

เตาหลอมไฟฟ้า



นายวิรุทธิ์ คอกชาติ
นายอุทธรศักดิ์ รักษายศ
นายตราวุฒิ ตั้งแสง

๑/พ.
๕๗๑ ๗๗
๒๕๕๐

เลขหมู่
เลขทะเบียน **83173**
วัน,เดือน,ปี - ๖ ส.ค. 2551

b. 11960589
i.

**ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2550**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ELECTRICAL MELTING FURNACE



**A THESIS SURMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2007**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาโท

หัวข้อปริญญาโท

เคหาลอมไฟฟ้า

ELECTRICAL MELTING FURANCE

นักศึกษา

นายธีรยุทธ คอกสาธุ

รหัสประจำตัว 48015664

นายสุทธศักดิ์ รักนายน

รหัสประจำตัว 48015677

นายสรวิทย์ พึ่งแสง

รหัสประจำตัว 48015686

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท

(มศ.ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ)

(ดร. อนันท์ โชยจาวณิช)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	เคาหลอมไฟฟ้า
นักศึกษา	นายธีรยุทธ คอกสาธุ นายยุทธศักดิ์ รักษายศ นายตราวุฒิ พึ่งแสง
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา	2550
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	ผศ.ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ ดร. อนันรุท ไชยจาวณิช

บทคัดย่อ

โครงการปริญญานิพนธ์นี้จัดทำขึ้นเพื่อออกแบบและจัดสร้างเคาหลอมไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการการให้ความร้อนด้วยขดลวดความต้านทาน ตัวเคามีขนาดความกว้าง 470 มิลลิเมตร ความยาว 470 มิลลิเมตร ความสูง 420 มิลลิเมตร และเข้าหลอมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 90 มิลลิเมตร สูง 95 มิลลิเมตร มีปริมาตรประมาณ 300 ลูกบาศก์เซนติเมตร ชุดฉนวนกันความร้อนชนิดแคลเซียมบอร์ด และฉนวนกันความร้อนขดลวด ความต้านทานมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ 2 มิลลิเมตรจำนวน 16 ชุด ต่อแบบอนุกรมแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ โดยใช้อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิตอล ไซเทอร์โมคัปเปิล ชนิด เค อุณหภูมิใช้งานสูงสุด 800 องศาเซลเซียส และควบคุมอุณหภูมิโดยให้มีค่าผิดพลาดได้ไม่เกิน ± 5 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title Electrical Melting Furnace
Student Mr Teerayut Doksakoo
Mr Yuthasak Raksayos
Mr.Sarawut Puengsang
Degree Bachelor of Engineering in Industrial Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year 2007

Thesis Advisor Asst. Prof. Dr Kannachai Kanlayasiri
Dr Anirut Chaijaruwann

ABSTRACT

This thesis is to design and build the electrical melting furnace. The furnace is heated by a heater coil. Electrical melting furnace is 470 mm. wide, 470 mm. long and 420 mm high. The crucible is 90 mm. for the inner diameter and 95 mm. in length. This furnace is able to contain 300 mm³ of melting metal. The heat loss of furnace is protected by calsiltherm boards and insulating firebrick. The heater coil is 2 mm. in diameter. The total number of coils is 16 coils. These coils are connected in a series circuit. The furnace is controlled by a digital temperature control with type k thermocouple, and can generate up to 800°C within ±5°C error.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่อง เคาหลอมไฟฟ้าฉบับนี้สำเร็จลงด้วยดี ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา
ผศ.ดร. กรรณชัย กัทยาศิริ และ ดร. อนิรุท ไชยจาวณิช
ขอขอบคุณ ผศ. พรศักดิ์ อรรถวณิช และ ดร. อนิรุท ที่ให้ความสะดวกการทำงานในภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาที่ให้ความรู้และคำแนะนำในช่วงการทำโครงงาน
ขอบคุณ คุณจตุรงค์ บริษัท ไทยบอเนอร์ ในความรู้ที่ให้สำหรับสร้างเคา
ขอบคุณภาควิชาอุตสาหกรรม ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำโครงงานและทำให้ทุกคนในกลุ่มโครงงาน มีความรู้เพื่อ
นำไปใช้ในการทำงานต่อไป
ท้ายสุดขอขอบคุณครอบครัวของพวกเขาที่ทำให้พวกเขามีทุกวันนี้ นั่นเป็นเพราะความรักที่พวกเขาทำให้นมา

นายธีรยุทธ คอกสาธุ
นายสุทธศักดิ์ รัชชานนท์
นายสรวุฒิ ทังแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการทำโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตการทำโครงการ.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน	3
2.1.1 การนำความร้อน (Conduction heat transfer)	3
2.1.2 การพาความร้อน (Convection heat transfer)	9
2.1.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation heat transfer)	10
2.2 ทฤษฎีการออกแบบเตาหลอมไฟฟ้า	12
2.2.1 อุณหภูมิของเตาหลอมไฟฟ้าที่ต้องการ	12
2.2.2 กำลังไฟฟ้า	12
2.2.3 การเลือกชนิดขดลวดความร้อน	13
2.2.4 การกำหนดภาระที่ผิว (Surface load).....	13
2.2.5 ภาระที่ผนังเตา (Wall load).....	14
2.2.6 การกำหนดขนาดความโคเส้นผ่านศูนย์กลาง	14
2.2.7 การออกแบบลวดชนิดขดเป็นคอยล์	15
2.2.8 หลักการเกี่ยวกับการวัดและการควบคุม.....	16
2.2.9 ระบบควบคุม	17
บทที่ 3 การคำนวณงาน	
3.1 การวางแผนการดำเนินงาน	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2 คุณสมบัติของเตาที่ต้องการ.....	20
3.3 ทำการเลือกและกำหนดวัสดุที่นำมาใช้.....	20
3.3.1 คอนกรีตทนไฟ (Castable refractories).....	20
3.3.2 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple).....	22
3.3.3 ภาวนความต้านทาน (Heater coils).....	22
3.3.4 แคลเซียมบอร์ด (Calsitherm boards).....	23
3.3.5 อิฐฉนวนทนไฟ (Insulating firebrick).....	24
3.4 การจัดสร้างเตาอบและติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม.....	24
3.4.1 เหล็กโครงสร้าง (Checked plates).....	24
3.4.2 ติดตั้งชุดฉนวนกันความร้อน.....	25
3.4.3 การใส่ขดลวดความต้านทาน.....	25
3.4.4 กระเบื้องอบแห้ง.....	26
3.4.5 ติดตั้งชุดอุปกรณ์ควบคุม.....	26
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	
4.1 ผลการจัดสร้างเตาหลอมไฟฟ้าและติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม.....	30
4.2 การคำนวณทฤษฎีการจัดสร้างเตาหลอมไฟฟ้า.....	31
4.2.1 ขนาดความโตเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด.....	31
4.2.2 การออกแบบลวดชนิดขดเป็นลักษณะสปริง.....	31
4.2.3 จำนวนรอบของขดลวด.....	32
4.2.4 ความยาวของขดลวด (Lw).....	32
4.2.5 ความยาวของขดลวดเมื่อยึดตามระยะพิคซ์.....	32
4.2.6 การคำนวณความร้อนโดยใช้หลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์	
คำนวณหาความร้อนสูญเสีย (Heat loss).....	33
4.3 การทดลองเพื่อทดสอบการทำงานของเตาหลอมไฟฟ้า.....	33
4.3.1 ชื่อการทดลอง.....	33
4.3.2 วัตถุประสงค์การทดลอง.....	33
4.3.3 อุปกรณ์การทดลอง.....	33
4.3.4 วิธีทำการทดลอง.....	34
4.3.5 ผลการทดลอง.....	34
4.4 สรุปผลการทดลอง.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการดำเนินงาน	
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน	39
5.2 วิจารณ์การดำเนินงาน	39
หนังสืออ้างอิง	40
ภาคผนวก	ผ1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่าตัวอย่างของสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h).....	10
ตารางที่ 3.1 สภาพการนำความร้อน.....	24
ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางเคมี (เป็นเปอร์เซ็นต์).....	24
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองความต้านทานของอุณหภูมิต่อเวลาเมื่อตั้งค่าที่ อุณหภูมิ 250, 300, 400, 500 องศาเซลเซียส	35



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังเรียบ	4
รูปที่ 2.2 วงจรความร้อนสมบูรณ์สำหรับผนังหลายชั้นอย่างอนุกรม.....	8
รูปที่ 2.3 กรณีที่มีผนังหลายชั้น	8
รูปที่ 2.4 การพัฒนาชั้นขอบเขตในการพาความร้อน.....	10
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตร-กำลังไฟฟ้า-อุณหภูมิ ของเตาที่มีฉนวนกันความร้อน.....	13
รูปที่ 2.6 ความต้านทานที่ผิวลวด	14
รูปที่ 2.7 ระบบการวัดปริมาณต่างๆ ของเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม	17
รูปที่ 2.8 ระบบการควบคุมวงจรเปิด.....	18
รูปที่ 2.9 ระบบการควบคุมวงจรปิด	19
รูปที่ 3.1 คอนกรีตทนไฟและปูนกาวทนความร้อนอุณหภูมิสูงสุด 1,300 องศาเซลเซียส	21
รูปที่ 3.2 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)	22
รูปที่ 3.3 ขดลวดความต้านทาน(Heater coil).....	23
รูปที่ 3.4 แคลเซียมบอร์ด (Calsitherm boards)	23
รูปที่ 3.5 อิฐฉนวนทนไฟ (Insulating firebrick)	24
รูปที่ 3.6 โครงสร้างเตา	25
รูปที่ 3.7 ภาพประกอบชุดฉนวนภายในเตา	25
รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะของการเจาะร่องใส่ขดลวดความต้านทาน	26
รูปที่ 3.9 กระเบื้องอกเบ้าหลอม	26
รูปที่ 3.10 การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลในเบ้าหลอม.....	27
รูปที่ 3.11 อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ.....	27
รูปที่ 3.12 ชุด ไซลิสต์เทรียลย์	28
รูปที่ 3.13 แสดงวงจรการควบคุมการทำงานของเตาหลอมไฟฟ้า	28
รูปที่ 4.1 เตาหลอมไฟฟ้าและตู้ควบคุม	30
รูปที่ 4.2 Relative pitch	32
รูปที่ 4.3 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส	36
รูปที่ 4.4 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส	36
รูปที่ 4.5 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	37
รูปที่ 4.6 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ในปัจจุบัน วิทยาการทางด้านเทคโนโลยีอุตสาหกรรมสาขาต่างๆ ได้เจริญก้าวหน้าไปมาก รวมทั้งวิทยาการทางด้านการผลิตเพื่อให้มีประสิทธิภาพการใช้งานที่สูงขึ้น การบัดกรีโลหะโดยใช้การหลอมด้วยเชื่อมประสาน (บัดกรีแข็ง) ก็เป็นการวิจัยพัฒนาอีกทางหนึ่ง การที่เราจะใช้งานบัดกรีที่มีคุณภาพดีนั้น เตาหลอมก็มีส่วนสำคัญอย่างยิ่ง

เตาหลอมไฟฟ้า (Electrical melting furnace) เป็นเตาที่ใช้กำลังทางไฟฟ้าเป็นต้นกำเนิดความร้อน เพื่อเพิ่มอุณหภูมิ โดยเตาชนิดนี้จะมีประโยชน์ในการหลอมวัสดุ ส่วนประกอบสำคัญในกระบวนการถ่ายเทความร้อน คือ 1. การนำความร้อน (Conduction) 2. การพาความร้อน (Convection) 3. การแผ่รังสีความร้อน (Radiation) โดยเตาหลอมไฟฟ้ามีการถ่ายเทความร้อน 2 แบบ คือ การนำความร้อน และการพาความร้อน อธิบายได้ดังนี้ ตัวกำหนดความร้อนหรือจุดขจัดความดันด้านทานจะถูกฝังไว้กับผนังเตา พลังงานความร้อนจะถูกถ่ายเทไปยังเตาหลอมโดยการพาความร้อน และการนำความร้อนจะนำพลังงานความร้อนไปยังวัสดุที่จะหลอม โดยอาศัยตัวกลางคือ เบ้าหลอมกราไฟต์ สืบเนื่องมาจากภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ได้มีการเรียนการสอนเกี่ยวกับวัสดุศาสตร์ และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน ซึ่งมีการอ้างอิงจากหนังสือและมีการทดลองจริง อุปกรณ์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในการทดลองคือเตาหลอมโลหะไฟฟ้าเตาหลอมที่สร้างขึ้นนี้สร้างขึ้นเพื่อใช้งาน และศึกษาค้นคว้าวิจัยในภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

1.2 วัตถุประสงค์ของการทำโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาและออกแบบเตาหลอมไฟฟ้าโดยจัดสร้างเตาหลอมไฟฟ้า

1.2.2 เพื่อสร้างเตาหลอมไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตการทำโครงการ

1.3.1 ใช้ขนาดด้านทานเป็นตัวกำเนิดความร้อนใช้กระแสไฟฟ้า 1 เฟส 220 โวลต์ อุณหภูมิใช้งานสูงสุด 800 องศาเซลเซียส

1.3.2 การควบคุมอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลเป็นตัววัดอุณหภูมิ และอุปกรณ์ควบคุมทางไฟฟ้า เป็นตัวควบคุมการทำงาน

1.3.3 ทวับคุมอุณหภูมิโดยให้มีความผิดพลาดได้ไม่เกิน 0.1 องศาเซลเซียสเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้เตาหลอมไฟฟ้าไว้ใช้งาน และใช้ในการศึกษาในภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
- 1.4.2 สามารถนำเตาหลอมไฟฟ้ามาใช้กับงานหลอมโลหะได้
- 1.4.3 ได้รับความรู้เกี่ยวกับการทำงานและวิธีการสร้างเตาหลอมไฟฟ้า
- 1.4.4 ได้รับความรู้ด้านการออกแบบวงจรควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบและจัดสร้างเตาหลอมไฟฟ้า จำเป็นจะต้องศึกษาหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำมาใช้เป็นแนวทางในการปฏิบัติงานอย่างถูกวิธีและตรงตามความต้องการของผู้จัดทำ นำมาซึ่งความสำเร็จในการจัดสร้างเตาหลอมไฟฟ้า ที่พร้อมใช้งาน

2.1 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนเป็นวิทยาศาสตร์ที่ใช้ในการประเมินการถ่ายเทของพลังงานซึ่งอาจเกิดขึ้นระหว่างวัตถุเนื่องจากความแตกต่างของระดับอุณหภูมิซึ่งพลังงานที่ถ่ายเทนั้นคือ “ความร้อน” และการถ่ายเทความร้อนก็จะช่วยให้การวิเคราะห์พลังงานของระบบ ด้วยกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ได้อย่างถูกต้องยิ่งขึ้น โดยการเพิ่มกฎที่ได้จากการทดลองที่ใช้ในการถ่ายเทพลังงานของระบบ การถ่ายเทความร้อนมี 3 แบบ คือ

2.1.1 การนำความร้อน (Conduction heat transfer)

การนำความร้อน เป็นรูปแบบหนึ่งของการถ่ายเทความร้อน ในลักษณะของการแลกเปลี่ยนพลังงานจากบริเวณอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณต่ำ โดยเคลื่อนที่แบบจลน์ (Kinetic motion) หรือการชนกันโดยตรงของโมเลกุลซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นในของไหลที่หนืดๆ ส่วนในกรณีของโลหะนั้นจะเป็นการไหลของกระแสอิเล็กตรอนสำหรับของแข็งที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี จะมีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระมากมายที่เคลื่อนไหวอยู่ภายในโครงสร้างของโมเลกุล (Lattice) ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี จะเป็นตัวนำความร้อนที่ดีตามไปด้วย ยกตัวอย่างเช่น ทองแดง เงิน เหล็ก ฯลฯ อันเป็นผลจากการนำหรือถ่ายเทความร้อนโดยอิเล็กตรอนอิสระเหล่านี้

กฎความสัมพันธ์ของการนำความร้อน โดยถือเกณฑ์การสังเกตจากการทดลอง กำเนิดจากบิโอท์ (Bio) แต่ต่อมานักฟิสิกส์-คณิตศาสตร์ชาวฝรั่งเศส ชื่อโจเซฟ ฟูริเยร์ นำเอาหลักการนี้มาใช้วิเคราะห์เป็นทฤษฎีความร้อน กฎนี้กล่าวว่า อัตราการไหลของความร้อนทิศทางนั้น ถ้าทราบการไหลของความร้อนในทิศทาง x กฎของฟูริเยร์กำหนดเป็น

$$q_x = kA \frac{dT}{dx} \quad \text{W} \quad (2.1)$$

$$q''_x = \frac{q_x}{A} = k \frac{dT}{dx} \quad \text{W/m}^2 \quad (2.2)$$

จากสมการ (2.1) ถ้าอุณหภูมิลดลงในทิศทางบวกของ x แล้ว $\frac{dT}{dx}$ เป็นลบ ดังนั้น q_x (หรือ q''_x)

มีค่าเป็นบวก เนื่องจากสมการมีเครื่องหมายลบติดอยู่ เพราะฉะนั้นเครื่องหมายลบจึงต้องใส่ในสมการและเพื่อให้แน่ใจว่าเครื่องหมายเป็นลบหรือเครื่องหมายบวกนั้นขึ้นอยู่กับการกำหนดทิศทางของอุณหภูมิและการคำนวณค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

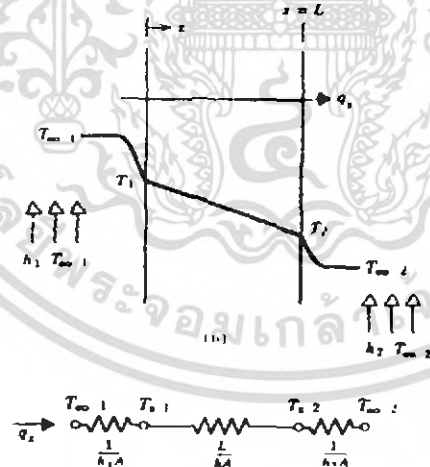
ว่า q'' , (หรือ q_x) เป็นปริมาณบวก เมื่อการไหลของความร้อนอยู่ในทิศทางบวกของ x ในทางกลับกันเมื่อทางด้านขวามือของสมการเป็นลบ แสดงว่าการไหลของความร้อนอยู่ในทิศทางลบของ x

จุดประสงค์หลัก ในการวิเคราะห์การนำความร้อนก็เพื่อที่จะหาสนามอุณหภูมิ (Temperature field) ในตัวกลางหนึ่งซึ่งเป็นผลจากเงื่อนไขที่สอดคล้องกับขอบเขต นั่นคือ ต้องทราบการกระจายอุณหภูมิ (Temperature field) เมื่อทราบค่านี้ก็จะสามารถหาฟังก์ชันความร้อนที่จุดใด ๆ ในตัวกลางนั้น จากกฎของฟูริเยร์ (Fourier's Law) การหาค่านี้ทำได้โดยใช้กฎของพลังงาน (Energy conservation) กับปริมาณความร้อนที่เฟอเรนเซียนซึ่งระบุกระบวนการถ่ายเทพลังงาน และใช้สมการอัตราที่เหมาะสมผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นสมการดิฟเฟอเรนเชียล ซึ่งคำตอบของมันจะให้การกระจายอุณหภูมิในตัวกลางหรือวัตถุนั้น

การนำความร้อนในสถานะสม่ำเสมอหนึ่งมิติ (One dimensional steady-state conduction) ลักษณะของการนำความร้อนแบบสม่ำเสมอที่จะกล่าวถึงนี้มีกรณีเกิดขึ้นของอุณหภูมิ และการไหลของความร้อนขึ้นอยู่กับทิศทางเพียงทิศทางเดียว โดยมีอุณหภูมิแต่ละจุดของวัตถุไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

2.1.1 | ผนังเรียบ (Plane wall)

สำหรับการนำความร้อนในหนึ่งมิติของผนังเรียบ อุณหภูมิจะเป็นฟังก์ชันของโคออร์ดิเนต x และการส่งผ่านความร้อนพิจารณาเฉพาะในทิศทางนี้ ในรูป 2.15 ของไหล 2 ชนิดที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันไหลผ่านในแค้ด้านของผนังเรียบ การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น โดยการพาความร้อนจากของไหลร้อนที่ $T_{\infty 1}$ ฝัผิวหนึ่งของผนังของผนัง T_1 และผ่านผนังโดยการนำไปยังอีกหน้าที่ T_2 จากนั้นความร้อนจะถูกพาออกไปโดยของไหลเย็นที่ $T_{\infty 2}$ ในการหาอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ สิ่งแรกที่จะต้องรู้ก็คือ การกระจายของอุณหภูมิภายในผนังเรียบ



รูปที่ 2 | การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังเรียบ

2.1.2 | การกระจายตัวของอุณหภูมิ (Temperature distribution)

การกระจายของอุณหภูมิภายในผนังหาได้จากสมการที่กระจายของความร้อน และเงื่อนไขที่ขอบเขตต่าง ๆ ตามเงื่อนไขดังกล่าว และไม่มีการผลิตความร้อนภายในผนัง สมการจะลดรูปเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) = 0 \quad (2.3)$$

ถ้าสมมติค่า k คงที่ โดยการอินทิเกรต 2 ครั้ง ได้คำตอบทั่วไปเป็น

$$T(x) = C_1 x + C_2 \quad (2.4)$$

โดยเงื่อนไขที่ขอบตามรูป จะได้ว่า $T(0) = T_1$ และ $T(L) = T_2$ แทนในสมการ (2.2) จะได้

$$C_1 = \frac{T_2 - T_1}{L}$$

$$C_2 = T_1$$

ดังนั้นคำตอบทั่วไปของการกระจายของอุณหภูมิในผนัง คือ

$$T(x) = \left(T_2 - T_1 \right) \frac{x}{L} + T_1$$

โดยใช้กฎของฟูรีเยร์ เพื่อหาค่าตอบของการส่งผ่านความร้อน นั่นคือ

$$T(x) = \left(T_2 - T_1 \right) \frac{x}{L} + T_1 \quad (2.5)$$

สังเกตว่า A เป็นพื้นที่ของผนังซึ่งตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายเทความร้อน และฟลักซ์ความร้อนนั้นก็คือ

$$q_x = kA \frac{dT}{dx} = \frac{kA}{L} (T_1 - T_2) \quad (2.6)$$

สังเกตเช่นกันว่า ค่าฟลักซ์ความร้อนเป็นค่าคงที่ไม่ขึ้นกับ x ซึ่งเป็นลักษณะที่ตรงกับสมการ (2.3) ซึ่งหมายความว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ความร้อนในทิศทาง x

$$q''_x = \frac{q_x}{A} = \frac{k}{L} (T_1 - T_2) \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.3 ความต้านทานความร้อน (Thermal resistance)

ในที่นี้เราจะนำสมการ (2.6) ซึ่งใช้แนวทางที่สำคัญมากมาใช้ นั่นคือ ความคล้ายคลึงกันระหว่างการสูญเสียความร้อนและประจุไฟฟ้า โดยที่ความต้านทานไฟฟ้านั้นเกี่ยวข้องกับการนำไฟฟ้านั้นเกี่ยวข้องกับการนำไฟฟ้า ดังนั้นความต้านทานความร้อนก็ต้องมีส่วนเกี่ยวข้องกับการนำความร้อน จากสมการ (2.6) ความต้านทานการนำความร้อน คือ

$$R_{t,cond} = \frac{(T_{s1} - T_{s2})}{q_x} = \frac{L}{kA} \quad (2.8)$$

ในทำนองเดียวกัน สำหรับการนำไฟฟ้าในระบบเดียวกัน กฎของโอห์มได้ให้รูปแบบความต้านทานไฟฟ้า

$$R_{t,cond} = \frac{(E1 - E2)}{I} = \frac{L}{\sigma A} \quad (2.9)$$

นอกจากนี้ ความต้านทานความร้อนยังมีส่วนเกี่ยวข้องกับการพาความร้อน จากกฎการเย็นตัวของนิวตัน

$$q = hA (T_s - T_\infty) \quad (2.10)$$

ความต้านทานความร้อนสำหรับการพา คือ

$$R_{t,conv} = \frac{(T_s - T_\infty)}{q} = \frac{1}{hA} \quad (2.11)$$

วงจรความร้อนสมบูรณ์สำหรับผนังเรียบที่มีการพาความร้อนที่ผิว แสดงในรูปที่ 2.2 อัตราการถ่ายเทความร้อนหาได้จาก การแยกพิจารณาของแต่ละช่วงในวงจร จะได้สมการ คือ

$$q_x = \frac{(T_{\alpha 1} - T_{s,1})}{\frac{1}{h_1 A}} = \frac{(T_{s,1} - T_{s,2})}{\frac{L}{kA}} = \frac{(T_{s,2} - T_{\alpha 2})}{\frac{1}{h_2 A}} \quad (2.12)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนอาจเขียนแทนด้วยเทอมของผลต่างอุณหภูมิทั้งหมด $(T_{\alpha 1} - T_{\alpha 2})$ และความต้านทานความร้อนรวม R_{t0}

$$q_x = \frac{(T_{\alpha 1} - T_{\alpha 2})}{R_{t0}} \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากความต้านทานการนำและการพาต่ออนุกรมกัน จึงได้

$$R_{10} = \frac{1}{h_1 A} + \frac{L}{kA} + \frac{1}{h_2 A} \quad (2.14)$$

2.1.1.4 ผนังหลายชั้น (Composite wall)

วงจรรวมความร้อนสมมูลอาจใช้สำหรับระบบที่ซับซ้อนได้เหมือนกัน เช่น ผนังหลายชั้น ซึ่งจำนวนความต้านทานความร้อนที่ต่ออนุกรมและขนานกัน จะขึ้นอยู่กับชั้นของวัสดุที่แตกต่างกันพิจารณาได้เป็น

$$q_c = \frac{(T_{\alpha,1} - T_{\alpha,4})}{R_t} \quad (2.15)$$

โดยที่ $T_{\alpha,1} - T_{\alpha,4}$ เป็นผลต่างของอุณหภูมิทั้งหมดและ $\sum R_t$ เป็นผลรวมของความต้านทานความร้อนดังนั้น

$$q_c = \left[\frac{(T_{\alpha,1} - T_{\alpha,4})}{\frac{1}{h_1 A} + \frac{L_A}{k_A A} + \frac{L_B}{k_B A} + \frac{L_C}{k_C A} + \frac{1}{h_2 A}} \right] \quad (2.16)$$

หรืออาจหาอัตราการถ่ายเทความร้อนได้จากการคิดในแต่ละช่วงก็ได้

$$q_c = \frac{(T_{\alpha,1} - T_{\alpha,4})}{\frac{1}{h_1 A}} = \frac{(T_{\alpha,1} - T_{\alpha,2})}{\frac{L_A}{k_A A}} = \frac{(T_{\alpha,2} - T_3)}{\frac{L_B}{k_B A}} \quad (2.17)$$

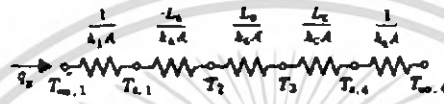
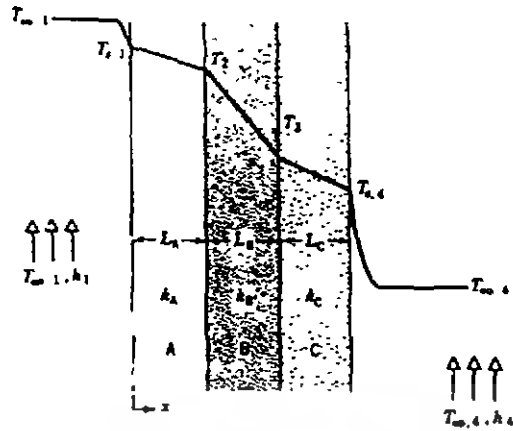
และโดยให้ U เป็นค่าสัมประสิทธิ์จากการถ่ายเทความร้อนทั้งหมด (Overall heat transfer coefficient) ซึ่งกำหนดขึ้นมาจากความคล้ายคลึงกับกฎของการเย็นตัวของนิวตัน จะได้ว่า

$$q_c = UA\Delta T \quad (2.18)$$

ซึ่ง ΔT เป็นผลต่างของอุณหภูมิมรวม จากสมการ (2.15) และสำหรับผนังหลายชั้นตามรูป

$$U = \frac{1}{R_{tot} A} = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{L_A}{k_A} + \frac{L_B}{k_B} + \frac{L_C}{k_C} + \frac{1}{h_2}} \quad (2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

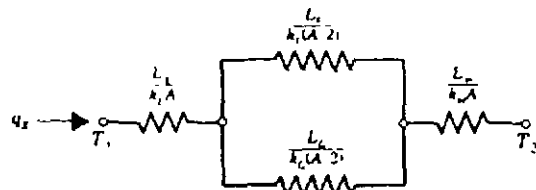
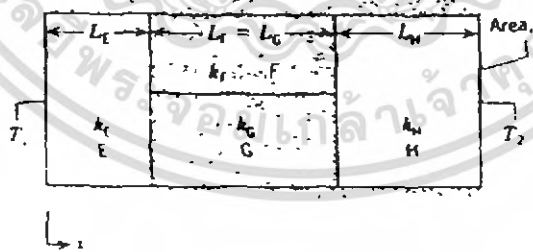


รูปที่ 2.2 วงจรความร้อนสมมูลสำหรับผนังหลายชั้นอย่างอนุกรม

โดยทั่วไปอาจเขียนได้เป็น

$$R_{tot} = \sum R_i = \frac{\Delta t}{q} = \frac{l}{UA} \quad (2.20)$$

ผนังหลายชั้นอาจมีคุณสมบัติตามรูปร่างเป็นแบบอนุกรม - ขนนกก็ได้ ดังเช่นแสดงในรูปที่ 2.17 ถึงการไหลของความร้อนจะเป็น 2 มิติ แต่อาจสมมุติเป็นเงื่อนไขหนึ่งมิติได้โดยสมมุติว่าผิวที่ตั้งฉากกับ x มีอุณหภูมิคงที่ตลอดเวลาหรืออาจสมมุติว่าผิวซึ่งขนานกับแกน x เป็นอะเดียบาตคืออย่างใดอย่างหนึ่ง



รูปที่ 2.3 กรณีที่มีผนังหลายชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 การพาความร้อน (Convection heat transfer)

เมื่อของไหล ไหลผ่านวัตถุที่เป็นของแข็งไหลผ่านภายในช่องทางการไหล โดยที่อุณหภูมิของของไหลและผิวของของแข็งค่าแตกต่างกัน การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลและผิวของของแข็งจะเกิดขึ้นเมื่อของไหลเคลื่อนที่สัมผัสกับผิวของของแข็ง กลไกของการถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า “ การพาความร้อน ” ถ้าการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดขึ้นโดยการทำขึ้นเองโดยใช้ปั๊มหรือพัดลมเป็นตัวทำให้เกิดแรงกระทำของไหลไหลผ่านบนพื้นผิว การถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า “ การพาความร้อนแบบบังคับ ” (Forced convection) ถ้าการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดจากแรงลอยตัว ซึ่งมีผลมาจากความแตกต่างของความหนาแน่นที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิภายในของไหล การถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า การพาความร้อนแบบอิสระ หรือการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Free or natural convection) เช่น ปล่อยแผ่นวัตถุร้อนที่วางอยู่ในแนวตั้งในอากาศเย็นที่หุดหนึ่ง ชั้นของอากาศที่ติดกับพื้นผิวของแผ่นวัตถุจะมีการเคลื่อนที่เพราะเกรเดียนอุณหภูมิในอากาศเป็นผลทำให้เกรเดียนของความหนาแน่นเพิ่มขึ้นซึ่งจะทำให้อากาศเกิดการเคลื่อนที่ โดยการเคลื่อนที่ของของไหลมีผลกระทบต่อการถ่ายเทความร้อนภายในของไหล การคำนวณหาการกระจายของอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนแบบการพาในทางปฏิบัติเป็นเรื่องที่สลับซับซ้อนมากในทฤษฎีวิศวกรรมเพื่อให้การคำนวณหาการถ่ายเทความร้อนง่ายขึ้นระหว่างผิวที่ร้อน T_s และอุณหภูมิของของไหลเย็นที่ไหลผ่านบนผิวที่อุณหภูมิ T_f ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) ถูกกำหนดเป็น

$$q'' = h(T_s - T_f) \quad (2.21)$$

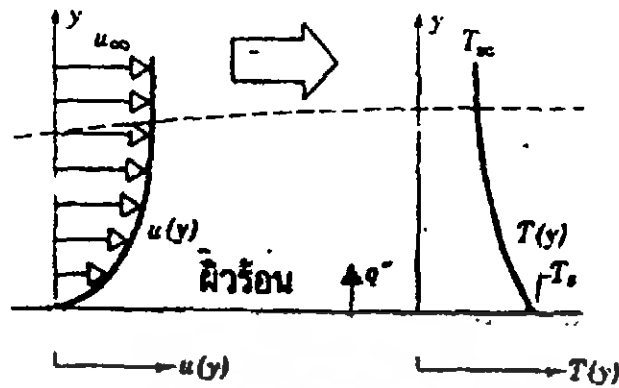
โดยที่ q'' เป็นฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทจากผนังความร้อนไปยังอุณหภูมิที่ต่ำกว่า ถ้าการถ่ายเทความร้อนเกิดจากการไหลของไหลที่ร้อน ไปยังผนังเย็น จะได้ว่า

$$q'' = h(T_f - T_s) \quad (2.22)$$

โดยที่ q'' เป็นฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทจากของไหลที่ร้อนไปยังผนังเย็น สมการ (2.22) สมการที่ได้มาจากกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) โดยที่อุณหภูมิมีหน่วย เซลเซียส หรือเคลวิน และสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h มีหน่วยเป็น $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h (Convective heat transfer coefficient or Film convection coefficient) จะมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามชนิดของการไหล (เช่น ลามินาร์ หรือเทอร์บูแลนต์) รูปทรงของวัตถุ พื้นที่ที่ของไหลไหลผ่าน คุณสมบัติทางฟิสิกส์ ของของไหล อุณหภูมิเฉลี่ย และตำแหน่งต่าง ๆ ตามพื้นผิวของวัตถุ นอกจากนี้ยังขึ้นกับกลไกการถ่ายเทความร้อนแบบธรรมชาติ (การเคลื่อนที่ของ ของ ไหลเนื่องจากแรงลอยตัว) ค่าของ h จะแปรเปลี่ยนไปตามตำแหน่งต่าง ๆ ตามพื้นผิววัตถุ ดังนั้นในทางวิศวกรรมแล้ว เพื่อความสะดวกจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยต่อพื้นผิว (\bar{h}) แทนค่า h ที่ตำแหน่งนั้น ๆ ในการพิจารณาการพาความร้อนตลอดทั้งพื้นผิว สมการ (2.21) และ (2.22) ค่า h จึงถูกแทนด้วยค่า \bar{h} ดังนั้นค่า q'' จึงเป็นค่าฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยตลอดบริเวณที่พิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 การพัฒนาชั้นขอบเขตในการพาความร้อน

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสามารถวิเคราะห์ได้จากการพิจารณาไหลผ่านวัตถุซึ่งมีรูปทรงเรขาคณิตต่าง ๆ เช่น แผ่นเรียบ หรือ การไหลผ่านในท่อทรงกระบอก สำหรับการไหลผ่านวัตถุที่มีรูปทรงคล้ายขั้วซ็อนค่า h สามารถได้จากวิธีทางการทดลอง ซึ่งค่าที่ได้จะมีช่วงของความแตกต่างกัน กว้างมากตามแต่ละรูปแบบ สำหรับการประยุกต์ต่าง ๆ

2.1.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation heat transfer)

การแผ่รังสีความร้อน คือ พลังงานที่ถูกส่งออกไปโดยสารซึ่งอยู่ที่อุณหภูมิจำกัดแน่นอน ถึงแม้เราจะเน้นการแผ่รังสีจากผิวของวัตถุแข็งก็ตาม การส่งออกของรังสีอาจเกิดขึ้นจากของเหลวและก๊าซ ดังนั้นโดยไม่ว่าจนถึงรูปแบบของสาร การส่งออกของรังสีเป็นการเปลี่ยนการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนขององค์ประกอบของอะตอมหรือโมเลกุล พลังงานของสนามการแผ่รังสีนั้นจะถูกนำออกไปโดยคลื่นไฟฟ้า (หรือเรียกอีกอย่างว่าโฟตอน) ในขณะที่ถ่ายเทพลังงานโดยการนำหรือการพาต้องการวัตถุตัวกลาง แต่การแผ่รังสีไม่ต้องการ ในความเป็นจริงการถ่ายเทโดยการแผ่รังสีเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดไม่ว่าในสุญญากาศ

ตารางที่ 2.1 ค่าตัวอย่างของสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h)

ชนิดของการไหล	h ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
การพาแบบอิสระที่ $\Delta T = 25^\circ C$	
แผ่นเรียบแนวดิ่ง 0.25 เมตรใน	
- อากาศบรรยากาศ	5
- น้ำมันเครื่องชนิด	7 (440)
ทรงกระบอกแนวนอน O.D. 0.02 เมตรใน	
- อากาศบรรยากาศ	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ค่าตัวอย่างของสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) (ต่อ)

ชนิดของการไหล	h(W/m ² °C)
- น้ำมันเครื่องชนิด ทรงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.02 เมตร ใน.	62 (741)
- อากาศบรรยากาศ	9
- น้ำมันเครื่องชนิด	60 (606)
การพาความร้อนแบบบังคับ อากาศบรรยากาศ 25 °C , L = 0.1 m L = 0.5 m	10 m/s ผ่านแผ่นเรียบ:
การไหลที่ 5 m/s ผ่านทางกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 cm	
- อากาศบรรยากาศ	85
- น้ำมันเครื่องชนิด	1,800
- น้ำที่ 1 kg/s ภายในท่อ 2.5 cm.I.D.	10,500
การเดือดของน้ำที่ 1 atm	
- การเดือดในภาชนะ	3,000
- การเดือดที่ฟลักซ์ความร้อนสูงสุด	3,500
- การเคื่อนเป็นฟิล์ม	300
การกลั่นตัวของไอน้ำที่ 1 atm	
- การกลั่นตัวเป็นแผ่นบาง ๆ บนท่อแนวนอน	9,000-25,000
- การกลั่นตัวเป็นแผ่นบาง ๆ บนท่อแนวตั้ง	4,000-11,000

ค่าฟลักซ์ความร้อนสูงสุดซึ่งการแผ่รังสีถูกส่งออกไปได้จากพื้นผิวหนึ่งกำหนดโดยกฎของ สตีเฟน - โบลซ์แมน (Stefan-Boltzmann Law)

$$q = \sigma T^4 s \quad (2.23)$$

โดยที่ T_s คือ ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์(K) ของผิว
 σ คือ ค่าคงที่ของสตีเฟน - โบลซ์แมน $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}$

สมการ (2.23) ใช้หาอัตราการส่งพลังงานออกของผิว การคำนวณหาอัตราสุทธิซึ่งการแผ่รังสีถูกแลกเปลี่ยนระหว่างผิว โดยทั่วไปไม่มีความยุ่งยากมาก อย่างไรก็ตามมีกรณีพิเศษซึ่งเกิดบ่อยในทางปฏิบัติ เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนสุทธิระหว่างพื้นผิวที่เล็กมากกับพื้นผิวที่ใหญ่มาก ๆ โดยพื้นผิวที่เล็กจะอยู่ล้อมรอบ พื้นผิวและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิ่งแวดล้อมที่ดูแตกต่างกัน โดยก๊าซซึ่งไม่มีอิทธิพลเกี่ยวกับการแผ่รังสีนั้น อัตราสุทธิของการแลกเปลี่ยนรังสีการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนระหว่างผิวและสิ่งแวดล้อมของมันต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของผิวกำหนดเป็น

$$q'' = \frac{q}{A} = \epsilon \sigma (T_s^4 - T_{\infty}^4) \quad (2.24)$$

ในสมการนี้ A เป็นพื้นที่ผิว และ ϵ เป็นสัมประสิทธิ์การส่งออกมาขณะที่ T เป็นอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมมีการประยุกต์สมการนี้ในรูปแบบอื่นเพื่อให้สะดวก คือ

$$q''_{\infty} = h_r A (T_s - T_{\infty}) \quad (2.25)$$

ซึ่งจากสมการ (2.25) ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี (h_r) คือ

$$h_r = \epsilon \sigma (T_s + T_{\infty})(T_s^2 + T_{\infty}^2) \quad (2.26)$$

จุดประสงค์ที่นำมานี้เพื่อให้มีรูปแบบเหมือนการพาความร้อน สังเกตว่า ค่า h_r ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเป็นสำคัญในขณะที่ h ของการพาขึ้นอยู่กับอุณหภูมิตามปกติ

2.2 ทฤษฎีการออกแบบเคาหลอมไฟฟ้า

องค์ประกอบที่ใช้ในการออกแบบเคาหลอมไฟฟ้า มีดังนี้

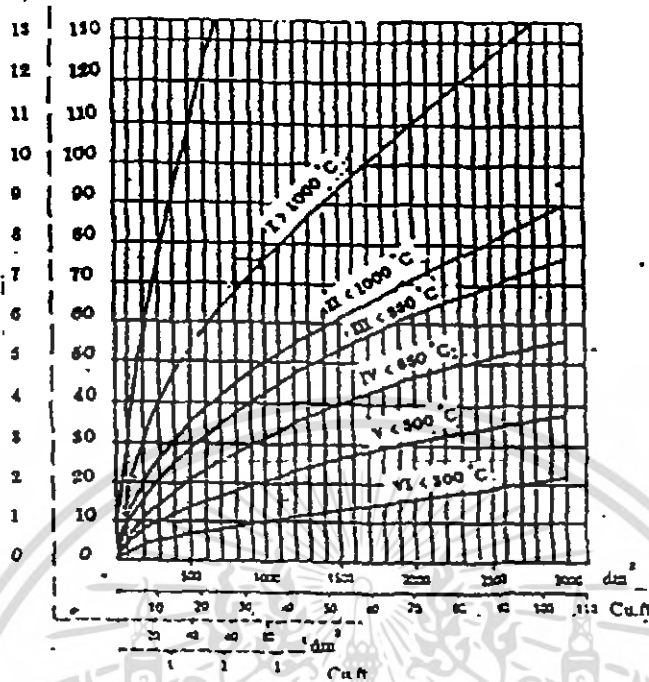
2.2.1 อุณหภูมิของเคาหลอมไฟฟ้าที่ต้องการ

ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ต้องการใช้งาน และเวลาที่หลอม โดยทั่วไป

2.2.2 กำลังไฟฟ้า

กำลังไฟฟ้าที่ต้องการนั้นขึ้นอยู่กับความร้อนที่ต้องการในการทำให้ภายในเตามีอุณหภูมิถึงตามที่ต้องการและต้องเผื่อความร้อนที่อาจสูญเสีย (Heat loss) ซึ่งปริมาณความร้อนที่ต้องการใช้นั้นสามารถกำหนดได้จากปริมาณภายในเตา ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตร-กำลังไฟฟ้า-อุณหภูมิ ของเตาที่มีฉนวนกันความร้อน

2.2.3 การเลือกชนิดขดลวดความร้อน

โดยทั่วไปรูปร่างของขดลวดความร้อนจะมี 2 ชนิด คือ แบบลวดกลม และลวดแบน ต้องเลือกคุณสมบัติที่เหมาะสมตามความต้องการ เช่น การนำไฟฟ้า ความต้านทาน และ ความทนความร้อน เป็นต้น

2.2.4 การกำหนดภาระที่ผิว (Surface load)

การกำหนดภาระที่ผิว เป็นการวัดความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าของขดลวดความต้านทาน โดยเตาอุณหภูมิจะมีภาระที่ผิวสูงกว่าเตาอบอุณหภูมิต่ำ

ปัจจัยในการพิจารณาการกำหนดภาระที่ผิว คือ อุณหภูมิที่ผิวขดลวดความต้านทาน รูปทรงและการวางขดลวดความต้านทาน ภายในเตากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Note: The diagram is valid for thyristor control. For on-off control lower surface loads should be chosen (about -20%).

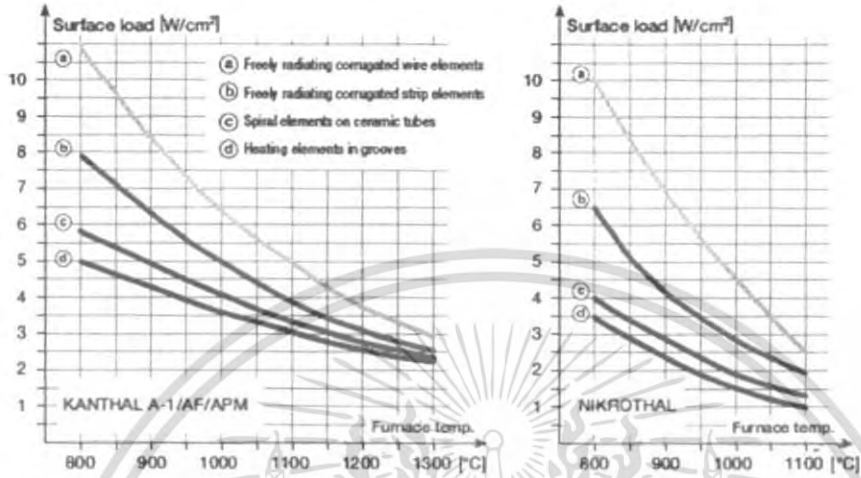
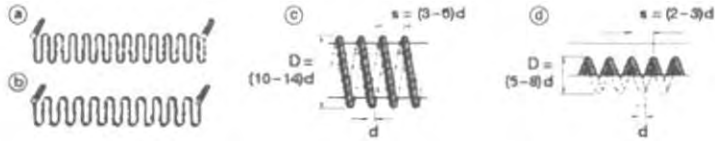


Fig. 4 Maximum recommended surface loads for KANTHAL and NIKROTHAL alloys in industrial furnaces.

รูปที่ 2.6 ความต้านทานที่ผิวหลอด

โดยมีข้อจำกัด ดังนี้

ขดลวดความต้านทาน ชนิด a กำหนดจากขดลวดความต้านทาน ชนิด ลวดกลมและลวดแบน ผึงอยู่ในร่องอิฐเท่านั้น

ขดลวดความต้านทาน ชนิด b กำหนดจากขดลวดความต้านทาน ชนิด ลวดกลม พันอยู่บนท่อ เซรามิคเท่านั้น

ความหนา 2 มิลลิเมตร เป็นอย่างน้อย

ขดลวดความต้านทาน ชนิด c และ d กำหนดจาก ลวดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง อย่างน้อย 5.0 มม. และสำหรับลวดแบนมีระยะห่างระหว่างขดลวดมากที่สุด และกรณีกำหนดภาระที่ผิวสูงสุด

2.2.5 ภาระที่ผนังเตา (Wall load)

ในการคำนวณขนาดของลวดต้านทาน จะต้องคำนึงถึงอุณหภูมิ และพื้นที่หน้าตัดของลวดต้านทานและจะต้องพิจารณาถึง อายุการใช้งาน, ภาระที่ผนังเตา, คุณสมบัติของผนัง และวัสดุที่ทำตัวต้านทาน ตลอดจนสภาพการถ่ายเทความร้อน ดังแสดงให้ภาคผนวก แสดงภาระที่ผนังเตา (Wall load) กับอุณหภูมิมีสูงค่านี้จะต้องอิงขึ้น เมื่อการกระจายความร้อนสม่ำเสมอ และพื้นที่ผิวของผนังเตามาก

2.2.6 การกำหนดขนาดความโตเส้นผ่านศูนย์กลาง

การคำนวณทางทฤษฎี สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$d = \frac{l}{2.91} \sqrt{\left(\frac{p}{v}\right)^2 \left(\frac{PC_1}{p}\right)} \quad (2.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P = กำลังวัตต์

V = แรงเคลื่อนไฟฟ้า

ρ = ความต้านทานจำเพาะของขดลวดความต้านทาน

C = สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิ ของขดลวดความต้านทาน

p = Surface load ของขดลวดความต้านทาน

2.2.7 การออกแบบขดลวดชนิดเป็นคอยล์

การออกแบบขดลวดขดลวดความต้านทาน หลังจากที่กำหนดความโตของถาดแล้ว ต่อไปจะต้องกำหนดความยาวของถาดที่จะพันเป็นคอยล์

$$R_1 = \frac{V^2}{P} \quad (2.28)$$

$$R_{20} = \frac{R_1}{C_1} \quad (2.29)$$

R = ความต้านทานของขดลวดความต้านทานขณะร้อน

R_{20} = ความต้านทานขณะเย็น

ความยาวถาดขณะเย็น

$$L = \frac{R_{20}}{\left(\frac{\Omega}{m}\right)} \quad (2.30)$$

L = ความยาวถาดขณะเย็น

จาก Khanthal Handbook กำหนดอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางขดลวดภายนอก และภายใน

$$\frac{D}{d} = 6 \quad (2.31)$$

จำนวนรอบของขดลวด

$$W = \frac{1000L}{\pi(D-d)} \quad (2.32)$$

ความยาวของขดลวด (L_w)

$$L_w = W \times d \quad (2.33)$$

จาก Khanthal Handbook กำหนด Relative pitch เป็น

$$\frac{S}{d} = 2 \quad (2.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวของขดลวดเมื่อยึดตามระยะพิคซ์

$$L_p = L_w (2) \quad (2.35)$$

จำนวนขดลวดที่ต้องใช้

$$\text{จำนวนขดลวดที่ต้องใช้} = \frac{L_r}{L_r} \quad (2.36)$$

L_r = ความยาวของเตาที่จะร้อยลวด

2.2.8 หลักการเกี่ยวกับการวัดและการควบคุม

จุดประสงค์หลักของการใช้เครื่องมือและควบคุมทั่วไป คือ ต้องการวัดค่าตัวแปรในกระบวนการทางอุตสาหกรรม โดยมีรายละเอียดเกี่ยวกับตัวแปรมากพอที่จะใช้ตรวจสอบหรือควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ ทั้งนี้เพื่อให้กระบวนการผลิตนั้นมีประสิทธิภาพสูง กล่าวคือ ผลิตภัณฑ์ที่คุณภาพดีมีต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดด้วย บางกรณีเราไม่อาจวัดค่าตัวแปรต่าง ๆ ได้โดยตรง ซึ่งจำเป็นต้องใช้เทคนิคบางประการ ในการวัดและควบคุมตัวแปรเหล่านั้น ปัจจุบันได้มีการค้นคว้าและพัฒนาสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเพื่อทำหน้าที่ วัดค่าตัวแปรต่าง ๆ ในกระบวนการอย่างมากมาย นั่นคือ ทำให้กระบวนการวัดและการควบคุม สามารถกระทำได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพในการทำงานสูงนอกจากนี้การส่งค่าตัวแปรที่ใช้สำหรับการควบคุมก็สามารถกระทำได้ง่ายและส่งไปได้ในระยะเวลาทางไกล ๆ

2.2.8.1 ระบบวัดและการควบคุม

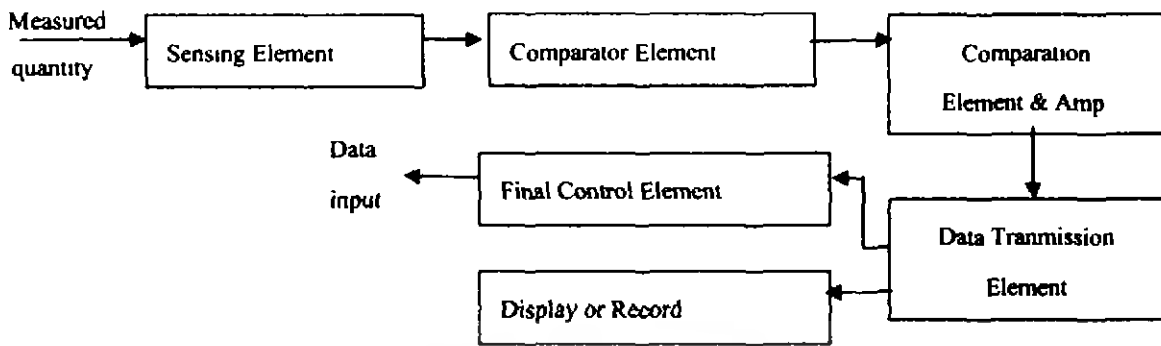
ส่วนประกอบของระบบการวัด แบบการควบคุมกระบวนการทางอุตสาหกรรม อาจแบ่งออกเป็น ส่วนต่าง ๆ ตามหน้าที่การทำงานได้เป็น 4 ส่วน คือ

- 1) ส่วนของอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการวัดและตรวจจับสัญญาณการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรที่ต้องการจะควบคุม
- 2) ส่วนของอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการวัดและเปรียบเทียบค่าตัวแปรที่วัดได้ และค่าที่กำหนดไว้
- 3) ส่วนขยายสัญญาณเพื่อการควบคุม เป็นส่วนที่จะนำเอาค่าตัวแปร ที่ได้จากส่วนเปรียบเทียบมาขยายและปรับขนาดสัญญาณให้เหมาะสมที่จะใช้ในการควบคุมต่อไป
- 4) ส่วนควบคุม เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ปรับหรือเปลี่ยนขนาด ปริมาณ หรือ คุณสมบัติของตัวแปรบางประการ ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการผลิต เพื่อให้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของตัวแปรให้มีค่าตามการ

เนื่องจากระบบการทำงาน of เครื่องมือวัดทางอุตสาหกรรมโดยทั่วไป มีลักษณะการทำงานเหมือนกัน กล่าวคือ องค์ประกอบหรือหน่วยงานแต่ละหน่วยในเครื่องมือวัดจะทำงานคล้าย ๆ กัน ซึ่งอาจแสดงองค์ประกอบของหน่วยงานต่าง ๆ ในเครื่องมือวัด ดังรูปที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 2.7 ระบบการวัดปริมาณต่างๆ ของเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม

จากรูปที่ 2.7 แสดงถึงระบบการวัดปริมาณต่างๆ ของเครื่องมือวัดทางอุตสาหกรรมจะเห็นว่าประกอบด้วยหน่วยต่าง ๆ ที่สำคัญ 6 หน่วย คือ

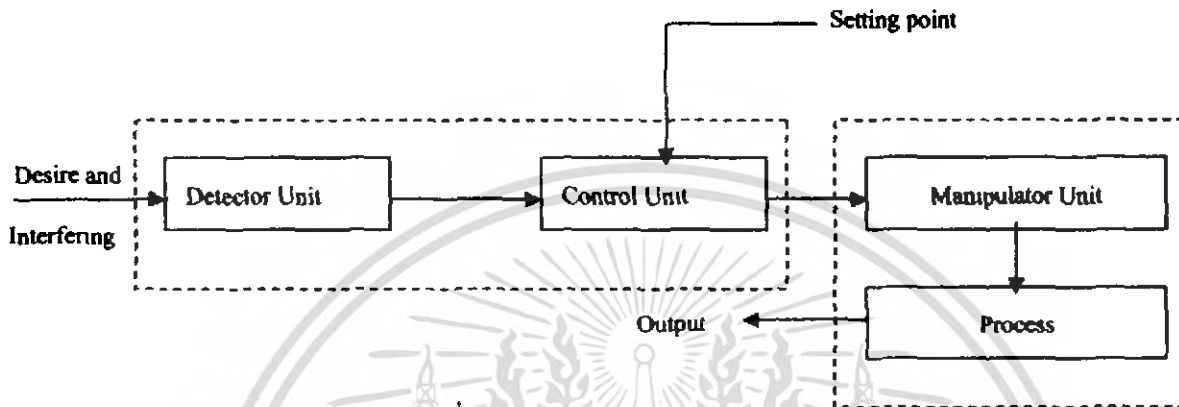
- 1) Sensing element เป็นหน่วยตรวจจับปริมาณตัวแปรต่าง ๆ ที่ต้องการวัดเช่น อุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหล ฯลฯ ที่หน่วยนี้จะส่งค่าออกมาเพียงใดก็ขึ้นอยู่กับปริมาณที่ต้องการวัด ในกระบวนการเหล่านั้น
- 2) Comparator element เป็นหน่วยที่ทำการเปรียบเทียบข้อมูลจากหน่วยตรวจจับการเปลี่ยนแปลงข้อมูลและปริมาณที่ต้องการควบคุม (จากหน่วยควบคุม) ซึ่งผลต่างที่ได้จะถูกนำไปใช้สำหรับการแสดงค่าควบคุมต่อไป
- 3) Conversion element and amplifier เป็นหน่วยที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงค่าที่ได้จากหน่วยแรกให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน โดยที่อาจมีการขยายระดับของสัญญาณ หรือข้อมูลทีวัดได้ให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสมที่จะชี้แสดงค่าหรือส่งข้อมูลไปยังหน่วยอื่น ๆ ซึ่งการขยายปริมาณของตัวแปรที่วัดได้จำเป็นต้องมีอัตราขยายที่คงที่ด้วยเพื่อที่จะให้ค่าที่อ่านได้นั้นถูกต้องแน่นอน
- 4) Data transmission element เป็นหน่วยที่ทำหน้าที่ส่งข้อมูลที่ถูกลขยายให้มีปริมาณที่เหมาะสมแล้วส่งไปยังหน่วยอื่น ๆ ซึ่งอาจส่งไปยังหน่วยแสดงผล หรือหน่วยควบคุมก็ได้
- 5) Display or recorder เป็นหน่วยงานแสดงผลข้อมูล ซึ่งอาจเป็นเครื่องมือที่ชี้บอกค่าต่าง ๆ ที่วัดได้ หรืออาจเป็นหน่วยที่สามารถทำการบันทึกการเปลี่ยนแปลงข้อมูลที่วัดได้ทุกขณะ
- 6) Final control element เป็นหน่วยงานควบคุมปริมาณที่ต้องการวัด และต้องการควบคุมให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสมตามความต้องการ สำหรับที่หน่วยนี้อาจประกอบด้วยหน่วยกำหนดค่าเป้าหมาย (Setting value) เพื่อให้กำหนดปริมาณที่ต้องการควบคุม และนำไปเปรียบเทียบกับปริมาณที่วัดได้จากหน่วยตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณต่างๆ

2.2.9 ระบบควบคุม

ในที่นี้จะหมายถึง ระบบที่ประกอบด้วยเครื่องมือและอุปกรณ์การควบคุมรวมอยู่ด้วยกัน เพื่อทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมอย่าง อัตโนมัติ ระบบควบคุมแบบวงจรมี (Open-loop control system)

2.2.9.1 ระบบควบคุมแบบวงจรมืด

เป็นระบบที่ไม่มีการติดตามผลเพื่อปรับเปลี่ยนค่าภายในวงจร กล่าวคือ หลังจากที่มีการควบคุมโดยส่งสัญญาณควบคุมไปแล้วจะไม่มี การติดตามผลที่เกิดขึ้นใหม่ เพื่อทำการปรับแต่งสัญญาณการควบคุมให้เหมาะสมต่อไป เลข แสดงระบบควบคุมแบบนี้ดังรูป 2.8



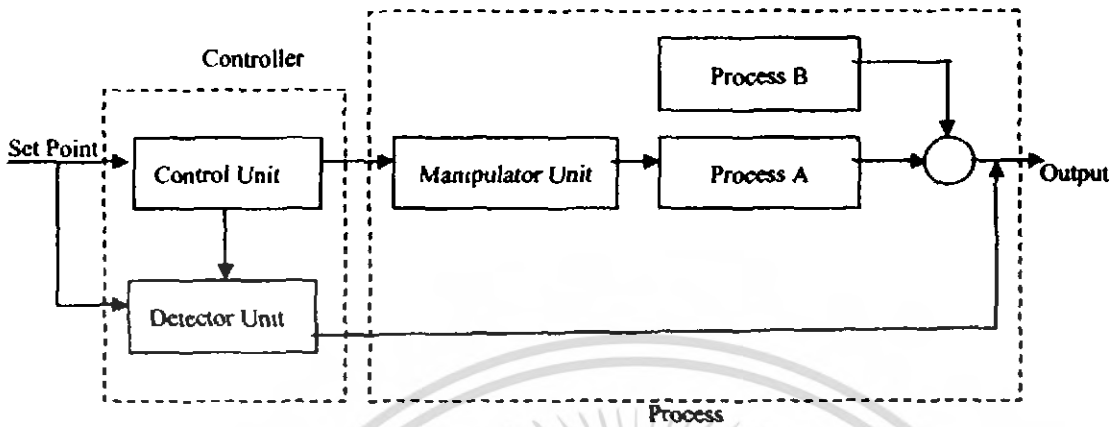
รูปที่ 2.8 ระบบการควบคุมวงจรมืด

จากรูป 2.8 แสดงระบบการควบคุมแบบวงจรมืด จะเห็นว่าค่าของตัวแปรในกระบวนการและสัญญาณรบกวนที่อาจเกิดขึ้น เนื่องจากสาเหตุใด ๆ ก็ตาม เป็นสัญญาณเข้าของระบบ (ถูกวัดด้วยเครื่องมือวัด) ต่อมาจะเป็นสัญญาณเข้าหน่วยควบคุมระบบ (Control unit) ซึ่งเราสามารถปรับระดับหรือปริมาณที่ต้องการควบคุมได้จากนั้นค่าที่ปรับได้จึงเข้าสู่กระบวนการ (Process) จากรูปอาจกล่าวได้ว่าภายหลังจากที่มีการควบคุมกระบวนการนั้น ๆ อาจไม่เข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการก็ได้ ซึ่งระบบการควบคุมแบบนี้ผู้ใช้หรือผู้ที่ควบคุมการทำงานของกระบวนการผลิต จำต้องคอยตรวจสอบและปรับค่าตัวแปรที่วัด ได้อยู่ตลอดเวลา

2.2.9.2 ระบบควบคุมแบบวงจรมืด

เป็นระบบที่มีการติดตามผลภายหลังจากที่มีการปรับแต่งภายในแล้ว โดยมีการวัดค่าตัวแปรที่มีการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการอยู่ตลอดเวลาว่าเข้าใกล้เป้าหมายที่ต้องการหรือยัง ทั้งนี้เพื่อนำไปปรับแต่งสัญญาณควบคุมสำหรับใช้ในการควบคุมต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 ระบบการควบคุมวงจรมืด

จากรูป 2.9 แสดงระบบการควบคุมแบบวงจรมืด จะเห็นว่าคล้ายกับระบบการควบคุมแบบวงจรมืด แต่ที่หน่วยควบคุม (Controller) จะมีอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณออกภายหลังจากการปรับแต่งปริมาณที่ต้องการควบคุมแล้ว ต่อมาสัญญาณที่ตรวจจับได้นี้จะนำมาเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมายเพื่อทำการควบคุมระบบต่อไป หากค่าผลลัพธ์นั้นยังไม่เข้าใกล้หรือเท่ากับค่าเป้าหมายที่ต้องการระบบควบคุมสามารถจะปรับตัวเองได้อย่างอัตโนมัติจนกว่าจะถึงค่าเป้าหมายที่กำหนดไว้ สำหรับขั้นตอนต่าง ๆ ของระบบควบคุมแบบวงจรมืดนี้อาจประกอบด้วย

- 1) การตรวจวัดค่าที่ต้องการควบคุมว่าต่างจากค่าเป้าหมายที่ต้องการควบคุมเพียงใด โดยอาศัยอุปกรณ์การวัดในลักษณะต่าง ๆ
- 2) อุปกรณ์ควบคุมที่ทำหน้าที่ปรับแต่งสัญญาณความแตกต่างระหว่างค่าผลลัพธ์หลังจากที่ถูกควบคุมแล้วและค่าเป้าหมายที่ถูกกำหนดไว้ แล้วจึงส่งไปควบคุมกระบวนการต่อไป เพื่อให้ค่าตัวแปรของกระบวนการถูกต้องตามต้องการ
- 3) หากปรากฏว่ายังมีค่าต่างจากค่าเป้าหมายอีก อุปกรณ์ตรวจวัดจะทำการวัดค่าตัวแปรในกระบวนการและคำนวณตามขั้นตอนต่าง ๆ ในขั้นตอนต่าง ๆ ในข้อ 1 และ 2 อีก จนกระทั่งค่าตัวแปรที่วัดได้เป็นค่าที่ต้องการจึงสิ้นสุดการควบคุม

จากการควบคุมที่กล่าวมาข้างต้นทั้งสองกรณีนี้จะเห็นว่ามีส่วนที่ต่างกันในส่วนของการควบคุม ซึ่งในระบบการควบคุมแบบวงจรมืดนี้เป็นระบบการควบคุมแบบอัตโนมัติและเป็นที่ยอมรับกันอย่างมากในปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การดำเนินงาน

3.1 การวางแผนการดำเนินงาน

ในการดำเนินงาน จะแบ่งงานออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นฮาร์ดแวร์ (Hardware) และส่วนอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (Temperature control)

- 1) การออกแบบส่วนเตาหลอมไฟฟ้า
- 2) การคัดเลือกและกำหนดวัสดุที่นำมาใช้
- 3) การจัดสร้างเตาหลอมไฟฟ้า
- 4) การติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม
- 5) การทดลองการทำงานทุกส่วนของเตาหลอมไฟฟ้า
- 6) สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง
- 7) สรุปและวิจารณ์ผลการดำเนินการ

3.2 คุณสมบัติของเตาที่ต้องการ

- 1) เป็นเตาที่ทำงานโดยใช้พลังงานจากไฟฟ้า
- 2) สามารถสร้างเตาหลอมมาไหลอมวัสดุ
- 3) จัดสร้างเตาหลอมไฟฟ้าที่ให้อุณหภูมิในการหลอมไม่เกิน 800 องศาเซลเซียส
- 4) นำอุปกรณ์ควบคุมอิเล็กทรอนิกส์มาใช้ เพื่อควบคุมอุณหภูมิภายในของเตาหลอมไฟฟ้า

3.3 ทำการเลือกและกำหนดวัสดุที่นำมาใช้

การเลือกซื้อวัสดุและอุปกรณ์ที่นำมาใช้ ควรมีการพิจารณาถึงความเหมาะสมในหลายด้าน เช่น คุณสมบัติ ราคาและคุณภาพ เพื่อให้การจัดสร้างเตาหลอมไปตามจุดประสงค์ที่กำหนด

3.3.1 คอนกรีตทนไฟ (Castable refractories)

คอนกรีตทนไฟ เป็นวัสดุทนไฟชนิดหนึ่งที่คล้ายกับคอนกรีตผสมเสร็จทั่วไป สามารถหล่อเป็นโครงสร้างเตาได้ไม่มีรอยต่อ มีคุณสมบัติทนไฟ หรือทนความร้อนที่อุณหภูมิสูงได้ดีเช่นเดียวกับอิฐทนไฟ ส่วนผสมประกอบไปด้วยซีเมนต์ทนไฟและมีวัสดุทนไฟหลายชนิดที่มีสัดส่วนที่เหมาะสม ซึ่งเมื่อผสมน้ำตามอัตราส่วนที่กำหนดแล้วจะให้ความแข็งแรง สามารถใช้งานได้ง่ายและสะดวกรวดเร็วจัดปัญหาเรื่องคั้งอิฐให้เข้ารูปและเหมาะสมสำหรับใช้งานบริเวณโครงสร้างที่ไม่สามารถก่ออิฐได้เป็นอย่างดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 คอนกรีตทนไฟและปูนกาวทนความร้อนอุณหภูมิสูงสุด 1,300 องศาเซลเซียส

3.3.1.1 เทคนิคการเลือกใช้คอนกรีตทนไฟ

ในการเลือกคอนกรีตทนไฟไปใช้งานจะต้องเลือกรุ่นคุณภาพของคอนกรีตให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งาน โดยสิ่งที่ควรนำมาพิจารณาเบื้องต้น ได้แก่

- 1) อุณหภูมิการใช้งาน
- 2) ปฏิกริยาทางเคมีและสภาพของตะกรันที่เกิดขึ้น รวมทั้งสภาพของอัลคาไลด้วย
- 3) การรับน้ำหนัก
- 4) การเสียดสีจากของแข็งและของไหล
- 5) การดกกระทบของเปลวไฟ

3.3.1.2 การเตรียมคอนกรีตทนไฟชนิดแห้ง

การเตรียมคอนกรีตทนไฟชนิดแห้งให้สามารถนำมาใช้งาน จะต้องทำให้กลายเป็นคอนกรีตแบบเหลวเสียก่อน โดยขั้นตอนในการเตรียมคอนกรีตทนไฟมีดังนี้

- 1) ตวงน้ำสะอาดที่ใช้ผสมคอนกรีตทนไฟเปอร์เซ็นต์ที่กำหนดไว้ที่ตวง
- 2) โรยผงคอนกรีตทนไฟลงในถุงผสมทีละน้อยจนหมด ขณะเดียวกันให้ทำการกวนด้วยไม้พายหรือไม้กวนมือตลอดเวลา
- 3) ทำการกวนจนกว่าคอนกรีตทนไฟจะเป็นเนื้อเดียวกันและเหนียวพอเหมาะกับการใช้งาน
- 4) ถ้าเป็นชนิดแห้งแข็งตัวที่อุณหภูมิห้องควรหมักทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง และต้องกวนอีกครั้งก่อนนำไปใช้งาน

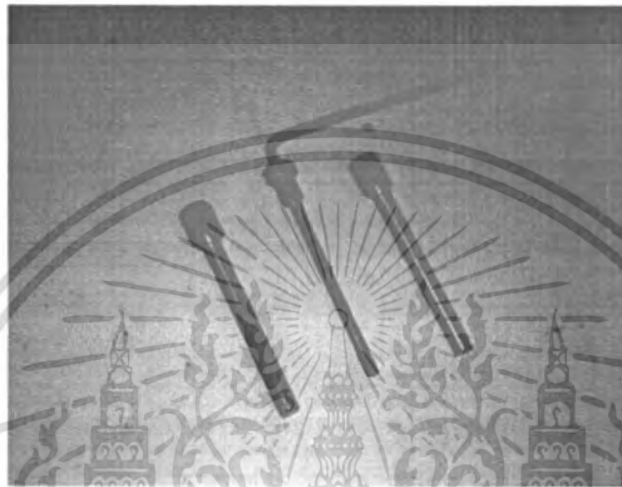
3.3.1.3 การเก็บรักษาคอนกรีตทนไฟ

ควรเก็บไว้ในที่แห้งและไม่ชื้นและอย่าให้ถูกน้ำ จัดเก็บแยกประเภทและคุณภาพเพื่อให้ง่ายต่อการนำมาใช้งานไม่ควรก่อกองเก็บโดยวางซ้อนกันเกิน 2 กระบะ เพราะจะทำให้คอนกรีตทนไฟอัดกันแข็งเป็นก้อน ควรใช้คอนกรีตทนไฟให้หมด หากเหลือควรรีดปากถุงหรือปิดฝาถุงคอนกรีตให้สนิท เพื่อไม่ให้คอนกรีตทนไฟแข็งตัวและไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

เนื่องจากเทอร์โมคัปเปิลมีหลายรูปแบบอย่างเช่น เทอร์โมคัปเปิลแบบ J, K, T, E, N, R และ S ซึ่งแต่ละแบบก็จะมี ลักษณะ คุณสมบัติและการนำไปใช้งานที่แตกต่างกัน เทอร์โมคัปเปิลชนิด แบบ เค (Type K) เป็นแบบที่สามารถวัดอุณหภูมิได้ในช่วง -270 ถึง 1,372 องศาเซลเซียสและเหมาะกับคุณสมบัติของเคาที่จะสร้าง ดังนั้นจึงเลือกใช้เทอร์โมคัปเปิลแบบ เค (Type K) ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

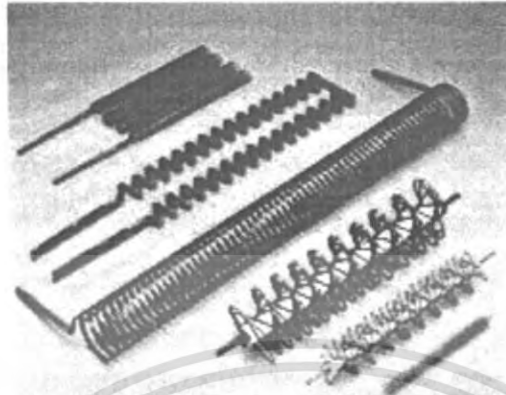
คุณสมบัติของเทอร์โมคัปเปิล

- 1) เป็นเทอร์โมคัปเปิล แบบ เค (Type K)
- 2) สามารถใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิ -270 ถึง 1,370 องศาเซลเซียส
- 3) ใช้หลอดป้องกัน (Protection tube) แบบสแตนเลส ซึ่งสามารถทนความร้อนได้ถึง 1,100° c
- 4) เอลลิเมนต์ (Element) ภายในที่ใช้เป็นแบบ single 2 เส้น
- 5) การเชื่อมปลายเทอร์โมคัปเปิลแบบ Ungrounded ซึ่งมีผลคือไฟไม่ช็อต และไฟไม่ย้อนกลับ
- 6) สายสัญญาณใช้แบบ Shield และ Glass braided ซึ่งสามารถทนอุณหภูมิได้ถึง 200° c นอกจากนี้ยังสามารถกันสัญญาณรบกวนได้เป็นอย่างดี

3.3.3 ลวดความต้านทาน (Heater coils)

เป็นโลหะผสมของ Kanthal และ Nikrothal มีความแข็งแรงและความเหนียวสูงมาก แต่เมื่อนำไปใช้ที่อุณหภูมิสูงแล้วความสามารถในการทนแรงดึง โลหะบางจะยังคงมีความเหนียวดีหลังใช้งานหลาย ๆ ปี สภาพการยืดตัว (Plasticity) ของโลหะ Kanthal จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 1,100 องศาเซลเซียส การยืดตัวเป็นไปอย่างช้า ๆ โดยน้ำหนักของมันเอง ลวดความต้านทานไม่ควรนำไปสัมผัสกับวัสดุพวก Non-ferrous ในระหว่างการผลิตการตัดด้วยเครื่องมือที่เป็นเหล็กอาจใช้ได้กรณีที่จำเป็น วัสดุที่จะนำมาผ่านกระบวนการผลิตจะต้องสะอาดปราศจากรอยสกปรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ชุดลวดความต้านทาน (Heater coil)

3.3.4 แคลเซียมบอร์ด (Calsitherm boards)



รูปที่ 3.4 แคลเซียมบอร์ด (Calsitherm boards)

เป็นแคลเซียมบอร์ดชนิด STBLOWN มีลักษณะเป็นแผ่นไฟเทนแผ่นดำใยสังเคราะห์ มีคุณสมบัติสามารถทนอุณหภูมิได้ถึง 1,260 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่น 96 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ถึง 128 กิโลกรัมต่อตารางเมตร โดยมีขนาด 25x600x7,200 มิลลิเมตร มีเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น เท่ากับ 3 เปอร์เซ็นต์แต่ที่ 1,000 องศาเซลเซียส กำลังต้านทานการดึงเท่ากับ 0.08 – 0.12 เมกะปาสคาล มีสีขาว มีสภาพนำความร้อนเป็นดังตารางที่ 3.1 ที่ความหนาแน่นที่ 128 กิโลกรัมต่อตารางเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 สภาพการนำความร้อน

อุณหภูมิ (° c)	สภาพการนำความร้อน (w/m ² k)
400	0.10
800	0.22
1,000	0.27

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางเคมี (เป็นเปอร์เซ็นต์)

สารประกอบ	คุณสมบัติทางเคมี (เป็นเปอร์เซ็นต์)
Al ₂ O ₃	45 - 46
SiO ₂	51 - 52
Fe ₂ O ₃	1.0

3.3.5 อิฐฉนวนทนไฟ (Insulating firebrick)

อิฐฉนวนทนไฟ ผลิตจากอลูมินาที่มีส่วนประกอบตั้งแต่ 35-60 เปอร์เซ็นต์มีค่าการนำความร้อนต่ำ ความจุความร้อนต่ำและมีความแข็งแรงสูง เป็นฉนวนกันความร้อนที่ดีมีการสูญเสียความร้อนน้อย อิฐฉนวนใช้งานช่วง 900-1400 องศาเซลเซียส ช่วยลดน้ำหนักของเตาเพราะอิฐมีน้ำหนักเบา ใช้เป็นผนังเตา



รูปที่ 3.5 อิฐฉนวนทนไฟ (Insulating firebrick)

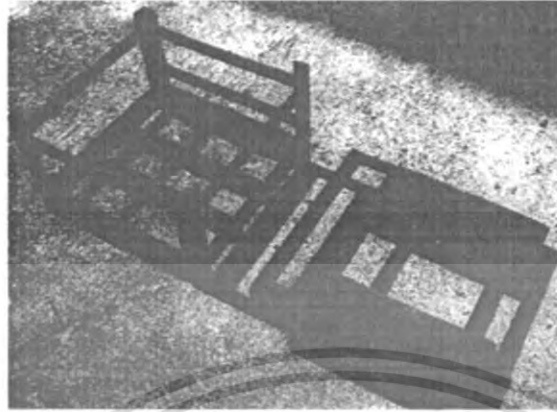
3.4 การจัดสร้างเตาอบและติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม

กระบวนการที่สำคัญอย่างหนึ่ง คือการจัดสร้างเตาหลอมและติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมให้เป็นไปตามการออกแบบ ซึ่งมีกระบวนการออกแบบดังนี้

3.4.1 เหล็กโครงสร้าง (Checkered plates)

เหล็กที่ใช้ขึ้นโครงเตาหลอมเป็นเหล็กฉาก (Equal angles) TIS 1227 ความหนา 14 มิลลิเมตร มีความกว้าง 40 มิลลิเมตร มีคุณสมบัติยืดหยุ่นและเชื่อมต่อกันง่าย ขึ้นโครงโดยการเชื่อมไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 โครงสร้างเตา

3.4.2 ติดตั้งชุดฉนวนกันความร้อน

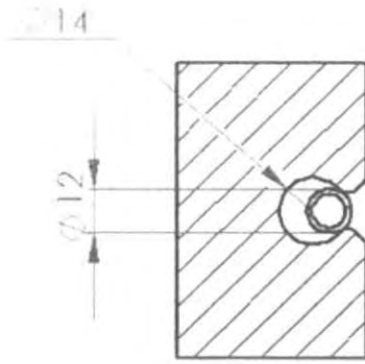
ประกอบอิฐฉนวนทนไฟและแคลเซียมบอร์ดลงในโครงเตา โดยวางอิฐที่เจาะร่องไว้ด้านใน แต่ละชั้นจะประสานด้วยปูนกาวทนความร้อน



รูปที่ 3.7 ภาพประกอบชุดฉนวนภายในเตา

3.4.3 การใส่ขดลวดความต้านทาน

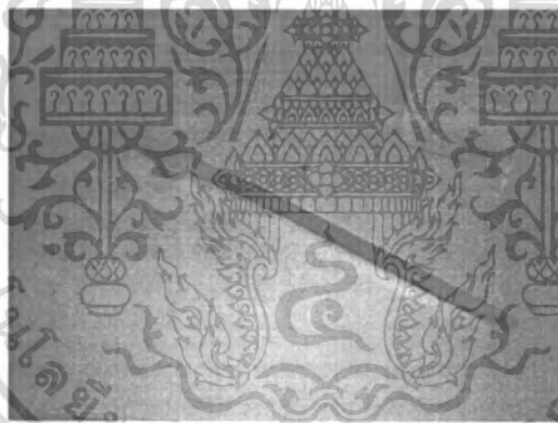
ลักษณะการวางขดลวดความต้านทาน จะถูกวางไปตามแบบดังรูป ขดลวดความต้านทานทั้ง 16 ขดจะเชื่อมต่อกันให้เป็นเส้นเดียวกัน โดยจะเหลือปลายขดลวดอยู่ 2 ขั้วไว้สำหรับต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่จะมาป้อนขดลวดหลังจากนั้นขดลวดทั้ง 16 ขดก็จะถูกร้อยเข้าไปในร่องที่ถูกเจาะไว้แต่ละด้าน ภายในตัวเตาเหลือเฉพาะส่วนที่เป็นขั้วของขดลวดจะยื่นออกมานอกเตา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะของการเจาะรูใส่ขลวดความต้านทาน

3.4.4 กระจกเย็บเข้าหลอม

เป็นอุปกรณ์เย็บเข้าหลอม ออกจากคิวเตาหลอมประกอบไปด้วย คันโยก และกระจก สามารถทำงานโดยใช้แรงกด กดลงไปที่เป็นกค และจะลงมาเองโดยแรงดึงของสปริง

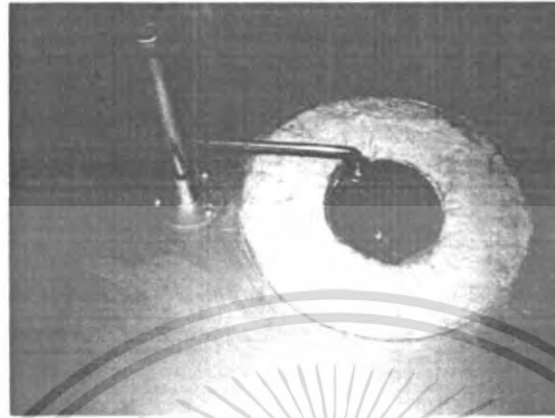


รูปที่ 3.9 กระจกเย็บเข้าหลอม

3.4.5 ติดตั้งชุดอุปกรณ์ควบคุม

ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเข้ากับตู้ควบคุม ให้ปลายของเทอร์โมคัปเปิลอยู่ภายในเข้าหลอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลในเบ้าหลอม

ติดตั้งตัวควบคุมอุณหภูมิเข้ากับโซลิดสเตทรีเลย์ และขดลวดความต้านทาน เมื่อกำหนดอุณหภูมิที่ต้องการ ณ อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิส่งสัญญาณไปยังโซลิดสเตทรีเลย์ เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดความต้านทาน ทำให้เกิดความร้อนขึ้น เมื่อถึงอุณหภูมิที่ต้องการชุดโซลิดสเตทรีเลย์จะหยุดการจ่ายกระแสไฟฟ้า เพื่อให้ขดลวดความต้านทานหยุดทำงาน รูปที่ และ รูปที่ แสดงอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิและชุดโซลิดสเตทรีเลย์ตามลำดับ

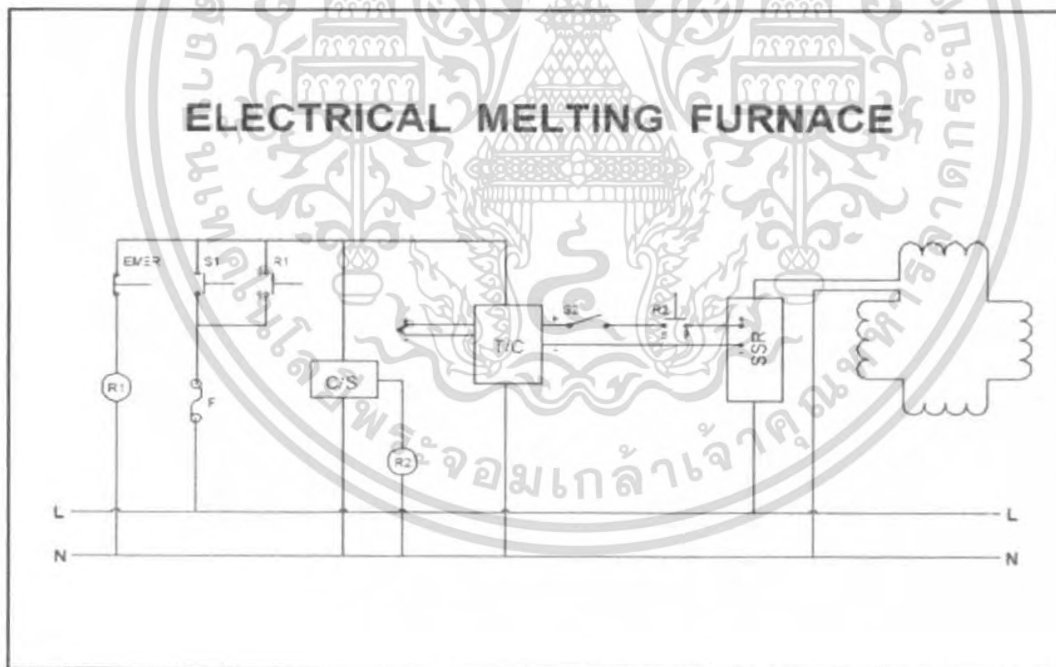


รูปที่ 3.11 อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 ชุด ไซคลิกสเตรียลย์



รูปที่ 3.13 แสดงวงจรการควบคุมการทำงานของเตาหลอมไฟฟ้า

ออกแบบวงจรควบคุมเป็นแบบ ON-OFF เพื่อให้วงจรมีการทำงานโดยกดสวิตช์ POWER กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านฟิวส์ไปยังตั้งควบคุมอุณหภูมิ T/C ตัวควบคุมอุณหภูมิทำการรับค่าอุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิล ที่ต่อมาจะภายในเบ้าหลอม มาแสดงที่ตัวควบคุมอุณหภูมิ จากนั้นเมื่อทำการเซตค่าแล้ว ไซคลิกสเตรียลย์ SSR จะทำงาน หน้าสัมผัสสลับเปิดเป็นปกติ ทำให้ไซคลิกสเตรียลย์ที่ต่อกับขดลวดความต้านทานมีแรงเคลื่อนไฟฟ้า ขดลวดความ
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาสำหรับนักเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นใบเซอร์เช็ช่นด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านทานจึงทำงาน เมื่อเทอร์โมคัปเปิลรับค่าอุณหภูมิภายในเข้าหอตอมเท่ากับที่เซตค่าไว้ ตัวควบคุมอุณหภูมิจะส่งสัญญาณให้โซลิดสเตทรีเลย์ทำการตัดวงจรจากปกติปิดเป็นปกติเปิด ทำให้ไม่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้า จะลดความต้านทานไม่ครบวงจรจึงไม่ทำงาน



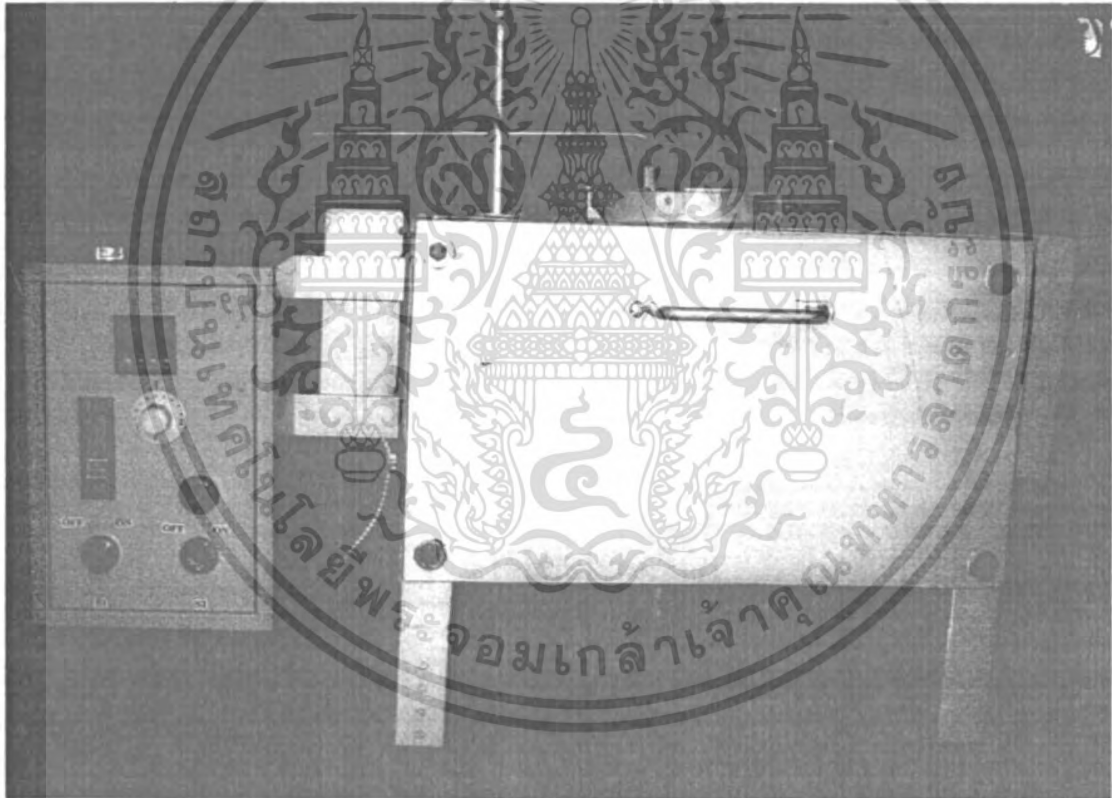
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

4.1 ผลการจัดสร้างเตาหลอมไฟฟ้าและติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม

ได้เตาหลอมไฟฟ้าที่มีความกว้าง 470 เซนติเมตร ยาว 470 เซนติเมตร สูง 420 เซนติเมตร ตัวเตาหลอม
ต่อเข้ากับตู้ควบคุมการทำงาน



รูปที่ 4.1 เตาหลอมไฟฟ้าและตู้ควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การคำนวณทฤษฎีการจัดขั้วรางเคาโฮมไฟฟ้า

4.2.1 ขนาดความโตเส้นผ่านศูนย์กลางของลวด

อุณหภูมิของผิวขดลวดความร้อน = 800 องศาเซลเซียส

$$\text{จากสมการ } d = \frac{1}{2.91} \sqrt{\left(\frac{p}{v}\right)^2 \left(\frac{pc_1}{p}\right)}$$

$$\begin{aligned} \text{คำนวณ} \quad d &= \frac{1}{2.91} \sqrt{\left(\frac{5,000}{220}\right)^2 \left(\frac{1.39 \times 10^6}{35}\right)} \\ &= 2 \text{ mm} \end{aligned}$$

เมื่อ

- P คือกำลังไฟฟ้า (วัตต์)
- V คือแรงเคลื่อนไฟฟ้า (โวลต์)
- p คือความต้านทานเฉพาะของขดลวดความต้านทาน
- C₁ คือสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิของขดลวดความต้านทาน
- p คือ Surface Load ของขดลวดความต้านทาน (วัตต์/ตร.ซม.)

4.2.2 การออกแบบวงจรชนิดขดเป็นคอยล์

จากสมการ (2.28)

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{V^2}{P} \\ &= \frac{(220)^2 \times 3}{(5,000)} = 9.68 \ \Omega \end{aligned}$$

คำนวณ

เมื่อ

R₁ = คือความต้านทานขดลวดความต้านทานขณะร้อน (Ω)

$$R_2 = \frac{R_1}{C_1}$$

คำนวณ

$$R_2 = \frac{9.68}{1.06} = 9.13$$

คือความต้านทานขณะเย็น (Ω)

เมื่อพิจารณาความต้านทานต่อความยาวลวดขนาด 2 มิลลิเมตร คือ 0.442 โอห์ม/เมตร

จากสมการ (2.30) ความยาวของขดลวดที่ติดตั้ง = 20.75 เมตร

จาก Khanthal Handbook กำหนดอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางขดลวดภายนอกและภายใน

$$\frac{D}{d} = 6$$

จากสมการ (2.31)

คำนวณ

$$\begin{aligned} D &= 6 \times 2 \\ &= 12 \text{ mm} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 จำนวนรอบของขดลวด

จากสมการ (2.32)

$$W = \frac{1,000L}{\pi(D-d)}$$

คำนวณ

$$W = \frac{1,000 \cdot 20.75}{\pi(12 \cdot 2)}$$

$$W = 661 \text{ รอบ}$$

W = จำนวนรอบของขดลวด

4.2.4 ความยาวของขดลวด (Lw)

จากสมการ

$$L_w = Wd$$

คำนวณ

$$L_w = 661 \cdot 2$$

$$= 1,322 \text{ mm}$$

Lw = ความยาวของขดลวด

4.2.5 ความยาวของขดลวดเมื่อยึดตามระยะพิทช์

จาก Khanthal handbook กำหนด Relative pitch เป็น



$$1322 \cdot 2.5 = 3,305 \text{ mm}$$

จำนวนขดลวดที่ต้องใช้ 16 ขด

แต่ละขดยาว $\frac{3,305}{16} = 207$ มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.6 การคำนวณความร้อนโดยใช้หลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์ คำนวณหาความร้อนสูญเสีย (Heat loss)

ผนังที่ใช้มี 2 ส่วน คือชั้นในจะใช้อิฐทนไฟ มีค่า $k = 0.38$ หนา 76 mm ส่วนผนังด้านนอกใช้ฉนวน

แคลเซียมบอร์ดมีค่า $k = 0.15$ หนา 25 mm

กำหนด T_1 ด้านในเตา = 800 °C ส่วน T_2 ด้านนอกเตา = 50 °C

$$\text{จาก } Q = \frac{kA(T_2 - T_1)}{L}$$

$$\text{จะได้ } Q = \frac{0.38 A(800 - T_2)}{0.076} \quad \text{_____ 1}$$

$$Q = \frac{0.15 A(T_2 - 50)}{0.025} \quad \text{_____ 2}$$

ให้สมการ 1 = 2 จะได้

$$Q = \frac{0.38 A(800 - T_2)}{0.076} = \frac{0.15 A(T_2 - 50)}{0.025}$$

$$T_2 = 481 \text{ } ^\circ\text{C}$$

กำหนด $A =$ พื้นที่ผนังเตาด้านนอก

$$= 270 \times 470 \text{ mm}$$

จะได้

$$Q = \frac{[0.38 \times 0.27 \times 0.47 \times (800 - 481)]}{0.076}$$

$$= 202,405 \text{ Kcal/h}$$

ใช้เวลาการหลอม 30 นาที ดังนั้น $Q = 0.5 \times 202,405$

$$Q = 101.20 \text{ Kcal}$$

$$P_{\text{loss}} = \frac{101.20}{(0.24 \times 60 \times 30)}$$

$$= 0.234 \text{ kW}$$

ผนังมีทั้งหมด 6 ด้าน ดังนั้น $P_{\text{loss}} = 0.234 \times 6$

$$= 1.406 \text{ kW}$$

4.3 การทดลองเพื่อทดสอบการทำงานของเตาหลอมไฟฟ้า

4.3.1 ชื่อการทดลอง

การทดลองเพื่อทดสอบการทำงานของเตาหลอมไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 250, 300, 400 และ 500 องศา

เซลเซียส

4.3.2 วัตถุประสงค์การทดลอง

- 1 ทดสอบการให้ความร้อนของเตาหลอมไฟฟ้า
- 2 ทดสอบการทำงานของวงจรควบคุม
- 3 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเมื่อเวลาเปลี่ยนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 อุปกรณ์การทดลอง

- 1 เคาหลอมไฟฟ้า
- 2 สุ่มควบคุม

4.3.4 วิธีทำการทดลอง

1. เปิดสวิทช์อุปกรณ์ควบคุมการทำงานของเคาหลอม
2. ตั้งค่าตัวควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิห้อง 29 องศาเซลเซียส
3. เมื่ออุณหภูมิภายในเคาหลอมที่ ทำการปรับค่าอุณหภูมิที่ต้องการ
4. เก็บค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลาที่เปลี่ยนไปทุก 2 นาที จากเทอร์โมคัปเปิล
5. เมื่อเราให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ ให้เก็บค่าจนกว่าอุณหภูมิจะคงที่

4.3.5 ผลการทดลอง

การทดลองส่งผ่านความร้อน โดยให้ความร้อนจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิที่กำหนดและจับเวลาในการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4 ใ

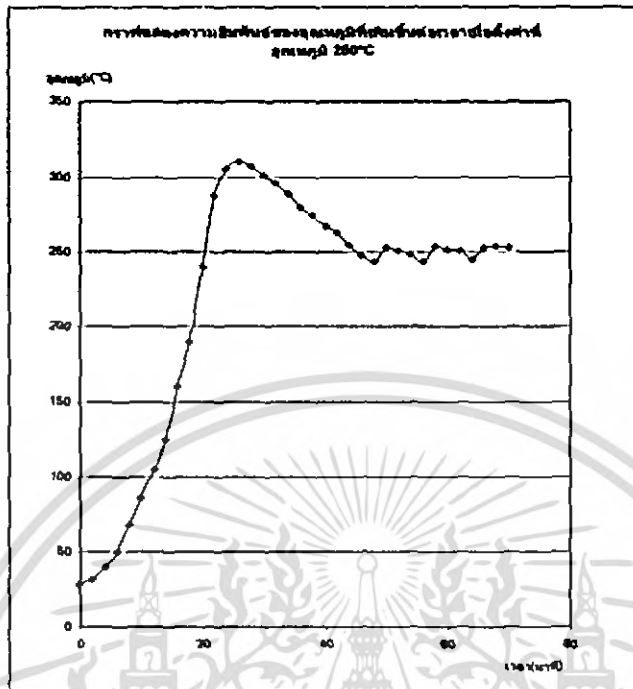


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

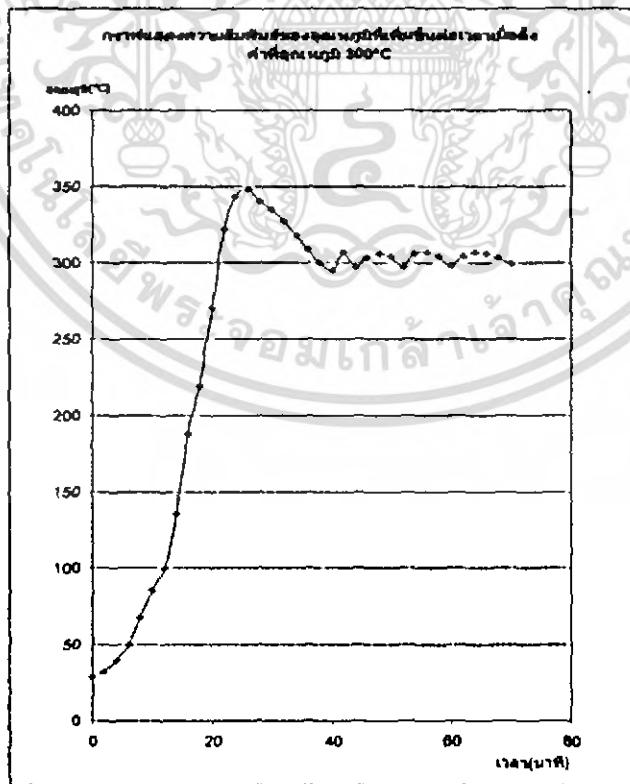
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าที่อุณหภูมิ 250, 300, 400, 500 องศาเซลเซียส

ตั้งค่าที่อุณหภูมิ 250°C		ตั้งค่าที่อุณหภูมิ 300°C		ตั้งค่าที่อุณหภูมิ 400°C		ตั้งค่าที่อุณหภูมิ 500°C	
เวลา(นาท)	T(°C)	เวลา(นาท)	T(°C)	เวลา(นาท)	T(°C)	เวลา(นาท)	T(°C)
0	29	0	29	0	29	0	29
2	32	2	32	2	32	2	30
4	40	4	40	4	40	4	35
6	50	6	50	6	50	6	42
8	68	8	68	8	68	8	60
10	86	10	86	10	86	10	80
12	105	12	100	12	100	12	100
14	125	14	136	14	136	14	135
16	160	16	188	16	188	16	208
18	190	18	219	18	219	18	276
20	240	20	270	20	270	20	300
22	288	22	322	22	300	22	310
24	306	24	343	24	326	24	309
26	310	26	348	26	352	26	320
28	307	28	340	28	378	28	346
30	301	30	335	30	404	30	380
32	296	32	327	32	426	32	410
34	289	34	318	34	428	34	448
36	280	36	309	36	416	36	482
38	275	38	300	38	406	38	509
40	267	40	295	40	395	40	498
42	263	42	307	42	403	42	500
44	255	44	297	44	401	44	502
46	248	46	303	46	398	46	498
48	244	48	306	48	404	48	502
50	253	50	304	50	400	50	494
52	251	52	297	52	395	52	504
54	249	54	306	54	405	54	494
56	244	56	307	56	397	56	504
58	254	58	304	58	400	58	501
60	252	60	298	60	403	60	500
62	251	62	304	62	396	62	504
64	245	64	307	64	402	64	496
66	253	66	306	66	398	66	504
68	254	68	303	68	400	68	496
70	253	70	299	70	404	70	503

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

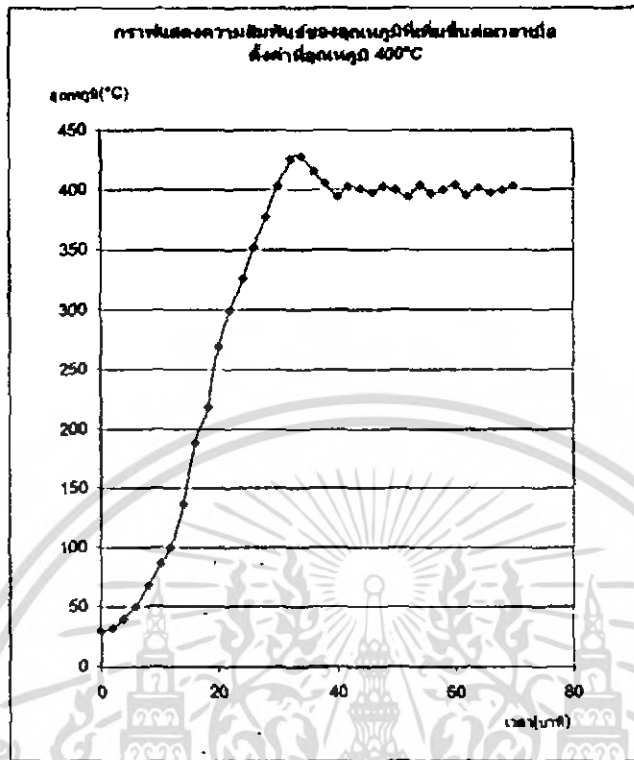


รูปที่ 4 3 ผลการทดลองความชื้นแห้งของอุณหภูมิต่างๆที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

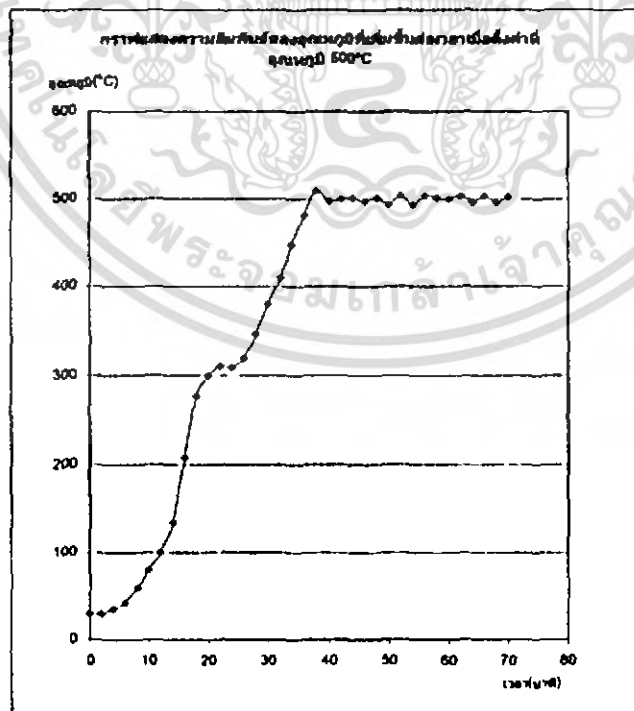


รูปที่ 4 4 ผลการทดลองความชื้นแห้งของอุณหภูมิต่างๆที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ผลการทดลองความถี่พัลส์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.6 ผลการทดลองความถี่พัลส์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 สรุปผลการทดลอง

กราฟที่ 1 ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส จากการทดลองจะเห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 60 นาที ค่าของอุณหภูมิจะเริ่มมีความคงที่ โดยมีค่าผิดพลาดไม่เกิน ± 5 องศาเซลเซียส จากอุณหภูมิที่ได้ตั้งไว้ 250 องศาเซลเซียส

กราฟที่ 2. ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส จากการทดลองจะเห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 50 นาที ค่าของอุณหภูมิจะเริ่มมีความคงที่ โดยมีค่าผิดพลาดไม่เกิน ± 5 องศาเซลเซียส จากอุณหภูมิที่ได้ตั้งไว้ 300 องศาเซลเซียส

กราฟที่ 3. ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส จากการทดลองจะเห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 46 นาที ค่าของอุณหภูมิจะเริ่มมีความคงที่ โดยมีค่าผิดพลาดไม่เกิน ± 5 องศาเซลเซียส จากอุณหภูมิที่ได้ตั้งไว้ 400 องศาเซลเซียส

กราฟที่ 4. ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จากการทดลองจะเห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 40 นาที ค่าของอุณหภูมิจะเริ่มมีความคงที่ โดยมีค่าผิดพลาดไม่เกิน ± 5 องศาเซลเซียส จากอุณหภูมิที่ได้ตั้งไว้ 500 องศาเซลเซียส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการดำเนินงาน

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

เตาหลอมไฟฟ้าได้ทำการออกแบบและจัดสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาและทดลอง โดยใช้หลักการให้ความร้อนด้วยขดลวดความต้านทานได้ผลดังนี้ คือ เตาหลอมไฟฟ้าให้ความร้อนสูงสุด 800 องศาเซลเซียส ใช้ไฟฟ้า 1 เฟส แรงเคลื่อนไฟฟ้า 220 โวลต์ กำลังไฟฟ้า 5 กิโลวัตต์ ควบคุมอุณหภูมิโดย เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ภายในประกอบไปด้วยขดลวดความต้านทาน 4 ชุด จำนวน 16 ชุด ฉนวนกันความร้อนทำจากอิฐฉนวนทนความร้อนและแคลเซียมโบรไซด์ตัวเตาต่อเข้ากับตู้ควบคุมภายในมีอุปกรณ์ทางไฟฟ้า และชุดควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัล

5.2 วิจารณ์การดำเนินงาน

ในการทดลองให้ความร้อนของเตาหลอมไฟฟ้า ความร้อนที่ได้มีอุณหภูมิสูงถึง 850 องศาเซลเซียส เนื่องจากขดลวดความต้านทานยังเก็บความร้อนไว้ในตัวมันเองอยู่ และจะลดลงที่อุณหภูมิที่กำหนดคือ 800 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิที่สูงเกินกว่ากำหนดนั้น ไม่ส่งผลเสียหาเพราะเนื่องจากวัดอุณหภูมิและอุปกรณ์ที่ถือมาใช้สามารถทนอุณหภูมิมากกว่า 1,000 องศาเซลเซียส และในการทดลองอุปกรณ์ทั้งสองส่วน ได้แก่ 1) เตาหลอม และ 2) อุปกรณ์ควบคุม สามารถทำงานร่วมกันได้ตามที่ออกแบบไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



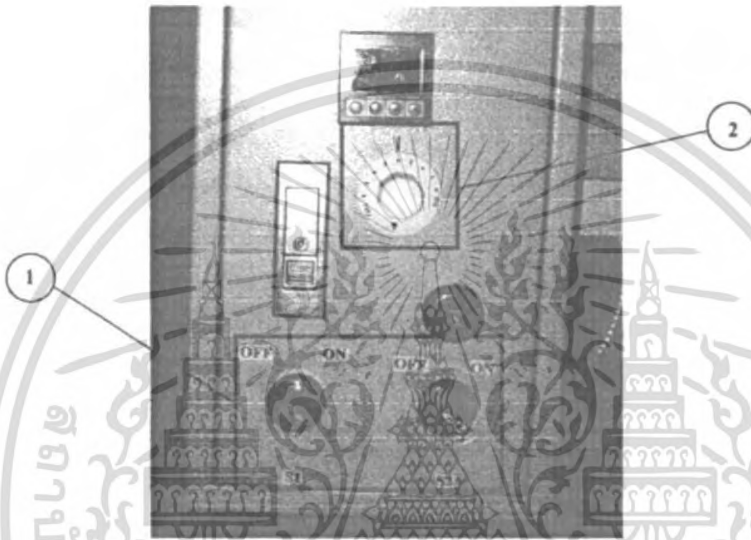
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คู่มือการใช้งานเตาหมอมไฟฟ้า



ขั้นตอนการใช้งาน

1. ปรับสวิทช์ s1 และ s2 ไปที่ตำแหน่ง ON
2. ปรับระดับการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ Timer stud ตามการใช้งาน คือถ้าหมุนปรับสวิทช์ไปที่ค่ามากจะทำให้ขดลวดร้อนเร็วขึ้น แต่ ถ้าถ้าหมุนปรับสวิทช์ไปที่ค่าน้อยจะทำให้ขดลวดร้อนช้า



3. ปรับอุณหภูมิตามการใช้งาน



โดยการปรับอุณหภูมิให้เพิ่มครั้งละ 150 – 200 องศาเซลเซียส กดปุ่ม  เพื่อเพิ่มอุณหภูมิ และกดปุ่ม  เพื่อลดอุณหภูมิ ปรับพักไว้ประมาณ 5-10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4 ปิดเครื่องเมื่อเลิกใช้งาน โดยปิดสวิทช์ s1 และ s2 ไปที่ตำแหน่ง OFF
- 5 เมื่อต้องการปิดเครื่องฉุกเฉิน ให้กดสวิทช์ Emergency stop บนตู้ควบคุม

ข้อควรระวัง

อย่าให้น้ำโลหะเย็นตัวในเบ้าหลอมเพราะอาจทำให้เบ้าหลอมแตก และไม่ควรปรับเพิ่มอุณหภูมิให้สูงทันที เพราะจะทำให้ขดลวดความต้านทานขาด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายชื่อบริษัทจัดซื้อวัสดุ

บริษัทเจริญสุขอิฐหินไฟจำกัด ที่อยู่ 303/1 ซอยเพชรเกษม 45 แขวงบางแค เขตบางแค กรุงเทพฯ 10160
โทรศัพท์ 0-2413-1514, 0-2413-3300, 0-2455-2577, 0-2455-25900-2413-3300

บริษัท ออมรอนอิเล็กทรอนิกส์ จำกัด ที่อยู่ 555 ชั้น 20 อาคารรสาทามวอร์ แขวงจตุจักร เขตจตุจักร กรุงเทพฯ
10900 โทรศัพท์ 662 942 6700

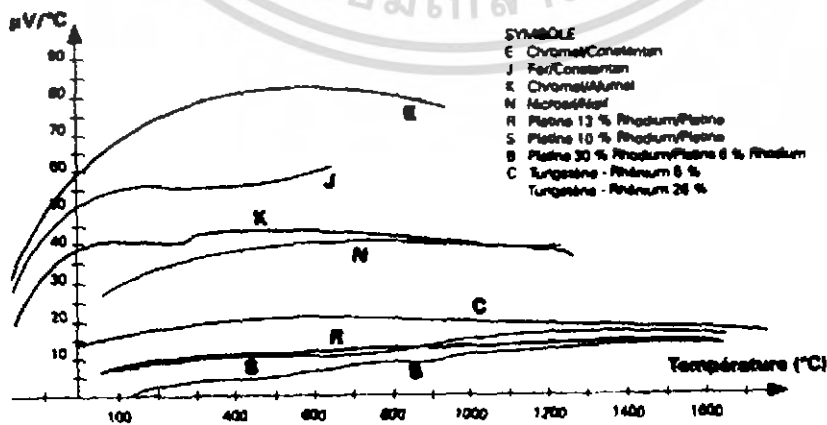
บริษัท ไทยเบอร์เนอร์ จำกัด ที่อยู่ 55/5 หมู่ 7 ถ. เดชบกลองสี่วา ค.นาสี อ.เมือง จ.สมุทรสาคร 74000 โทรศัพท์
(034) 466190-5 โทรสาร (034) 466189



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

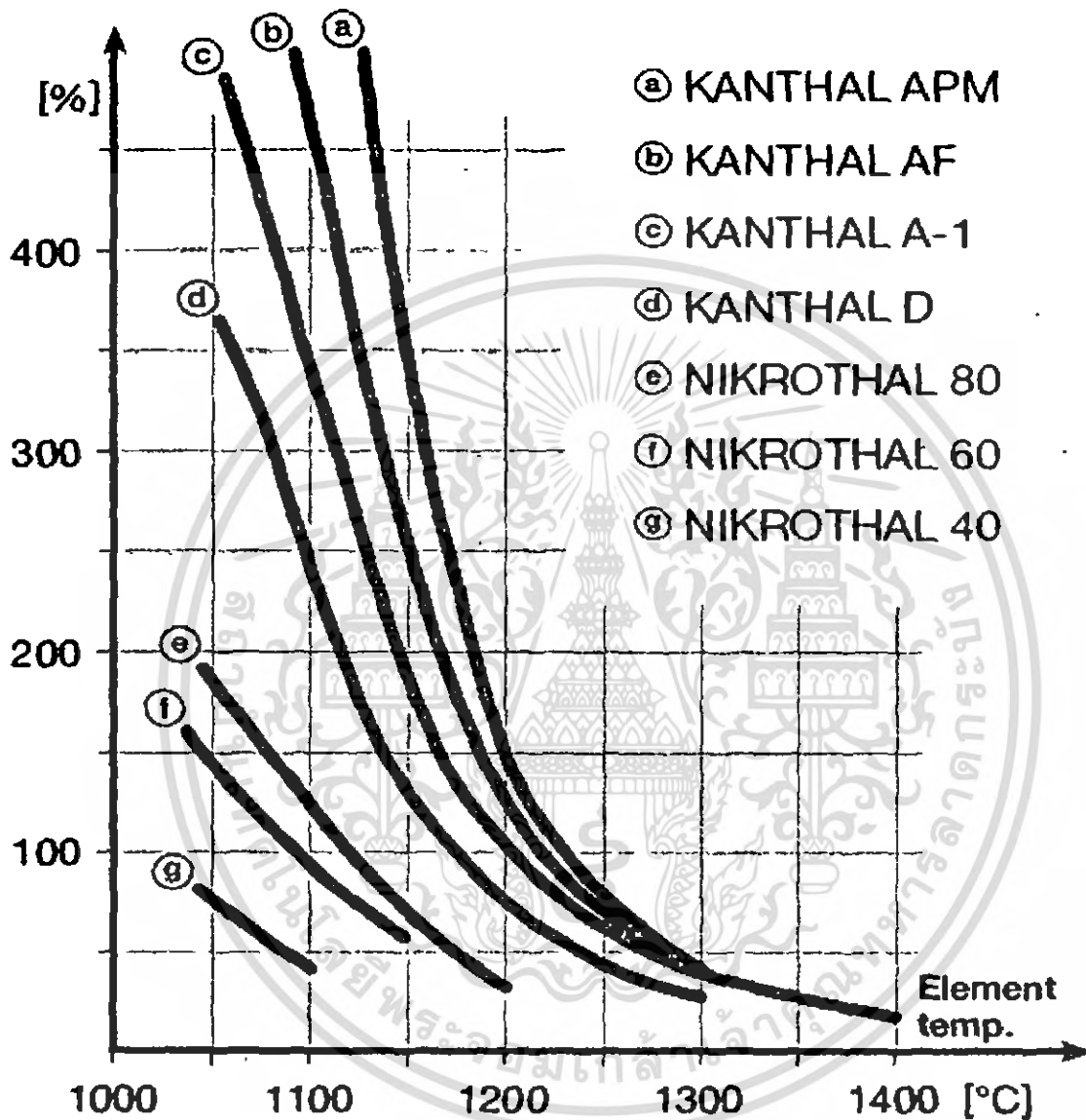
ตาราง ผ.1 แสดงการเลือกใช้เทอร์โมคัปเปิล

TC	Min Temp C	Max Temp C	Min Temp mV	Max Temp mV	Min Temp uV/C	Max Temp uV/C
J	-210	-100	-8	-4	19	41
	-100	150	-8	8	41	55
	150	1200	+8	69	55	57
K	-200	-50	-6	-2	15	35
	-50	200	-2	8	35	40
	200	1360	+8	54	40	33
T	-200	-100	-6	-3	15	28
	-100	175	-3	8	28	50
	175	400	8	20	50	61
E	-200	-60	-8	3	25	50
	-60	125	3	8	50	70
	125	1000	8	76	70	75
R	-50	70	-1	1	3	6
	70	800	1	8	6	12
	800	1768	8	21	12	12
S	-50	150	-1	1	4	8
	150	860	1	8	8	11
	860	1768	8	19	11	10
B	250	600	1	2	3	6
	600	1300	2	8	6	10
	1300	1820	8	14	10	12
N	-200	-110	-4	-2	10	20
	-110	260	-2	8	20	34
	260	1300	8	47	34	36



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟ ผ 1 แสดงอายุการใช้งานขดลวดความต้านทานชนิดต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Physical and Mechanical Properties

KANTHAL and NIKROTHAL alloys are generally available in wire or strip form. Physical and mechanical properties of the alloys are listed in Table 2.

Table 2. KANTHAL and NIKROTHAL, Wire and Strip.

	KANTHAL APM	KANTHAL A-1	KANTHAL A-1	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	80	35
Resistivity at 20°C, Ωmm ² /m ¹	1.45	1.45	1.39	1.35	1.09	1.18	1.11	1.04
at 68°F, Ω/cmil	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	0.298	0.298	0.285
Coefficient of thermal expansion, K ⁻¹								
20-750°C, 68-1380°F	14.10*	14.10*	14.10*	14.10*	17.10*	16.10*	16.10*	18.10*
20-1000°C, 68-1838°F	15.10*	15.10*	15.10*	15.10*	18.10*	17.10*	17.10*	19.10*
Thermal conductivity at 20°C								
W m ⁻¹ K ⁻¹	13	13	13	13	15	13	13	13
68°F, Btu in ft ⁻² h ⁻¹ °F ⁻¹	90	90	90	90	104	90	90	90
Specific heat capacity								
KJ kg ⁻¹ K ⁻¹ , 20°C	0.48	0.46	0.46	0.46	0.48	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	1600	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 600°C, Nmm ⁻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	6	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	260	145	215	145	580	580	580	580
Magnetic properties	Magnetic (Curie point 600°C 1100°F)				Non		Slightly Non	
Emissivity, fully oxidized condition	0.70	0.70	0.70	0.70	0.88	0.88	0.88	0.86

* 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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KANTHAL AF

Wire and strip. Standard stock items.

Resistivity $1.39 \Omega \text{ mm}^2 \text{ m}^{-1}$. Density 7.15 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	1300	1400
C_t	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 Ω/m 20 $^{\circ}\text{C}$	Weight g/m	cm^2/Ω 20 $^{\circ}\text{C}$	Strip*) WxT mm	Resistance Ω/m 20 $^{\circ}\text{C}$	Weight g/m	cm^2/Ω 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	88	1934
1.4	0.903	11.0	48.7	12.0x1.2	0.0985	103	2735
1.5	0.787	12.6	59.9	15.0x1.2	0.0772	129	4198
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	8281
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 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ผ.4 แสดงการเลือกใช้อุ่นทนไฟ

Key Specifications / Special Features

	MORTAR 1			Mortar for Insulating Bricks			MORTAR 2		
	HM-30	HM-32	HM-34	AM-30W	AM-43W	PM-80	HM-43	HM-36	HM-38
Physical Data (Typical)									
Refractoriness, SK(Seger Cone)	30	32	34	29	32	38	34	36	37
Approximate Amount Required per 1000,9"									
Equivalent (Thinly Troweller Joints),kgs	140-180	140-180	160-200	180-230	160-200	180-270	160-200	170-210	165-210
Approximate Amount of Water for Trowelling									
Consistency (Dry Only),Litres/50kgs	20-25	20-25	20-25				20-25	20-25	20-25
Modulus of Rupture at joints.After Drying at 110° C.,kg/cm ²				15-30	15-30	15-30			
Refractoriness Test									
Mortar does not squeeze or flow from joints									
When heated at, °C	1400	1400	1600				1600	1600	1600
Chemical Analysis, %Approx.									
Silica (SiO ₂)	63.8	58.7	51.2	54.1	47.9	11.4	50.0	31.4	27.2
Alumina (Al ₂ O ₃)	27.6	32.1	40.3	35.2	46.4	80.5	43.6	62.5	70.0
Iron Oxide (Fe ₂ O ₃)	2.1	2.0	2.0	2.0	1.9	1.5	2.0	1.9	1.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ผ.5 แสดงการเลือกใช้อิฐทนไฟ

Key Specifications / Special Features

	INSULATING FIREBRICK					WHITE BRICK
	PC-2	B-1	B-2	C-1	C-2	
Physical Data (Typical)						
Maximum Service Temperature, °C	1400	900	1000	1300	1400	
Refractoriness, SK(Seger Cone)						26-27
Bulk Density, gm/cc	1.35-1.45	0.65-0.70	0.75-0.80	0.75-0.80	0.85-0.90	2.05-2.10
Apparent Porosity,%	45-50	70-75	70-75	70-72	65-70	14-20
Water absorption,%						8-10
Cold Crushing Strength, kg/cm ²	110-130	10-15	20-30	30-40	40-50	250-400
Modulus of Rupture, kg/cm ²	20.0-30.0	10-12	10-12	15-20	20-25	40-70
Thermal Conductivity, Kcal/hr.m °C at 350 °C		0.11	0.18	0.30	0.38	
Chemical Analysis, % Approx.						
Silica (SiO ₂)	36.72	55.2	51.3	50.3	34.6	69.0
Alumina (Al ₂ O ₃)	236.15	36.5	39.1	42.8	60.2	21.0
Iron Oxide (Fe ₂ O ₃)	0.0080	3.3	3.0	2.7	1.4	1.3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ม.6 แสดงคุณสมบัติของแคลเซียมบอร์ด

	Test method	Units	SELCAL 900	SELCAL 1000	SELCAL 1100	MICROCAL® 1100
Classification temperature		°C	900	1000	1100	1100
Apparent density (± 10%)	EN 1094-4	kg/m³	275	250	250	250
Approx. open Porosity	EN 1094-4	%	~ 90	~ 90	~ 90	~ 90
Compressive strength 10% deformation	EN 1094-6	MPa	2,0	1,5	1,6	1,6
Compressive strength after 12 h annealing	EN 1094-6	MPa	1,0 900 °C	0,7 1000 °C	0,7 1050 °C	0,9 1000 °C
Shrinkage after 12 h annealing	EN 1094-6	%	0,8 900 °C	1,5 1000 °C	1,5 1050 °C	0,9 1000 °C
Bonding strength	ISO 8143	MPa	1,2	0,7	0,8	0,8
Thermal conductivity 400 °C 600 °C 800 °C	EN 853-1416	W/mK	0,10 0,12 0,15	0,11 0,12 0,15	0,11 0,12 0,15	0,08 0,10 0,12
Specific heat capacity		kJ/kg	0,8...1,2	0,8...1,2	0,8...1,2	0,8...1,2
Chemical analysis CaO SiO₂ LOI	EN 853-2	%	42 43 11	42 44 11	43 45 10	33 39 11

Test results represent typical average values obtained in accordance with accepted test methods, and are subject to normal manufacturing fluctuations. Thus, no guarantee for the above properties can be given. Technical alterations are reserved.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ผ.7 แสดงขนาดของเบ้าหลอม

www.thaiburner.com

TB THAIBURNER 89. CO., LTD
02-8134958

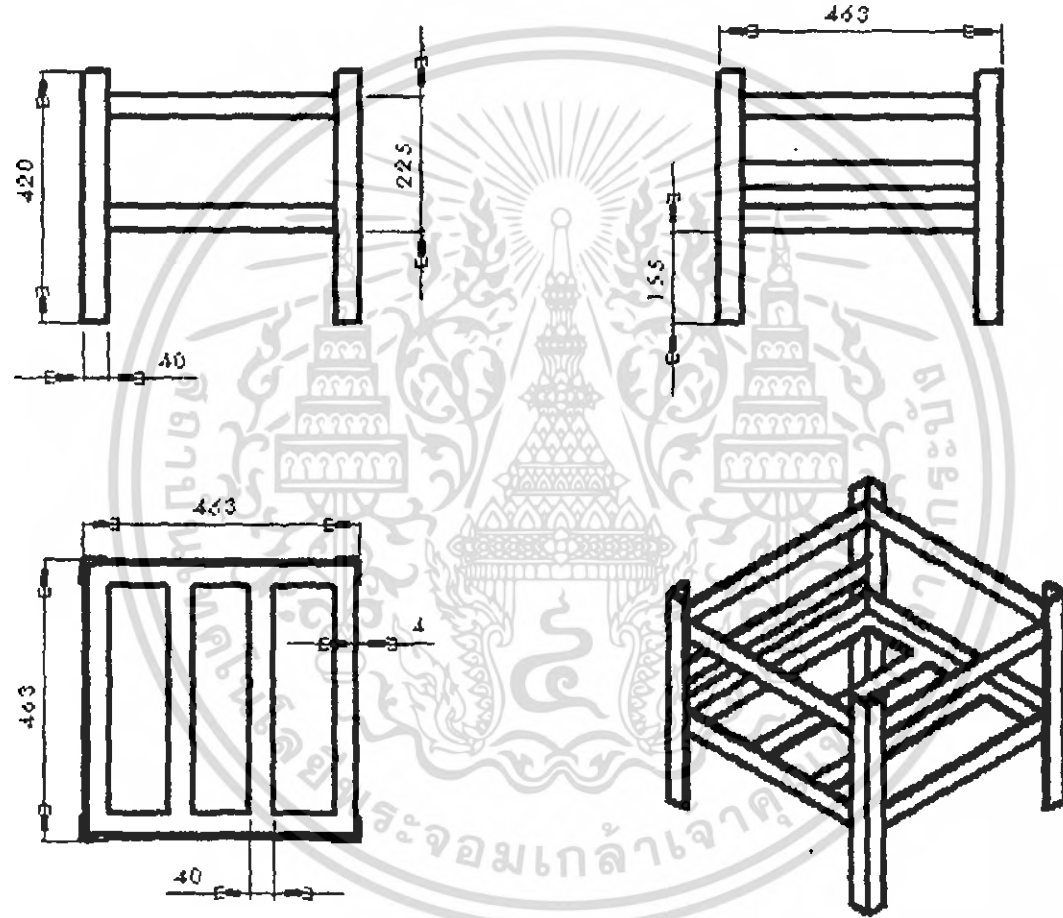
A/AX/AXO					TP/TPX/TPXO				
No order	H	D	d		No.	ca.	H	D	d
ca. kg Cu	mm	mm	mm	AX	TPX	kg Cu	mm	mm	mm
6/0	29	25	15		TP 903	75	725	260	190
5/0	35	32	25		TP 901	120	760	285	235
4/0	51	41	29		TP 904	200	815	345	240
3/0	54	48	32		TP 8	300	875	420	285
2/0	57	51	35		TP 14	500	1015	420	255
0	70	60	41		TP 8	400	800	480	295
1/2	80	70	43		TP 10	540	940	440	295
1	90	90	55		TP 388	600	760	540	360
1 1/2	100	95	60		TP 15	950	970	540	360
2	110	102	65		TP 833	1100	1130	540	330
3	130	110	70		TP 830	1260	1190	540	360
4	140	115	75		TP 960	1700	1230	660	365
5	150	125	85						
6	165	130	90						
7	175	140	95						
8	180	155	110						
10	200	160	115						
12	210	170	120						
14	220	175	120						
15	230	180	120						
16	230	185	125						
18	240	195	130						
20	250	200	130						
25	290	220	150						
30	300	230	160						
40	310	260	190						
50	310	275	195						
60	345	285	200						
70	360	295	205						
80	375	305	215						
90	380	315	225						
100	400	325	230						
120	410	345	245						
130	430	350	250						
150	440	370	260						
175	480	380	270						
200	500	400	285						
250	510	420	300						
300	520	440	315						
350	590	475	330						
400	600	500	345						
500	650	510	360						
600	660	530	375						
800	800	560	420						
1000	820	635	470						
1100	890	635	420						
1500	900	780	435						
1600	1000	780	435						
1700	1060	880	450						
1800	1300	880	450						
1900	1020	790	430						
2000	1250	950	550						

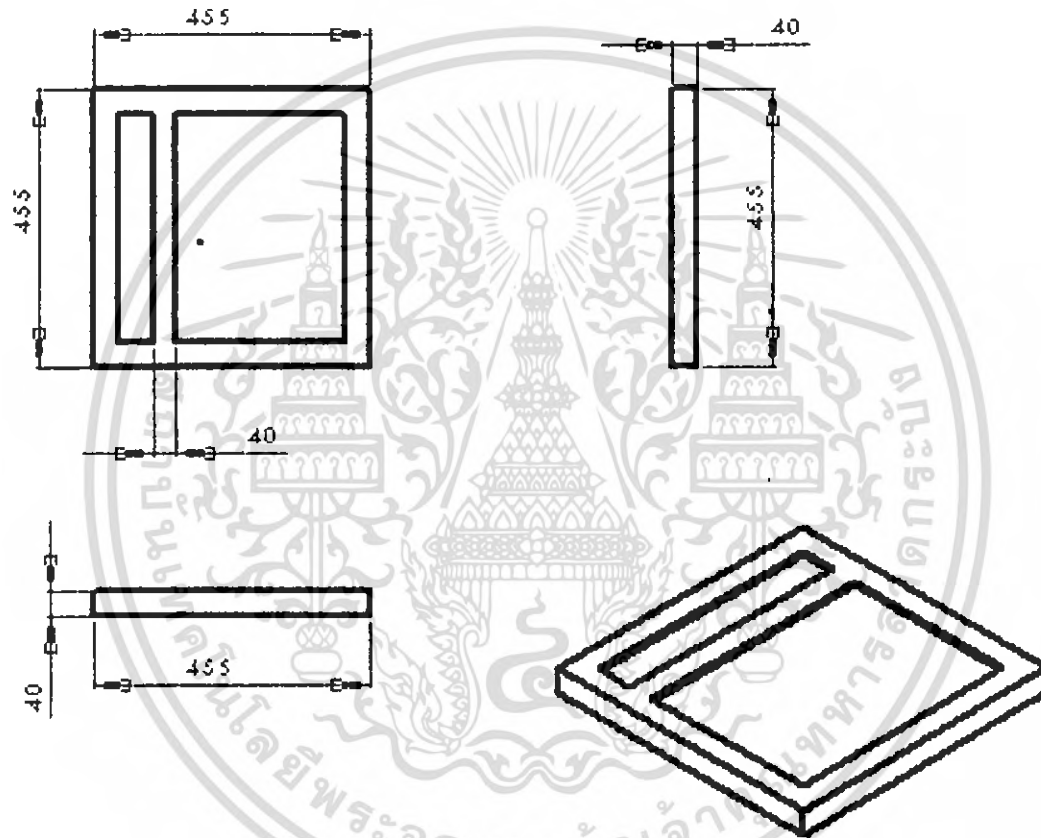
TP/TPX/TPXO (with long spout)					KX/KFX/KFXO				
No.	Cap. ca.	H	D	d	No.	H	D	d	L
TPX	kg Cu	mm	mm	mm	KFX	mm	mm	mm	mm
TP 173 G	120	490	325	240	75	270	350	260	
TP 173	120	490	300	235	95	270	350	260	
TP 194	500	600	350	260	120	470	440	295	
TP 400 G	225	615	350	260	120	990	485	320	
TP 723 G	270	535	350	260	120	1090	485	320	
TP 600	500	805	355	260	130	1130	590	370	
TP 643	300	675	420	255	155	1130	590	370	
TP 962	430	800	435	295	135	1130	590	370	
TP 89	500	710	515	375	135	1130	590	370	
TP 12	500	940	440	295	150	1130	590	370	
TP 16	900	970	540	390	160	1130	590	370	

K/KX/KXO					C/CX				
No order	H	D	d		No order	H	D	d	
ca. kg Cu	mm	mm	mm	KX	ca. kg Cu	mm	mm	mm	CX
100	520	290	200		50	370	250	180	
150	600	320	240		60	400	255	190	
200	620	350	250		80	440	275	205	
250	650	370	260		100	480	295	210	
300	720	445	280		120	520	310	230	
350	750	450	290		150	550	330	240	
400	800	460	320		200	600	340	250	
500	840	465	320		250	620	345	250	
600	940	485	320		300	650	360	260	

SC/SCX				
No	H	D	d	
SCX	mm	mm	mm	
50	245	190	140	
60	320	205	150	
80	355	225	160	
100	375	235	185	
130	415	250	190	
150	440	275	195	
200	475	290	210	
250	535	300	240	
300	560	320	240	
600	695	420	285	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





DATE	โครงการ
REVISION	
DESIGNER	
CHECKER	