สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เตาหลอมอลูมิเนียมไฟฟ้า

The Electrical Aluminium Melting Furnace

สุปรียา สุขพันธุ์ถาวร

Miss Supreeya Sukpanthavorn

สุรัสวดี จินาพันธ์

Miss Suratsawadee Jinaphan

เอกพจน์ สมสกุลถาวร

Mr. Aggapot Somsakunthaworn

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 45809
วัน, เดือน, ปี 18 ก.พ. 2546

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

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เตาหลอมอลูมิเนียมไฟฟ้า
	The Electrical Aluminium Melting Furnace
นักศึกษา	นางสาวสุปรียา สุขพันธุ์ถาวร
รหัสนักศึกษา	41014785
นักศึกษา	นางสาวสุรัสวดี จินาพันธ์
รหัสนักศึกษา	41014790
นักศึกษา	นายเอกพจน์ สมสกุลถาวร
รหัสนักศึกษา	41014815
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
ปีการศึกษา	2544

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์

(ผศ.พรศักดิ์ อรรถวานิช)

(อ. พลชัย โชติปรายนกุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เตาหลอมอลูมิเนียมไฟฟ้า
นักศึกษา	นางสาวสุปรียา สุขพันธุ์ถาวร
นักศึกษา	นางสาวสุรัสวดี จินาพันธ์
นักศึกษา	นายเอกพจน์ สมสกุลถาวร
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ
	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา	2544
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	ผศ.พรศักดิ์ อรรถวานิช
	อ. พลชัย โชติปรายนกุล

บทคัดย่อ

โครงงานเตาหลอมอลูมิเนียมขนาด 10 กิโลกรัมที่จัดทำขึ้นตามความต้องการของภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เพื่อใช้ประโยชน์ในการศึกษาในวิชางานหล่อ ได้แก่ วิชากรรมวิธีการผลิต, วิชาวัสดุวิศวกรรม, วิชาโลหะวิทยา และ วิชาการทดลองทางวิศวกรรม โดยใช้ขดลวดต้านทานเป็นตัวเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนเพื่อถ่ายเทให้กับเบ้าหลอมโดยขดลวดสามารถทำอุณหภูมิได้ถึง1000° c โดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากขดลวดต้านทานซึ่งมี 24 เส้น ใช้ไฟ 3 เฟส 220 โวลต์ ต่อแบบสตาร์ ระบบควบคุมอุณหภูมิใช้ชุดควบคุมอุณหภูมิ(Temperature Control) 1 ตัว ทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิกับเทอร์โมคัปเปิล Type k โดยกรรมวิธีการเทจะใช้แม่แรงยกเบ้าหลอมจากด้านล่างของเตาหลอมให้ปากเบ้าหลอมสูงขึ้นมาจากตัวเตาหลอมเพื่อใช้คีมคีบเบ้าหลอมออกมาทำการเทเข้าแบบ โดยใช้ฉนวนกันความร้อน 2 ชนิดตามลักษณะการใช้งาน ชนิดแรกจะเป็นอิฐทนไฟ โดยเซาะอิฐเป็นร่องเพื่อใส่ขดลวดความร้อนและ ชนิดที่สองเป็นฉนวนความร้อนแบบเซรามิคไฟเบอร์ (Ceramic fiber) ที่มีน้ำหนักเบาสำหรับเตาหลอมที่สร้างขึ้นมีความสามารถหลอมอลูมิเนียมได้10กิโลกรัมโดย การหลอมเบ้าแรกจะใช้เวลาประมาณ 90 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	The Electrical Aluminium Melting Furnace
Student	Miss Supreeya Sukpanthavorn
	Miss Suratsawadee Jinaphan
	Mr. Aggapot Somsakunthaworn
Degree	Bachelor of Engineering in Industrial Engineering
	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year	2001
Advisor	Assistant Professor Pornsak Attavanich
	Pholchai Chotiprayanakul

ABSTRACT

Electrical aluminium melting furnace, the project by the students in Faculty of Industrial Engineering of KMITL for studying the subject of foundry which is a part of Manufacturing Process, Material science, Metallurgy and Work Shop. This furnace generates and transfers heat to the crucible by resistance coils making the temperature to 1000 $^{\circ}$ c. We jack up the crucible and grip it out of the furnace to pour the melted aluminium.

We used two kinds of insulator. The first is insulation bricks gouged for putting the heater in. Another one is ceramic fiber, which can decrease more weight of the furnace than using whole insulation bricks. This furnace is competent to melt 10 kilograms aluminium. First melting spend 90 minutes by the heat from 24 resistance coils, 3 phases, 4 lines star connected. The thermal controlling system used the temperature control and thermocouple type k.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การทำโครงงานนี้ คณะผู้ดำเนินโครงงานขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ พรศักดิ์ อรรถวานิช , อาจารย์ พลชัย โชติปรายนกุล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานนี้ อาจารย์ เอกพจน์ ตันตราภิวัฒน์ อาจารย์ อุดม จันทร์จรัสสุข ซึ่งได้ให้คำแนะนำมากมายในการดำเนินโครงงาน รวมทั้งการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่มีประโยชน์ต่อโครงงานนี้ คณะผู้ดำเนินโครงงานรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอขอบพระคุณอย่างสูงในความกรุณาของท่านอาจารย์ทุกๆ ท่านไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

นางสาวสุปรียา สุขพันธุ์ถาวร
นางสาวสุรัสวดี จินาพันธ์
นายเอกพจน์ สมสกุลถาวร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II

กิตติกรรมประกาศ III

สารบัญ IV

สารบัญตาราง VII

สารบัญภาพ XI

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาของโครงการ 1

1.2 แนวคิด 1

1.3 วัตถุประสงค์ 1

1.4 ขอบเขตของโครงงาน 2

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำโครงงาน 2

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในการออกแบบสร้างเตาหลอม

2.1 หลักการทำงานของเตาหลอม 3

2.2 การถ่ายเทความร้อน 3

2.3 เทคนิคการหลอมโลหะอะลูมิเนียม 7

2.4 คุณสมบัติทั่วไปของโลหะอะลูมิเนียม 12

2.5 วัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวน 14

บทที่ 3 การออกแบบและการดำเนินงาน

3.1 แผนการดำเนินงาน 17

3.2 วัตถุทนไฟ 17

3.3 ฉนวนกันความร้อน 17

3.4 การคำนวณหากำลังไฟฟ้าที่ใช้ 18

3.5 การออกแบบขดลวดความต้านทาน 20

3.6 การออกแบบตัวเตาหลอม 26

3.7 การออกแบบวงจรไฟฟ้า 26

3.8 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างเตาหลอม 27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9 ขั้นตอนการปฏิบัติงาน..... 28

บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน

4.1 ขั้นตอนการทดลอง..... 29
4.2 การทดลองหาอัตราเพิ่มของอุณหภูมิ..... 34
4.3 การหาประสิทธิภาพของเตาหลอมอลูมิเนียมไฟฟ้า..... 37

บทที่ 5 สรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน..... 39
5.2 วิเคราะห์ผลการดำเนินงาน..... 39
5.3 แนวทางพัฒนาและปรับปรุงในอนาคต..... 39

บรรณนานุกรม..... 42

ภาคผนวก

เทอร์โมคัปเปิ้ล..... A-1
KANTHAL HANDBOOK..... A-10
Drawing..... A-18
คู่มือการใช้ตัวควบคุมอุณหภูมิ..... A-39
รูปเตาหลอม..... A-45
ค่าใช้จ่าย..... A-47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติด้านเคมีของฉนวนกันความร้อน..... 18

ตารางที่ 4.1 บันทึกผลการทดลองที่1..... 30

ตารางที่ 4.2 บันทึกผลการทดลองที่ 2..... 31

ตารางที่ 4.3 บันทึกผลการทดลองที่3..... 33

ตารางที่ 4.4 แสดงข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา (ใช้ไฟ 3 เฟส)..... 34

ตารางที่ 4.5 แสดงข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา (ใช้ไฟ 2 เฟส)..... 36

ตารางที่ 4.6 แสดงข้อมูลช่วงเวลาที่ magnetic contractor ON และ OFF..... 38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 การนำความร้อนผ่านผนังราบที่ค่าการนำความร้อนที่ขนาดสม่ำเสมอ..... 4
รูปที่ 2.2 การนำความร้อนแบบมิติเดียวผ่านผนังหลายชั้นและการเปรียบเทียบกับวงจรไฟฟ้า..... 5
รูปที่ 2.3 วงจรความร้อนแบบต่อความต้านทานแบบอนุกรม..... 6
รูปที่ 2.4 Solubility of hydrogen in solid and liquid aluminium..... 9
รูปที่ 2.5 Foseco Porotec apparatus..... 9
รูปที่ 2.6 Some Porotec samples..... 10
รูปที่ 2.7 Diagram of sodium chloride/potassium chloride mixtures..... 11
รูปที่ 2.8 Diagram of sodium chloride/potassium chloride/sodium fluoride mixtures..... 11
รูปที่ 2.9 Effect of Cold Working Upon Mechanical Properties..... 14
รูปที่ 3.1 แสดงการวัดขนาดต่างๆของขดลวด..... 24
รูปที่ 3.2 ภาพของเตาหลอมที่ออกแบบ..... 26
รูปที่ 3.3 วงจรไฟฟ้า..... 26
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงผลการทดลองที่ 1..... 30
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลการทดลองที่ 2..... 32
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทียบกับเวลา (ใช้ไฟ 3 เฟส)..... 35
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทียบกับเวลา (ใช้ไฟ 2 เฟส)..... 37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาของโครงการ

ในปัจจุบันวิวัฒนาการทางด้านเทคโนโลยีสาขาต่าง ๆ ได้เจริญก้าวหน้าไปมาก รวมทั้งวิวัฒนาการทางด้านการหล่อโลหะ การที่เราจะได้งานหล่อที่มีคุณภาพดีนั้น เตาหลอมนับว่ามีส่วนสำคัญอย่างยิ่งเตาหลอมโลหะที่เราสร้างขึ้นควรจะมีประสิทธิภาพสูง ประหยัด กรรมวิธีการหลอมโลหะจะต้องเหมาะสมกับเตาหลอม และงานหลอมชนิดนั้น ๆ เพราะฉะนั้น การเลือกเตาให้เหมาะสมมีหลักใหญ่ ๆ ดังนี้

(1) ชนิดของโลหะ หรือ โลหะผสมและอุณหภูมิ

(2) คุณภาพของน้ำโลหะที่ต้องการ เช่น องค์ประกอบทางเคมี , โครงสร้างทางโลหะวิทยา

(3) จำนวนและวิธีการผลิต

(4) ชนิด และค่าใช้จ่ายของพลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอม

(5) สภาวะการควบคุมการทำงาน และความปลอดภัยในการใช้งาน

1.2 แนวคิด

โดยทั่วไปในงานหล่ออลูมิเนียมในอุตสาหกรรมจะใช้เตาเบ้า, เตาน้ำมัน โดยมีเชื้อเพลิงเป็นถ่าน,น้ำมันหรือแก๊สความร้อนในลักษณะนี้เป็นความร้อนจากเปลวไฟ หรือเปลวความร้อนต้องสัมผัสกับเบ้าหลอมโลหะ ซึ่งจะทำให้ไอน้ำที่อยู่ปนกับเปลวไฟแยกตัวเมื่อสัมผัสกับอลูมิเนียมได้แก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจน ทำให้อลูมิเนียมเกิดเป็นตะกรันของอลูมิเนียมออกไซด์ ส่วนสำหรับเตาหลอมอลูมิเนียมให้ความร้อนโดยลวดต้านทาน สามารถควบคุมการหลอมได้ง่าย ทั้งการละลายของแก๊สและการเกิดตะกรันของอลูมิเนียมออกไซด์

ข้อได้เปรียบของเตาหลอมแบบใช้ไฟฟ้ามีดังนี้

(1) มีประสิทธิภาพสูงกว่าเตาหลอมแบบใช้น้ำมัน

(2) อายุการใช้งานของเบ้าหลอมมากกว่าเบ้าที่ใช้กับเตาน้ำมัน 20 ถึง 100%

(3) สามารถควบคุมอุณหภูมิได้แน่นอน

(4) สภาวะการทำงานไม่มีเสียงรบกวน, ไม่มีควันเสียของแก๊สทำให้การปฏิบัติงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

1.3 วัตถุประสงค์

(1) เพื่อให้ทราบถึงหลักการทำงานของเตาหลอมโลหะไฟฟ้า

(2) เพื่อศึกษาชิ้นส่วน, ตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการทำงานของเตาหลอมโลหะไฟฟ้า

(3) เพื่อนำความรู้ในด้านกลศาสตร์, ความร้อน, วงจรไฟฟ้า, ฯลฯ นำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างเตาหลอมโลหะไฟฟ้า

(4) เพื่อประโยชน์ในด้านการเรียนการสอนกระบวนการผลิต งานหล่อโลหะ

(5) ให้สามารถออกแบบโครงสร้างของเตาหลอมโลหะไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขอบเขตของโครงงาน

ออกแบบและสร้างเตาหลอมอลูมิเนียมชนิดใช้ลวดต้านทานให้ความร้อนมีพื้นที่หน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ใช้เบ้าซิลิกอนคาร์ไบด์ แบบยกเท ใช้ไฟฟ้า 3 เฟส 220 โวลต์อุณหภูมิในเตาสูงสุด 1000 °Cหลอมอลูมิเนียม 10 กิโลกรัม ในเวลา 90 นาที การควบคุมอุณหภูมิใช้ชุดควบคุมอุณหภูมิและเทอร์โมคัปเปิลโดยใช้แม่แรงเพื่อยกเบ้าหลอมขึ้นเพื่อใช้คีมสามารถคีบเบ้าหลอมยกออกมาเทเข้าแบบ

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำโครงงาน

(1) เพื่อสร้างเตาหลอมอลูมิเนียมให้กับทางภาควิชา

(2) เพื่อสร้างทักษะและประสบการณ์ในงานทางด้านวิศวกรรม

(3) เพื่อสร้างทักษะการทำงานร่วมกันเป็นหมู่คณะ

(4) เพื่อให้รู้จักการวางแผน การทำงานและการดำเนินงาน

(5) เพื่อสร้างทักษะทางด้านเศรษฐศาสตร์ ในการวิเคราะห์การใช้งบประมาณในการสร้างเตาหลอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในการออกแบบสร้างเตาหลอม

2.1 หลักการทำงานของเตาหลอม

การทำงานของเตาหลอมเริ่มจากเมื่อขดลวดได้รับกระแสไฟผ่านเข้ามา (ขดลวดมี 24 เส้น ใช้ไฟฟ้า 3 เฟสๆละ 8 เส้นต่อแบบสตาร์) ขดลวดจะเกิดการเหนี่ยวนำทำให้เกิดความร้อนขึ้น การควบคุมอุณหภูมิจะใช้ชุดควบคุมอุณหภูมิร่วมกับเทอร์โมคัปเปิ้ล ชนิด K ซึ่งจะติดตั้งจากด้านล่างเตาเข้ามาที่จุดใกล้กับด้านล่างของเบ้า เพื่อให้การควบคุมอุณหภูมิทำได้อย่างถูกต้องเป็นไปตามความต้องการ โดยที่ชุดควบคุมอุณหภูมิสามารถตั้งอุณหภูมิได้ตามต้องการ แต่ไม่เกิน 1199° c การควบคุมอุณหภูมิจะเป็นแบบ เปิด-ปิด เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงถึงที่ตั้งไว้ ชุดควบคุมอุณหภูมิจะตัดไฟที่จ่ายให้กับขดลวด ถ้าอุณหภูมิลดลงต่ำกว่าที่ตั้งไว้ชุดควบคุมอุณหภูมิก็จะต่อไฟให้กับขดลวดตามเดิม เพื่อให้ขดลวดสามารถคงอุณหภูมิไว้ได้ตลอดเวลา

การตรวจสอบอุณหภูมิเทของอลูมิเนียม จะทำได้โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์แบบจุ่ม เพื่อตรวจสอบอุณหภูมิเทว่าถูกต้องหรือไม่อีกครั้งหนึ่ง (ใช้อุณหภูมิเท 750° c) หลังจากที่อลูมิเนียมเหลวได้อุณหภูมิเทแล้วจะใช้แม่แรงดันเบ้าหลอมจากข้างใต้ให้สูงพ้นปากเตาประมาณ 5 ซม. แล้วใช้ปากคีบ คีบเบ้าหลอมออกมา

2.2 การถ่ายเทความร้อน[1 : P 105 – 118]

การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนที่สมบูรณ์แบบนั้นจำเป็นต้องทราบถึงกลไกการถ่ายเทความร้อนแบบต่างๆ 3 แบบด้วยกันคือ

1. การถ่ายเทความร้อนโดยการนำ หรือ การนำความร้อน (conduction)
2. การถ่ายเทความร้อนโดยการพา หรือ การพาความร้อน(convection)
3. การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี หรือการแผ่รังสีความร้อน(radiation)

2.2.1 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำ (conduction heat transfer)

การถ่ายเทความร้อนโดยการนำเป็นการถ่ายเทความร้อนเพียงวิธีเดียว ที่เกิดขึ้นในตัววัตถุที่เป็นตัวกลางทึบแสง เมื่อมีความลาดชันของอุณหภูมิเกิดขึ้นในวัตถุดังกล่าวก็จะมีความร้อนถ่ายเทจาจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำของวัตถุนั้น ตามกฎของการนำความร้อนของฟูเรียร์(Fourier 's Law of conduction)

$$q_k = - kA\frac{dT}{dX} \qquad (2.1)$$

เมื่อ

q_k ; อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำหรือการนำความร้อน

k ; ค่าการนำความร้อนของผนัง,W/m*K

A ; พื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน,m^2

T ; อุณหภูมิ , K

X ; ทิศทางการไหลของความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก) การนำความร้อนในผนังราบ (plane wall)

ให้พิจารณาการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังราบ ที่ผิวที่อุณหภูมิคงที่และมีขนาดสม่ำเสมอทั่วทั้งผิว (ดังรูปที่ 2-1) เนื่องจากผิวทั้งสองมีอุณหภูมิแตกต่างกันความร้อนจึงไหลจากผิวที่มีอุณหภูมิสูงไปยังผิวที่มีอุณหภูมิต่ำถ้าหากค่านำความร้อน k ของผนังมีขนาดคงที่แล้วจะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนจากสมการคือ

$$q_L = \frac{kA}{L} \times (T_1 - T_2) \qquad (2.2)$$

เมื่อ

q_k ;อัตราความร้อนที่ไหลผ่านผนัง ,Watt

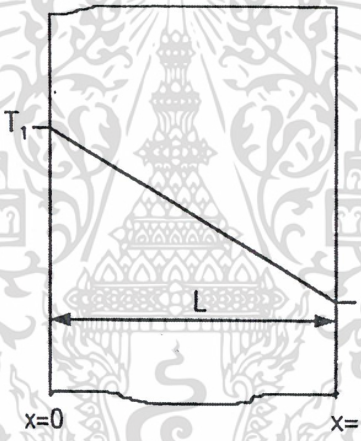
k ;ค่าการนำความร้อนของผนัง,W/m*K

A ;พื้นที่หน้าตัดของผนังที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล,m^2

L ;ความหนาของผนัง,m

T_1 ; อุณหภูมิของผิวทางด้านซ้าย (ที่ X=0) ,K

T_2 ; อุณหภูมิของผิวทางด้านขวา (ที่ X=L) ,K



รูปที่ 2.1 การนำความร้อนผ่านผนังราบที่ค่าการนำความร้อนที่ขนาดสม่ำเสมอ [1 : P 106]

ข) การนำความร้อนในผนังราบซ้อนกันแบบต่ออนุกรม (plane walls in series)

ถ้าความร้อนไหลผ่านผนังที่ซ้อนกันหลายชั้น โดยการนำเช่นผนังของอาคารบ้านเรือนแล้วการวิเคราะห์เกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนก็จะยิ่งยากขึ้น ในกรณีที่สภาวะต่างๆคงที่ หรือไม่แปรผันตามเวลาแล้วนั้นอัตราความร้อนที่ไหลผ่านผนังแต่ละชั้นก็จะมีขนาดเท่าๆกัน ทั้งๆ ที่ความลาดชันของอุณหภูมิในผนังแต่ละชั้นมีค่าแตกต่างกัน ในกรณีนี้อัตราความร้อนที่ไหลผ่านผนังดังรูปที่ 2-2 แต่ละชั้นจะมีค่าเป็น

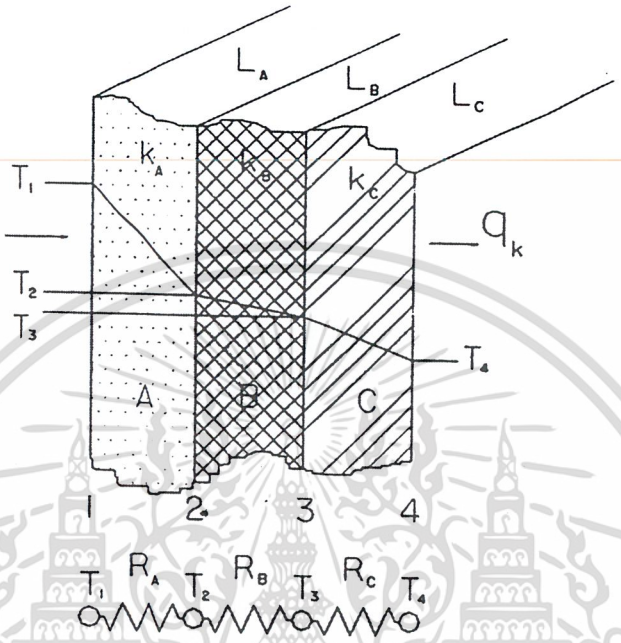
$$q_k = \frac{T_1 - T_2}{\frac{L}{kA_A} + \frac{L}{kA_B} + \frac{L}{kA_C}} \qquad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

T_1 ; อุณหภูมิผิวของผนังชั้นแรก,K

T_2 ; อุณหภูมิผิวของผนังชั้นที่ 2 ,K



รูปที่ 2.2 การนำความร้อนแบบมิติเดียวผ่านผนังหลายชั้นและการเปรียบเทียบกับวงจรไฟฟ้า[1 : P 107]

ค) การนำความร้อนตามแนวรัศมี

ความต้านทานรวมที่ใช้หาอัตราการถ่ายเทความร้อน ก็จะเป็นความต้านทานจากการนำของท่อและฉนวน ดังรูป 2-3 และจะมีสมการสำหรับหาอัตราการถ่ายเทความร้อนเป็น

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{\ln(r_1/r_2)}{2\pi k_1 \ell} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_2 \ell}} \qquad (2.4)$$

เมื่อ

T_1 ; อุณหภูมิเฉลี่ยของการไหล ,K

T_2 ; อุณหภูมิที่ผิวนอกของการไหล ,K

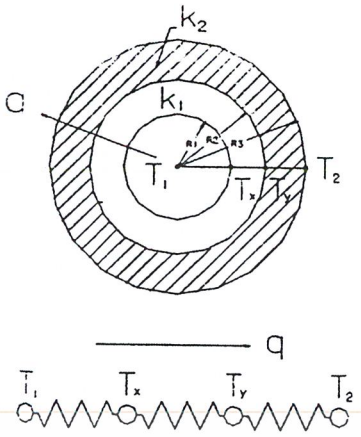
k_1 ; ค่าการนำความร้อนของวัสดุที่ 1 ,W/m*K

k_2 ; ค่าการนำความร้อนของวัสดุที่ 2 ,W/m*K

r_1 ; รัศมีที่ 1 ,m

ℓ ; ความยาวของท่อ , m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่2.3 วงจรความร้อนแบบต่อความต้านทานแบบอนุกรม [1 : P 109]

2.2.2 การถ่ายเทความร้อนโดยการพา (convection heat transfer)

เมื่อของไหลสัมผัสกับผิววัตถุที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันก็จะมีการแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนระหว่างของไหลกับวัตถุ ขบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนนี้เรียกว่า "การถ่ายเทความร้อนโดยการพาหรือการพาความร้อน" ขบวนการถ่ายเทความร้อนดังกล่าวนี้เป็นปรากฏการณ์พื้นๆ แต่รายละเอียดของกลไกการถ่ายเทความร้อนนั้นซับซ้อนมาก ในตอนแรกนี้จะไม่กล่าวถึงวิธีการวิเคราะห์ แต่จะเสนอกลไกและสมการหลักที่สามารถใช้คำนวณอัตราการพาความร้อนของระบบย่อยๆ ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญของระบบที่ใช้ให้ความร้อน และใช้ระบายความร้อน

การถ่ายเทความร้อนโดยการพาหรือการพาความร้อนนี้ จำแนกออกเป็น 2 ประเภท คือ

ก) **การพาความร้อนแบบอิสระ (free convection)**

แรงที่ทำให้ของไหลเกิดการเคลื่อนไหวในการพาความร้อนแบบอิสระนั้น เกิดมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิในการไหล ที่เนื่องมาจากการที่ของไหลสัมผัสผิวของวัตถุที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน และทำให้เกิดแรงลอยตัวขึ้น ตัวอย่างของการพาความร้อนแบบอิสระนี้ได้แก่ การถ่ายเทความร้อนระหว่างผนังหรือหลังคาบ้านในวันที่อากาศสงบเงียบ การพาความร้อนภายในกาต้มน้ำที่มีขดลวดให้ความร้อน หรือการถ่ายเทความร้อนจากผิวของตัวเก็บความร้อนของแสงอาทิตย์(solar collector) ในช่วงที่ไม่มีลมพัด

ข) **การพาความร้อนแบบบังคับ (force convection)**

การพาความร้อนแบบบังคับจะเกิดขึ้นเมื่อมีแรงจากภายนอกมาบังคับให้ของไหลเคลื่อนที่ผ่านผิววัตถุที่ร้อนหรือเย็นกว่า เนื่องจากของไหลของการพาความร้อนแบบบังคับมีความเร็วที่สูงกว่าแบบอิสระ ดังนั้นความร้อนที่ถ่ายเทได้จากความแตกต่างของอุณหภูมิที่มีขนาดเท่าๆกับการพาความร้อนแบบอิสระ จึงมีจำนวนมากกว่าแต่ไม่ว่าจะเป็นการพาความร้อนแบบไหนก็ตาม ต่างก็มีสมการสำหรับหาอัตราการถ่ายเทความร้อนที่อยู่ในรูปของ "กฎการระบายความร้อนของนิวตัน"

$$q = h_c A (T_s - T_{f\infty}) \qquad (2.5)$$

เมื่อ

h_c ; หนึ่งหน่วยการพาความร้อนหรือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย (W/m2.k)

A ; พื้นที่ที่ผิววัสดุที่สัมผัสกับของไหล ,m2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ts ; อุณหภูมิของผิววัสดุ ,k

$T_{r\infty}$; อุณหภูมิของของไหลที่อยู่ห่างออกไปจากผิวที่มีการถ่ายเทความร้อน ,k

2.2.3 การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี (radiation heat transfer)

ความร้อนจากการนำและการพา จะไหลผ่านได้เฉพาะกรณีที่มีสื่อกลาง (medium) เท่านั้นสำหรับความร้อนจากการแผ่รังสีนั้นจะไหลผ่านได้แม้กระทั่งในสุญญากาศ ในการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีพลังงานจะเคลื่อนที่ไปในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความเร็วเท่ากับความเร็วของแสง ปรากฏการณ์จากการแผ่รังสีของแม่เหล็กไฟฟ้ามีอยู่ด้วยกันหลายแบบ (เช่น รังสีเอกซ์) ในที่นี้จะพิจารณาแต่เพียงการแผ่รังสีความร้อนที่มีความร้อนเป็นพลังงานที่ถูกเคลื่อนย้ายเท่านั้น

จำนวนพลังงานที่ถูกส่งออกจากผิวในลักษณะของรังสีความร้อน (radiant heat) นั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสมบูรณ์และลักษณะของผิววัตถุที่สามารถแผ่รังสีได้สมบูรณ์หรือที่เรียกว่าวัตถุสีดำ (blackbody) จะแผ่รังสีความร้อน q_r ในอัตรา

$$q_r = \varepsilon \sigma A T^4 \qquad (2.6)$$

เมื่อ

q_r ; อัตราการแผ่ความร้อน ,watt

ε ; ค่าการแผ่รังสี (remittance)

A ; พื้นที่ผิวของตัวแผ่รังสี ,m^2

T ; อุณหภูมิผิวของตัวแผ่รังสี ,k

σ; ค่าคงที่ Stefan-Boltzwann constant มีค่าเป็น $5.67*10^{-8} w/m^2.k^4$

2.3 เทคนิคการหลอมโลหะอะลูมิเนียม[7 : P 58 – 69]

คุณสมบัติของโลหะที่เหมาะสมสำหรับการหล่อหลอม (casting metal) ควรจะมีคุณสมบัติที่สำคัญหลายประการดังนี้ คือ

- ควรจะมีสมบัติไหลง่าย(good fluidity) สามารถไหลผ่านช่องทางแคบๆหรือไหลไปตามช่องทางของแบบที่สลับซับซ้อนได้โดยง่าย
- มีจุดหลอมเหลวต่ำสะดวกในการหล่อหลอม (Low melting point)
- ไม่ยอมให้แก๊สใดๆละลายได้ง่ายในขณะหลอมเหลว(Low gas solubility)
- ไม่เปราะแตกง่ายขณะเกิดการแข็งตัว(not hot shortness)
- สามารถผสมธาตุต่างๆเข้าได้ง่ายและสม่ำเสมอ (good chemical reproducibility)
- ให้ผิวงานหล่อที่เรียบไม่ติดทรายเบบหรือสเกล(good as-cast surface finish)

จะไม่พบโลหะชนิดใดที่จะให้คุณสมบัติทางด้านหล่อหลอมครบถ้วนตามที่กล่าวมานี้เลย ยกเว้นโลหะอะลูมิเนียมที่ให้คุณสมบัติที่เข้าใกล้มากที่สุด จะเห็นว่าโลหะอลูมิเนียมมีจุดหลอมตัวต่ำประมาณ 690-730°C มีช่วงของการแข็งตัวยาวและไหลได้ง่าย ทำให้ปัญหาทางด้านวัสดุทำแบบหล่อหมดไป ปัญหาที่สำคัญและจัดเป็นเรื่องที่ต้องระมัดระวังในการหล่อหลอมอะลูมิเนียมก็คือคุณสมบัติเปราะแตกง่ายในช่วงเกิดการแข็งตัว และอีกประการหนึ่งคือ อะลูมิเนียมยอมให้แก๊สโดยเฉพาะไฮโดรเจนละลายได้ดีมากในสภาพหลอมเหลว และปริมาณของแก๊สจะลดลงเมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะลูมิเนียมแข็งตัว นอกจากนี้ อะลูมิเนียมรวมตัวกับออกซิเจนและกลายเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ได้ง่ายและมีความถ่วงจำเพาะใกล้เคียงกับโลหะอะลูมิเนียม ทำให้การแยกตัวของอะลูมิเนียมออกไซด์เป็นไปได้ยาก อันจะมีผลทำให้อะลูมิเนียมออกไซด์สามารถไหลปะปนไปกับโลหะอะลูมิเนียมเข้าแบบหล่อทำให้ได้ชิ้นงานหล่อที่คุณภาพต่ำ ประการสุดท้ายที่จัดว่าสำคัญไม่น้อยก็คือ เรื่องการหดตัวในสภาวะของแข็งที่ค่อนข้างสูง(3.8-8.5%) ทำให้ควบคุมขนาดของงานหล่อได้ยาก ทั้งหมดที่กล่าวมานี้เป็นสิ่งที่จะต้องแก้ไขขณะทำการหล่อหลอม เพื่อให้ได้งานหล่อที่มีคุณภาพดีตามมาตรฐาน

2.3.1 เทคนิคการหล่อหลอมโลหะอะลูมิเนียมที่สำคัญแบ่งออกเป็น 4 ขั้น ดังนี้

1. เลือกเตาหลอม(melting furnace)
2. การป้องกันและกำจัดแก๊สไฮโดรเจน
3. การป้องกันและกำจัดอะลูมิเนียมออกไซด์
4. การปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะอะลูมิเนียมขั้นสุดท้ายก่อนเทลงแบบหล่อ(modification)

การเลือกเตาหลอม (melting furnace) เตาที่ใช้หลอมอะลูมิเนียมมีหลายแบบ ขึ้นอยู่กับปริมาณของโลหะอะลูมิเนียม เช่น เตาแบบ crucible เตากระทะ (reverberatory) และเตาไฟฟ้า(Induction หรือ resistance furnace)

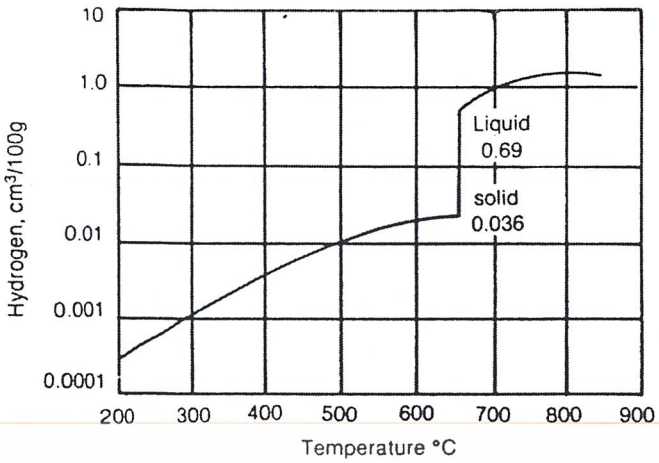
ถ้าเป็นเตาแบบใช้ถ่านหรือน้ำมันเชื้อเพลิง ควรจะเป็นลักษณะที่เปลวความร้อนไม่สัมผัสกับโลหะ (Indirect Fired Furnace) เพราะเปลวไฟจะมีไอน้ำปนอยู่ด้วย จะทำให้ไอน้ำแยกตัวเมื่อสัมผัสกับอะลูมิเนียม ได้แก๊สไฮโดรเจนกับออกซิเจน อะลูมิเนียมละลายแก๊สไฮโดรเจนได้ดี และกลายเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ได้ง่ายเมื่อสัมผัสกับออกซิเจน ในขั้นหลอมนี้จะต้องป้องกันแก๊สทั้งสองให้มากที่สุด

สำหรับเตาไฟฟ้า ถ้าเป็นแบบกระแสเหนี่ยวนำ(Induction) ไม่ว่าจะเป็นประเภทความถี่ต่ำหรือความถี่สูงจะมีผลทำให้เกิดการกวน (Stirring effect) น้ำโลหะที่กำลังหลอมเหลวทำให้มีโอกาสละลายแก๊สในอากาศได้มาก

เตาหลอมไฟฟ้าที่ดีที่สุดควรจะเป็นแบบใช้ลวดความต้านทาน(Resistance) เนื่องจากสามารถควบคุมได้ง่ายทั้งการละลายแก๊ส และการเกิดอะลูมิเนียมออกไซด์ เพราะไม่เกิดการกวนน้ำโลหะ

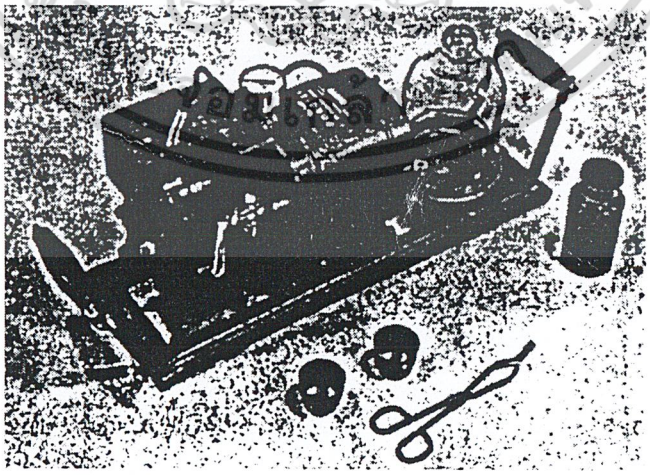
การป้องกันและกำจัดแก๊สไฮโดรเจน ในการหลอมโลหะอะลูมิเนียมย่อมจะหลีกเลี่ยงไม่ให้แก๊สไฮโดรเจนมีที่มาได้หลายทาง เช่นติดมากับโลหะที่จะนำมาหลอมในรูปของความชื้น มากับแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ และสุดท้ายมาจากความชื้นในอากาศเมื่อไอน้ำหรือความชื้นสัมผัสกับโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวจะเกิดแก๊สไฮโดรเจน ($2Al + 3H_2O \longrightarrow Al_2O_3 + 6H$) ในตอนที่แก๊สไฮโดรเจนละลายอยู่ในอะลูมิเนียม จะอยู่ในสภาพที่เป็นอะตอมละลายอยู่ใน โลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลว ต่อเมื่อโลหะอะลูมิเนียมเย็นตัวลง ปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนที่ละลายได้จะลดน้อยลงตามลำดับ ทำให้อะตอมของไฮโดรเจนที่ถูกขับออกมารวมตัวกันเข้าเป็นโมเลกุลและในที่สุดก็กลายเป็นฟองเล็กๆกระจัดกระจายอยู่ทั่วไปทำให้ได้คุณภาพของงานหล่อที่ต่ำ จะเห็นได้ชัดเจนภายหลังนำเอาชิ้นงานไปกลึงหรือไสผิวออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



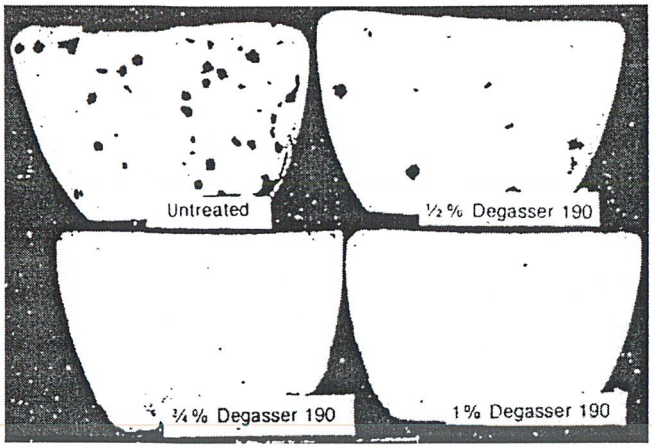
รูปที่ 2.4 Solubility of hydrogen in solid and liquid aluminium. [7 : P 59]

วิธีการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนในทางปฏิบัติใช้แก๊สคลอรีนหรือแก๊สไนโตรเจนเป่าผ่านท่อลงไปที่ก้นเบ้าทำให้เกิดเป็นฟอง(bubble) ที่ขึ้นมาที่ผิว ฟองของแก๊สคลอรีนหรือไนโตรเจนจะทำหน้าที่เป็นพาหนะนำเอาแก๊สไฮโดรเจนออกมาด้วย ในบางแห่งใช้อะลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$) หรือเฮกซาโคลโรอีเทน(C_2Cl_6) ซึ่งเป็นของแข็ง กดลงใต้ผิวของโลหะอะลูมิเนียม จะทำให้เกิดฟองของแก๊สขึ้นมาทำหน้าที่ไล่แก๊สไฮโดรเจนได้เช่นเดียวกัน การกำจัดแก๊สไฮโดรเจนจะต้องกระทำก่อนเทลงแบบหล่อเล็กน้อยเมื่อไล่แก๊สแล้วต้องรีบเทโลหะลงแบบหล่อ มิฉะนั้นอะลูมิเนียมอาจจะละลายแก๊สได้อีก ทำการทดสอบดูก่อนเพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีแก๊สไฮโดรเจนเหลืออยู่ในน้ำโลหะอะลูมิเนียม การทดสอบจะกระทำได้โดยตักโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวภายหลังจากการไล่แก๊สแล้วใส่ลงในเบ้าโลหะขนาดเล็ก นำเอาครอบแก้วที่มีท่อต่อไปยังเครื่องแวคคั่ม ดูดอากาศออกทำให้ครอบแก้วมีความดันต่ำกว่าบรรยากาศ เอาครอบแก้ววางครอบเบ้าโลหะอะลูมิเนียม เมื่อโลหะอะลูมิเนียมแข็งตัว ถ้ายังมีแก๊สไฮโดรเจนเหลืออยู่ แก๊สไฮโดรเจนจะถูกดูดโดยสุญญากาศทำให้ผิวด้านบนของโลหะอะลูมิเนียมในเบ้าฟูขึ้นมา แต่ถ้าไม่มีแก๊สไฮโดรเจนเหลืออยู่ในอะลูมิเนียมผิวหน้าของโลหะอะลูมิเนียมจะยุบตัวเป็นแอ่งลึก อุปกรณ์สำหรับแวคคั่มเทสต์ปรากฏดังภาพแสดง



รูปที่ 2.5 Foseco Porotec apparatus. [7 : P 61]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 Some Porotec samples. [7 : P 62]

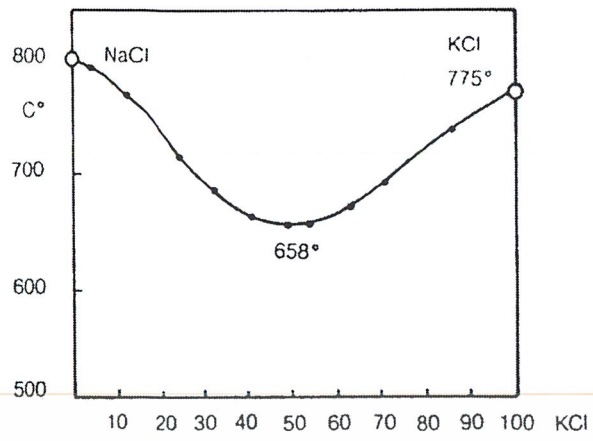
2.3.2 การป้องกันและกำจัดอะลูมิเนียมออกไซด์(Dross)

จากที่ทราบว่าอะลูมิเนียมออกไซด์มีความถ่วงจำเพาะใกล้เคียงกับอะลูมิเนียมหลอมเหลวมากคือประมาณ 2.6 g/cm^3 ทำให้อะลูมิเนียมออกไซด์สามารถลอยปะปนไปกับน้ำโลหะได้ง่าย ในขณะเทโลหะอะลูมิเนียมเหลวลงแบบหล่อ จะมีผลทำให้งานหล่อมีคุณภาพต่ำ คือมีผิวไม่เรียบ และความต้านทานแรงดึงต่ำ การแก้ไขปัญหาจะต้องกระทำทั้งการป้องกันไม่ให้เกิดหรือเกิดอะลูมิเนียมออกไซด์ให้น้อยที่สุด โลหะอะลูมิเนียมสามารถละลายอะลูมิเนียมออกไซด์ได้ระหว่าง 0.003-0.04%

ปรกติอะลูมิเนียมสามารถรวมตัวกับออกซิเจนได้ง่ายมาก แต่ออกไซด์ของอะลูมิเนียมจะมีความแน่นทึบมาก ไม่ยอมให้ออกซิเจนซึมผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียมใต้ผิวของออกไซด์ได้ ดังนั้นอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เกิดบริเวณผิวหน้าจะทำหน้าที่เป็นฟิล์มป้องกันการเกิดออกไซด์ได้เป็นอย่างดี ถ้าทำการหลอมโลหะอะลูมิเนียมด้วยวิธีธรรมดา การป้องกันการเกิดออกไซด์ทำได้โดยจะต้องไม่แตะต้องหรือกวนโลหะหลอมเหลว ทำให้ฟิล์มของอะลูมิเนียมออกไซด์ถูกทำลาย การเกิดออกไซด์ก็จะมีน้อยแต่เพื่อให้การป้องกันมีประสิทธิภาพมักจะใช้ฟลักซ์เข้าช่วย ซึ่งฟลักซ์ที่ใช้มี 3 ประเภทคือ

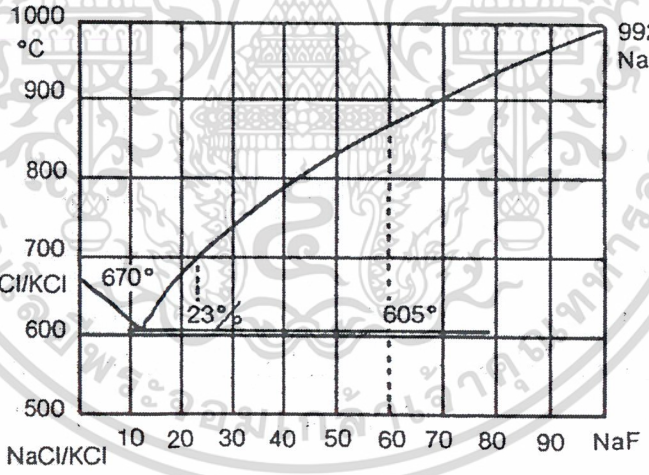
ฟลักซ์ปิดคลุมผิวหน้า(Covering fluxes) ทำหน้าที่ปกคลุมผิวหน้าของอะลูมิเนียมหลอมเหลวเอาไว้เป็นการป้องกันทั้งไม่ให้เกิดออกไซด์และการละลายของแก๊สไฮโดรเจน ฟลักซ์ชนิดนี้จะต้องมีจุดหลอมตัวต่ำกว่าจุดหลอมตัวของอะลูมิเนียมและมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าด้วย ได้แก่ เกลือคลอไรด์ของโซเดียมและโพแทสเซียม (NaCl , KCl) ที่ส่วนผสมยูเทคติค (50%)จะมีจุดหลอมเหลว 658°C(ดังปรากฏในรูปที่2.7)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 Diagram of sodium chloride/potassium chloride mixtures. [7 : P 65]

ฟลักซ์ทำความสะอาด(Cleaning fluxes) ทำหน้าที่ป้องกันการเกิดออกไซด์ และช่วยให้ออกไซด์และสิ่งเจือปนอื่น (Suspended particle) ถูกจับติดกับฟลักซ์ทำให้สามารถกำจัดออกไซด์และกวาดสแลกออกได้ง่าย ฟลักซ์ชนิดนี้ประกอบด้วยเกลือของโซเดียมและโพแทสเซียมเช่นเดียวกันแต่จะผสมฟลูออไรด์ของโซเดียมเข้าไปด้วยทำให้มีจุดหลอมเหลวและความถ่วงจำเพาะต่ำลงไปอีก ดังแผนภูมิสมดุลที่แสดงระหว่างเกลือ NaCl + KCl กับ NaF



รูปที่ 2.8 Diagram of sodium chloride/potassium chloride/sodium fluoride mixtures. [7 : P 66]

ฟลักซ์ลดการสูญเสียอะลูมิเนียมที่ติดไปกับออกไซด์ (Drossing off fluxes) เป็นฟลักซ์ที่ทำหน้าที่ลดการสูญเสียอะลูมิเนียม ซึ่งส่วนใหญ่จะมีอะลูมิเนียมเป็นเม็ดเล็กๆปนอยู่กับออกไซด์ หรือ Dross ฟลักซ์ชนิดนี้จะให้ปฏิกิริยาเกิดความร้อน (Exothermic reaction) จำนวนหนึ่งพอที่จะทำให้เม็ดเล็กๆ ของอะลูมิเนียมละลายรวมตัวกันเป็นหยดและตกกลับไปรวมกับอะลูมิเนียมหลอมเหลวในเบ้าหลอม ทำให้ลดการสูญเสียโลหะอะลูมิเนียมไปกับฟลักซ์ ซึ่งฟลักซ์ชนิดนี้จะผสมผงโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) หรือไนเตรด (Na_2NO_3) ซึ่งจะให้อะตอมของออกซิเจนไปรวมกับผงอะลูมิเนียมส่วนหนึ่งกลายเป็น Al_2O_3 และให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 การปรับปรุงคุณสมบัติขั้นสุดท้ายก่อนเทลงแบบหล่อ(Grain refinement)

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีช่วงในการแข็งตัวกว้าง(Long range freezing) จึงมักจะให้เกรนมีขนาดโต ทำให้เสียคุณสมบัติเชิงกล โดยเฉพาะตามบริเวณชิ้นงานที่มีความหนามากๆยิ่งแบบหล่อทำด้วยทรายยิ่งจะได้ขนาดของเกรนโตมากยิ่งขึ้น ความประสงค์ในการปรับปรุงคุณสมบัติขั้นสุดท้ายก่อนเทลงแบบ จึงต้องแก้ไขให้โลหะอะลูมิเนียมที่ได้มีขนาดเกรนเล็กและสม่ำเสมอ (equiaxed) การปรับปรุงดังกล่าวมีลักษณะที่สำคัญ 2 ประการคือ

1. การทำให้เย็นอย่างรวดเร็ว (rapid cooling rate) เป็นการลดช่วงของการเกิดการแข็งตัวให้สั้นที่สุด เพื่อไม่ให้โอกาสเกรนที่กำเนิดขึ้นมีการขยายตัววิธีนี้ใช้ได้ดีทั่วไป โดยการใช้โลหะเป็นแบบหล่อเช่นที่ใช้กันในการหล่อแบบใช้แรงดัน (die casting) หรือการหล่อโดยใช้แบบหล่อเป็นโลหะ (permanent mold)
2. โดยการผสมโลหะช่วยลดขนาดของเกรน(grain-refining) ซึ่งจะไม่ทำให้ส่วนผสมของโลหะอะลูมิเนียมเปลี่ยนไป โลหะที่จัดเป็น grain refiner ได้แก่ไทเทเนียม, โบรอน หรือเซอร์โคเนียมการผสมโลหะเหล่านี้จะกระทำก่อนการเทโลหะลงแบบเล็กน้อย ซึ่งไทเทเนียมหรือโบรอน จะรวมตัวกันให้สารประกอบ เช่น ไทเทเนียมโบไรด์ หรือสารประกอบเชิงโลหะอื่นๆ และสารประกอบเหล่านี้จะอยู่ในสภาพของแข็งลอยอยู่ในโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลว ซึ่งจะทำหน้าที่ให้กำเนิดนิวเครียสเทียม (heterogeneous nucleus) แก่โลหะอะลูมิเนียม ทำให้ได้เกรนที่ละเอียดและสม่ำเสมอ

โลหะผสมหรือสารช่วยลดขนาดเกรน(Grain refiner) ที่ใช้กันทั่วๆไปจะอยู่ในรูปของฟลักซ์ เช่น โพแทสเซียมไทเทเนียมฟลูออกไรด์ (K_2TiF_6) และโพแทสเซียมโบโรฟลูออกไรด์ (KBF) เมื่อผสมลงไปในอะลูมิเนียมหลอมเหลวจะเกิดปฏิกิริยาแยกตัวออก และจะให้ไทเทเนียมโบไรด์ในที่สุด

นอกจากสารช่วยลดขนาดเกรนจะอยู่ในรูปของฟลักซ์แล้ว ยังมีใช้กันในรูปของโลหะผสม (Hardener) ระหว่างอะลูมิเนียมกับธาตุที่เป็น grain refiner เช่น อะลูมิเนียมไทเทเนียม , อะลูมิเนียมโบรอน หรืออะลูมิเนียม-ไทเทเนียม-โบรอน ซึ่งจะมีไทเทเนียมไม่เกิน 5% และมีโบรอนไม่เกิน 2.5และมีโบรอนไม่เกิน 2.5%

ปริมาณของสารช่วยลดขนาดเกรน(grain refiner) ที่ต้องการสำหรับโลหะผสมอะลูมิเนียมทั่วๆไปจะมีไทเทเนียมประมาณ 0.05-0.15% โบรอนประมาณ 0.04% หรือระหว่าง0.01-0.08%ไทเทเนียมและ 0.003%โบรอน ถ้าใช้ปริมาณของสารช่วยลดขนาดเกรนมากเกินไปจะเกิดข้อเสียตรงที่มีการแยกตัวโดยเฉพาะไทเทเนียมโบไรด์จะมีความหนาแน่น (Density) สูงกว่าอะลูมิเนียมจะแยกตัวตกตะกอนและจะอยู่ส่วนล่าง นอกจากนี้ไทเทเนียมโบไรด์มีความแข็งค่อนข้างสูง เมื่อเกิดการขัดสีกับแม่พิมพ์อาจจะทำให้อายุของแม่พิมพ์โดยเฉพาะการอัดขึ้นรูป(extrusion die)สั้นลงมาก

2.4 คุณสมบัติทั่วไปของโลหะอะลูมิเนียม [6 : P128 – 137]

อะลูมิเนียมจัดเป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบา มีความต้านทานต่อการเป็นสนิม มีความแข็งแรงอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง แต่มีความเหนียวสูงสามารถนำไปใช้งานได้กว้างขวางแทนเหล็ก และทองแดงได้ในหลายๆ ด้านของงานวิศวกรรมและอุตสาหกรรม อะลูมิเนียมมีคุณสมบัติทางด้านหล่อหลอมที่ดี โดยมีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ สามารถรวมตัวกับโลหะอื่นๆ เป็นโลหะผสมได้ง่ายมีความสามารถในการไหลอยู่ในเกณฑ์สูง สามารถหล่อหลอมได้ง่าย ข้อเสียของอะลูมิเนียมมีอยู่บ้างเหมือนกัน โดยเฉพาะอะลูมิเนียมมีขอบเขตการยืดหยุ่น(Elastic limit)ต่ำ ทำให้การใช้งานถูกจำกัดขอบเขตไปมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์

น้ำหนักอะตอม	26.97
ระบบผลึก	FCC(a=b=c=4.041A°)
ความหนาแน่น(20°C)	2.70 g/cm^3
อุณหภูมิหลอมเหลว	658 °C
จุดเดือดกลายเป็นไอ(Boiling)	1800 °C
ความร้อนจำเพาะ(0-100°C)	0.2259 Cal/g °C
ความร้อนแฝงของการกลายหลอมละลาย	93 Cal/g
อัตราการหดตัวจากสภาพหลอมเหลว	6.6%
สัมประสิทธิ์การขยายตัว(20 °C)	23.8 10^{-6}/ °C
ความต้านทานจำเพาะ(20 °C)	2.699 microhm.cm
สภาพตัวนำความร้อน(20 °C)	0.52 Cal.cm/cm^2.°C.sec

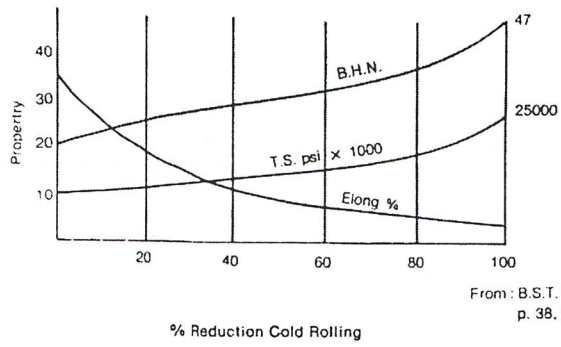
2.4.2 คุณสมบัติเชิงกล

ความแข็งแรง(Tensile Strength)	8-10 kg/mm^2
พิกัดความยืดหยุ่น(Elastic limit)	3 kg/mm^2
อัตราการยืดตัว(Percent Elongation)	40-45 %
ความแข็ง(Hardness)	16-20 H_B
โมดูลัสของการยืดหยุ่น(Modulus of Elasticity)	7800 kg/mm^2

2.4.3 การใช้งานโลหะอะลูมิเนียม

เนื่องจากโลหะอะลูมิเนียม มีความต้านทานต่อการเป็นสนิม อันเนื่องมาจากฟิล์มของ Al_2O_3 ที่เกิดจากการรวมตัวของอะลูมิเนียมกับออกซิเจน มีความแน่นทึบมากช่วยป้องกันมิให้ออกซิเจนสามารถแทรกซึมลงไปทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียมใต้ฟิล์มของ Al_2O_3 ได้ ทำให้โลหะอะลูมิเนียมเกิดภูมิต้านทานต่อการเป็นสนิมได้ด้วยตัวเอง (Passive state) และคุณสมบัติที่ยืดตัวได้ง่ายของอะลูมิเนียม จึงทำให้สามารถขึ้นรูปได้ง่าย ด้วยการรีดเป็นแผ่น หรืออัดขึ้นรูปให้มีรูปร่างได้สะดวก ทำให้การใช้งานอะลูมิเนียมมีขอบเขตกว้างขวางมาก เช่น ใช้ทำกรอบประตูหน้าต่าง ทำท่อ ทำเป็นเส้นลวดแทนลวดทองแดง เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี ปกติอะลูมิเนียมที่ใช้กันถึงแม้จะอยู่ในประเภทบริสุทธิ์ก็ตาม แต่ในทางปฏิบัติจะยอมให้มีโลหะเจือปนได้บ้าง โดยเฉพาะธาตุเหล็ก ซิลิคอน และทองแดงยอมให้มีได้ไม่เกิน 0.5% ซึ่งธาตุเจือปนเหล่านี้มีผลทำให้คุณสมบัติด้านความเหนียวและความต้านทานการกัดกร่อนลดลง การผ่านงานขึ้นรูปเย็นมีผลทำให้ความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นแต่จะทำให้ความเหนียวลดลงมาก ดังปรากฏในภาพแสดงผลของความแข็ง, ความแข็งแรง และอัตราการยืดตัว ที่มีต่อปริมาณการรีดเย็น (% Reduction Cold Rolling)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 Effect of Cold Working Upon Mechanical Properties[6 :P 130]

2.5 วัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวน [5 :P 79 – 87]

เตาเผาและเตาถลุงในระยะแรกๆ ก่อสร้างด้วยอิฐทนไฟซึ่งทนไฟได้สูงและมีความแข็งแรงสูง แต่ผนังเตาทั้งสองแบบ ค่อนข้างหนา ทั้งนี้เพราะว่าอิฐทนไฟ ที่ผลิตจากดินทนไฟทั่วไปมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไม่ดีนัก และรวมทั้งเกิดความกลัวการเผาวัสดุกรุผนังเตามากเกินไปอันเป็นผลเนื่องมาจากคุณภาพของอิฐก่อเตาด้านนอกออกมา มีคุณสมบัติเป็นฉนวนไม่ดี อย่างไรก็ดีเมื่อมีการเผาที่อุณหภูมิสูงมากขึ้น และราคาเชื้อเพลิงสูงขึ้นจึงมีการนำวัสดุฉนวนมาใช้ก่อสร้างเป็นส่วนหนึ่งของผนังเตา เพื่อทำให้ผนังเตามีคุณสมบัติเป็นฉนวนมากขึ้น วิธีการเช่นนี้ช่วยทำให้เกิดการก่อสร้างผนังเตาบางลง พร้อมกับทำให้การสูญเสียความร้อนน้อยลง ใช้พื้นที่และปริมาณวัตถุทนไฟในการก่อสร้างเตาน้อยลง และช่วยประหยัดเชื้อเพลิงเพราะว่าผนังเตาเก็บกักความร้อนไว้น้อยลง

การเกิดอิฐฉนวนทนไฟเป็นการเกิดการวิวัฒนาการที่ยิ่งใหญ่อันหนึ่งของวัตถุทนไฟ แต่การเกิดการพัฒนาวัตถุฉนวนทนไฟที่อุณหภูมิสูงก็ยังไม่เป็นการวิวัฒนาการที่ยิ่งใหญ่ไปกว่าการเกิดวิวัฒนาการความคิดที่ว่า การสร้างให้เกิดฉนวนกันความร้อนสามารถกระทำให้เกิดขึ้นได้ในผนังเตา วิธีการเช่นนี้ทำให้การออกแบบเตาเผาและเตาถลุงเปลี่ยนแปลงไปอย่างมากมาย ช่วยทำให้ผนังเตามีขนาดและน้ำหนักลดลงอย่างมากมาย ปัจจุบันผนังเตาที่มีความหนา 9" หรือ 4.5" มีใช้กันอย่างแพร่หลาย

อิฐฉนวนทนไฟสามารถใช้ได้กับอุณหภูมิสูงกว่า 3000°F

อิฐฉนวนทนไฟยังมีข้อดีกว่าอิฐทนไฟอีกอย่างหนึ่งคือ การเก็บกักความร้อนไว้ในผนังและหลังคาเตามีน้อยกว่า จึงช่วยส่งเสริมให้เตาเผาแบบเผาเป็นครั้งคราวมีประสิทธิภาพสูงมากขึ้น

อิฐฉนวนทนไฟไม่ควรใช้กับขี้ถลุงหรือเนื้อแก้วที่เหลว เพราะว่ารูพรุนในอิฐจะถูกของเหลวแทรกเข้าไปอยู่ทำให้ค่าความเป็นฉนวนลดลง นอกจากนี้ อิฐฉนวนทนไฟมีโครงสร้างที่เปราะ พรุน จะถูกกัดกร่อนได้ดี

2.5.1 คุณสมบัติต่างๆ

คุณสมบัติที่สำคัญมากอันหนึ่งของวัตถุฉนวนความร้อน ได้แก่ สภาพความนำความร้อน เพราะฉนวนความร้อนเมื่อใช้ที่ที่มีความร้อนสูงมากขึ้นจะมีปริมาตรมากขึ้นและสภาพนำความร้อนก็สูงขึ้นเช่นกัน

คุณสมบัติที่สำคัญอีกอันหนึ่งคือ ความสามารถในการเก็บกักความร้อนไว้ในตัว คุณสมบัตินี้โดยคร่าวๆ แล้วเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนาแน่น ดังนั้นสำหรับเตาเผาชั่วครั้งคราวถ้าก่อสร้างด้วยอิฐเบาจะได้ประโยชน์อย่างแท้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุฉนวนมีความทนทานต่อแรงกดและการขัดสีต่ำกว่าอิฐทนไฟ แต่คุณสมบัตินี้ก็ไม่เป็นผลดีเฉพาะบางกรณีเท่านั้น ตัวอย่างเช่น การสร้างฉนวนระหว่างโครงเหล็กและบล็อคของเตาเผาซีเมนต์ชนิดหมุนจะต้องไม่แตกสลาย เมื่ออยู่ภายใต้การสั่นสะเทือนและเกิดแรงเค้นตลอดเวลา นักอุตสาหกรรมควรจะได้รับคำปรึกษาเมื่อต้องมีการเลือกใช้วัตถุฉนวนเพื่อใช้งานอย่างเช่นกรณีที่กล่าวมานี้

อิฐฉนวนทนไฟหลายชนิดแตกสลายเมื่อใช้งานในบรรยากาศของ ไฮโดรเจนในเตาถลุงโลหะบางชนิด อิฐที่ทนทานต่อปฏิกิริยาได้ดีควรเป็นอิฐที่ประกอบด้วย 95 % Al_2O_3 และ 5 % CaO ไม่ควรมี SiO_2 , Fe_2O_3 และ TiO_2 เพราะว่าจะถูกรีดิวซ์ได้เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะเช่นที่กล่าวมา

2.5.2 อิฐฉนวนกันความร้อน

อิฐฉนวนกันความร้อนคุณภาพเอชไอ ผลิตจากดินทนไฟคุณภาพสูงผสมกับวัสดุที่ไหม้ไฟซึ่งบดละเอียด มีคุณสมบัติในการนำความร้อนต่ำ มีการหดตัวน้อย มีการต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันกะทันหันได้สูง และไม่มีการยุบตัวเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีเหมาะสำหรับใช้ก่อใต้อิฐทนไฟเพื่อกันความร้อนบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง

2.5.3 อิฐฉนวนกันความร้อน เอชไอ

คุณสมบัติทางฟิสิกส์ :

ความหนาแน่น (Bulk Densi) (กรัม / ลบ.ซม.)	0.90
ความพรุนปรากฏ (Apparent Porosity) (%)	55 - 65
กำลังต้านแรงบี้บดเมื่อเย็น (Cold Crushing Strength) (กก. / ตร.ซม.)	30 – 40
ความเปลี่ยนแปลงตามยาวถาวร 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 1300 °C (%)	- 0.5
(Permanent Linear Change 2 hour at 1300 °C)	
ความทนไฟ (Refractoriness) (เอสเค)	32
(°C)	1710
การต้านอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงฉับพลันกะทันหัน (Resistance to Thermal Shock)	สูง
ความทนไฟภายใต้น้ำหนักบรรทุก (Refractoriness Under Load)	
t_a (°C)	1350
t_b (°C)	1500

การนำความร้อน (Thermal Conductivity) (กิโลแคลอรี่ / m.hr.°C)

อุณหภูมิกลาง 400 °C (Mean Temperature) 400 °C	(K.Cal. / m.hr.°C)	0.38
อุณหภูมิกลาง 600 °C (Mean Temperature) 600 °C	(K.Cal. / m.hr.°C)	0.43
อุณหภูมิกลาง 800 °C (Mean Temperature) 800 °C	(K.Cal. / m.hr.°C)	0.48
อุณหภูมิกลาง 1000 °C (Mean Temperature) 1000 °C	(K.Cal. / m.hr.°C)	0.53

ส่วนประกอบทางเคมี

Al_2O_3 + TiO_2	(%)	20
SiO_2	(%)	75
Fe_2O_3	(%)	1.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.4 ปูนทนไฟ

ปูนทนไฟเป็นตัวประสานระหว่างก้อนอิฐที่ใช้ในการก่ออิฐทนไฟ โรงงานอิฐทนไฟท่าหลวงผลิตปูนทนไฟทั้งชนิดแข็งตัวเมื่อได้รับความร้อน (Heat Setting Mortar) และแข็งตัวในอากาศ (Air Setting Mortar) และผลิตขึ้นเพื่อใช้กับอิฐทนไฟทุกชนิด ปูนทนไฟของโรงงานอิฐทนไฟท่าหลวงเป็นผงละเอียดและมีคุณสมบัติสม่ำเสมอเพื่อใช้ก่ออิฐทนไฟ โดยมีรอยต่อเชื่อมระหว่างก้อนอิฐที่บางและเกาะตัวแน่น การเลือกใช้ปูนทนไฟที่ถูกต้องเหมาะกับชนิดของอิฐทนไฟจะช่วยให้งานก่ออิฐมีคุณภาพดีสม่ำเสมอ และสามารถใช้งานได้นานกว่า

ปูนทนไฟชนิดแข็งตัวเมื่อได้รับความร้อนเป็นปูนทนไฟที่ต้องใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง เพื่อให้เกิดการเชื่อมตัว ดังนั้นในระยะเริ่มอุ่นเตาเผารอยต่อจะยังไม่มีความแข็งแรงเท่าใดนัก ฉะนั้นจึงเหมาะกับงานที่ต้องการยืดหยุ่นในขณะเริ่มอุ่นเตาเผาในระยะแรก

ปูนทนไฟชนิดแข็งตัวในอากาศเป็นปูนทนไฟที่ผสมสารเคมีพิเศษเพื่อเป็นตัวประสาน ปูนทนไฟชนิดนี้จะแข็งตัวอย่างรวดเร็วในขณะที่เริ่มอบไล่ความชื้น หรือแม้แต่ที่อุณหภูมิของบรรยากาศปกติ การเชื่อมตัวระหว่างก้อนอิฐทนไฟนี้จะดำเนินเรื่อยไปจนกระทั่งเกิดการเชื่อมตัวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะทำให้ได้งานก่ออิฐที่แข็งแรงตลอดระยะเวลาที่ใช้งาน

2.5.5 ข้อมูลทางเทคนิคสำหรับปูนทนไฟ

		คุณภาพสูง	คุณภาพต่ำ
ปริมาณอะลูมินา (Al_2O_3 Content)	(%)	40 - 43	70 – 75
ขนาดเม็ดโตที่สุด (mm .) (Maximum grain size)		0.5	0.5
ชนิดของการก่อตัว (type of set)		ด้วยความร้อน (เอช เอ็ม เค) ในอากาศ (เอ เอ็ม เค)	ด้วยความร้อน (เอช เอ็ม บี) ในอากาศ (เอช เอ็ม บี)
ความทนไฟ (refractoriness)	(เอสเค)	34	36
	(°C)	1755	1850
จำนวนปูนทนไฟต่อน้ำหนักอิฐ (Mortar required by weight of brick)	(%)	6 – 10	8 – 12
ปริมาณน้ำที่ผสมต่อน้ำหนักปูนทนไฟ (Water added by weight of refractory mortar)	(%)	20	20
เฉพาะปูนทนไฟชนิดก่อตัวด้วยความร้อน (Heat setting mortars only)			
การใช้งาน : (Application)		สำหรับอิฐทนไฟที่มีอลูมินาไม่เกิน 43 %	สำหรับอิฐทนไฟที่มีอลูมินาระหว่าง 50 – 80 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

บทที่3

การออกแบบและการดำเนินงาน

3.1 แผนการดำเนินงาน

งานที่ต้องดำเนินการ	2544							2545		
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูล										
2. ออกแบบโครงสร้างเตาหลอม										
3. ติดต่อและจัดซื้ออุปกรณ์										
4. สร้างเตาตามที่ออกแบบไว้										
5. ทดสอบเตาหลอม										
6. ปรับปรุงและแก้ไข										
7. รวบรวมข้อมูลและสรุปผล										

3.2 วัตถุทนไฟ [5: P 79-87]

เนื่องจากเตาหลอมนั้นมีอุณหภูมิ 1000° c ดังนั้นวัสดุที่นำใช้สร้างเตาหลอมต้องใช้วัสดุทนไฟมาเป็นส่วนประกอบในการสร้าง วัสดุทนไฟที่จะนำมาใช้นั้นจะต้องมีคุณสมบัติที่ทนความร้อนได้สูง และยังสามารถรักษาคุณสมบัติทางกลไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง ในทางการค้าแบ่งวัสดุทนไฟออกเป็น ดินทนไฟ(Fiercely), คอนกรีตทนไฟ (Costable), ปูนทนไฟ(Mortar), ซิลิกา (Silica), เบสิก (Basic) และ High Alumina ซึ่งรวมทั้งมัลไลท์ และ วัสดุทนไฟคอร์รันดัมมเบส บางครั้งก็แบ่งตามคุณสมบัติทางเคมี ออกเป็น กรด,ด่าง และ กลาง

ชนิดกรด : ซิลิท,ดินทนไฟ,เซอร์คอน และ เซอร์โคเนียม

ชนิดด่าง : แมคนิไซท์ และ โดโลไมท์

ชนิดกลาง : อลูมิน่า,โครม,คาร์บอน,ซิลิคอนคาร์ไบด์และมัลไลด์

ในการเลือกวัสดุทนไฟนอกจากคุณสมบัติทางการภาพแล้ว ยังต้องพิจารณาคุณสมบัติทางเคมีด้วยว่า เมื่อขณะที่อุณหภูมิสูงนั้น สารต่างๆที่ประกอบอยู่ในวัสดุทนไฟจะเกิดออกซิเดชั่นออกมาผสมกับโลหะที่เราหล่ออยู่หรือไม่

3.3 ฉนวนกันความร้อน[5: P 79-87]

ฉนวนกันความร้อนที่ใช้จะเป็นฉนวนกันความร้อนแบบเซรามิคไฟเบอร์เพราะเป็นฉนวนกันความร้อนที่สามารถทนความร้อนได้สูงถึง1200 °C และมีน้ำหนักเบา ส่วนความหนาของฉนวนคือ 25 mm จะปิดทับอิฐ และมีโครงเตาภายนอกมาปิดทับอีกชั้นหนึ่งเพื่อความแข็งแรง คุณสมบัติของฉนวนแบบ เซรามิคไฟเบอร์ประเภทต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 3.1

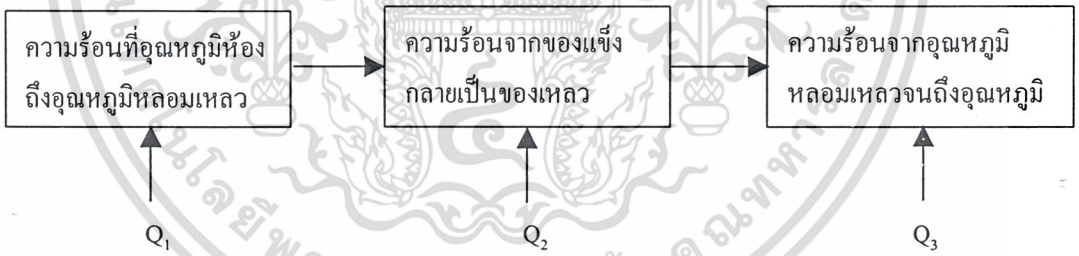
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

45809

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติด้านเคมีของฉนวนกันความร้อน [5: P 80]

	Durablanket Hot Face	Durablanket	Duraback
Al2O3	52-53%	47.90%	37-43%
SiO2	46-47%	51.70%	55-60%
Fe2O3	0.06	0.04%	1.30%
TiO3	0.04	0.00%	Up to 1.7%
Leachable Chlorides	< 10 PPM	< 10 PPM	< 10 PPM
Alkali	0.30%	-	-
CaO	-	-	Up to 7.5%
MgO & other Trace Inorganic	0.01%	-	Up to 0.3%

3.4 การคำนวณหากำลังไฟฟ้าที่ใช้ [1: P 105 - 118]



กำหนด

อุณหภูมิหลอมเหลว 660°C

อุณหภูมิเท 900°C

Q = ปริมาณความร้อน (kcal)

K = Thermal Conductivity (kcal/mhC)

S = ความร้อนจำเพาะของอะลูมิเนียมมีค่า 0.2098 cal/gmC

L = ความร้อนแฝงของอะลูมิเนียมมีค่า 92.4 cal/gm

3.4.1 ความร้อนในการหลอมละลาย

$$Q = m(s\Delta T + L + st_0) \quad (3.1)$$

$$= 10[0.2096 \times (660-25) + 92.4 + 0.2096 \times (900-660)]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

= 2758 kcal.

3.4.2 ความสูญเสียที่เบ้าหลอมซิลิกอนคาร์ไบด์

$Q = ms\Delta T$ เมื่อ s คือค่าความร้อนจำเพาะของซิลิกอนคาร์ไบด์ (3.2)

$= 3 \times (0.32) \times (660-25+240)$

$= 840$ kcal.

3.4.3 กำลังที่ใช้ในการหลอมอะลูมิเนียม 10 kg.

ใช้เวลาในการหลอมประมาณ 90 นาที

จาก $P = Q/0.24t$ (3.3)

ดังนั้นจะได้ $P = 2758+840/(0.24 \times 60 \times 90)$

$= 2.776$ kwatt.

3.4.4 คำนวณหาความร้อนสูญเสีย (Heat loss)

ผนังที่ใช้มี 2 ส่วน คือชั้นในจะใช้อิฐทนไฟ มีค่า K = 0.21 หนา 76 mm. ส่วนผนังด้านนอกใช้ฉนวน มีค่า K = 0.27 หนา 25 mm.

กำหนด T_1 ด้านในเตา = 1000 °C ส่วน T_2 ด้านนอกเตา = 50 °C

จาก $Q = kA(\Delta T)$

T_3 | T_2 | T_1

25 76

จะได้ $Q = 0.21\ A(1000- T_2)/0.076$ _____ 1

$Q = 0.27\ A(T_2 - 50)/0.025$ _____ 2

สมการ 1=2 จะได้

$0.21\ A(1000- T_2)/0.76 = 0.27\ A(T_2 - 50)/0.025$

$T_2 = 243.55$ °C

กำหนด A = พื้นที่ผนังเตาด้านนอก

$= 450 \times 460$ mm^2.

จะได้ $Q = [0.21 \times 0.450 \times 0.460 \times (1000-243.55)] / 0.076$

$= 714.845$ kcal/h.

ใช้เวลา 90 นาที ดังนั้น $Q = 1.5 \times 714.845$

$= 1072.27$ kcal.

$P_{loss} = 1072.27/(0.24 \times 60 \times 90)$

$= 0.827$ กิโลวัตต์

ผนังมีทั้งหมด 6 ด้าน ดังนั้น $P_{loss} = 0.827 \times 6$

$= 4.964$ กิโลวัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังที่ใช้ทั้งหมด = 2.776+4.964

= 7.74กิโลวัตต์

เผื่อค่าความสูญเสียโดยจะใช้กำลังทั้งหมดประมาณ 10 กิโลวัตต์

3.5 การออกแบบขดลวดความต้านทาน [3: P 1-15]

3.5.1 การคำนวณและการออกแบบลวดทำความร้อนชนิดกลม

สิ่งที่จะต้องทราบก่อนการคำนวณลวด คือ

1. อุณหภูมิภายในเตาที่ต้องการ
2. กำลังวัตต์ หรือกิโลวัตต์ที่ต้องการ
3. แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จะจ่ายให้กับเตา (ทั้งแรงเคลื่อนและแรงเฟส)
4. พื้นที่ที่ใช้วางขดลวดความต้านทาน
5. คุณสมบัติของขดลวดความต้านทาน
6. คุณสมบัติของฉนวนและอิฐทนไฟ

เมื่อทราบทั้ง 6 หัวข้อแล้ว ขั้นต่อไปจะต้องเลือกชนิดของลวดทำความร้อนว่าจะใช้ชนิด Kanthal หรือชนิด Nikrothal โดยดูคุณสมบัติของลวดทั้ง 2 ชนิด จากตารางที่ 6 (ในภาคผนวก)

เมื่อได้ชนิดของลวดที่ต้องการแล้ว ขั้นต่อไปจะต้องกำหนด Surface Load (W / cm^2) ที่เหมาะสมสำหรับลักษณะและอุณหภูมิของเตา

Surface Load คือ กำลังวัตต์ที่ป้อนให้กับขดลวดความต้านทานชิ้นนั้น หารด้วยพื้นที่ผิวของขดลวดความต้านทานส่วนที่ให้ความร้อนจะได้ตัวเลขจำนวนหนึ่ง เลขจำนวนนั้นเรียกว่า Surface Load

$$\rho = P / A_c \qquad (3.4)$$

เมื่อ

ρ ; Surface Load

P ; กำลังวัตต์

A_c ; พื้นที่ผิวเฉพาะส่วนที่ให้ความร้อน

ในระบบเมตริกจะกำหนด Surface Load เป็นวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (W / cm^2) แต่ระบบอื่น อาจเป็นวัตต์ต่อตารางนิ้ว (W / in^2)

อุณหภูมิบนขดลวดความต้านทานมีความสำคัญมากต่อขดลวดความต้านทานซึ่งจะมีผลให้ขดลวดความต้านทานมีอายุการใช้งานสั้น อุณหภูมิบนขดลวดความต้านทานจะกำหนดจาก Surface Load ของตัวมันเองและสภาพรอบๆ ขดลวดความต้านทานว่าจะระบายความร้อนออกจากตัวขดลวดความต้านทานได้ดีเพียงใด

ความจริงแล้วลวด Kanthal สามารถที่จะให้อุณหภูมิสูงกว่าลวด Nikrothal นั่นหมายถึงว่าลวด Kanthal สามารถกำหนดให้มี Surface Load ได้สูงกว่าลวด Nikrothal และอายุการใช้งานจะยืนนานกว่าหรือเท่ากัน

มีปัจจัยสำคัญอยู่ 3 ประการในการพิจารณากำหนด Surface Load ของขดลวดความต้านทานใดๆก็ตามดังนี้ คือ

1. อุณหภูมิของผิวขดลวดความต้านทาน
2. รูปทรงของขดลวดความต้านทาน
3. กระแสที่ไหลผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยิ่งทำให้ขดลวดความต้านทานระบายความร้อนออกจากตัวได้เร็วเท่าไร จะทำให้สามารถกำหนดSurface Load ได้สูงเท่านั้น ดังนั้น ขดลวดชนิด R.O.B. (Rod Over Bend) จึงเป็นชนิดที่สามารถให้ Surface Load ได้สูงที่สุดในขบวนการ ในทางกลับกันการพันขดลวดความต้านทานเป็นคอล์ย มีส่วนที่บังกัน ไม่สามารถจะระบายความร้อนได้ดี จึงไม่สามารถที่จะกำหนดให้มี Surface Load สูงๆได้ หรือจะเห็นว่าขดลวดความต้านทานพันเป็นขดบนท่อกระเบื้องจะมี Surface Load สูงกว่าขดลวดที่ฝังอยู่ในก้อนอิฐ

3.5.2 การหาขนาดของขดลวด

ก) การกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด

มีการคำนวณ 2 วิธี คือ

- คำนวณตามทฤษฎี
- คำนวณโดยวิธีลัด

(ทั้ง 2 วิธี ให้ผลเช่นเดียวกัน)

การคำนวณตามทฤษฎีสามารถคำนวณได้จากสูตร $P/V)^2 \rho C_t/p$

$$d = \frac{1}{2.91} \sqrt[3]{\frac{P}{E}^2 \frac{\rho C_t}{p}} \qquad (3.5)$$

เมื่อ

P	;	กำลังวัตต์ (Watts)
E	;	แรงเคลื่อนไฟฟ้า (Volts)
ρ	;	ความต้านทานจำเพาะของขดลวดความต้านทาน (Ω mm ^{2} / m^{-1})
C_t	;	สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิของขดลวดความต้านทาน
P	;	Surface Load ขดลวดของขดลวดความต้านทาน (W / m^2)

การคำนวณ

กำหนดให้

กำลังวัตต์	=	10,000	Watts
แรงเคลื่อนไฟฟ้า	=	220	Volts
ความต้านทานจำเพาะของ heater	=	1.39	
สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิของ heater	=	1.06	
Surface load ของ heater	=	3.5 W/cm^2	

แทนค่าลงในสูตร

$$d = \frac{1}{2.91} \sqrt[3]{\frac{3,333.33}{220}^2 \frac{1.39x1.06}{3.5}} \qquad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

= 1.57 mm.

= 1.5 mm.

จากตาราง KANTHAL AF จะเห็นว่าลวดขนาด 1.5 mm. ใกล้เคียงที่สุด ควรเลือกใช้ขนาด 1.5 mm.

การคำนวณโดยวิธีลัดซึ่งจะได้ผลเช่นเดียวกัน กระทำได้คือการใช้พื้นที่ผิวของลวดความ และ ความต้านทานของลวดขณะเย็น จากข้อมูลทั้ง 2 อัน จะได้อัตราส่วนระหว่างพื้นผิวต่อความต้านทาน (cm^2/Ω)

ถ้ากำหนดข้อมูลทางไฟฟ้าเราสามารถคำนวณหา (cm^2/Ω) ได้ดังนี้

$$cm^2/\Omega = I^2Ct/p \qquad (3.7)$$

เมื่อ

I ; กระแสไฟฟ้าที่ผ่านขดลวดความต้านทาน (Ampere)

C_t ; สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิของลวด

P ; Surface Load (W/cm^2)

ถ้าคำนวณหา cm^2/Ω เราก็สามารถไล่จากตารางลวดเพื่อหาขนาดของลวดได้อย่างไรก็ตาม ขนาดลวดที่ได้ จะเหมาะสมหรือไม่ จะแล้วแต่ชนิดของเตา และลักษณะการใช้งานด้วย

ใช้ข้อมูลเช่นเดียวกับตัวอย่างการคำนวณทางทฤษฎีและก่อนจะใช้สูตร จะต้องคำนวณหากระแส ดังนี้

$$I = P/E \qquad (3.8)$$

$$= 3{,}333.33/220$$

$$= 15.15\ A$$

จากตาราง KANTHAL AF จะเห็นว่าค่า cm^2/Ω ที่ใกล้เคียงที่สุด นั่นคือ ลวดขนาด 1.5 mm. ที่ควรเลือกใช้

3.5.3 การคำนวณเพื่อออกแบบลวดชนิดขดเป็นคอยล์

หลังจากที่ได้กำหนดขนาดของลวดแล้ว ขั้นต่อไป จะต้องกำหนดความยาวของลวด เพื่อจะพันเป็นคอยล์ ขั้นแรก เราต้องคำนวณหาความต้านทานขณะเย็น แต่ก่อนที่จะคำนวณ เราต้องทราบความต้านทานของลวดขดลวดความต้านทานขณะร้อนก่อน คือ

$$R_T = V^2/P \qquad (3.9)$$

เมื่อ

R_t ; ความต้านทานขณะลวดร้อน (อุณหภูมิใช้งาน)

V ; แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดความต้านทาน

P ; กำลังวัตต์ของขดลวดความต้านทาน

จากตารางKANTHAL AF จะเห็นว่ามีช่องบอกความต้านทานของลวดต่อความยาวของลวดขนาดต่างๆ ฉะนั้น ความยาวของลวดขณะเย็นก็คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L = \frac{R_{20}}{\Omega/m} \qquad (3.10)$$

ตัวอย่าง (ใช้รายละเอียดจากตัวอย่างการคำนวณทฤษฎี ที่กล่าวมาแล้ว)

กำหนดให้

P = 3,333.33 Watts

V = 220 Volts

เลือกลวดชนิด AF

อุณหภูมิลวด 1,200 $^{\circ}$ C

สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิ C_t 1.06

Surface Load 3.5 W / cm^2

ขนาดลวดที่คำนวณแล้ว คือ 1.5 mm.

R_t = (220)^2 / 3333.33

= 14.52 Ω

ค่าของความต้านทานขณะเย็นหาได้จากสูตร

$$R_{20} = \frac{Rt}{Ct} \qquad (3.11)$$

R_{20} = $\frac{14.52}{3333.33}$

= 13.699 Ω

จากตาราง KANTHAL AF ค่าความต้านทานต่อความยาวของลวด 1.5 mm. คือ 0.787 Ω/m.

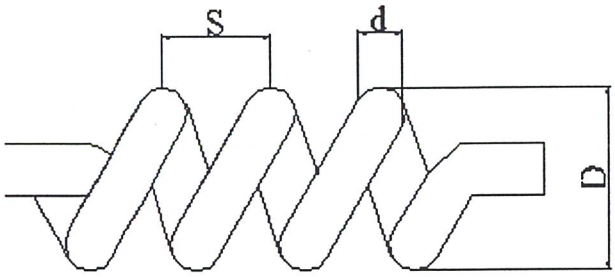
ความยาวของลวดที่จะต้องตัด คือ (ยังไม่เผื่อปลายเพื่อต่อสายไฟ)

Length = 13.699/0.787

= 17.405 m.

หลังจากที่กำหนดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางแล้ว และได้ความยาวเรียบร้อยแล้วขั้นต่อไปจะต้องกำหนดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของคอยล์ ดังรูปที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แสดงการวัดขนาดต่างๆของขดลวด

D ; ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของคอยล์

d ; เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของขดลวด

S ; ระยะห่างระหว่างเกลียว

จากคู่มือ Kanthal AF ได้ให้ข้อแนะนำอัตราส่วนระหว่าง D / d สำหรับเตาอุตสาหกรรมที่อุณหภูมิต่างๆและลวดประเภทต่างๆดังนี้

ลวดประเภท Kanthal

อุณหภูมิผิวลวด	วางในร่อง	พันกระบอก
ต่ำกว่า 1,000 °C	D / d = 6 ถึง 9	12 ถึง 14
สูงกว่า 1,000 °C	D / d = 5 ถึง 8	12 ถึง 14

การเลือกอัตราส่วนต่ำ จะทำให้ความเครียดในลวดสูง แต่ถ้าเลือกอัตราส่วนสูงจะทำให้ขดลวดล้มง่าย

จากตัวอย่างที่กล่าวมาข้างต้น อัตราส่วนของ D / d (เพื่อหาขนาด D)คือเลือกขนาด D/d=8

ดังนั้นจะได้ D = 8 x 1.5

= 12 mm.

ตามความยาวของลวดที่คำนวณได้ จะคำนวณจำนวนรอบ(W)ที่จะต้องพันได้ดังนี้

$$W = \frac{1{,}000xl}{\pi(D-d)} \qquad (3.12)$$

$$W = \frac{1000x17.405}{\pi(12-1.5)}$$

$$= 527.65 \text{ รอบ}$$

ความยาวของขดลวดเมื่อชิดกัน

$$L_w = Wd \qquad (3.13)$$

$$L_w = 527.65 \times 1.5$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

= 791.476 mm.

เพื่อให้ระยะ pitch สม่ำเสมอ ได้กำหนดอัตราส่วน s / d = 2-4 เลือกใช้ค่า s = 2

ความยาวลวดเมื่อยืดตามระยะ pitch แล้ว

$$L = L_w \times S \qquad (3.14)$$

S = ระยะห่างระหว่างขดต่อขด ซึ่งกำหนดได้จาก

S = d x (2 ถึง 4)

หรือ S จะต้องอยู่ระหว่าง 2 ถึง 4 เท่าของความโตเส้นผ่านศูนย์กลางลวด

L = 791.476 x 2

= 1582.95 mm.

ความยาวของเตาที่จะร้อยลวด L_f = 200 mm.

ดังนั้นจำนวนขดลวดที่ใช้ = 1582.95 / 200

= 7.914 ขด / เฟส

ดังนั้นจะใช้ลวดประมาณ 8 ขด/เฟส

คำนวณค่าใหม่จะได้

L = 200 x 8

= 1600 mm.

L_w = 1600 / 2

= 800 mm.

W = 800 / 1.5 =533.33 รอบ

Length = 533.33(12-1.5)π / 1000

= 17.59 m.

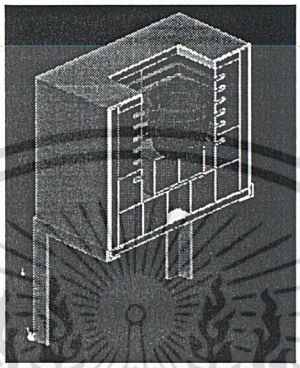
ดังนั้น - จะใช้ขดลวด 8 ขด/เฟส

- ความยาวขดละ 200 มม.
- ค่าความยาวที่ยืดตามระยะ pitch แล้ว / 1เฟส คือ 1600 มม.
- **3 เฟส** จะใช้ทั้งหมด 24 ขด
- ความยาวลวดที่ขดแล้วยืดตามระยะ pitch ทั้งหมด 4800 มม.
- ค่าความต้านทาน ต่อ 1 เฟส คือ 14.52 Ω
- ปริมาณกระแสไฟฟ้า ต่อ 1 เฟส คือ 15.15 A.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

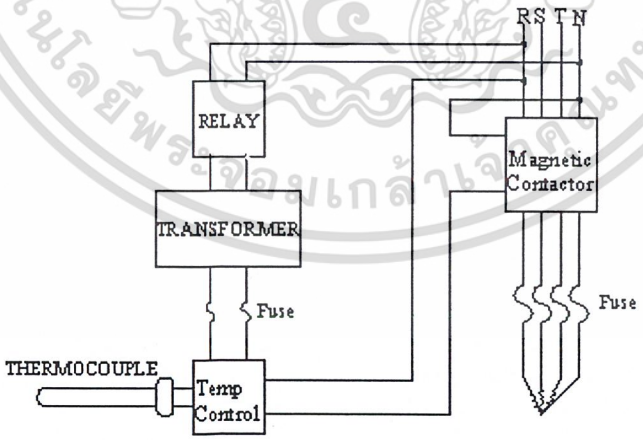
3.6 การออกแบบตัวเตาหลอม

เตาหลอมที่ออกแบบจะมีชั้นของฉนวน 2 ชั้น ชั้นที่หนึ่งคือ อิฐทนไฟซึ่งจะถูกเซาะเป็นร่องเพื่อใส่ขดลวดต้านทาน ชั้นที่สองซึ่งเป็นชั้นถัดออกมาจะเป็น ceramic fiber ซึ่งชั้นของอิฐและ ceramic fiber จะถูกก่ออยู่ภายในโครงที่ทำจากเหล็กฉากหนา 4 mm ทางด้านล่างของเตาจะเจาะรูไว้เพื่อใมช้แม่แรงยกเบ้าหลอมขึ้นเหนือปากเตาได้ส่วนตัวโครงสร้างของเตาจะใช้เหล็กแผ่นมาทำเป็นโครงสร้าง ปิดทับโครงอีกชั้นหนึ่ง ขาตั้งจะทำจากเหล็กฉาก ซึ่งรูปแบบที่ออกแบบแล้วแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ภาพของเตาหลอมที่ออกแบบ

3.7 การออกแบบวงจรไฟฟ้า



รูปที่ 3.3 วงจรไฟฟ้า

เมื่อเปิดสวิตช์รีเลย์จะทำงาน ทำให้ไฟ 220 V.ผ่านเข้าตัวควบคุมอุณหภูมิโดยผ่านการแปลงแรงดันผ่าน Transformer เหลือ 110 V. Thermocouple ที่ต่ออยู่กับ Them control ทำหน้าที่ตรวจสอบอุณหภูมิภายในเตาหลอม ถ้ายัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม้ได้อุณหภูมิตามที่ต้องการ Them control จะสั่งให้ สวิตซ์แม่เหล็กไฟฟ้า(Magnetic contractor) ทำงานทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลเข้าสู่ขดลวดความต้านทาน เพื่อผลิตความร้อน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการแล้วตัวควบคุมอุณหภูมิ จะหยุดสั่งงาน สวิตซ์แม่เหล็กไฟฟ้าทำให้ตัดการจ่ายไฟให้กับขดลวดความต้านทาน

3.8 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างเตาหลอม

3.8.1 ส่วนตัวเตาและฝาเตา

1. เหล็กฉาก หนา 4 มม. ความกว้าง 1.5 นิ้ว
2. อิฐทนไฟ
3. ปูนทนไฟ
4. เซรามิคไฟเบอร์
5. ขดลวดความต้านทานขนาด 1.5 มม.
6. เหล็กแผ่น

3.8.2 ส่วนฝาเตา

1. เหล็กฉาก หนา 4 มม. ความกว้าง 1.5 นิ้ว
2. อิฐทนไฟ
3. ปูนทนไฟ
4. เซรามิคไฟเบอร์
5. ขดลวดความต้านทานขนาด 1.5 มม.
6. เหล็กแผ่น

3.8.3 ส่วนชุดยก

1. แม่แรง
2. เพลากลม
3. คอนกรีตทนไฟ

3.8.4 ส่วนชุดควบคุมและให้ความร้อน

1. กล่องไฟฟ้า ขนาด 25x35x15 ซม.
2. ตัวควบคุมอุณหภูมิ (Temp control)
3. สวิตซ์แม่เหล็กไฟฟ้า
4. อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Thermocouple)
5. รีเลย์
6. ฟิวส์
7. สวิตซ์ฉุกเฉิน
8. สวิตซ์เปิด-ปิด
9. สายไฟ
10. หางปลา
11. เทปพันสายไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9 ขั้นตอนการปฏิบัติงาน

1. เชื่อมโครงสร้างเตาและฐาน
2. เซาะร่องอิฐสำหรับร้อยขดลวดความต้านทาน
3. นำอิฐที่เซาะร่องเรียบร้อยแล้วมาก่อเป็นตัวเตา
4. ใส่ขดลวดความต้านทานตามร่องอิฐที่ได้เซาะไว้
5. ใส่เซรามิคไฟเบอร์
6. ติดตั้งแม่แรงสำหรับยกเบ้าหลอม
7. นำแผ่นเหล็กมาประกอบรอบตัวเตา
8. ทำฝาเตา(ซึ่งมีรูปแบบคล้ายตัวเตา)
9. ติดตั้งระบบควบคุมอุณหภูมิ
10. ทดสอบการทำงานของเตาหลอมอะลูมิเนียมไฟฟ้า
11. ตบแต่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการดำเนินงาน

ขั้นตอนการทดลองและผลที่ได้จากการทดลองโดยทำการทดลองขึ้นเพื่อหาประสิทธิภาพและความสามารถของเตาหลอม ซึ่งจะทำการหลอมอะลูมิเนียม 10 กิโลกรัม แล้วนำลงไปเทในแบบหล่อหลังจากนั้นทำการหลอมอะลูมิเนียมเพิ่ม 10 กิโลกรัม โดยที่เบ้าแรกจะจับเวลาในขณะที่เบ้าเย็นจนกระทั่งอะลูมิเนียมหลอมละลายและถึงอุณหภูมิเทของอะลูมิเนียม เบ้าที่สองจะจับเวลาเมื่อเริ่มใส่อะลูมิเนียมและวัดอุณหภูมิขณะใส่อะลูมิเนียมเพื่อที่จะเปรียบเทียบว่าเบ้าที่สองใช้เวลาในการหลอมแตกต่างจากเบ้าแรกอย่างไร จากนั้นทำการบันทึกผลของการวัดอุณหภูมิกับเวลาเพื่อหาเวลาทั้งหมดที่จะให้ความร้อนแก่อะลูมิเนียมก่อนที่จะนำไปเทลงแบบหล่อ

4.1 ขั้นตอนการทดลอง

4.1.1 การเปิดเตาหลอมครั้งแรก

การทดลองครั้งแรกหลังจากสร้างเตาหลอมเสร็จ เพื่อตรวจสอบสภาพการทำงานเบื้องต้นของ วงจรควบคุม รวมถึงความบกพร่องต่างๆ เช่น การบิดตัวของขดลวดออกมาจากร่องอิฐฉนวนทนไฟหรือไม่ และ เป็นการไล่ความชื้นที่มีอยู่ภายในเตา โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. เปิดสวิตช์เตาหลอม ตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 100 °C เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 100 °C ทำการคงอุณหภูมิไว้ประมาณ 5 นาที
2. ตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 200°C เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 200 °C ทำการคงอุณหภูมิไว้ประมาณ 5 นาที
3. ตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 300°C เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 300 °C ทำการคงอุณหภูมิไว้ประมาณ 5 นาที
4. ปิดเตา

จากการทดลองตามขั้นตอนข้างต้น ผลที่ได้คือ มีน้ำเกาะอยู่บนปากเตา น้ำที่เกาะอยู่บนปากเตานี้ มาจากความชื้นที่ยังคงอยู่ในปูนทนไฟ ขณะทำการก่ออิฐ และมีควันลอยออกมาจากภายในเตาเนื่องจากเศษฝุ่นผงได้ถูกเผาไหม้

4.1.2 การหลอมอะลูมิเนียมเบ้าแรก

1. ใส่อะลูมิเนียม น้ำหนัก 300 กรัม ลงในเบ้าหลอม
2. ทำการเปิดสวิตช์เตาหลอมโดยตั้งอุณหภูมิตอนแรกไว้ที่ 100 °C รอจนกระทั่งอุณหภูมิภายในเตาหลอมมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิที่ตั้งไว้
3. ตั้งอุณหภูมิเพิ่มขึ้นหลังจากที่อุณหภูมิภายในเตามีค่าคงที่แล้ว ครั้งละ 100 °C จนถึง 800 °C
4. บันทึกการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทียบกับเวลา และทำการคงอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิต่างๆที่เพิ่มขึ้น
5. ในขณะที่อุณหภูมิถึงประมาณ 600-800 °C ทำการตรวจสอบอะลูมิเนียมในเบ้าหลอมว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร

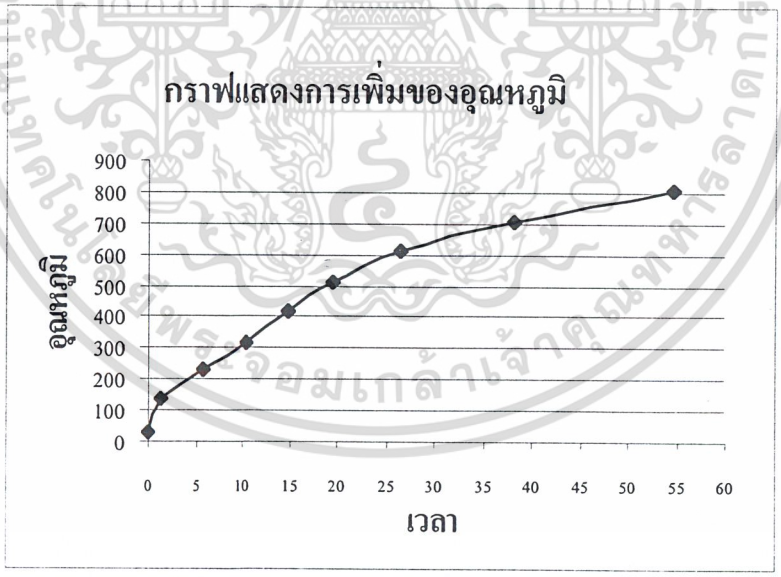
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เมื่ออะลูมิเนียมที่อยู่ในเบ้าหลอมละลายหมดแล้วใส่ผง slag remover ลงในเบ้าหลอม รอจนกระทั่ง slag รวมตัวกัน แล้วจึงทำการตักออก

7. ยกเบ้าหลอมออกมาเทอะลูมิเนียมลงสู่แบบหล่อที่เตรียมไว้

ตารางที่ 4.1 บันทึกผลการทดลองที่ 1

ช่วงอุณหภูมิ °C	เวลาที่ใช้ (นาที)	อุณหภูมิที่ขึ้นไปสูงสุด °C	หมายเหตุ
35 - 100	1.35	139	คงอุณหภูมิไว้ 3 นาที
100 - 200	1.57	228	คงอุณหภูมิไว้ 3 นาที
200 - 300	1.52	320	คงอุณหภูมิไว้ 3 นาที
300 - 400	1.53	417	คงอุณหภูมิไว้ 3 นาที
400 - 500	1.58	514	คงอุณหภูมิไว้ 5 นาที
500 — 600	2.05	611	คงอุณหภูมิไว้ 10 นาที
600 - 700	1.57	709	คงอุณหภูมิไว้ 15 นาที
700 - 800	1.52	807	คงอุณหภูมิไว้ 20 นาที อลูมิเนียมจึงละลายหมด



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงผลการทดลองที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 การหลอมอะลูมิเนียมเบ้าสอง

1. หลังจากหลอมอะลูมิเนียมเบ้าแรกเสร็จและเทออกจากเบ้าหลอมใส่อะลูมิเนียม น้ำหนัก 300 กรัม ลงในเบ้าหลอม

2. ทำการเปิดสวิตซ์เตาหลอมโดยตั้งอุณหภูมิตอนแรกไว้ที่ 770 °C

3. บันทึกการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทียบกับเวลา(จับเวลาทุกๆ 3 นาที) และทำการคงอุณหภูมิไว้ที่ 770 °C

4. ทำการตรวจสอบอะลูมิเนียมในเบ้าหลอมว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างไรเทียบกับเวลา

5. เมื่ออะลูมิเนียมที่อยู่ในเบ้าหลอมละลายหมดแล้วใส่ผง slag remover ลงในเบ้าหลอม รอจนกระทั่ง slag รวมตัวกัน แล้วจึงทำการตักออก

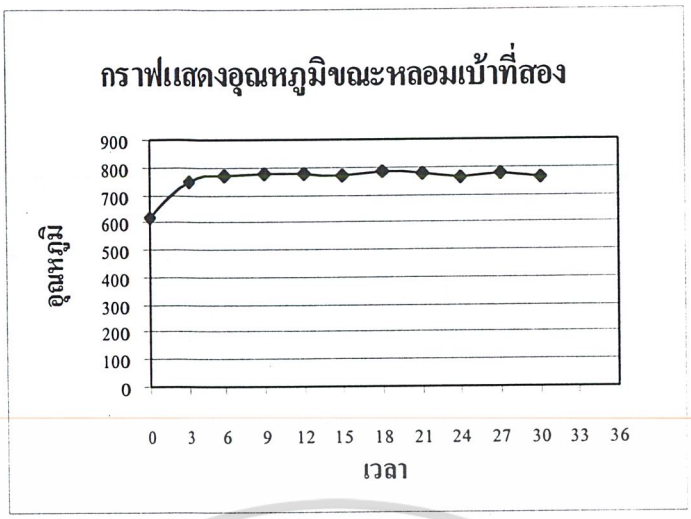
6. ยกเบ้าหลอมออกมาเทอะลูมิเนียมลงสู่แบบหล่อที่เตรียมไว้

เมื่อทำการเปิดสวิตซ์เตาหลอมอุณหภูมิในเตาหลอมมีค่า 615 °C แต่อุณหภูมิที่ตั้งไว้มีค่า 770 °C เนื่องจากหลังจากเทน้ำอะลูมิเนียมในเบ้าแรกแล้วความร้อนในเตาหลอมมีการระบายออกสู่บรรยากาศภายนอก

ตารางที่ 4.2 บันทึกผลการทดลองที่ 2

นาทีที่	อุณหภูมิ °C	หมายเหตุ
3	748	-
6	769	-
9	776	อะลูมิเนียมเริ่มละลาย
12	775	-
15	770	-
18	784	-
21	774	อะลูมิเนียมยังละลายไม่หมด
24	762	-
27	776	-
30	764	อะลูมิเนียมละลายหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลการทดลองที่ 2

ในการหลอมอะลูมิเนียมเบ้าสอง ใช้เวลาทั้งหมดประมาณ 30 นาที จะสังเกตเห็นว่าเวลาที่ใช้ในการหลอมอะลูมิเนียมลดลงประมาณ 60 % จากเวลาเดิม เนื่องเตาหลอมสามารถเก็บความร้อนจากการหลอมเบ้าแรกไว้ภายในเตาได้

4.1.4 การหลอมอะลูมิเนียมเบ้าสอง(เพิ่มน้ำหนักของอะลูมิเนียมเป็น 2 เท่าจากเดิม)

1. หลังจากหลอมอะลูมิเนียมเบ้าแรกเสร็จและเทออกจากเบ้าหลอมใส่อะลูมิเนียม น้ำหนัก 600 กรัม ลงในเบ้าหลอม
2. ทำการเปิดสวิตซ์เตาหลอมโดยตั้งอุณหภูมิตอนแรกไว้ที่ 770 ^{o}C
3. บันทึกการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทียบกับเวลา(จับเวลาทุกๆ 3 นาที) และทำการคงอุณหภูมิไว้ที่ 770 ^{o}C
4. ทำการตรวจสอบอะลูมิเนียมในเบ้าหลอมว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างไรเทียบกับเวลา
5. เมื่ออะลูมิเนียมที่อยู่ในเบ้าหลอมละลายหมดแล้วใส่ผง slag remover ลงในเบ้าหลอม รอจนกระทั่ง slag รวมตัวกัน แล้วจึงทำการตักออก
6. ยกเบ้าหลอมออกมาเทอะลูมิเนียมลงสู่แบบหล่อที่เตรียมไว้

เมื่อทำการเปิดสวิตซ์เตาหลอมอุณหภูมิในเตาหลอมมีค่า 615 ^{o}C แต่อุณหภูมิที่ตั้งไว้มีค่า 770 ^{o}C เนื่องจากหลังจากเทน้ำอะลูมิเนียมในเบ้าแรกแล้วความร้อนในเตาหลอมมีการระบายออกสู่บรรยากาศภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 บันทึกผลการทดลองที่ 3

นาทีที่	อุณหภูมิ ^{0}C	หมายเหตุ
3	770	-
6	771	-
9	763	-
12	769	-
15	761	-
18	771	อะลูมิเนียมเริ่มละลาย
21	779	-
24	782	-
27	781	-
30	775	อะลูมิเนียมละลายหมด

ในการหลอมอะลูมิเนียมเบ้าสอง ใช้เวลาทั้งหมดประมาณ 30 นาที จะสังเกตเห็นว่าเวลาที่ใช้ในการหลอมอะลูมิเนียมมีเวลาเท่ากันกับเวลาที่ใช้ในการหลอมอะลูมิเนียม 300 กรัม เนื่องจากอุณหภูมิหลอมเหลวของอะลูมิเนียมอยู่ที่ 660 ^{o}C ฉะนั้นไม่ว่าจะหลอมอะลูมิเนียมน้ำหนักขนาดใดก็ตาม(ไม่เกิน 10 กิโลกรัม) เวลาที่ใช้ในการหลอมจะไม่แตกต่างกันมากนัก

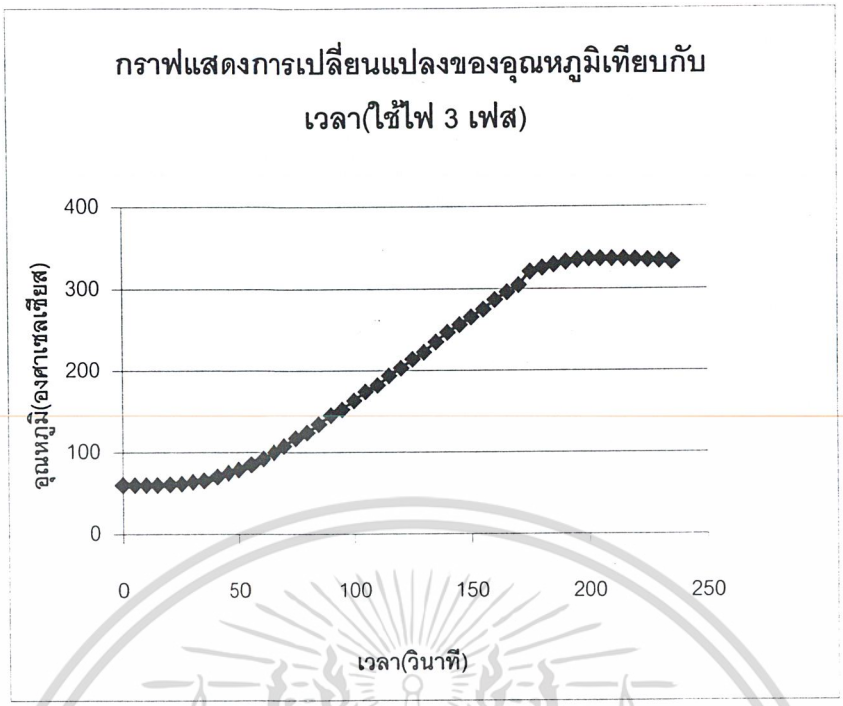
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทดลองหาอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ

ตารางที่ 4.4 แสดงข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา (ใช้ไฟ 3 เฟส)

วินาทีที่	อุณหภูมิ ^0C	วินาทีที่	อุณหภูมิ ^0C
0	60	120	203
5	60	125	214
10	60	130	223
15	60	135	235
20	61	140	247
25	62	145	256
30	64	150	266
35	66	155	275
40	70	160	287
45	75	165	296
50	79	170	305
55	85	175	321
60	92	180	326
65	100	185	330
70	108	190	333
75	117	195	335
80	124	200	337
85	134	205	337
90	145	210	337
95	152	215	337
100	163	220	336
105	174	225	335
110	182	230	334
115	194	235	333

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



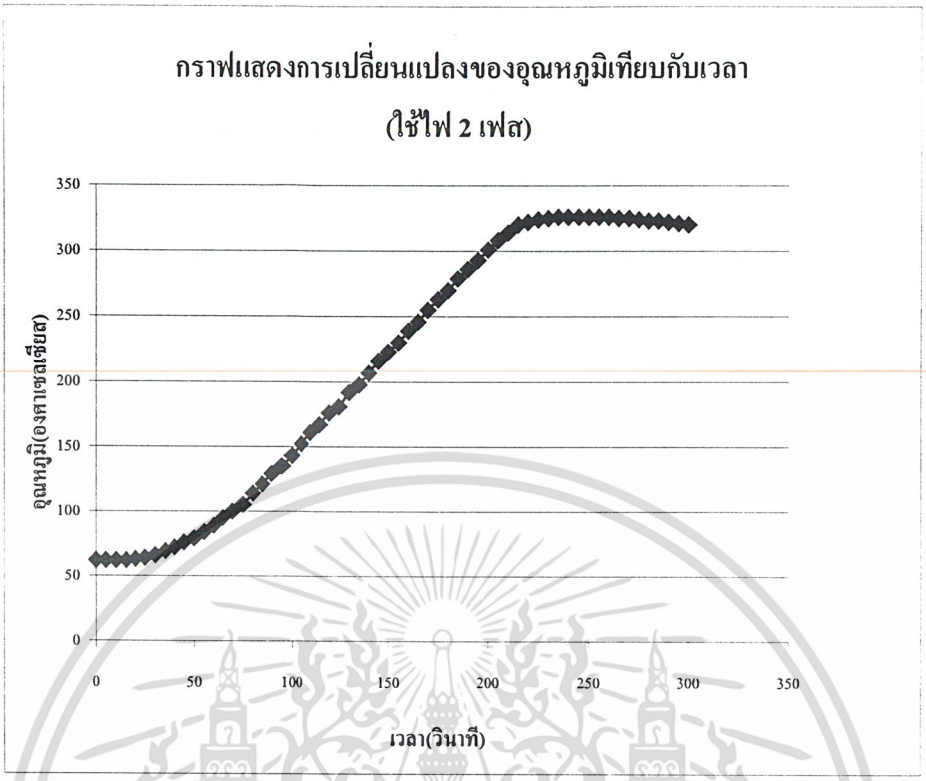
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทียบกับเวลา (ใช้ไฟ 3 เฟส)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 แสดงข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา (ใช้ไฟ 2 เฟส)

วินาทีที่	อุณหภูมิ ^{0}C	วินาทีที่	อุณหภูมิ ^{0}C
0	62	155	230
5	62	160	239
10	62	165	246
15	62	170	255
20	63	175	263
25	64	180	270
30	66	185	279
35	69	190	286
40	72	195	293
45	76	200	301
50	79	205	308
55	84	210	314
60	89	215	320
65	95	220	322
70	100	225	324
75	105	230	325
80	114	235	326
85	121	240	326
90	129	245	326
95	135	250	326
100	143	255	326
105	152	260	326
110	161	265	325
115	167	270	325
120	176	275	324
125	181	280	323
130	192	285	323
135	198	290	322
140	207	295	321
145	216	300	320
150	223		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทียบกับเวลา (ใช้ไฟ 2 เฟส)

จากกราฟรูปที่ 4.3 และ 4.4 จะเห็นว่า เมื่อจ่ายไฟ 2 เฟสให้กับเตาหลอมอลูมิเนียมไฟฟ้าจะใช้เวลาในการเพิ่มอุณหภูมิไปยังอุณหภูมิเป้าหมาย โดยใช้เวลามากกว่าการใช้ไฟ 3 เฟส

4.3 การหาประสิทธิภาพของเตาหลอมอะลูมิเนียมไฟฟ้า

การหาประสิทธิภาพของเตาหลอมอลูมิเนียมเพื่อที่จะทราบถึงความสามารถของเตาหลอมอลูมิเนียมไฟฟ้าในการกักเก็บความร้อนไว้ภายในเตาทำให้เราทราบถึงการสูญเสียความร้อนภายในเตา วิธีในการหาประสิทธิภาพภายในเตาทำได้โดย

1. ทำการเปิดสวิตช์เตาหลอมอลูมิเนียมไฟฟ้าแล้วทำการเพิ่มอุณหภูมิจนกระทั่งอุณหภูมิภายในเตาหลอมมีอุณหภูมิ 900 °C (ทำการเพิ่มอุณหภูมิครั้งละ 100 °C ตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งถึง 900 °C)
2. คงอุณหภูมิที่ 900 °C
3. จับเวลาในช่วงที่ magnetic contractor ON (จ่ายไฟให้กับขดลวดความต้านทาน) และช่วงที่ magnetic contractor OFF (ไม่จ่ายไฟให้กับขดลวดความต้านทาน)

จากการทดลองได้ผลการทดลองดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงข้อมูลช่วงเวลาที่ magnetic contractor ON และ OFF

ช่วงเวลาที่ magnetic contractor ON (วินาที)	ช่วงเวลาที่ magnetic contractor OFF (วินาที)
22	55
21	51
23	46
24	46
25	44
28	43
28	44
29	43
30	42
30	41
Total 260 วินาที	Total 455 วินาที

จากผลการทดลองข้างต้นทำให้สามารถหาประสิทธิภาพของเตาหลอมอลูมิเนียมไฟฟ้าได้ โดยอาศัยการหาการสูญเสียกำลังที่จ่ายให้กับเตาหลอมอลูมิเนียมไฟฟ้า

$$\text{การสูญเสียกำลัง (loss)} = \frac{\text{เวลาที่จ่ายกำลังไฟให้กับขดลวดความต้านทาน}}{\text{เวลารวมทั้งหมด}} \qquad (4.1)$$

จากสูตรทำให้สามารถหากำลังที่สูญเสียได้ดังนี้

$$\text{กำลังที่สูญเสีย (loss)} = \frac{260}{260 + 455}$$

$$= 0.36$$

เนื่องจากมีการจ่ายกำลังไฟให้กับเตาหลอมอลูมิเนียมไฟฟ้า 10 กิโลวัตต์ ดังนั้นกำลังที่สูญเสียคือ 0.36 x 10 กิโลวัตต์ (3.6 กิโลวัตต์)

ประสิทธิภาพ (Efficiency)ของเตาหลอมอลูมิเนียมไฟฟ้าหาได้จาก

$$\text{ประสิทธิภาพ} = 1 - \frac{\text{กำลังไฟฟ้าที่สูญเสีย(loss)}}{\text{กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเตาหลอมอลูมิเนียมไฟฟ้า}} \qquad (4.2)$$

$$= 1 - \frac{3.6\text{กิโลวัตต์}}{10\text{กิโลวัตต์}}$$

$$= 0.64 \text{ หรือ } 64\ \%$$

เตาหลอมอลูมิเนียมไฟฟ้ามีประสิทธิภาพ 64 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

การสร้างเตาหลอมอะลูมิเนียมไฟฟ้าจะแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วน คือ

5.1.1 การศึกษาข้อมูล

การศึกษาข้อมูลนั้น จะต้องทำการศึกษาถึง

1. รูปแบบ โครงสร้าง และส่วนประกอบที่เกี่ยวข้องกับการสร้างเตาหลอมอะลูมิเนียมไฟฟ้า
2. คุณสมบัติของวัสดุที่เป็นส่วนประกอบของเตาหลอมอะลูมิเนียมไฟฟ้าทั้งในด้านของการทนความร้อน การเก็บกักอุณหภูมิ และค่าการนำความร้อน เช่น อิฐทนไฟ ปูนทนไฟ เซรามิคไฟเบอร์ เป็นต้น
3. ปริมาณความร้อนที่ต้องการในการหลอมอะลูมิเนียม 10 กิโลกรัม โดยต้องคำนึงถึงความร้อนที่ใช้ในการหลอมละลาย และความร้อนที่สูญเสีย
4. กำลังไฟฟ้าที่จะจ่ายให้กับขดลวดความต้านทาน เพื่อให้สามารถหลอมอะลูมิเนียมได้
5. คุณสมบัติของขดลวดความต้านทานที่สามารถทนกำลังไฟฟ้าที่ต้องการ (ที่ได้จากการคำนวณ) เพื่อที่ขดลวดความต้านทานจะไม่เกิดความเสียหายเมื่อทำการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับขดลวดความต้านทาน
6. ระบบควบคุมอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการใช้งาน

5.1.2 การสร้างเตาหลอมอะลูมิเนียมไฟฟ้า

หลังจากได้ทำการศึกษาข้อมูลในด้านต่างๆแล้วในส่วนของการดำเนินงานด้านการสร้างเตาหลอมอะลูมิเนียมไฟฟ้า ได้มีการหาวัสดุและอุปกรณ์ตามคุณสมบัติและลักษณะที่ได้ทำการศึกษามาข้างต้น จากนั้นนำวัสดุและอุปกรณ์มาสร้างและทำการประกอบตามรูปแบบและโครงสร้างที่ได้ออกแบบไว้ รวมถึงระบบการควบคุมอุณหภูมิภายในเตาหลอมอะลูมิเนียมไฟฟ้า

5.2 วิเคราะห์ผลการดำเนินงาน

จากการดำเนินงานตามแผนการดำเนินงานที่ได้กำหนดไว้ทำให้สามารถสร้างเตาหลอมอะลูมิเนียมไฟฟ้าที่หลอมอะลูมิเนียมได้ครั้งละ 10 กิโลกรัมและเสร็จตามเวลาที่ได้วางแผนไว้

5.3 ปัญหา,แนวทางพัฒนาและปรับปรุง

5.3.1 ปัญหาที่เกิดขึ้น

1. โครงสร้างของตัวเตา

เกิดปัญหา คือ เมื่อทำการเชื่อมขาของตัวเตาแล้ว ขาไม่ตั้งฉากกับฐานของตัวเตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีแก้ปัญหา คือ นำเหล็กมาดามแต่ละด้านเพื่อให้ขาของตัวเตามีความแข็งแรงและทำให้ขาตั้งฉากกับตัวเตามากขึ้น

2. การฉาบปูนเพื่อเชื่อมอิฐแต่ละก้อน

เกิดปัญหา คือ เมื่อทำการฉาบปูนลงบนอิฐแล้วไม่สามารถทำให้อิฐติดกันได้

วิธีแก้ปัญหา คือ เนื่องจากในตอนแรกที่ทำการฉาบปูนนั้นได้มีการทาน้ำลงบนอิฐทำให้อิฐดูดซับน้ำจนอิ่มตัวจนปูนไม่สามารถติดกับเนื้ออิฐได้ รวมถึงเนื้อของปูนที่ทำการผสมนั้นไม่เป็นเนื้อเดียวกัน จึงได้สอบถามจากทางร้านขายอิฐทนไฟและปูนทนไฟว่า ในการฉาบปูนนั้นจะต้องผสมปูนให้เป็นเนื้อเดียวกันให้หมด และที่สำคัญก็คือ ไม่ต้องทาน้ำบนผิวอิฐ เมื่อทำตามคำแนะนำดังกล่าวแล้วทำให้อิฐสามารถติดกับปูนได้

3. ความยาวระหว่างขดลวดความต้านทาน

เกิดปัญหา คือ ทางร้านที่ขายขดลวดความต้านทานนั้นไม่ทำการพันขดลวดให้มีความยาวระหว่างขดตามที่ต้องการ(จากที่ต้องการ คือให้ขดลวดความต้านทาน มีความยาวระหว่างขด 5 ซม.แต่ทางร้านทำมาให้มีระยะห่างถึง 20 ซม.)

วิธีแก้ปัญหา คือ ทำการพันขดลวดเพิ่มเองด้วยมือโดยใช้แท่งเหล็กเป็นแกนในการพันเพื่อให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ

4. การใส่ เซรามิคไฟเบอร์ รอบตัวเตา

เกิดปัญหา คือ ไม่สามารถใส่ เซรามิคไฟเบอร์ ได้ เนื่องจาก เซรามิคไฟเบอร์ มีความนิ่มและยุ่ยมากรวมถึงระยะระหว่างอิฐและตัวโครงสร้างมีขนาดพอดีกับความหนาของ เซรามิคไฟเบอร์ มาก

วิธีแก้ปัญหา คือ ตัด เซรามิคไฟเบอร์ แบ่งครึ่งแล้วใส่ทีละครึ่ง (ครึ่งบนและครึ่งล่าง)ทำให้สามารถใส่ เซรามิคไฟเบอร์ รอบตัวเตาได้

5. แม่แรงที่ต่อกับแท่งเหล็กไม่สามารถใส่เข้าไปในตัวเตาได้

เกิดปัญหา คือ เมื่อทำการทดลองนำแท่งเหล็กติดกับตัวแม่แรงแล้วทำการใส่เข้าทางด้านล่างของตัวเตาแต่ไม่สามารถใส่ขึ้นไปได้

วิธีแก้ปัญหา คือ จากที่ในตอนแรกจะทำการเชื่อมแท่งเหล็กเข้ากับตัวแม่แรงก็ได้เปลี่ยนเป็นใช้เหล็กประกบระหว่างแท่งเหล็กกับแม่แรงแล้วใช้น็อตเป็นตัวยึดทำให้สามารถใส่แท่งเหล็กจากด้านบนได้และทำการจับยึดแม่แรงได้

6. แม่แรงยกเบ้าแล้วโครงเคลง

เกิดปัญหา คือ เมื่อนำแม่แรงที่ต่อกับแท่งเหล็กแล้วดันเบ้าหลอมขึ้น เบ้าหลอมจะเกิดการเอียงเนื่องจากรูที่อยู่ใต้เตาหลอมนั้นมีขนาดใหญ่กว่าแท่งเหล็กที่ต่อกับแม่แรง

วิธีแก้ปัญหา คือ นำท่อเหล็กที่มีขนาดใกล้เคียงกับแท่งเหล็กที่ติดกับแม่แรง มาเชื่อมต่อกับแผ่นเหล็กแล้วนำไปติดไว้ที่ก้นเตาหลอม จะทำให้ในการยกเบ้าหลอมขึ้นนั้น ท่อเหล็กจะเป็นตัวบังคับทิศทางของแท่งเหล็กที่ยกเบ้าหลอมขึ้น

5.3.2 ข้อเสนอแนะ

จากปัญหาที่เกิดขึ้นข้างต้นทำให้ ทราบถึงแนวทางในการสร้างเตาหลอมอะลูมิเนียมไฟฟ้าเพื่อไม่ให้เกิดปัญหาขณะสร้างเตาหลอมอะลูมิเนียมไฟฟ้าจึงควร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ก่อนจะทำโครงสร้างของตัวเตาควรมีการวัดขนาดอย่างละเอียดและในการประกอบโครงสร้างควรทำด้วยความระมัดระวังโดยเฉพาะในส่วนที่ต้องการความตั้งฉากเนื่องจากโครงสร้างถือเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดในการสร้างเตาหลอมอะลูมิเนียมไฟฟ้าเพื่อความสวยงามและคงทน
2. ควรทำความสะอาดอิฐทนไฟก่อนทำการก่อ
3. ในการใส่เซรามิคไฟเบอร์ควรทำการใส่ก่อนการก่ออิฐเพราะเซรามิคไฟเบอร์มีความนิ่มและยุ่ยมาก
4. ในการเจาะรูใต้เตาหลอมอะลูมิเนียมไฟฟ้า เพื่อให้แม่แรงสามารถยกเบ้าหลอมขึ้นนั้นควรเจาะรูให้พอดีกับขนาดของแม่แรงเพื่อไม่ให้เกิดความโครงเครง
5. ในการเปิดเตาครั้งแรกควรมีการคงอุณหภูมิประมาณ 300 °C เพื่อให้น้ำ หรือความชื้นที่อยู่ภายในตัวเตาระเหยออกมา

5.3.3 แนวทางพัฒนาและปรับปรุง

1. สามารถใช้แนวทางในการปฏิบัติและวิธีการคำนวณเพื่อทำการประยุกต์ใช้สร้างเตาหลอมอะลูมิเนียมไฟฟ้าที่มีขนาดต่างๆได้ รวมถึงยังสามารถประยุกต์ใช้ในระบบที่เกี่ยวกับการใช้ความร้อน
2. ถ้าต้องการควบคุมอุณหภูมิให้มีความแม่นยำและละเอียดมากยิ่งขึ้นอาจใช้ระบบควบคุมที่เป็นแบบสัดส่วน(P controller) ,แบบอินทิกรัล(I controller), แบบเดอร์ลิเวอทีฟ(D controller) หรืออาจใช้คอมพิวเตอร์มาช่วยในการควบคุม
3. ในการจะหลอมอะลูมิเนียมให้ได้ขนาดมากขึ้นอาจทำการเปลี่ยนเบ้าหลอมให้มีขนาดใหญ่ขึ้นแต่ต้องมีขนาดเล็กกว่าปากเตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] นักสิทธิ์ คูวัฒนาชัย , การถ่ายเทความร้อน,พิมพ์ครั้งที่ 3,ฟิสิกส์เซ็นเตอร์การพิมพ์,2531

[2] กิตติ ตีรเศรษฐ,วิทยา ทิพย์สุวรรณพร,วิศวกรรมระบบควบคุม,พิมพ์ครั้ง 1

[3] บริษัท แอสแสบสตีลส์ (ประเทศไทย)จำกัด,เอกสารประกอบการคำนวณขดลวด Kanthal

[4] ห้างหุ้นส่วนจำกัด ไทย.เอส.เอส อิฐทนไฟ,เอกสารข้อมูลวัสดุทนไฟ

[5] รศ.ปรีดา พิมพ์ขาวขำ , " วัตถุทนไฟ (refractories)" , ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , บริษัทสุรพิมพ์ จำกัด, 2538

[6] รศ.มนัส สถิรจินดา, "โลหะนอกกลุ่มเหล็ก" , โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[7] ดร.หริส สูตะบุตร, ดร.เคนยิ จิยิอิวา, "หล่อโลหะ" ,บริษัทศูนย์การพิมพ์ควงกมลจำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

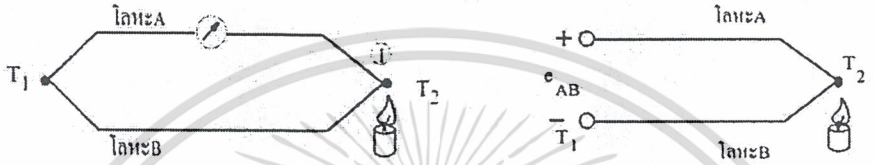
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอร์โมคัปเปิ้ล(Thermocouple)

หลักการของเทอร์โมคัปเปิ้ล

ในปี ค.ศ. 1821 โธมัส ซีเบ็ค (Thomus Seebeck) นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมันได้ทำการทดลองและค้นพบว่า เมื่อทำการเชื่อมปลายโลหะ 2 เส้นที่เป็นโลหะต่างชนิดกันเข้าด้วยกัน ถ้าอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองด้านไม่เท่ากันจะเกิดกระแสไหลในโลหะทั้งสองเส้น นั่นแสดงว่า ถ้าเปิดปลายจุดต่อด้านหนึ่งออกแล้วนำโวลต์มิเตอร์ไปวัด จะได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างโลหะ 2 เส้นค่าหนึ่ง (ค่านี้มีปริมาณน้อย หน่วยเป็น mV)เรียกแรงเคลื่อนไฟฟ้านี้ว่า Seebeck Voltage



รูปที่1 แสดง Seebeck Voltage

ปริมาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะแปรผันโดยตรงกับผลต่างอุณหภูมิของปลายจุดต่อทั้งสอง โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$e_{AB} = \Delta T$$

e_{AB} : Seebeck voltage

: ค่าสัมประสิทธิ์ของ Seebeck มีหน่วยเป็น Voltt / K

ΔT : ผลต่างอุณหภูมิของปลายจุดต่อทั้งสอง

เทอร์โมคัปเปิ้ลแบบมาตรฐาน

เทอร์โมคัปเปิ้ลมีหลายชนิดให้เลือกแล้วแต่ย่านอุณหภูมิ และลักษณะการใช้งาน โดยความแตกต่างของแต่ละชนิดนี้เกิดจากการเลือกใช้คู่ของวัสดุ(Element)ของโลหะ ที่จะนำมาเชื่อมเข้าด้วยกันให้แตกต่างกัน เพราะโลหะแต่ละชนิดย่อมมีคุณสมบัติพิเศษเฉพาะตัวของมันอยู่แล้ว เมื่อนำโลหะชนิดต่างๆกันมาจับคู่เชื่อมเข้าด้วยกัน จะทำให้คุณสมบัติของเทอร์โมคัปเปิ้ลที่ได้แตกต่างกันไป นอกจากนี้ได้มีการทดลองผสมโลหะต่างชนิดเข้าด้วยกัน เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะเดิมให้ดีขึ้น หรือเพื่อใช้แทนโลหะบางชนิดที่ใช้ทำอยู่เดิม เช่น แพลทินัม เนื่องจากมีราคาสูง ตัวอย่างโลหะผสมที่เกิดขึ้น เช่น โครเมล (Cromel) คือ โลหะผสมของนิกเกิ้ล 90% และโครเมียม 10%,อลูเมล (Alumel) คือโลหะผสมของทองแดง 95% อลูมิเนียม 2 % แมงกานีส 2%และซิลิคอน1%,คอนสแตนแตน(Constantan) คือโลหะผสมของทองแดง60% และนิกเกิ้ล40%เป็นต้น

การใช้งานเทอร์โมคัปเปิ้ล ควรเลือกใช้ให้ถูกต้องและเหมาะสมกับงานนั้นๆ โดยพิจารณามีหลายข้อ เช่น ค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้งาน,ราคา,ความกัดกร่อนของสารที่เทอร์โมคัปเปิ้ลสัมผัส,ต้องใช้Thermowellหรือไม่,ลักษณะบรรยากาศที่เป็น Oxidizing, Reducing ,Inert หรือ Vacuum เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1แสดงคุณสมบัติเปรียบเทียบเทอร์โมคัปเปิ้ลแบบมาตรฐานชนิดต่าง

Type	ส่วนผสม	ย่านอุณหภูมิใช้งาน		แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้
		^{o}C	^{o}F	mV
B	แพลทินัม - 30% โรเดียม แพลทินัม - 6 % โรเดียม	0 ถึง1820	32 ถึง 3310	0 ถึง 13.814
R	แพลทินัม - 13 % โรเดียม แพลทินัม	-50 ถึง1768	-60 ถึง 3210	-0.226 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	-350ถึง1400	-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 แสดงสภาวะแวดล้อมในการใช้งานเทอร์โมคัปเปิ้ลแบบมาตรฐานโดยไม่ต้องใช้ Protecting Tube

	ความเหมาะสมในการใช้งาน						
TC TYPE	บรรยากาศ Oxidizing	บรรยากาศ Reducing	บรรยากาศ Inert	Vacuum	บรรยากาศ Sulferous	อุณหภูมิ $< 0\ ^{o}C$	มีไอของโลหะ
B	ได้	ไม่ได้	ได้	ได้ในช่วงสั้นๆ	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 $> 500\ ^{o}C$	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

* ใช้งานได้ดีกว่าแบบ E,J และ T เมื่ออุณหภูมิ $> 550\ ^{o}C$

โดยเฉพาะกับอุณหภูมิ $< 0\ ^{o}C$

Oxidizing : กระบวนการทางเคมีที่ดึงออกซิเจนจากภายนอกเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารนั้น

Reducing : กระบวนการทางเคมีที่ออกซิเจนถูกดึงออกจากสารนั้นเพื่อ ไปทำปฏิกิริยากับสารภายนอก

Vacuum : ค่าความดันที่ต่ำกว่าบรรยากาศจนถึงสภาวะสุญญากาศ

Inert : สภาวะเฉื่อยที่ไม่เกิดปฏิกิริยาเคมี

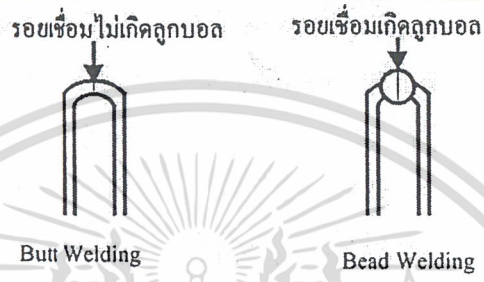
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนประกอบของเทอร์โมคัปเปิ้ล

- ตัวเทอร์โมคัปเปิ้ล

การเชื่อมหัวเทอร์โมคัปเปิ้ล ที่ด้าน T_1 มีความสำคัญมาก ต้องเชื่อมให้ถูกต้องตามหลักการ เพื่อให้ได้การวัดแม่นยำ และมีอายุการใช้งานยาว การเชื่อมหัวเทอร์โมคัปเปิ้ล มีการแบ่งตามขนาดของลวดดังนี้

1. ลวดโตที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดตั้งแต่ประมาณ 2 ตร.มม.ขึ้นไป ใช้เครื่องเชื่อมแบบใช้มือธรรมดาโดยมีก๊าซอาร์กอนซึ่งเป็นก๊าซเฉื่อยไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับสารใดฉีดปกคลุมบริเวณเชื่อมเพื่อไม่ให้เกิด Oxide ขึ้นตรงรอยต่อของลวด เรียกว่าการเชื่อมแบบ Butt ซึ่งง่ายกว่าการเชื่อมลวดขนาดเล็ก



รูปที่ 2 รอยเชื่อมแบบ Butt และ Bead

2. ลวดที่มีพื้นที่หน้าตัดเล็กกว่า 2 ตร.มม.การเชื่อมด้วยมือจะมี Human Error (ความผิดพลาดจากคนทำ)ได้มาก เพราะขึ้นกับทักษะ และสมาธิ ซึ่งต้องผ่านการฝึกฝนมาอย่างดี จึงควรใช้เครื่องจักรอัตโนมัติเชื่อมเพื่อให้เกิดรอยต่อที่สนิท , สมมาตร และ ไม่มีค่าความผิดพลาดเกิดขึ้นได้ การเชื่อมลวดขนาดเล็กเรียกว่าการเชื่อมแบบ Bead Welding ซึ่งเครื่องจักรอัตโนมัติจะเชื่อมให้เกิดรอยต่อที่เป็นลูกบอลครึ่งลูก 2 ชิ้นเชื่อมต่อกันสนิทตลอดรอยต่อดังรูปที่ 3

(a) การเชื่อมโดยใช้เครื่องจักรอัตโนมัติระยะห่างระหว่างลวดทั้งสองและระยะจากหัวเชื่อมเท่ากันทุกครั้งทำให้รอยเชื่อมเกิดลูกบอลติดสนิทและสมมาตรกันทำให้วัดได้แม่นยำและอายุการใช้งานนานกว่า	(b) การเชื่อมโดยใช้มือไม่แน่นอนรอยเชื่อมอาจจะไม่ติดสนิท ไม่สมมาตรอายุการใช้งานสั้นและค่าผิดพลาดมากกว่า

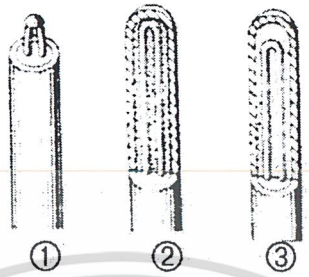
หมายเหตุ เทอร์มอคัปเปิลของ FW ที่มีลวดขนาดเล็ก จะเชื่อมด้วยเทคโนโลยีเครื่องจักรอัตโนมัติเสมอ

รูปที่ 3รอยเชื่อมที่เกิดจากการเชื่อมที่ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **Metal Sheath**

เพื่อให้เทอร์โมคัปเปิ้ลมีความเรียบร้อยแข็งแรง พร้อมในการใช้งาน คู่สายของเทอร์โมคัปเปิ้ลจะประกอบอยู่ใน Metal Sheath โดยลักษณะการประกอบตัวเทอร์โมคัปเปิ้ลเข้ากับ Metal Sheath มี 3 วิธีดังนี้



รูปที่ 4 ลักษณะการประกอบตัวเทอร์โมคัปเปิ้ลเข้ากับ Metal Sheath

1. แบบเปลือย (Exposed unction) ให้ผลการวัดไวที่สุด (Minimum response Time) จุดต่อสำหรับวัดสัมผัสกับของเหลวที่ต้องการวัดโดยตรง ผลเสียของแบบเปลือย คือ ชำรุดเสียหายง่ายและอายุการใช้งานสั้น ไม่เหมาะสำหรับงานความดันสูงหรือของเหลวที่มีการกลั่นตัว
2. แบบ Grounded Junction สายคู่ของเทอร์โมคัปเปิลที่เชื่อมติดกัน จะถูกเชื่อมต่อลงบนส่วนปลายท่อโลหะของ Metal Sheath อีกทีหนึ่ง สามารถใช้ได้กับของเหลวที่เป็นสารกัดกร่อน ให้ผลการตอบสนองต่ออุณหภูมิไวกว่าแบบ Ungrounded Junction แต่มีข้อเสียคือ ถ้ามีกระแสไฟรั่วจากอุปกรณ์อื่นมาที่ Metal Sheath จะทำให้ค่าวัดอุณหภูมิผิดพลาดได้
3. แบบ Ungrounded Junction ใช้ได้กับของเหลวที่เป็นสารกัดกร่อน มีอายุการใช้งานยืนยาวที่สุด แต่มีข้อเสียคือ ให้ผลการวัดช้า เหมาะกับงานที่อุณหภูมิไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง ในงานอุตสาหกรรมจะใช้แบบนี้เกือบทั้งหมด

สำหรับ Metal Sheath ที่เป็น Ceramic นั้นมักจะใช้ในกรณีที่อุณหภูมิการใช้งานสูง เช่น 800 ^{o}C ขึ้นไป หรือในบรรยากาศที่มีการกัดกร่อนสูง

ชีทเทอร์โมคัปเปิล(Sheath Thermocouple) คือ เทอร์โมคัปเปิลที่ตัว Metal Sheath ผลิตสำเร็จรูปมาพร้อมกับตัวสายเทอร์โมคัปเปิลเลย จึงทนอุณหภูมิได้สูงกว่าแบบธรรมดามาก เพราะฉนวนไฟฟ้าที่อยู่ระหว่างขดลวดเทอร์โมคัปเปิล กับ Metal Sheath จะถูกบีบอัดแน่นกว่าปรกติหลายเท่า ท่อ Metal Sheath มักจะทำจากโลหะเหนียวและยืดหยุ่น สามารถดัดท่องอได้ตามความเหมาะสมกับงาน

- **ฉนวนของเทอร์โมคัปเปิล**

เป็นส่วนที่ใช้กั้นระหว่างตัวเทอร์โมคัปเปิล กับ Metal Sheath ส่วนใหญ่จะเป็นสารประเภทแมกนีเซียมออกไซด์,อลูมิเนียมออกไซด์ หรือเบอรีลเลียมออกไซด์

- **Thermowell**

เป็นอุปกรณ์เสริมใช้ป้องกันไม่ให้เทอร์โมคัปเปิล สัมผัสกับสารที่ต้องการวัดอุณหภูมิโดยตรง เช่น สารที่กัดกร่อน ,มีความดันสูง หรือในบางกรณี ที่ต้องการถอดตัวเทอร์โมคัปเปิลเพื่อซ่อมบำรุงโดยไม่รบกวนการทำงานของระบบ จำเป็นต้องใช้ Thermowell เป็นตัวกลางด้วยเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **Extension Wire**

คือ สายที่ใช้ในการเชื่อมต่อ หรือต่อเพิ่มจากตัวที่เทอร์โมคัปเปิลมีอยู่แล้ว ในกรณีจุดที่วัดอุณหภูมิและจุดที่ต้องการรับสัญญาณจาก เทอร์โมคัปเปิล อยู่ห่างกันมี 2 แบบ คือ แบบที่ทำจากสารประเภทเดียวกับเทอร์โมคัปเปิล (เช่น Type E,J,K,T)และแบบที่ทำจากโลหะต่างชนิดกับ เทอร์โมคัปเปิล (เช่น Type R,S,B) เนื่องจากวัสดุที่ใช้ทำสาย คือ แพลทินัม มีราคาแพง

การเลือกสั่งซื้อเทอร์โมคัปเปิล

เทอร์โมคัปเปิล คือ โลหะ 2 ชนิดต่างกันที่นำมาเชื่อมปลายเข้าด้วยกันที่ด้านหนึ่งซึ่งเป็นด้านที่ใช้วัดอุณหภูมิ ส่วนอีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับอุปกรณ์ใช้งาน เช่น เครื่องควบคุมอุณหภูมิ,เครื่องบันทึกอุณหภูมิเป็นต้น

อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้งานได้ นอกจากขึ้นอยู่กับชนิดของเทอร์โมคัปเปิลแล้ว ยังขึ้นอยู่กับชนิดของปลอก (Protecting Tube) และขนาดของลวดเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้ด้วย

ตารางที่ 3 ชนิดของปลอก (Protecting Tube)

ชนิดของปลอก	คุณสมบัติ	อุณหภูมิใช้งานสูงสุด (^{o}C)
SUS304เส้นผ่านศูนย์กลาง 5,6 มม. SUS304เส้นผ่านศูนย์กลาง 9.5,12.7มม. SUS304เส้นผ่านศูนย์กลาง 22 มม.	ใช้งานทั่วไปกับอากาศ,ของเหลว หรือของแข็ง	600 800 1000
SUS316	ใช้กับอากาศ หรือของเหลวที่มีลักษณะกัดกร่อน	เหมือน SUS304
เซรามิค Pythagoras เซรามิค Alsint 99.7	ใช้ในเตาเผา หรือเตาอบอุณหภูมิสูง	1400 1700
Sheath Thermocouple	ใช้ได้กับงานทั่วไปและสารที่กัดกร่อน(เป็น SUS 316)	1200
Inconel 600	ใช้ได้ดีในบรรยากาศที่สกปรก หรือมีเศษโลหะปนอยู่ เช่น เตาเผาขยะ ทนการกระแทกและทนการกัดกร่อนได้ดีที่สุด	1200
กราไฟต์	ใช้ในเตาหลอมอลูมิเนียม,ทองเหลือง	1000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4 ขนาดของลวดเทอร์โมคัปเปิล

เทอร์โมคัปเปิล Type	เส้นผ่านศูนย์กลาง(มม.)		JIS C 1602		ANSI
	JIS	ANSI	อุณหภูมิใช้งานสูงสุดในงานทั่วไป(^{o}C)	อุณหภูมิสูงสุดในงาน Overheated(^{o}C)	อุณหภูมิใช้งานสูงสุด(^{o}C)
B	0.05	0.50	1500	1700	1700
R	0.05	0.50	1400	1600	1400
S	0.05	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	-
	2.6	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	760
	2.3	-	550	750	-
	1.6	1.6	500	650	590
	1.0	-	450	550	-
	-	0.8	-	-	480
	0.65	-	400	500	-
	-	0.5	-	-	370
	-	0.32	-	-	370

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

รูปที่ 5 เทอร์โมคัปเปิล

ฮีตเตอร์(Heater)

หลักการของฮีตเตอร์

ฮีตเตอร์ เป็นอุปกรณ์ทำความร้อนในอุตสาหกรรม ที่มีหลักการพื้นฐานคือ เมื่อมีกระแสไหลผ่านลวดตัวนำที่มีค่าความต้านทานสูง ลวดตัวนำจะร้อน ดังนั้นลวดที่ใช้ผลิตฮีตเตอร์จะต้องมีคุณสมบัติเหนียวและทนอุณหภูมิได้สูง สำหรับลวดฮีตเตอร์ของ TIC เป็นลวด Khantal (นิกเกิ้ล : โครเมียม / 80 : 20) จากประเทศสวีเดน ทนอุณหภูมิได้ถึง 1250 °C เป็นลวดผลิตฮีตเตอร์ที่ดีที่สุดในโลก ส่วนประกอบอื่นๆในการผลิตฮีตเตอร์มีดังนี้

- ฉนวนแม็กนีเซียมออกไซด์(MgO) จาก USA มีค่าความนำไฟฟ้าต่ำแต่นำความร้อนได้ดีมากทำหน้าที่กั้นกลางระหว่างลวดฮีตเตอร์กับปลอกโลหะ เพื่อป้องกันไม่ให้มีกระแสรั่ว (Leak Current) จากลวดฮีตเตอร์ออกไปยัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผิวโลหะ จุดสำคัญ คือ ห้ามมีความชื้นในฉนวนเด็ดขาดเพราะจะทำให้ค่าความนำไฟฟ้าสูงขึ้น หากมีความชื้นแก้ไขได้โดยการอบในเตาอบ

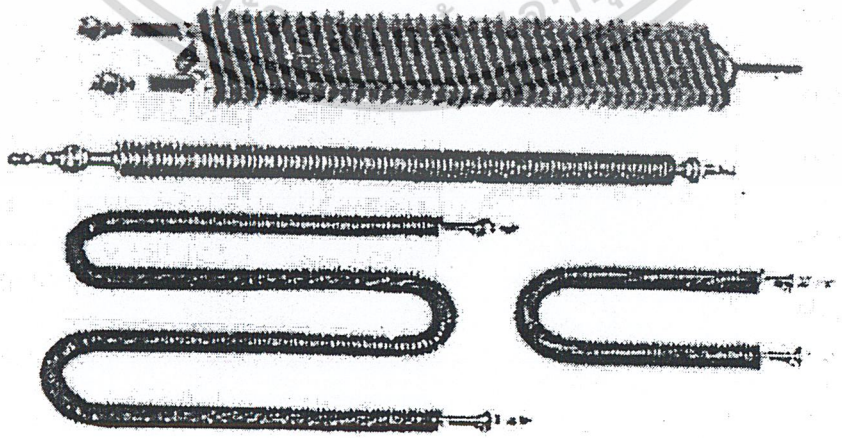
- ท่อสแตนเลส 304 และ 316 จากออสเตรเลีย เลือกที่มีความหนาเป็นพิเศษ ทำให้ทนอุณหภูมิได้สูงกว่าปรกติ และไม่มีตะเข็บด้านนอกของผิวท่อ จึงไม่มีปัญหาการแตกปริตามแนวตะเข็บท่อฮีตเตอร์เมื่ออุณหภูมิสูง
- Insulation Tester เป็นเครื่องทดสอบความเป็นฉนวนของฮีตเตอร์เพื่อให้แน่ใจว่าในการใช้งานจริงจะไม่มีกระแสรั่วจากลวดฮีตเตอร์สู่ผิวโลหะซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อผู้ใช้ได้ มาตรฐานของ TIC ได้กำหนดการทดสอบแรงดันที่ 1500 VAC และค่าความเป็นฉนวนต้องมากกว่า 500M

ฮีตเตอร์ถูกแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆตามลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกันดังนี้

- ฮีตเตอร์แท่ง หรือ Cartridge Heater ใช้ให้ความร้อนกับวัสดุที่เป็นของแข็ง เช่นเหล็ก และโลหะต่างๆ ตัวอย่างการใช้งาน เช่นงานบรรจุหีบห่อ งานขึ้นรูปพลาสติก
- ฮีตเตอร์ครีบ หรือ Finned Heater และฮีตเตอร์ท่อกลม หรือ Tubular Heater ใช้ให้ความร้อนกับอากาศ เช่น ใช้ในห้องอบแห้ง ในเตาอบ
- ฮีตเตอร์จุ่ม หรือ Immersion Heater หรือบางทีเรียกว่า ฮีตเตอร์ต้มน้ำ ใช้ให้ความร้อนกับของเหลวทุกชนิด ตัวอย่างการใช้งาน เช่น งานต้มนำ ต้มน้ำมัน งานผสมสาร
- บอบบิ้นฮีตเตอร์(Bobbin Heater)ใช้ให้ความร้อนของเหลวเหมือนฮีตเตอร์จุ่ม
- ฮีตเตอร์อินฟราเรด (Infrared Heater) ใช้ให้ความร้อนกับวัตถุโดยไม่ต้องสัมผัสโดยตรง ไม่เหมาะกับวัตถุที่มีลักษณะมันวาว เนื่องจากวัตถุมันวาวจะมีคุณสมบัติสะท้อนแสง ทำให้ไม่สามารถดูดซับรังสีอินฟราเรดได้อย่างเต็มที่ที่ติดตั้งในเตาอบ หรือเหนือคอนเวย์เยอร์ได้
- ฮีตเตอร์รัดท่อ หรือ Band Heater ใช้ให้ความร้อนกับของเหลวที่อยู่ในท่อ
- ฮีตเตอร์แผ่น หรือ Strip Heater ใช้ให้ความร้อนโดยแนบกับวัตถุโดยตรง

ฮีตเตอร์ครีบ Finned Heater และฮีตเตอร์ท่อกลม หรือ Tubular Heater

ฮีตเตอร์ครีบ ทำจาก Tubular Heater ที่ดัดเป็นรูปต่างๆและเพิ่มแผ่นครีบม้วนติดกับท่อฮีตเตอร์อย่างต่อเนื่องจากปลายด้านหนึ่งไปอีกด้านหนึ่ง ส่วนของแผ่นครีบที่เพิ่มขึ้นมาจะทำให้ฮีตเตอร์ สามารถถ่ายเทความร้อนได้เร็วขึ้น ส่วนฮีตเตอร์ท่อกลมคือ Tubular Heater ที่ใช้ให้ความร้อนโดยตรงโดยไม่ติดครีบ



รูปที่ 6 ฮีตเตอร์ครีบ Finned Heater และฮีตเตอร์ท่อกลม หรือ Tubular Heater

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฮีตเตอร์ครีบและฮีตเตอร์ท่อกลมใช้กับงานต่อไปนี้

- ใช้ในเตาอบ
- ใช้ในท่อ DUCT
- ใช้กับเครื่องปรับอากาศ

การติดตั้งสามารถทำได้ 2 วิธี คือ ติดตั้งแบบให้ความร้อนโดยตรง และแบบส่งผ่านความร้อนจากห้องเผาไปยังห้องอบโดยใช้ลมร้อน เป็นฮีตเตอร์ที่ใช้กับอากาศ ไม่ควรใช้กับของเหลว เนื่องจากจะเกิดตะกรันจับที่ครีบของฮีตเตอร์ทำให้ความร้อนไม่สามารถถ่ายเทได้ ในกรณีที่ให้ความร้อนกับอากาศที่ไม่หมุนเวียน ควรเลือกวัสดุที่ใช้ทำฮีตเตอร์เป็นอินโคลอย เนื่องจากมีคุณสมบัติถ่ายเทความร้อนได้ดี และทนอุณหภูมิได้สูงกว่าชนิดอื่นๆ

สายไฟฟ้าทนความร้อนหุ้มไฟเบอร์กล๊าส

สายทนความร้อนคุณภาพสูงจากประเทศญี่ปุ่น ทนอุณหภูมิสูงสุด 250 °C ใช้ต่อกับฮีตเตอร์หรือใช้ในเตาอบที่อุณหภูมิสูง มีหลายขนาดให้เลือกใช้งาน

ตารางที่ 5 คุณสมบัติของสายไฟฟ้าทนความร้อนหุ้มไฟเบอร์กล๊าส

พื้นที่หน้าตัด (Sq.mm.)	ความหนาต่ำสุดของฉนวน(mm.)	เส้นผ่าศูนย์กลาง		ความต้านทานมากสุดในสายที่20°C(/km)	ปริมาณกระแสที่ทนได้(A)
		ทั่วไป(mm)	มากสุด(mm.)		
0.75	0.3	2.4	2.65	25.8	8
1.0	0.3	2.5	2.75	19.4	10
1.5	0.3	2.6	2.85	13.2	15
2.0	0.35	3.2	3.5	9.91	19
2.5	0.35	3.6	3.9	9.52	23
3.5	0.4	4.1	4.4	5.38	26
4.0	0.4	4.5	4.8	5.12	29
5.5	0.4	4.7	5.0	3.46	35
8.0	0.6	5.7	6.0	2.45	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการเลือกลวด Kanthal หรือ Nikrothal

จะพิจารณาจากคุณสมบัติของลวดตามตารางที่ 6

ตารางที่ 6 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_w	3.61		3.61	
Temperature factor, C_t	1.05		1.06	
Cold resistance, R_{20}	3.44		3.41	
Wire diameter, mm *in*	5.5	*0.217*	5.5	*0.217*
Surface load, W/cm² *W/in²*	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: $\frac{44.4-29.6}{44.4} = 33\%$ $\frac{98-65}{98} = 33\%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติทาง Physical และ Mechanical ของลวด Kanthal และ Nikrothal

ลวด Kanthal และ Nikrothal จะมีลักษณะแบน หรือ กลม ซึ่งจะมี คุณสมบัติทาง Physical และ Mechanical ของลวดต่างกันดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 KANTHAL and NIKROTHAL , Wire and Strip.

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 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^2m^{-1}	1.45	1.45	1.39	1.35	1.09	1.18	1.11	1.04
at 68°F, Ω/cmf	*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}*	*18.10^{-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}*	*19.10^{-6}*
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	0.46	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, 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	Non	Slightly	Non
Emissivity, fully oxidized condition	0.70	0.70	0.70	0.70	0.88	0.88	0.88	0.88

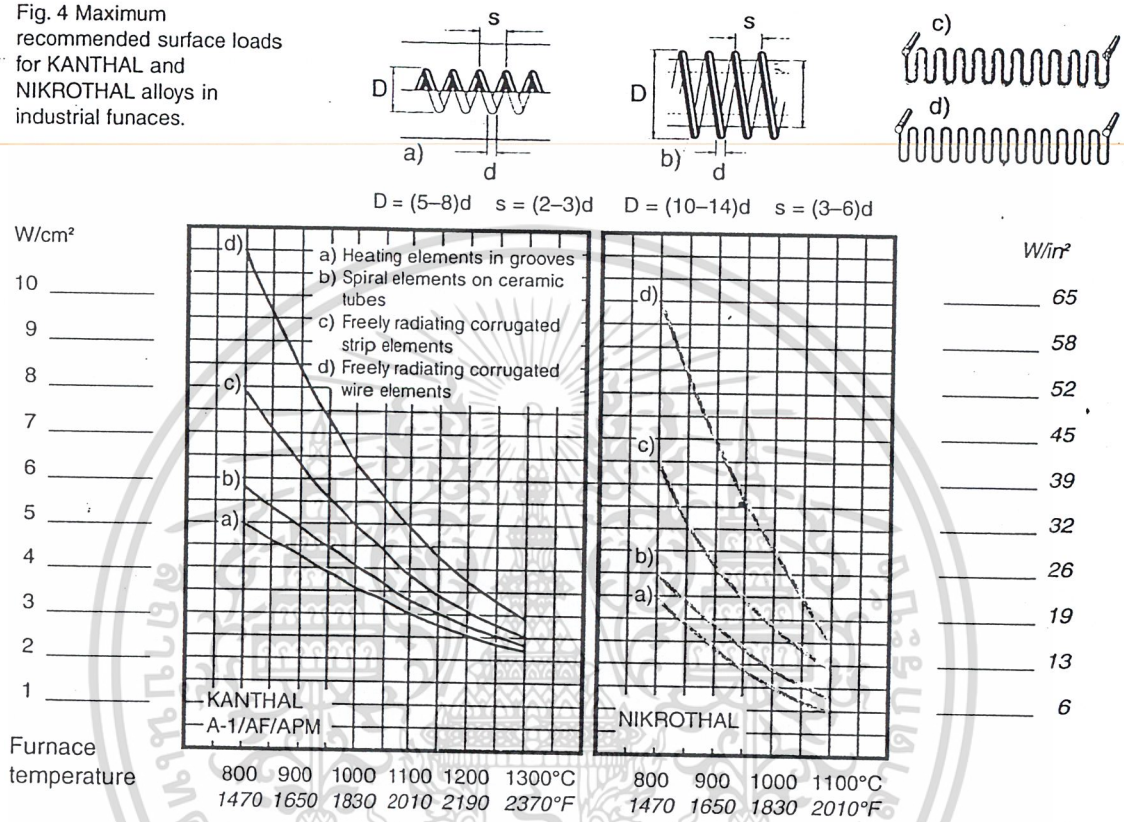
*) The values given apply for sizes of 4 mm, *0.16 in* diameter for the KANTHAL alloys and of 1 mm, *0.04* in for the NIKROTHAL alloys.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Element surface load

ค่าของ surface load ของแต่ละช่วงนั้นจะหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่า surface load ดังรูปที่ 7

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



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

รูปที่ 7 Maximum recommended surface loads for KANTHAL and NIKROTHAL alloy in industrial furnaces.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KANTHAL A-1 and APM

Wire and strip. Standard stock items.

Resistivity 1.45 Ω mm² m⁻¹. Density 7.1 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	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	cm²/Ω 20°C	Strip*) WxT mm	Resistance Ω/m 20°C	Weight g/m	cm²/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	0.725	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				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KANTHAL AF

Wire and strip. Standard stock items.

Resistivity 1.39 Ω $mm^2 m^{-1}$. Density 7.15 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	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°C	Weight g/m	cm²/Ω 20°C	Strip*) WxT mm	Resistance Ω/m 20°C	Weight g/m	cm²/Ω 20°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	0.00371	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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KANTHAL D

Wire and strip. Standard stock items.

Resistivity 1.35 Ω $mm^2 m^{-1}$. Density 7.25 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	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 Ω/m 20°C	Weight g/m	cm^2/Ω 20°C
1.0	1.72	5.7	18.3
1.1	1.42	6.9	24.3
1.2	1.19	8.2	31.6
1.3	1.02	9.6	40.2
1.4	0.877	11.2	50.2
1.5	0.764	12.8	61.7
1.6	0.671	14.6	74.9
1.7	0.595	16.5	89.8
1.8	0.531	18.4	107
2.0	0.430	22.8	146
2.5	0.275	35.6	286
2.8	0.219	44.6	401
3.0	0.191	51.2	493
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

Strip*) WxT mm	Resistance Ω/m 20°C	Weight g/m	cm^2/Ω 20°C
5.0x0.1	2.70	3.6	43
5.0x0.2	1.35	7.3	76
5.0x0.3	0.900	10.9	118
5.0x0.4	0.657	14.5	160
10.0x1.2	0.113	87	1990
12.0x1.2	0.0938	104	2820
15.0x1.2	0.0750	131	4320
15.0x1.5	0.0600	163	5500
20.0x1.5	0.0450	218	9560
15.0x2.0	0.0450	218	7560
20.0x2.0	0.0338	290	13000
25.0x2.0	0.0270	363	20000
20.0x2.5	0.0270	363	16700

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NIKROTHAL 70

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

Resistivity 1.18 Ω $mm^2 m^{-1}$. 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 Ω/m 20°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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NIKROTHAL 80

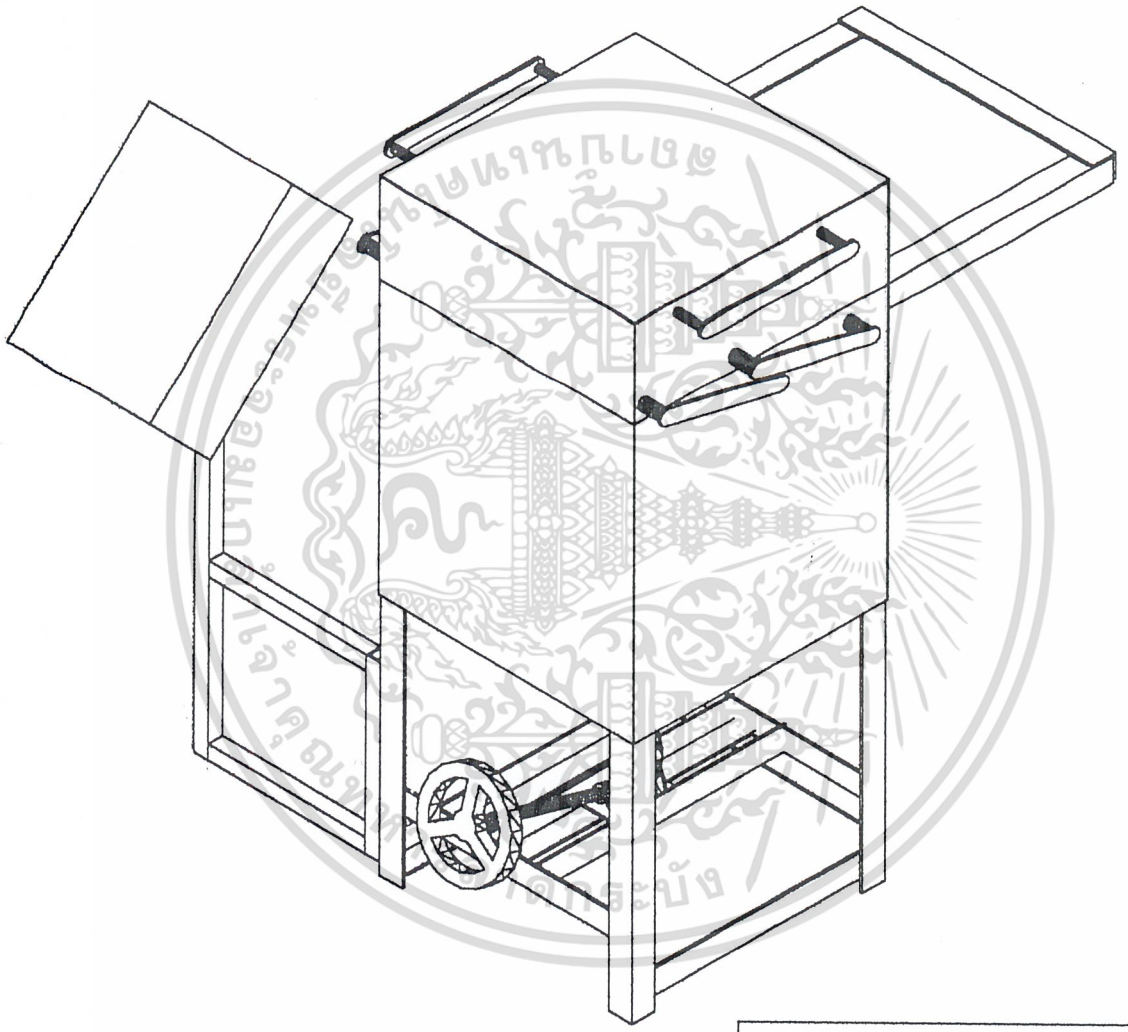
Wire and Strip. Standard stock items.

Resistivity 1.09 Ω $mm^2 m^{-1}$. Density 8.30 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	1.04	1.04	1.04	1.04	1.05	1.06	1.07

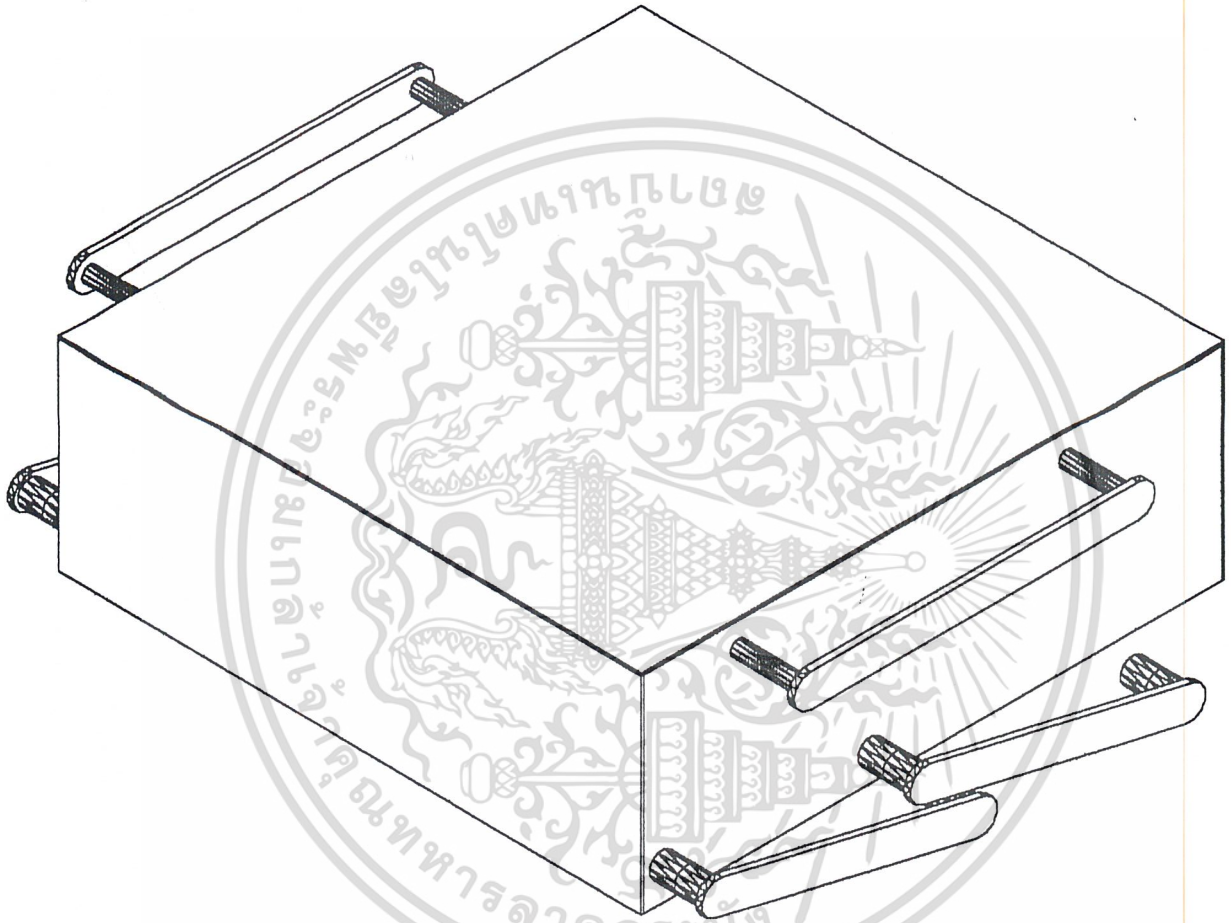
Wire dia mm	Resistance Ω/m 20°C	Weight g/m	cm^2/Ω 20°C	Strip*) WxT mm	Resistance Ω/m 20°C	Weight g/m	cm^2/Ω 20°C
1.0	1.39	6.52	22.6	15.0x1.0	0.0727	125	4404
1.2	0.964	9.39	39.1	20.0x1.0	0.0545	166	7706
1.3	0.821	11.0	49.7	25.0x1.0	0.0436	208	11930
1.4	0.708	12.8	62.1	12.0x1.2	0.0757	120	3488
1.5	0.617	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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

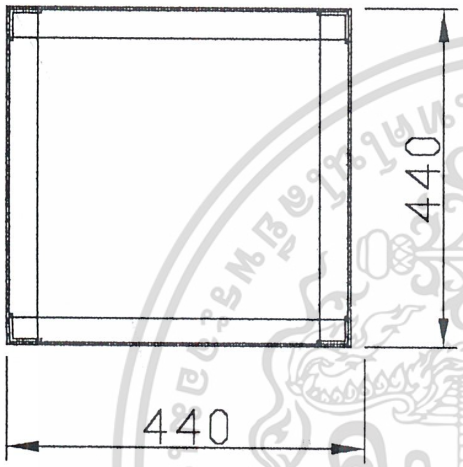


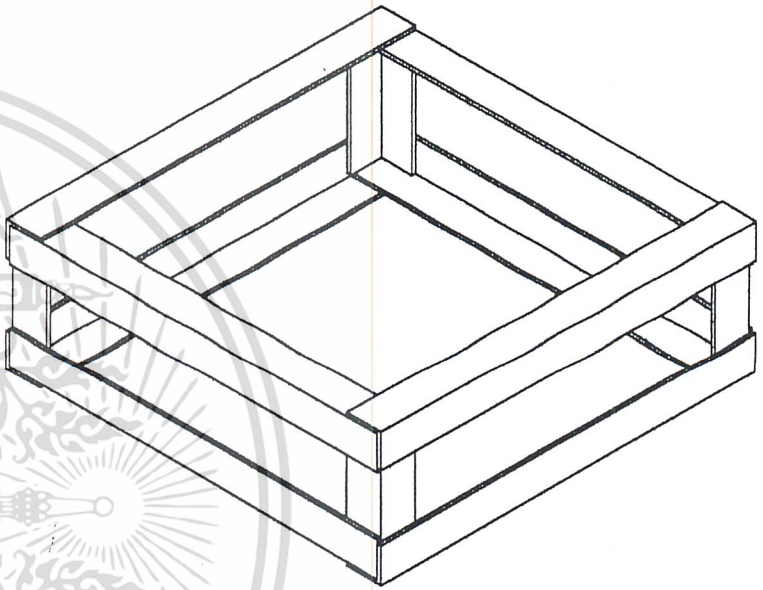
A-18

King Mongkut's Institute of Technology Ladgrabang	
Project : Electrical Furnace	Part : เตาหลอม
Code : EF-0000	



King Mongkut's Institute of Technology Ladgrabang	
Project : Electrical Furnace	Part : ฝาเตา
Code : EF-1000	





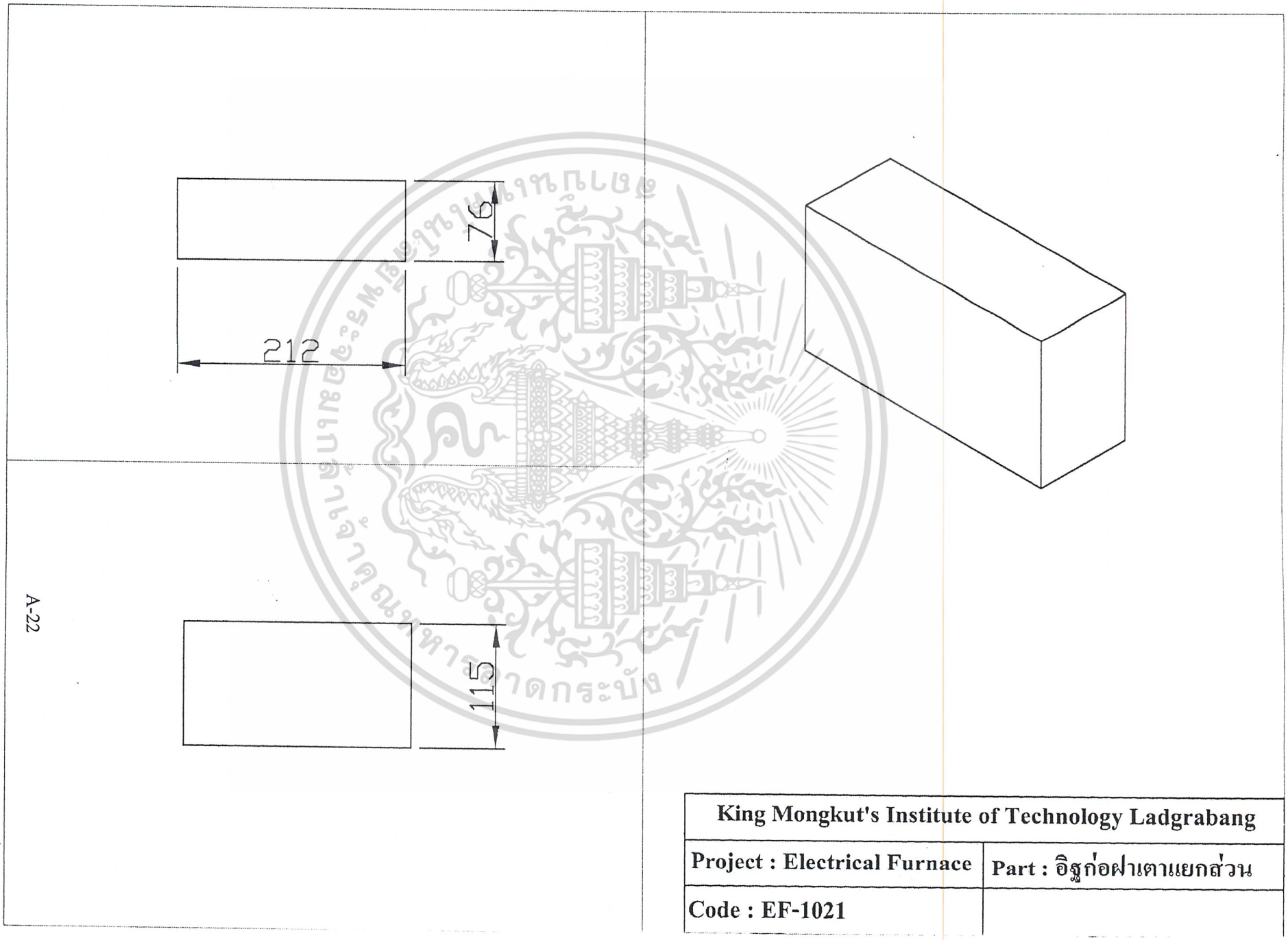
A-20

King Mongkut's Institute of Technology Ladgrabang	
Project : Electrical Furnace	Part : โครงฝาเตา
Code : EF-1010	

ผู้ใช้งานระบบนี้ยินยอมให้ใช้ข้อมูลส่วนบุคคลของตนเองตามวัตถุประสงค์ของการใช้งานระบบเท่านั้น ห้ามนำข้อมูลส่วนบุคคลของผู้อื่นไปใช้ในทางที่ผิดกฎหมาย ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น

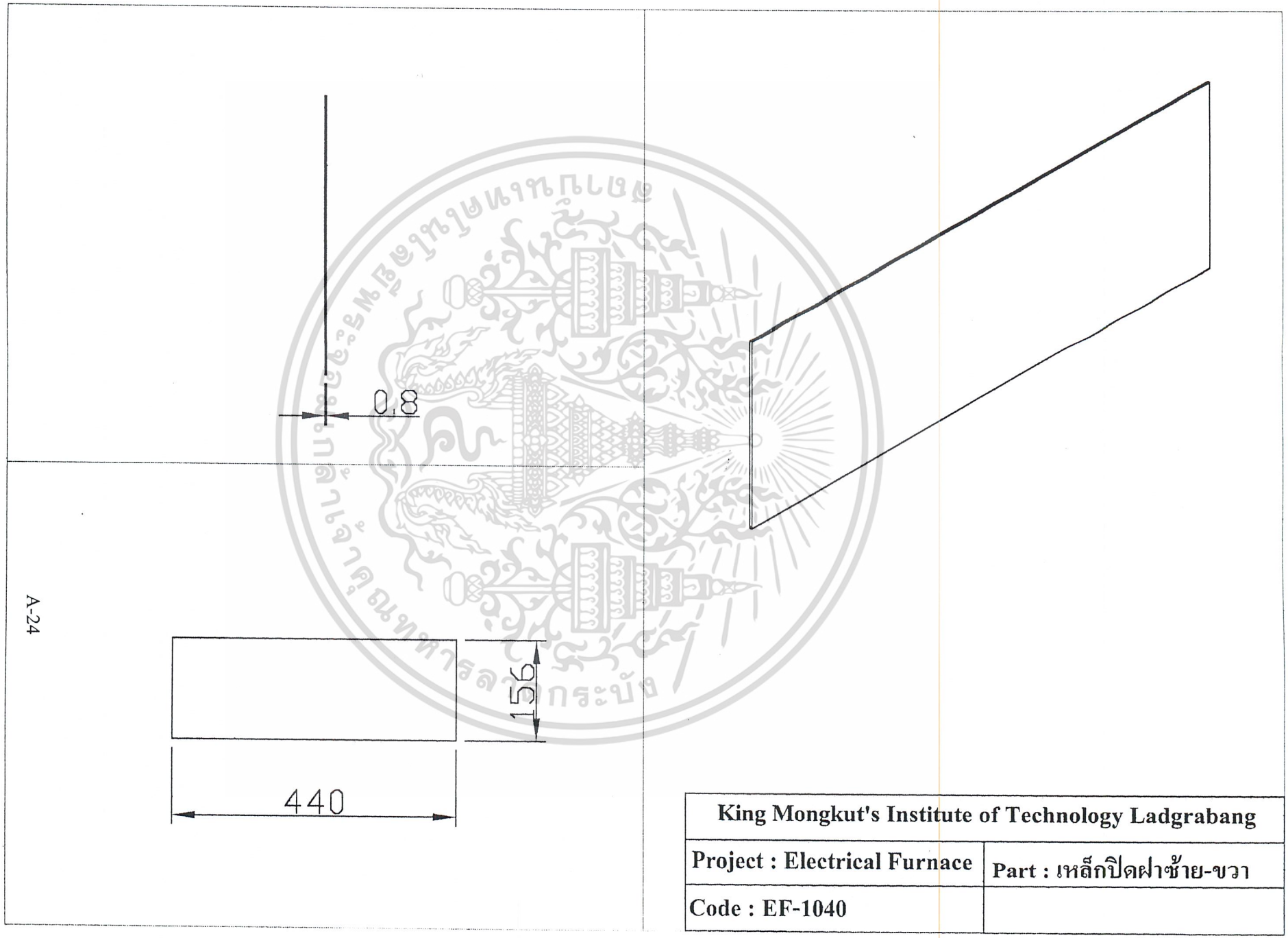
King Mongkut's Institute of Technology Ladgrabang		
Project : Electrical Furnace	Part : อิฐก่อผ่านตา	
Code : EF-1020		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

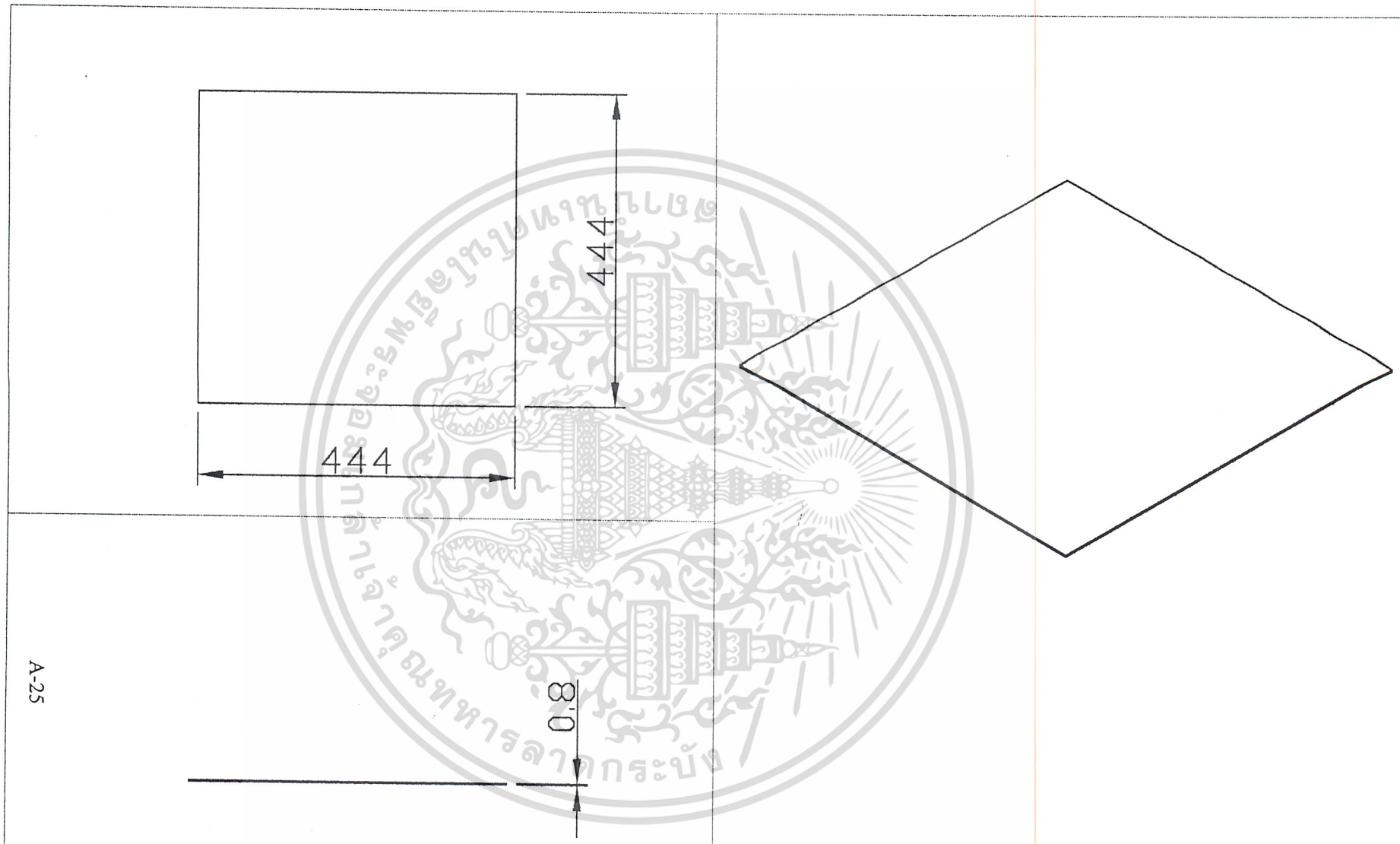


King Mongkut's Institute of Technology Ladgrabang	
Project : Electrical Furnace	Part : อิฐก่อฝาเตาแยกส่วน
Code : EF-1021	

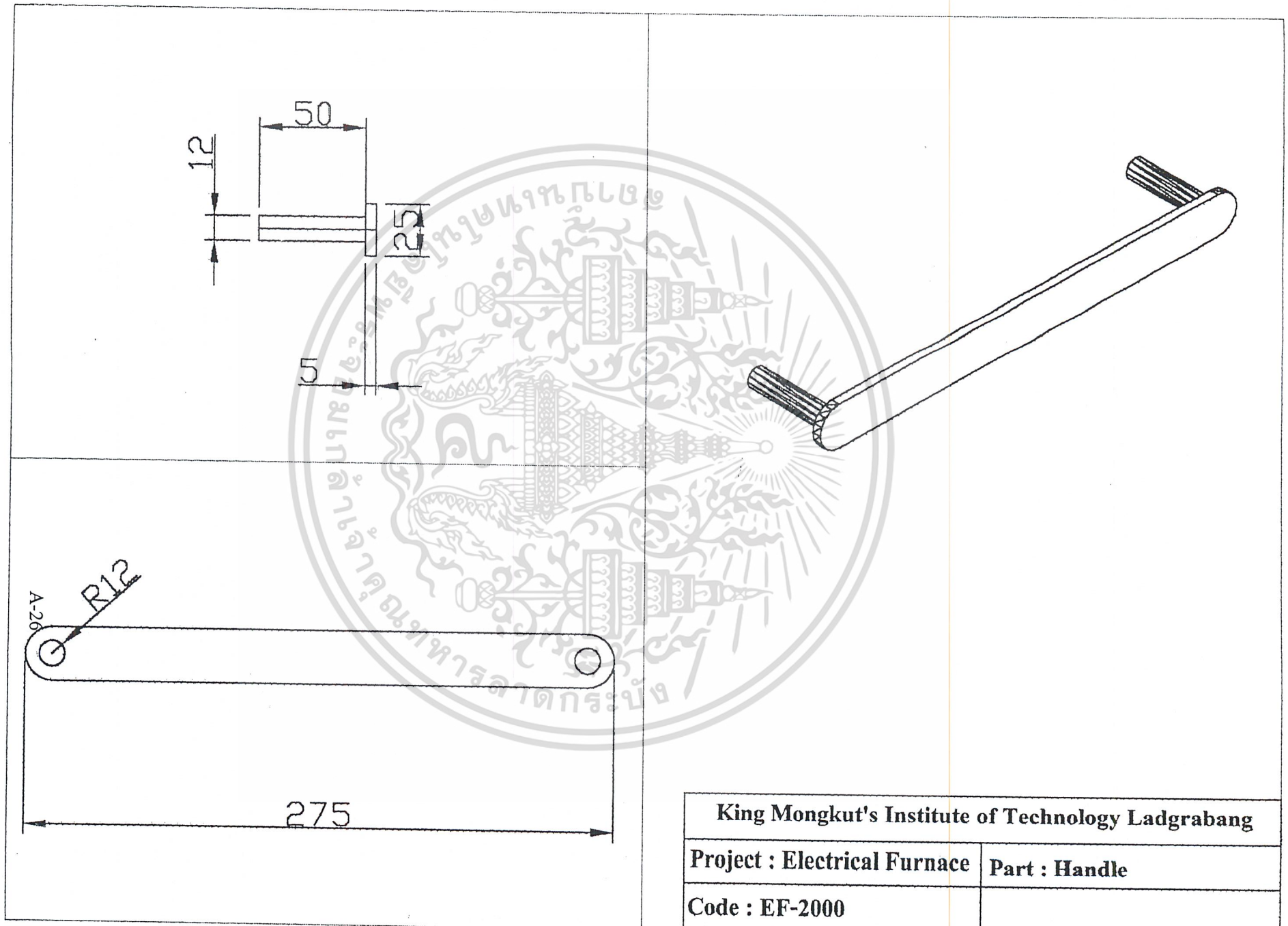
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



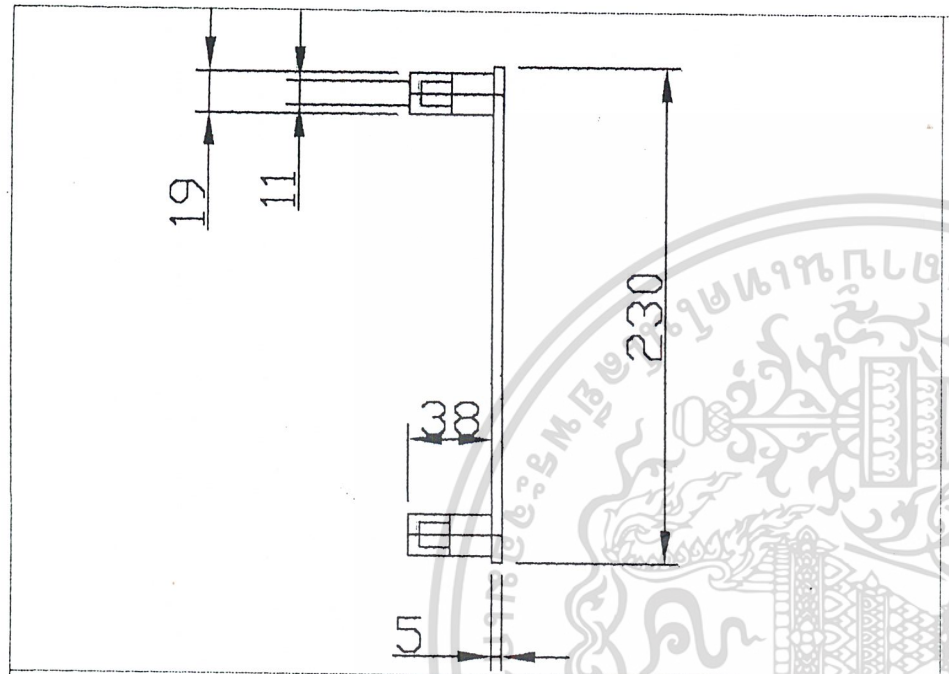
King Mongkut's Institute of Technology Ladgrabang	
Project : Electrical Furnace	Part : เหล็กปิดฝาซ้าย-ขวา
Code : EF-1040	

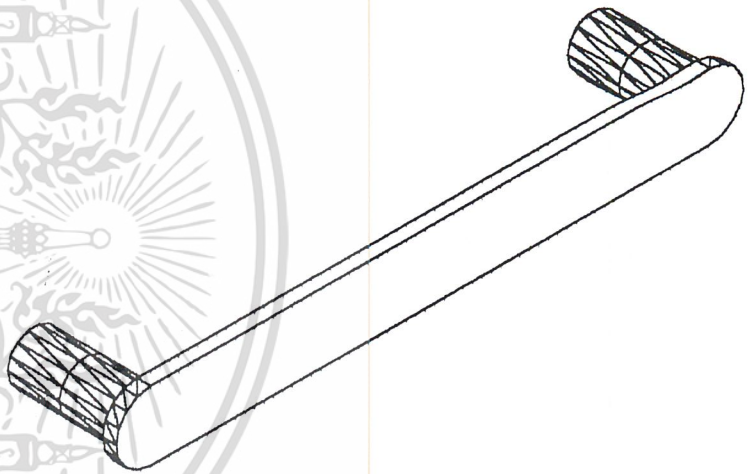


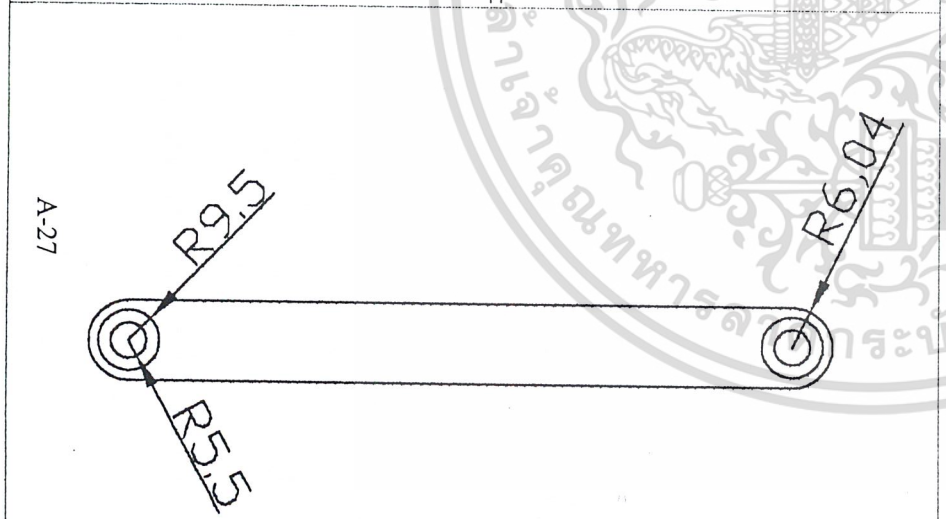
King Mongkut's Institute of Technology Ladgrabang	
Project : Electrical Furnace	Part : เหล็กปิดฝาบน
Code : EF-1050	



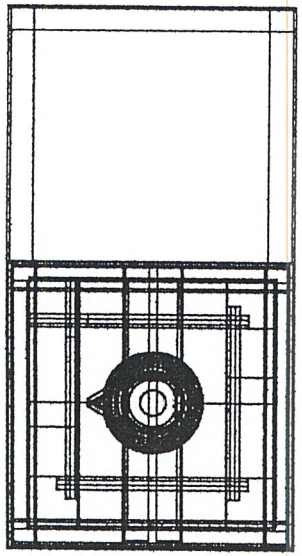
King Mongkut's Institute of Technology Ladgrabang	
Project : Electrical Furnace	Part : Handle
Code : EF-2000	

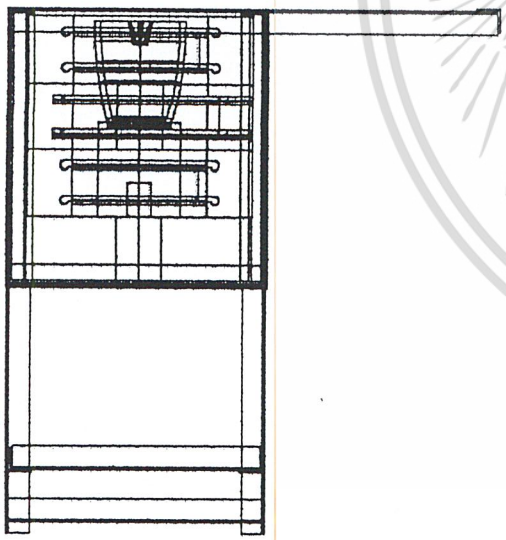


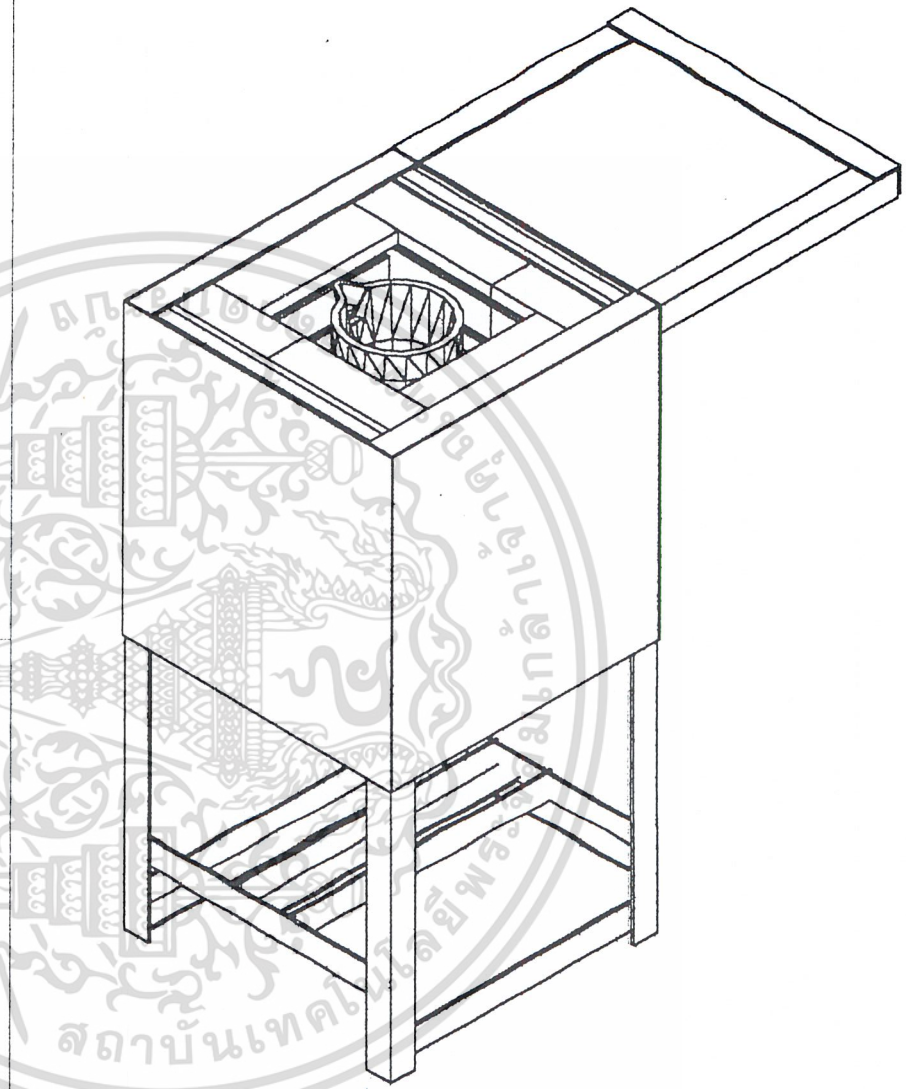




King Mongkut's Institute of Technology Ladgrabang	
Project : Electrical Furnace	Part : แขนเหวี่ยงฝาเตา
Code : EF-3000	

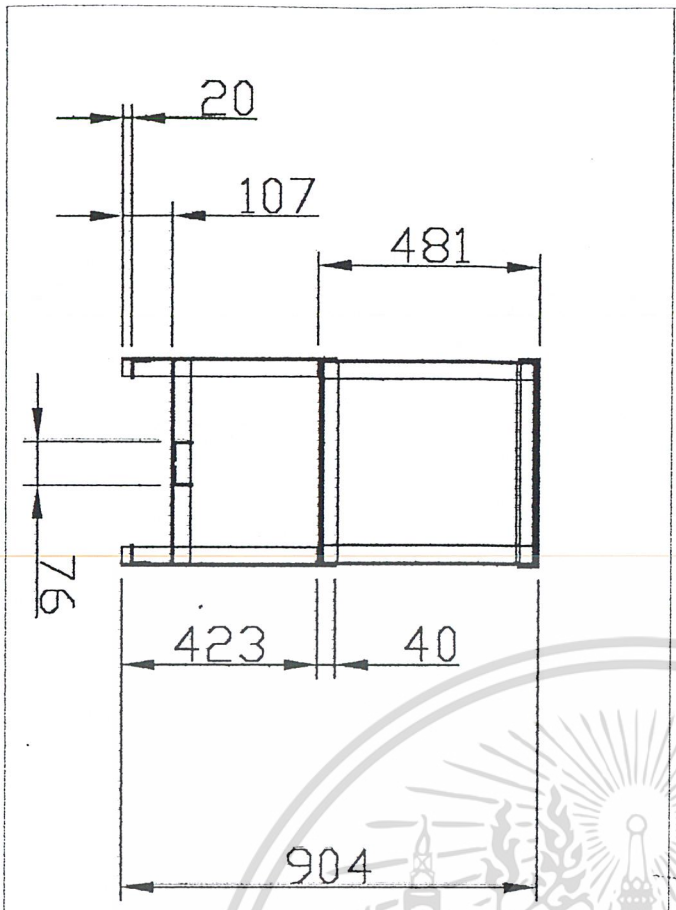


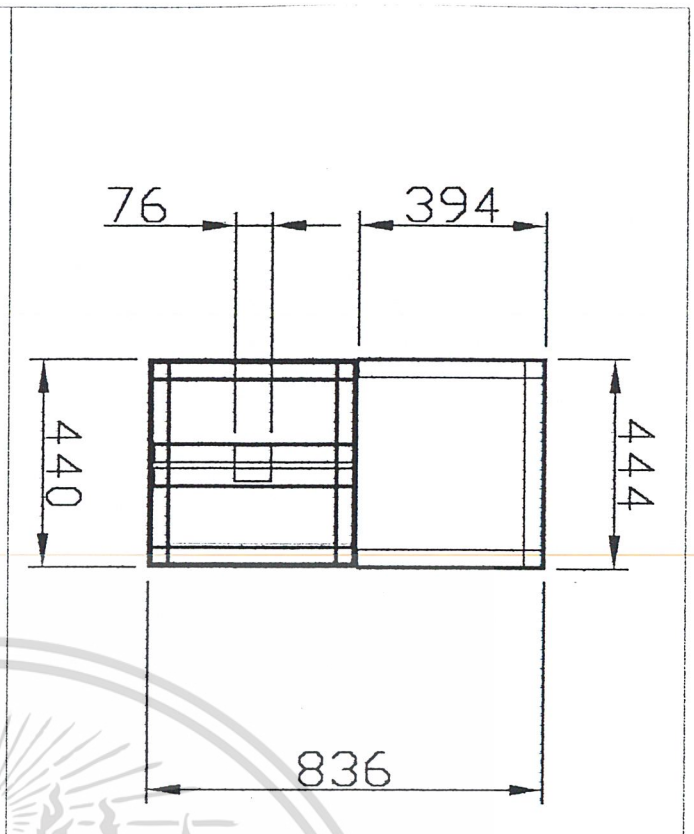


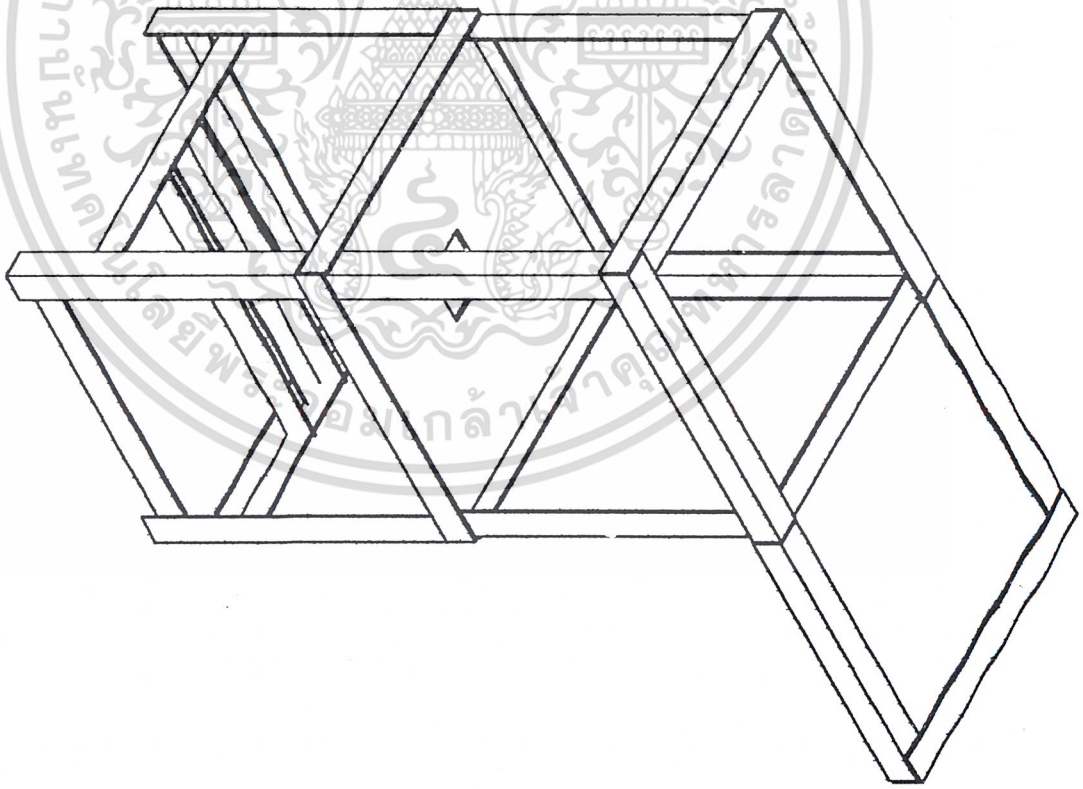


King Mongkut's Institute of Technology Ladgrabang	
Project : Electrical Furnace	Part : ตัวเตาหลอม
Code : EF-4000	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

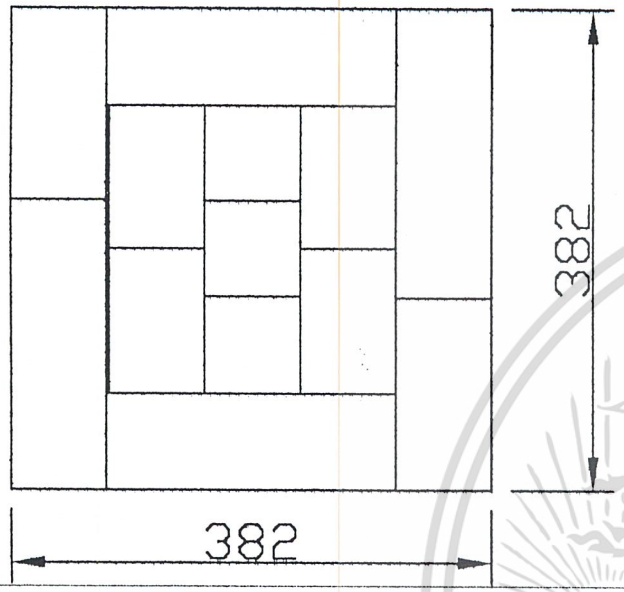


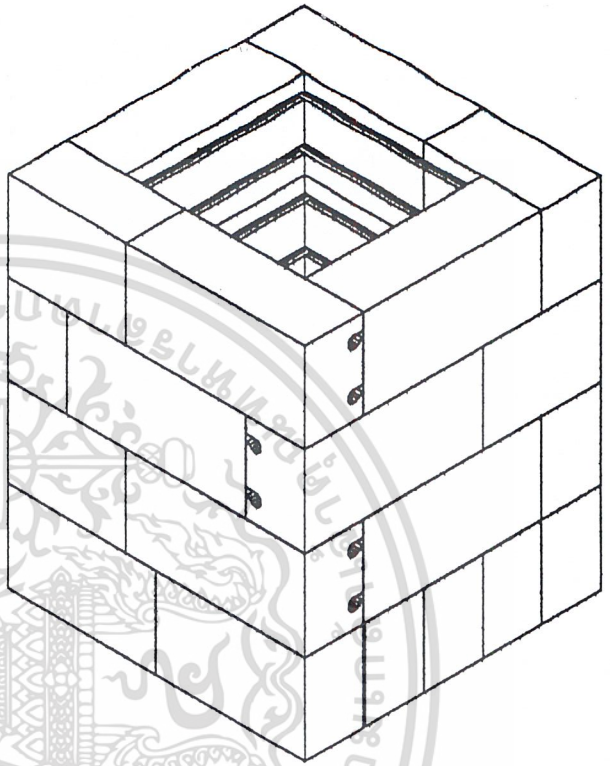


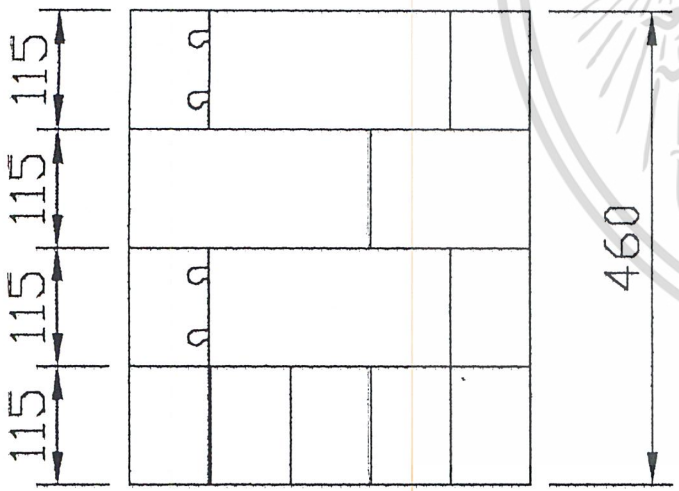


King Mongkut's Institute of Technology Ladgrabang		
Project : Electrical Furnace	Part : โครงตากลอย	
Code : EF-4010		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



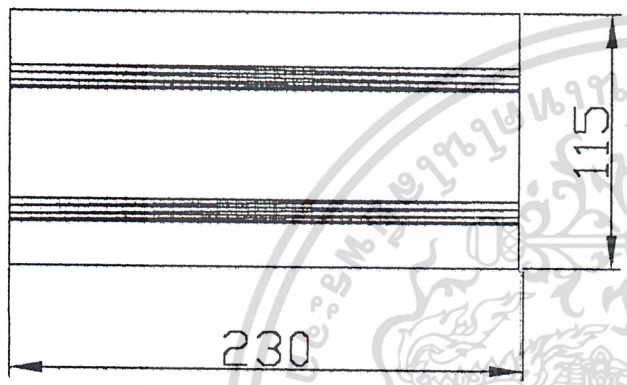


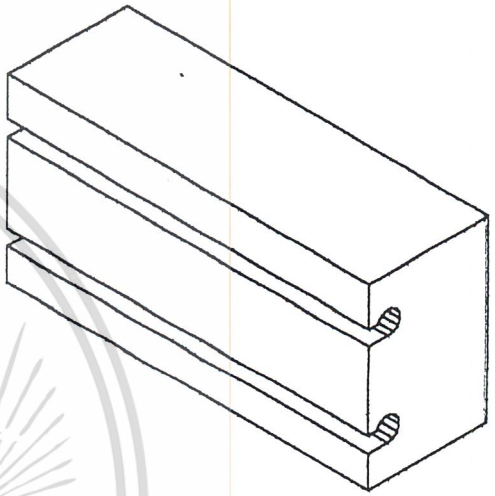


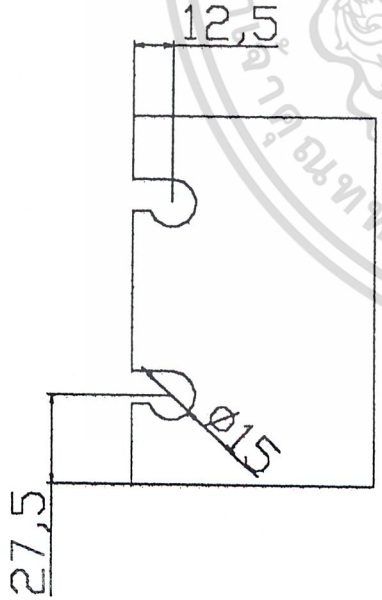
King Mongkut's Institute of Technology Ladgrabang	
Project : Electrical Furnace	Part : อิฐก่อตัวเตา
Code : EF-4020	

A-30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

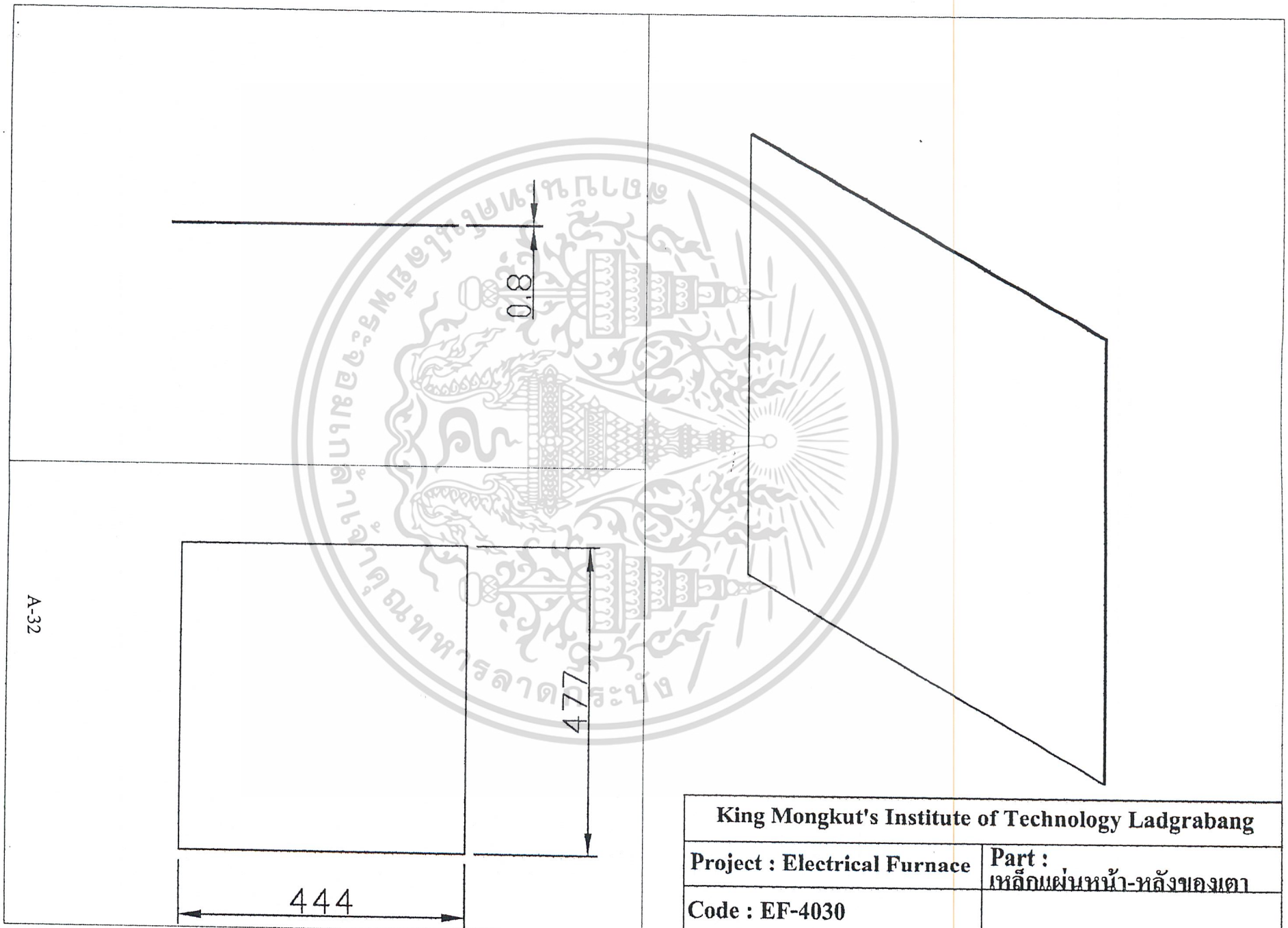




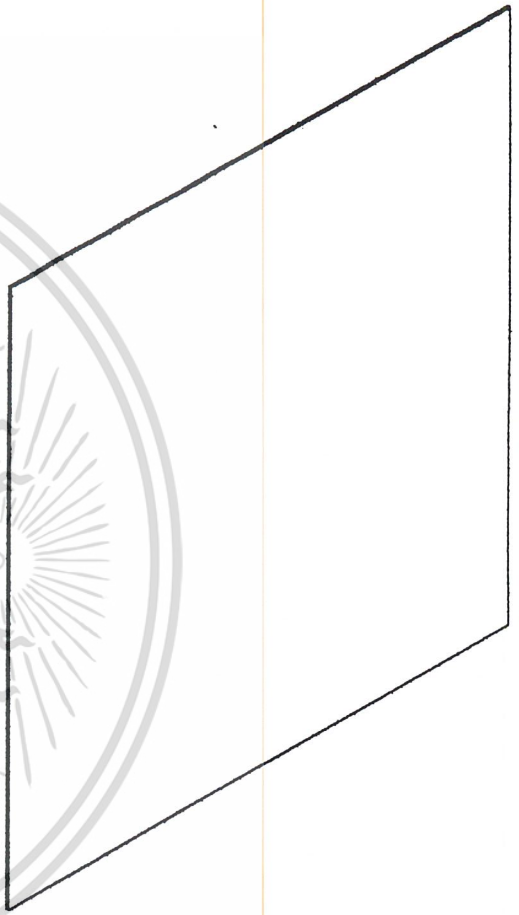


A-31

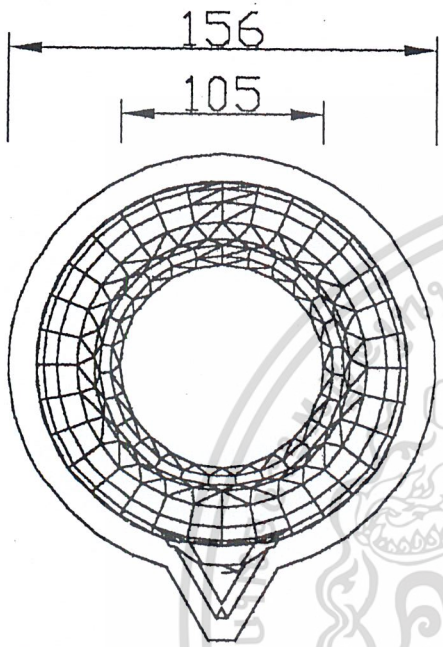
King Mongkut's Institute of Technology Ladgrabang	
Project : Electrical Furnace	Part : อิฐเซาะร่อง
Code : EF-4021	

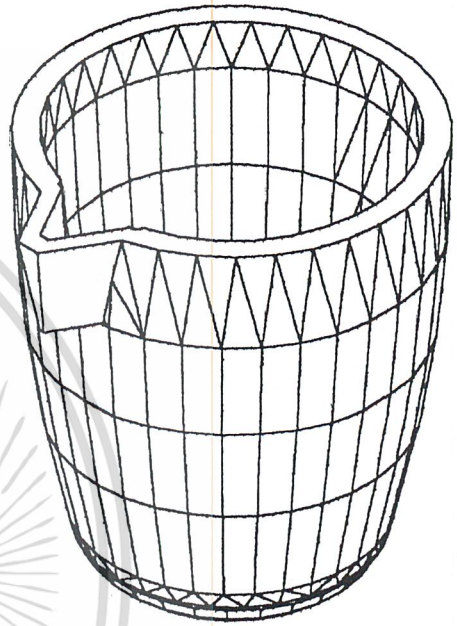


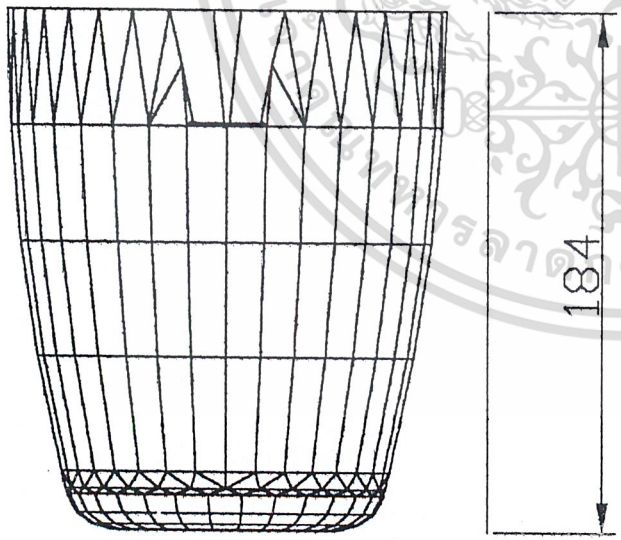
King Mongkut's Institute of Technology Ladgrabang	
Project : Electrical Furnace	Part : เหล็กแผ่นหน้า-หลังของเตา
Code : EF-4030	



King Mongkut's Institute of Technology Ladgrabang	
Project : Electrical Furnace	Part : เหล็กแผ่นซ้าย-ขวาของเตา
Code : EF-4040	

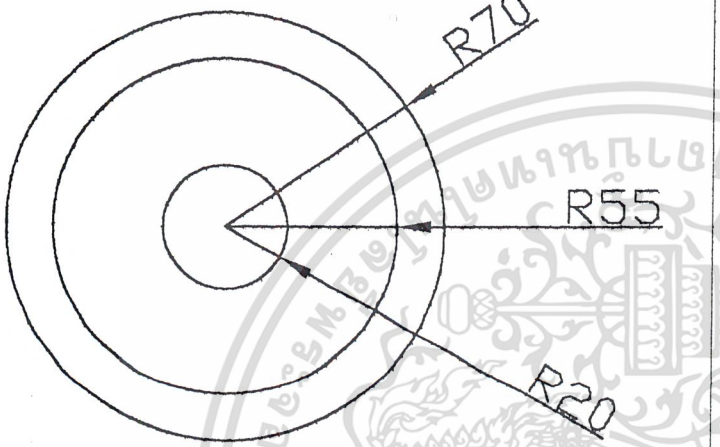


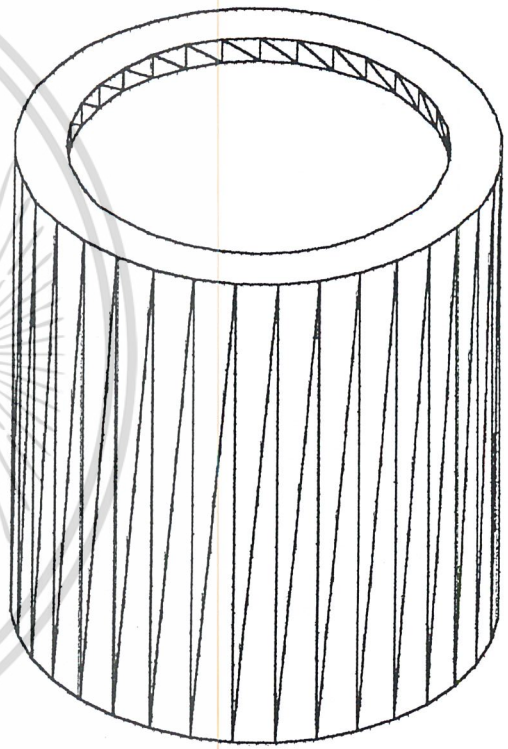


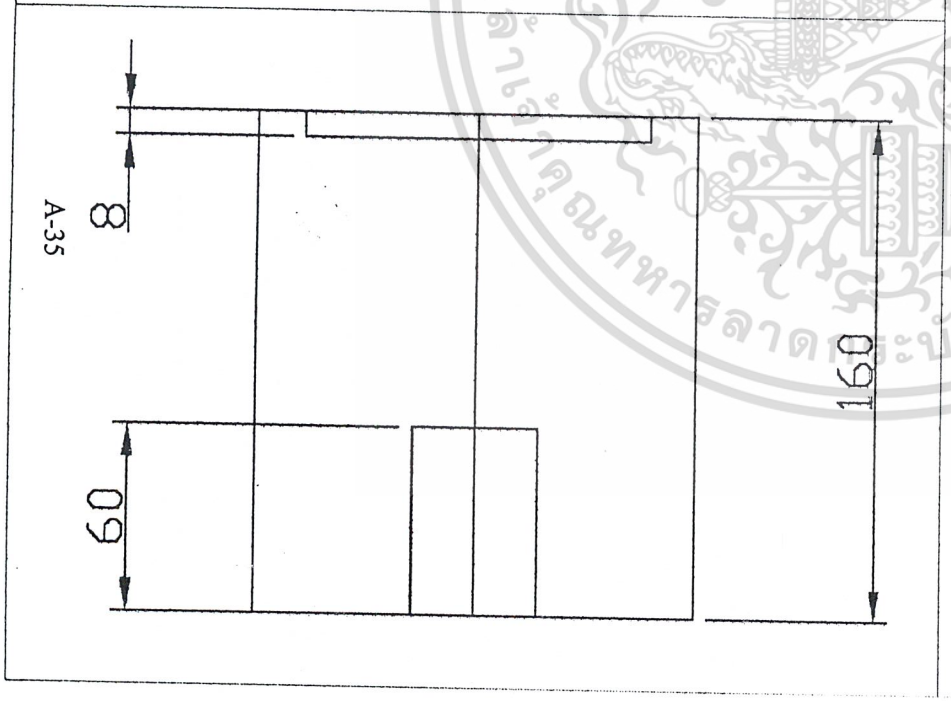


A-34

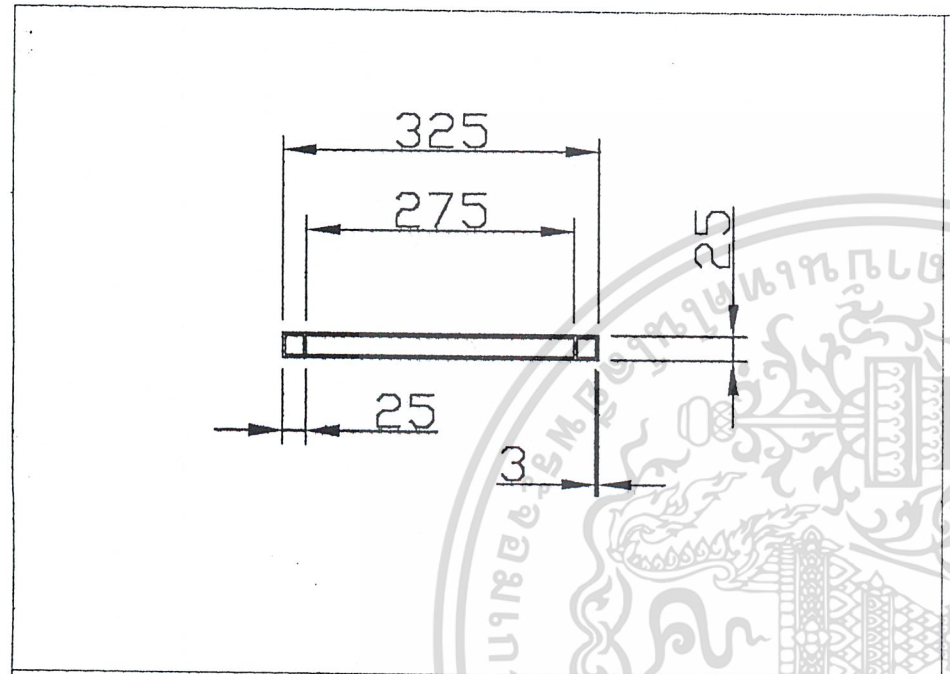
King Mongkut's Institute of Technology Ladgrabang	
Project : Electrical Furnace	Part : Crusible
Code : EF-5000	

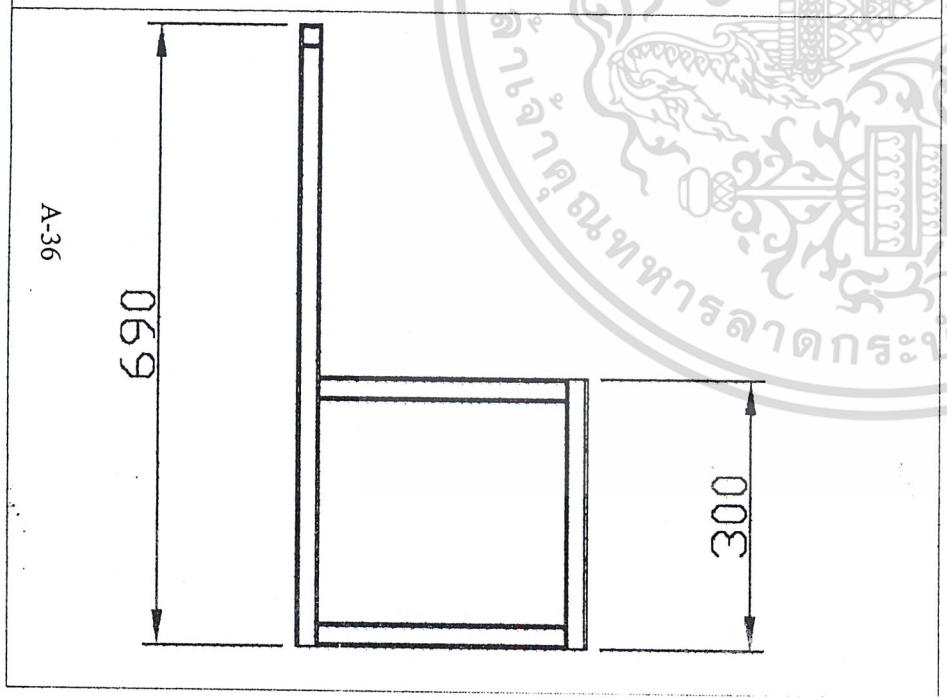




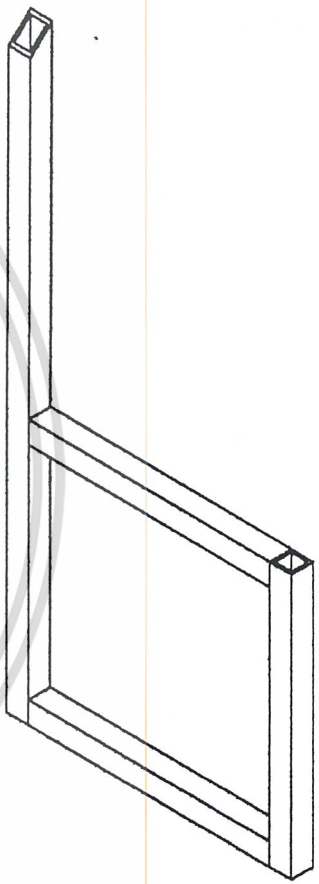


King Mongkut's Institute of Technology Ladgrabang	
Project : Electrical Furnace	Part : ฐานรองเบ้า
Code : EF-6000	



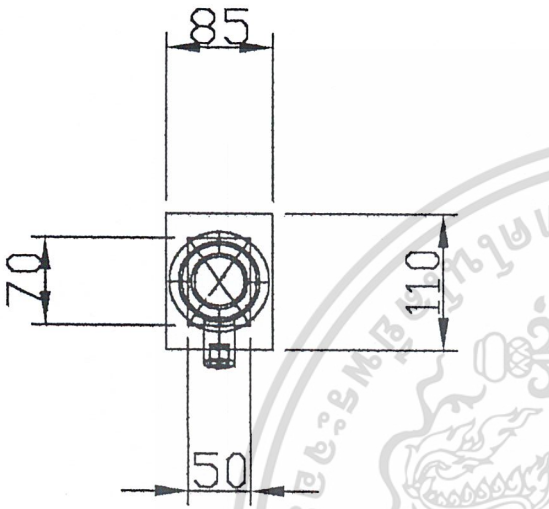


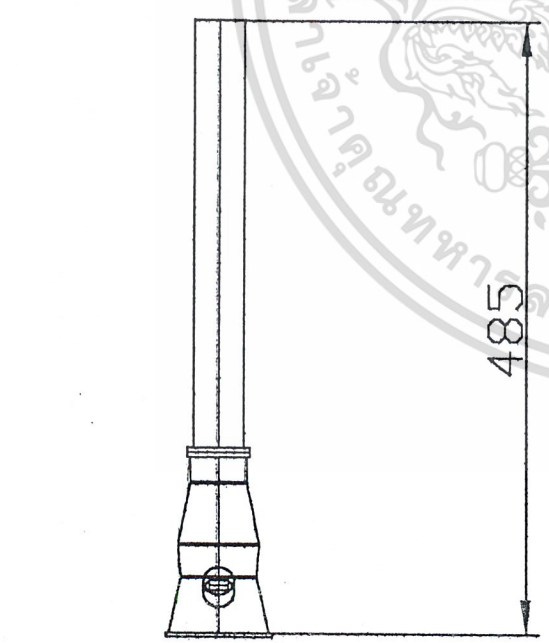
A-36



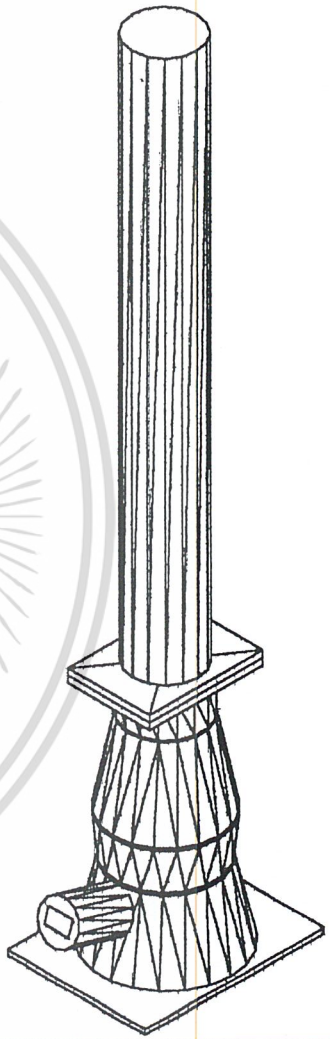
King Mongkut's Institute of Technology Ladgrabang	
Project : Electrical Furnace	Part : โครงติดกล่องควบคุม
Code : EF-7000	

ลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

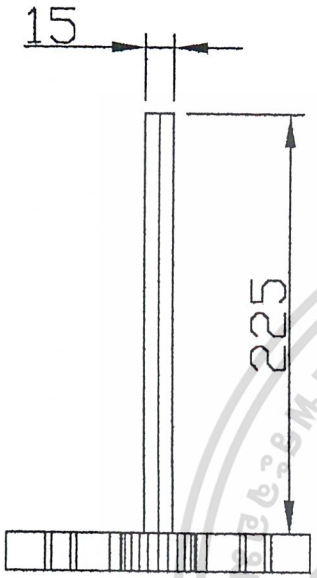


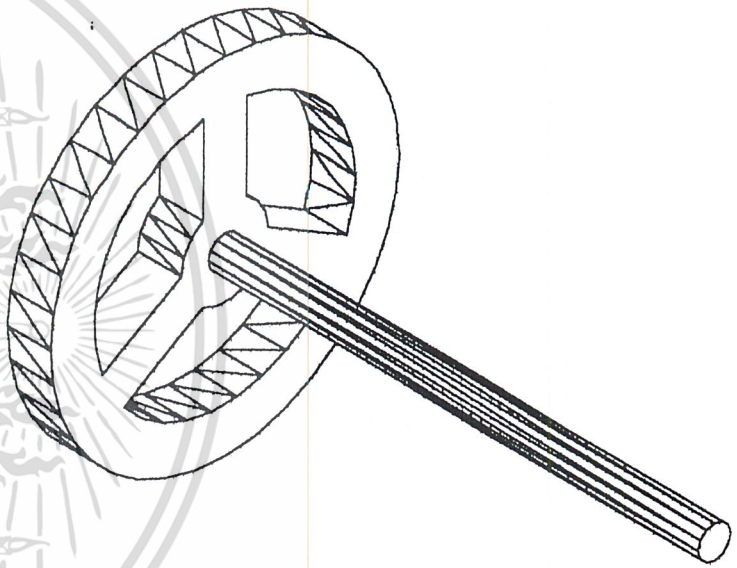


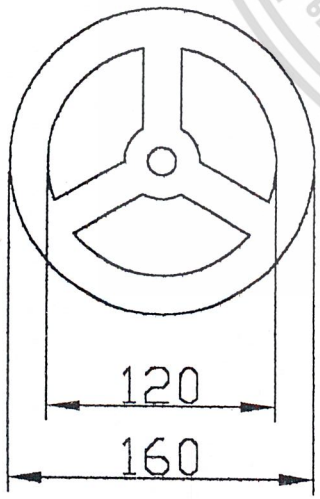
A-37



King Mongkut's Institute of Technology Ladgrabang	
Project : Electrical Furnace	Part : ชุดยกเบ้าหลอม
Code : EF-8000	







A-38

King Mongkut's Institute of Technology Ladgrabang	
Project : Electrical Furnace	Part : พวงมาลัยชุดยกเบ้าหลอม
Code : EF-9000	

ผู้ใช้งานระบบห้องสมุดนี้ยินยอมให้ใช้ข้อมูลเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำ ดัดแปลง เผยแพร่ หรือกระทำการใดๆ ในลักษณะเดียวกันนี้ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น

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 ▲ TO SELECT SENSOR e.g. Type K – 2
Sensor options:
(For full table **see 8**)

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

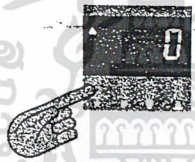
RTD 9
PT100

Step 4

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

Step 5

PRESS ✱ TO DISPLAY SET POINT



Step 6

PRESS AND HOLD ✱
PRESS ▲ TO INCREASE SET POINT

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

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

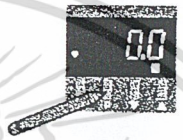
TO AUTOTUNE

Step 7

START AUTOTUNE 'AT' NEAR AMBIENT

Step 8

PRESS P TO ACCESS PROGRAM MODE
Function O flashes on right



Step 9

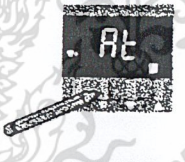
PRESS ✱ TO CHANGE TO OPTION SELECTION
Option O flashes on left

Step 10

PRESS ▲ TO SELECT AUTOTUNE 'AT'
Option 1

Step 11

PRESS P TO START AUTOTUNE 'AT'



AT and Process temperature displayed alternately during Autotune

2 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

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, 1 Setting up
2, 3, 5 Autotune, 6 Prop cycle time
7 Functions, 4 Selection, 8 Tables
12 Alarms, 11 Error messages

Autotuned parameters	Autotune limits
Entered automatically:	
Proportional band/Gain	0.5 – 200 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**

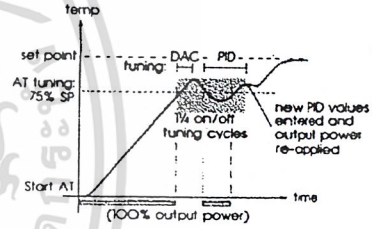


Fig. 1 Autotune AT

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

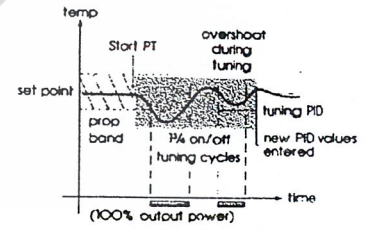


Fig. 2 Autotune PT

3.3 OVERIDING 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)

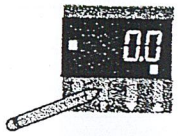
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

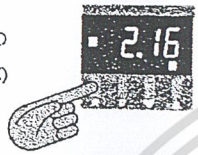


Step 2

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

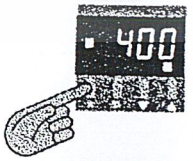
Used in Function 2 to set full scale alarms and Function 24 – Range adjustment. Mode B enables all digits to be used for Options values

Step 1

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

Step 2

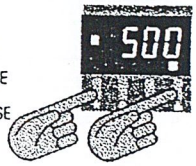
PRESS ✱ TO DISPLAY OPTION VALUE e.g. Range 400° flashes



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

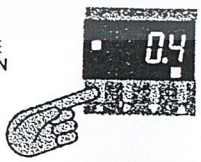
Run Autotune AT **see 2**. When complete (alternating AT display stops) display the AT calculated cycle time and accept if suitable, this will then replace the 20 sec factory setting

Step 1

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

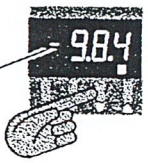
Step 2

PRESS ✱ TO CHANGE TO OPTION SELECTION



Step 3

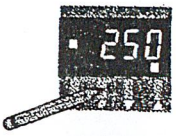
PRESS ▲ TO DISPLAY CALCULATED AT VALUE e.g. 9.8 sec
Note Flashing bar shows calculated AT value is displayed



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 secs

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

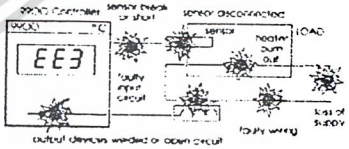


Fig. 3 Typical faults detected by LBA

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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8 FUNCTIONS AND OPTIONS TABLE
Please read these important notes first

1. **Factory setting:** is Option **O** (except Functions 2 and 22)

2. **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

3. **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

4. **AT values** (marked ▲ ■ ▼):
As calculated on the latest AT or PT run

5. **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 No.	Opt No.	Parameter

OPERATING MODE ... Protected

0 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 SP1 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	14	▲ ■ ▼ Operational AT value
5	60 sec		
6	0.05 sec	15	■ Latest calculated 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		
7	1 sec	15	▲ ■ ▼ AT value
8	2 sec		

Fn No.	Opt No.	Parameter

OPERATIONAL PARAMETERS ... continued

7 SP1 DAC approach control

O	1.5 x prop band	5	3.0
1	0.5	6	4.0
2	1.0		
3	2.0	7	▲ ■ ▼ AT value
4	2.5		

8 SP1 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		
7	18 min	14	▲ ■ ▼ AT value

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 No.	Opt No.	Parameter

INITIAL CONFIGURATION ... Protected

16 Sensor Select and Range Table

Range Table

	Type	Factory set °C	Factory set °F	Sensor range (SR) °C	Sensor range (SR) °F
	T/C				
1	J	400	800	800	1470
2	K	400	800	1200	1999
3	N	400	800	1200	1999
4	R	1600	1999	1600	1999
5	S	1600	1999	1600	1999
6	T	250	500	250	500
7	E	500	1000	600	1100
8	L	400	800	800	1470
10	B	1600	1999	1800	1999
	RTD				
9	PT100	200	400	400	750

Range minimum: O°C/32°F
Except T/PT100:
Factory set O°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 (O.1°) ±199.9° 1° settings become O.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 not reset by Function 15
1	°F	

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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13 IMPORTANT ADVANCED FUNCTIONS SECURITY

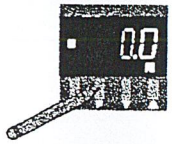
The advanced functions are intended for OEM's and process engineers. Access is therefore protected in the Function table

To avoid inadvertent access to the advanced functions, ensure that the protection is set to Fn 15/Opt 5 after use.

13.1 'HIDDEN' ACCESS TO ADVANCED FUNCTIONS

Step 1

PRESS P TO ENTER PROGRAM MODE

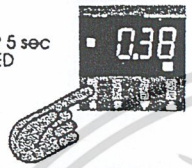


Step 2

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 No.	Opt No.	Parameter

26 SP1 Heat Power limit

0	100% max	8	60%
1	95%	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%

output

Not in SP1 ON/OFF mode

27 SP2 Cool limit

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

output

Not in SP2 ON/OFF mode

Direct/Reverse mode selection

		Normal	OFF when logically ON
28	SP1 Output	0	1
29	SP1 LED	0	1
30	SP2 Output	0	1
31	SP2 LED	0	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 (0.1°)

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 **45** US
44 OS2

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

46 QCT1 **48** QCT3
47 QCT2 **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, independant of set point. This high sensitivity monitor may be affected by interference. (Fit snubber to minimise disturbance)

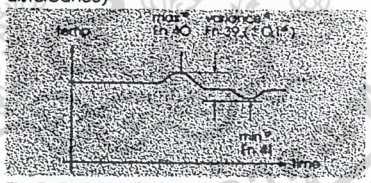


Fig. 7 Performance monitor (PM) Fns 38-41

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)

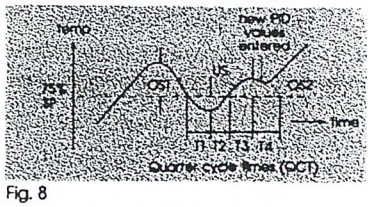


Fig. 8

13.4 MONITOR OPERATION (PM/DCM)

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

14 PROGRAM SECURITY LOCK

To be made by qualified technicain. 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.

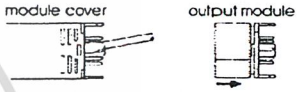
[• •] • LOCKED (or remove link)

• [• •] UNLOCKED

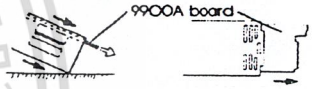
15 INTERNAL LINK CHANGES

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

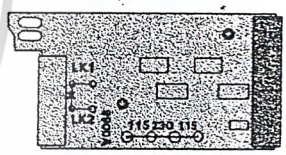
To remove the 9900A board:
1. First removethe output module, carefully lever the retaining clips from the slots in the module cover with a small screwdriver.



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	Option Set date:				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

17 COOL STRATEGY FOR HEAT-COOL APPLICATIONS

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

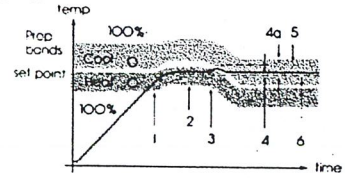


Fig. 9

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)

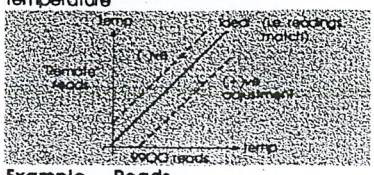
Step

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 O° (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 REGULATING TO A REMOTE STANDARD

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

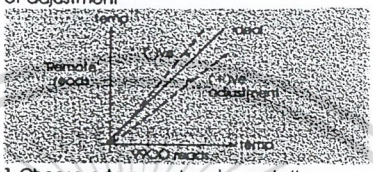
SENSOR ERROR CORRECTION: Fn 9
Provides correction at one single temperature



Example	Reads
9900	404°
'Remote'	400°
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	T1 reads		T2 reads
9900	60°		200°
'Remote'	58°		205°
Error	E1 = +2°	E2 =	-5°

4. **Calculation of span adjustment for Fn 35**

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

$$\text{Example: Fn 35} = \frac{(-5°) - (+2°)}{200° - 60°} \times 250° \quad \text{(Fn 24 CR)}$$

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

Fn 35 = -5° Set (-5°) 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

19 NOTES ON OTHER FUNCTIONS

Function Item

Fn O 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 O°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

20 PID TUNING NOTES

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

Output device	Recommended time
9900 Internal relays	10 sec minimum (5 sec with derated contacts & snubber)
SSR	1 sec
Linear output (mA/Vdc)	0.05 sec

Ideal **Too long** (oscillates)

2. **Proportional band/Gain: Fn 5/11**
   Smooths out oscillation occuring 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 independant 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 O
   (or Reset funtions: 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:**

		Set opt value
Fn 4 Prop cycle time (Ensure compatible with output device)	$\frac{T}{20}$ sec	Nearest
Fn 5 Prop band/Gain	$\frac{A \times 1.5 \times 100\%}{\text{config range}}$	Next larger
Fn 6 Derivative time/Rate	$\frac{T}{10}$ sec	Next shorter
Fn 8 Integral time/Reset	$\frac{T}{60}$ min	Next longer
Fn 7 DAC Approach control	1.5 factory set	see 20.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 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 polution 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.

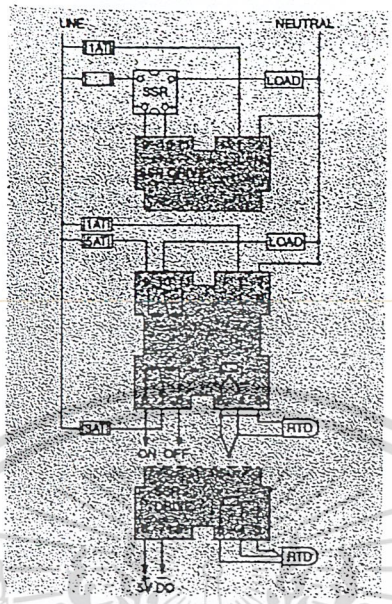
It is the responsibility of the installation engineer to ensure that this equipment's compliance to EN61010 is not impaired when fitted to the final installation and to use this equipment as specified in this manual, failure to do so may impair the protection provided. Follow wiring diagrams and regulations.

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"²) 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.

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)

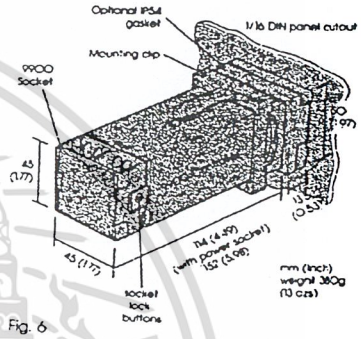


Fig. 6

11 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. SP1 in ON/OFF mode	Latches: Reset

SOFTWARE FAULTS

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

PRESS ▼▲ together to reset latched message

12 9900 SPECIFICATION

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	NiCroSil/NiSil	B	Pt - 30% Rh/
E	Chromel/Con		Pt - 6% Rh

Standards: IPTS 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 0-300°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: ±1.5% Impedence 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	9911C/F	9912C/F
Relay	SSd	9912C/F	9922C/F
SSd	Relay	9921C/F	9921C/F
SSd	SSd	9922C/F	9922C/F
Relay	-	9901C/F	9902C/F
SSd	-	9920C/F	9920C/F

13 WARRANTY

CAL Controls warrant this product free of defects in workmanship and material 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

CONTROL CHARACTERISTICS

SP1 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	0.5-9.0 x PB
(ON/OFF Hysteresis	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.
Error indicator:	3 step LED.
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:	0.50°C (32-130°F)
Mouldings:	Flame Retardent 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

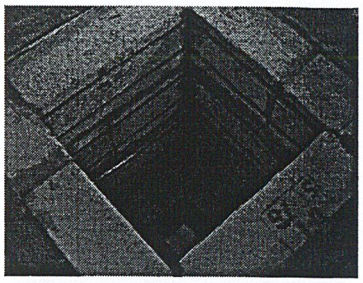
CAL Controls policy of continuous development may cause detail changes to the enclosed information. E & OE

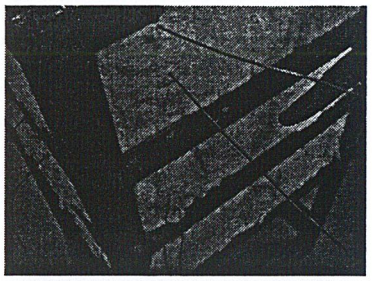
Designed by BDC Technical Services, Baldock, UK

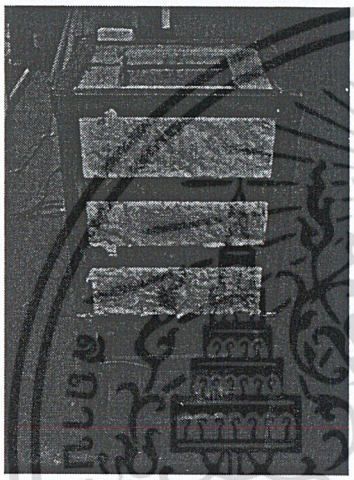
401 1296

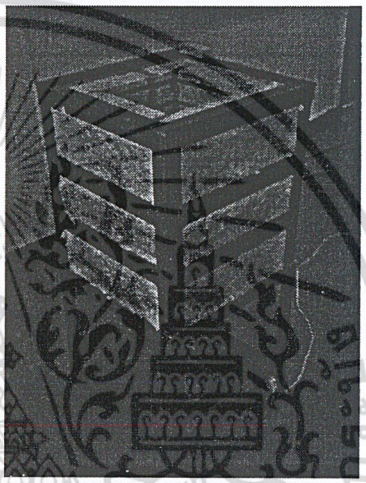
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปเตาหลอมอะลูมิเนียมไฟฟ้าขณะดำเนินการสร้าง

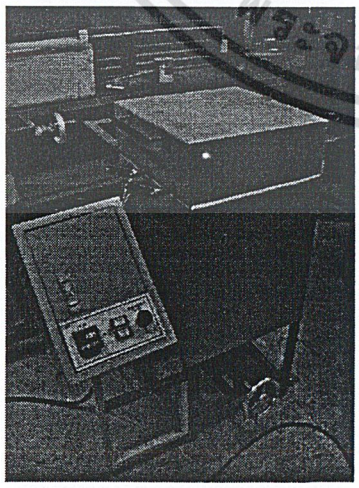


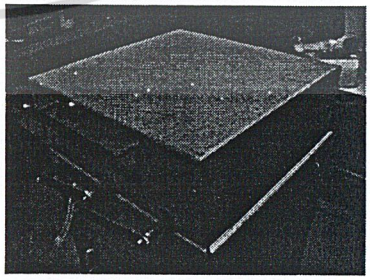






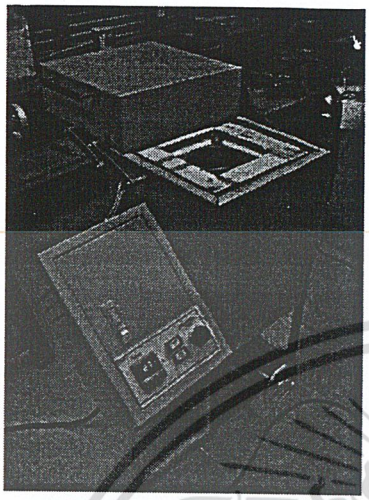
รูปภายนอกของเตาหลอมอะลูมิเนียมไฟฟ้า

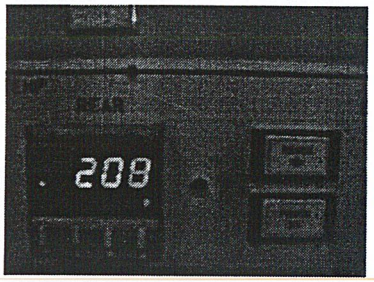


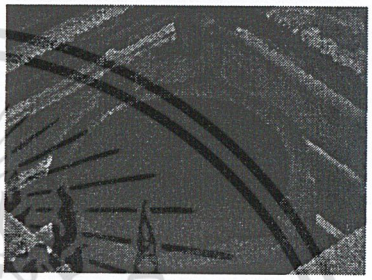


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปเตาหลอมอะลูมิเนียมไฟฟ้าขณะทำการทดลอง







เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการอุปกรณ์และราคาโดยประมาณในการสร้างเตาหลอมอะลูมิเนียมไฟฟ้า

รายการอุปกรณ์	ราคา/หน่วย (บาท)	จำนวน	ราคารวม(บาท)
1. อิฐทนไฟ	4.	45	1800
2. ปูนทนไฟ	35 kg.	1	560
3. Thermo couple	110	1	1100
4. Them control	5000	1	5000
5. Crucible	1700-1800	1	1750
6. เหล็กฉาก	250 บาท/ 6 เมตร	2	500
7. เซรามิคไฟเบอร์	1500	1	1500
8. Heater	2200 บาท/1 kg	0.8	1760
9. เบ็ดเตล็ด			3000
		Total	16970

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้