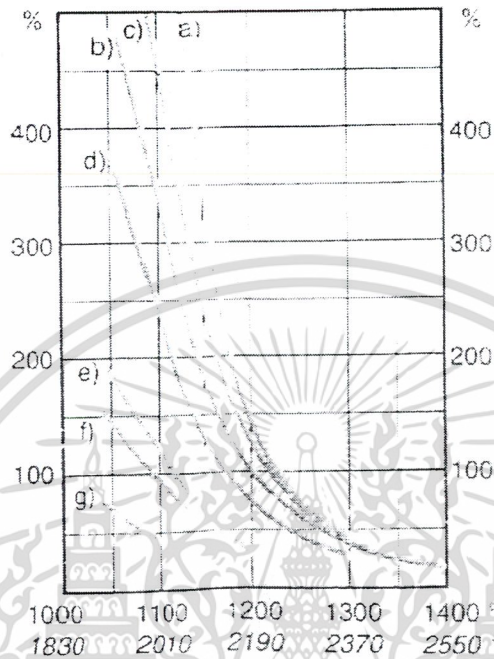
	Diameter, mm / in:			
	1.0-3.0 °C	0.039-0.118 °F	>3.0 °C	>0.118 °F
KANTHAL A-1	1225-1350	2240-2460	1400	2550
KANTHAL AF	1225-1350	2240-2460	1400	2550
KANTHAL D	1100-1200	2010-2190	1300	2370
ALKROTHAL	1000-1050	1830-1920	1100	2010
NIKROTHAL 80 Plus	1075-1150	1970-2100	1200	2190
NIKROTHAL 60 Plus	1000-1075	1830-1970	1150	2100
NIKROTHAL 40 Plus	1000-1050	1830-1920	1100	2010
NIKROTHAL 20 Plus	975-1025	1790-1880	1050	1920

ตารางที่ 2.11 อุณหภูมิสูงสุดของลวดแต่ละชนิดที่ขนาดต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Comparative life (KANTHAL A-1 at 1200°C
2190°F = 100%)

a) KANTHAL APM	e) NIKROTHAL 80 Plus
b) KANTHAL A-1	f) NIKROTHAL 60 Plus
c) KANTHAL AF	g) NIKROTHAL 40 Plus
d) KANTHAL D	



รูปที่ 2.22 แสดงถึงการเปรียบเทียบอายุการใช้งานของลวดKanthalและNikrothal ที่อุณหภูมิ 1200 °C

2.6.9 รูปร่างของตัวต้านทาน

โดยทั่ว ๆ ไปรูปร่างของตัวต้านทานจะมี 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ เป็นเส้นลวดและแบบเป็นแผ่นความแข็งแรงของตัวต้านทานจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น การออกแบบความหนาของแผ่น

2.6.10 การเปลี่ยนแปลงความต้านทานกับอุณหภูมิ

การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของตัวต้านทาน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอัตราการเย็นตัวของตัวกำเนิดความร้อนหลังจากการให้ความร้อนมีผลอย่างมาก การคำนวณค่าความต้านทานที่อุณหภูมิต่าง ๆ หาได้จากสูตรความต้านทานที่อุณหภูมิห้องกับ Factor (C1)

สำหรับวัสดุของบริษัท KANTHAL ผลของการเย็นตัวมีน้อยมาก จึงไม่นำมาพิจารณาสภาพความต้านทานของ KANTHAL Alloy ขึ้นอยู่กับปริมาณของออกซิเดชันที่ผสมอยู่ การใช้งานนาน ๆ ที่อุณหภูมิสูง ๆ จะทำให้ปริมาณออกซิเดชันลดลง ซึ่งทำให้สภาพความต้านทานที่อุณหภูมิใช้งานเกือบคงที่ การเพิ่มสภาพความต้านทานที่อุณหภูมิห้องลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.11 การออกแบบขดลวด

2.6.11.1 สูตรในการหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดที่เหมาะสม

$$d = \frac{1}{2.91} \sqrt[3]{\left(\left(\frac{P}{V}\right)^2 \rho \left(\frac{C_t}{P}\right)\right)} \quad (2.10)$$

ส.ป.ส ทางอุณหภูมิของลวดต้านทาน C_t

ภาระที่ผิวของลวดต้านทาน $P W/cm^2$

กำลังไฟฟ้า P W

แรงเคลื่อนไฟฟ้า V V

อุณหภูมิ T

2.6.11.2 การออกแบบลวดชนิดขดเป็นขดลวด

หลังจากที่กำหนดความ โต้ของขดลวดแล้ว ต่อไปจะต้องกำหนดความยาวของลวดที่จะพันเป็น คอลย์

$$R_t = \frac{v^2}{P} \quad (2.11)$$

R_t = ความต้านทานลวดฮีตเตอร์ขณะร้อน

$$R_{20} = \frac{R_t}{C_t} \quad (2.12)$$

R_{20} = ความต้านทานขณะเย็น

2.6.11.3 การคำนวณขนาดขดลวด D (Spiral Element)

เมื่อได้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของลวด ขึ้นต่อไปคือการหาเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของขด

ลวด (External Diameter of Spiral)

Kanthal Alloy

กำหนดอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (D) กับเส้นผ่านศูนย์กลางของลวด (d)

- สำหรับในอุตสาหกรรม

> 1000 ; $D/d = 6-8$

< 1000 ; $D/d = 5-6$

- สำหรับ Electrical heating ทั่วๆ ไป

$D/d = 4 - 10$

อัตราส่วน D/d ที่น้อยจะทำให้เกิดการยึดตัวของลวดสูง ถ้าอัตราส่วน D/d มากจะทำให้ขดลวดไม่

แข็งแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.11.4 สำหรับสูตรหาจำนวนขดลวด เมื่อทราบความยาว

จำนวนขดลวด (W)

$$\text{ความยาวขด, mm} \quad L_w = W \cdot d \quad (2.13)$$

เพื่อให้ระยะ pitch (S) สม่าเสมอ ได้กำหนดอัตราส่วนดังนี้

อัตราส่วน 2 ถึง 4

$$\text{ความยาวเมื่อยึด} \quad L = S / d \cdot L_w \quad (2.14)$$

2.6.12 การต่อระบบไฟฟ้า

ระบบไฟฟ้าที่ใช้กับเตาอบโลหะประเภทนี้ จะใช้ไฟฟ้าที่มีแรงเคลื่อน 220 V การต่อลวดความต้านทาน นั้นจะต่อแบบขนาน ซึ่งการต่อแบบขนานนี้จะให้ความร้อนได้ดีและสูงกว่าการต่อแบบอนุกรม

2.6.13 การสูญเสียความร้อนในเตาอบ (Heat Loss)

ได้กล่าวคือปัญหาสำคัญของการทำงานในเตาคือ การสูญเสียความร้อน (C ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีที่ จะป้องกันการสูญเสียความร้อนให้ได้ การสูญเสียความร้อนจะเกิดขึ้นตามกรณีต่อไปนี้

- (1) สูญเสียไปกับสิ่งแวดล้อม
- (2) สูญเสียไปกับผนังเตาซึ่งเป็นฉนวนกันความร้อน
- (3) เกิดการรั่วซึมทางความร้อน
- (4) ความร้อนซึ่งผ่านไปยังส่วนที่ยื่นออกนอกเปลือกเตา แล้วกระจายไปสู่บรรยากาศภายนอก
- (5) การแผ่รังสีออกไปทางประตู

2.6.13.1 การสูญเสียความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม

การสูญเสียความร้อนจากพื้นที่ผิวที่ไม่มีฉนวนกันค่าความต้านผิว (Boundary Conductance valve) ตัวอย่างเช่น ถ้าอากาศล้อมรอบเตามีอุณหภูมิ 70 องศาฟาเรนไฮด์อัตราการสูญเสียความร้อนทั้งหมดคือ ค่าความต้านทานที่ผิว (Boundary Conductance Valve)

2.6.13.2 สูญเสียไปกับผนังซึ่งเป็นฉนวนกันความร้อน

การสูญเสียความร้อนในกรณีนี้ จะพิจารณาแยกออกเป็น 2 ประเภท คือ การสูญเสียความร้อน ที่สภาวะสมดุล (Steady State) และขณะที่อุณหภูมิกำลังเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อพิจารณาเตาที่ว่า และมีอุณหภูมิเท่ากับ อุณหภูมิห้องทันทีที่เปิดสวิทซ์ให้เตาทำงาน พลังงานความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นภายในเตาขณะที่ผนังเตาและเปลือก เตายังมีอุณหภูมิอยู่ที่อุณหภูมิห้อง ความร้อนนั้นจะถูกสะสมไว้ภายในเตา จนกระทั่งผิวนอกของเปลือกเตาเริ่ม ร้อน และเกิดการสูญเสียไปกับบรรยากาศภายนอก และเมื่อหยุดทำงานของเตา พลังงานความร้อนที่ถูกเก็บไว้ใน ผนังเตาก็จะค่อย ๆ ลดลงจนหมดไป ในทางปฏิบัติจะควบคุมให้ได้อุณหภูมิมีค่าตามความต้องการได้ จึงจำเป็นต้องศึกษาการทำงานของเตาที่สภาวะสมดุล ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อเตาทำงานไปเรื่อย ๆ จนมีอุณหภูมิกึ่งที่ และมีสภาพการ ที่อุณหภูมิกำลังเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ผลของการสูญเสียความร้อนทั้งสองกระบวนการจะแสดงในรูปของ กราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.13.3 การสูญเสียความร้อนที่สภาวะสมดุล

การกระจายความร้อนในผนังเตาในรูปทรงต่าง ๆ และเป็นวัสดุเดียวกัน ถ้าเป็นผนังเตาชั้นเดียว ด้านที่มีอุณหภูมิสูงกว่ามีอุณหภูมิเป็น t และด้านที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจะมีอุณหภูมิเป็น t_c

การนำความร้อน (Thermal conductivity) เท่ากับ K (Btu/ft² Hm F) และผนังเตามีความเป็น (ft) จะได้อัตราไหลของความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เป็น q_a ดังแสดงในสมการที่ (2.15)

$$q_a = (t_t - t_{g0})k/L \quad (2.15)$$

และเมื่อผนังเตามีพื้นที่ทั้งหมดมีค่าเท่ากับ A (sq.ft) จะทำให้อัตราการไหลของความร้อนมีค่าดังสมการที่ (2.16)

$$q_{total} = q_a \times A \quad (2.16)$$

แต่ในทางปฏิบัติแล้วไม่สามารถหาค่าของอุณหภูมิ ที่ผิวของผนังเตา จึงใช้ค่าอุณหภูมิภายในเตา (t) กับอุณหภูมิของบรรยากาศภายนอก เป็นค่าประมาณแทน จึงทำให้อัตราการไหลของความร้อนเป็นดังสมการที่ (2.17)

$$q = (t_t - t_g)/R_h \quad (2.17)$$

เมื่อ R_h คือ ความต้านทานความร้อนของผนังเตาซึ่งขึ้นอยู่กับารออกแบบและค่าความต้านทานผิว (Boundary Conductance values) ดังตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.12 แสดงค่าความต้านทานความร้อนของผนังเตา

ลักษณะของผนังเตา	R_h
แบบเรียบชั้นเดียว	$(L/K+1/h_1+1/h_g)(1/A)$
แบบเรียบหลายชั้น	$(L_1/K_1+L_2/K_2+L_3/K_3+1/h_g+1/h_4)(1/A)$

แต่ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของฉนวนจะเปลี่ยนแปลงไป ตามอุณหภูมิจึงจำเป็นต้องทราบค่าของอุณหภูมิในชั้นต่าง ๆ ของผนังเตา เพื่อเลือกค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ที่ถูกต้อง

สำหรับการกระจายความร้อนในฉนวนหลาย ๆ ชั้นผลต่างของอุณหภูมิมระหว่างผิวนอกกับผิวใน ($t-t$) เป็นสัดส่วนกับผลกับผลรวมของความต้านทานความร้อน (R) อุณหภูมิจะมีค่าลดลงไปในแต่ละชั้น ความแตกต่างของอุณหภูมิในชั้นที่หนึ่ง t มีค่าดังสมการที่ (2.18)

$$t_1 = [(L_1/h_1)(t_r - t_g)]/[L_1/K_1 + L_2/h_2/h_3 + \dots + 1/h_0 + 1/h_1] \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับชั้นใด ๆ จะความแตกต่างของอุณหภูมิคงสมการที่ (2.19)

$$t_1 = [(L_n/h_n)(t_1 - t_a) / [L_1/h_1 + L_2/h_2 + \dots + 1/h_0 + 1/h_1]] \quad (2.19)$$

เมื่อทราบลักษณะการกระจายความร้อนแล้ว ก็สามารถเลือกชนิดของวัสดุที่จะใช้ทำผนังเตาได้ นอกจากนี้รูปร่างของเตา ก็มีผลต่อการสูญเสียความร้อนเช่นเดียวกับกับขนาดของเตาพิจารณาได้จากตารางปฐพีเหลี่ยมลูกบาศก์ กับเตาทรงกระบอก จะมีข้อแตกต่างกันดังนี้

- ปริมาตรภายในของเตาทรงกระบอกมีมากกว่าในขนาดที่เท่ากัน
- พื้นที่ผนังด้านในของเตาที่ทรงกระบอกเล็กกว่า
- การสูญเสียความร้อนที่ผนังเตา ณ สภาวะสมดุลของเตาที่เหลี่ยมลูกบาศก์มีมากกว่า
- ถ้าพื้นที่ผนังด้านในมีค่าเท่ากัน เตาทรงกระบอกจะมีอัตราการไหลของความร้อนต่ำกว่า

2.6.13.4 การสูญเสียความร้อนซึ่งผ่านมาจากผนังเตา

ในช่วงที่อุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อย ๆ ความร้อนจะถูกสะสมไว้ที่ผนังเตา ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.20)

$$\text{ปริมาณความร้อนที่สะสมไว้ที่ผนังเตา} = \text{น้ำหนักของผนังเตา} \times \text{อุณหภูมิเฉลี่ย} \times \text{ความร้อนจำเพาะ} \quad (2.20)$$

2.6.13.5 การสูญเสียความร้อนขณะทำงานเป็นช่วง (Intermittent Operation Loss)

หลังจากที่เปิดเตาแล้ว ความร้อนที่ถูกเก็บอยู่ในผนังเตา จะเริ่มกระจายผ่านออกไปทางผิวด้านนอก ซึ่งในทางทฤษฎีแล้วจะใช้เวลาอันเป็นอนันต์กว่าที่อุณหภูมิของเตาจะมีค่าเท่ากับอุณหภูมิห้องอีกครั้งหนึ่ง อย่างไรก็ตาม เมื่อปิดเตาในขณะที่ความร้อนยังคงอยู่ กระบวนการเพิ่มความร้อน (Heating up) จนถึงสภาวะสมดุล (Steady state) ครั้งที่สอง จะใช้เวลาและพลังงานน้อยกว่าการปิดเตาขณะที่กำลังเย็นอยู่ ลักษณะเช่นนี้เรียกว่าการทำงานเป็นช่วง (Intermittent Operation)

การหาความร้อนที่สูญเสียของการทำงานในลักษณะเช่นนี้ ก็สามารถทำได้แต่เป็นเพียงค่าประมาณเท่านั้น และมีข้อยุ่งยากมากกว่าการทำงานในสภาวะสมดุล

2.6.13.6 การสูญเสียความร้อนเนื่องจากการลัดวงจรทางความร้อน (Thermal Short Circuit)

วัสดุที่มีการนำความร้อนที่ดีกว่าจะทำให้เกิดการลัดวงจรทางความร้อน ระหว่างตัวนำที่มีการนำความร้อนที่แย่กว่า ซึ่งถ้าวัสดุที่ทำให้เกิดการลัดวงจรมีความหนาจะทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนน้อย

2.6.13.7 ความร้อนที่สูญเสียไปกับวัสดุที่ยื่นออกมานอกเตา

วัสดุที่ยื่นออกมานอกเตาที่เห็นได้ชัดคือ ตัวนำไฟฟ้า เพื่อต่อเข้ากับลวดความต้านทาน ถ้าพิจารณาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่วัสดุดังกล่าว ก็สามารถหาความร้อนสูญเสียที่พื้นผิวหน้าตัดบนวัสดุดังกล่าวได้ และสมมติว่าแต่ละหน้าตัดมีอุณหภูมิคงที่แล้วอุณหภูมิของวัสดุดังกล่าว เป็นฟังก์ชันกับระยะทางจากเตา และรูปเรขาคณิต และคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุนั้น

อย่างไรก็ตาม ความร้อนที่สูญเสียในกรณีนี้มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความร้อนที่สูญเสียไปกับผนังเตา

2.6.13.8 ความร้อนที่สูญเสียไปทางช่องเปิดต่างๆ ของเตา

ช่องเปิดต่าง ๆ ของเตาที่เห็นได้ชัดก็คือประตูเตา การแผ่รังสีของความร้อนสามารถผ่านประตูได้ ดังนั้นในทางปฏิบัติควรมีประตูเตาที่ปิดมิดชิด เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนที่เกิดขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การดำเนินงาน

3.1 การวางแผนการดำเนินงาน

ในการดำเนินงานของโครงการเรื่องเตาอบไฟฟ้า ทางผู้ดำเนินงานได้ทำการศึกษาหลายขั้นตอน เพื่อให้การดำเนินงานของโครงการนี้บรรลุวัตถุประสงค์ และได้แบ่งขั้นตอนในการดำเนินงานออกเป็นดังนี้คือ

1. การศึกษาข้อมูลเบื้องต้นและรวบรวมข้อมูลเพื่อนำมาเป็นข้อมูลในการจัดสร้างเตาอบไฟฟ้า
2. การคำนวณและการออกแบบเตาอบไฟฟ้า
3. การสร้างเตาอบไฟฟ้า
4. การทดสอบและปรับปรุงแก้ไขเตาอบไฟฟ้า
5. การประเมินผลการดำเนินงานของเตาอบไฟฟ้า
6. การจัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์

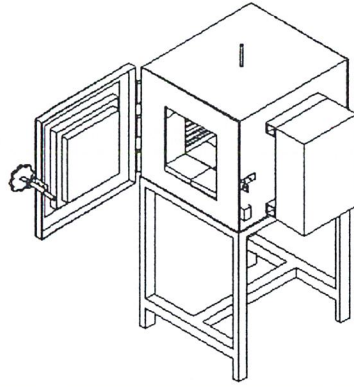
3.2 การออกแบบสร้างเตาอบ

ในการออกแบบและสร้างเตาอบไฟฟ้านี้ อาศัยคู่มือของบริษัท Kanthal กับแนวทางในการออกแบบตัวกำหนดความร้อนซึ่งเป็นลวดต้านทานที่สามารถให้อุณหภูมิได้สูงถึง 1350 องศาเซลเซียส การออกแบบตัวเตาขนาดต่าง ๆ พิจารณาจากขนาดของอิฐฉนวนที่ใช้เป็นผนังเตา โดยให้สามารถป้องกันการสูญเสียความร้อนให้มากที่สุด ขั้นตอนการทำงานมีดังนี้

1. หากำลังไฟฟ้าที่ใช้กับเตาอบไฟฟ้า
2. หาขนาดของลวดต้านทาน
3. ออกแบบร่องใส่ลวดต้านทาน
4. ออกแบบประตูเตา โดยใช้เกลียวล็อกในการเปิดปิด
5. การประกอบส่วนต่าง ๆ

3.2.1 กำลังไฟฟ้าที่ใช้กับเตาอบไฟฟ้า

ตัวแปรที่สำคัญในการพิจารณาหาลำโพงไฟฟ้าที่ใช้กับเตาอบไฟฟ้า คือปริมาณภายในเตา (Chamber) ซึ่งในที่นี้เตาที่ออกแบบเป็นเตาที่มีฉนวนกันความร้อนที่มีปริมาตรภายในเตา 36 ลูกบาศก์เดซิเมตร และอุณหภูมิสูงสุด 1000 องศาเซลเซียส จากรูปที่ 2.18 สามารถหาลำโพงไฟฟ้าได้เท่ากับ 5.25 kW



รูปที่ 3.1 แสดงแบบเตาอบไฟฟ้าที่ได้ออกแบบ

3.2.2 ขนาดของลวดต้านทาน

วิธีการหาขนาดของลวดต้านทาน ต้องคำนึงถึงภาระที่ผิวของลวดต้านทาน ซึ่งมีอิทธิพลต่อ

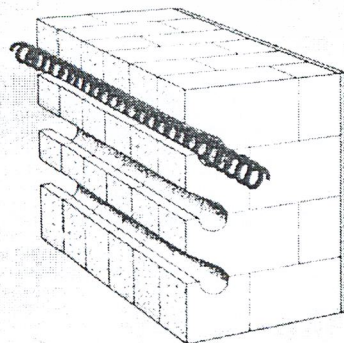
1. อายุการใช้งานช่องลวดต้านทาน
2. กำลังไฟฟ้าที่ต้องการ 6.56 กิโลวัตต์
3. อุณหภูมิที่ต้องการ 1000 °C

บริษัท Kanthal ได้เสนอแนะค่าของภาระที่ผิวไว้ตามตารางที่ ก-1 และได้เลือกใช้ลวดต้านทาน Kanthal AF ซึ่งมีค่าของภาระที่ผิวเท่ากับ 2.5 วัตต์/ซม.² ทำให้สามารถหาเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดต้านทานได้ 1.2 มิลลิเมตร และยาว 16.969 เมตรต่อเฟส โดยวิธีการคำนวณที่แสดงไว้ในภาคผนวกที่ ข หรือจากโดยวิธีการพล

3.2.3 ร่องใส่ลวดต้านทาน

ขนาดของร่องใส่ลวดต้านทาน

- | | | |
|-------------------------------------|----|-----------|
| - เส้นผ่านศูนย์กลางของร่อง | 9 | มิลลิเมตร |
| - ความกว้างของช่องโค | 6 | มิลลิเมตร |
| - ระยะระหว่างศูนย์กลางของร่องถึงขอบ | 10 | มิลลิเมตร |
| - ระยะระหว่างร่อง | 25 | มิลลิเมตร |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนรูปที่ 3.2 แสดงแบบร่องใส่ลวดความต้านทานของเตาอบให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 การออกแบบประตูเตา

ประตูเตาจะใช้บานพับเปิดปิดประตูและปิดด้วยเกลียวล็อก

3.3 วัสดุส่วนประกอบของโครงเตา

3.3.1 อิฐทนไฟขนาดมาตรฐาน (Standard Refractory Bricks)

หมายถึง อิฐทนไฟที่มีค่าการนำความร้อนและความจุความร้อนต่ำ ซึ่งมีความหนาแน่นรวมและการเปลี่ยนแปลงโดยการเผาเข้าเป็นไปตามรายละเอียดที่กำหนดไว้ในแต่ละชั้นคุณภาพ ซึ่งอิฐที่ใช้เป็นอิฐทนไฟอย่างเบาซึ่งสามารถทำร่องได้ง่ายเป็นชนิด C-1 ST-76

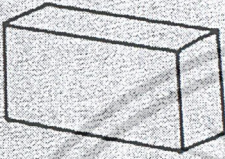

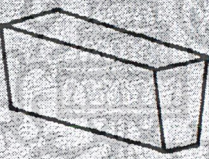
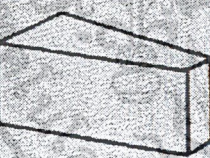



รูปที่ 3.3 แสดงอิฐทนไฟชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิฐทนไฟขนาดมาตรฐาน

STANDARD REFRACTORY BRICKS

DESCRIPTION SHAPE	BRICK NO.	ASTM (SK 30 - A - 90)
STRAIGHT 	ST-76	ST-76 76 × 115 × 230
	ST-64	ST-64 64 × 115 × 230
SPLIT 	SP-50	SP-50 50 × 115 × 230
	SP-38	SP-38 38 × 115 × 230
	SP-32	SP-32 32 × 115 × 230
	SP-25	SP-25 25 × 115 × 230
SIDE ARCH 	SA-70	SA-70 76/70 × 115 × 230
	SA-64	SA-64 76/64 × 115 × 230
	SA-50	SA-50 76/50 × 115 × 230
END ARCH 	EA-70	EA-70 76/70 × 115 × 230
	EA-64	EA-64 76/64 × 115 × 230
	EA-50	EA-50 76/50 × 115 × 230
KEY 	KE-102	KE-102 76 × 115/102 × 230
	KE-89	KE-89 76 × 115/89 × 230
	KE-76	KE-76 76 × 115/76 × 230

รูปที่ 3.4 แสดงอิฐทนไฟขนาดต่างๆและมีติของอิฐทนไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 ผนวกันความร้อนเซรามิกไฟเบอร์

ผนวกันซึ่งมีคุณสมบัติในการนำความร้อนต่ำ ทำให้เก็บความร้อนได้ดี (หรือกั้นความร้อนจากภายนอกได้ดี) ทำให้ประหยัดพลังงาน

การประยุกต์การใช้งาน

ใช้บุผนังตู้เพื่อเป็นผนวกันความร้อน

ใช้รองงานเชื่อม

ใช้เป็นภาชนะสำหรับรองรับวัตถุที่มีอุณหภูมิสูง

คุณลักษณะเด่น

ทนอุณหภูมิได้ 1260 °C และ 1400 °C

มีทั้งแบบผืน แผ่นแข็ง และแบบก้อนฝอย (คล้ายสำลี) ให้เลือกใช้ตามความเหมาะสม

มีคุณสมบัติในการดูดซับเสียงได้ดี

น้ำหนักเบาสามารถตัด โค้งงอได้ตามต้องการ จึงง่ายแก่การติดตั้ง

ไม่ติดไฟ

อายุการใช้งานยาวนาน

3.3.2.1 เซรามิกไฟเบอร์แบบกระดานแข็ง (Board)

คุณลักษณะ

ขนาด 900 มม. x 600 มม. (ยาว x กว้าง)

อุณหภูมิใช้งาน 1260 และ 1400 °C

ความหนา 25 และ 50 มม.

เหมาะจะใช้กับการบุผนังเรียบ เช่น ห้องอบความร้อน , เตาเผา ฯลฯ

รูปที่ 3.5 แสดงเซรามิกไฟเบอร์แบบกระดานแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติเซรามิกไฟเบอร์แบบกระดานแข็ง

อุณหภูมิใช้งาน (°C)	1,260	1,400
จุดหลอมเหลว (°C)	1,760	1,700
ขนาด ยาว x กว้าง (มม.)	900x600	
ความหนา (มม.)	25	50
ความหนาแน่น (kg/m ³)	250	
การนำความร้อน (Kcal/mh °C)	ที่ 600 °C	0.08
	ที่ 800 °C	0.12
	ที่ 1,000 °C	0.16

3.3.2.2 เซรามิกไฟเบอร์แบบผืน (Blanket)

คุณลักษณะ

เป็นม้วนหน้ากว้าง 600 มม. ยาว 7200 มม. หนา 25 มม.

ความหนาแน่น 96 ,128 และ 160 kg/m³ (ความหนาแน่นสูงจะมีความเป็นฉนวนดี)

เหมาะจะใช้กับการบุผนังที่มีความโค้ง เช่น เตาหลอม , ทำมาทนความร้อน



รูปที่ 3.6 แสดงเซรามิกไฟเบอร์แบบผืน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 แสดงคุณสมบัติเซรามิกไฟเบอร์แบบผืน

อุณหภูมิใช้งาน (°C)		1,260	1,400
จุดหลอมเหลว (°C)		1,760	1,700
ขนาด (มม.)		7200x600	
ความหนา (มม.)		25	
การนำความร้อน (Kcal/mh °C) (ที่ความหนาแน่น 128 kg/m ³)	ที่ 600 °C	0.10	0.11
	ที่ 800 °C	0.14	0.17
	ที่ 1,000 °C	0.20	0.25

3.3.2.3 เซรามิกไฟเบอร์แบบก้อนฝอย (Bulk)

เป็นก้อนฝอยคล้ายสำลี สามารถให้อัดหรือยืดเปลี่ยนรูปได้ ความหนาแน่นอยู่ในช่วง 62 – 200 kg/m³ ขึ้นอยู่กับการอัดแน่นของผู้ใช้ เหมาะกับการหุ้มท่อหรืออุดรอยที่แบบกระดาน หรือแบบผืนเข้าไม่ถึง



รูปที่ 3.7 แสดงเซรามิกไฟเบอร์แบบก้อนฝอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 แสดงคุณสมบัติเซรามิกไฟเบอร์แบบก้อนฝอย

อุณหภูมิใช้งาน (°C)		1,260	1,400
จุดหลอมเหลว (°C)		1,760	1,700
ขนาดบรรจุ		15 kg	
ความหนาแน่น (kg/m ³)		60-200	
การนำความร้อน (kcal/mh °C) (ที่ความหนาแน่น 190 kg/m ³)	ที่ 600 °C	0.12	0.12
	ที่ 800 °C	0.16	0.16
	ที่ 1,000 °C	0.23	0.23

3.3.3 ปูนทนไฟ (Refractory Mortar)

เป็นวัสดุทนไฟที่ใช้ก่ออิฐทนไฟแต่ละก้อนให้ยึดติดกันช่วยให้โครงสร้างสามารถคงรูปร่างอยู่ได้ และช่วยป้องกันการร้าวไหลของเปลวไฟและวัตถุติดภายในเตา มีคุณสมบัติทนทานต่ออุณหภูมิสูงได้เช่นเดียวกับวัสดุทนไฟชนิดอื่น ๆ

3.3.3.1 ประเภทของปูนทนไฟ แบ่งได้เป็น 2 ชนิด

1. ปูนทนไฟชนิดที่ต้องให้ความร้อนจึงจะแข็งตัว เป็นปูนทนไฟชนิดผงแห้ง ซึ่งการใช้งานต้องนำไปผสมน้ำตามสัดส่วนที่กำหนดไว้ข้างตงก่อนการใช้งาน จะให้ความแข็งแรงสมบูรณ์เมื่อได้รับความร้อนสูงเกินกว่า 1000 °C
2. ปูนทนไฟชนิดที่ให้ความแข็งแรงที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งมีทั้งชนิดผงแห้งซึ่งต้องผสมน้ำก่อนนำไปใช้งาน และชนิดเปียกซึ่งผสมเสร็จพร้อมใช้งานได้ทันที ปูนทนไฟชนิดที่ให้ความแข็งแรงที่อุณหภูมิห้องนี้ จะเกิดปฏิกิริยาให้ความแข็งแรงได้เอง ณ อุณหภูมิห้อง

3.3.3.2 การเตรียมปูนทนไฟ

การเตรียมปูนไฟชนิดแห้ง(Dry Type Mortars)

1. ตวงน้ำสะอาดที่ใช้ผสมปูนทนไฟตามเปอร์เซ็นต์น้ำที่กำหนดไว้ข้างตง
2. โรยผงปูนทนไฟลงในตงผสมทีละน้อยจนหมด ขณะที่โรยให้เปิดสว่านไฟฟ้าใบกวนตลอดเวลา
3. กวนจนกว่าปูนทนไฟเป็นเนื้อเดียวกัน และเหนียวพอเหมาะสมกับการใช้งาน

การเตรียมปูนไฟชนิดเปียก(Wet Type Mortars)

1. เปิดปากตง ใช้ส่วนตบกดปั่นตบจนปูนทนไฟให้ทั่วโดยใช้เวลา 5-10 นาที
2. หากเนื้อปูนทนไฟข้นเกินไปให้เติมน้ำสะอาดปรับความหนืดของปูนทนไฟให้เหมาะกับการใช้งาน และต้องกวนปูนทนไฟให้เป็นเนื้อเดียวกันก่อนนำไปใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3.3 การทดสอบความเหนียวที่เหมาะสมของปูนทนไฟ

โดยการใช้เครื่องดักปูนทนไฟขึ้นมาแล้วชี้เครื่องลงไปบนแนวคิง

1. ถ้าปูนทนไฟยังคงติดเครื่องอยู่ เมื่อสลัดเบาๆ ปูนจึงจะหลุดออกจากเครื่อง แสดงว่าปูนทนไฟมีความเหนียวเหมาะสมกับการใช้งาน

2. ถ้าปูนทนไฟนั้น ไหลหลุดออกจากเครื่องทันที แสดงว่าปูนทนไฟนั้นเหลวเกินไป จะทำให้เกิดการขาดตัวและมีรอยร้าวเมื่อปูนทนไฟแห้ง

3. ถ้าผสมแห้งเกินไป จะเกิดรอยร้าว และจะไดงานที่มีความหนาของปูนทนไฟไม่เรียบสม่ำเสมอ

3.3.3.4 การใช้งาน

1. ในการเตรียมปูนทนไฟทิ้งไว้เป็นเวลานานๆ ควรควนให้เป็นเนื้อเดียวกันอีกครั้งก่อนนำมาใช้งาน

2. ฉาบปูนทนไฟลงบนผิวอิฐทนไฟที่จะนำมาก่อทั่วทั้งหน้าอิฐ ให้มีความหนาไม่เกิน 2 มม.

3. ใช้ค้อนยางหรือพลาสติกปรับแต่งระดับด้วยการตีอิฐทนไฟให้อยู่ในระดับเดียวกันซึ่งอาจทำให้ปูนทนไฟเอี่ยมออกมาตามแนวก่อเล็กน้อย

3.3.3.5 การเปิดเตาครั้งแรก

ภายหลังก่อเตาเรียบร้อยแล้ว ควรอุ่นเตาตามอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ ดังนี้ เพื่อไม่ให้เกิดการแตกร้าวบริเวณแนวของปูนทนไฟเนื่องจากการขยายตัวอย่างรวดเร็ว

1. ปรับอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 30-40°C/ชั่วโมง เป็นระยะเวลา 15 ชั่วโมง

2. รักษาอุณหภูมิที่ประมาณ 560- 600°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

3. ปรับอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 30-50 °C/ชั่วโมง จนถึงอุณหภูมิใช้งาน

3.3.3.6 การเก็บรักษาปูนทนไฟ

1. ควรเก็บไว้ในที่ร่มแห้งและไม่ชื้นอย่าให้ถูกน้ำ

2. ไม่ควรเก็บโดยซ้อนทับมากเกินไปกว่า 2 กระบะ เพราะจะทำให้ปูนทนไฟอัดตัวแข็งเป็นก้อน

3. ควรใช้ให้หมดถุงหรือตักหากเหลือควรรดน้ำปิดฝาลังให้สนิททุกครั้งเพื่อไม่ให้ปูนทนไฟแข็งตัว และสามารถนำกลับมาใช้ได้อีกครั้ง

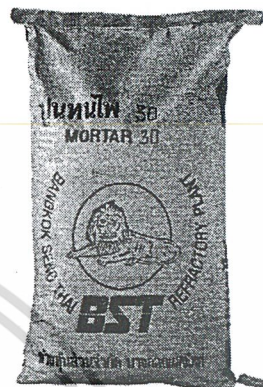
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 แสดงคุณสมบัติต่างของปูนทนไฟ

ปูนทนไฟ

Air Setting and Heat Setting Mortar MORTAR REFRACTORIES

Mortar	Heat Setting				Air Setting		
	30 HM	43 HM	70 HM	SK 38	43 PM	SK 38 PM	80 PM
Properties							
Physical properties							
Refractoriness (SK)	30	32	35	38	34	38	38
App. amount of water for Trowelling, lit/50 kg	20-25	20-25	20-21	10-15			
Chemical composition							
Silica (SiO ₂) %	58.9	50.0	27.9	12.8	49.6	20.1	15.9
Alumina (Al ₂ O ₃) %	32.0	43.4	68.9	82.6	43.7	76.7	80.1
Iron oxide (Fe ₂ O ₃) %	2.0	1.9	1.5	1.4	1.9	2.0	2.0
Application	General Kiln & Furnace For Fireclay & High Alumina Bricks				Ladle Tank Kiln & Furnace		

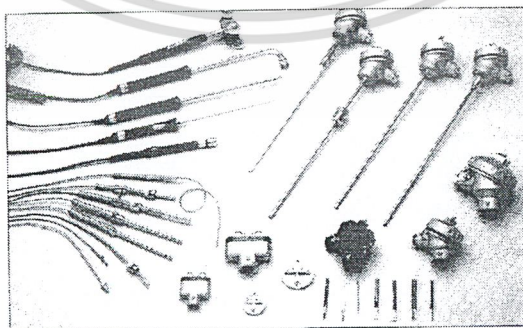


3.3.4 เหล็ก

เหล็กที่ใช้ทำโครงจะเป็นเหล็กฉากหนา 4 มิลลิเมตร กว้าง 40 มิลลิเมตร ซึ่งใช้ทั้งเหล็กฉากและเหล็กแบนธรรมดา ส่วนเหล็กที่ใช้ทำฝาครอบจะใช้เหล็กบาง 1 มิลลิเมตร

3.3.5 เทอร์โมคัปเปิล

เทอร์โมคัปเปิลมีหลายชนิด เพราะฉะนั้นเราจะต้องใช้เทอร์โมคัปเปิลให้ถูกกับย่านอุณหภูมิที่เราใช้งาน ในที่นี้จะเลือกเทอร์โมคัปเปิล Type K แบบหั่วสแตนเลส มีย่านอุณหภูมิใช้งาน -270 C ถึง 1372 C



รูปที่ 3.8 แสดงรูปเทอร์โมคัปเปิลแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.6 ลวดต้านทาน (Heater)

ใช้ลวด Kanthal AF ซึ่งมีข้อดีดังนี้

- รองรับอุณหภูมิที่สูง
- อายุการใช้งานนาน
- รับภาระที่ผิวของตัวต้านทานได้มาก
- ความหนาแน่นน้อย

3.4 การสร้างเตาอบไฟฟ้า

ขั้นตอนในการสร้างเตาอบไฟฟ้ามีดังนี้

3.4.1 การจัดสร้างเตาอบไฟฟ้าตามที่ออกแบบไว้

1. ดำรวจราคาวัสดุและร้านจำหน่าย
2. จัดซื้อวัสดุและอุปกรณ์ที่จำเป็น
3. จัดสร้างเตาอบไฟฟ้าตามขั้นตอนดังนี้
 - จัดทำโครงเตาอบ
 - ทำการเจาะรูอิฐทนไฟสำหรับร้อยลวดความต้านทาน
 - ทำการก่ออิฐทนไฟ
 - ทำฝาปิดหน้าเตา
 - ติดตั้งชุดควบคุมอุณหภูมิ
 - เตรียมพร้อมที่จะทดลองใช้เตาอบไฟฟ้าในระยะทดลอง

3.5 การเลือกชนิดของการควบคุม

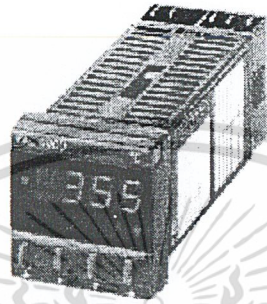
ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกระบบวิธีการทำงานของชุดควบคุมอุณหภูมิชนิด เปิด-ปิด หรือการควบคุมชนิด 2 ตำแหน่งระบบควบคุมชนิด เปิด-ปิด เป็นชนิดของชุดควบคุมที่มีราคาถูก ง่ายต่อการทำงานและการซ่อมบำรุงสัญญาณออกของชุดควบคุมจะมีเพียง 2 สถานะคือ เปิด กับ ปิด ซึ่งสัญญาณนี้จะทำให้ตัวควบคุมสุดท้ายทำงานเต็มที่หรือหยุดทำงานอย่างใดอย่างหนึ่งเท่านั้น อย่างไรก็ตาม การควบคุมแบบ เปิด-ปิด จะเป็นการใช้พลังงานอย่างไม่มีประสิทธิภาพที่ตีพ้อและเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่าย เนื่องจากการซ่อมบำรุงฮีตเตอร์ และอิฐทนไฟภายในเตาโดยเฉพาะการทำงานที่อุณหภูมิสูง ซึ่งมักจะพบปัญหาเกี่ยวกับ การส่งผ่านความร้อนค่าอุณหภูมิจริงจะมีการแกว่งรอบค่าควบคุมซึ่งจะเป็นผลให้ชุดควบคุมจะต้องทำการสั่งให้ฮีตเตอร์ ปิด หรือ เปิดอยู่ตลอดเวลา

โดยสรุปแล้วชุดควบคุมแบบ เปิด - ปิด จะมีข้อได้เปรียบที่ว่าราคาถูกการติดตั้งทำได้สะดวก ซึ่งจะนำไปใช้ได้ดีกับงานที่มีค่าอุณหภูมิไม่วิกฤติมากนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 เครื่องวัดและควบคุมอุณหภูมิ รุ่น CAL 9900 (Temperatuer Controller CAL 9900)

เป็นเครื่องควบคุมอุณหภูมิขนาดเล็ก เหมาะในการติดตั้งกับตู้สวิตช์ขนาดเล็ก หรือมีพื้นที่จำกัด สามารถดูและเปรียบเทียบค่าได้ง่าย ระบบควบคุมสามารถทำได้ทั้ง PID Autotuning , PID , PI , PD , P และ ON/OFF ในที่นี้ เราเลือกใช้ระบบ ON/OFF



รูปที่ 3.9 แสดงเครื่องวัดและควบคุมอุณหภูมิ รุ่น CAL 9900



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 3.10 แสดงถึงภาพวงจรควบคุมของเตาอบไฟฟ้าให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 การออกแบบการทดลอง

การทดลองของเตาอบไฟฟ้าทำได้โดยการหาผลการทดลองในรูปความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา โดยเก็บข้อมูลทุกๆ 30 วินาทีจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการและสังเกตพฤติกรรมของอุณหภูมิที่สภาวะคงตัว(Steady State) นำผลที่ได้มาแสดงผลในรูปของตารางและกราฟเพื่อง่ายต่อการวิเคราะห์

หลังจากได้นำข้อมูลของอุณหภูมิที่สภาวะคงตัว(Steady State) แล้วนำข้อมูลที่ได้มาหาประสิทธิภาพของเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ โดยหาได้จากช่วงเวลา que เตาอบไฟฟ้าให้พลังงานความร้อนต่อหน่วยเวลาทั้งหมด เทียบกับพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเตาอบไฟฟ้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง และ สรุปผล

4.1 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ

การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆทำได้โดยเก็บข้อมูลทุกๆ 30 วินาทีจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการและสังเกตพฤติกรรมของอุณหภูมิที่สภาวะคงตัว(Steady State) นำผลที่ได้มาแสดงผลในรูปของตารางและกราฟ

4.1.1 ทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาขณะเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องไปที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสที่สภาวะไม่คงตัว (Transient State)

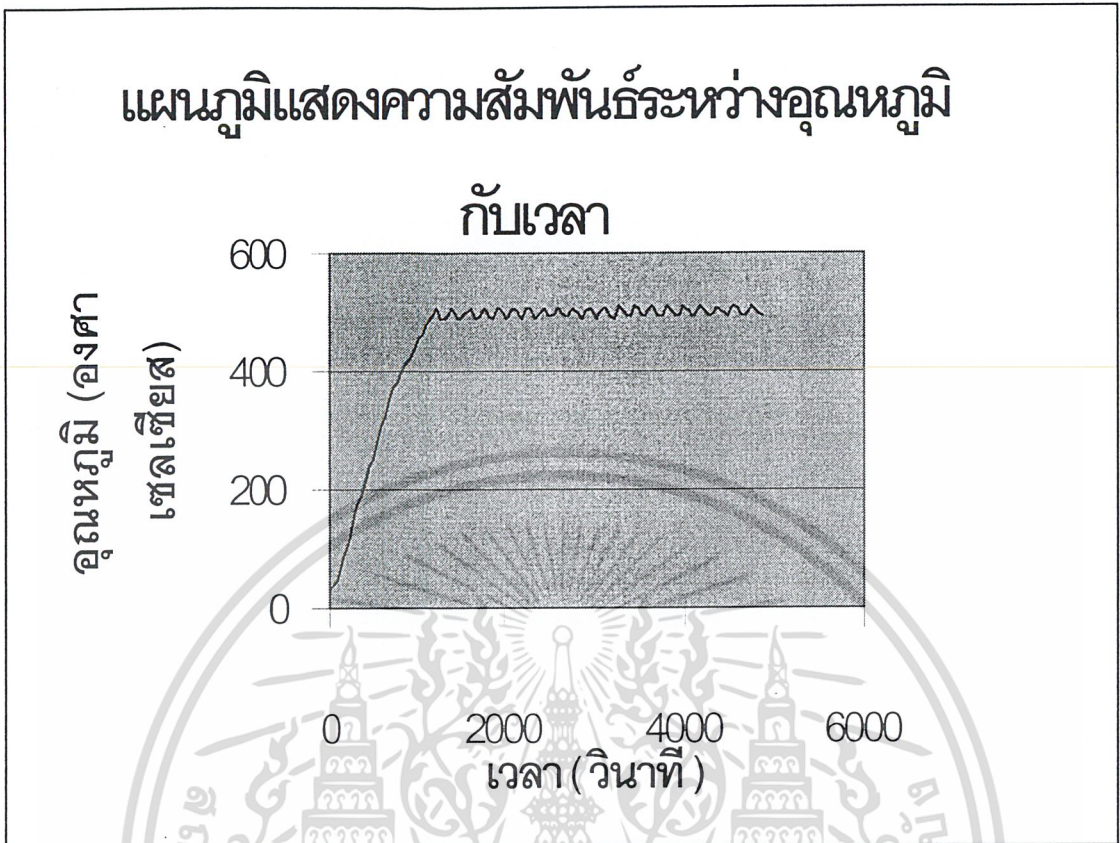
เวลา (วินาที)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	เวลา (วินาที)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	เวลา (วินาที)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)
0	33	540	285	1080	471
30	35	570	300	1110	478
60	41	600	313	1140	485
90	51	630	326	1170	492
120	62	660	339	1200	498
150	76	690	351	1230	505
180	90	720	363		
210	106	750	374		
240	122	780	384		
270	139	810	395		
300	156	840	404		
330	173	870	414		
360	190	900	423		
390	207	930	431		
420	224	960	440		
450	240	990	448		
480	255	1020	456		
510	270	1050	464		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาขณะสถานะคงตัว(Steady State)
ในช่วงการทำงาน 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

เวลา (วินาที)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	เวลา (วินาที)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	เวลา (วินาที)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	เวลา (วินาที)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	เวลา (วินาที)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)
1260	501	2100	507	2940	507	3780	501	4620	500
1290	490	2130	501	2970	503	3810	509	4650	494
1320	488	2160	493	3000	496	3840	507	4680	492
1350	493	2190	491	3030	491	3870	501	4710	502
1380	500	2220	498	3060	497	3900	495	4740	510
1410	506	2250	507	3090	505	3930	492	4770	507
1440	500	2280	505	3120	507	3960	500	4800	502
1470	488	2310	497	3150	501	3990	509	4830	497
1500	490	2340	490	3180	494	4020	507	4860	492
1530	493	2370	494	3210	491	4050	502		
1560	496	2400	503	3240	498	4080	495		
1590	504	2430	508	3270	509	4110	492		
1620	505	2460	502	3300	507	4140	499		
1650	497	2490	495	3330	501	4170	509		
1680	489	2520	493	3360	494	4200	508		
1710	493	2550	498	3390	492	4230	503		
1740	501	2580	507	3420	500	4260	496		
1770	507	2610	506	3450	509	4290	492		
1800	502	2640	500	3480	506	4320	497		
1830	493	2670	492	3510	500	4350	508		
1860	490	2700	492	3540	494	4380	508		
1890	497	2730	501	3570	492	4410	504		
1920	506	2760	508	3600	501	4440	498		
1950	505	2790	504	3630	509	4470	492		
1980	498	2820	497	3660	507	4500	499		
2010	490	2850	491	3690	500	4530	506		
2040	493	2880	495	3720	494	4560	509		
2070	502	2910	504	3750	492	4590	505		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 แสดงแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาขณะเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องไปที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสที่สภาวะไม่คงตัว (Transient State)

เวลา (วินาที)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	เวลา (วินาที)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)
0	67	810	464
30	72	840	473
60	82	870	482
90	95	900	491
120	110	930	499
150	126	960	507
180	145	990	515
210	163	1020	522
240	183	1050	529
270	203	1080	536
300	221	1110	543
330	239	1140	550
360	258	1170	556
390	277	1200	563
420	294	1230	569
450	311	1260	574
480	328	1290	581
510	343	1320	586
540	358	1350	592
570	373	1380	597
600	386	1410	602
630	399		
660	412		
690	423		
720	434		
750	444		
780	455		

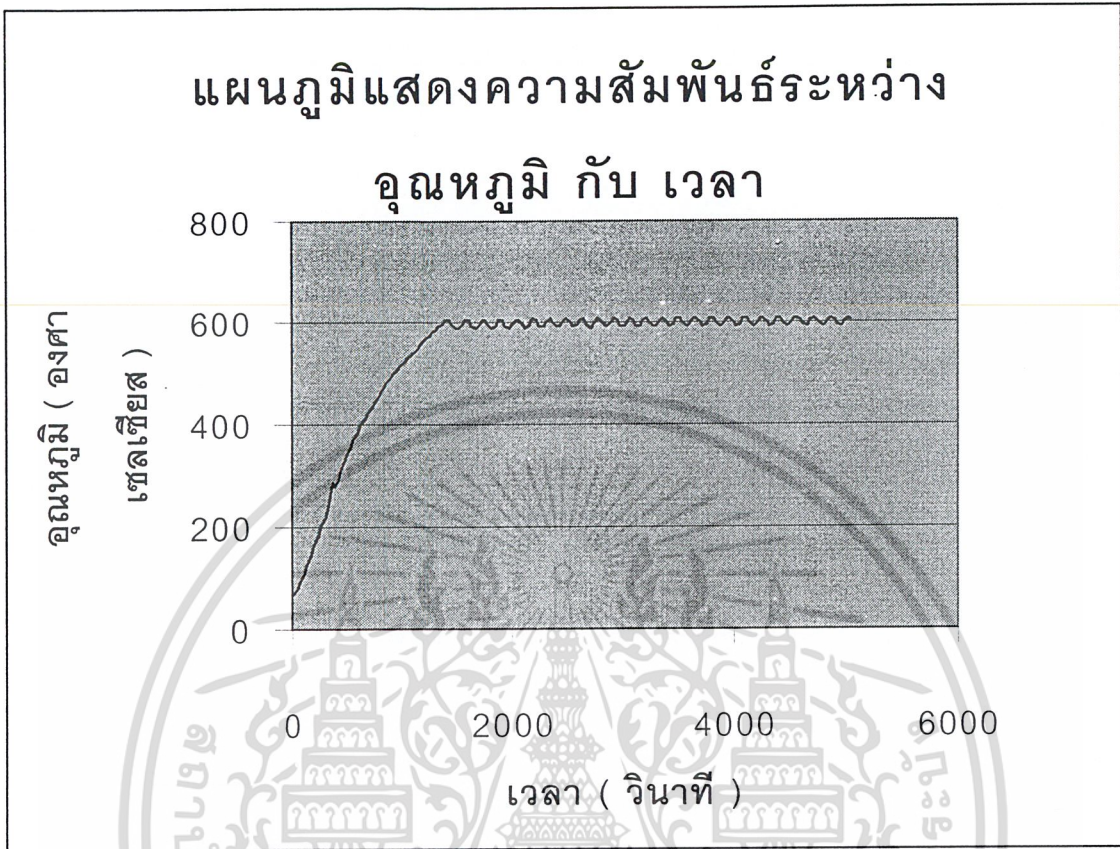
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาขณะสภาวะคงตัว (Steady State)

ในช่วงการทำงาน 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

เวลา (วินาที)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	เวลา (วินาที)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	เวลา (วินาที)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	เวลา (วินาที)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	เวลา (วินาที)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)
1440	603	2310	599	3180	604	4050	596	4920	598
1470	598	2340	607	3210	608	4080	608	4950	592
1500	587	2370	601	3240	601	4110	606	4980	599
1530	589	2400	591	3270	592	4140	599	5010	608
1560	595	2430	592	3300	594	4170	592	5040	605
1590	603	2460	603	3330	605	4200	595		
1620	604	2490	607	3360	608	4230	608		
1650	593	2520	600	3390	600	4260	607		
1680	588	2550	591	3420	592	4290	600		
1710	594	2580	595	3450	595	4320	593		
1740	602	2610	605	3480	606	4350	596		
1770	605	2640	606	3510	607	4380	609		
1800	593	2670	595	3540	600	4410	607		
1830	589	2700	590	3570	592	4440	601		
1860	594	2730	597	3600	595	4470	593		
1890	603	2760	608	3630	607	4500	595		
1920	605	2790	605	3660	606	4530	607		
1950	594	2820	595	3690	599	4560	608		
1980	589	2850	591	3720	591	4590	602		
2010	595	2880	600	3750	596	4620	595		
2040	604	2910	608	3780	608	4650	593		
2070	604	2940	603	3810	606	4680	604		
2100	595	2970	594	3840	599	4710	608		
2130	590	3000	592	3870	592	4740	603		
2160	597	3030	601	3900	597	4770	596		
2190	607	3060	608	3930	608	4800	592		
2220	603	3090	602	3960	606	4830	602		
2250	593	3120	593	3990	599	4860	609		
2280	591	3150	592	4020	592	4890	605		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แสดงแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 ทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาขณะเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องไปที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสที่สภาวะไม่คงตัว (Transient State)

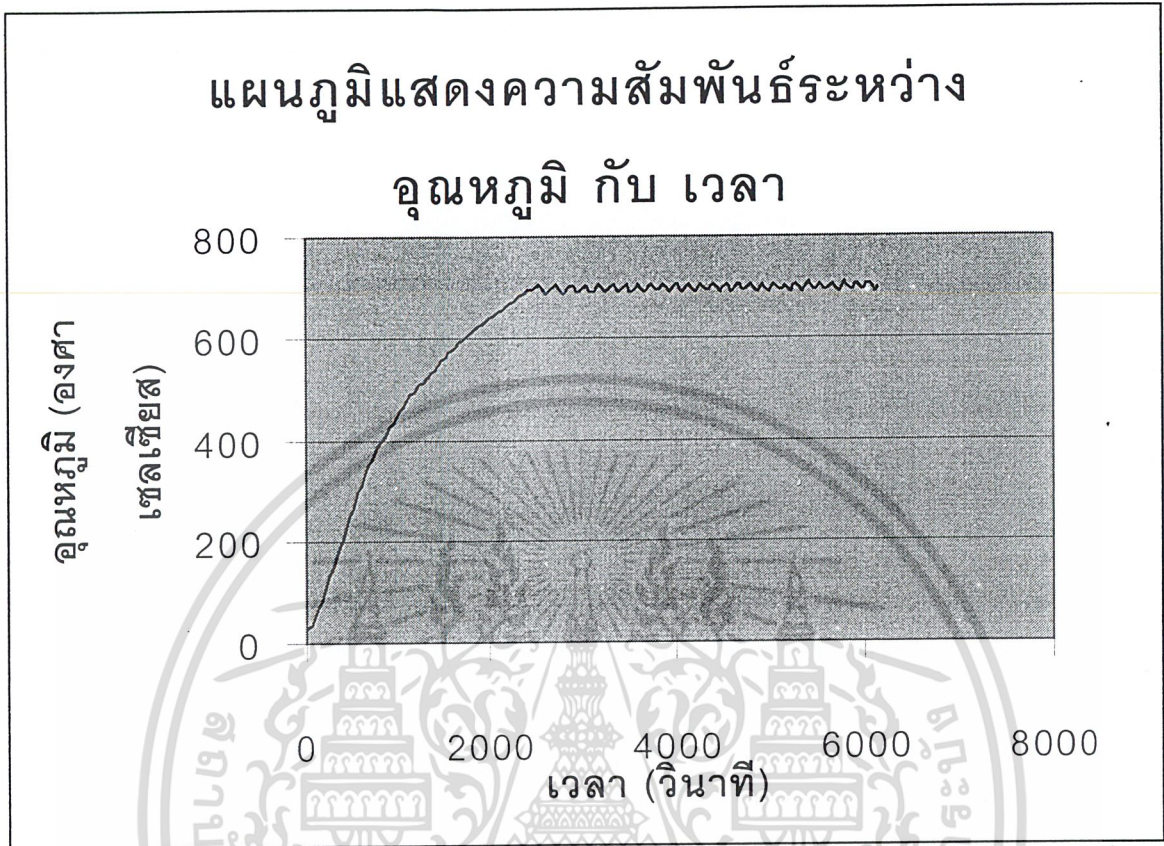
เวลา (วินาที)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	เวลา (วินาที)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	เวลา (วินาที)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	เวลา (วินาที)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)
0	29	810	395	1620	580	2430	692
30	31	840	405	1650	585	2460	695
60	37	870	415	1680	590	2490	698
90	46	900	424	1710	595	2520	702
120	58	930	433	1740	599		
150	71	960	441	1770	604		
180	86	990	449	1800	609		
210	101	1020	457	1830	613		
240	118	1050	465	1860	617		
270	134	1080	473	1890	622		
300	152	1110	480	1920	626		
330	170	1140	487	1950	630		
360	187	1170	494	1980	634		
390	204	1200	501	2010	639		
420	221	1230	507	2040	643		
450	237	1260	513	2070	646		
480	253	1290	520	2100	651		
510	269	1320	526	2130	654		
540	284	1350	532	2160	658		
570	299	1380	537	2190	662		
600	312	1410	543	2220	666		
630	326	1440	549	2250	670		
660	339	1470	554	2280	673		
690	351	1500	560	2310	677		
720	363	1530	565	2340	681		
750	375	1560	570	2370	685		
780	385	1590	575	2400	688		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาขณะสภาวะคงตัว (Steady State) ในช่วงการทำงาน 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

เวลา (วินาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (วินาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (วินาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (วินาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (วินาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
2550	704	3420	694	4290	703	5160	703	6030	704
2580	694	3450	702	4320	692	5190	695	6060	707
2610	687	3480	704	4350	692	5220	691	6090	699
2640	690	3510	691	4380	703	5250	702	6120	691
2670	695	3540	690	4410	706	5280	705	6150	699
2700	700	3570	698	4440	696	5310	697		
2730	705	3600	706	4470	691	5340	690		
2760	696	3630	699	4500	698	5370	698		
2790	687	3660	689	4530	707	5400	708		
2820	691	3690	693	4560	700	5430	702		
2850	697	3720	702	4590	690	5460	692		
2880	703	3750	704	4620	695	5490	694		
2910	702	3780	692	4650	705	5520	705		
2940	689	3810	693	4680	704	5550	702		
2970	689	3840	698	4710	693	5580	695		
3000	696	3870	706	4740	694	5610	692		
3030	703	3900	699	4770	702	5640	701		
3060	703	3930	689	4800	706	5670	707		
3090	689	3960	694	4830	697	5700	698		
3120	690	3990	704	4860	690	5730	690		
3150	697	4020	704	4890	699	5760	698		
3180	704	4050	692	4920	707	5790	708		
3210	701	4080	691	4950	699	5820	700		
3240	689	4110	703	4980	690	5850	692		
3270	692	4140	707	5010	698	5880	695		
3300	699	4170	698	5040	707	5910	706		
3330	706	4200	689	5070	702	5940	705		
3360	698	4230	696	5100	692	5970	695		
3390	689	4260	705	5130	694	6000	694		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดงแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 ทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาขณะเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องไปที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสที่สภาวะไม่คงตัว (Transient State)

เวลา (วินาที)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	เวลา (วินาที)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	เวลา (วินาที)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	เวลา (วินาที)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	เวลา (วินาที)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)
0	40	810	360	1620	557	2430	675	3240	760
30	41	840	370	1650	562	2460	678	3270	763
60	44	870	381	1680	567	2490	682	3300	766
90	51	900	390	1710	572	2520	685	3330	769
120	60	930	400	1740	577	2550	689	3360	772
150	70	960	409	1770	582	2580	693	3390	775
180	82	990	418	1800	587	2610	696	3420	778
210	94	1020	427	1830	592	2640	700	3450	780
240	108	1050	435	1860	597	2670	703	3480	783
270	123	1080	443	1890	601	2700	706	3510	786
300	136	1110	451	1920	606	2730	706	3540	789
330	151	1140	459	1950	610	2760	713	3570	792
360	166	1170	465	1980	615	2790	716	3600	794
390	182	1200	473	2010	619	2820	719	3630	797
420	196	1230	480	2040	623	2850	722	3660	800
450	210	1260	487	2070	627	2880	725		
480	225	1290	493	2100	632	2910	728		
510	238	1320	499	2130	636	2940	731		
540	252	1350	506	2160	640	2970	734		
570	266	1380	512	2190	644	3000	736		
600	279	1410	518	2220	648	3030	739		
630	291	1440	524	2250	652	3060	743		
660	303	1470	530	2280	656	3090	746		
690	315	1500	535	2310	660	3120	749		
720	327	1530	541	2340	663	3150	751		
750	338	1560	546	2370	667	3180	754		
780	349	1590	552	2400	671	3210	757		

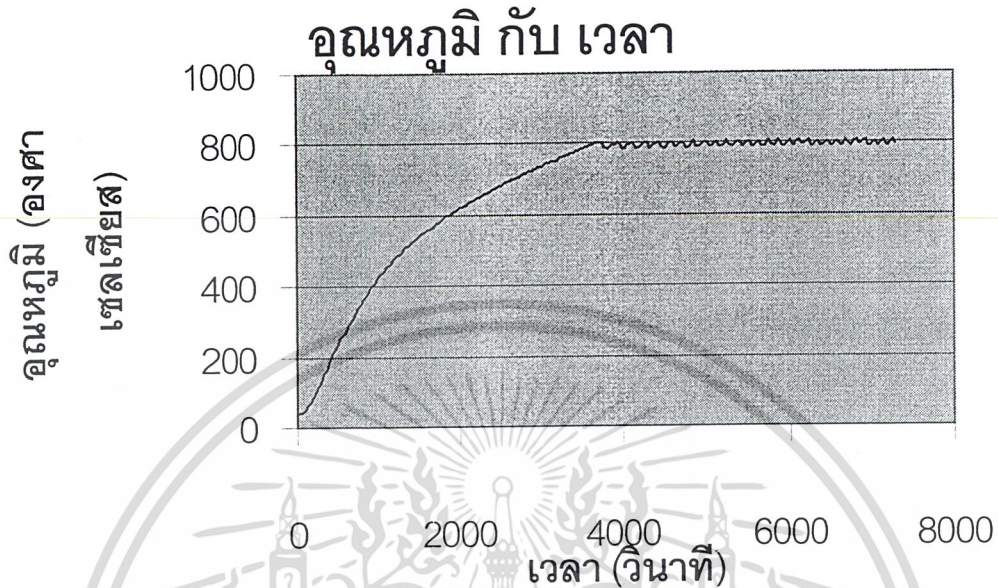
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาขณะสภาวะคงตัว (Steady State) ในช่วงการทำงาน 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

เวลา (วินาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (วินาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (วินาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (วินาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (วินาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
3690	800	4560	801	5430	789	6300	792	7170	795
3720	802	4590	804	5460	794	6330	802	7200	791
3750	804	4620	792	5490	803	6360	805	7230	802
3780	792	4650	790	5520	804	6390	793	7260	806
3810	786	4680	796	5550	790	6420	794	7290	794
3840	789	4710	803	5580	792	6450	803		
3870	794	4740	796	5610	801	6480	803		
3900	799	4770	788	5640	805	6510	792		
3930	803	4800	792	5670	792	6540	794		
3960	801	4830	800	5700	792	6570	804		
3990	787	4860	806	5730	800	6600	800		
4020	788	4890	789	5760	806	6630	791		
4050	794	4920	789	5790	794	6660	794		
4080	799	4950	796	5820	790	6690	806		
4110	804	4980	804	5850	800	6720	799		
4140	798	5010	801	5880	806	6750	793		
4170	787	5040	789	5910	792	6780	800		
4200	790	5070	793	5940	790	6810	806		
4230	796	5100	801	5970	799	6840	795		
4260	802	5130	805	6000	807	6870	797		
4290	802	5160	793	6030	795	6900	800		
4320	788	5190	790	6060	793	6930	806		
4350	790	5220	798	6090	800	6960	793		
4380	795	5250	806	6120	806	6990	792		
4410	802	5280	796	6150	795	7020	802		
4440	804	5310	789	6180	797	7050	805		
4470	791	5340	795	6210	800	7080	793		
4500	788	5370	804	6240	806	7110	804		
4530	795	5400	801	6270	793	7140	807		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง



รูปที่ 4.4 แสดงแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การหาประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิใดๆ

การหาประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิใดๆทำได้จากการนำข้อมูลของอุณหภูมิที่สภาวะคงตัว (Steady State) แล้วนำข้อมูลที่ได้อมาหาประสิทธิภาพโดยหาได้จากเวลาที่เตาอบไฟฟ้าให้พลังงานความร้อนต่อหน่วยเวลาทั้งหมดเทียบกับพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเตาอบไฟฟ้า

$$\text{OUTPUT} = \text{INPUT} - \text{HEAT LOSS}$$

$$\text{HEAT LOSS} = (\text{ON TIME} / \text{TOTAL TIME}) (\text{INPUT})$$

$$\text{EFFICIENCY} = \text{OUTPUT} / \text{INPUT}$$

$$\text{EFFICIENCY} = (\text{INPUT} - \text{HEAT LOSS}) / \text{INPUT}$$

$$\text{EFFICIENCY} = 1 - (\text{HEAT LOSS} / \text{INPUT})$$

โดยที่ความร้อนสูญเสีย (Heat Loss) หาได้จากช่วงเวลาการทำงานของเตาอบ (On Time) เทียบกับช่วงเวลาทั้งหมดที่กำหนดในแต่ละช่วง (Total Time) คูณด้วยพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเตาอบ (Input)

4.2.1 หาประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

4.2.1.1 หาประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ที่สภาวะคงตัว (Steady State) โดยกำหนดช่วงเวลาใช้งานทั้งหมด 10 นาที และบันทึกหาช่วงเวลาการทำงานของเตาอบ (On Time)

ช่วงเวลาการทำงานของเตาอบ (On Time) 354 วินาที

ช่วงเวลาใช้งานทั้งหมด (Total Time) 600 วินาที

ได้ประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

41.00 เปอร์เซ็นต์

4.2.1.2 หาประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ที่สภาวะคงตัว (Steady State) โดยกำหนดช่วงเวลาใช้งานทั้งหมด 20 นาที และบันทึกหาช่วงเวลาการทำงานของเตาอบ (On Time)

ช่วงเวลาการทำงานของเตาอบ (On Time) 655 วินาที

ช่วงเวลาใช้งานทั้งหมด (Total Time) 1200 วินาที

ได้ประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

45.42 เปอร์เซ็นต์

4.2.1.3 หาประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ที่สภาวะคงตัว (Steady State) โดยกำหนดช่วงเวลาดำเนินงานทั้งหมด 30 นาที และบันทึกหาช่วงเวลาการทำงาน ของเตาอบ (On Time)

ช่วงเวลาการทำงานของเตาอบ (On Time) 934 วินาที
ช่วงเวลาใช้งานทั้งหมด (Total Time) 1800 วินาที
ได้ประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส
48.12 เปอร์เซ็นต์

4.2.1.4 หาประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ที่สภาวะคงตัว (Steady State) โดยกำหนดช่วงเวลาดำเนินงานทั้งหมด 40 นาที และบันทึกหาช่วงเวลาการทำงาน ของเตาอบ (On Time)

ช่วงเวลาการทำงานของเตาอบ (On Time) 1163 วินาที
ช่วงเวลาใช้งานทั้งหมด (Total Time) 2400 วินาที
ได้ประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส
51.55 เปอร์เซ็นต์

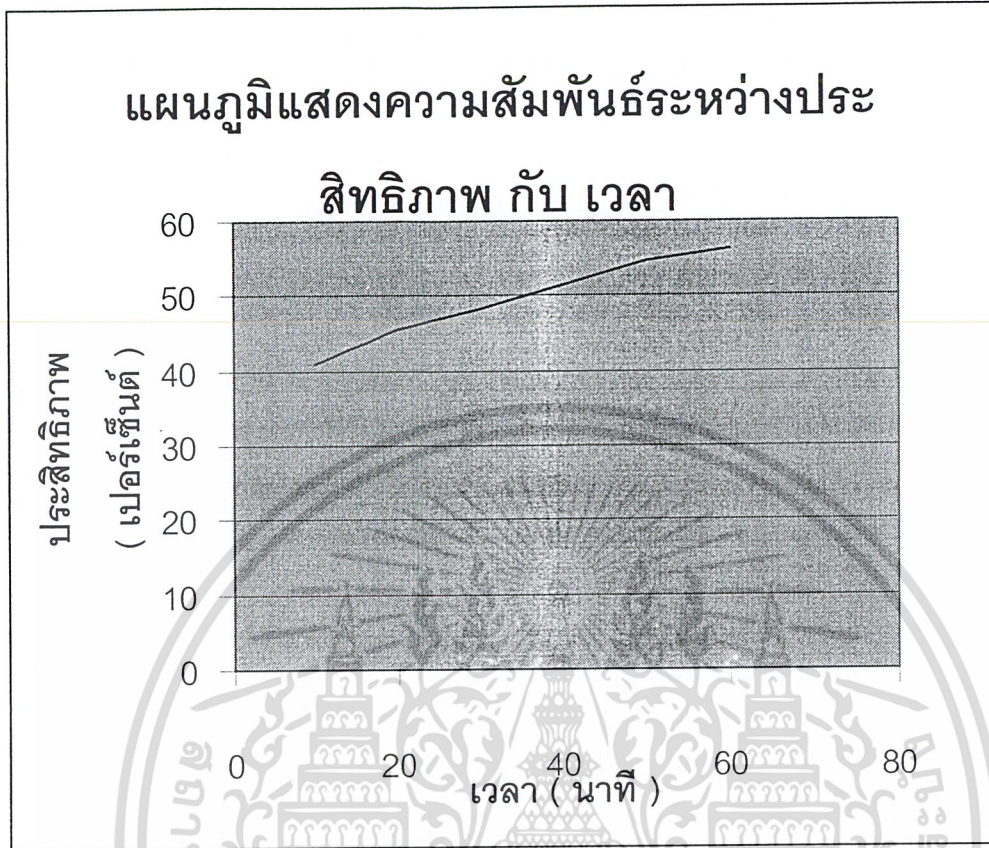
4.2.1.5 หาประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ที่สภาวะคงตัว (Steady State) โดยกำหนดช่วงเวลาดำเนินงานทั้งหมด 50 นาที และบันทึกหาช่วงเวลาการทำงาน ของเตาอบ (On Time)

ช่วงเวลาการทำงานของเตาอบ (On Time) 1362 วินาที
ช่วงเวลาใช้งานทั้งหมด (Total Time) 3000 วินาที
ได้ประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส
54.60 เปอร์เซ็นต์

4.2.1.6 หาประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ที่สภาวะคงตัว (Steady State) โดยกำหนดช่วงเวลาดำเนินงานทั้งหมด 60 นาที และบันทึกหาช่วงเวลาการทำงาน ของเตาอบ (On Time)

ช่วงเวลาการทำงานของเตาอบ (On Time) 1574 วินาที
ช่วงเวลาใช้งานทั้งหมด (Total Time) 3600 วินาที
ได้ประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส
56.28 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แสดงแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับเวลาที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 หาประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

4.2.2.1 หาประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ที่สภาวะคงตัว (Steady State) โดยกำหนดช่วงเวลาดำเนินงานทั้งหมด 10 นาที และบันทึกหาช่วงเวลาการทำงานของเตาอบ (On Time)

ช่วงเวลาการทำงานของเตาอบ (On Time) 392 วินาที

ช่วงเวลาดำเนินงานทั้งหมด (Total Time) 600 วินาที

ได้ประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

34.67 เปอร์เซ็นต์

4.2.2.2 หาประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ที่สภาวะคงตัว (Steady State) โดยกำหนดช่วงเวลาดำเนินงานทั้งหมด 20 นาที และบันทึกหาช่วงเวลาการทำงานของเตาอบ (On Time)

ช่วงเวลาการทำงานของเตาอบ (On Time) 694 วินาที

ช่วงเวลาดำเนินงานทั้งหมด (Total Time) 1200 วินาที

ได้ประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

42.17 เปอร์เซ็นต์

4.2.2.3 หาประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ที่สภาวะคงตัว (Steady State) โดยกำหนดช่วงเวลาดำเนินงานทั้งหมด 30 นาที และบันทึกหาช่วงเวลาการทำงานของเตาอบ (On Time)

ช่วงเวลาการทำงานของเตาอบ (On Time) 952 วินาที

ช่วงเวลาดำเนินงานทั้งหมด (Total Time) 1800 วินาที

ได้ประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

47.12 เปอร์เซ็นต์

4.2.2.4 หาประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ที่สภาวะคงตัว (Steady State) โดยกำหนดช่วงเวลาดำเนินงานทั้งหมด 40 นาที และบันทึกหาช่วงเวลาการทำงานของเตาอบ (On Time)

ช่วงเวลาการทำงานของเตาอบ (On Time) 1205 วินาที

ช่วงเวลาดำเนินงานทั้งหมด (Total Time) 2400 วินาที

ได้ประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

49.80 เปอร์เซ็นต์

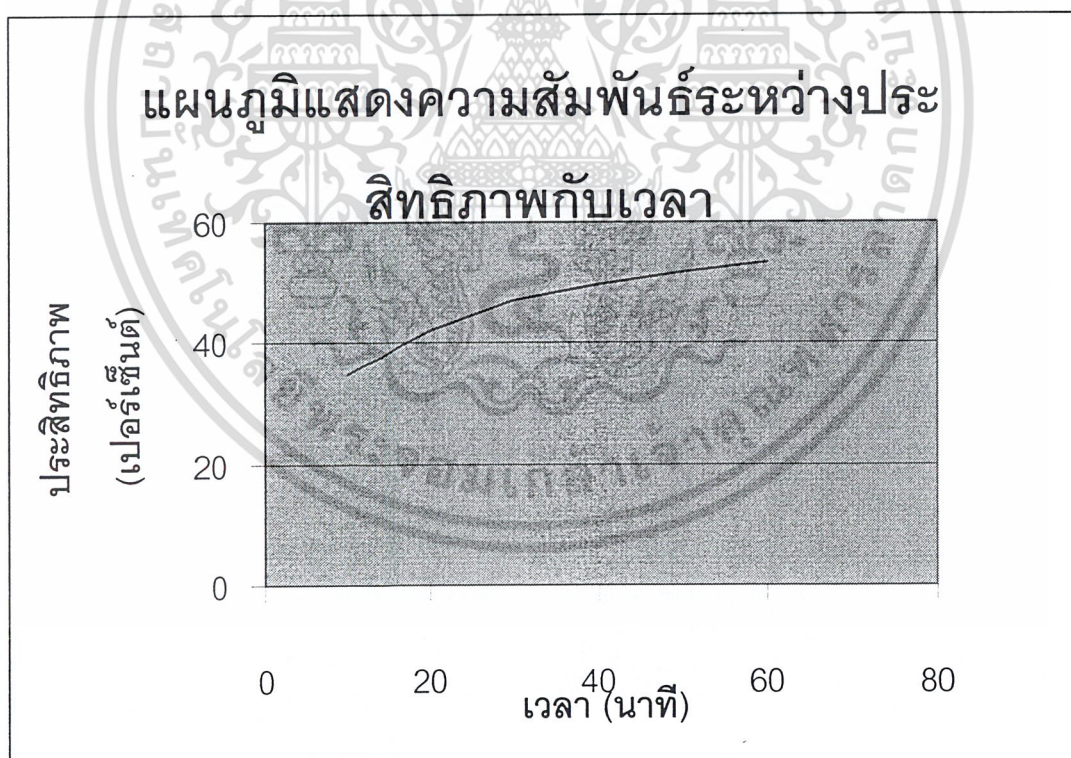
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2.5 หาประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ที่สภาวะคงตัว (Steady State) โดยกำหนดช่วงเวลาดำเนินงานทั้งหมด 50 นาที และบันทึกหาช่วงเวลาการทำงาน ของเตาอบ (On Time)

ช่วงเวลาการทำงานของเตาอบ (On Time) 1446 วินาที
ช่วงเวลาดำเนินงานทั้งหมด (Total Time) 3000 วินาที
ได้ประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส 51.80 เปอร์เซ็นต์

4.2.2.6 หาประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ที่สภาวะคงตัว (Steady State) โดยกำหนดช่วงเวลาดำเนินงานทั้งหมด 60 นาที และบันทึกหาช่วงเวลาการทำงาน ของเตาอบ (On Time)

ช่วงเวลาการทำงานของเตาอบ (On Time) 1676 วินาที
ช่วงเวลาดำเนินงานทั้งหมด (Total Time) 3600 วินาที
ได้ประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส 53.45 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.6 แสดงแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับเวลาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 หาประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

4.2.3.1 หาประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ที่สภาวะคงตัว (Steady State) โดยกำหนดช่วงเวลาดำเนินงานทั้งหมด 10 นาที และบันทึกหาช่วงเวลาการทำงานของเตาอบ (On Time)

ช่วงเวลาการทำงานของเตาอบ (On Time) 443 วินาที

ช่วงเวลาดำเนินงานทั้งหมด (Total Time) 600 วินาที

ได้ประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

26.17 เปอร์เซ็นต์

4.2.3.2 หาประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ที่สภาวะคงตัว (Steady State) โดยกำหนดช่วงเวลาดำเนินงานทั้งหมด 20 นาที และบันทึกหาช่วงเวลาการทำงานของเตาอบ (On Time)

ช่วงเวลาการทำงานของเตาอบ (On Time) 834 วินาที

ช่วงเวลาดำเนินงานทั้งหมด (Total Time) 1200 วินาที

ได้ประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

30.50 เปอร์เซ็นต์

4.2.3.3 หาประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ที่สภาวะคงตัว (Steady State) โดยกำหนดช่วงเวลาดำเนินงานทั้งหมด 30 นาที และบันทึกหาช่วงเวลาการทำงานของเตาอบ (On Time)

ช่วงเวลาการทำงานของเตาอบ (On Time) 1181 วินาที

ช่วงเวลาดำเนินงานทั้งหมด (Total Time) 1800 วินาที

ได้ประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

34.39 เปอร์เซ็นต์

4.2.3.4 หาประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ที่สภาวะคงตัว (Steady State) โดยกำหนดช่วงเวลาดำเนินงานทั้งหมด 40 นาที และบันทึกหาช่วงเวลาการทำงานของเตาอบ (On Time)

ช่วงเวลาการทำงานของเตาอบ (On Time) 1497 วินาที

ช่วงเวลาดำเนินงานทั้งหมด (Total Time) 2400 วินาที

ได้ประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

37.62 เปอร์เซ็นต์

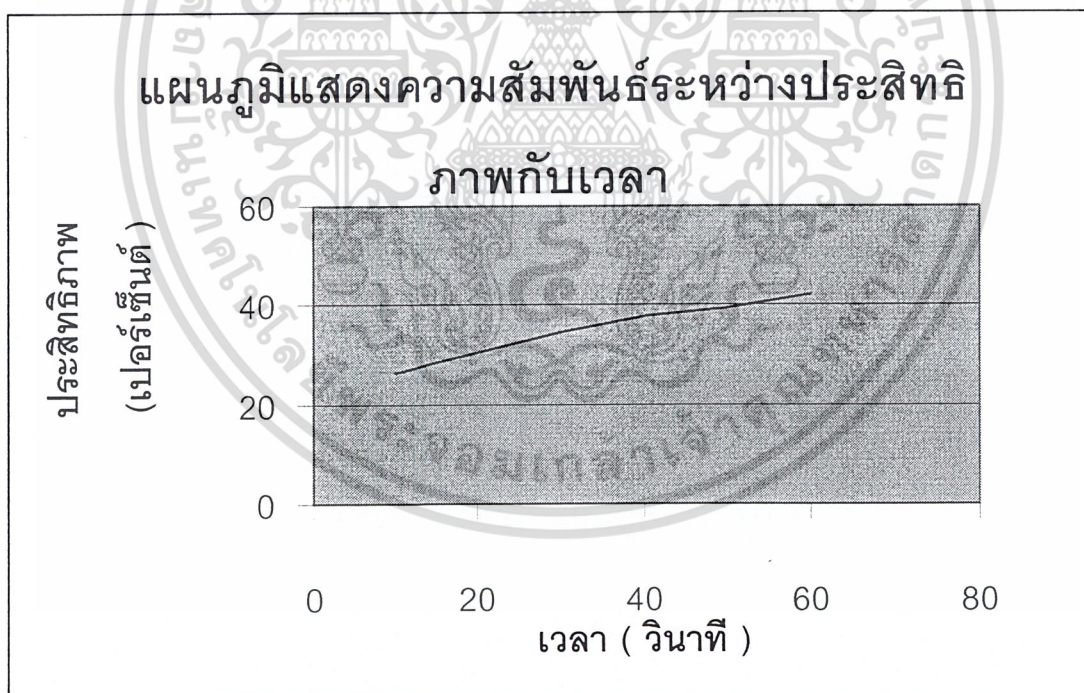
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3.5 หาประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ที่สภาวะคงตัว (Steady State) โดยกำหนดช่วงเวลาดำเนินงานทั้งหมด 50 นาที และบันทึกหาช่วงเวลาการทำงาน ของเตาอบ (On Time)

ช่วงเวลาการทำงานของเตาอบ (On Time) 1826 วินาที
 ช่วงเวลาดำเนินงานทั้งหมด (Total Time) 3000 วินาที
 ได้ประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส 39.14 เปอร์เซ็นต์

4.2.3.6 หาประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ที่สภาวะคงตัว (Steady State) โดยกำหนดช่วงเวลาดำเนินงานทั้งหมด 60 นาที และบันทึกหาช่วงเวลาการทำงาน ของเตาอบ (On Time)

ช่วงเวลาการทำงานของเตาอบ (On Time) 2079 วินาที
 ช่วงเวลาดำเนินงานทั้งหมด (Total Time) 3600 วินาที
 ได้ประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส 42.25 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.7 แสดงแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับเวลาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 หาประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

4.2.4.1 หาประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ที่สภาวะคงตัว (Steady State) โดยกำหนดช่วงเวลาใช้งานทั้งหมด 10 นาที และบันทึกหาช่วงเวลาการทำงานของเตาอบ (On Time)

ช่วงเวลาการทำงานของเตาอบ (On Time) 430 วินาที

ช่วงเวลาใช้งานทั้งหมด (Total Time) 600 วินาที

ได้ประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส 28.34 เปอร์เซ็นต์

4.2.4.2 หาประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ที่สภาวะคงตัว (Steady State) โดยกำหนดช่วงเวลาใช้งานทั้งหมด 20 นาที และบันทึกหาช่วงเวลาการทำงานของเตาอบ (On Time)

ช่วงเวลาการทำงานของเตาอบ (On Time) 846 วินาที

ช่วงเวลาใช้งานทั้งหมด (Total Time) 1200 วินาที

ได้ประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส 29.50 เปอร์เซ็นต์

4.2.4.3 หาประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ที่สภาวะคงตัว (Steady State) โดยกำหนดช่วงเวลาใช้งานทั้งหมด 30 นาที และบันทึกหาช่วงเวลาการทำงานของเตาอบ (On Time)

ช่วงเวลาการทำงานของเตาอบ (On Time) 1253 วินาที

ช่วงเวลาใช้งานทั้งหมด (Total Time) 1800 วินาที

ได้ประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส 30.39 เปอร์เซ็นต์

4.2.4.4 หาประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ที่สภาวะคงตัว (Steady State) โดยกำหนดช่วงเวลาใช้งานทั้งหมด 40 นาที และบันทึกหาช่วงเวลาการทำงานของเตาอบ (On Time)

ช่วงเวลาการทำงานของเตาอบ (On Time) 1628 วินาที

ช่วงเวลาใช้งานทั้งหมด (Total Time) 2400 วินาที

ได้ประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส 32.17 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4.5 หาประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ที่สภาวะคงตัว (Steady State) โดยกำหนดช่วงเวลาดำเนินงานทั้งหมด 50 นาที และบันทึกหาช่วงเวลาการทำงาน ของเตอบ (On Time)

ช่วงเวลาการทำงานของเตอบ (On Time) 1964 วินาที

ช่วงเวลาดำเนินงานทั้งหมด (Total Time) 3000 วินาที

ได้ประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

34.54 เปอร์เซ็นต์

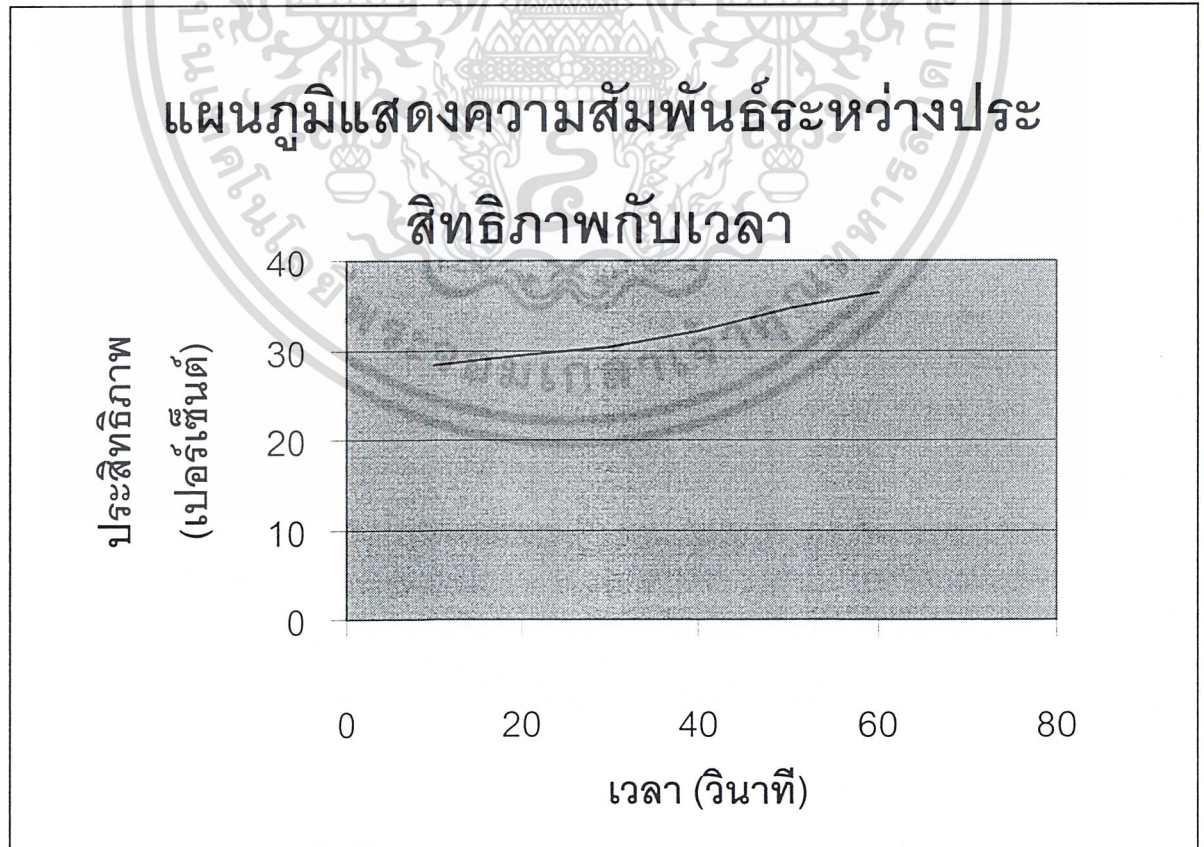
4.2.4.6 หาประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ที่สภาวะคงตัว (Steady State) โดยกำหนดช่วงเวลาดำเนินงานทั้งหมด 60 นาที และบันทึกหาช่วงเวลาการทำงาน ของเตอบ (On Time)

ช่วงเวลาการทำงานของเตอบ (On Time) 2293 วินาที

ช่วงเวลาดำเนินงานทั้งหมด (Total Time) 3600 วินาที

ได้ประสิทธิภาพทางความร้อนของฉนวนเตอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

36.31 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.8 แสดงแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับเวลาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆซึ่งเก็บข้อมูลทุกๆ 30วินาทีจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ อัตราการเพิ่มอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิห้องอย่างรวดเร็วและค่อยๆลดลงเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิถึงสภาวะคงตัว (Steady State) จะมีช่วงการแกว่งของอุณหภูมิ ขอบเขตบนของอุณหภูมิจะเพิ่มมากขึ้น ขอบเขตล่างของอุณหภูมิจะลดลง

การหาประสิทธิภาพพจนนของเตาอบไฟฟ้าพบว่าในแต่ละช่วงเวลาและช่วงอุณหภูมิที่ต่างกันจะมีประสิทธิภาพพจนนต่างกัน จากผลการทดลองพบว่าในช่วงเวลา 10 นาที 20 นาที จนถึง 60 นาที เมื่อเวลาที่เปิดเตาอบไฟฟ้ามากขึ้นประสิทธิภาพพจนนจะมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นและจากผลการทดลองพบว่าในช่วงอุณหภูมิ 500 ถึง 800 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพพจนนจะมีแนวโน้มลดลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน

5.1 สรุปผลที่ได้จากโครงการ

การทำงานตลอด 2 ภาคการศึกษาที่ผ่านมาจะทำในส่วนขององค์ประกอบการหาข้อมูลในส่วนของ การสร้างเตาอบ การคำนวณกำลังไฟฟ้า การคำนวณความร้อนที่สูญเสีย การหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด การหาความยาวของขดลวด การออกแบบการวางขดลวด การออกแบบวงจรไฟฟ้าซึ่งเป็นองค์ประกอบที่พร้อมที่จะสร้างเตาอบ รวมถึงถึงการลงมือสร้างเป็นเตาอบไฟฟ้าขึ้นมาจนเสร็จสิ้น

5.2 การบรรลุวัตถุประสงค์จากการทำโครงการ

1. ได้ศึกษาและเรียนรู้ทฤษฎีทางความร้อน หลักการสร้างเตาอบไฟฟ้า และระบบควบคุมของเตาอบไฟฟ้า
2. ได้ทำการออกแบบและทำการสร้างเตาอบไฟฟ้า
3. เตาอบไฟฟ้าสามารถทำงานได้ตามจุดประสงค์ที่ตั้งไว้ และสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานทางความร้อนได้

5.3 ปัญหาที่พบระหว่างการปฏิบัติงาน

1. เมื่อคำนวณขดลวดได้เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.28 mm แต่ทางบริษัทผู้จัดจำหน่ายไม่มีลวดขนาด 1.3 mm และ 1.4mm จึงต้องทำการเลื่อนขนาดขดลวดเป็น 1.2 mm หรือ 1.5mm จากการเลือกขนาดขดลวดเป็น 1.5 mm ไม่สามารถที่จะวางในตัวเตาได้เนื่องจากจำเป็นต้องใช้พื้นที่และความยาวจำนวนมากจึงจะได้กำลังไฟฟ้าตามที่คำนวณไว้ซึ่งวิธีแก้ไขก็คือเปลี่ยนปริมาตรภายในเตาอบหรือเปลี่ยนขนาดขดลวดเป็น 1.2 mm ซึ่งจะสามารถวางลวดได้พอดี แต่ตามหลักการแล้วจะได้อายุการใช้งานที่สั้นลง
2. การใช้ปูนทนไฟชนิดผสมเองจะต้องใช้ความชำนาญในการทำเป็นอย่างมาก หากไม่มีประสบการณ์จะทำให้เกิดความล่าช้าเนื่องจากปูนไม่ก่อตัวและจะแตกได้ง่าย
3. การซื้ออุปกรณ์ไฟฟ้าที่เกินขนาด เช่น แอมมิเตอร์และซีล็คเตอร์ ซึ่งต้องใช้โหลดที่สูงมาก จึงไม่สามารถทำให้ใช้งานได้ตามที่สมควร

5.4 แนวทางการพัฒนาและปรับปรุง

หลังจากที่ได้ทำการทดสอบและวิเคราะห์ผลที่ได้จากเตาอบแล้วทำให้ทราบว่าปัญหาเกิดขึ้นหลายจุดด้วยกัน และปัญหาที่เกิดขึ้นก็สามารถแก้ไขและทำการปรับปรุงเพื่อให้เตาอบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และทราบด้วยว่าในการออกแบบสร้างเตาอบนั้นจะต้องคำนึงถึงส่วนต่าง ๆ ที่ได้ทำการออกแบบไว้ดังนี้คือ

1. การป้องกันการสูญเสียความร้อนควรที่จะมีการบดทวนกันความร้อนไว้ทุกด้านของเตาอบเพื่อที่จะทำ

ให้เตาอบร้อนเร็ว และทำให้ลดการสูญเสียความร้อนภายในเตาอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล ควรจะติดตั้งในตำแหน่งที่เหมาะสม คือ ไม่ควรติดตั้งในตำแหน่งที่ใกล้เพดานหรือใกล้ขดลวดความต้านทานมากเกินไปเพราะจะทำให้อุณหภูมิที่ได้เป็นอุณหภูมิเฉพาะจุดมากกว่าที่จะเป็นอุณหภูมิเฉลี่ย

3. การออกแบบขดลวดความต้านทาน ในการออกแบบขดลวดความต้านทานให้สามารถทำอุณหภูมิได้สูง ถ้าออกแบบเป็นขดลวดความต้านทานพันบนแท่งเซรามิกจะดีกว่าการวางขดลวดไว้บนร่องอิฐเนื่องจากสามารถแผ่รังสีความร้อนได้ทุกทิศทาง การพันบนแท่งเซรามิกสามารถที่จะรับภาระที่ผิวที่สูง ๆ ได้ดีกว่าการวางขดลวดไว้บนร่องอิฐ

4. ตำแหน่งที่ติดตั้งตู้ควบคุมอุณหภูมิไม่ควรติดตั้งไว้ที่ตัวเตาอบเพราะจะทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เสื่อมสภาพเร็ว ดังนั้นควรติดตั้งในตำแหน่งที่คาดว่าจะได้รับอิทธิพลความร้อนจากเตาอบน้อยที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

1. รศ.มนตรี พิรุณเกษตร,การถ่ายเทความร้อน,บริษัท วิทย์พัฒนา จำกัด
2. นกสิทธิ์ คุ้มพัฒนาชัย,การถ่ายเทความร้อน,สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซนเตอร์
3. รศ.ดร.สมศรี จรุงเรือง,ระเบียบวิธีวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน,ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
4. KANTHAL CO ., Ltd, KANTHAL HANDBOOK
5. บริษัท เทคโนโลยี อินสทรูเมนต์ จำกัด,เทคโนโลยีและอุปกรณ์การวัดทางอุตสาหกรรม
6. ผศ.วิชาญ ก่อดาวงศ์,วิเคราะห์ห้วงจรไฟฟ้า,สำนักพิมพ์ SE-ED
7. TEND CO.Ltd , Electrical High&Low Equipment
8. ห้างหุ้นส่วนจำกัดบางกอกแสงไทย , เอกสารข้อมูลวัสดุทนไฟ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก - 1 แสดงค่าทางไฟฟ้าของลวด Kanthal AF

KANTHAL AF

Wire and strip. Standard stock items.

Resistivity $1.39 \Omega \text{mm}^2 \text{m}^{-1}$. Density 7.15g cm^{-3} . To obtain resistivity at working temperature, multiply by factor C_1 in following table.

°C	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
C_1	1.00	1.00	1.01	1.01	1.02	1.03	1.04	1.04	1.05	1.05	1.06	1.06	1.06	1.06	1.07

Wire dia mm	Resistance $\Omega/\text{m } 20^\circ\text{C}$	Weight g/m	$\text{cm}^2/\Omega 20^\circ\text{C}$	Strip WxT mm	Resistance $\Omega/\text{m } 20^\circ\text{C}$	Weight g/m	$\text{cm}^2/\Omega 20^\circ\text{C}$
1.0	1.77	5.62	17.8	10.0x1.0	0.139	71.5	1582
1.1	1.46	6.79	23.6	15.0x1.0	0.0927	107	3453
1.2	1.23	8.09	30.7	20.0x1.0	0.0695	143	6043
1.3	1.05	9.49	39.0	10.0x1.2	0.1158	86	1934
1.4	0.903	11.0	48.7	12.0x1.2	0.0965	103	2735
1.5	0.787	12.6	59.9	15.0x1.2	0.0772	129	4196
1.6	0.691	14.4	72.7	15.0x1.5	0.0618	161	5342
1.7	0.612	16.2	87.2	20.0x1.5	0.0463	215	9281
1.8	0.546	18.2	104	25.0x1.5	0.0371	268	14302
2.0	0.442	22.5	142	15.0x2.0	0.0463	215	7339
2.2	0.366	27.2	189	20.0x2.0	0.0348	286	12664
2.3	0.335	29.7	216	25.0x2.0	0.0278	358	19424
2.4	0.307	32.3	245	30.0x2.0	0.0232	429	27623
2.5	0.283	35.1	277	15.0x2.5	0.0371	268	27623
2.6	0.262	38.0	312	20.0x2.5	0.0278	358	16190
2.8	0.226	44.0	390	25.0x2.5	0.0222	447	24733
2.9	0.210	47.2	433	30.0x2.5	0.0185	536	35071
3.0	0.197	50.5	479	20.0x3.0	0.0232	429	19828
3.25	0.168	59.3	609	25.0x3.0	0.0185	536	27331
3.5	0.144	68.8	761	30.0x3.0	0.0154	644	39223
3.75	0.126	79.0	936				
4.0	0.111	89.8	1136				
4.25	0.0980	101	1363				
4.5	0.0874	114	1618				
4.75	0.0784	127	1902				
5.0	0.0708	140	2219				
5.5	0.0585	170	2953				
6.0	0.0492	202	3834				
6.5	0.0419	237	4875				
7.0	0.0361	275	6089				
7.35	0.0328	303	7048				
7.5	0.0315	316	7489				
8.0	0.0277	359	9089				
8.25	0.0260	382	9968				
9.27	0.0206	483	14141				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KANTHAL A-1 and APM

Wire and strip. Standard stock items.

Resistivity $1.45 \Omega \text{mm}^2 \text{m}^{-1}$. Density 7.1g cm^{-3} . To obtain resistivity at working temperature, multiply by factor C_t in following table.

°C	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
C_t	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.02	1.02	1.03	1.03	1.04	1.04	1.04	1.04	1.05

Wire dia mm	Resistance Ω/m 20°C	Weight g/m	cm^2/Ω 20°C	Strip*) WxT mm	Resistance Ω/m 20°C	Weight g/m	cm^2/Ω 20°C
1.0	1.85	5.58	17.0	5.0x1.0	0.290	35.5	414
1.1*)	1.53	6.75	22.7	10.0x1.0	0.145	49.7	1520
1.2	1.28	8.03	29.4	15.0x1.0	0.0967	107	3310
1.3*)	1.09	9.43	37.4	20.0x1.0	0.0725	142	5790
1.4*)	0.942	10.9	46.7	12.0x1.2	0.101	102	2620
1.5	0.821	12.5	57.4	15.0x1.2	0.101	128	4020
1.6*)	0.721	14.3	69.7	10.0x1.5	0.097	107	2380
1.7	0.639	16.1	83.6	12.0x1.5	0.0806	128	3350
1.8	0.570	18.1	99.2	15.0x1.5	0.0644	160	5120
2.0	0.462	22.3	136	20.0x1.5	0.0483	213	8900
2.2	0.381	27.0	181	25.0x1.5	0.0387	266	13700
2.3	0.349	29.5	207	30.0x1.5	0.0320	320	19600
2.4*)	0.321	32.1	235	15.0x2.0	0.0483	213	7040
2.5	0.295	34.9	266	20.0x2.0	0.0363	284	12100
2.6	0.273	37.7	299	25.0x2.0	0.0290	355	18600
2.8	0.235	43.7	374	30.0x2.0	0.0242	426	26500
2.9	0.219	47.0	416	20.0x2.5	0.0290	355	15500
3.0	0.205	50.2	460	25.0x2.5	0.0232	444	23700
3.25	0.175	58.9	584	30.0x2.5	0.0193	533	33600
3.5	0.151	68.3	730	20.0x3.0	0.0242	426	19008
3.75	0.131	78.4	897	25.0x3.0	0.0193	533	26200
4.0	0.115	89.2	1090	30.0x3.0	0.0161	639	41000
4.25	0.102	101	1306				
4.5	0.0912	113	1550				
4.75	0.0818	126	1824				
5.0	0.0738	139	2127				
5.5	0.0610	169	2831				
6.0	0.0513	201	3676				
6.5	0.0437	236	4673				
7.0	0.0377	273	5840				
7.35	0.0340	300	5840				
8.0	0.0288	357	8690				
8.25	0.0271	380	9560				
9.5	0.0205	503	14600				
10.0	0.0185	558	17000				

*) only A-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-3 แสดงค่าทางไฟฟ้าของลวด Kanthal D

KANTHAL D

Wire and strip. Standard stock items.

Resistivity $1.35 \Omega \text{mm}^2 \text{m}^{-1}$. Density 7.25g cm^{-3} . To obtain resistivity at working temperature, multiply by factor C_t in following table.

$^{\circ}\text{C}$	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
C_t	1.00	1.00	1.01	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.06	1.06	1.07	1.07	1.08	1.08

Wire dia mm	Resistance $\Omega/\text{m } 20^{\circ}\text{C}$	Weight g/m	$\text{cm}^2/\Omega 20^{\circ}\text{C}$	Strip WxT mm	Resistance $\Omega/\text{m } 20^{\circ}\text{C}$	Weight g/m	$\text{cm}^2/\Omega 20^{\circ}\text{C}$
1.0	1.72	5.7	18.3	5.0x0.1	2.70	3.6	43
1.1	1.42	6.9	24.3	5.0x0.2	1.35	7.3	76
1.2	1.19	8.2	31.6	5.0x0.3	0.900	10.9	118
1.3	1.02	9.6	40.2	5.0x0.4	0.657	14.5	160
1.4	0.877	11.2	50.2	10.0x1.2	0.113	87	1990
1.5	0.764	12.8	61.7	12.0x1.2	0.0938	104	2820
1.6	0.671	14.6	74.9	15.0x1.2	0.0750	131	4320
1.7	0.595	16.5	89.8	15.0x1.5	0.0600	163	5500
1.8	0.531	18.4	107	20.0x1.5	0.0450	218	9560
2.0	0.430	22.8	146	15.0x2.0	0.0450	218	7560
2.5	0.275	35.6	286	20.0x2.0	0.0338	290	13000
2.8	0.219	44.6	401	25.0x2.0	0.0270	363	20000
3.0	0.191	51.2	493	20.0x2.5	0.0270	363	16700
3.25	0.163	60.1	627				
3.5	0.140	69.8	784				
3.75	0.122	80.1	964				
4.0	0.107	91.1	1170				
4.25	0.0952	103	1403				
4.5	0.0849	115	1666				
4.75	0.0762	128	1959				
5.0	0.0688	142	2285				
5.5	0.0568	172	3041				
6.0	0.0477	205	3948				
6.5	0.0407	241	5019				
7.35	0.0318	308	7257				
8.0	0.0269	364	9358				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NIKROTHAL 70

Wire. No standard stock items –
on special order only.

Resistivity $1.18 \Omega\text{mm}^2\text{m}^{-1}$. Density 8.10 g cm^{-3} . To obtain resistivity at working temperature, multiply by factor C_t in following table.

°C	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
C_t	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.05	1.04	1.04	1.04	1.05	1.05	1.06

Wire dia mm	Resistance $\Omega/\text{m } 20^\circ\text{C}$	Weight g/m	cm^2/Ω 20°C
1.0	1.50	6.36	20.9
1.1	1.24	7.70	27.8
1.2	1.04	9.16	36.1
1.3	0.889	10.8	45.9
1.4	0.767	12.5	57.4
1.5	0.668	14.3	70.6
1.6	0.587	16.3	85.6
1.7	0.520	18.4	103
1.8	0.464	20.6	122
1.9	0.416	23.0	143
2.0	0.376	25.4	167
2.2	0.310	30.8	223
2.5	0.240	39.8	327
2.6	0.222	43.0	368
2.8	0.192	49.9	459
3.0	0.167	57.3	565
3.25	0.142	67.2	718
3.5	0.123	77.9	897
3.75	0.107	89.5	1103
4.0	0.0939	102	1338
4.25	0.0832	115	1605
4.5	0.0742	129	1905
4.75	0.0666	144	2241
5.0	0.0601	159	2614
5.5	0.0497	192	3479
6.0	0.0417	229	4517
6.5	0.0356	269	5742
7.0	0.0307	312	7172
7.35	0.0278	344	8303
7.5	0.0267	358	8822
8.0	0.0235	407	10706
8.25	0.0221	433	11741
9.0	0.0185	515	15244

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NIKROTHAL 80

Wire and Strip. Standard stock items.

Resistivity 1.09 $\Omega\text{mm}^2\text{m}^{-1}$. Density 8.30 g cm^{-3} . To obtain resistivity at working temperature, multiply by factor C_t in following table.

$^{\circ}\text{C}$	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
C_t	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.04	1.04	1.04	1.04	1.05	1.06	1.07

Wire dia mm	Resistance $\Omega/\text{m } 20^{\circ}\text{C}$	Weight g/m	cm^2/Ω 20°C	Strip WxT mm	Resistance $\Omega/\text{m } 20^{\circ}\text{C}$	Weight g/m	cm^2/Ω 20°C
1.0	1.39	6.52	22.6	15.0x1.0	0.0727	125	4404
1.2	0.964	9.39	39.1	20.0x1.0	0.0545	166	7706
1.3	0.821	11.0	49.7	25.0x1.0	0.0436	208	11930
1.4	0.708	12.8	62.1	12.0x1.2	0.0757	120	3488
1.5	0.617	14.7	76.4	15.0x1.5	0.0484	187	6812
1.6	0.542	16.7	92.7	20.0x1.5	0.0363	249	11840
1.8	0.428	21.1	132	25.0x1.5	0.0291	311	18230
2.0	0.347	26.1	181	15.0x2.0	0.0363	249	9358
2.3	0.262	34.5	275	20.0x2.0	0.0273	332	16150
2.5	0.222	40.7	354	25.0x2.0	0.0218	415	24770
2.6	0.205	44.1	398	30.0x2.0	0.0182	498	35230
2.8	0.177	51.1	497	20.0x2.5	0.0218	415	20640
3.0	0.154	58.7	611	25.0x2.5	0.0174	519	31540
3.25	0.131	68.9	777	30.0x2.5	0.0145	623	44730
3.5	0.113	79.9	971				
3.75	0.0987	91.7	1194				
4.0	0.0867	104	1449				
4.25	0.0768	118	1738				
4.5	0.0685	132	2063				
4.75	0.0615	147	2426				
5.0	0.0555	163	2830				
5.5	0.0459	197	3766				
6.0	0.0386	235	4890				
6.5	0.0328	275	6217				
7.0	0.0283	319	7764				
7.5	0.0247	367	9550				
8.0	0.0217	417	11590				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-6 เปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่าง NiCr 80/20 กับ Kanthal AF

Table 1. A 120 kW furnace equipped with R.O.B. elements. 3 elements of 40 kW each. 380 V.

Element Data	NiCr 80/20		KANTHAL AF	
Furnace temperature, °C / °F	1000	1830	1000	1830
Element temperature, °C / °F	1068	1955	1106	2025
Hot resistance, R _h	3.61		3.61	
Temperature factor, C _t	1.05		1.05	
Cold resistance, R _c	3.44		3.41	
Wire diameter, mm / in	5.5	0.217	5.5	0.217
Surface load, W/cm ² / W/in	3.09	19.9	3.98	25.7
Wire length, m, ft 3 elements	224.9	738	174.6	573
Wire weight, kg, lb 3 elements	44.4	98	29.6	65
Weight saving:	$\frac{44.4 - 29.6}{44.4} = 33\%$		$\frac{98 - 65}{98} = 33\%$	

5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-7 เปรียบเทียบคุณสมบัติของโลหะ Kanthal และ Nikrothal

	KANTHAL APM	KANTHAL A-1	KANTHAL AF	KANTHAL D	NIKROTHAL 80	NIKROTHAL 70	NIKROTHAL 60	NIKROTHAL 40
Max continuous operating temp., °C	1425	1400	1300	1300	1200	1250	1150	1100
°F	2600	2550	2370	2370	2190	2280	2100	2010
Nominal composition, % Cr	22	22	22	22	20	30	15	20
Al	5.8	5.8	5.3	4.8	-	-	-	-
Fe	Rest	Rest	Rest	Rest	-	-	-	-
Ni	-	-	-	-	80	70	60	35
Resistivity at 20°C, Ωmm/m	1.45	1.45	1.39	1.35	1.09	1.18	1.11	1.04
at 68°F, Ωcmf	872	872	836	812	655	704	668	626
Density, g/cm ³	7.10	7.10	7.15	7.25	8.3	8.1	8.2	7.9
lb/in ³	0.256	0.256	0.259	0.262	0.300	0.296	0.296	0.285
Coefficient of thermal expansion, K ⁻¹								
20-750°C, 68-1380°F	14.10 ⁻⁶	14.10 ⁻⁶	14.10 ⁻⁶	14.10 ⁻⁶	17.10 ⁻⁶	16.10 ⁻⁶	16.10 ⁻⁶	16.10 ⁻⁶
20-1000°C, 68-1838°F	15.10 ⁻⁶	15.10 ⁻⁶	15.10 ⁻⁶	15.10 ⁻⁶	18.10 ⁻⁶	17.10 ⁻⁶	17.10 ⁻⁶	17.10 ⁻⁶
Thermal conductivity at 20°C								
W/m·K	13	13	13	13	15	13	13	13
68°F, Btu inft-2h-1°F-1	90	90	90	90	104	90	90	90
Specific heat capacity								
KJ/kg·K, 20°C	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.50
Btu/lb-1°F-1, 68°F	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110	0.119
Melting point, °C	1500	1500	1500	1500	1400	1380	1390	1390
°F	2730	2730	2730	2730	2550	2515	2535	2535
Mechanical properties (approx.)*								
Tensile strength, N/mm ²	680	680	680	680	750	875	750	750
psi	99000	99000	99000	99000	109000	127000	109000	109000
Yield point, N/mm ²	445	445	445	445	450	450	450	450
psi	65000	65000	65000	65000	65000	65000	65000	65000
Hardness Hv	230	230	230	230	180	185	180	180
Elongation at rupture, %	19	19	19	19	30	30	30	30
Tensile strength at 900°C, N/mm ²	40	34	37	34	100	120	100	120
1650°F, psi	5800	5000	5400	5000	14500	17400	14500	17400
Creep strength at 800°C, N/mm ²	14	6	8	8	15	15	15	20
1000°C, N/mm ²	1.8	1	1.5	1	4	4	4	4
1470°F, psi	2000	870	1160	870	2160	2160	2160	2160
1830°F, psi	280	145	215	145	580	580	580	580
Magnetic properties	Magnetic (Curie point 600°C, 1100°F) Non							
Emissivity, fully oxidized condition	0.70	0.70	0.70	0.70	0.88	0.88	0.88	0.88

* The values given apply for sizes of 4 mm, 0.16 in diameter for the KANTHAL alloys and of 1 mm, 0.04 in for the NIKROTHAL alloys

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

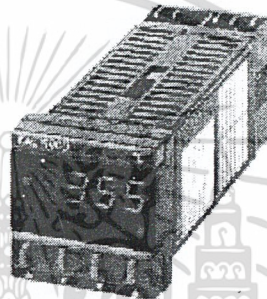
ตารางที่ ก-8 แสดงถึงย่านอุณหภูมิการใช้งานและแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากความร้อนของเทอร์โมคัปเปิล type K

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
270	4.418										
260	4.411	4.404	4.406	4.408	4.410	4.412	4.414	4.416	4.417	4.418	4.419
250	4.404	4.406	4.413	4.417	4.421	4.425	4.429	4.433	4.435	4.436	4.437
240	4.397	4.395	4.393	4.394	4.397	4.399	4.402	4.405	4.407	4.409	4.410
230	4.292	4.271	4.250	4.229	4.207	4.200	4.214	4.222	4.234	4.237	4.244
220	4.184	4.170	4.161	4.152	4.142	4.133	4.123	4.113	4.103	4.092	4.081
210	4.070	4.048	4.031	4.014	4.007	4.009	4.011	4.013	4.014	4.017	4.018
200	3.991	3.977	3.972	3.976	3.981	3.985	3.990	3.994	3.997	4.001	4.005
190	3.920	3.917	3.920	3.924	3.929	3.934	3.939	3.943	3.947	3.951	3.955
180	3.880	3.884	3.888	3.892	3.896	3.900	3.904	3.908	3.912	3.916	3.920
170	3.834	3.844	3.854	3.864	3.874	3.884	3.894	3.904	3.914	3.924	3.934
160	3.782	3.800	3.811	3.823	3.835	3.847	3.859	3.871	3.883	3.895	3.907
150	3.724	3.754	3.764	3.776	3.788	3.800	3.812	3.824	3.836	3.848	3.860
140	3.669	3.709	3.719	3.724	3.728	3.732	3.736	3.740	3.744	3.748	3.752
130	3.611	3.637	3.642	3.646	3.650	3.654	3.658	3.662	3.666	3.670	3.674
120	3.553	3.566	3.569	3.572	3.575	3.578	3.581	3.584	3.587	3.590	3.593
110	3.495	3.496	3.497	3.498	3.499	3.500	3.501	3.502	3.503	3.504	3.505
100	3.437	3.437	3.437	3.437	3.437	3.437	3.437	3.437	3.437	3.437	3.437
90	3.379	3.379	3.379	3.379	3.379	3.379	3.379	3.379	3.379	3.379	3.379
80	3.321	3.321	3.321	3.321	3.321	3.321	3.321	3.321	3.321	3.321	3.321
70	3.263	3.263	3.263	3.263	3.263	3.263	3.263	3.263	3.263	3.263	3.263
60	3.205	3.205	3.205	3.205	3.205	3.205	3.205	3.205	3.205	3.205	3.205
50	3.147	3.147	3.147	3.147	3.147	3.147	3.147	3.147	3.147	3.147	3.147
40	3.089	3.089	3.089	3.089	3.089	3.089	3.089	3.089	3.089	3.089	3.089
30	3.031	3.031	3.031	3.031	3.031	3.031	3.031	3.031	3.031	3.031	3.031
20	2.973	2.973	2.973	2.973	2.973	2.973	2.973	2.973	2.973	2.973	2.973
10	2.915	2.915	2.915	2.915	2.915	2.915	2.915	2.915	2.915	2.915	2.915
0	2.857	2.857	2.857	2.857	2.857	2.857	2.857	2.857	2.857	2.857	2.857
0	0.000	0.009	0.019	0.029	0.039	0.049	0.059	0.069	0.079	0.089	0.099
10	0.097	0.207	0.317	0.427	0.537	0.647	0.757	0.867	0.977	1.087	1.197
20	0.206	0.416	0.626	0.836	1.046	1.256	1.466	1.676	1.886	2.096	2.306
30	0.412	0.824	1.236	1.648	2.060	2.472	2.884	3.296	3.708	4.120	4.532
40	0.618	1.236	1.854	2.472	3.090	3.708	4.326	4.944	5.562	6.180	6.798
50	0.824	1.648	2.472	3.296	4.120	4.944	5.768	6.592	7.416	8.240	9.064
60	1.030	2.060	3.090	4.120	5.150	6.180	7.210	8.240	9.270	10.300	11.330
70	1.236	2.472	3.708	4.944	6.180	7.416	8.652	9.888	11.124	12.360	13.596
80	1.442	2.884	4.326	5.768	7.210	8.652	10.094	11.536	12.978	14.420	15.862
90	1.648	3.296	4.944	6.592	8.240	9.888	11.536	13.184	14.832	16.480	18.128
100	1.854	3.708	5.562	7.416	9.270	11.124	12.978	14.832	16.686	18.540	20.394
110	2.060	4.120	6.180	8.240	10.300	12.360	14.420	16.480	18.540	20.600	22.660
120	2.266	4.532	6.798	9.064	11.330	13.596	15.862	18.128	20.394	22.660	24.926
130	2.472	4.944	7.416	9.888	12.360	14.832	17.084	19.346	21.608	23.872	26.140
140	2.678	5.356	8.034	10.708	13.390	15.862	18.096	20.358	22.620	24.874	27.126
150	2.884	5.768	8.652	11.536	14.420	16.914	19.108	21.370	23.632	25.854	28.112
160	3.090	6.180	9.270	12.360	15.450	17.966	20.120	22.382	24.544	26.766	29.098
170	3.296	6.592	9.888	13.184	16.480	18.978	21.132	23.394	25.556	27.568	29.984
180	3.502	7.004	10.506	14.006	17.500	19.990	22.144	24.406	26.568	28.580	30.870
190	3.708	7.416	11.124	14.832	18.512	20.996	23.156	25.418	27.580	29.592	31.756
200	3.914	7.828	11.742	15.654	19.524	21.996	24.168	26.430	28.592	30.604	32.642
210	4.120	8.240	12.360	16.480	20.536	22.996	25.180	27.442	29.604	31.616	33.528
220	4.326	8.652	12.978	17.302	21.548	23.996	26.192	28.454	30.616	32.628	34.414
230	4.532	9.064	13.596	18.124	22.550	24.996	27.204	29.466	31.628	33.640	35.300
240	4.738	9.476	14.214	18.946	23.550	25.996	28.216	30.478	32.652	34.652	36.186
250	4.944	9.888	14.834	19.768	24.550	26.996	29.028	31.490	33.664	35.664	37.072
260	5.150	10.300	15.454	20.590	25.550	27.996	29.840	32.502	34.676	36.676	37.958
270	5.356	10.712	16.074	21.412	26.550	28.996	30.652	33.514	35.688	37.688	38.844
280	5.562	11.124	16.694	22.234	27.550	29.996	31.464	34.526	36.700	38.700	39.730
290	5.768	11.536	17.314	23.056	28.550	30.996	32.276	35.538	37.712	39.712	40.616
300	5.974	11.946	17.934	23.878	29.550	31.996	33.088	36.544	38.724	40.724	41.502
310	6.180	12.356	18.554	24.700	30.550	32.996	33.900	37.556	39.736	41.736	42.388
320	6.386	12.766	19.174	25.522	31.550	33.996	34.712	38.568	40.748	42.748	43.274
330	6.592	13.176	19.794	26.344	32.550	34.996	35.524	39.580	41.760	43.760	44.160
340	6.798	13.586	20.414	27.166	33.550	35.996	36.336	40.592	42.772	44.772	45.046
350	7.004	14.000	21.034	27.988	34.550	36.996	37.148	41.604	43.784	45.784	45.932
360	7.210	14.410	21.654	28.810	35.550	37.996	37.960	42.616	44.796	46.796	46.818
370	7.416	14.820	22.274	29.632	36.550	38.996	38.772	43.628	45.808	47.808	47.704
380	7.622	15.230	22.894	30.454	37.550	39.996	39.584	44.640	46.820	48.820	48.590
390	7.828	15.640	23.514	31.276	38.550	40.996	40.396	45.652	47.832	49.832	49.476
400	8.034	16.050	24.134	32.098	39.550	41.996	41.208	46.664	48.844	50.844	50.362
410	8.240	16.460	24.754	32.920	40.550	42.996	42.020	47.676	49.856	51.856	51.248
420	8.446	16.870	25.374	33.742	41.550	43.996	42.832	48.688	50.868	52.868	52.134
430	8.652	17.280	25.994	34.564	42.550	44.996	43.644	49.700	51.880	53.880	53.020
440	8.858	17.690	26.614	35.386	43.550	45.996	44.456	50.712	52.892	54.892	53.906
450	9.064	18.100	27.234	36.208	44.550	46.996	45.268	51.724	53.904	55.904	54.792
460	9.270	18.510	27.854	37.030	45.550	47.996	46.080	52.736	54.916	56.916	55.678
470	9.476	18.920	28.474	37.852	46.550	48.996	46.892	53.748	55.928	57.928	56.564
480	9.682	19.330	29.094	38.674	47.550	49.996	47.704	54.760	56.940	58.940	57.450
490	9.888	19.740	29.714	39.496	48.550	50.996	48.516	55.772	57.952	59.952	58.336
500	10.094	20.150	30.334	40.318	49.550	51.996	49.328	56.784	58.964	60.964	59.222
510	10.300	20.560	30.954	41.140	50.550	52.996	50.140	57.796	59.976	61.976	60.108
520	10.506	20.970	31.574	41.962	51.550	53.996	50.952	58.808	60.988	62.988	60.994
530	10.712	21.380	32.194	42.784	52.550	54.996	51.764	59.820	61.996	63.996	61.880
540	10.918	21.790	32.814	43.606	53.550	55.996	52.576	60.832	63.008	65.008	62.766
550	11.124	22.200	33.434	44.428	54.550	56.996	53.388	61.844	64.020	66.020	63.652
560	11.330	22.610	34.054	45.250	55.550	57.996	54.200	62.856	65.032	67.032	64.538
570	11.536	23.020	34.674	46.072	56.550	58.996	55.012	63.868	66.044	68.044	65.424

CAL 9900 Temperature Controller

Main Features

- Full Feature Autotune
- Clear Bright Digital Display
- Positive Feel Control Buttons
- Robust Reliable Output Relays
- Dual Output: Standard
- High Accuracy
- Versatility
- Comprehensive Alarm Features
- Cool Strategy
- Parameter Modification Security
- Performance Monitor/Diagnostics



Technical Specification

Supply voltages	110V a.c. or 240V d.c. +10% -15%
Power consumption	5VA
Control temperature range	-200 to +1800°C (sensor dependant)
Front bezel sealing	IP54
Switching capabilities	
SP1 relay	5A 250V a.c.
SP1 SSR drive	25mA 5V d.c.
SP2 relay	3A 250V a.c.
SP2 SSR drive	25mA 5V d.c.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thermocouple	J,K,R,S,T,E,L,N
RTD	pt100
Linear process inputs	0-20mV 4-20mV
Temperature coefficient	150ppm/C sensor span
Reference conditions	22C +/- 2°C after 30 mins settling time
Calibration accuracy	+/-0.25% of sensor full scale
	+/- 1C



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CAL 9900 AUTOTUNE PID TEMPERATURE CONTROLLER INSTALLATION AND OPERATING MANUAL

INSTALLATION

Install the 9900 controller in panel **see 10.2**
Wire up connections **see 10.1**

TO SELECT SENSOR AND ADJUST SET POINT

Step 1

POWER UP
Self check sequence



Step 2

ZERO FLASHES ON LEFT
indicating no sensor selected



Note
Buttons only adjust flashing digits
(shown green)

Step 3

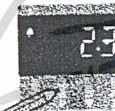
PRESS \blacktriangle TO SELECT
SENSOR e.g. Type K = 2
Sensor options:
(For full table **see 8**)



J	1	R	4	E	7	RTD	9
K	2	S	5	L	8	PT100	
N	3	T	6	B	10		

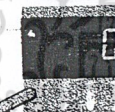
Step 4

PRESS **P** TO ENTER
SENSOR INTO MEMORY
Display shows process
temperature e.g. Ambient



Step 5

PRESS \star TO DISPLAY
SET POINT



Step 6

PRESS AND HOLD \star
TO INCREASE
SET POINT
PRESS \blacktriangle TO INCREASE



Output turns on and temperature rises

The controller is now
operational with
factory PID settings:

Prop band 2.5%
Prop time 20 sec
Derivative 25 sec
Integral 5 min
DAC approach
control 1.5

2 IMPORTANT - Please read before using Autotune AT

- 1 If required adjust: Range, Hi-res 0.1°, Negative temperature ranging, **see 8**
- 2 Proportional cycle-time: 20 sec factory set, if unsuitable change now or use Autotune calculated value after tuning run **see 6**
- 3 For best results use normal set point and load conditions
- 4 Start Autotune AT with the load cool

TO AUTOTUNE

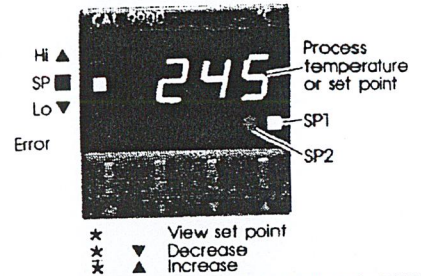
Step 7

START AUTOTUNE 'AT'
NEAR AMBIENT



CAL Controls

The CAL 9900 microprocessor based temperature controller provides precise control with a minimum of setting up, the advanced Autotune algorithm tunes all five control parameters automatically. The simple setting up procedure below is normally sufficient, specialised applications may need the comprehensive 9900 features covered in this manual.

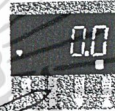


KEY CONTENTS GUIDE

9 Important caution - please read first
10 Installation 11 Setting up
2, 3, 5 Autotune 4 Prop cycle-time
Function 4 Selection 8 Table
7 Alarms 11 Error messages

Step 8

PRESS **P** TO ACCESS
PROGRAM MODE
Function 0 flashes
on right



Step 9

PRESS \star TO CHANGE
TO OPTION SELECTION
Option 0 flashes
on left



Step 10

PRESS \blacktriangle TO SELECT
AUTOTUNE 'AT'
Option 1



Step 11

PRESS **P** TO START
AUTOTUNE 'AT'



AT and Process
temperature displayed
alternately during
Autotune



Autotuned parameters Autotune limits

Entered automatically:
Proportional band/Gain 0.5 - 20% c/range
Integral time/Reset 0.2 - 43.5 min
Derivative time/Rate 1.0 - 255 sec
DAC approach control 0.5 - 9.0 x gain

Proportional cycle time 0.8 - 819 sec

Calculated but for safety reasons needs
manual acceptance **see 6**

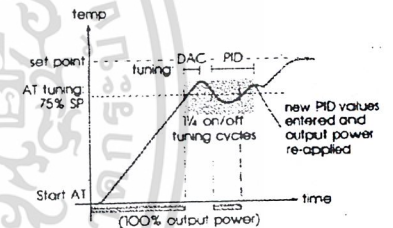


Fig. 1 Autotune AT

3.2 AUTOTUNE PT (Push-to-Tune) Select Opt 2 at step 10

Used to fine tune difficult applications at set point. Useful if the set point or thermal conditions are substantially changed. During PT tuning some overshoot will occur. If this is unacceptable, temporarily reduce set point. PT tunes the parameters listed above except DAC. Proportional cycle time is re-calculated but needs manual acceptance

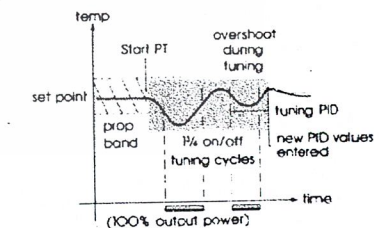


Fig. 2 Autotune PT

3.3 OVERRIDING AUTOTUNE VALUES

After AT/PT any Autotuned parameter may be changed to an Option from the table. The original Autotuned value is retained in memory.
Note Subsequent Autotune AT or PT run replaces manual selections with new calculated values (except Cycle time)

3 AUTOTUNE TYPES AND USES

Two types of Autotune are provided to ensure optimum control of a wide range of applications

AUTOTUNE AT - Normal method, tunes during warm up

AUTOTUNE PT - (Push-to-Tune) - For difficult applications, tunes at set point

3.1 AUTOTUNE AT

Start Autotune AT with the load cool. A short tuning cycle occurs at 75% set point during warm up. New PID values are automatically entered and the temperature rises to set point

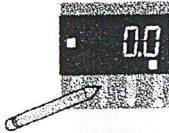
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ที่ ก-1 คู่มือการใช้งานของ CAL 9900 Temperature Controller ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4 CONTROLLER FUNCTIONS DISPLAY AND SELECTION PROCEDURE

The facilities of the 9900 are selected from the Functions and Options Table **see 8** using program mode
 Functions (Fn) – The available controller facilities
 Options (Opt) – The available values for each Function e.g. Function 5 Option 0 (Fn 5/Opt 0) = SP1 Prop band of 2.5%
 Note 1 Should difficulty occur in adjusting Options check the Parameter lock **see 14**
 Note 2 Normal control is maintained with existing settings during programming

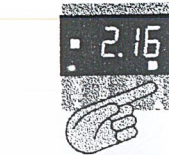
4.1 Step 1

PRESS **P** TO ENTER PROGRAM MODE



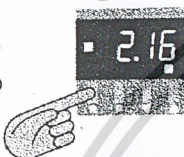
Step 2

PRESS AND HOLD **▲** INDEX TO FUNCTION
 e.g. Function 16 (Sensor select) flashes



Step 3

PRESS ***** CHANGE TO OPTION SELECTION
 e.g. Option 2 (Type K)



Step 4

PRESS **▼** or **▲** SELECT OPTION REQUIRED
 e.g. Option 1 (Type J)



Step 5

PRESS ***** CHANGE TO FUNCTION SELECTION
 Set other Functions as required



Step 6

PRESS **P** TO EXIT PROGRAM MODE WHEN SELECTIONS COMPLETE
 Process temperature displayed



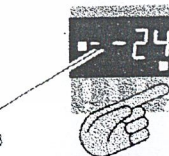
Control commences with new instructions now entered in memory

4.2 MODE B – FUNCTION/OPTION DISPLAY PROCEDURE

Used in Function 2 to set full scale alarms and Function 24 – Range adjustment.
 Mode B enables all digits to be used for Options values

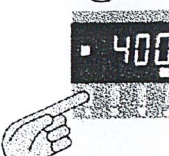
Step 1

PRESS **▲** TO INDEX TO FUNCTION
 e.g. Function 24 (Range adjustment) flashes
 Note 2 bars = Mode B



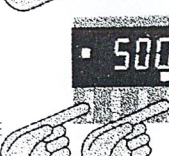
Step 2

PRESS ***** TO DISPLAY OPTION VALUE
 e.g. Range 400 °C flashes



Step 3

PRESS AND HOLD *****
 PRESS **▲** TO INCREASE
 PRESS **▼** TO DECREASE OPTION VALUE



5 AUTOTUNE HINTS

5.1 Autotune error messages **see 11** (EE5-7)

(Latched: PRESS **▼▲** to reset)
 AT/PT tunes most applications satisfactorily, but if tuning fails and error messages repeatedly occur, the application has unusual characteristics requiring manual tuning **see 21**

5.2 Tuning with set point near ambient

Difficult both to control and Autotune. Use PT. If tuning fails try with Fn 5/Opt 1, otherwise increase set point or tune manually

5.3 In High Resolution (0.1°)

Should error message EE6 occur during tuning, select normal resolution (Fn 18/Opt 0) then Autotune and afterwards re-select Hi res. (check range setting Fn 24)

5.4 AUTOTUNE VALUE DISPLAY

At the end of an Autotune run the AT value is automatically entered and may be displayed in Functions:

- 5 Prop band/Gain
- 6 Derivative time/Rate
- 7 DAC approach control
- 8 Integral time/Reset

Step 1

PRESS **P** TO ENTER PROGRAM MODE



Step 2

PRESS **▲** TO INDEX TO FUNCTION
 e.g. Function 5 Prop band
 AT value = 3.5%



Note 3 LED's show an AT value displayed

6 PROPORTIONAL CYCLE TIME

6.1 Autotuned cycle time

Autotune calculates the optimum value but for safety reasons does not automatically implement it

6.2 If the cycle time needed is known

Applications known to require shorter times than the 20 sec factory setting, including SSR drive (1 sec), linear outputs (0.05 sec) should select the appropriate Option in Function 4 using the procedure **see 4**. This setting will not be changed, but may be replaced with the calculated AT value if preferred after the Autotune run

6.3 Normal procedure

Run Autotune AT **see 2**. When complete (alternating AT display stops) display the AT calculated cycle time and accept if suitable, this will then replace the 20 sec factory setting

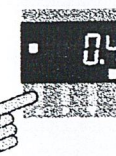
Step 1

Index to Function 4
 For procedure **see 4**
 Option 0: 20 sec factory setting



Step 2

PRESS ***** TO CHANGE TO OPTION SELECTION



Step 3

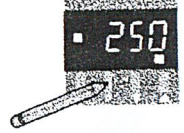
PRESS **▲** TO DISPLAY CALCULATED AT VALUE
 e.g. 9.8 sec
 Note Flashing bar shows calculated AT value is displayed



Step 4

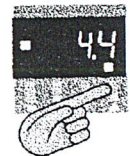
IF AT VALUE SUITABLE

PRESS **P** TO ACCEPT AT VALUE NOW OPERATIONAL



OR IF AT VALUE UNSUITABLE

PRESS **▲** TO SELECT A SUITABLE OPTION FROM TABLE
 e.g. Option 4: 30 sec

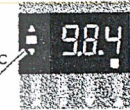


6.4 AT Cycle time values in Function 4

Two AT cycle time values are stored, to enable the current operational value to be retained, until a new value from a subsequent Autotune run is considered
 Example of two AT cycle time values after a subsequent Autotune run:

Step 5

Index to Function 4
 Operational AT value – 9.8 sec
 As accepted previously (Step 4) Note 3 LED's ON



Step 6

PRESS ***** TO CHANGE TO OPTION SELECTION

Step 7

PRESS **▲** TO DISPLAY Latest calculated AT value
 e.g. 7.2 sec
 Note Flashing bar



Step 8

Alternative actions:

PRESS **P** to accept the latest calculated AT value – 7.2 sec which replaces 9.8 sec as the operational AT value

OR PRESS **▼** to display current operational AT value, Then PRESS **P** to retain 9.8 sec

OR PRESS **▲** to select Option from Table

7 ALARMS

7.1 SP2 Operating mode

The operating mode must be selected at Function 19 before adjusting SP2 at Function 2

7.2 Alarm output operation

The alarm output is failsafe, SP2 relay is de-energised and SP2 red LED on during the alarm condition (Not with SP2 in Proportional mode)

7.3 LBA – Loop break alarm **see Fig. 3**

LBA detects a control loop fault, and displays an error message (EE3). The alarm relay may be configured to act also
 LBA operates if the controller fails to receive the correct response to the output within a set time, technically:
 LBA occurs when SP1 output is saturated 0% or 100% and the process temperature fails to move a minimum 50% prop band in the LBA time. SP1 output state is unaffected by LBA alarm condition

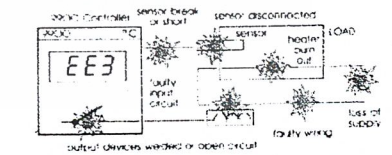


Fig. 3 Typical faults detected by LBA

7.4 Selecting LBA – EE3 message only

1. Index to Function 12 – LBA time
 Option 0 – LBA OUT, displayed
2. PRESS ***** to change to option selection
3. PRESS **▼** to select Option 14
 The recommended initial setting (2 x Integral time in use)
4. LBA alarm condition: EE3 displayed, alternating with process temperature display latches, to reset PRESS **▼▲** together
 To configure Alarm relay SP2 to LBA Select Option 6 in Function 19 (Relay latches in alarm condition, to reset PRESS **▼▲**.)
 Note Use LBA with SP2 ON/OFF mode only (Fn 10/Opt 0). Reset EE3/Relay before any other program changes

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FUNCTIONS AND OPTIONS TABLE
Please read these important notes first

- Factory setting:** is Option O (except Functions 2 and 22)
- Initial configuration:** Functions 16-24 must be selected first then entered into memory by exiting Program mode - see 4 then Autotune and other Functions may be selected
- Protected Functions:** All Functions, except User Settings (Functions 1, 2, 3) may be locked in memory after setting to prevent tampering. See 14 Parameter lock
- AT values (marked ▲ ▼):** As calculated on the latest AT or PT run
- Locating Functions:** Function O is the Program mode entry point
Pressing ▲ increments
▼ moves direct to Function 13 for access to higher Functions
Hold pressed to auto index through table (Functions 13, 14, 25 are unused)

Fn Opt No. No. Parameter

OPERATING MODE ... Protected

O Operating mode

- O Normal Operation
- 1 Start Autotune AT
- 2 Start Autotune PT
- 3 Park mode
- 4 - 100 Manual heat %

USER SETTINGS ... Unprotected

1 Manual Reset (OUT IN PID)

1° steps (max ±127° / 50% prop band)

2 SP2 Adjust

1° steps Factory setting 5°
SP2 mode must be selected in Function 19 before adjusting SP2

SP2 mode (Fn 19)	Option No.	Function 2 range
Deviation alarm	1 - 3	O - 127°
Full scale alarm	4 - 5	O - *
Cool strategy	7	±127°

(* Sensor range : Fn 16)

3 SPI Lock

- O Unlocked
- 1 Locked

OPERATIONAL PARAMETERS ... Protected

4 SP1 Proportional cycle time

O 20 sec	10 3 sec
1 1 sec	11 7 sec
2 5 sec	12 14 sec
3 10 sec	13 45 sec
4 30 sec	▲ Operational AT value
5 60 sec	▼ Latest calculated AT value
6 0.05 sec	15 ■ AT value
7 ON/OFF	
8 0.3 sec	
9 2 sec	

5 SP1 Proportional band/Gain SP1 Hysteresis in ON/OFF mode

O 2.5% CR	1.25%
1 0.5%	0.25%
2 1%	0.5%
3 2%	1%
4 3%	1.5%
5 5%	2.5%
6 10%	5%
7 20%	10%
8 1.5%	0.75%
9 4%	2%
10 6%	3%
11 7%	3.5%
12 8%	4%
13 14%	7%
14 100%	50%

15 ▲ AT value
▼

6 SP1 Derivative time/Rate

O 25 sec	9 3 sec
1 OUT	10 7 sec
2 5 sec	11 15 sec
3 10 sec	12 20 sec
4 50 sec	13 35 sec
5 100 sec	14 75 sec
6 200 sec	▲ AT value
7 1 sec	▼
8 2 sec	

Fn Opt No. No. Parameter

OPERATIONAL PARAMETERS ... continued

7 SPI DAC approach control

O 1.5 x prop band	5 3.0
1 0.5	6 4.0
2 1.0	▲ AT value
3 2.0	▼
4 2.5	

8 SPI Integral time

O 5 min	8 0.2 min
1 OUT	9 7 min
2 0.5 min	10 13 min
3 1 min	11 25 min
4 2 min	12 33 min
5 3 min	13 43 min
6 10 min	▲ AT value
7 18 min	▼

9 Sensor error correction

1° steps (±127° max)

10 SP2 Proportional cycle time

O ON/OFF	9 3 sec
1 1 sec	10 7 sec
2 5 sec	11 14 sec
3 10 sec	12 45 sec
4 20 sec	Non linear ranges for Cool strategy
5 60 sec	13 0.15-10 sec
6 0.05 sec	14 0.15-20 sec
7 30 sec	15 0.06-15 sec
8 2 sec	

11 SP2 Proportional band/Gain SP2 Hysteresis in ON/OFF mode

O 2.5% CR	1.25%
1 0.5%	0.25%
2 1%	0.5%
3 2%	1%
4 3%	1.5%
5 5%	2.5%
6 10%	5%
7 20%	10%
8 1.5%	0.75%
9 4%	2%
10 6%	3%
11 7%	3.5%
12 8%	4%
13 14%	7%
14 100%	50%

12 LBA ... Loop break alarm - time

O OUT	9 30 min
1 1 min	10 40 min
2 2 min	11 50 min
3 4 min	12 70 min
4 6 min	13 90 min
5 8 min	Recommended initial setting:
6 10 min	14 2 x Operational integral time
7 15 min	
8 20 min	

15 Reset Functions O - 24 to factory settings

- O Normal
- 1 Reset (Function 22 not reset)

Abbreviations:

- Fn - Function
- Opt - Option
- SR - Sensor range
- CR - Configured range

Fn Opt No. No. Parameter

INITIAL CONFIGURATION ... Protected

16 Sensor Select and Range Table

Range Table				
	Type	Factory set	Sensor range (SR)	
	T/C	°C	°F	°C
1	J	400	800	800
2	K	400	800	1200
3	N	400	800	1200
4	R	1600	1999	1600
5	S	1600	1999	1600
6	T	250	500	250
7	E	500	1000	600
8	L	400	800	800
10	B	1600	1999	1800

9 RTD PT100 200 400 400 750

Range minimum: 0°C/32°F
Except T/PT100:
Factory set 0°C/32°F
Minimum available -200°C/°F

Linear process inputs Display

11	O - 20mV	O - 100
12	4 - 20mV	O - 100
13	O - 20mV	O - 1000
14	4 - 20mV	O - 1000
15	O - 20mV	O - 2000

17 Negative temperature ranging

- O Disabled
- 1 Enabled (range min -200°)

18 Display resolution

- O Normal (1°)
- 1 Hi-res (0.1°) ±199.9°
1° settings become 0.1°
Ranged O - 200° on selection of Hi-res, (reset with Fn 24)

19 SP2 Operating mode
Select and enter Function 19 before adjusting SP2 in Function 2

- O OUT
- 1 Deviation alarm - High
- 2 Deviation alarm - Low
- 3 Deviation band alarm
- 4 Full scale alarm - High
- 5 Full scale alarm - Low
- 6 LBA - Loop break alarm
- 7 Cool strategy

20 SP1 Sensor break

- O Upscale
- 1 Downscale

21 SP2 Sensor break

- O Upscale
- 1 Downscale

22 °C/°F (Note Change top fascia)

- O °C } Factory set
- 1 °F } not reset by Function 15

23 Software version number

24 Configured range (CR) adjustment

- 1° steps
- Mode B adjustment see 4.2 (See Range Table in Function 16)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

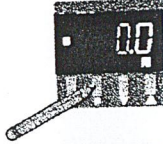
13 IMPORTANT ADVANCED FUNCTIONS SECURITY

The advanced functions are intended for OEM's and process engineers. Access is therefore protected in the Function table

13.1 'HIDDEN' ACCESS TO ADVANCED FUNCTIONS

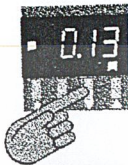
Step 1

PRESS **P** TO ENTER PROGRAM MODE



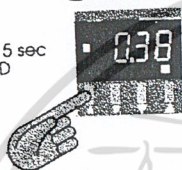
Step 2

PRESS **▼** TO GO DIRECTLY TO FUNCTION 13



Step 3

PRESS & HOLD **★** FOR 5 sec TO ACCESS ADVANCED FUNCTIONS (Entry point Fn 38)



13.2 ADVANCED FUNCTIONS - Protected

Fn Opt Parameter No. No.

26 SP1 Heat Power limit

0	100% max	8	60%
1	95% output	9	55%
2	90%	10	50%
3	85%	11	45%
4	80%	12	40%
5	75%	13	30%
6	70%	14	20%
7	65%	15	10%

Not in SP1 ON/OFF mode

27 SP2 Cool limit

0	100% max	4	40%
1	80% output	5	30%
2	60%	6	20%
3	50%	7	10%

Not in SP2 ON/OFF mode

Direct/Reverse mode selection

	Normal	OFF when logically ON
28	SP1 Output	0
29	SP1 LED	1
30	SP2 Output	0
31	SP2 LED	1

32 Error indicator resolution

0	Normal (2% range/segment)
1	High (1%)
2	Low (4%)

33 Temperature display sensitivity

0	Normal
1	High
2	Low

34 Derivative polling ratio

0	0.5 x derivative time
1	0.2
2	0.7
3	1.0

35 Sensor span adjust

1% steps (+15°/-16° max)

Note 'Hidden' Fn 15/Opt 5 resets ALL functions, except Fn 22

36 SP2 Latch alarms

- 0 Normal
- 1 Latch

Only for: SP2 ON/OFF mode, Fn 19/Opt 1-5

PRESS **▼▲** together to reset (in non alarm condition)

37 Spare

DIAGNOSTICS

Read only Functions 39-49 Mode B display see 4.2

PERFORMANCE MONITOR (PM)

38 Start monitor (Entry point from Fn 13)

- 0 OFF
- 1 Start

Readings are reset on subsequent monitor start or de-powering

39 Read temperature variance (O.1°)

40 Read maximum temperature (°C/°F)

41 Read minimum temperature (°C/°F)

42 Read Duty Cycle Monitor (DCM) % heat (SP1 % ON time)

AUTOTUNE TUNING DATA Fig. 8

Overshoot/Undershoot (°C/°F)
Max 255° /Hi-res 25.5°

- 43 OS1
- 44 OS2
- 45 US

Quarter cycle times (sec)
Min 2 sec/max 1800 sec (30 min)

- 46 QCT1
- 47 QCT2
- 48 QCT3
- 49 QCT4
- 50 Spare PRESS **▲** to Fn 0

13.3 DIAGNOSTICS Functions 38 - 49

To assist with machine development, commissioning and trouble shooting

PERFORMANCE MONITOR (PM)

Monitors and displays minimum and maximum temperatures, and variance (deviation) to 0.1°C/°F. Displayed temperatures are measured values, independent of set point. This high sensitivity monitor may be affected by interference, (Fit snubber to minimise disturbance)

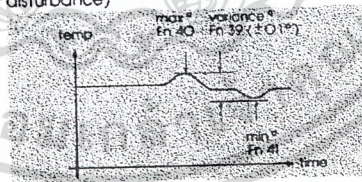


Fig. 7 Performance monitor (PM) Fns 38-41

DUTY CYCLE MONITOR (DCM)

Monitors percentage power used in the previous proportioning cycle. Average several readings for a more accurate result. Power requirements outside the range 20% - 80% may be difficult to control and autotune

AUTOTUNE TUNING DATA (Fns 43-49)

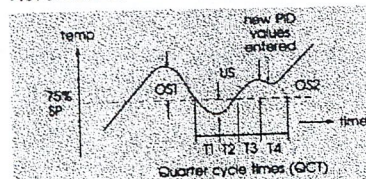


Fig. 8

13.4 MONITOR OPERATION (PM/DCM)

Step	Select
1	To start monitor: Fri 38/Opt 1
2	To return to normal operation: PRESS P Fns 39-42
3	To view readings (PM/DCM): Fns 38/Opt 0
4	To stop monitor: (Readings are retained)
5	Reset: Readings reset on next monitor start. Fri 38/Opt 1
	Monitor and readings reset On de-powering

14 PROGRAM SECURITY LOCK

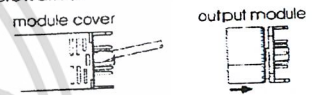
To be made by qualified technician. De-power controller before proceeding using a screw driver at side of bezel remove lower fascia containing push buttons. All functions except user settings - Functions 1-3 can be protected against tampering. To protect function settings change the plastic link from unlocked to locked position.

- LOCKED (or remove link)
- UNLOCKED

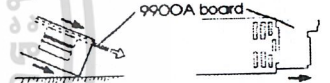
15 INTERNAL LINK CHANGES

These operational modifications should be made by a qualified technician before installation.

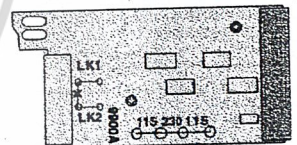
To remove the 9900A board:
1. First remove the output module, carefully lever the retaining clips from the slots in the module cover with a small screwdriver.



2. Tap module cover on table top, as shown, to release the 9900A board. Carefully remove board, avoid damaging components on protruding tongue



15.1 To convert to 3 wire RTD/PT100 (inhibits thermocouple operation) Carefully cut pad at X avoid damage to R3. Fit solder links LK1, LK2 using 22SWG wire.



15.2 Supply Voltage Conversion (Plug in links)

IMPORTANT - check your installation operating voltage before proceeding. Wrongful conversion could damage this unit. For 115 Volt ±15% operation fit two links (spare link in accessories bag) in positions 115 and 115. For 230 Volt ±15% operation fit one link in position 230.

16

9900 FUNCTION/OPTION RECORD			
Customer Ref:			
9900		model	serial no.
Function Number	date:	Option Set	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

17 COOL STRATEGY FOR HEAT-COOL APPLICATIONS

Cool strategy: A change in load causes movement of the linked heat and cool prop bands

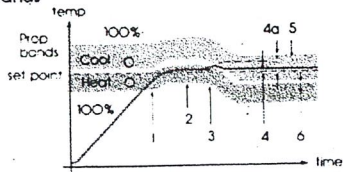


Fig. 9

1. Integral causes linked prop bands to move up
2. Stabilises e.g. 30% heat
3. Exothermic load change causes integral to move prop bands down minimising disturbance
4. Minimum offset achieved (4a = offset without cool strategy integral action)
5. Stabilises e.g. 50% cool
6. Consistent dead band throughout

17.1 SETTING UP ROUTINE FOR HEAT COOL (Single zone procedure)

Step

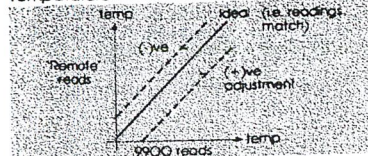
1. **Run Autotune AT:** (Set normal operating temp) Accept AT proportional cycle time Fn 4/Opt 15
Note: SP1/SP2 cycle times must be compatible with switching devices used (SP2 cool output is OFF at this stage)
2. **When temperature stable at set point:**
 - Select cool strategy Fn 19/Opt 7
 - Select cool prop band option value from table nearest to Heat prop band value (view Fn 5) Fn 11
 - Select cool cycle time option value nearest to Heat cycle time value (view Fn 4) Fn 10
 - Adjust SP2 dead band to 0° (Factory set 5°) Fn 2
3. **Run with normal background/exothermic thermal conditions,** good results should be achieved and provide the basis for fine tuning
4. **Further adjustments:** e.g. Water cooling. Should oscillation occur try (in order):
 - Double cool prop band value Fn 11 and reduce integral time value Fn 8
 - Halve cool cycle time Fn 10
 - Introduce cool overlap Fn 2/(-)ve
5. **Non-linear cooling**
For water cooling above 100°C where flash to steam occurs. Select non-linear ranges in cool cycle time Fn 10/Opt 13-15
6. **Fine tuning**
If overshoot (into cool) or undershoot (into heat) occurs, slowly make the following adjustments, observing the results:
 - Increase cool overlap Fn 2/(-)ve
 - Apply SP2 cool limit, progressively Fn 27/Opt 1
 - If needed: SP1 heat limit Fn 26/Opt 1
7. **Contact CAL for more application advice and data if required**

18 RE-CALIBRATING TO A REMOTE STANDARD

To enable the 9900 calibration to match an external meter, data logger etc. (i.e. 'Remote' reading)

SENSOR ERROR CORRECTION: Fn 9

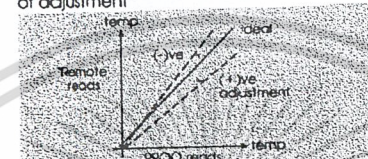
Provides correction at one single temperature



Example
9900 Reads 40.4°
'Remote' 40.0°
Error +4° Set (-4) correction at Fn 9
Note: Error polarity applies to 9900 correction

Sensor span adjust: Fn 35

Provides correction where two temperatures require differing amounts of adjustment



1. Choose a temperature towards the bottom of the normal operating range and one at the top
2. Run at the lower temperature T1, note the error E1 between 9900 and 'Remote' reading
3. Repeat at upper temperature T2 and note error E2

Example
9900 T1 reads 60°
'Remote' 58°
Error E1 = +2°
T2 reads 200°
'Remote' 205°
Error E2 = -5°

4. Calculation of span adjustment for Fn 35

$$\text{Formula: Fn 35} = \frac{E2 - E1}{T2 - T1} \times \text{CR (as Fn 24)}$$

$$\text{Example: Fn 35} = \frac{(-5) - (+2)}{200 - 60} \times 250$$

$$= \frac{-3}{140} \times 250$$

$$\text{Fn 35} = -5^\circ \text{ Set } (-5^\circ) \text{ in Fn 35}$$

5. A span error entered in Fn 35 immediately changes the reading, allow time to stabilise at T2. If an error exists correct with Fn 9. Then check at T1. If an error exists check readings and calculations: repeat if necessary

18 NOTES ON OTHER FUNCTIONS

Function Item

- Fn 0 Park mode (Opt 3)**
Temporarily turns outputs off
Display: and Process temperature
Useful in commissioning and trouble shooting, e.g. Multizone applications
Manual heat % (Opt 4-100)
If sensor break occurs (EE1/2) SP1 output (heater power) may be manually controlled 4-100% (Not in ON/OFF mode)
Display: XXH (XX = % output)
- Fn 3 SP1 Set point lock**
Stops unauthorised adjustment
- Fn 5 Retransmission:**
With 100% prop band, accuracy ± 5% configuration range using linear input/output

Fn 16 Linear process inputs

Optional 9900-PIM Process interface module (Data from CAL)
This remote module provides greater versatility when using the 9900 with linear inputs

Fn 17 Negative temperature ranging

Enables type T/RTD-PT100 to be used below 0°C/32°F
Note: increased range to -200°C/F, may effect PID values

Fn 18 Display resolution

Note: Effect on set point and other values set in °C/°F e.g. 100.0° in hi-res = 1000° in normal

Fn 26 SP1 Heat power limit

Limits maximum heater power during warm up. Useful if heaters oversized

Fn 27 SP2 Cool power limit

Limits maximum cooling power outside prop band in heat-cool

19 PID TUNING NOTES

1. **Proportional cycle time: Fns 4/10**
Determines the cycle rate of the output device

Output device
9900 Internal relays
SSR Linear output (mA/Vdc)

Recommended time
10 sec minimum (5 sec with derated contacts & snubber)
1 sec
0.05 sec



Ideal **Too long (oscillates)**

2. **Proportional band/Gain: Fn 5/11**
Smooths out oscillation occurring in ON/OFF control



Too narrow (oscillates) **Too wide (slow warm up and response)**

3. **Integral time/Reset: Fn 8**
Automatically corrects offset errors caused by proportional control



Too short (overshoots and oscillates) **Too long (slow warm up and response)**

4. **Derivative time/Rate: Fn 6**
Suppresses overshoot and speeds response to disturbances



Too long (oscillates and over corrects) **Too short (slow warm up and response under corrects)**

5. **DAC approach control: Fn 7**
Tunes warm up characteristics independent of normal operating conditions. Controls when derivative action starts on warm up. (smaller setting = closer to set point) Useful when sensor very remote from heater



Too small (overshoot) **Too large (slow stepped warm up)**

21 PID MANUAL TUNING GUIDE

For unusual applications producing error messages (EE5/6) on Autotune AT/PT

1. **Initial settings:**
Fn 5/Opt 0 (or Reset functions: Fn 15/Opt 1)
Fn 4/Opt 7 (ON/OFF Mode)
Normal operating set point
(Then allow process to stabilise)
2. **Take several readings of:**
Amplitude A
Time period T
(Diagnostics Fns 38/39 may help)
3. **Set PID values:**

Parameter	Setting	Set opt value
Fn 4 Prop cycle time (Ensure compatible with output device)	T sec	Nearest 20
Fn 5 Prop band/Gain	A x 1.5 x 100% config range	Next larger
Fn 6 Derivative time/Rate	T sec	Next shorter
Fn 8 Integral time/Reset	T min	Next longer
Fn 7 DAC Approach control	1.5 factory set	see 20.5

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9 INSTALLATION: IMPORTANT SAFETY INFORMATION PLEASE REVIEW



Designed for use: UL 873 - only in products where the acceptability is determined by Underwriters laboratories Inc.

EN61010-1-Within Installation Categories II and III environment and pollution degree 2.

To avoid possible hazards accessible conductive parts of final installation should be protectively earthed in accordance with EN61010 for Class 1 equipment.

Output wiring should be within a grounded cabinet. Sensor sheaths should be bonded to ground or not be accessible.

Live parts should not be accessible without use of a tool.

It is the responsibility of the installation engineer to ensure that this equipment's compliance to EN61010 is not impaired when fitted to the final installation and to use this equipment as specified in this manual, failure to do so may impair the protection provided. Follow wiring diagrams and regulations.

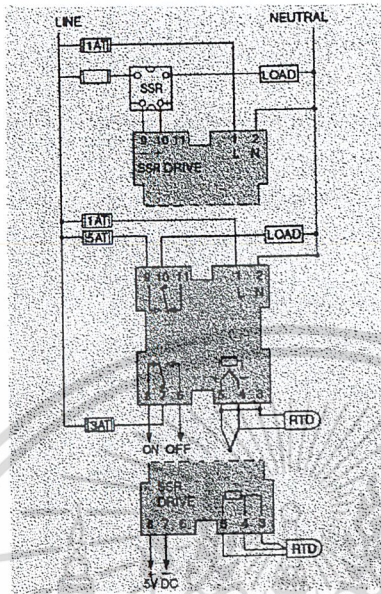
10 INSTALLATION

10.1 ELECTRICAL INSTALLATION



CAUTION RISK OF ELECTRICAL SHOCK.

1. Check controller label is the correct supply voltage for your application.
2. Connections are shown on the socket label.
3. For connection to socket use, 250 Faston receptacles provided in accessory kit.
4. Recommended wire size for mains voltage and outputs 32/0.2 1.0mm² (18 AWG 0.04") rated to 6 Amps/300V at 70°C.
5. For use with 2 wire RTD an external link is required between connections 3 and 5.
6. IMPORTANT. It is recommended that interference suppressors are fitted across relay contacts to prolong relay life.



Fuses: 250VAC rated, time lag type to IEC 127.

12 9900 SPECIFICATION

1.1 ERROR MESSAGES

APPLICATION FAULTS

EE1 Sensor burnout	Check sensor	Self clearing
EE2 RTD/PT100 short	Check sensor	Self clearing
EE3 LBA Loop break	Check control loop	Latches: Reset

AUTOTUNE AT/PT TUNING CYCLE FAULTS

Autotune run is aborted:
Previous values are retained

EE5 Outside time limit	Latches: Reset
EE6 O/shoot exceeds limit	Latches: Reset
EE7 Unable to run Autotune.	Latches: Reset

SP1 in ON/OFF mode

SOFTWARE FAULTS

EE8 Calibration data error	Replace unit if it persists
EE9 System error	Replace unit

PRESS together to reset latched message

WARRANTY

CAL Controls warrant this product free of defects in workmanship and materials for three (3) years from date of purchase

1. Should the unit malfunction, return it to the factory. If defective it will be repaired or replaced at no charge.
2. There are no user-serviceable parts in this unit. This warranty is void if the unit shows evidence of being tampered with or subjected to excessive heat, moisture, corrosion or other misuse.
3. Components which wear, or damage with misuse, are excluded e.g. Relays, SSR.
4. To comply with this warranty the installation and use must be by suitably qualified personnel.
5. Neither CAL Controls Ltd or CAL Controls Inc shall be responsible for any damage or loss to other equipment howsoever caused, which may be experienced as a result of the installation or use of this product. CAL Controls liability for any breach of this agreement shall not exceed the purchase price paid.

Designed by BDC Technical Services, Baldock, UK

1. CONFIGURATION
All functions are front key selectable, it is the responsibility of the installing engineer to ensure that the configuration is safe. Remove the function lock link to protect critical functions from tampering.
 2. ULTIMATE SAFETY ALARMS
Normal safety advice: Do not use SP2 as the sole alarm where personal injury or damage may be caused by equipment failure.
- ### 10.2 MECHANICAL
1. Prepare a 1/16 DIN panel cut out: 45 x 45mm +0.6 -0
1.77" x 1.77" +0.02 -0
 2. Remove the socket, pressing in the lock buttons
 3. Slide the controller into the cut out
 4. Fit the mounting clip see fig, pressing it firmly against the panel, jacking screws optional
 5. Plug on the socket
 6. After installation remove and discard the protective front window label
 7. Cleaning - if required wipe with damp cloth (water only)

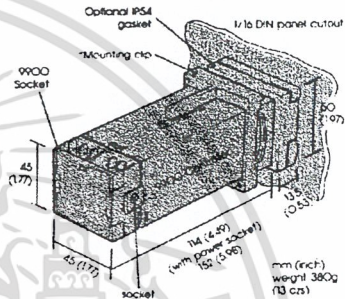


Fig. 6

INPUTS

See 8 Function 16 for Range Table
Thermocouple - 9 types

J Iron/Constantan	T Copper/Con
K Chromel/Alumel	R Pt - 13% Rh/Pt
L Fe/Konst	S Pt - 10% Rh/Pt
N NiCrSi/ NiSi	B Pt - 30% Rh/
E Chromel/Con	Pt - 6% Rh

Standards: 1PTS 68/DIN 43710
Linearity: 5 - 95% sensor range see 8
J/K/L/N/E ±1°C, T ±2°C, B ±6°C >500°C
R/S O-300°C ±5°C, 300-1600°C ±2°C
CJC Rejection: 20:1 (0.05% / °C) typical
External resistance: 100 Ω maximum

Resistance thermometers

RTD/PT100 2 wire (optional 3 wire)
DIN 43760 100 Ω 0°C/138.5 Ω 100°C Pt

Linear process inputs: 0-20mV/4-20mV
Linearity: ±15% Impedance 100k Ω min

Applicable to all Inputs

SR=sensor range, CR=configured range
Calibration accuracy: ±0.25% SR ±1°C
Sampling frequency: Input 3Hz, CJC 5sec
Common mode rejection: Negligible effect up to 140dB, 240V, 50-60Hz
Series mode rejection: 60dB, 50-60Hz
Temperature coefficient: 150ppm/°C SR
Reference conditions: 22°C ±2°C, 115/230V ±5%, after 30m settling time

OUTPUTS

OUTPUT MODULE - Dual standard

Main output: SP1
Relay standard: 5A/250Vac resistive SPDT/Form C
SSd-optional: 5V/25mA non-isolated

Alarm/Cool channel output: SP2
Relay-standard: 3A/250Vac resistive SPDT/Form C
SSd-optional: 5V/25mA non-isolated

9900 Controller output module - types

SP1 output	SP2	115V code	230V
Relay	Relay	991.11C/F	991.12C/F
Relay	SSd	991.21C/F	991.22C/F
SSd	Relay	992.11C/F	992.12C/F
SSd	SSd	992.21C/F	992.22C/F
Relay	-	991.01C/F	991.02C/F
SSd	-	992.01C/F	992.02C/F

CONTROL CHARACTERISTICS

SPI PID Parameters	Field selectable
Prop band/Gain	0.5-100% CR
Prop cycle-time	0.05-81s or ON/OFF
Integral time/Reset	0.2-43m or OUT
Derivative time/Rate	1.0-255s or OUT
DAC approach control (ON/OFF Hysteresis)	0.5-9.0 x PB 0.25-50%CR

GENERAL

Supply Voltage: 115V or 230V ±15%
50-60Hz 6VA
(Link selectable)
Digital LED Display: 3½ digit 10mm high.
High brightness green, 3 step LED.
Error indicator: SP1 Green SP2 Amber.
Output LEDs: SP1 Green SP2 Amber.
Keypad: 4 Elastomeric Buttons.

ENVIRONMENTAL

Humidity: Max. 80%
Altitude: Up to 2000M
Installation: Categories II and III
Pollution: Degree II
Safety: UL873, CSA 22.2/142-87, EN61010
Protection: IP54 (with gasket)
EMC Emission: EN50081-1
FCC Rules 15 Sub-part J Class A
EMC Immunity: EN50082-1, RF Field ±2% FS
Ambient: 0.5°C (32-130°F)
Mouldings: Flame Retardant Polycarbonate



CAL Controls Ltd

Bury Mead Road, Hitchin, Herts, SG5 1RT, UK
Tel: +44 (0) 1462-436161 Fax: +44 (0) 1462-451801

CAL Controls Inc

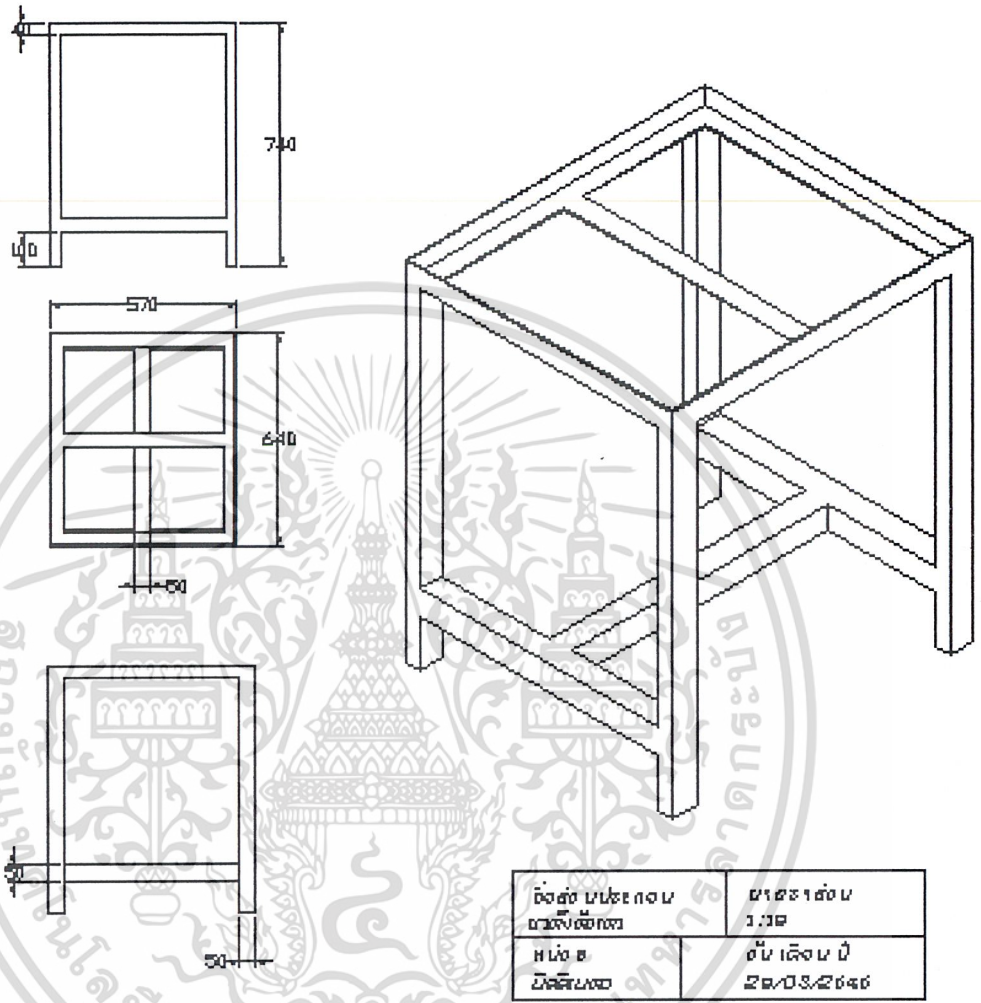
1580 S. Milwaukee Avenue, Libertyville, IL 60048
Tel: (847) 680-7080 Fax: (847) 816-6852

CAL Controls policy of continuous development may cause detail changes to the enclosed information. E & OE

401 1296

Designed by BDC Technical Services, Baldock, UK

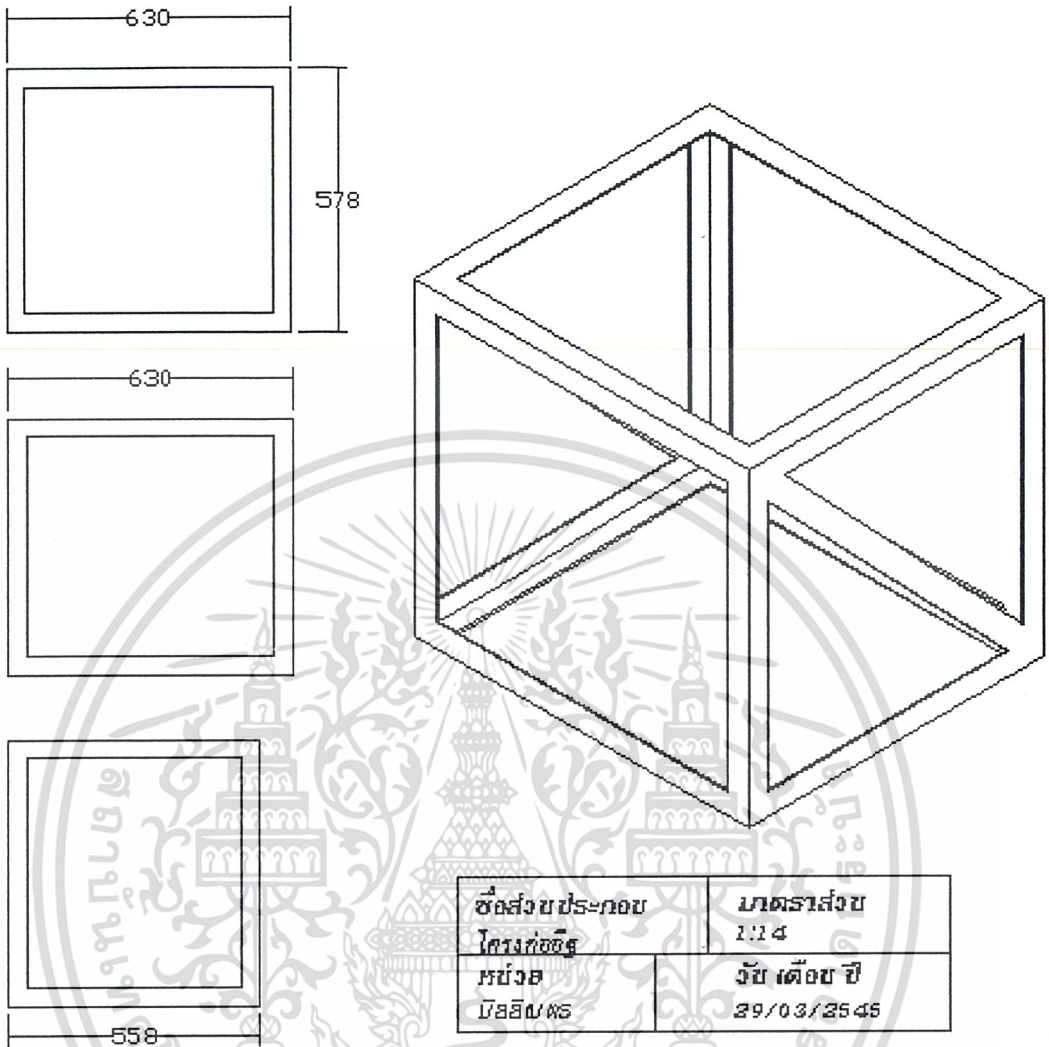
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตั้งโต๊ะ บนโต๊ะคอน บนหลังค้ำ	ขนาด ๑๕๐๐ x ๑.๑๐
หน้าโต๊ะ วัสดุ ๑๕๐๐	ชั้น เคียง ๐ ๒๓/๐๓/๒๕๔๖

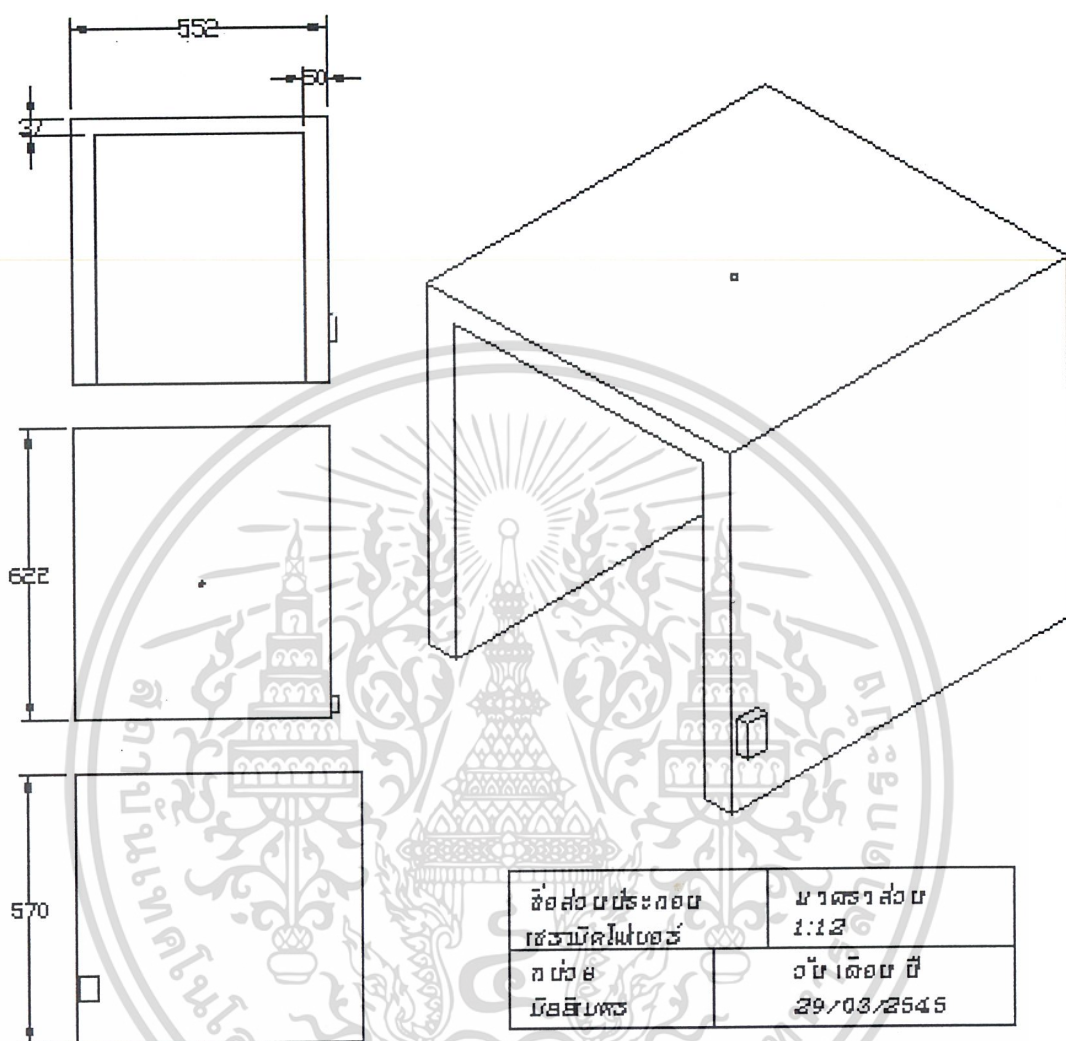
รูปที่ ก- 1 แสดงขนาดตั้งของเตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-2 แสดงโครงกออฐ

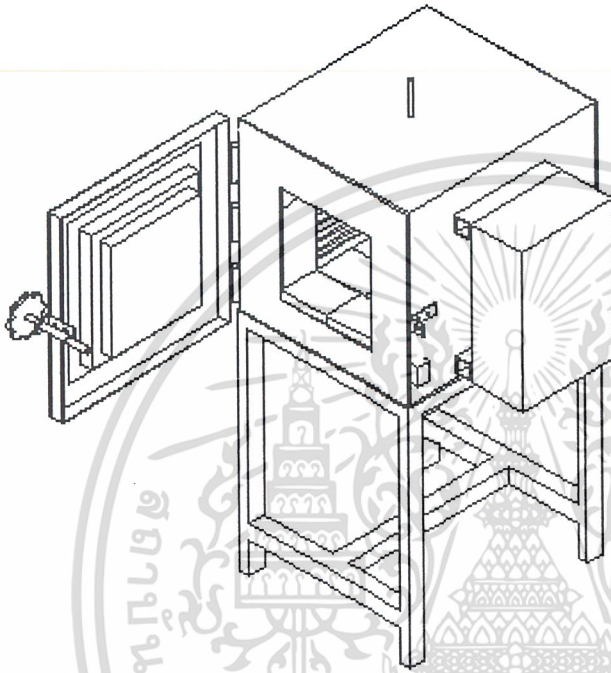
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-3 แสดงชั้นการวางเซรามิกไฟเบอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบภาพรวมของเตา



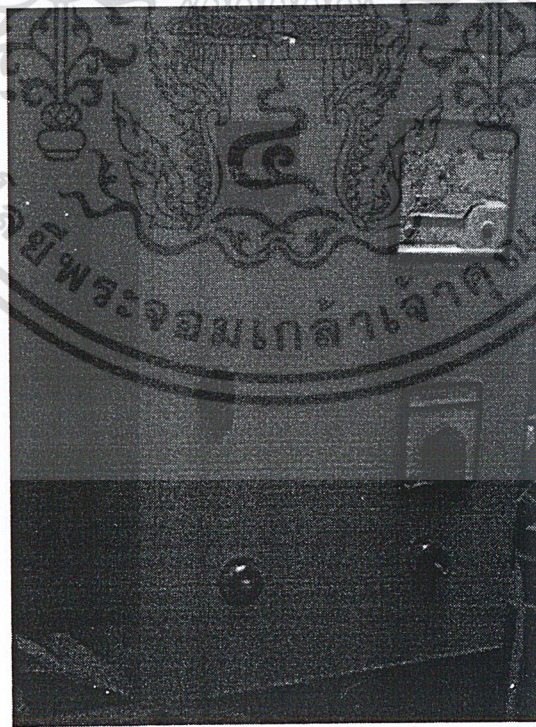
เลขภาพรวมของเตา	มาตราส่วน 1:12
หน่วย มัณฑล	วัน เดือน ปี 29/03/2545

รูปที่ ก-4 แสดงภาพรวมของเตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-5 แสดงเตาอบไฟฟ้าที่สร้างเสร็จแล้ว



รูปที่ ก-6 แสดงภาพกล่องควบคุมเตาอบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข

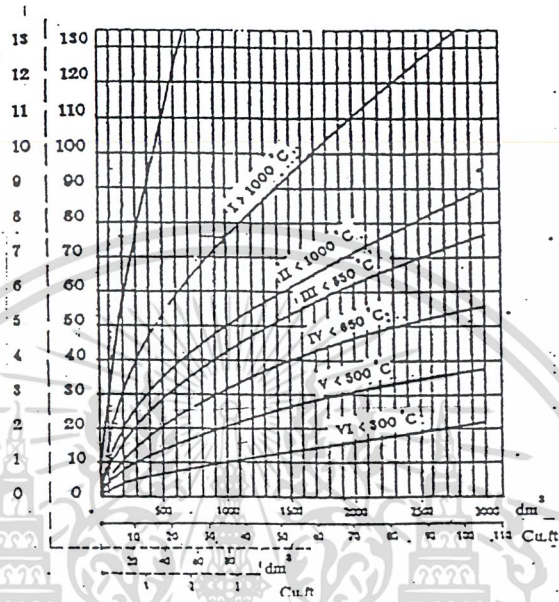
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคการคำนวณ

การคำนวณและการออกแบบขดลวด

กำลังไฟฟ้าของเตาอบที่จะใช้จะได้มาจากจุดตัดของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับปริมาตร

ของเตา



รูปที่ ข-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและปริมาตร

ปริมาตรภายในเตา = $300 \times 300 \times 400 \text{ mm}$
 $= 36 \text{ dm}^3$

จากกราฟจะได้ $P = 5.25 \text{ KW}$

พิจารณาค่าความร้อนสูญเสีย

ค่านำความร้อนอิฐฉนวน (Thermal conductivity)
 $= 0.178 \text{ W/m.k}$

ความต้านทานอิฐฉนวน = $76 / (0.178 \times 10^3)$
 $= 0.45 \text{ k/W}$

ความต้านทานเหล็กครอบ = $10 / (50 \times 10^3)$
 $= 2 \times 10^{-4} \text{ k/W}$

ความต้านทานอากาศ = $5 / (0.846 \times 10^3)$
 $= 6.214 \times 10^{-5}$

ความต้านทาน Ceramic-fiber = $25 / (0.27 \times 10^3) = 0.092 \text{ K/W}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผนังด้านข้าง 2 ด้าน และผนังด้านล่าง

$$\sum \frac{L}{h} = 0.43 + 2 \times 10^{-4} + 6.214 \times 10^{-5} + 0.092$$

$$= 0.44 \text{ k/w}$$

ได้ความร้อนสูญเสีย = 2215 w/mm²
พื้นที่ผิว = 300 x 400 mm
= 12 x 10⁴ mm²

สูญเสียความร้อนที่ผนังเตา 3 ด้าน

$$= 2.215 \times 3 \times 12 \times 10^4 \times 10^{-6}$$

$$= 0.7974 \text{ kW}$$

การสูญเสียความร้อนที่ผนังด้านหลัง
ความต้านทาน Ceramic-fiber = 116 / (0.27 x 10³)

$$= 0.43 \text{ K/W}$$

$$\sum \frac{L}{h} = 0.43 + 2 \times 10^{-4} + 6.214 \times 10^{-5} + 0.43$$

$$= 0.86 \text{ K/w}$$

$$Q = \frac{(1000 - 25)}{0.86}$$

ได้ความร้อนสูญเสีย = 1133 w/mm²
พื้นที่ผิว = 300 x 400 mm
= 12 x 10⁴ mm²
= 1.133 x 12 x 10⁴ x 10⁻⁶
= 0.13596 kW

ได้ความร้อนสูญเสีย Q = 135.96 w/mm²
พื้นที่ผิว = 300 x 300 mm
= 9 x 10⁴

การสูญเสียความร้อนที่ผนังเตา

$$= 0.13596 \times 9 \times 10^4 \times 10^{-6}$$

$$= 0.0122 \text{ kW}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสูญเสียความร้อนที่ผนังด้านหน้า

ความหนา ceramic - fiber = 50 mm

$$\begin{aligned} \text{ความต้านทาน Ceramic - fiber} &= 50 / (0.27 \times 10^3) \\ &= 0.185 \text{ K/W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum \frac{L}{h} &= 0.43 + 2 \times 10^{-4} + 6.214 \times 10^{-5} + 0.185 \\ &= 0.535 \text{ K/w} \end{aligned}$$

$$Q = \frac{(1000 - 25)}{0.535}$$

$$\text{ได้ความร้อนสูญเสีย} = 1822 \text{ w/mm}^2$$

$$\text{พื้นที่ผิว} = 300 \times 300 \text{ mm} = 9 \times 10^4$$

การสูญเสียความร้อนที่ผนังเตา

$$\begin{aligned} &= 1.822 \times 9 \times 10^4 \times 10^{-6} \\ &= 0.164 \text{ kW} \end{aligned}$$

ผนังด้านบน

ความหนา ceramic - fiber = 145 mm

$$\begin{aligned} \text{ความต้านทาน Ceramic - fiber} &= 145 / (0.27 \times 10^3) \\ &= 0.537 \text{ K/W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum \frac{L}{h} &= 2 \times 10^{-4} + 6.214 \times 10^{-5} + 0.537 \\ &= 0.537 \text{ k/w} \end{aligned}$$

$$Q = \frac{(1000 - 25)}{0.537}$$

$$\text{ได้ความร้อนสูญเสีย} = 1,816 \text{ w/mm}^2$$

$$\begin{aligned} \text{พื้นที่ผิว} &= 300 \times 400 \text{ mm} \\ &= 9 \times 10^4 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

การสูญเสียความร้อนที่ผนังเตา

$$\begin{aligned} &= 1.816 \times 9 \times 10^4 \times 10^{-6} \\ &= 0.218 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\text{การสูญเสียความร้อนทั้งหมด} = 0.7974 + 0.0122 + 0.164 + 0.218 = 1.1916$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะฉะนั้นจะต้องเพิ่มกำลังไฟเพื่อชดเชยกำลังไฟที่สูญเสียไปในรูปแบบของความร้อน = 1.2 Kw
 กำลังไฟที่ได้ทั้งหมดเท่า 6562.5 w (เพิ่มประมาณ 25%ของกำลังไฟเดิม)

เพราะฉะนั้นจะได้กำลังไฟที่เอาไปใช้ $P = 6562.5 \text{ w}$

แต่ไฟที่ใช้เป็นไฟ 3 เฟส $P = 6562.5/3$
 $= 2187.5 \text{ w}$

แรงเคลื่อนไฟฟ้า $V = 220 \text{ v}$

อุณหภูมิ $T = 1000 \text{ C}$

การคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวด คำนวณได้จากสูตรหาขนาดเส้นลวดจาก Kanthal Handbook

$$d = \left(\frac{1}{2.91} \right) \left[\left(\frac{P}{V} \right)^2 P \left[\frac{C_t}{P} \right] \right]^{\frac{1}{3}}$$

โดยที่ ส.ป.ส ทางอุณหภูมิของลวดต้านทาน

$$C_t = 1.06$$

ภาวะที่ผิวของลวดต้านทาน $\rho = 2.5 \text{ W/cm}^2$

จะได้ $d = 1.28 \text{ mm}$

โดย $R_t = \frac{V^2}{P}$
 $= 22.125 \Omega$

$$R_{20} = \frac{R_t}{C_t}$$

$$= 20.872 \Omega$$

$$R_t = R \text{ ที่ } 1000 \text{ C}$$

$$R_{20} = R \text{ ที่ } 20 \text{ C}$$

แต่เนื่องจากเส้นลวด 1.3 mm และ 1.4 mm ทางบริษัทผู้จัดจำหน่ายไม่มีขายจึงจำเป็นต้องเปลี่ยนขนาดลวดที่ได้ให้ใกล้เคียงที่สุดคือลวดขนาด 1.2 mm และ 1.5 mm ซึ่งจากการคำนวณแล้วจะเลือกใช้ลวด 1.2 mm เนื่องจากลวดขนาด 1.5 mm ไม่สามารถวางได้พอในพื้นที่ที่กำหนด และอาจไม่ได้กำลังไฟฟ้าเท่ากับที่คำนวณ จึงเลือกลวดขนาด 1.2 mm

ค่าความต้านทานต่อหน่วยความยาวที่ 20 C ของลวด Kanthal AF ขนาด 1.2 mm คือ 1.23 Ω/m

เพราะฉะนั้นจะต้องใช้ลวดยาว

$$20.872/1.23 = 16.969 \text{ m}$$

$$= 16.969 \text{ m/เฟส}$$

การขดลวดค่า $D/d = 6$

$$D = 7.2$$

$$W = \frac{1000L}{\pi(D-d)}$$

$$= 900.3 \text{ รอบ}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ความยาวลวดซิดกัน

$$\begin{aligned}Lw &= w d \\ &= 1080.36 \text{ m}\end{aligned}$$

$$\text{Relative pitch } S/d = 3$$

$$\begin{aligned}\text{ค่าความยาวยี่ด } L &= (S/d).Lw \\ &= 3241.08 \text{ mm}\end{aligned}$$

$$\text{ความยาวที่ร้อยขดลวด } Lf = 325 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned}\text{จำนวนขดลวดที่ได้} &= 3241.08/325 \\ &= 9.974 \text{ ขด} \\ &= 10 \text{ ขด}\end{aligned}$$

ที่ผนังด้านหลัง

$$\text{ความยาวที่ร้อยขดลวด } Lf = 280 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned}\text{จำนวนขดลวดที่ได้} &= 3241.08/280 \\ &= 11.57 \text{ ขด} \\ &= 11 \text{ ขด}\end{aligned}$$

โดยที่

$$Lf = \text{ความยาวที่ร้อยขดลวด}$$

$$Lw = \text{ความยาวลวดซิดกัน}$$

$$L = \text{ความยาวยี่ดของขดลวด}$$

$$W = \text{จำนวนรอบ}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้