

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เตาอบไฟฟ้าในบรรยากาศอาร์กอน

Electric Furnace Atmosphere of Argon



นาย มานนท์ เซ็นตียะนันท์

Mr. Manon Sentiyanont

นาย อิสระ ไชยสอาด

Mr. Isara Chaisard

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2545

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 49867

วัน,เดือน,ปี = 2 มี.ค. 2547

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับกรใช้ร่วเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์ เตาอบไฟฟ้าในบรรยากาศอาร์กอน
Electric Furnace Atmosphere of Argon
นักศึกษา นาย มานนท์ เช็นติยะนนท์
รหัสประจำตัว 43015693
นักศึกษา นาย อิศระ ไชยสอาด
รหัสประจำตัว 43015713
ปริญญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ
ปีการศึกษา 2545
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	เตาอบไฟฟ้าในบรรยากาศอาร์กอน Electric Furnace Atmosphere of Argon
นักศึกษา	นาย มานนท์ เซ็นดิยะนนท์ นาย อิศระ ไชยสอาด
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	ผศ.พรศักดิ์ อรรธวานิช อ.พลชัย โชติปราชญกุล

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการออกแบบและสร้างเตาอบไฟฟ้าในบรรยากาศอาร์กอนและจะเป็นอุปกรณ์ในการทดลองของภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ซึ่งลักษณะของเตาอบมีดังนี้ ตัวโครงสร้างเตามีขนาด 390 x 390 x 455 มิลลิเมตร ภายในช่องบรรจุงานมีขนาด 180 x 180 x 250 มิลลิเมตร ใช้ไฟฟ้า 1 เฟส แรงเคลื่อนไฟฟ้า 220 โวลต์ กำลังไฟฟ้า 2.5 กิโลวัตต์ อุณหภูมิที่ใช้งานสูงสุด 1000 °c ส่วนของอุปกรณ์การควบคุมอุณหภูมิใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ตัวกำเนิดความร้อนใช้ขดลวดต้านทานขนาด 1.5 มิลลิเมตร จำนวน 820 ขด มีท่อวาล์วเปิด-ปิดขนาด 11 มิลลิเมตร เป็นตัวระบายออกซิเจนและก๊าซออกมาทางด้านผนังเตาใช้ฉนวนกันความร้อนคือ อิฐทนไฟ และไฟเบอร์บอร์ด เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนข้อมูลทางด้านกรคำนวณในการออกแบบได้อ้างอิงจาก Kanthal Handbook บริษัท แอสเสป สตีลส์ (ประเทศไทย) จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Electric Furnace Atmosphere of Argon
Student	Mr. Manon Sentiyant Mr. Isara Chaisard
Degree	Bachelor of Engineering in Industrial Engineering King Mongkut's Institute of Technology Lankrabang
Year	2002
Thesis Advisor	Asst. Prof. Pornsak Attavanich Mr. Pholachai Chotipraynakul

ABSTRACT

This report is a part of a senior student's thesis required for their graduation in Industrial Engineering. The Objective of this thesis are design and construct electric furnace atmosphere of argon to be used in the department lab. The Furnace itself is 390 x 390 x 455 mm. At the outer dimensions with inner chamber size of 180 mm length and width and a 250 mm height. This 2.5 Kilowatts furnace uses 220 volts single phase electricity and can generate up to 1000 °c controlled by a type K thermocouple. Pipe valve size of 11 mm use for drain oxygen and gas argon to out side. As all information are derived from Kanthal Handbook by Assabsteel (Thailand) Ltd.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์หัวข้อ เตาอบไฟฟ้าในบรรยากาศอาร์กอน ประสบผลสำเร็จได้นั้นเพราะได้รับความกรุณาเป็นอย่างสูงจาก ผศ.พรศักดิ์ อรรณวนิช และอาจารย์ พลชัย โชติปราชญกุล ในการให้โอกาสสำหรับคำปรึกษาแนะนำและให้ความช่วยเหลือในการแก้ไขปัญหาจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สรรพสิทธิ์ ลิ้มบรรณรัตน์ เป็นอย่างสูงสำหรับความกรุณาในการสนับสนุน และให้ความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน รวมถึงการดูแลเอาใจใส่และคอยให้กำลังใจตลอดมา

ขอขอบพระคุณ Mr.Zeng Xing Wan Managing Director Inter Kilns Industry Co., Ltd. เป็นอย่างยิ่งที่ท่านได้อนุเคราะห์วัสดุอุปกรณ์เครื่องมือและสถานที่ในการสร้าง เตาอบไฟฟ้าในบรรยากาศอาร์กอน จนเป็นผลสำเร็จ

ขอขอบคุณ นาย รุ่งโรจน์ ไกรศรีศิริกุล เพื่อนนักศึกษาที่ให้ความช่วยเหลืออย่างจริงใจมาโดยตลอด
สุดท้ายนี้ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกคนสำหรับกำลังใจที่ดี น้ำใจที่คงาม



นาย มานนท์ เชนดิยะนนท์
นาย อิศระ ไชยสอาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญภาพ	VII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตการศึกษา	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 การถ่ายเทความร้อน	2
2.2 การควบคุมบรรยากาศภายในเตา	9
2.3 ทฤษฎีการออกแบบเตาอบไฟฟ้า	13
2.4 ประเภทของวัตถุดิบไฟ	17
บทที่ 3 การดำเนินงาน	
3.1 การดำเนินงานด้านฮาร์ดแวร์	23
3.2 การดำเนินงานด้านวงจรควบคุม	42
3.3 การดำเนินงานด้านการทดสอบเตา	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน

4.1 ผลการดำเนินงานด้านฮาร์ดแวร์	44
4.2 ผลการดำเนินงานด้านวงจรควบคุม	45
4.3 ผลการทดสอบ	46

บทที่ 5 สรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน

5.1 สรุปผล	52
5.2 ข้อเสนอแนะในการทำโครงการ	52

บรรณานุกรม	53
------------	----

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ภาคผนวก ข

ภาคผนวก ค



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงระยะเวลาในการเผาที่ความหนาต่างๆ กัน	11
ตารางที่ 2.2 แสดงส่วนผสมของเกลือกับช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน	12
ตารางที่ 2.3 แสดงระยะห่างมากที่สุดระหว่างช่วงต่อช่วงของลวดแบนที่แนะนำให้ใช้	15
ตารางที่ 2.4 สมบัติทางกายภาพของ Ar	22
ตารางที่ 3.1 แสดงชนิดของอิฐฉนวนทนไฟ	34
ตารางที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของเตาอบ ในการทดสอบที่ 1	47
ตารางที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของเตาอบ ในการทดสอบที่ 1 แซ่ไว้เวลานาน 1 ชั่วโมง	48
ตารางที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของเตาอบ ในการทดสอบที่ 2	49
ตารางที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของเตาอบ ในการทดสอบที่ 2 แซ่ไว้เวลานาน 1 ชั่วโมง	50



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังเรียบ	4
รูปที่ 2.2 วงจรความร้อนสมมูลสำหรับผนังหลายชั้นอย่างอนุกรม	7
รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะรูปร่างเป็นแบบอนุกรม-ขนาน	8
รูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นถึงหน้าสัมผัสที่มาประกบกันระหว่างผิวของของแข็ง	9
รูปที่ 2.5 แสดงผลของอุณหภูมิที่ต่างกันบริเวณผิวและภายในใจกลางเมื่อเผาด้วยอัตราต่าง ๆ กัน	12
รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาตร-กำลังไฟฟ้า-อุณหภูมิ ของเตาที่มีฉนวนความร้อน	13
รูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์อุณหภูมิภายในเตา และ Surface load	14
รูปที่ 3.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาตร-กำลังไฟฟ้า-อุณหภูมิ ของเตาที่มีฉนวนความร้อน	23
รูปที่ 3.2 แบบและขนาดต่าง ๆ ของเตา	26
รูปที่ 3.3 แบบและขนาดของโครงเหล็กฝาปิดเตา	27
รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายของโครงเหล็กฝาปิดเตา	27
รูปที่ 3.5 แบบและขนาดของโครงเหล็กตัวเตา	28
รูปที่ 3.6 ภาพถ่ายของโครงเหล็กตัวเตา	28
รูปที่ 3.7 แบบของอิฐที่เซาะร่อง	29
รูปที่ 3.8 ภาพถ่ายของอิฐที่เซาะร่อง	29
รูปที่ 3.9 แบบการเรียงอิฐ	30
รูปที่ 3.10 ภาพถ่ายการเรียงอิฐ	30
รูปที่ 3.11 แบบภาพตัดคั่นบนของตัวเตาอบ	31
รูปที่ 3.12 ภาพถ่ายคั่นบนของตัวเตาอบในขณะที่เปิดฝาเตา	31
รูปที่ 3.13 แบบแสดงภาพรวมของเตาอบเมื่อประกอบส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกัน	32
รูปที่ 3.14 แบบแสดงภาพตัดภายในเตาอบ	33
รูปที่ 3.15 อิฐทนไฟ	34
รูปที่ 3.16 แสดงแบบและขนาดมาตรฐานของอิฐทนไฟ	35
รูปที่ 3.18 ปูนทนไฟ	37
รูปที่ 3.19 เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิดต่าง ๆ	38
รูปที่ 3.20 แสดงรูปแบบและขนาดต่าง ๆ ของขดลวดฮีตเตอร์	39
รูปที่ 3.21 แสดงภาพของขดลวดฮีตเตอร์ชนิดที่ใช้งาน	39
รูปที่ 3.23 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ	40
รูปที่ 3.24 เซรามิกไฟเบอร์ชนิดต่าง	40
รูปที่ 3.25 เซรามิกไฟเบอร์แบบฝืน	41
รูปที่ 3.26 เซรามิกไฟเบอร์แบบกระดานแข็ง	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.27 แสดงวงจรควบคุม	42
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายด้านหน้าของเตาอบที่เสร็จสมบูรณ์	44
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายด้านบนของเตาอบที่เสร็จสมบูรณ์	44
รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายวงจรควบคุมที่เสร็จสมบูรณ์	45
รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายกล่องวงจรควบคุมที่เสร็จสมบูรณ์ขณะทำงาน	45
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ในการทดสอบที่ 1	47
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ภายในเวลา 1 ชั่วโมง ของการทดสอบที่ 1	48
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ในการทดสอบที่ 2	49
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ภายในเวลา 1 ชั่วโมง ของการทดสอบที่ 2	50
รูปที่ 4.9 แสดงภาพถ่ายชั้นทดสอบของการอบในบรรยากาศอาร์กอน	51
รูปที่ 4.10 แสดงภาพถ่ายชั้นทดสอบของการอบในบรรยากาศปกติ	51



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ

การอบชุบความร้อนเหล็กกล้า และเหล็กหล่อเป็นเทคโนโลยีอย่างหนึ่งที่มีความสำคัญมาก เพราะเหล็กจะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลภายหลังการอบชุบได้อย่างกว้างขวาง มากกว่าโลหะอื่น ๆ ที่ใช้ใน อุตสาหกรรม ในขณะที่สภาวะการแข่งขันในธุรกิจอุตสาหกรรม มีมากขึ้น ทำให้ต้องลดต้นทุนในการผลิตและลดเวลาในการทำงานในด้าน การอบชุบ ทำให้ผู้ประกอบการด้านอุตสาหกรรมหาวิธีการสร้างเตาอบชุบ โดยลดเวลาในการอบคืนตัว และป้องกันการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวเหล็กในขณะทำการอบ ซึ่งจะทำได้โดยวิธีการอบในบรรยากาศต่าง ๆ ในโครงการนี้จะทำการสร้างเตาอบไฟฟ้าในบรรยากาศอาร์กอน

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการอบเหล็กภายใต้การอบในบรรยากาศควบคุม
2. เพื่อศึกษากระบวนการทำงานของเตาอบ ไฟฟ้าในบรรยากาศอาร์กอน
3. เพื่อศึกษาหลักการออกแบบสร้างเตาอบ ไฟฟ้าในบรรยากาศอาร์กอน

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ใช้ขนาดด้านทานเป็นตัวกำเนิดความร้อน ใช้กระแสไฟฟ้า 1 เฟส 220 โวลต์ อุณหภูมิภายในเตาสูงสุด 1,000 องศาเซลเซียส
2. การควบคุมอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมคัปเปิ้ล เป็นตัววัดอุณหภูมิและอุปกรณ์ควบคุมทางไฟฟ้า เป็นตัวควบคุม
3. ใช้ก๊าซอาร์กอน เข้าไปแทนที่บรรยากาศในเตาอบ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รู้หลักการทำงานของเตาอบ ไฟฟ้า
2. ได้รู้ถึงการออกแบบสร้างเตาอบ ไฟฟ้าในบรรยากาศอาร์กอน
3. ได้เตาอบ ไฟฟ้าในบรรยากาศอาร์กอนไว้ใช้งาน และใช้ในการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การถ่ายเทความร้อน

เทคนิคนี้เป็นเตาอบหุบในบรรยากาศอาร์กอน ซึ่งใช้กับงานที่เป็นโลหะโดยใช้ขดลวดฮีทเตอร์เป็นตัวทำให้เกิดความร้อนโดยใช้หลักการถ่ายเทความร้อนมีรูปแบบในการถ่ายเทความร้อน ซึ่งจะกล่าวต่อไปนี้

2.1.1 การนำความร้อน (Conduction)

การนำความร้อน เป็นรูปแบบหนึ่งของการถ่ายเทความร้อน ในลักษณะของการแลกเปลี่ยนพลังงานจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง ไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยเคลื่อนแบบจลน์ (Kinetic Motion) หรือการชนกันโดยตรงของโมเลกุล ซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นในของไหลที่หยุดนิ่ง ส่วนในกรณีของโลหะนั้นจะเป็นการไหลของกระแสอิเล็กตรอน สำหรับของแข็งที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี จะมีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระมากมายที่เคลื่อนไหวอยู่ภายในโครงสร้างของ โมเลกุล (Lattice) ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าวัตถุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี จะเป็นตัวนำความร้อนที่ดีตามไปด้วย ยกตัวอย่างเช่น ทองแดง เงิน เหล็ก ฯลฯ อันเป็นผลจากการนำหรือถ่ายเทพลังงานความร้อน โดยอิเล็กตรอนอิสระเหล่านี้

กฎสหสัมพันธ์ของการนำความร้อนโดยถือเกณฑ์การสังเกตจากการทดลอง กำเนิดจากบิโตร์ (Biot) แต่ต่อมา นักฟิสิกส์-คณิตศาสตร์ชาวฝรั่งเศส ชื่อ โจเซฟ ฟูริเยร์ (Joseph Fourier) นำหลักการนี้มาใช้วิเคราะห์เป็นทฤษฎีความร้อน กฎนี้กล่าวว่า อัตราการไหลเวียนของการนำความร้อนในทิศทางที่กำหนดเป็นสัดส่วนกับพื้นที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อนและเกรเดียนต์ของอุณหภูมิในทิศทางนี้ สำหรับการไหลของความร้อนในทิศทาง x กฎของฟูริเยร์กำหนดเป็น

$$q_x = kA \frac{dT}{dx} \quad w \quad (2.1a)$$

หรือ $q''_x = \frac{q_x}{A} = k \frac{dT}{dx} \quad w / m^2 \quad (2.1b)$

โดยที่ q_x คือ อัตราการนำความร้อนผ่านพื้นที่ A ในทิศทางบวก x
 q''_x คือ ฟลักซ์ความร้อนในทิศทางบวก x
 k คือ ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุ (Thermal Conductivity of Material) และเป็นค่าบวก

2.1.2 การนำความร้อนในสภาวะสม่ำเสมอหนึ่งมิติ (One Dimensional ,Steady-State Conduction)

ในบทนี้ จะเป็นการพิจารณาเกี่ยวกับปัญหาการนำความร้อน แบบสม่ำเสมอในหนึ่งมิติ เพื่อหาการกระจายของอุณหภูมิ และความร้อนที่ไหลภายในวัตถุที่รูปร่างเป็นแบบผืนเรียบ, ทรงกระบอก และทรงกลม ลักษณะของการนำความร้อนแบบสม่ำเสมอที่จะกล่าวถึงนี้ จะมีเกรเดียนต์ของอุณหภูมิและการไหลของความร้อนขึ้นอยู่กับทิศทางเพียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทิศทางเดียว โดยที่อุณหภูมิแต่ละจุดของวัตถุไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา นอกจากนี้ยังกล่าวถึงลักษณะของเงื่อนไขที่ขอบเขตในแบบต่าง ๆ และลักษณะของการที่มีและไม่มีแหล่งผลิตความร้อนภายในวัตถุอีกด้วย

2.1.2.1 ผนังเรียบ (Plane wall)

สำหรับการนำความร้อนในหนึ่งมิติของผนังเรียบ อุณหภูมิจะเป็นฟังก์ชันของโคออร์ดิเนต x และ การส่งผ่านความร้อนพิจารณาเฉพาะในทิศทางนี้ (ในรูป 2.1) ของไหล 2 ชนิดที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน ไหลผ่านในแต่ละด้านของผนังเรียบ การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นโดยการพาความร้อนจากของไหลร้อนที่ $T_{\infty,1}$ สู่วิวหนึ่งของผนังที่ $T_{s,1}$ และผ่านผนังโดยการนำไปยังอีกด้านหนึ่งที่ $T_{s,2}$ จากนั้นความร้อนจะถูกพาออกไปโดยของไหลเย็นที่ $T_{\infty,2}$

ในอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ สิ่งแรกที่จะต้องรู้ก็คือ การกระจายของอุณหภูมิภายในผนังเรียบ

2.1.2.2 การกระจายของอุณหภูมิ (Temperature distribution)

การกระจายของอุณหภูมิภายในผนัง หาได้จากสมการการฟุ้งกระจายของความร้อนและเงื่อนไขที่ขอบเขตต่าง ๆ ตามเงื่อนไขดังกล่าว และไม่มีการผลิตความร้อนภายในผนัง สมการจะลดรูปเป็น

$$\frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) = 0 \quad (2.2)$$

ถ้าสมมติค่า k คงที่ โดยการอินทิเกรต 2 ครั้ง ได้คำตอบทั่วไปเป็น

$$T(x) = c_1 x + c_2 \quad (2.3)$$

โดยเงื่อนไขที่ขอบตามรูปได้ว่า $T(0) = T_{s,1}$ และ $T(L) = T_{s,2}$ แทนใน 2.3 จะได้

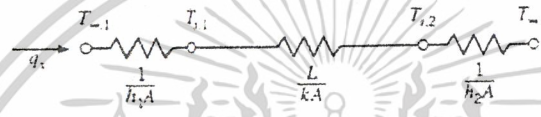
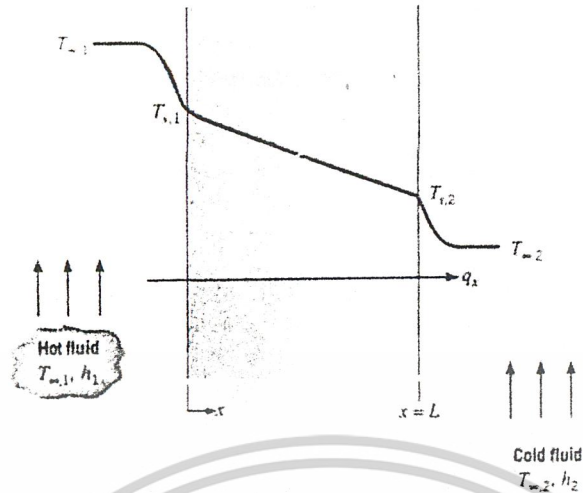
$$c_1 = \frac{T_{s,2} - T_{s,1}}{L}$$

$$c_2 = T_{s,1}$$

ดังนั้น คำตอบทั่วไปของการกระจายอุณหภูมิในผนัง คือ

$$T(x) = (T_{s,2} - T_{s,1}) \frac{x}{L} + T_{s,1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังเรียบ

โดยใช้กฎของฟูริเยร์ เพื่อหาคำตอบของการส่งผ่านความร้อน นั่นคือ

$$T(x) = (T_{s1} - T_{s2}) \frac{x}{L} + T_{s1} \quad (2.4)$$

สังเกตว่า A เป็นพื้นที่ของผนังซึ่งตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายเทความร้อน และฟลักซ์ความร้อนนั้นก็คือ

$$q_x = kA \frac{dT}{dx} = \frac{kA}{L} (T_{s1} - T_{s2}) \quad (2.5)$$

สังเกตเช่นกันว่า ค่าฟลักซ์ความร้อนเป็นค่าคงที่ไม่ขึ้นกับ x ซึ่งเป็นลักษณะที่ตรงกับสมการ (2.2) ซึ่งหมายความว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ความร้อนในทิศทาง x

$$q''_x = q_x / A = (k / L)(T_{s1} - T_{s2}) \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 ความต้านทานความร้อน (Thermal resistance)

ในที่นี้เรานำจะนำสมการ (2.4) ซึ่งให้แนวทางที่สำคัญมากมาใช้ นั่นคือความคล้ายคลึงกันระหว่างการที่กระจายของความร้อนและประจุไฟฟ้า โดยที่ความต้านทานไฟฟ้านั้นเกี่ยวข้องกับการนำไฟฟ้า ดังนั้นความต้านทานความร้อนก็ต้องมีส่วนเกี่ยวข้องกับการนำความร้อน จากสมการ (2.5) ความต้านทาน การนำความร้อน คือ

$$R_{1,cond} = (T_{s1} - T_{s2}) / q_x = L / kA \quad (2.7)$$

ในทำนองเดียวกัน สำหรับการนำไฟฟ้าในระบบเดียวกัน กฎของโอห์มได้ให้รูปแบบความต้านทานไฟฟ้าเป็น

$$R_e = (E_1 - E_2) / I = L / (\sigma A) \quad (2.8)$$

นอกจากนี้ ความต้านทานความร้อนยังมีส่วนเกี่ยวข้องกับการพาความร้อน จากกฎการเย็นตัวของนิวตัน

$$q = hA(T_s - T_\infty) \quad (2.9)$$

ความต้านทานความร้อนสำหรับการพา คือ

$$R_{t,conv} = (T_s - T_\infty) = \frac{1}{hA} \quad (2.10)$$

วงจรความร้อนสมมูลย์สำหรับผนังเรียบที่มีการพาความร้อนที่ผิว แสดงในรูปที่ 2.11 อัตราการถ่ายเทความร้อนหาได้จาก การแยกพิจารณาของแต่ละช่วงในวงจร ซึ่งได้

$$q_x = \frac{(T_{\infty,1} - T_{s1})}{1/h_1A} = \frac{(T_{s1} - T_{s2})}{L/kA} = \frac{(T_{s2} - T_{\infty,2})}{1/h_2A} \quad (2.11)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนอาจเขียนแทนด้วยเทอมของผลต่างอุณหภูมิทั้งหมด $(T_{\infty,1} - T_{\infty,2})$ และความต้านทานความร้อนรวม R_{to}

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{R_{to}} \quad (2.12)$$

เนื่องจากความต้านทานการนำและการพาต่ออนุกรมกัน จึงได้

$$R_{tot} = \frac{1}{h_1A} + \frac{L}{kA} + \frac{1}{h_2A} \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 ผนังหลายชั้น (Composite wall)

วงจรความร้อนสมมูลอาจใช้สำหรับระบบที่ซับซ้อนได้เหมือนกัน เช่น ผนังหลายชั้น ซึ่งจำนวนความต้านทานความร้อนที่ต่ออนุกรมและขนานกัน จะขึ้นอยู่กับชั้นของวัสดุที่แตกต่างกันพิจารณาผนังเรียบหลายชั้นที่ต่ออนุกรมกันของรูปที่ 2.2 อัตราการถ่ายเทความร้อนในหนึ่งมิติของระบบนี้ เขียนได้เป็น

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,4}}{\sum R_t} \quad (2.14)$$

โดยที่ $T_{\infty,1} - T_{\infty,4}$ เป็นผลต่างของอุณหภูมิทั้งหมด และ $\sum R_t$ เป็นผลรวมของความต้านทานความร้อนรวม ดังนั้น

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,4}}{\left[(1/h_1A) + (L_A/k_A A) + (L_B/k_B A) + (L_C/k_C A) + (1/h_4A) \right]} \quad (2.15)$$

หรืออาจหาอัตราการถ่ายเทความร้อนได้จากการคิดในแต่ละช่วงก็ได้

$$q_x = \frac{(T_{\infty,1} - T_{s1})}{(1/h_1A)} = \frac{(T_{s1} - T_{s2})}{L_A/k_A A} = \frac{(T_{s2} - T_3)}{L_B/k_B A} \quad (2.16)$$

และโดยให้ U เป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนทั้งหมด (Overall heat transfer coefficient) ซึ่งกำหนดขึ้นมาจากความคล้อยคลึงกันกับกฎของการเย็นตัวของนิวตัน จะได้ว่า

$$q_x \cong UA \nabla T \quad (2.17)$$

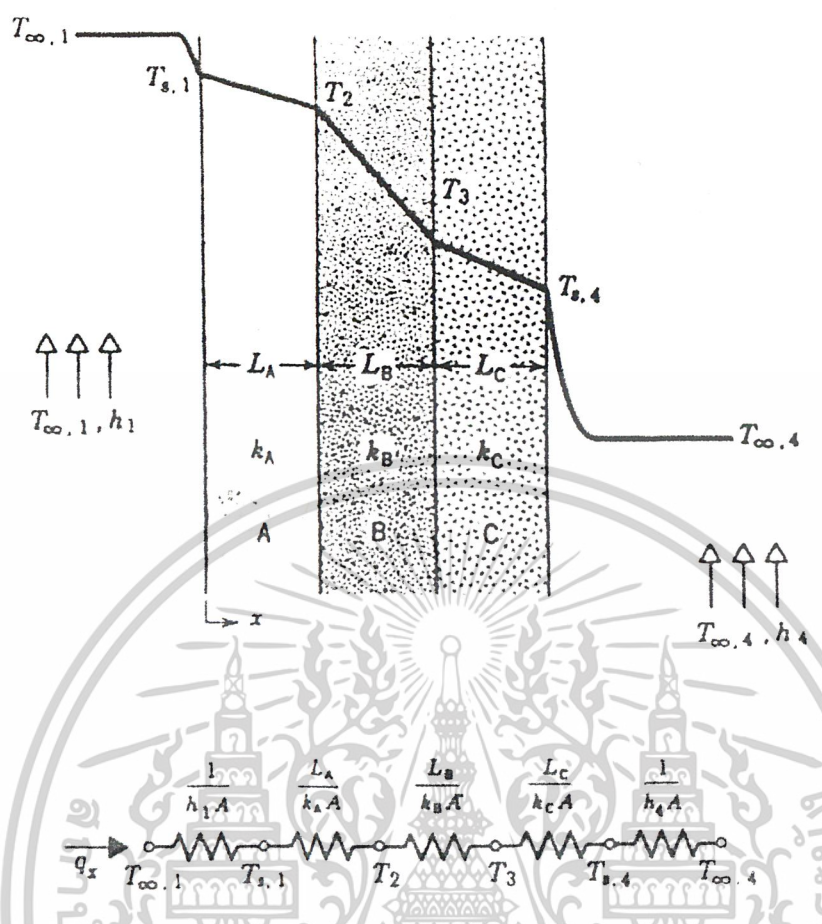
ซึ่ง ∇T เป็นผลต่างของอุณหภูมิรวม จากสมการ (2.13) และ (2.16) จะพบว่า $UA = 1/R_{tot}$ และสำหรับผนังหลายชั้นตามรูป 2.2

$$U = \frac{1}{R_{tot} A} = \frac{1}{\left[(1/h_1) + (L_A/k_A) + (L_B/k_B) + (L_C/k_C) + (1/h_4) \right]} \quad (2.18)$$

โดยทั่วไปอาจเขียนได้เป็น

$$R_{tot} = \sum R_i = \frac{\nabla T}{q} = \frac{1}{UA} \quad (2.19)$$

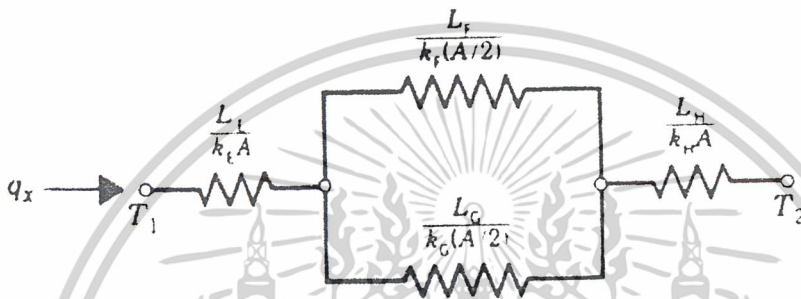
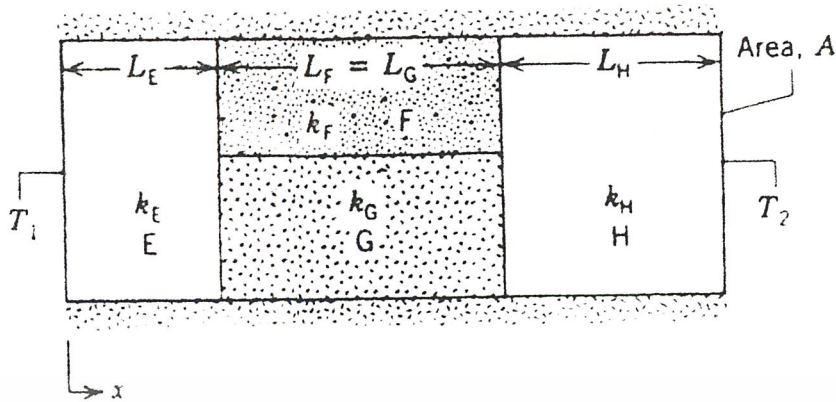
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 วงจรความร้อนสมมูลย์สำหรับผนังหลายชั้นอย่างอนุกรม

ผนังหลายชั้นอาจมีคุณลักษณะตามรูปร่างเป็นแบบอนุกรม-ขนานก็ได้ ดังเช่นแสดงในรูป 2.3 ถึงแม้ว่าการไหลของความร้อนจะเป็น 2 มิติ แต่อาจสมมติเป็นเงื่อนไขหนึ่งมิติได้โดยสมมติว่าผิวที่ตั้งฉากกับทิศทาง x มีอุณหภูมิคงที่ตลอดเวลาหรืออาจสมมติว่าผิวซึ่งขนานกับแกน x เป็นอะเดียบาติก อย่างใดอย่างหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

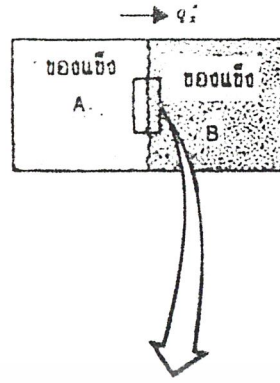


รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะรูปร่างเป็นแบบอนุกรม-ขนาน

2.1.5 ความต้านทานของหน้าสัมผัส (Contact resistance)

ในระบบผนังหลายชั้นที่กล่าวมา เราไม่ได้คำนึงถึงอุณหภูมิคลในช่องหน้าสัมผัสระหว่างวัสดุแต่ละชนิดที่ประกบกันอยู่ ซึ่งโดยปกติแล้วอุณหภูมิที่ผ่านของแข็งเหล่านั้นจะลดลงทันทีเมื่อผ่านหน้าสัมผัสระหว่างวัสดุทั้งสอง อุณหภูมิที่ลดลงเมื่อข้ามหน้าสัมผัสเป็นผลมาจากความต้านทานความร้อนของหน้าสัมผัส $R_{t,c}$ (Thermal contact resistance) เมื่อพิจารณาจากรูป 2.4 แสดงให้เห็นถึงหน้าสัมผัสที่มาประกบกันระหว่างผิวของของแข็งจะเกิดช่องว่างเป็นจุด ๆ จำนวนมาก และช่องว่างเหล่านี้บรรจุอยู่ด้วยอากาศหรือของไหลที่อยู่รอบ ๆ การถ่ายเทความร้อนผ่านของไหลที่บรรจุในช่องจะเป็นแบบการนำ เพราะของไหลอยู่นิ่งไม่มีการพาในชั้นบาง ๆ ของของไหล และไม่มีอิทธิพลของการแผ่รังสีที่อุณหภูมิปกติ ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนจึงเป็นการนำเท่านั้น ถ้าค่า k ของของไหลน้อยกว่าของแข็งนั้นแล้ว ผิวสัมผัสนั้นจะทำตัวเป็นตัวต้านทานต่อการไหลของความร้อนความต้านทานถูกเรียกเป็น “ความต้านทานความร้อนของหน้าสัมผัส” ความต้านทานนี้ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์หลายประการ เช่น ความหยาบของหน้าสัมผัส อุณหภูมิของหน้าสัมผัส ความดันของหน้าสัมผัส และชนิดของวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นถึงหน้าสัมผัสที่มาประกบกันระหว่างผิวของของแข็ง

ความเรียบของผิวสัมผัสเป็นตัวประกอบอีกอย่างหนึ่ง ซึ่งมีอิทธิพลต่อการนำความร้อนของหน้าสัมผัส การเชื่อมกันของผิวสัมผัสอาจให้ค่าการนำที่ต่ำได้ เนื่องจากผิวเป็นคลื่นหรือขรุขระ ซึ่งเราสามารถแก้ไขเหตุนี้ได้โดยการใส่หรือเสริมช่องว่างระหว่างผิวสัมผัสนี้ด้วยวัสดุที่อ่อน เช่น ตะกั่ว ตารางที่ 2.1 (ก) แสดงให้เห็นอิทธิพลการอัดหน้าสัมผัสของโลหะซึ่งให้ค่าความต้านทานของหน้าสัมผัสภายในที่แน่นอน ไขศูญญาภาส (ข) แสดงถึงความแปรเปลี่ยนของความต้านทานความร้อนของอลูมิเนียมซึ่งหน้าสัมผัสของไนบรจด้วยของไหลที่มีค่า k แตกต่างกัน

2.2 การควบคุมบรรยากาศภายในเตา (Furnace atmosphere and its control)

ในการอบความร้อนที่กระทำต่อเหล็กกล้าบางชนิด โดยเฉพาะเหล็กกล้าชิ้นส่วนของเครื่องมือที่ต้องการผิวเหล็กที่สะอาดปราศจากออกไซด์และต้องการความแข็งที่ผิวแน่นอน การอบชุบความร้อนจะต้องกระทำภายในเตาที่สามารถควบคุมบรรยากาศ เพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียธาตุคาร์บอน (Decarburizing) หรือธาตุบางตัวตามบริเวณผิวขณะเผาในเตา หรือเพื่อไม่ให้เกิดการเป็นออกไซด์ตามผิว ซึ่งจะทำให้ขนาดของชิ้นงานภายหลังการอบชุบความร้อนเปลี่ยนแปลง หรือมีฉะนั้นอาจจะเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นในการทำความสะอาดผิวด้วยการยิงเม็ดทรายขัดผิว (Shot Blast) บางครั้งอาจจะต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นในการล้างสนิมด้วยกรรมวิธีฟิคคลิง (Pickling) หรือการทำความสะอาดผิวอื่นๆ การอบชุบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อนภายในเตาที่ควบคุมบรรยากาศ ดังกล่าวนี้อาจทำให้ผิวเหล็กกล้าภายใต้การอบชุบเสียด จมมีค่ากล่าวถึงกรรมวิธีการอบชุบความร้อนนี้ว่า Bright Hardening หรือ Annealing

ความมุ่งหมายที่สำคัญของการควบคุมบรรยากาศภายในเตามี 3 ประการ ดังนี้คือ

- 1) ป้องกันการสูญเสียคาร์บอนและธาตุอื่นๆ ที่สำคัญขณะทำการเผาในระยะเวลาสั้น
- 2) ป้องกันการเกิดออกไซด์ตามบริเวณผิวทำให้เกิดปัญหาในการกำจัดภายหลัง
- 3) ในกรณีที่ต้องการปรับปรุงความแข็งแรงบริเวณผิวแห่งเหล็กให้สูงขึ้นสามารถกระทำได้ด้วยการควบคุมบรรยากาศภายในเตา ดังเช่น การทำคาร์บอร์ไรซิง คาร์โบ-ไบตรายคิง หรือการทำไนตรายคิง

ความสำคัญอีกประการหนึ่งของการควบคุมบรรยากาศภายในเตาอบชุบก็คือการอบชุบที่ต้องกระทำที่อุณหภูมิสูง เช่น การอบชุบเหล็กกล้าความเร็วสูง (High Speed Steel) ซึ่งต้องเผาที่อุณหภูมิสูงประมาณ $1280^{\circ} - 1300^{\circ}\text{C}$ การป้องกันไม่ให้เกิดออกไซด์มีจำนวนมาก เพราะออกไซด์ที่เกิดและอยู่ในช่วงอุณหภูมินี้จะมีแนวโน้มหลอมเหลวจัดติดแน่นกับชิ้นเหล็ก และภายในผิวออกไซด์จะเกิดการลดปริมาณคาร์บอนในเหล็กลงอีก ทำให้เกิดความแข็งแรงของเหล็กกล้าหลังการอบชุบได้ต่ำ และการกำจัดฟิล์มออกไซด์ที่จับแน่นกระทำได้ยาก เป็นการสูญเสียที่จะแก้ไขภายหลังไม่ได้เลย

2.2.1 ปฏิกริยาของแก๊สภายในเตา (Gas reaction)

ในการอบชุบความร้อนเหล็กกล้าภายในเตาที่มีแก๊สอยู่เดี่ยวหรือแก๊สผสมกันหลายชนิด จำเป็นจะต้องศึกษาถึงปฏิกริยาระหว่างแก๊สกับผิวเหล็ก และปฏิกริยาระหว่างแก๊สด้วยกัน เพื่อให้เข้าใจหลักการเกิดปฏิกริยาของแก๊สต่างๆ และสามารถแก้ไขพร้อมทั้งควบคุมให้ผลที่เกิดไม่เป็นอุปสรรคต่อการอบชุบเหล็กกล้าแก๊สที่จะมีบทบาทต่อบรรยากาศของเตาอบชุบของเหล็กกล้ามีหลายชนิด เริ่มตั้งแต่อากาศซึ่งประกอบด้วยแก๊สออกซิเจน (21%) และ ไนโตรเจน (79%) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน ไอน้ำ และแก๊สเฉื่อยอื่นๆ (อาร์กอน และฮีเลียม)

2.2.2 อัตราการเผาและช่วงเวลาที่เหมาะ (Heating rate & Holding time)

การกำหนดอัตราการเผาและช่วงเวลาที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับแฟคเตอร์หลายประการ เช่น ส่วนผสมของเหล็ก โครงสร้างเดิม ความเครียดเหลือค้างรูปร่างและขนาดของชิ้นงานที่จะทำการชุบแข็ง

ปกติเหล็กเมื่อบรรจุเข้าเตาเผา ความร้อนที่เหล็กได้รับที่ผิวกับใจกลางจะไม่เท่ากันในตอนแรก เพราะกว่าความร้อนจะเคลื่อนที่ผ่านเนื้อเหล็กเข้ามาถึงใจกลางย่อมต้องใช้เวลา การเผาในอัตราสูง ความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวกับใจกลางจะมีค่ามาก การบิดงอมีมากซึ่งจะทำให้เกิดการแตกร้าวได้ง่าย โดยทั่วไปแนะนำให้ใช้อัตราการเผาไว้ 3 อัตรา ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของเตา

อัตราการเผาช้า เป็นวิธีที่เริ่มต้น โดยบรรจุเหล็กเข้าเตาพร้อมๆ กับการให้ความร้อนแก่เตาเผาพร้อมๆ กัน อุณหภูมิทั้งของเตาและชิ้นงานจะร้อนในอัตราใกล้เคียงกัน ในลักษณะนี้ อุณหภูมิแตกต่างระหว่างผิวกับใจกลางของแท่งเหล็กมีน้อย (คุณภาพประกอบ) การเผาใหม่ในลักษณะเช่นนี้เหมาะสำหรับเหล็กที่มีคาร์บอนสูงมีความเครียดเหลือค้างมากจากการขึ้นรูป รูปร่างซับซ้อนและมีส่วนที่หนาและบางต่างกันมาก

อัตราการเผาสูง วิธีนี้จะเผาเตาให้มีอุณหภูมิเท่าที่ต้องการ จากนั้นจึงจะบรรจุเหล็กเข้าเตาภายหลัง หรือเป็นในกรณีที่เตากำลังใช้งานอยู่ เมื่อนำเอาเหล็กออกไปชุบหมักแล้ว ก็เริ่มบรรจุเหล็กชุดต่อไปใหม่ ลักษณะเช่นนี้อัตราการเผาจะสูงอุณหภูมิระหว่างผิวกับใจกลางจะแตกต่างกันมากในตอนเริ่มต้น แต่จะไปเท่ากันในระยะที่สั้นกว่าวิธีแรก ดังภาพแสดงการเผาในอัตราสูงเหมาะสำหรับงานชิ้นเล็กๆ รูปร่างไม่ซับซ้อน และเป็นอัตราคาร์บอนปานกลาง จะใช้วิธี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอาเหล็กบรรจุไว้ในหีบปิดคลุมมิดชิด บรรจุเข้าเตาจะช่วยลดอัตราการเผาผลาญได้อีกเพราะกว่าความร้อนจะผ่านหีบเข้าไปถึงใจกลางแท่งเหล็กจะช้าลง

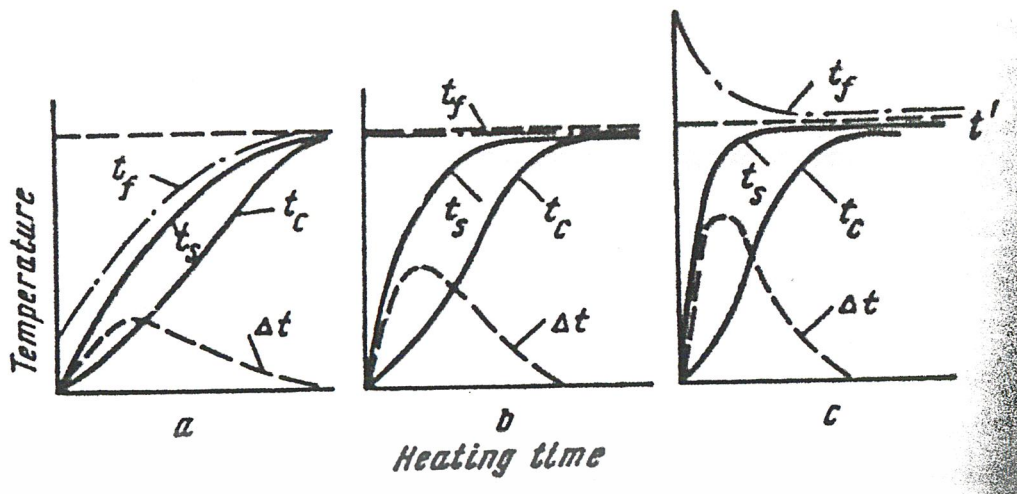
สำหรับช่วงเวลาที่ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิที่ต้องการ (Holding Time) มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ออสเทนไนท์ที่สม่ำเสมอและให้อุณหภูมิทั้งบริเวณผิวและใจกลางแท่งเท่ากัน ไม่มีกฎเกณฑ์ที่ตายตัวขึ้นอยู่กับหลักปฏิบัติ ถ้าเป็นเหล็กคาร์บอนหรือเหล็กผสมต่ำ (Low - Alloys) ซึ่งคาร์บอนละลายตัวได้ง่าย จะใช้เวลาประมาณ 5-15 นาทีก็พอ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงานด้วย แต่ถ้าเป็นเหล็กผสมปานกลางหรือสูง ซึ่งคาร์ไบด์มีเสถียรภาพจะต้องใช้เวลาให้นานพอที่คาร์ไบด์จะละลายตัวหมด ซึ่งเวลาที่ใช้ควรเพิ่มขึ้นประมาณ 25 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ของเวลาที่ใช้เกณฑ์ปกติ ดังตารางเวลาที่เหมาะสมข้างล่างนี้

ตารางที่ 2.1 แสดงระยะเวลาในการเผาที่ความหนาต่างๆ กัน
Heating Times and Holding Times (working Temperatures) for Hardening
Carbon and Structural Steels

Thickness or Diameter of Part (mm)	Box furnace (gas or oil-fired)		Salt baths	
	Heating min	Holding min	Heating min	Holding min
25	20	5	7	3
50	40	10	17	8
75	60	15	24	12
100	80	20	33	17
125	100	25	40	20
150	120	30	50	25
200	160	40	65	35

อัตราการเผาที่สูงมาก เป็นวิธีที่ไม่สู้จะนิยมใช้เพราะอัตราการเผาจะสูง อุณหภูมิระหว่างผิวกับใจกลางแท่งเหล็กจะแตกต่างกันมากในตอนเริ่มต้นโดยวิธีการเผาให้อุณหภูมิในเตาสูงเกินกว่าอุณหภูมิที่ต้องการ ดังแสดงเมื่อบรรจุเหล็กเข้าเตาอุณหภูมิของเตาจะลดลงมาจนถึงที่ต้องการพร้อมๆ กับอุณหภูมิของชิ้นงานร้อนขึ้น เวลาที่ใช้จะสั้นกว่าทั้งสองวิธีแต่อุณหภูมิระหว่างใจกลางกับผิวเหล็กจะแตกต่างกันมาก อาจทำให้เกิดการบิดงอหรือชิ้นงานแตกร้าวได้ง่าย วิธีนี้เหมาะสำหรับงานขนาดเล็กและรูปร่างง่ายจำเป็นจะต้องบรรจุในหีบเหมือนวิธีที่สองเพื่อช่วยลดอัตราการเผาให้ช้าลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แสดงผลของอุณหภูมิที่ต่างกันบริเวณผิวและภายในใจกลางเมื่อเผาด้วยอัตราต่าง ๆ กัน
(a อัตราต่ำ, b อัตราปานกลาง และ c อัตราสูง)

ในทางปฏิบัติที่นิยมกันสำหรับการชุบแข็งทั่วไป เพื่อให้การเผาเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ และเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดเหล็กเกิดออกซิเดชัน นิยมใช้การเผาเหล็กในอ่างเกลือที่เป็นกลาง (Neutral Salt Bath) ซึ่งให้ผลดีกว่าการเผาในเตาทั่วๆ ไป โดยเฉพาะความสม่ำเสมอของอุณหภูมิและอัตราการเผา เกลือที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นเกลือโซเดียมคลอไรด์ หรืออาจจะผสมกับเกลือชนิดอื่น เพื่อให้มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำลง และง่ายต่อการควบคุม ดังตารางแสดงเวลาที่เหมาะสมข้างล่างนี้

ตารางที่ 2.2 แสดงส่วนผสมของเกลือกับช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน
Composition of salt Baths use to Heat Steel Parts for Hardening

Compositions	Melting Point °c	Range of Practical Application °c	Features
100% NaCl	808	850 to 1,100	Decarburises steel
100% BaCl ₂	960	1,000 to 1,400	Ditto
28% NaCl + 72% CaCl ₂	500	540 to 870	Decarburises steel
60% Na ₂ CO ₃ + 50% KCl	560	580 to 815	Decomposes above 875 °c
50% NaCl + % K ₂ CO ₃	580	580 to 815	Ditto
33.3% CaCl ₂ + 33.3% BaCl ₂ + 33.4% NaCl	570	600 to 870	Decarburises steel above 820 °c
50% CaCl ₂ + 50% BaCl ₂	600	650 to 900	Ditto
35% NaCl + 50% BaCl ₂	620	650 to 815	Decomposes above 815 °c
22% NaCl + 78% BaCl ₂	635	700 to 870	Decarburises steel above 820 °c
44% NaCl + 56% KCl	665	700 to 870	Ditto

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ทฤษฎีการออกแบบเตาอบไฟฟ้า

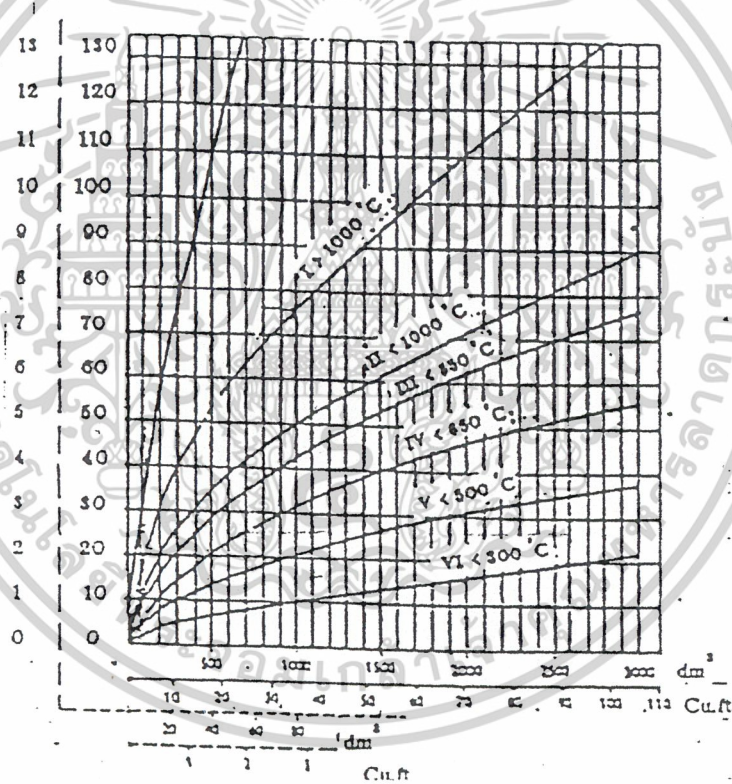
องค์ประกอบที่ใช้ในการออกแบบเตาอบไฟฟ้ามีดังนี้

2.3.1 อุณหภูมิของเตาอบไฟฟ้าที่ต้องการ

ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ต้องการใช้งาน และเวลาที่จจะอบ โดยทั่วไป อุณหภูมิของเตาจะสูงกว่าอุณหภูมิที่ต้องการอบ ประมาณ 10%

2.3.2 กำลังไฟฟ้า

กำลังไฟฟ้าที่ต้องการนั้นขึ้นอยู่กับความร้อนที่ต้องการในการทำให้ภายในเตาอุณหภูมิถึงตามที่ต้องการและ ต้องเพื่อความร้อนที่อาจสูญเสีย (Heat Loss) ซึ่งปริมาณความร้อนที่ต้องใช้นั้นสามารถกำหนดได้จากปริมาณภายในเตา ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ดังนี้



รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณกำลังไฟฟ้า-อุณหภูมิ ของเตาที่มีนิวนความร้อน

2.3.3 การเลือกชนิดขดลวดความร้อน

โดยเลือกจากคุณสมบัติ ของขดลวดชนิดนั้นให้เหมาะสมตามความต้องการ ซึ่งโดยทั่วไปรูปร่างของขดลวด ความร้อนจะมี 2 ชนิดคือ แบบลวดกลม และลวดแบน

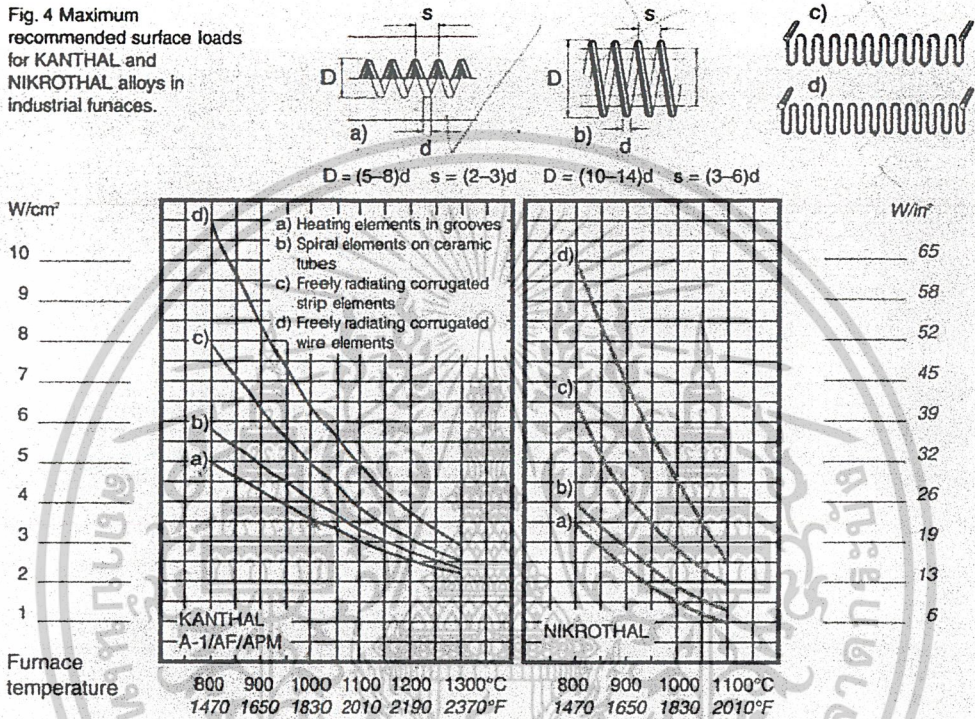
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4 การกำหนดภาระที่ผิว (Surface Load)

Surface Load (W/cm^2) เป็นการวัดความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า ของขดลวดความร้อนในเตาอบไฟฟ้า อุณหภูมิสูงจะมีภาระที่ผิวสูงกว่าเตาอบไฟฟ้าอุณหภูมิต่ำ

ปัจจัยในการพิจารณา Surface Load มีดังนี้ อุณหภูมิที่ผิวฮีเตอร์ รูปทรงและการวางฮีเตอร์ภายในเตากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน

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



รูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์อุณหภูมิภายในเตา และ Surface load

โดยมีข้อจำกัด ดังนี้

ฮีเตอร์ชนิด a กำหนดจากฮีเตอร์ ชนิดลวดกลมและลวดแบน ผึงอยู่ในร่องอิฐ

ฮีเตอร์ชนิด b กำหนดจากฮีเตอร์ ชนิดลวดกลมพันอยู่บนท่อเซรามิก

ฮีเตอร์ชนิด a และ b กำหนดจาก ลวดกลมเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดไม่ต่ำกว่า 3.0 mm เท่านั้น และลวดแบนมีความหนา 2.0 mm เป็นอย่างน้อย

ฮีเตอร์ชนิด c และ d กำหนดจาก ลวดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง อย่างน้อย 5.0 mm และสำหรับลวดแบนมีระยะห่างระหว่างขดลวดมากที่สุด และ ที่ Surface load สูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 แสดงระยะห่างมากที่สุดระหว่างช่วงต่อช่วงของลวดแบนที่แนะนำให้ใช้

อุณหภูมิ (° C)	ระยะห่างช่วงต่อช่วงของลวดแบน (mm)
<900° C	400
1000° C	350
1100° C	300
1200° C	200
1300° C	150

สำหรับลวดขนาดที่เล็กกว่า และบางกว่าข้อกำหนดต่าง ๆ ข้างต้นนี้จะต้องกำหนด Surface load ให้ต่ำลงและระยะห่างระหว่างช่วงต่อช่วง ให้สั้นลงเพื่อลดการบิดเบี้ยว หลังจากการใช้งานซึ่งจะทำให้อายุการใช้งาน ของฮีตเตอร์สั้นลง

2.3.5 ภาระที่ผนังเตา (Wall Load)

ในการคำนวณขนาดของลวดต้านทาน จะต้องคำนึงถึงอุณหภูมิ และพื้นที่หน้าตัดของลวดต้านทานและจะต้องพิจารณาถึง อายุการใช้งาน, ภาระที่ผนังเตา, คุณสมบัติของผนัง และวัสดุที่ทำตัวต้านทาน ตลอดจนสภาพการถ่ายเทความร้อน ดังแสดงในภาคผนวก แสดงภาระที่ผนังเตา (Wall Load) กับอุณหภูมิ โดยเฉพาะเตาที่มีอุณหภูมิสูง ค่านี้จะถูกตั้งยิ่งขึ้น เมื่อการกระจายความร้อนสม่ำเสมอ และพื้นที่ผิวของผนังเตามาก

2.3.6 การกำหนดขนาดความโตเส้นผ่านศูนย์กลาง

การคำนวณทางทฤษฎี สามารถคำนวณได้จากสูตร

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

p = กำลังวัตต์

v = แรงเคลื่อนไฟฟ้า

ρ = ความต้านทานจำเพาะของฮีตเตอร์

C_t = สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิของฮีตเตอร์

P = Surface load ของ ฮีตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.7 การออกแบบลวดชนิดคดเป็นคอล์ย

หลังจากที่กำหนดความโตของขดลวดแล้วต่อไปจะต้องกำหนดความยาวของลวดที่จะพันเป็นคอล์ย

$$R_t = \frac{v^2}{p} \quad (2.20)$$

R_t = ความต้านทานลวดฮีตเตอร์ขณะร้อน

$$R_{20} = \frac{R_t}{C_t} \quad (2.21)$$

R_{20} = ความต้านทานขณะเย็น

ขดลวดความร้อนแต่ละขนาดมีค่าความต้านทานต่อความยาวลวดขนาดต่าง ๆ ดังแสดงในภาพ ความยาวลวดขณะเย็น คือ

$$L = \frac{R_{20}}{\Omega} \quad (2.22)$$

จาก Khanthal Handbook กำหนด อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางขดลวดภายนอก และภายใน

$$\frac{D}{d} = 6 \quad (2.23)$$

จำนวนรอบของขดลวด

$$w = \frac{1000L}{\pi(D-d)} \quad (2.24)$$

เมื่อ W = จำนวนรอบของขดลวด

ความยาวของขดลวด

$$Lw = Wd \quad (2.25)$$

จาก Khanthal Handbook กำหนด relative pitch เป็น

$$\frac{s}{d} = 2 \quad (2.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวของขดลวดเมื่อยึดตามระยะพิชชี

$$L_p = L_w (S/d) \quad (2.27)$$

ความยาวของเตาที่จะร้อยลวด (L_f)

$$\text{จำนวนขดลวดที่จะต้องใช้} = L_p/L_f$$

2.4 ประเภทของวัตถุดิบไฟ

เปลือกโลกประกอบไปด้วยธาตุต่าง ๆ มากมายรวมร้อยกว่าธาตุแต่มีเพียงบางธาตุที่มีปริมาณมาก และสามารถก่อให้เกิดสารประกอบที่คงทน และมีคุณสมบัติเป็นวัตถุดิบไฟ หมู่ธาตุที่สามารถก่อให้เกิดสารประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นวัตถุดิบไฟได้แก่ Si, Al, Mg, Ca, Cr, Zr, และ C หมู่ธาตุเหล่านี้สามารถก่อให้เกิดสารประกอบออกไซด์ที่มีประโยชน์ เช่น SiO_2 , Al_2O_3 , MgO และ ZrO_2 , Cr_2O_3 ระบายได้ และ CaO ไม่คงทนในบรรยากาศแต่สารเหล่านี้สามารถรวมตัวกันเกิดเป็นวัสดุที่มีประโยชน์ เช่น CaO กับ MgO รวมตัวกันเป็นโคโลไมต์ ($CaCO_3$, $MgCO_3$) และ Cr_2O_3 รวมตัวกับ MgO เป็น $Cr_2O_3 \cdot MgO$ ซึ่งเป็นสไปเนล เราสามารถนำเอาธาตุ C มาใช้ได้โดยตรงหรืออาจผลิตให้อยู่ในรูปแกรไฟต์แล้วจึงนำมาใช้ หรือทำให้รวมตัวกับ Si กลายเป็นซิลิคอนคาร์ไบด์เสียก่อนจึงนำมาใช้งาน

2.4.1 การแบ่งประเภทของวัตถุดิบไฟ

การแบ่งประเภทของวัตถุดิบไฟสามารถแบ่งได้หลายวิธี กล่าวคือ

แบ่งประเภทตามคุณสมบัติทางเคมี ซึ่งสามารถแบ่งได้ 4 ประเภทใหญ่ ๆ

1. วัตถุดิบไฟประเภทที่มีคุณสมบัติทางเคมีเป็นกรด ซึ่งมีสูตรทั่วไป MO_2 ได้แก่ วัตถุดิบไฟชนิดซิลิกา (SiO_2), และวัตถุดิบไฟชนิดเซอร์โคเนีย (ZrO_2)
2. วัตถุดิบไฟประเภทที่มีคุณสมบัติทางเคมีเป็นกลาง ซึ่งมีสูตรทั่วไป M_2O_3 ได้แก่ วัตถุดิบไฟชนิดอะลูมินา (Al_2O_3) และวัตถุดิบไฟชนิดโครมิกอกไซด์ (Cr_2O_3)
3. วัตถุดิบไฟประเภทที่มีคุณสมบัติทางเคมีเป็นด่าง ซึ่งมีสูตรทั่วไป MO ได้แก่ วัตถุดิบไฟชนิดแมกนีเซียม (MgO) และวัตถุดิบไฟชนิดแคลเซียม (CaO)
4. วัตถุดิบไฟประเภทพิเศษอื่น ๆ ได้แก่ คาร์บอน และ แกรไฟต์ (C) ซิลิคอนคาร์ไบด์ วัตถุดิบไฟกลุ่มบอไรด์ และคาร์ไบด์อื่น ๆ

2.4.2 การจำแนกวัตถุดิบไฟที่มีความแข็งแรงและมีความทนไฟสูง

การจำแนกชนิดวัตถุดิบไฟในขั้นต่อไปนี้เป็น การจำแนกซึ่งเป็นที่ยอมรับกันใน สหรัฐอเมริกา การจำแนกเช่นนี้เป็นการจำแนกอย่างมีเหตุผลต่อการนำวัตถุดิบไฟไปใช้งานทั่วไป

อิฐทนไฟธรรมดา (Fireclay Brick)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิฐที่ใช้งานต่ำกว่า	PCE	15
อิฐที่ใช้งานที่	PCE	15
อิฐที่ใช้งานที่	PCE	29
อิฐที่ใช้งานที่	PCE	31.5

อิฐทนไฟที่ใช้ดินขาวเผาแล้วเป็นวัตถุดิบปริมาณมาก และมีการเผาอิฐที่อุณหภูมิสูง
วัตถุนทนไฟที่มีอะลูมินาสูง

50 %	Al_2O_3	(PCE 34)
60 %	Al_2O_3	(PCE 35)
70 %	Al_2O_3	(PCE 36)
80 %	Al_2O_3	(PCE 37)
85 %	Al_2O_3	
90 %	Al_2O_3	
99 %	Al_2O_3	(Al_2O_3 ค่าสุด 97 %)

2.4.3 วัตถุดิบ

ดินต่าง ๆ ที่ใช้ในการผลิตอิฐทนไฟ เพื่อให้ได้อิฐทนไฟมีส่วนประกอบของ Al_2O_3 อยู่ระหว่าง 18 ถึง 44% และ SiO_2 อยู่ระหว่าง 50 ถึง 80 % นั้น ได้แก่ ดินทนไฟที่มี SiO_2 เป็น องค์ประกอบอยู่มาก ดินทนไฟที่มีความเหนียวดีและดินขาว อิฐทนไฟที่ใช้ในบริเวณที่ถูกความร้อนจัด ควรประกอบด้วยดินทนไฟที่มีปริมาณ SiO_2 สูงหรือค่อนข้างสูง อยู่ในปริมาณที่มากพอสมควร ดินทนไฟที่ใช้ควรมีความทนไฟได้ถึง PCE 33 ถึง 35 และควรมีการหดตัวน้อยมากทั้งขณะตากแห้งและหลังจากการเผาเนื่องจากดินที่มี SiO_2 เป็นองค์ประกอบอยู่มากความเหนียวไม่ดี อาจใช้ดินเหนียวทนไฟซึ่งสามารถทนไฟได้สูงถึง PCE 29 ถึง 33 เข้าช่วย ในกรณีที่มีการหดตัวสูง แต่มีความทนไฟได้ดี อาจใช้ร่วมกับดินขาวที่มีความทนไฟได้ถึง PCE 34 ถึง 35 นอกจากนี้ อาจใช้ดินขาวที่เผาจนสุกตัวดีแล้วผสมในส่วนผสมของเนื้อดินปั้นอิฐ เพื่อช่วยลดการหดตัวหลังจากการเผาและช่วยให้เกิดสภาพความคงทนต่อการใช้งานมากยิ่งขึ้น หรืออีกนัยหนึ่งในการผลิตอิฐทนไฟที่ใช้งานหนักจะต้องเตรียมส่วนผสมของเนื้อดินอย่างระมัดระวัง สัดส่วนของส่วนผสมของวัตถุดิบทั้งหลายควรจะก่อให้เกิดอิฐทนไฟที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับงาน โดยเฉพาะ ทั้งนี้เพราะว่าเราไม่สามารถคาดคะเนได้ว่าอิฐที่ผลิตได้จะมีคุณสมบัติหมดทุกด้าน อย่างไรก็ตามก็ได้มีความพยายามที่จะผลิตอิฐทนไฟที่มีความพรุนตัวต่ำเพื่อทนทานต่อซัลฟูรได้ดียิ่งขึ้น วิธีการที่ใช้ได้แก่ควบคุมขนาดของวัตถุดิบ

1. การใช้แรงอัดสูง
2. การเผาที่อุณหภูมิสูง

เนื่องจากดินที่ทนไฟได้สูงสามารถหาได้ยาก จึงได้มีความพยายามนำดินขาวมาใช้เนื่องจากดินขาวมีการหดตัวสูงมาก ส่วนผสมของดินขาวปริมาณมากพอสมควรปริมาณหนึ่งถูกนำมาเผาให้สุกดีเสียก่อนจึงใช้เป็นส่วนผสม เมื่อเผาอิฐถึงอุณหภูมิ 3,000 °F หรือสูงกว่า จะได้อิฐทนไฟที่มีคุณภาพดีมากยิ่งขึ้น

อิฐทนไฟที่ผลิตจากดินทนไฟและมีความสมบัติต่าง ๆ ค่อยกว่า อาจจะมีผลผลิตโดยใช้ดินทนไฟชนิดเดียว หรือผลิตโดยการผสมดินหลาย ๆ ชนิด ตัวอย่างเช่น อิฐที่ใช้ในการรองรับ โลหะเหลวร้อน มักจะผลิตจากดินเหนียวทนไฟที่มีจุดอ่อนตัวต่ำแต่เพียงชนิดเดียว หรืออิฐทนไฟที่มีซิลิกามากกว่าปกติเล็กน้อยก็ผลิตจากดินขาวที่มีซิลิกาสูงกว่าปกติชนิดเดียวเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิฐทนไฟที่มีอะลูมินาสูง ผลผลิตขึ้นมากเพื่อจะใช้งานได้ดียิ่งขึ้น และใช้งานในบริเวณที่มีปฏิกิริยารุนแรงกว่าได้ คือกว่าอิฐทนไฟธรรมดา อิฐชนิดนี้จะมีอะลูมินาอยู่ระหว่าง 50 ถึง 99 % ดังนั้นนอกจากจะใช้ดินขาวเป็นวัตถุดิบแล้วจึงจำเป็นต้องใช้ดินทนไฟและวัตถุดิบอื่น ๆ เข้ามาผสมกัน ตอนแรก ๆ ใช้โคอะสเปอร์แต่ปัจจุบันหาแหล่งวัตถุดิบได้ยาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้แร่บ็อกไซต์ หรือดินที่มีแร่บ็อกไซต์เป็นวัตถุดิบ ถึงแม้ว่าจะมีการหัดตัวสูงหลังจากการเผา นอกจากนี้ก็ยังใช้แร่ โคลยาไนท์ ซิลลิมาไนต์ และแอนคาไลต์ ทั้งนี้เพราะว่าแร่ทั้งสามนี้หลังจากเผาแล้วปริมาตรไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง ในบางกรณีก็ใช้มูลโลดที่สังเคราะห์ขึ้นมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตอิฐทนไฟชนิดนี้ สำหรับอิฐทนไฟที่มีเปอร์เซ็นต์อะลูมินาสูงมาก ๆ จำเป็นต้องใช้อะลูมินาที่เตรียมขึ้นโดยวิธีทางเคมี วัตถุดิบส่วนใหญ่ที่ใช้ในการผลิตอิฐทนไฟที่มีอะลูมินาสูงมาก ๆ จะต้องผ่านการเผามาก่อน เพื่อให้อิฐหดตัวน้อยลงหลังจากการเผา

อิฐทนไฟที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบก็ผลิตจากก้อนแร่แกนีสเตอร์ซึ่งมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่และบางครั้งก็ต้องทำความสะอาดก้อนแร่เพื่อขจัดอะลูมินาออกไปเสียบ้าง เพื่อให้อิฐที่ผลิตได้มีคุณภาพดีมากยิ่งขึ้น

อิฐแมกนีไซต์ ผลิตจากผลผลิตที่ได้จากการเผา แร่แมกนีไซต์ระหว่าง 2,800 °F ถึง 3,500 °F อุณหภูมิที่เผาขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของแร่แมกนีเซีย (MgO) อาจผลิตจากน้ำทะเล อิฐอาจผลิตโดยการเผาในเตาเผาหรือใช้สารเคมีเชื่อมยึด หรืออาจใช้ในลักษณะที่มีแผ่นเหล็กหุ้มไว้อีกทอดหนึ่ง อิฐที่มีฤทธิ์เป็นด่างลงชนิดผลิตโดยใช้แร่โครไมต์เป็นวัตถุดิบ ส่วนประกอบส่วนมากของอิฐชนิดนี้จะมีแร่โครไมต์และแมกนีไซต์เป็นองค์ประกอบในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน แรก ๆ อิฐพวกนี้คงสภาพรูปร่างอิฐอยู่ได้ด้วยการเชื่อมยึดของสารประกอบซิลิเกต ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากตัวแร่ปฏิกิริยาหลายเป็นแก้วซึ่งมีปะปนอยู่ในแร่โครไมต์ แต่ปัจจุบันตัวแร่ปฏิกิริยาเหล่านั้น ได้ถูกขจัดออกไปเสียส่วนมาก และใช้วิธีการเผาอิฐที่อุณหภูมิสูงขึ้น เพื่อให้ได้โครงสร้างที่เกิดจากการเชื่อมยึดติดกัน โดยตรงระหว่างอนุภาคของแร่ในเนื้ออิฐ โครงสร้างที่เกิดขึ้นนี้จะมีคามแข็งแรงมากขึ้นแม้ว่าจะอยู่ในอุณหภูมิสูง

อิฐทนไฟที่มีฤทธิ์เป็นด่างและใช้ทาร์หรือน้ำมันดินเป็นตัวเชื่อมยึดก้อนอิฐ ส่วนมากจะใช้ในเตาสำหรับผลิตเหล็กกล้า ซึ่งใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นตัวทำปฏิกิริยา อิฐพวกนี้ผลิตจากส่วนผสมของโครไมต์และแมกนีไซต์ ซึ่งได้เผามาอย่างดีแล้ว เนื่องจากอิฐชนิดนี้มีปฏิกิริยากับน้ำได้รวดเร็ว ดังนั้นอายุการใช้งานค่อนข้างสั้น ขณะเผาอิฐชนิดนี้จะชุ่มไปด้วยน้ำมันดินซึ่งจะแทรกเข้าไปในรูพรุนของก้อนอิฐ

มีอิฐบางชนิดผลิตขึ้น โดยใช้เซอร์คอน และเซอร์โคเนียที่คงทนคือคงสภาพเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ได้ดี พวกซิลิโคคาร์ไบด์ผลิตโดยอาศัยเนื้อแก้ว เนื้อสารประกอบไนโตรไดออกไซด์ในไตรด์ เป็นสารเชื่อมยึดติด แท่งคาร์ไบด์ก็มีการผลิตปริมาณมากใช้สำหรับกรูผนังเตาถลุงต่าง ๆ

2.4.4 คุณสมบัติต่าง ๆ ในอิฐทนไฟ

คุณสมบัติต่าง ๆ ในอิฐทนไฟที่เผาสุกตัวดีแล้วเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดและปริมาณของดินต่าง ๆ และองค์ประกอบอื่นๆ ที่ใช้ ความหนาแน่นในการขึ้นรูปและอุณหภูมิที่เผา คุณสมบัติต่าง ๆ ที่สำคัญที่สุด ได้แก่

จุดหลอมตัว (Fusion Point)

การยึดตัวภายใต้แรงอัด (Creep Under Compression)

ความทนทานต่อผลอันเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ แรงกด และความแตกต่างของสัมประสิทธิ์การขยายตัว (Spalling resistance)

ความทนทานต่อปฏิกิริยาของซัลฟูร (Slag resistance)

ความทนทานต่อการกระทำของแก๊สและไอต่าง ๆ (Stability Against Gases and Vapors)

ความทนทานต่อการขัดสี (Abrasion resistance)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนำอิฐทนไฟไปใช้ในทุกกรณี ควรจะพิจารณาคุณสมบัติต่าง ๆ และสภาวะ ณ ที่จะนำอิฐทนไฟไปใช้อย่างรอบคอบ เพื่อจะทำให้เกิดผลที่ดีที่สุดจะเป็นการดีที่สุดถ้าได้ปรึกษากับบริษัทผู้ผลิตอิฐทนไฟที่มีประสบการณ์ จะได้เลือกตราที่เหมาะสมที่สุด

การใช้วัสดุทนไฟชนิดอื่น ๆ ก็เช่นเดียวกัน ควรจะได้ศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้วให้ลึกซึ้ง

2.4.5 ปูนทนไฟ

ปูนทนไฟเป็นตัวประสานระหว่างก้อนอิฐที่ใช้ในการก่ออิฐทนไฟ โรงงานอิฐทนไฟทำหลวงผลิตปูนทนไฟทั้งชนิดแข็งตัวเมื่อได้รับความร้อน (Heat Setting Mortar) และแข็งตัวในอากาศ (Air Setting Mortar) และผลิตขึ้นเพื่อใช้กับอิฐทนไฟทุกชนิด ปูนทนไฟของโรงงานอิฐทนไฟทำหลวงเป็นผงละเอียดและมีคุณสมบัติสม่ำเสมอเพื่อใช้ก่ออิฐทนไฟ โดยมีรอยต่อเชื่อมระหว่างก้อนอิฐที่บางและเกาะตัวแน่น การเลือกใช้ปูนทนไฟที่ถูกต้องเหมาะกับชนิดของอิฐทนไฟจะช่วยให้งานก่ออิฐมีคุณภาพดีสม่ำเสมอ และสามารถใช้งานได้นานกว่า

ปูนทนไฟชนิดแข็งตัวเมื่อได้รับความร้อนเป็นปูนทนไฟที่ต้องใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง เพื่อให้เกิดการเชื่อมตัว ดังนั้นในระยะเริ่มอุ่นเตาเผารอยต่อจะยังไม่มีความแข็งแรงเท่าใดนัก ฉะนั้นจึงเหมาะกับงานที่ต้องการยึดหยุ่นในขณะเริ่มอุ่นเตาเผาในระยะแรก

ปูนทนไฟชนิดแข็งตัวในอากาศ เป็นปูนทนไฟที่ผสมสารเคมีพิเศษเพื่อเป็นตัวประสาน ปูนทนไฟชนิดนี้จะแข็งตัวอย่างรวดเร็วในขณะที่เริ่มอบไล่ความชื้น หรือแม้แต่ที่อุณหภูมิของบรรยากาศปกติ การเชื่อมตัวระหว่างก้อนอิฐทนไฟนี้จะดำเนินเรื่อยไปจนกระทั่งเกิดการเชื่อมตัวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะทำให้ได้งานก่ออิฐที่แข็งแรงตลอดระยะเวลาที่ใช้งาน

2.4.6 คอนกรีตทนไฟ

คอนกรีตทนไฟผลิตจากการเลือกขนาดเม็ดของวัสดุทนไฟที่ถูกต้องผสมกับวัสดุที่เป็นตัวประสานชนิดพิเศษ ซึ่งเมื่อผสมกับน้ำแล้วสามารถใช้หล่อได้และจะแข็งตัว เช่นเดียวกับคอนกรีตธรรมดาทั่วไป

สำหรับงานที่ต้องใช้อิฐทนไฟชนิดธรรมดา หรือชนิดอะลูมินาสูงที่มีรูปร่างพิเศษ เพื่อการก่อสร้างเตาเผาในส่วนมากมักนิยมใช้คอนกรีตทนไฟหล่อแทนการก่อด้วยอิฐทนไฟ ซึ่งทำได้ง่ายและสะดวกกว่าการก่อด้วยอิฐ และไม่มีรอยต่อด้วย การใช้คอนกรีตทนไฟแทนนี้จะทำให้ประหยัดทั้งเงินและเวลาได้มาก เพราะการใช้อิฐทนไฟรูปร่างพิเศษที่มีรูปร่างแปลก ๆ นั้น ไม่เพียงแต่จะมีราคาแพงเท่านั้นบางครั้งไม่สามารถจะก่อหรือประกอบเข้ากันได้ เนื่องจากเนื้อที่จำกัด

ข้อได้เปรียบของการใช้คอนกรีตทนไฟแทนอิฐทนไฟรูปร่างพิเศษมีดังนี้

1. ทำได้ง่าย รวดเร็ว และถูกกว่าก่อด้วยอิฐทนไฟ ผู้ที่ไม่มีความชำนาญก็สามารถทำได้

2. ขจัดปัญหาเรื่องรอยต่อที่ไม่แข็งแรงได้

3. ขจัดปัญหาเรื่องอิฐทนไฟรูปร่างพิเศษที่มีราคาแพงและไม่สามารถจัดหาได้ในเวลาอันรวดเร็ว

4. การซ่อมแซมเตาเผาทำได้ง่ายและสะดวกรวดเร็วกว่าการซ่อมโดยการก่ออิฐ 513 ซีเอ็ม - 1013 ซีเอ็ม

- 514 ซีเอ็ม-1014 ซีบี - 516 และ ซีบี - 1016

คุณภาพ “ซีเอ็ม” นั้นใช้สำหรับงานทั่ว ๆ ไป ที่มีอุณหภูมิไม่เกิน 1,400 องศาเซลเซียส ส่วนคุณภาพ “ซีบี” ใช้กับอุณหภูมิที่สูงกว่า 1,400 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอนกรีตทนไฟที่มีขนาดเม็ดเล็ก (สูงสุด 5 ม.ม) เหมาะกับงานที่มีรูปร่างพิเศษขนาดเล็กและบาง ส่วน
คอนกรีตทนไฟที่มีขนาดเม็ดโต (สูงสุด 10 ม.ม) เหมาะกับงานที่มีรูปร่างขนาดใหญ่มีความหนา และต้องการความ
แข็งแรงในการหล่อ

2.4.7 ความหมายของอาร์กอนในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

อาร์กอน หมายถึง ธาตุที่มีสัญลักษณ์ Ar มีคุณสมบัติไม่มีสี ไม่มีกลิ่น มีความหนาแน่น 1.783 กรัมต่อลูก
บาศก์เดซิเมตร ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส และความดัน 760 มิลลิเมตรของปรอท อาจอยู่ในสถานะของเหลวหรือ
ก๊าซ

อาร์กอนแบ่งตามการใช้งานออกเป็น 2 ชั้นคุณภาพ คือ

ชั้นคุณภาพ 1 สำหรับอุตสาหกรรมหลอดไฟฟ้า และงานวิเคราะห์ที่ต้องการความถูกต้องสูง

ชั้นคุณภาพ 2 สำหรับเชื่อมอาร์คและตัดโลหะ และอุตสาหกรรมโลหะการ

อาร์กอนอยู่ในหมู่ 0 ของตารางธาตุ (ธาตุอื่น ๆ ได้แก่ He, Ne, Kr, Xe และ Rn) ธาตุในหมู่นี้นิยมเรียกว่า
แก๊สเฉื่อย (Inert Gases) แก๊สมีตระกูล (Noble Gases) หรือแก๊สหายาก (Rare Gases)

ชื่อ Argon มาจากคำกรีก Argos แปลว่า ไม่อ่องไว (Inactive)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 สมบัติทางกายภาพของ Ar

จุดวิกฤต	
อุณหภูมิ	150.86 K
ความดัน (atm)	48.34
ความหนาแน่น (g/ml)	0.536
จุดเดือดปกติ	87.28 K
จุดทรีเปิล (triple point)	
อุณหภูมิ	83.81 K
ความดัน	0.68 atm
ความหนาแน่น	
แก๊สที่ 1 atm และ 273.15 K	1.7838 g/l
แก๊ส จุดเดือดปกติ	5.763 g/l
ของเหลว ณ จุดเดือดปกติ	1.3936 g/l
ของเหลว ณ จุดทรีเปิล	1.418 g/l
ของแข็ง ณ จุดทรีเปิล	1.623 g/l
ความร้อนของการกลายเป็นไอ ณ จุดเดือดปกติ	1550 cal/mol
ความร้อนของการหลอมเหลว ณ จุดทรีเปิล	283 cal/mol
ความจุ ความร้อน ณ ความดันคงที่ แก๊ส ที่ 1 atm, 25 องศาเซลเซียส	4.969 cal/mol-K
การนำความร้อน แก๊สที่ 1 atm 0 องศาเซลเซียส	40.5 cal/cm-sec-K
พลังงานไอออไนเซชันลำดับ 1	15.759 eV/อะตอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การดำเนินงาน

3.1 การดำเนินงานด้านฮาร์ดแวร์

การดำเนินงานในการสร้างเตาอบไฟฟ้าในบรรยากาศอาร์กอนด้านฮาร์ดแวร์ หรือ โครงสร้างรวมถึงส่วนประกอบต่าง ๆ ของเตาอบ มีขั้นตอนการคำนวณและส่วนประกอบ ดังต่อไปนี้

3.1.1 การคำนวณและการออกแบบสร้างเตาอบ

ในการออกแบบเตาอบใช้คู่มือของ Kanthal Handbook เป็นหลักและใช้ทฤษฎีทาง Thermodynamic มาเปรียบเทียบในการคำนวณด้วย โดยมีข้อกำหนดดังนี้

1. แรงเคลื่อนไฟฟ้า (Voltage)

แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ใช้คือ 220 โวลท์ 1 เฟส

2. กำลังไฟฟ้า (Power)

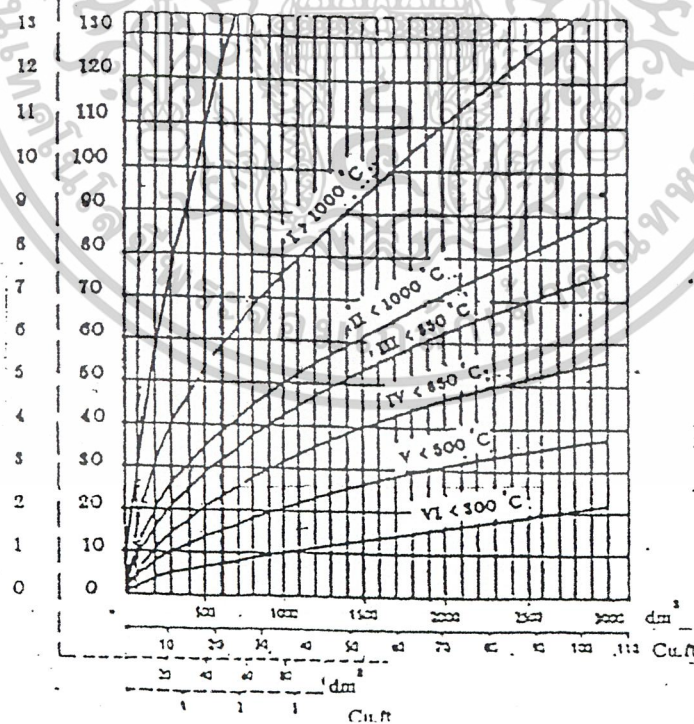
ปริมาตรภายในเตา = $180 \times 180 \times 250 \text{ mm.}$

$$= 8100000 \text{ mm.}$$

$$= 8.1 \text{ dm}^3$$

อุณหภูมิ

$$= 1000^\circ\text{C}$$



รูปที่ 3.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาตร-กำลังไฟฟ้า-อุณหภูมิ ของเตาที่มีฉนวนความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเทียบปริมาตรภายในเตากับอุณหภูมิโดยใช้กราฟจะได้กำลังไฟฟ้าของเตา = 2.5 kw

กำหนดภาระที่ผิวของขดลวดความต้านทานเมื่อกำหนดอุณหภูมิที่ต้องการ และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ = 2.5 W/cm²

3.1.1.1 การคำนวณหาขนาดของขดลวด

จากสมการ
$$d = \frac{1}{2.91} \sqrt[3]{\left(\frac{p}{y}\right)^2 \rho \left(\frac{C_t}{p}\right)}$$

กำหนดให้

- กำลังวัตต์ของขดลวด = 2.5 kW
- แรงเคลื่อนที่ไฟฟ้า = 220 v
- ภาระที่ผิวของขดลวดความร้อน = 2.5 W/cm²
- อุณหภูมิของผิว ขดลวดความร้อน = 1000°C
- สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิ = 1.06
- ความต้านทานเฉพาะ = 1.39
- ∴ ใช้ขดลวดขนาด d = 1.5 mm

3.1.1.2 กำหนดหาความต้านทานขดลวดขณะร้อน

จากสมการ
$$R_t = \frac{v^2}{p} \Omega$$

R_t = ความต้านทานขดลวดขณะร้อน

V = แรงเคลื่อนไฟฟ้า

P = กำลังวัตต์

R₂₀ = ความต้านทานขดลวดขณะเย็น

C_t = สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิ

จาก L = R₂₀ / ความต้านทานต่อความยาวของขดลวด (Ω / m20 °C)

∴ ใช้ความยาวขดลวด = 23.2 m

3.1.1.3 หาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด

จากสมการ
$$D = (5-8) d$$

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด

∴ ใช้ D = 10.5 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.4 หาจำนวนรอบของขดลวด

$$\text{จากสมการ } W = \frac{1000 \times L}{\pi(D-d)} \text{ รอบ}$$

W = จำนวนรอบของขดลวด

L = ความยาวลวดที่ต้องใช้

D = เส้นผ่านศูนย์กลางขดลวด

D = เส้นผ่านศูนย์กลางเส้นลวด

∴ ใช้ W = 820.5 รอบ

3.1.1.5 การหาความยาวขดลวด

$$\text{จากสมการ } L_w = W \cdot d \text{ mm}$$

$$\text{แทนค่า } L_w = 820.5 \times 1.5 \text{ mm}$$

$$\therefore \text{ใช้ } L_w = 1230.75 \text{ mm}$$

3.1.1.6 หาความยาวของขดลวดเมื่อคิดระยะพิตซ์

$$\text{จากสมการ } S = (2-3)d$$

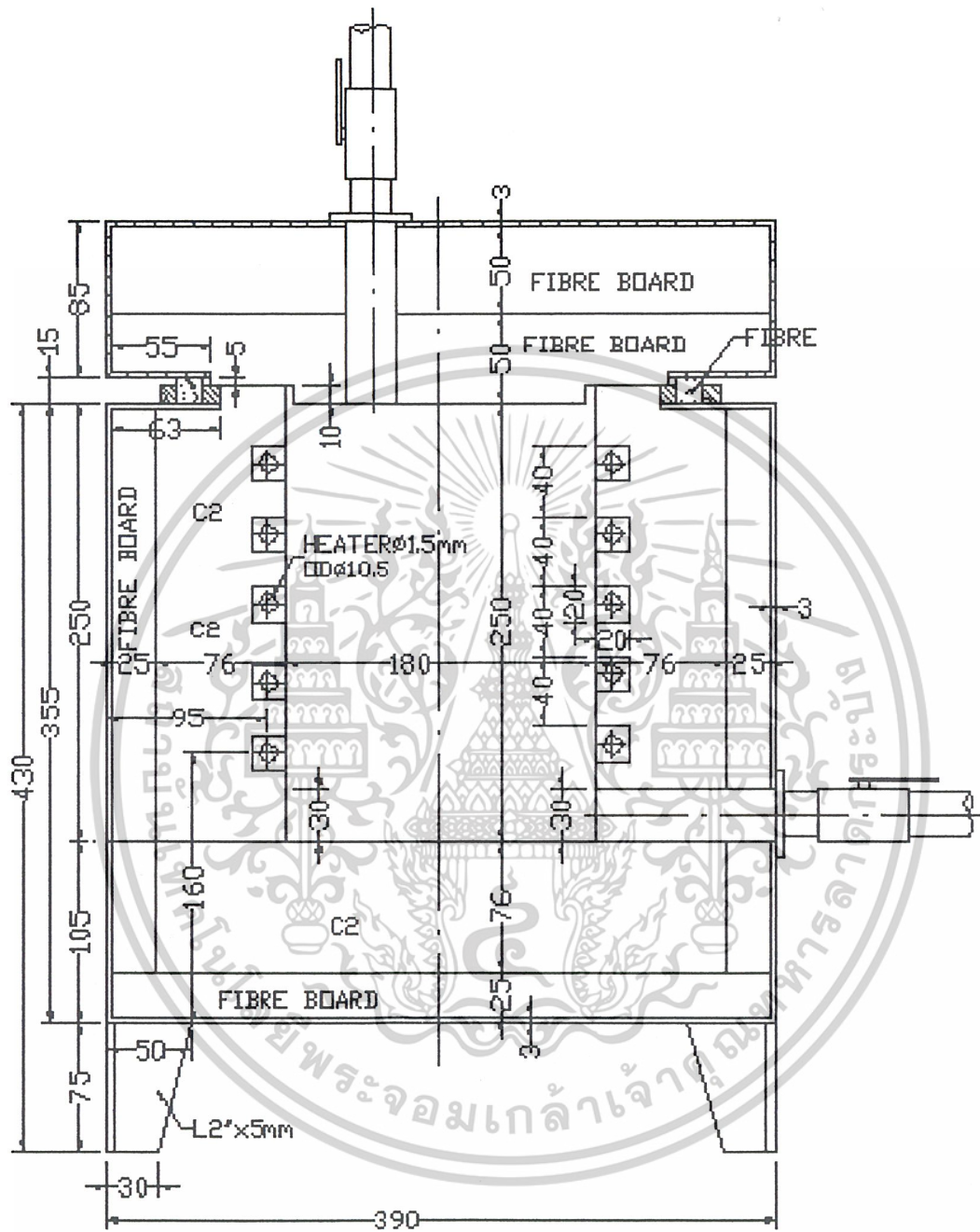
S = ระยะพิตซ์

$$\text{แทนค่า } S = 2 \times 1.5$$

$$\therefore \text{ใช้ } S = 3 \text{ mm}$$

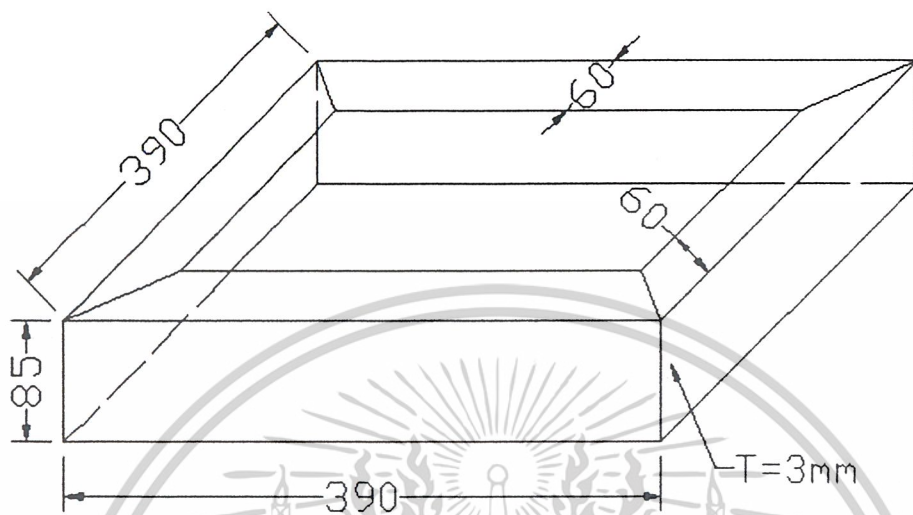
$$\begin{aligned} \therefore \text{ความยาวของขดลวดเมื่อคิดระยะพิตซ์} &= 1230.75 \times 3 \text{ mm} \\ &= 3692.25 \text{ mm} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

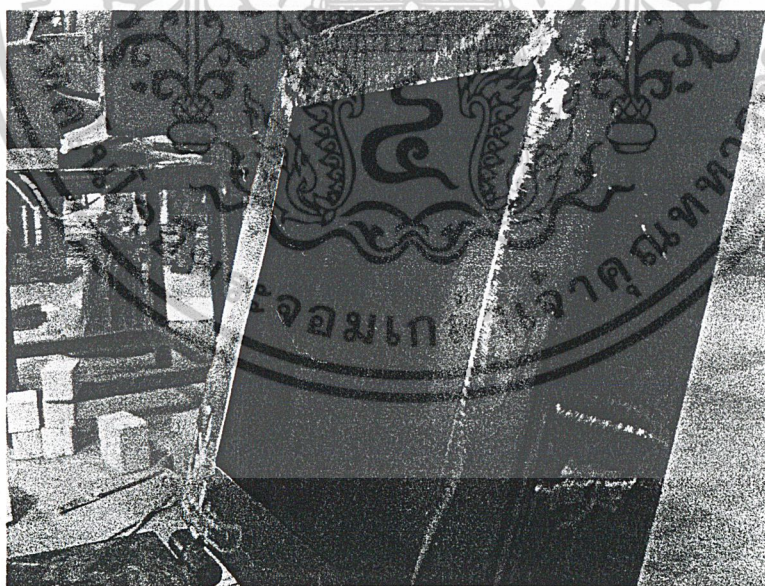


รูปที่ 3.2 แบบและขนาดต่างๆ ของเตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

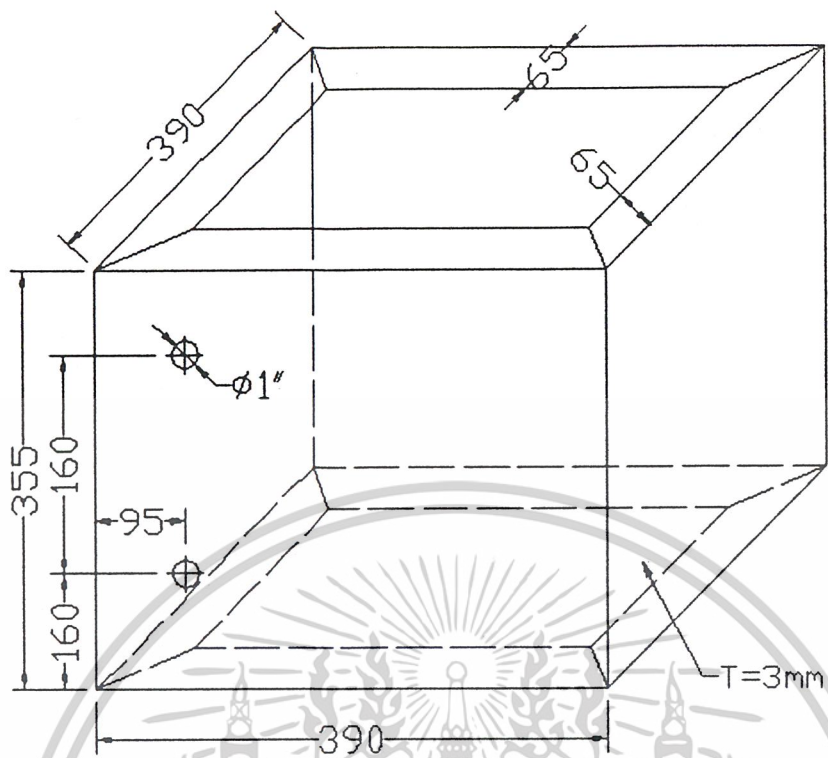


รูปที่ 3.3 แบบและขนาดของโครงเหล็กฝาปิดเตา



รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายของโครงเหล็กฝาปิดเตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

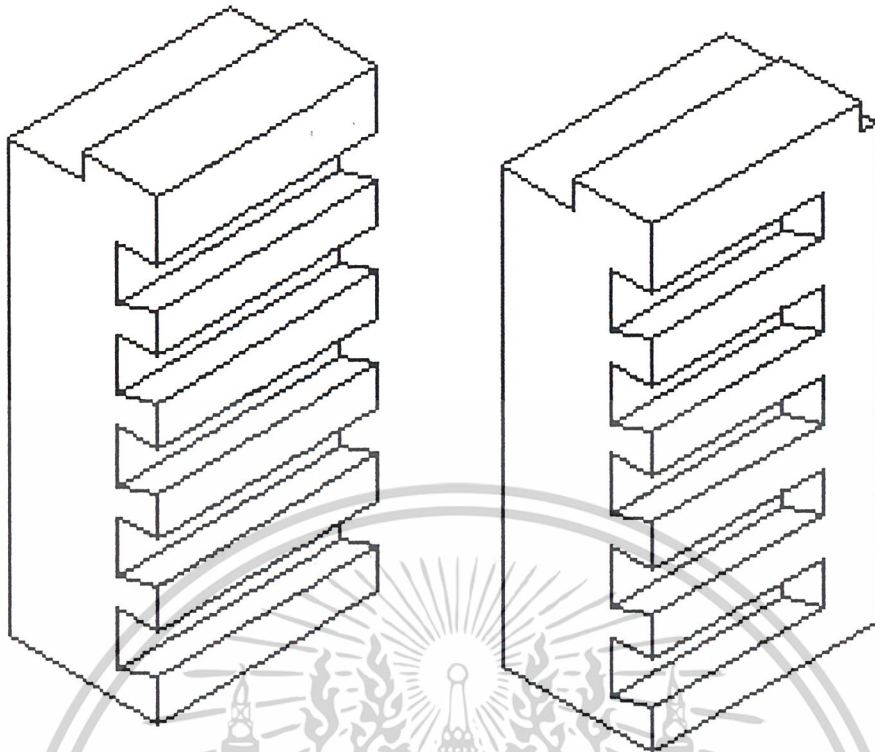


รูปที่ 3.5 แบบและขนาดของโครงเหล็กตัวเตา



รูปที่ 3.6 ภาพถ่ายของโครงเหล็กตัวเตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

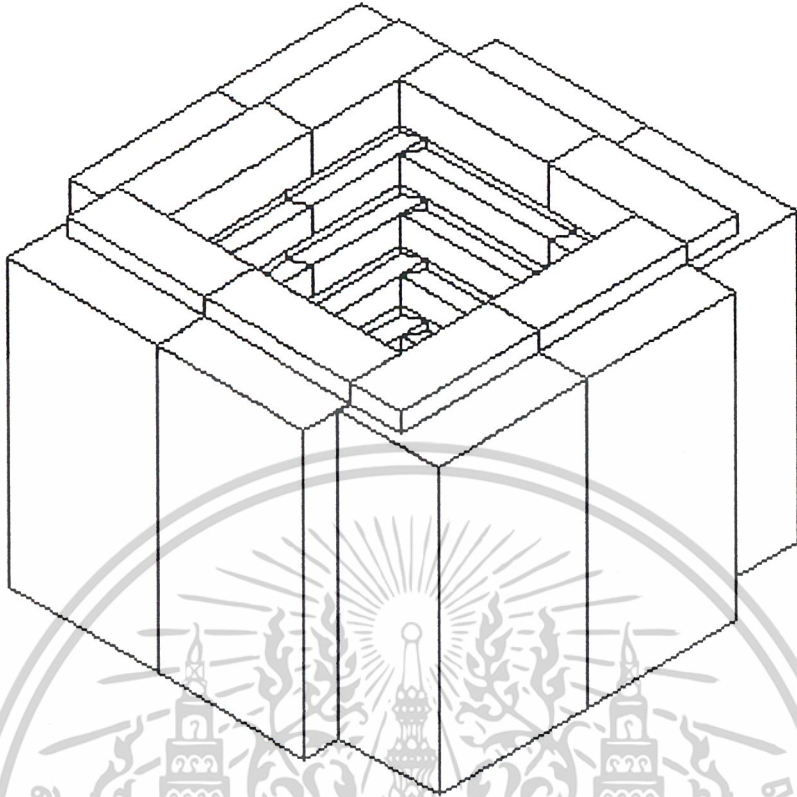


รูปที่ 3.7 แบบของอิฐที่เจาะร่อง



รูปที่ 3.8 ภาพถ่ายของอิฐที่เจาะร่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

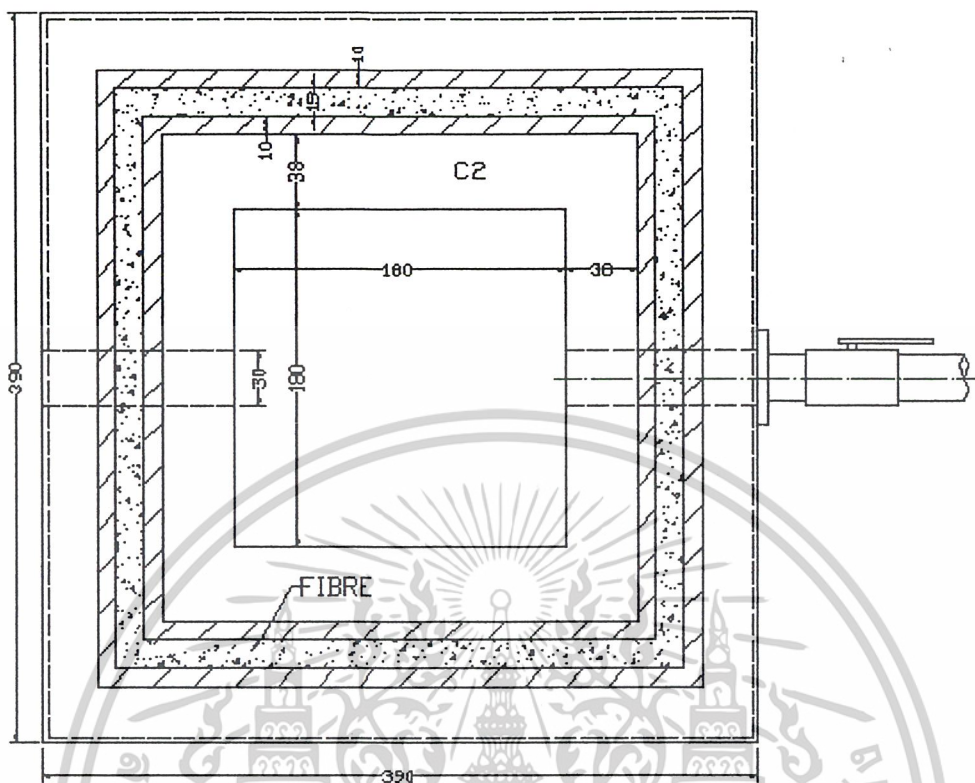


รูปที่ 3.9 แบบการเรียงอิฐ

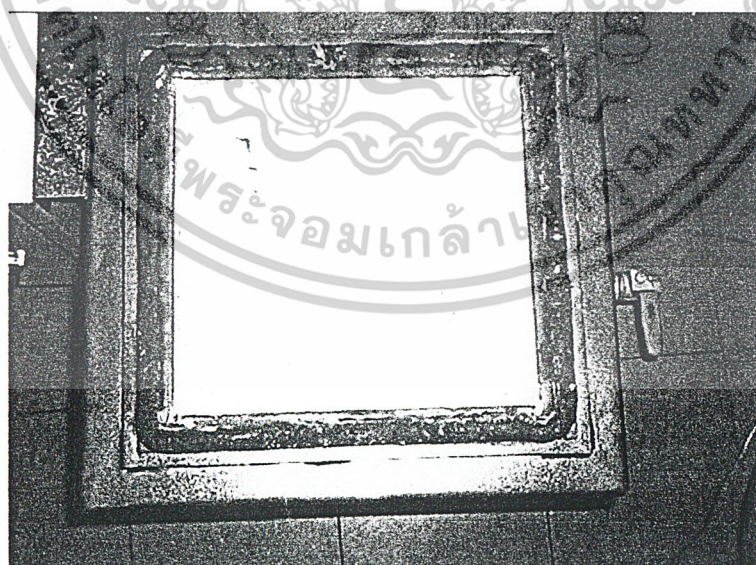


รูปที่ 3.10 ภาพถ่ายการเรียงอิฐ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

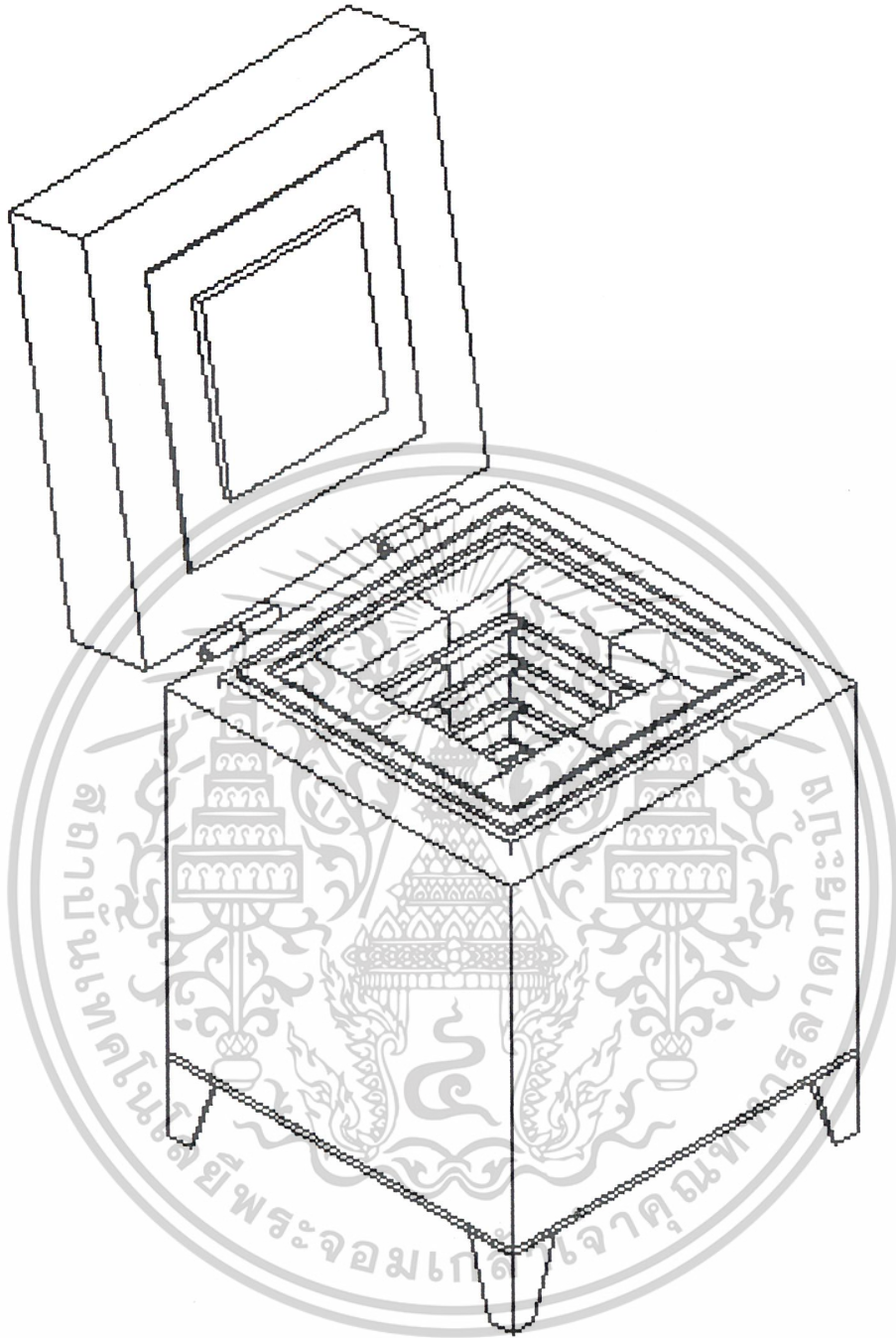


รูปที่ 3.11 แบบภาพตัดด้านบนของตัวเตาอบ



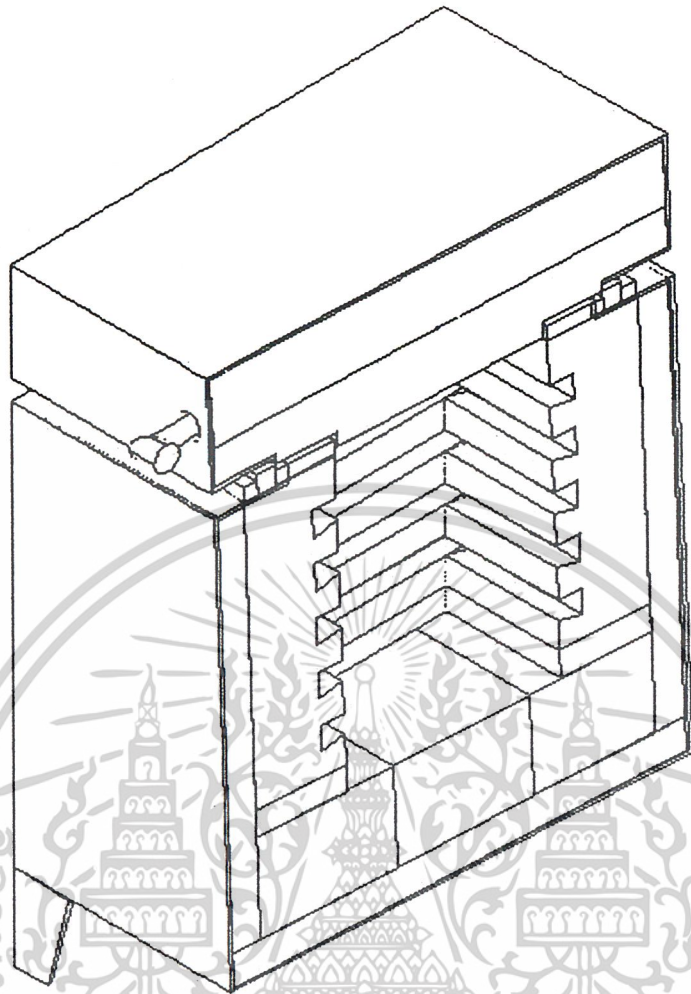
รูปที่ 3.12 ภาพถ่ายด้านบนของตัวเตาอบในขณะเปิดฝาเตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 แบบแสดงภาพรวมของเตาอบเมื่อประกอบส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 แบบแสดงภาพตัดภายในเตาอบ

3.1.2 การเลือกชนิดของวัสดุที่นำมาใช้ มีดังนี้

3.1.2.1 อิฐทนไฟ แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

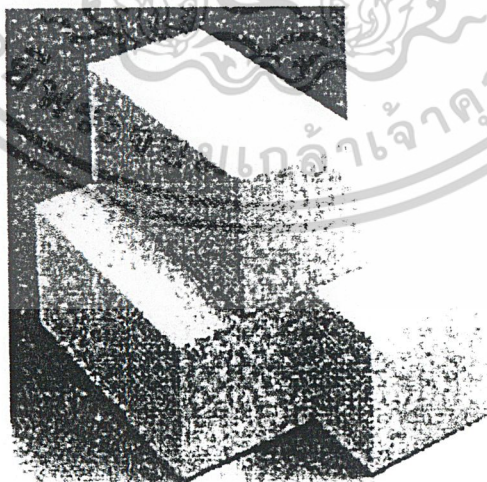
1. อิฐฉนวนทนไฟ
2. อิฐทนไฟอะลูมินาสูง

อิฐฉนวนทนไฟ หมายถึง อิฐทนไฟที่มีค่าการนำความร้อนและการจุความร้อนต่ำ ซึ่งมีความหนาแน่นรวมและการเปลี่ยนแปลงโดยการเผาซ้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงชนิดของอิฐฉนวนทนไฟ

ชนิด	ชั้นคุณภาพ	การเปลี่ยนแปลง โดยการเผาซ้ำ ไม่เกินร้อยละ 2 เมื่อเผาที่อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความหนาแน่นรวม กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ไม่เกิน	ความต้านทานแรงบีบคเมื่อเย็น เมกาปาสกาล ไม่ต่ำกว่า
ก	ก09	900	0.6	1
	ก11	1100	0.7	1
	ก12	1200	0.75	1
	ก13	1300	0.8	1
	ก14	1400	0.85	1
	ก15	1500	0.95	2.5
ข	ข09	900	0.7	2.5
	ข11	1100	0.75	2.5
	ข12	1200	0.8	2.5
	ข13	1300	0.85	2.5
	ข14	1400	0.9	2.5
	ข15	1500	1	2.5
ค	ค13	1300	1.1	5
	ค14	1400	1.2	7
	ค15	1500	1.25	9








รูปที่ 3.15 อิฐทนไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

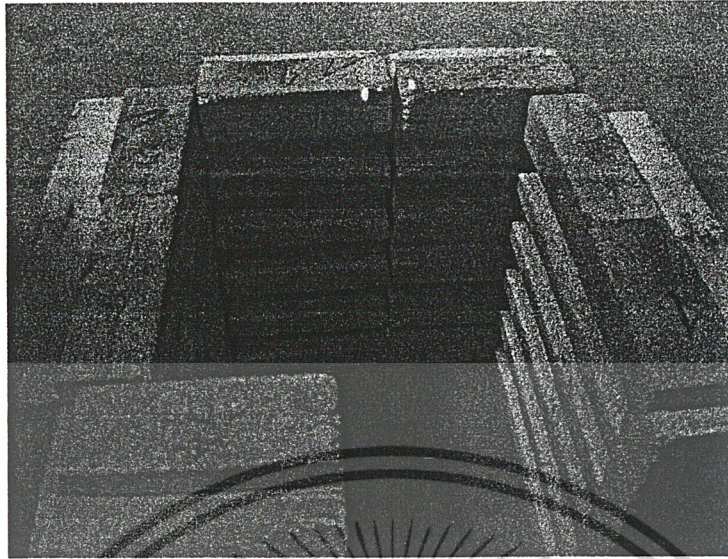
อิฐทนไฟขนาดมาตรฐาน

STANDARD REFRACTORY BRICKS

DESCRIPTION SHAPE	BRICK NO.	ASTM (SK 30 A 390)
STRAIGHT 	ST-76	ST-76 76 x 115 x 230
	ST-64	ST-64 64 x 115 x 230
SPLIT 	SP-50	SP-50 50 x 115 x 230
	SP-38	SP-38 38 x 115 x 230
	SP-32	SP-32 32 x 115 x 230
	SP-25	SP-25 25 x 115 x 230
SIDE ARCH 	SA-70	SA-70 76/70 x 115 x 230
	SA-64	SA-64 76/64 x 115 x 230
	SA-50	SA-50 76/50 x 115 x 230
END ARCH 	EA-70	EA-70 76/70 x 115 x 230
	EA-64	EA-64 76/64 x 115 x 230
	EA-50	EA-50 76/50 x 115 x 230
KEY 	KE-102	KE-102 76 x 115/102 x 230
	KE-89	KE-89 76 x 115/89 x 230
	KE-76	KE-76 76 x 115/76 x 230

รูปที่ 3.16 แสดงแบบและขนาดมาตรฐานของอิฐทนไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 ภาพถ่ายของอิฐทนไฟที่ใช้งาน

3.1.2.2 ปูนทนไฟ

เป็นวัสดุทนไฟที่ใช้ก่ออิฐทนไฟแต่ละก้อน ให้ยึดติดกันช่วยให้โครงสร้างสามารถคงรูปร่างอยู่ได้และช่วยป้องกันการรั่วไหลของเปลวไฟและวัสดุคืบภายในเตา มีคุณสมบัติทนทานต่ออุณหภูมิ ได้เช่นเดียวกับวัสดุทนไฟชนิดอื่น ๆ ประเภทของปูนทนไฟ แบ่งได้เป็น 2 ชนิด

1. ปูนทนไฟชนิดที่ต้องให้ความร้อนจึงจะแข็งตัว เป็นปูนทนไฟชนิดผงแห้ง ซึ่งการใช้งานต้องนำไปผสมน้ำตามสัดส่วน ที่กำหนดไว้ข้างตงก่อนการใช้งาน จะให้ความแข็งแรงสมบูรณ์เมื่อได้รับความร้อนสูงเกินกว่า $1,000^{\circ}\text{C}$
2. ปูนทนไฟชนิดที่ให้ความแข็งแรงที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งมีทั้งชนิดผงแห้งซึ่งต้องผสมน้ำก่อนนำไปใช้งาน และชนิดเปียกซึ่งผสมเสร็จพร้อมใช้งาน ได้ทันที ปูนทนไฟชนิดที่ให้ความแข็งแรงที่อุณหภูมิห้องนี้จะเกิดปฏิกิริยาให้ความแข็งแรงได้เอง ณ อุณหภูมิห้อง

การเตรียมปูนทนไฟชนิดแห้ง

1. ตวงน้ำให้สะอาดที่ใช้ผสมปูนทนไฟตามเปอร์เซ็นต์ที่กำหนดไว้ที่ตง
2. โรยผงปูนทนไฟลงในตงผสมทีละน้อยจนหมด ขณะเดียวกันให้เปิดส่วนไฟฟ้าติดใบพัดคววนอยู่ตลอดเวลา
3. กวนต่ออีกจนกว่าปูนทนไฟจะเป็นเนื้อเดียวกันและเหนียวพอเหมาะกับการใช้งาน
4. ถ้าเป็นชนิดแห้งแข็งตัวที่อุณหภูมิห้องควรมักทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง และต้องกวนอีกครั้งก่อนนำไปใช้งาน

การเตรียมปูนทนไฟชนิดเปียก

1. เปิดปากตงใช้ส่วนไฟฟ้าติดใบพัดคววนปูนทนไฟให้ทั่วโดยใช้เวลาประมาณ 5-10 นาที
2. หากเนื้อปูนทนไฟข้นเกินไปให้เติมน้ำสะอาดปรับความหนืดของปูนทนไฟให้เหมาะสมกับการใช้งาน และต้องกวนปูนทนไฟนั้นให้เป็นเนื้อเดียวกันก่อนนำไปใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 ปูนทนไฟ

3.1.2.3 เทอร์โมคัมป์เป็ล

เนื่องจากเทอร์โมคัมป์เป็ลมีหลายรูปแบบอย่างเช่น เทอร์โมคัมป์เป็ลแบบ J, K, T, E, N, R และ S ซึ่งแต่ละแบบก็จะมีลักษณะคุณสมบัติและการนำไปใช้งานที่แตกต่างกัน เทอร์โมคัมป์เป็ลชนิดแบบ เค (Type K) เป็นแบบที่สามารถวัดอุณหภูมิได้ในช่วง -270 ถึง $1,372$ องศาเซลเซียสและเหมาะสมกับคุณสมบัติของเตาอบที่จะสร้าง ดังนั้นจึงเลือกใช้เทอร์โมคัมป์เป็ลแบบ เค (Type K)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GENERAL THERMOCOUPLE SPECIFICATIONS

1		TYPE K, J Under 350°C	8		TYPE K, J Under 600°C
2		TYPE K, J Under 350°C	9		TYPE K, J 9.5ø~under 600°C 12.7ø~under 700°C 15.9ø~under 800°C 17.3ø~under 900°C 21.7ø~under 1,000°C
3		TYPE K, J Under 600°C	10		TYPE K, J 9.5ø~under 600°C 12.7ø~under 700°C 15.9ø~under 800°C 17.3ø~under 900°C 21.7ø~under 1,000°C
4		TYPE K, J Under 600°C	11		TYPE R, S Under 1,600°C
5		TYPE K, J Under 600°C	12		RTD (3 สาย) PT 100Ω Under 300°C
6		TYPE K, J Under 600°C	13		RTD (3 สาย) PT 100Ω Under 300°C
7		TYPE K, J Under 600°C	14		RTD (3 สาย) PT 100Ω Under 300°C
12		RTD (3 สาย) PT 100Ω Under 300°C	15		RTD (3 สาย) PT 100Ω Under 300°C

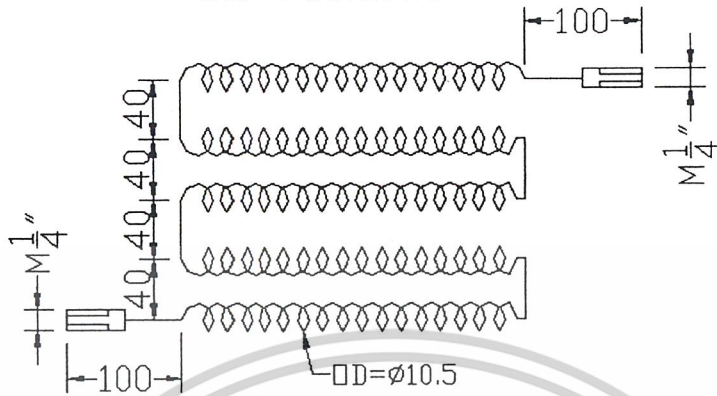
รูปที่ 3.19 เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิดต่างๆ

3.1.2.4 ลวดฮีตเตอร์ (Heater Coils)

เป็นโลหะผสมของ Kanthal และ Nikrothal มีความแข็งแรงและความเหนียวสูงมาก แต่เมื่อนำไปยึดที่อุณหภูมิสูงแล้วความสามารถทนแรงดึงและความยืดหยุ่นจะลดลง โลหะบางยังคงมีความเหนียวดีหลังจากใช้งานหลาย ๆ ปี สภาพการยึดตัว (Plasticity) ของโลหะ Kanthal จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 1,100 °c การยึดตัวเป็นไปอย่างช้า ๆ โดยน้ำหนักของมันเอง ลวดความต้านทานไม่ควรนำไปสัมผัสกับวัสดุพวก Non-Ferrous ในระหว่างการผลิต การตัดด้วยเครื่องมือที่เป็นเหล็กอาจใช้ได้ ในกรณีที่ทำเป็น วัสดุที่จะนำมาผ่านกระบวนการผลิตจะต้องสะอาดปราศจากรอยสกปรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HEATER $\phi 1.5\text{mm}$
 $L=23.2\text{m}/\phi$
 $\square\text{D}=\phi 10.5\text{mm}$



รูปที่ 3.20 แสดงรูปแบบและขนาดต่างๆ ของขดลวดฮีตเตอร์



รูปที่ 3.21 แสดงภาพของขดลวดฮีตเตอร์ชนิดที่ใช้งาน

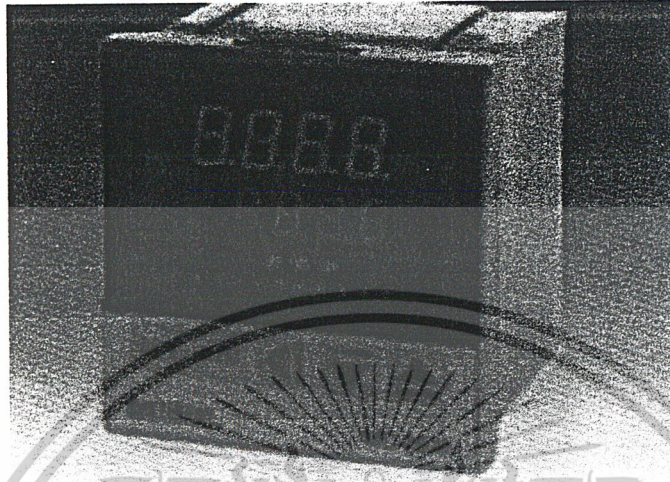


รูปที่ 3.22 ลวดฮีตเตอร์ชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2.5 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperatuer Control)

เครื่องควบคุมอุณหภูมิที่ใช้งานเป็นแบบดิจิทัล รุ่น NT-2438 มีขนาดเล็กสามารถใช้งานกับเทอร์โมคัปเปิ้ลได้หลายแบบ ตั้งค่าควบคุมอุณหภูมิได้หลายช่วงและยังสามารถตั้งค่าवलบอุณหภูมิได้อีกด้วย



รูปที่ 3.23 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ

3.1.2.6 เซรามิกไฟเบอร์

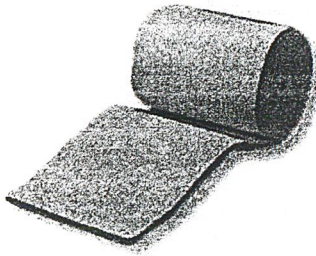
เป็นฉนวนกันความร้อนทำมาจากเซรามิก มีหลากหลายชนิด โดยมีคุณสมบัติคล้ายคลึงกัน คือนำความร้อนต่ำ สามารถทนอุณหภูมิได้สูงมีความหนาแน่นมากมีความยืดหยุ่นต่ำ แต่ละชนิดมีลักษณะแตกต่างกันมีทั้งแบบฝอย ,แบบ เชือกถัก ,แบบกระดานแข็ง ,แบบแผ่น เป็นต้น โดยแต่ละชนิดเลือกใช้ตามลักษณะการใช้งาน



รูปที่ 3.24 เซรามิกไฟเบอร์ชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบพืน (BLANKET)



คุณลักษณะ

- เป็นฉนวน หนากว้าง 600 มม. ยาว 7,200 มม. หนา 25 มม.
- ความหนาแน่น 96, 128 และ 160 kg/m³ (ความหนาแน่นสูงจะมีความเป็นฉนวนดี)
- อุณหภูมิใช้งาน 1,260 และ 1,400 °C
- เหมาะในการบุผนังที่มีความโค้ง เช่น เตาหลอม, กำแพงกันความร้อน

การระบุรุ่น

1. ระบุอุณหภูมิ : 1,260, 1,400 °C
2. ระบุความหนาแน่น : 96 (6P), 128 (8P), 160 kg/m³ (10P)

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

รูปที่ 3.25 เซรามิกไฟเบอร์แบบผืน



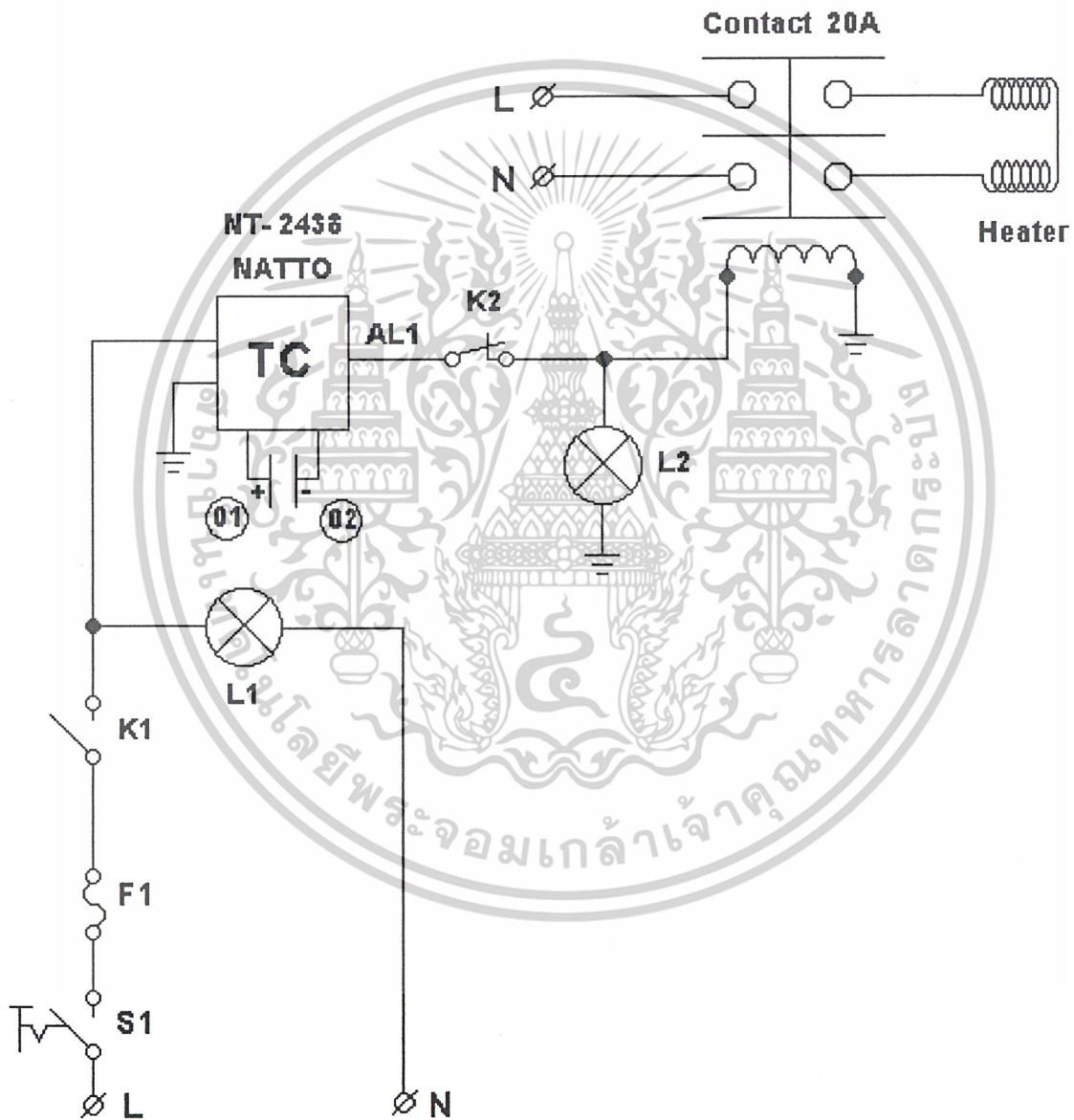
รูปที่ 3.26 เซรามิกไฟเบอร์แบบกระดานแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การดำเนินงานด้านวงจรควบคุม

ออกแบบวงจรควบคุมเป็นระบบ ON-OFF เพื่อให้วงจรมีการทำงานโดย เมื่อกดสวิตช์ S1 กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านฟิวส์ F1 ผ่านแมกเนติกคอนแทคเตอร์ K1 ทำให้ K1 ทำงานหน้าสัมผัสปกติเปิดก็ปิดวงจรทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านหลอด L1 แสดงสภาวะการทำงานและมีกระแสไปยังตัวควบคุมอุณหภูมิ กระแสไฟฟ้าไหลผ่านหน้าสัมผัสปกติปิดของ K2 ทำให้ Contact 20 A มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านซึ่งเป็นไฟเลี้ยงคอยล์ทำงาน ฮีตเตอร์ครบวงจรจึงทำงาน

เมื่อถึงอุณหภูมิที่ตั้งไว้ K2 ทำงานทำให้หน้าสัมผัสปกติปิดเปลี่ยนสถานะเป็นปกติเปิด ทำให้ไม่มีไฟไปเลี้ยงคอยล์ Contact 20 A ทำให้ ฮีตเตอร์ไม่ครบวงจรจึงไม่ทำงาน ดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.27 แสดงวงจรควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การดำเนินงานด้านการทดสอบเตา

มีวิธีดำเนินการทดสอบ ดังต่อไปนี้

1. เปิดสวิทช์ไฟที่กล่องวงจรควบคุม
2. สำหรับอบในบรรยากาศอาร์กอนทำการตั้งค่าอุณหภูมิไว้ที่ 700 °c เมื่ออุณหภูมิใกล้ถึงให้เปิดวาล์วค่อย ๆ ปลดออกก๊าซอาร์กอนเข้าไปในเตาพร้อมกับเปิดวาล์วด้านบนเพื่อไล่อากาศออกเมื่อก๊าซเข้าไปเต็มให้ปิดวาล์วทั้งหมดแล้วตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 800 °c ส่วนในการอบบรรยากาศปกติให้ตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 800 °c
3. เปิดสวิทช์ฮีตเตอร์ที่กล่องวงจรควบคุม
4. สังเกตการทำงานของเครื่องควบคุมอุณหภูมิและการทำงานของเตาอบไฟฟ้า
5. บันทึกการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิโดยเทียบกับเวลา
6. เมื่อให้ความร้อนไปถึงอุณหภูมิที่ต้องการในการอบบรรยากาศอาร์กอนให้เปิดวาล์วที่ตั้งก๊าซอาร์กอน และเปิดวาล์วที่ตัวเตาอบเพื่อให้ก๊าซอาร์กอนเข้าไปแทนที่ในอากาศปกติขณะเดียวกันให้เปิดวาล์วตัวบนเตาอบเพื่อให้ระบายออกซิเจนออกมา
7. เมื่อเวลาผ่านไปพอสมควรสังเกตว่ามีก๊าซซึมออกมาให้ปิดวาล์วที่ตั้งก๊าซแล้วปิดวาล์วทั้งสองที่เตาอบ
8. จากนั้นก็ตั้งค่าอุณหภูมิที่ 800 °c แล้วอบแซ่วี้อีก 1 ชั่วโมง เช่นเดียวกับการอบในบรรยากาศปกติ
9. ใช้คีมจับชิ้นงานที่อบเสร็จแล้วจับในถังสารชุบอย่างรวดเร็ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

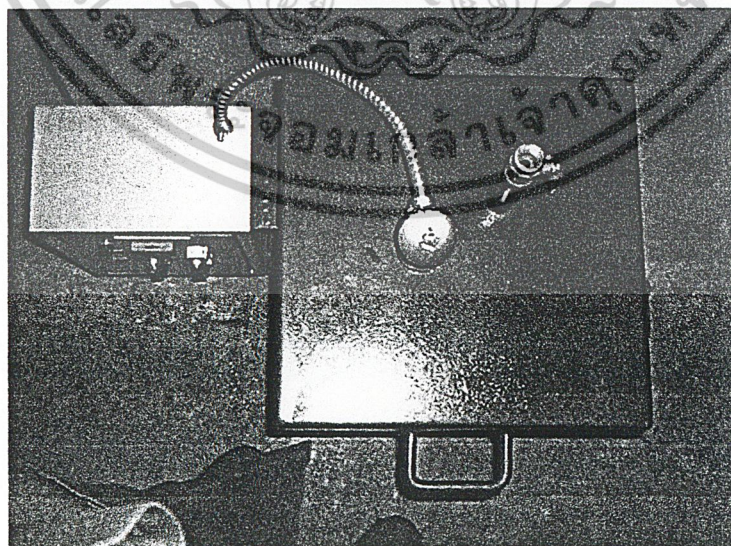
ผลการดำเนินงาน

4.1 ผลการดำเนินงานด้านฮาร์ดแวร์

ในการดำเนินการสร้างเตาอบไฟฟ้าในบรรยากาศอาร์กอนที่ผ่านมา ได้เตาอบรูปทรงสี่เหลี่ยมมีฝาเปิดทางด้านบน มีขนาดภายนอก 390 x 390 x 455 mm ขนาดภายในช่องใส่ชิ้นงาน 180 x 180 x 250 mm มีท่อवालวขนาด 11 mm ปลอยก๊าซเข้าทางด้านข้างของตัวเตาอบ และปลอยก๊าซออกทางด้านบนของฝาเตาอบ ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายด้านหน้าของเตาอบที่เสร็จสมบูรณ์



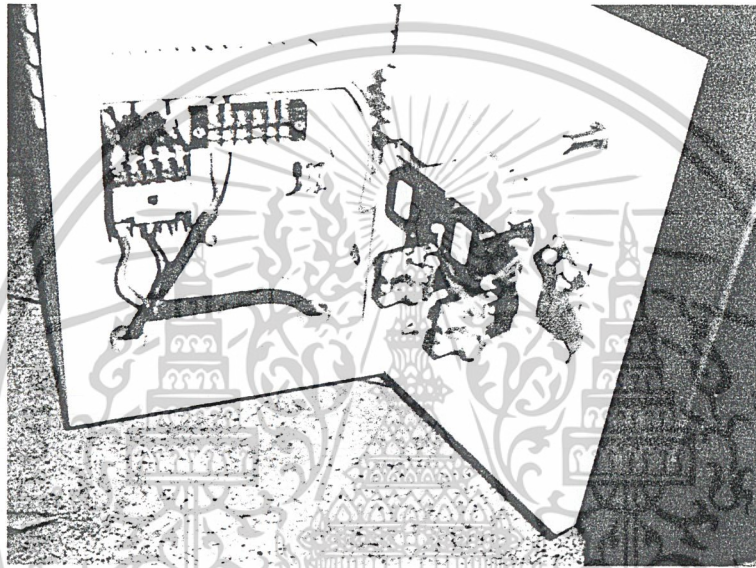
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายด้านล่างของเตาอบที่เสร็จสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการดำเนินงานด้านวงจรควบคุม

จากการดำเนินการต่อวงจรควบคุมเป็นระบบ ON-OFF ตามที่ออกแบบไว้จนเสร็จสิ้นได้วงจรทำงาน โดยเมื่อเปิดสวิตช์ Power กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านฟิวส์ผ่านแมกเนติกคอนแทคเตอร์ ทำให้ทำงานหน้าสัมผัสปกติเปิดก็ปิดวงจรทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านหลอดไฟสีแดงจึงสว่างแสดงสภาวะการทำงาน จากนั้นทำการตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการเสร็จแล้วจึงเปิดสวิตช์ Heater หลอดไฟสีเขียวจึงสว่างแสดงสภาวะการทำงาน โดยมีกระแสไฟฟ้าไหลไปยังตัวควบคุมอุณหภูมิ กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน Contact 20 A ฮีตเตอร์ครบวงจรจึงทำงาน

เมื่ออุณหภูมิขึ้นถึงที่ตั้งไว้สวิตช์ Heater จึงปิดหลอดไฟสีเขียวดับ เนื่องจาก K2 ทำงานทำให้หน้าสัมผัสปกติปิดเปลี่ยนสถานะเป็นปกติเปิด ทำให้ไม่มีไฟไปเลี้ยงคอยล์ Contact 20 A ทำให้ ฮีตเตอร์ไม่ครบวงจรจึงไม่ทำงาน



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายวงจรควบคุมที่เสร็จสมบูรณ์



รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายกล่องวงจรควบคุมที่เสร็จสมบูรณ์ขณะทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการทดสอบ

บันทึกผลการทดสอบโดยการหาผลการทดสอบจากการทำสองการทดสอบ โดยการทดสอบในบรรยากาศอาร์กอนที่อุณหภูมิ 800 °c และที่การทดสอบในบรรยากาศปกติที่ 800 °c โดยที่การทดสอบทั้งสองครั้งนี้จะต้องอบแห้งไว้อีก 1 ชั่วโมง แล้วนำมาจุ่มสารชุบ ซึ่งในการทดสอบนี้จะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาและการหาค่าต่าง ๆ โดยจะทำ 2 การทดสอบ ดังต่อไปนี้

การทดสอบที่ 1 การทดสอบอบในบรรยากาศอาร์กอนอุณหภูมิภายในเตาจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเปลี่ยนไปทุกๆ 1 นาที จนอุณหภูมิเพิ่มขึ้นไปใกล้ถึง 700 °c จึงค่อย ๆ ปล่อยให้ก๊าซอาร์กอนเข้าไปในเตาอบแล้วเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 800 °c จากนั้นอบแห้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการบันทึกผล

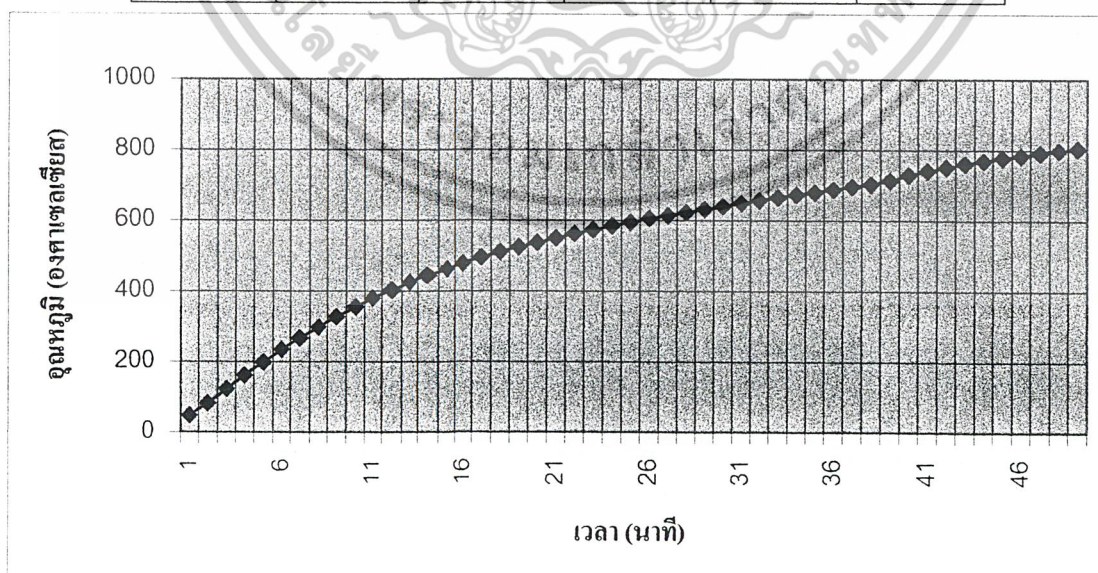
การทดสอบที่ 2 ทำการทดสอบอบในบรรยากาศปกติโดยเพิ่มอุณหภูมิไปเรื่อยจนถึง 800 °c และอบแห้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการอบทั้งสองบรรยากาศมาเปรียบเทียบหาความแตกต่างที่เกิดขึ้นของชิ้นงานที่ได้จากการอบและนำไปวิเคราะห์หาผลที่ต้องการแก้ไข จากนั้นทำการบันทึกผล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของเตาอบ ในการทดสอบที่ 1
การอบในบรรยากาศอาร์กอน ที่อุณหภูมิ 800 °c

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°c)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°c)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°c)
0	32	17	496	34	673
1	48	18	511	35	680
2	82	19	525	36	688
3	123	20	538	37	696
4	162	21	550	38	703
5	199	22	563	39	713
6	234	23	574	40	729
7	267	24	585	41	741
8	298	25	595	42	751
9	327	26	605	43	761
10	355	27	614	44	769
11	380	28	623	45	777
12	403	29	632	46	784
13	425	30	640	47	791
14	444	31	649	48	798
15	462	32	657	49	804
16	479	33	665		

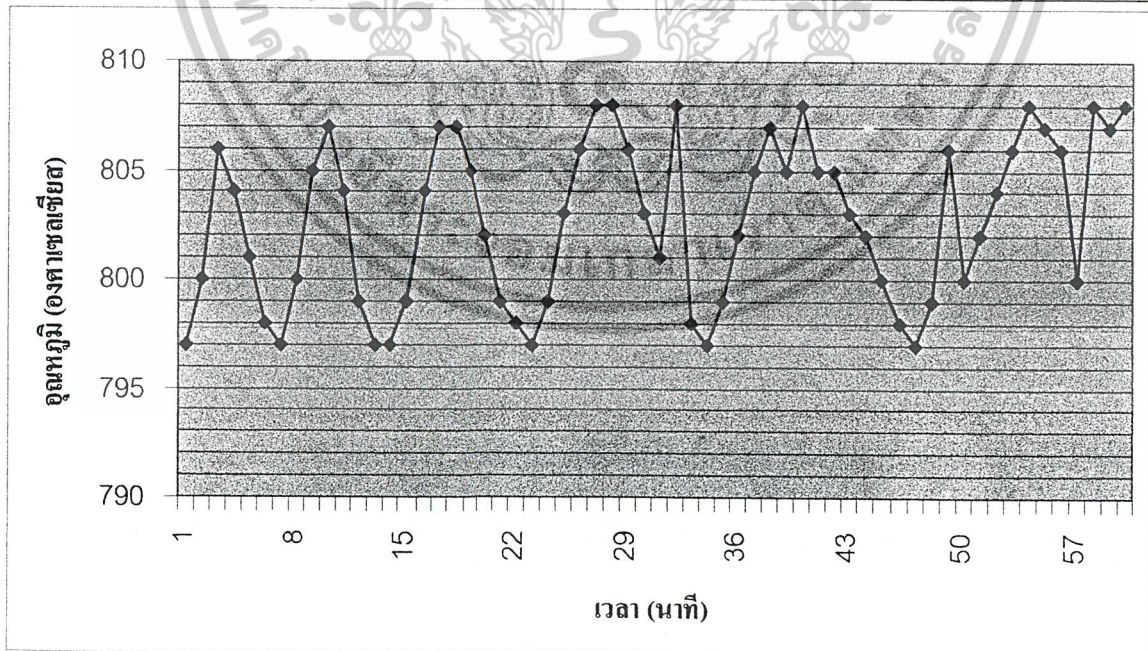


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ในการทดสอบที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของเตาอบในการทดสอบที่ 1 การอบในบรรยากาศอาร์กอน ที่อุณหภูมิ 800 °c แซ่ไว้นาน 1 ชั่วโมง โดยที่ตั้งอุณหภูมิเผื่อไว้ที่ +5 °c

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°c)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°c)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°c)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°c)
1	797	16	804	31	801	46	798
2	800	17	807	32	807	47	798
3	806	18	807	33	798	48	799
4	804	19	805	34	797	49	799
5	801	20	802	35	799	50	800
6	798	21	799	36	802	51	802
7	797	22	798	37	805	52	804
8	800	23	797	38	807	53	806
9	805	24	799	39	805	54	808
10	807	25	803	40	808	55	808
11	804	26	806	41	805	56	809
12	799	27	808	42	805	57	800
13	797	28	800	43	803	58	808
14	800	29	806	44	802	59	807
15	799	30	803	45	800	60	808

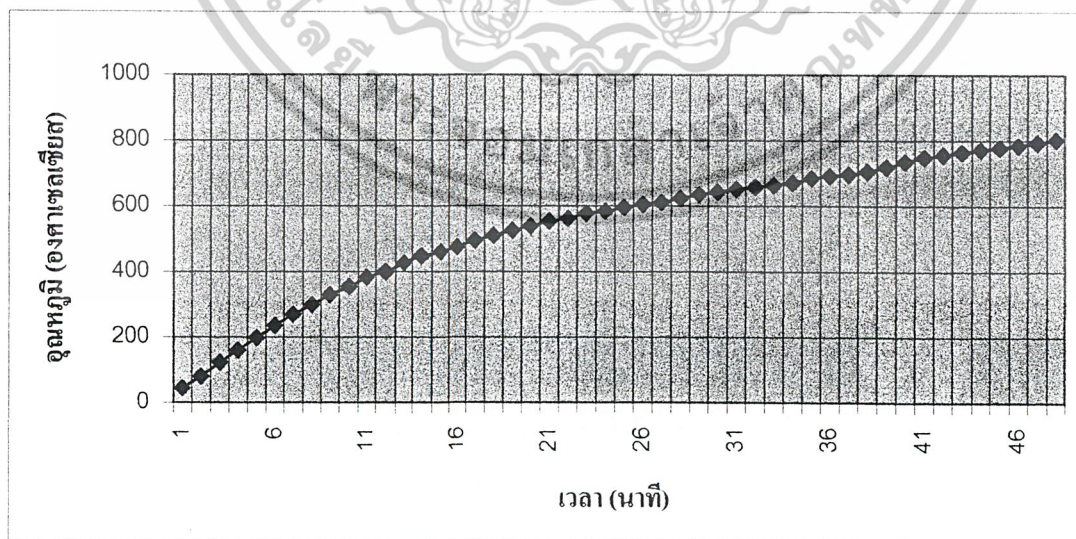


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ภายในเวลา 1 ชั่วโมง ของการทดสอบที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของเตอบ ในการทดสอบที่ 2
การอบในบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 800°C

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°c)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°c)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°c)
0	30	17	495	34	671
1	45	18	510	35	685
2	80	19	525	36	692
3	123	20	539	37	697
4	160	21	554	38	706
5	198	22	561	39	718
6	235	23	577	40	735
7	269	24	584	41	749
8	298	25	596	42	756
9	328	26	605	43	764
10	354	27	611	44	772
11	382	28	624	45	778
12	400	29	635	46	785
13	426	30	643	47	793
14	447	31	651	48	802
15	460	32	658		
16	475	33	664		

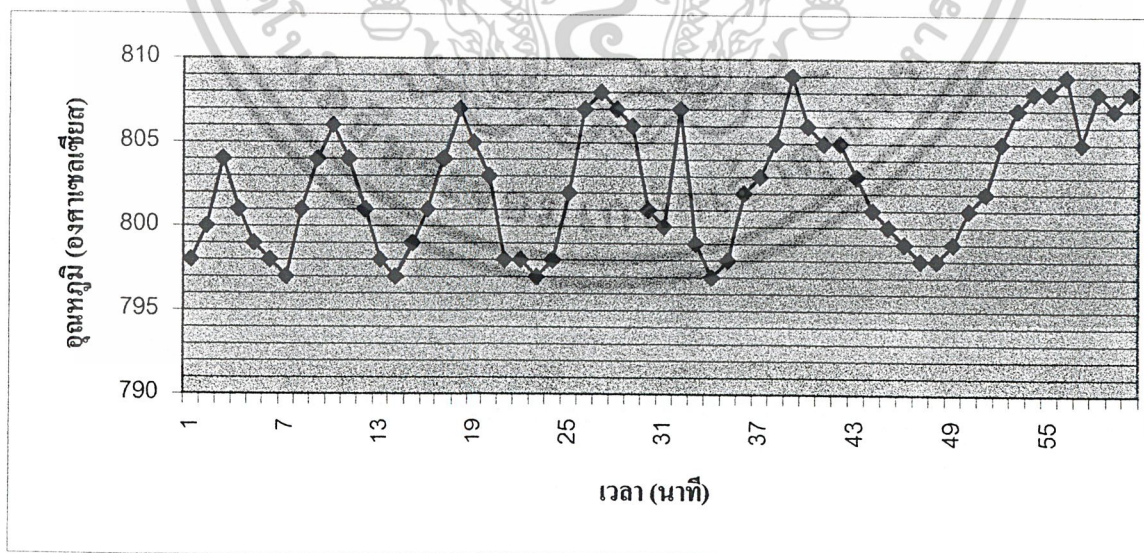


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ในการทดสอบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของเตาอบในการทดสอบที่ 2 การอบในบรรยากาศปกติ ที่อุณหภูมิ 800 °c แซ่ไว้ นาน 1 ชั่วโมง โดยที่ตั้งอุณหภูมิเผื่อไว้ที่ +5 °c

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°c)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°c)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°c)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°c)
1	798	16	801	31	800	46	799
2	800	17	804	32	807	47	798
3	804	18	807	33	799	48	798
4	801	19	805	34	797	49	799
5	799	20	803	35	798	50	801
6	798	21	798	36	802	51	802
7	797	22	798	37	803	52	805
8	801	23	797	38	805	53	807
9	804	24	798	39	809	54	808
10	806	25	802	40	806	55	808
11	804	26	807	41	805	56	809
12	801	27	808	42	805	57	805
13	798	28	807	43	803	58	808
14	797	29	806	44	801	59	807
15	799	30	801	45	800	60	808



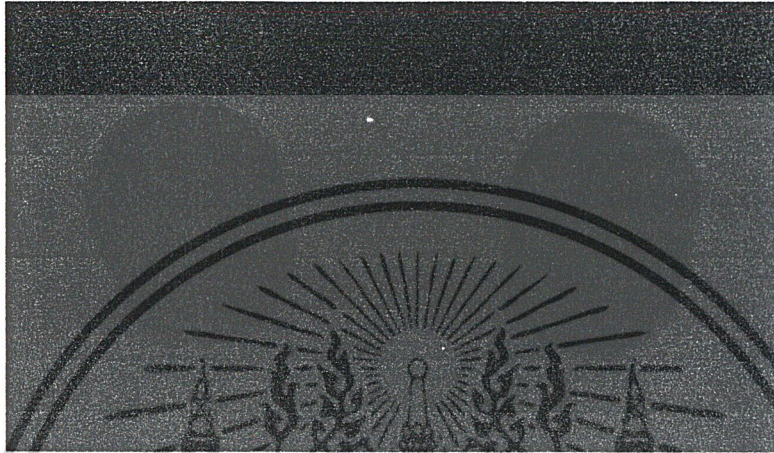
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ภายในเวลา 1 ชั่วโมง ของการทดสอบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 ผลการทดสอบที่ 1 การอบในบรรยากาศอาร์กอน ที่อุณหภูมิ 800 °c

จากการเก็บบันทึกข้อมูลในการทดสอบที่ 1 ทำให้ทราบถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงระหว่างอุณหภูมิกับเวลา โดยการอบในบรรยากาศอาร์กอน อุณหภูมิขึ้นถึง 800 °c ในระยะเวลา 49 นาที ดังแสดงในตารางที่ 4.1

สำหรับชิ้นงานทดสอบ เมื่อนำมาทำการสำรวจพื้นผิวจะเห็นได้ว่าพื้นผิวไม่เป็นสนิม ดังแสดงในรูปที่ 4.9 มีความสมบูรณ์กว่าพื้นผิวของชิ้นงานทดสอบในการอบในบรรยากาศปกติ

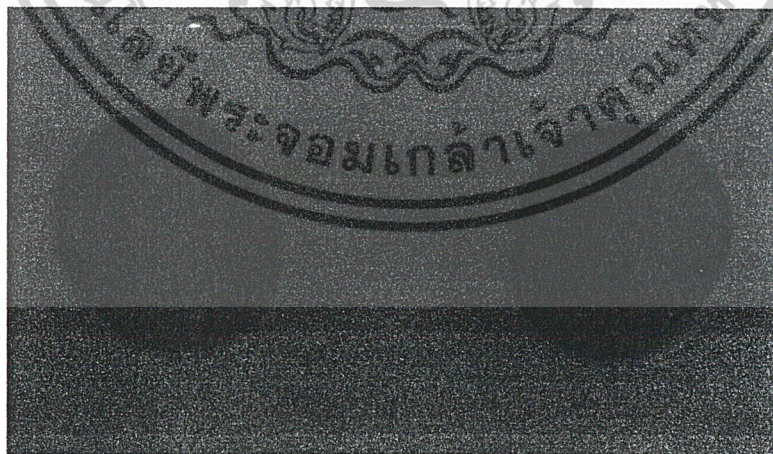


รูปที่ 4.9 แสดงภาพถ่ายชิ้นทดสอบของการอบในบรรยากาศอาร์กอน

4.3.2 ผลการทดสอบที่ 2 การอบในบรรยากาศปกติ ที่อุณหภูมิ 800 °c

จากการเก็บบันทึกข้อมูลในการทดสอบที่ 2 ทำให้ทราบถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงระหว่างอุณหภูมิกับเวลา โดยการอบในบรรยากาศปกติ อุณหภูมิขึ้นถึง 800 °c ในระยะเวลา 48 นาที ดังแสดงในตารางที่ 4.3

สำหรับชิ้นงานทดสอบ เมื่อนำมาทำการสำรวจพื้นผิวจะเห็นได้ว่าพื้นผิวบางส่วนเป็นสนิม ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 แสดงภาพถ่ายชิ้นทดสอบของการอบในบรรยากาศปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน

5.1 สรุปผล

เนื่องด้วยโครงการนี้เป็นการออกแบบ และสร้างเตาอบไฟฟ้าในบรรยากาศอากาศที่สามารถควบคุมได้ด้วยวงจรควบคุม ซึ่งสามารถให้ความร้อนสูงในเตาอบและได้ไม่เกิน 1,000 °c โดยได้ทำการทดสอบการทำงานของเตาอบในกาครอบในบรรยากาศอาร์กอนและการอบในบรรยากาศปกติ โครงการนี้ได้ทำการทดสอบถึงอุณหภูมิ 800 °c สำหรับอบในบรรยากาศปกติใช้เวลา 48 นาที และสำหรับอบในบรรยากาศอาร์กอนใช้เวลา 49 นาที เมื่อทำการทดสอบได้ตามที่กำหนดไว้ จึงนำชิ้นงานทดสอบมาชุบน้ำอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นนำชิ้นงานทดสอบมาเปรียบเทียบหาความแตกต่างสำหรับชิ้นงานทดสอบที่อบในบรรยากาศอาร์กอนนำมาสำรวจพื้นผิวจะเห็นได้ว่าผิวชิ้นงานไม่เป็นสนิม ส่วนชิ้นงานทดสอบที่อบในบรรยากาศปกติจะมีสนิมบางส่วน ทำให้ทราบได้ว่าในการควบคุมบรรยากาศในเตาอบโดยใช้ก๊าซอาร์กอนเข้าไปปกคลุมบรรยากาศนั้นมีผลต่อชิ้นงานทดสอบอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งจะเป็นผลดีต่อผิวของชิ้นงาน และในโครงสร้างของชิ้นงาน รวมทั้งยังช่วยลดกระบวนการในการอบชุบ

5.2 ข้อเสนอแนะในการทำโครงการ

1. ควรทำการติดตั้งระบบ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เป็นตัวควบคุมวงจรการทำงานของเตาอบ
2. ส่วนของโครงสร้างเตาอบควรทำฝาเปิด-ปิด ทางด้านล่าง เพื่อลดระยะเวลาในการนำชิ้นงานออกจากเตาตู้สารชุบ เพื่อป้องกันไม่ให้ชิ้นงานสัมผัสกับออกซิเจนโดยตรง

บรรณานุกรม

1. ผศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์, การถ่ายเทความร้อน ,ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2. รศ.มนัส สติรจินดา, วิศวกรรมการอบชุบ ,คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
3. รศ.ปรีดา พิมพ์ขาวำ, วัสดุทนไฟ ,ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
4. Assabsteel (Thailand) Ltd. ,Kanthal Handbook



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

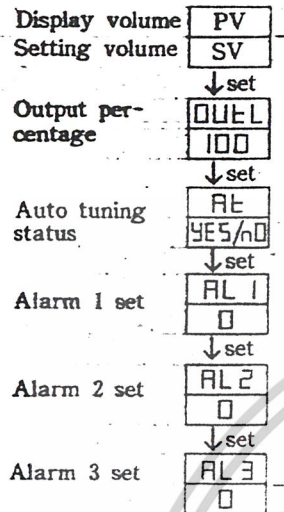


ภาคผนวก ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

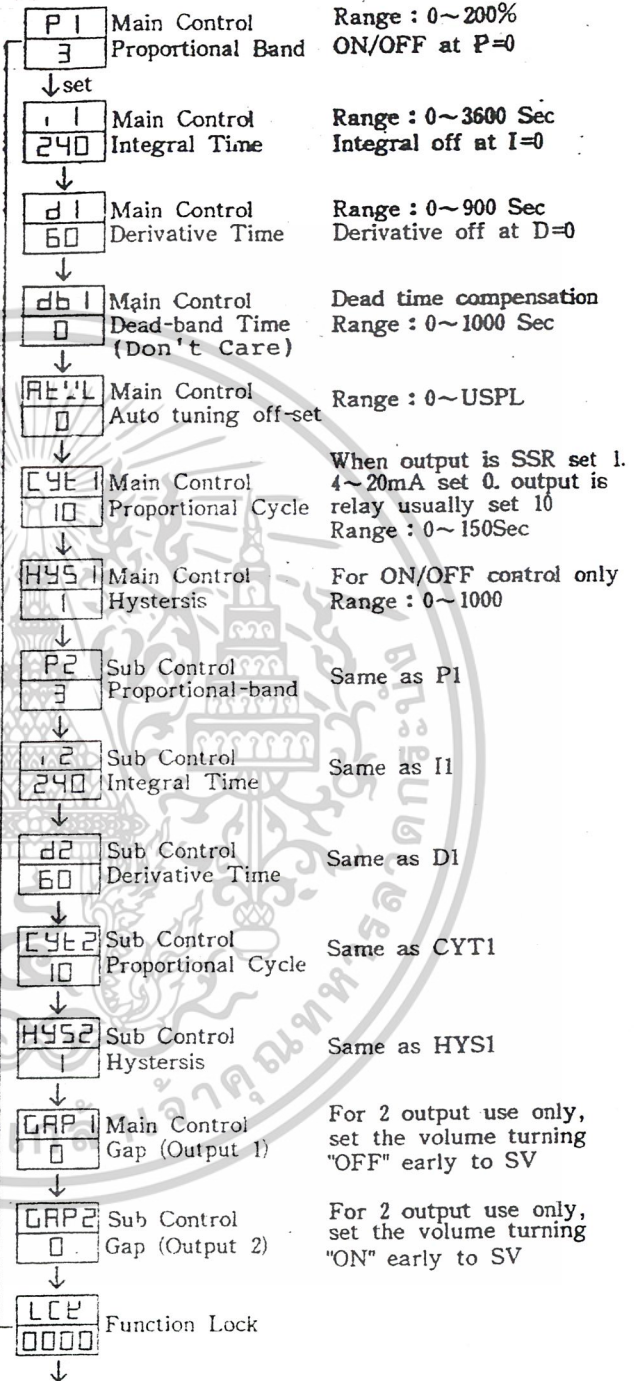
4. Operating flow

☆level 1



press Set key 5 sec.

☆level 2



- Press the SHIFT KEY < to change the parameters. If the SHIFT KEY is pressed, the first digit begins blinking. Press the UP KEY Δ OR DOWN KEY ∇ to increase or decrease the value of the digit, then press the SHIFT KEY again to go to the next digit. As all the digit were written, press SET KEY to enter the value.
- SET KEY also has the function of changing mode, if the SET KEY is pressed, the display shows the next mode.
- Press the SET KEY for 5 sec. the display goes to level 2. Return to level 1, do it also.
- If any key were not pressed for 1 min., the display would go to level 1.
- Press A/M KEY the display goes to level 1, no matter where it is.
- If OUTL set "0", the controller has no output.

(Over this level please contact our local distributor ◦)

LCK=0100, it can enter 1 & 2 and change their parameters.

LCK=0110, it can enter 1 & 2 and change level 1 parameters only.

LCK=0001, it can enter level 1 only and change SV only.

LCK=0101, it can't change any parameter except LCK.

P2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MICRO PROCESSOR TEMPERATURE CONTROLLER INSTRUCTION MANUAL

Before using please check whether range, input and output match your requirement

1. Front panel instruction

* DISPLAY

PV : process volume, red 4 digit

SV : setting volume, green 4 digit

* LED

OUT1 : output 1, green

AL1 : alarm 1, red

OUT2 : output 2, green

AL2 : alarm 2, red

AT : auto-tuning, yellow

MAN : manual, yellow

PRO : program, yellow

* KEY

SET : mode & set key

◁ : shift key

▽ : down key

△ : up key

A/M : auto/manual

2. Auto tuning

a. AT to be set YES, auto tuning performance ◦

b. After finishing auto tuning, PID parameter have been set automatically ◦

SV-ATVL=auto tuning volume, ex. SV=200°C ATVL=5, auto tuning is at 195°C ◦

c. ATVL=auto tuning offset, set volume will be deduced from SV, it can prevent over shoot during auto tuning ◦ (but in program type, ATVL=auto tuning volume)

d. Auto tuning failure

(1) ATVL to be set too big (if no sure, set ATVL=0)

(2) System time too long, in this case please set PID parameter individually ◦

3. Error information

Open	Open circuit of main control sensor.
* AdCF	A/D convertor failed.
* C JCE	Cold junction compensation failed.
Open	Open circuit of sub control sensor.
UUU1	PV exceeds USPL.
LLL1	PV under LSPL.
UUU2	Input signal of sub control exceeds the upper limit.
LLL2	Input signal of sub control under the lower limit.
* r RCF	RAM failed.
Open	Interface failed.
AUEF	Auto tuning failed.

NOTE : If the "*" marked error occurs, the Temperature Controller needs repair.
Please send it to the nearest sales office or retail dealer.

P1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ISOLITE INSULATING CERAMIC FIBER

© ISOVCO, a trademark owned by ISOLITE INSULATING PRODUCTS CO., LTD. of Japan

Product	Classification Temperature	Bulk density (lb/ft ³)	Thermal conductivity (Kcal/m ² h°C)	Thermal expansion (100°C/100°C)	Modulus of rupture (at 23°C)	Moisture absorption (%)	Standard size (mm)	Typical applications	Remarks
BULK									
▲ 1240 BULK	1240°C (2200°F)	40 - 200 (bulk density)	0.07 - 0.10	0.14 - 0.20	0.08 - 0.12	0.14 - 0.23	3kg corner / 15kg corner	Expansion joint filler	Core fibers of bulk
▲ 1400 BULK	1400°C (2500°F)	40 - 200 (bulk density)	0.07 - 0.10	0.14 - 0.20	0.08 - 0.12	0.14 - 0.23	3kg corner / 15kg corner	Medium for various applications	Core fibers of bulk
▲ 1600 BULK	1600°C (2900°F)	94 (9F), 128 (8F)	0.08	0.15	0.22	0.21	7200 x 600 x 6, 12.5, 23, 3600 x 600 x 5.0	Furnace linings	Core fibers of bulk
▲ 1240 BLANKET	1240°C (2200°F)	128 (8F), 140 (10F)	0.06	0.10	0.14	0.20	1200 x 600 x 6, 12.5, 23	Hot lead	Core fibers of bulk
▲ 1400 BLANKET	1400°C (2500°F)	128 (8F), 140 (10F)	0.07	0.12	0.18	0.23	7200 x 600 x 6, 12.5, 23	Furnace reduction	Core fibers of bulk
▲ 1600 BLANKET	1600°C (2900°F)	128 (8F), 140 (10F)	0.08	0.13	0.18	0.23	7200 x 600 x 6, 12.5, 23	Hot metal	Core fibers of bulk
▲ 1500 BLANKET	1500°C (2700°F)	128 (8F), 140 (10F)	0.09	0.13	0.18	0.23	3600 x 600 x 2.5	Furnace reduction	Core fibers of bulk
▲ 1600 BLANKET	1600°C (2900°F)	94 (9F), 128 (8F)	0.09	0.14	0.19	0.23	18m x 600 x 1.0 18m x 600 x 2.0	Hot metal	Core fibers of bulk
▲ 1240 PAPER	1240°C (2200°F)	315	0.3	0.11	0.15	0.20		Hot metal	Core fibers of bulk
PAPER									
▲ 1240 ACE PAPER	1240°C (2200°F)	140	0.06	0.09	0.12	0.17		Hot metal	Core fibers of bulk
▲ 1500 ACE PAPER	1500°C (2700°F)	140	0.08	0.12	0.16	0.19		Hot metal	Core fibers of bulk
▲ 1600 ACE PAPER	1600°C (2900°F)	250	0.07	0.11	0.17	0.20		Hot metal	Core fibers of bulk
▲ 1240 BOARD	1240°C (2200°F)	250	0.08	0.12	0.16	0.19	30m x 600 x 2.5 900 x 600 x 2.0	Hot metal	Core fibers of bulk
▲ 1400C BOARD	1400°C (2500°F)	250	0.10	0.14	0.20	0.23		Hot metal	Core fibers of bulk
▲ 1600A BOARD	1600°C (2900°F)	180	0.10	0.14	0.20	0.23		Hot metal	Core fibers of bulk
▲ 1600B BOARD	1600°C (2900°F)	200	0.10	0.14	0.20	0.23		Hot metal	Core fibers of bulk
▲ 1700A BOARD	1700°C (3100°F)	300	0.12	0.16	0.22	0.25		Hot metal	Core fibers of bulk
BOARD									
H BOARD	1600°C (2900°F)	1000	0.24	0.26	0.29	0.33	600 x 300 x 1.0, 1.5, 2.0, 2.5	Furnace hot lining	Core fibers of bulk
M1	1100°C (2000°F)	1000	0.24	0.26	0.29	0.33	600 x 300 x 1.0, 1.5, 2.0, 2.5	Hot metal	Core fibers of bulk
M2	1400°C (2500°F)	1000	0.26	0.29	0.33	0.37	600 x 300 x 1.0, 1.5, 2.0, 2.5	Hot metal	Core fibers of bulk
M3	1400°C (2500°F)	1800	0.49	0.52	0.55	0.63	600 x 300 x 1.0, 1.5, 2.0, 2.5	Hot metal	Core fibers of bulk
TEX-12									
YARN	1240°C (2200°F)	1000g/m ² (SI)	0.07	0.13	0.19	0.27	Ø2, Ø3	Furnace hot lining	Core fibers of bulk
CLOTH	1240°C (2200°F)	850g/m ² (SI)	0.07	0.13	0.19	0.27	30m x 1000 x 2.0 or 1.8 (Standard field)	Furnace hot lining	Core fibers of bulk
MAF	1240°C (2200°F)	310 (bulk density)	0.07	0.13	0.19	0.27	30m x 25, 50, 75, 100 x 2.0 or 1.8	Furnace hot lining	Core fibers of bulk
MAF	1240°C (2200°F)	310 (bulk density)	0.11	0.16	0.22	0.27	Diameter 6-30	Furnace hot lining	Core fibers of bulk
FELT									
▲ 1240 FELT	1240°C (2200°F)	140	0.07	0.13	0.19	0.27	600 x 300 x 3, 6, 12.5, 19, 23	Furnace hot lining	Core fibers of bulk
▲ 1400 FELT	1400°C (2500°F)	140	0.08	0.14	0.20	0.28	300 x 300 x 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0	Furnace hot lining	Core fibers of bulk
▲ 1600 FELT	1600°C (2900°F)	130	0.11	0.16	0.22	0.27	300 x 150 x 50, 75, 100	Furnace hot lining	Core fibers of bulk
▲ WET FELT	1240°C (2200°F)	350 (100°C Air-dry density)	0.07	0.13	0.19	0.27	300 x 300 x 1.50-3.00	Furnace hot lining	Core fibers of bulk
▲ 1240 UNWEFTED	1240°C (2200°F)	130	0.07	0.13	0.19	0.27		Furnace hot lining	Core fibers of bulk
▲ 1400 UNWEFTED	1400°C (2500°F)	140	0.08	0.14	0.20	0.28		Furnace hot lining	Core fibers of bulk
▲ 1500 UNWEFTED	1500°C (2700°F)	140	0.08	0.14	0.20	0.28		Furnace hot lining	Core fibers of bulk
▲ 1600 UNWEFTED	1600°C (2900°F)	130	0.12	0.18	0.24	0.29		Furnace hot lining	Core fibers of bulk
▲ 1240 UNWEFTED	1240°C (2200°F)	128 - 210	0.08	0.13	0.19	0.27		Furnace hot lining	Core fibers of bulk
▲ 1400 UNWEFTED	1400°C (2500°F)	128 - 210	0.09	0.14	0.20	0.28		Furnace hot lining	Core fibers of bulk
▲ 1500 UNWEFTED	1500°C (2700°F)	100 - 120	0.12	0.18	0.24	0.29		Furnace hot lining	Core fibers of bulk
▲ 1600 UNWEFTED	1600°C (2900°F)	100 - 120	0.12	0.18	0.24	0.29		Furnace hot lining	Core fibers of bulk
▲ 1240 SINTERED BLOCK	1240°C (2200°F)	178 - 210	0.08	0.13	0.19	0.27		Furnace hot lining	Core fibers of bulk
▲ 1400 SINTERED BLOCK	1400°C (2500°F)	178 - 210	0.08	0.13	0.19	0.27		Furnace hot lining	Core fibers of bulk
▲ 1500 SINTERED BLOCK	1500°C (2700°F)	130	0.09	0.14	0.20	0.28		Furnace hot lining	Core fibers of bulk
▲ 1600 SINTERED BLOCK	1600°C (2900°F)	130	0.09	0.14	0.20	0.28		Furnace hot lining	Core fibers of bulk
BLOCK									
▲ 1240 VHS	1240°C (2200°F)	250	0.06	0.08	0.12	0.16		Hot metal	Core fibers of bulk
▲ 1340 VHS	1340°C (2400°F)	250	0.07	0.09	0.14	0.19		Hot metal	Core fibers of bulk
▲ 1400 CVS	1400°C (2500°F)	250	0.07	0.09	0.14	0.19		Hot metal	Core fibers of bulk
▲ 1600 VHS	1600°C (2900°F)	180	0.07	0.09	0.14	0.19		Hot metal	Core fibers of bulk
SHAPES									

* Manufactured by ISOLITE CERAMIC FIBERS SDN. BHD.

* Specifications are subject to change without notice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าการผิดใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 ² m ⁻¹	1.45	1.45	1.39	1.35	1.09	1.18	1.11	1.04
at 68°F, Ω/cm ²	372	372	336	312	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		Slightly	
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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	KANTHAL A-1 and APM		KANTHAL AF		KANTHAL D		NIKROTHAL 80 and 70		NIKROTHAL 60		NIKROTHAL 40	
	°C	°F	°C	°F	°C	°F	°C	°F	°C	°F	°C	°F
Oxidizing:												
Air, dry	1400*	2550	1300	2370	1300	2370	1200***	2190	1150	2100	1100	2010
Air, moist	1200	2190	1200	2190	1200	2190	1150	2100	1100	2010	1050	1920
Neutral:												
N ₂ , Nitrogen**	1200	2190	1250	2280	1150	2100	1250	2280	1200	2190	1150	2100
Ar, Argon	1050	1920	1100	2010	1000	1830						
Exothermic: 10 CO, 15 H ₂ 5 CO ₂ , 70 N ₂	1400*	2550	1300	2370	1300	2370	1250	2280	1200	2190	1150	2100
Endothermic: 20 CO, 40 H ₂ 40 N ₂	1150	2100	1150	2100	1100	2010	1100***	2010	1100	2010	1100	2010
Reducing:												
Endothermic: 20 CO, 40 H ₂ 40 N ₂	1050	1920	1050	1920	1000	1830	1100**	2010	1100	2010	1100	2010
H ₂ , Hydrogen	1400*	2550	1300	2370	1300	2370	1250	2280	1200	2190	1150	2100
Cracked ammonia: 75 H ₂ , 25 N ₂							1250	2280	1200	2190	1150	2100
Vacuum: 10 ⁻³ torr	1150	2100	1200	2190	1100	2010	1000	1830	900	1650	900	1650

* Max 1425°C, 2600°F for APM

** The higher values apply for pre-oxidized material.

*** Please note risk of "green rot" formation in carburizing atmospheres. Use KANTHAL AF or NIKROTHAL 70.

**** 1250°C, 2280°F for NIKROTHAL 70.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KANTHAL A-1 and APM

Wire and strip. Standard stock items.

Resistivity $1.45 \Omega \text{ mm}^2 \text{ m}^{-1}$. 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	cm^2/Ω 20°C	Strip*) WxT mm	Resistance Ω/m 20°C	Weight g/m	cm^2/Ω 20°C
1.0	1.85	5.58	17.0	6.0x1.0	0.290	35.5	414
1.1*)	1.53	6.75	22.7	10.0x1.0	0.145	49.7	1520
1.2	1.28	8.03	29.4	15.0x1.0	0.0967	107	3310
1.3*)	1.09	9.43	37.4	20.0x1.0	0.0725	142	5790
1.4*)	0.942	10.9	46.7	12.0x1.2	0.101	102	2620
1.5	0.821	12.5	57.4	15.0x1.2	0.101	128	4020
1.6*)	0.721	14.3	69.7	10.0x1.5	0.097	107	2380
1.7	0.639	16.1	83.6	12.0x1.5	0.0806	128	3350
1.8	0.570	18.1	99.2	15.0x1.5	0.0644	160	5120
2.0	0.462	22.3	136	20.0x1.5	0.0483	213	6900
2.2	0.381	27.0	181	25.0x1.5	0.0387	268	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	538	26200
4.0	0.115	89.2	1090	30.0x3.0	0.0161	639	41000
4.25	0.102	101	1306				
4.5	0.0912	113	1550				
4.75	0.0818	126	1824				
5.0	0.0738	139	2127				
5.5	0.0610	169	2831				
6.0	0.0513	201	3676				
6.5	0.0437	236	4673				
7.0	0.0377	273	5840				
7.35	0.0340	300	5840				
8.0	0.0288	357	8690				
8.25	0.0271	380	9560				
9.5	0.0205	503	14600				
10.0	0.0185	558	17000				

*) only A-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KANTHAL AF

Wire and strip. Standard stock items.

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

°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 $\Omega/\text{m } 20^\circ\text{C}$	Weight g/m	cm^2/Ω 20°C	Strip*) WxT mm	Resistance $\Omega/\text{m } 20^\circ\text{C}$	Weight g/m	cm^2/Ω 20°C
1.0	1.77	5.62	17.8	10.0x1.0	0.139	715	1582
1.1	1.46	6.79	23.6	15.0x1.0	0.0927	107	3453
1.2	1.23	8.09	30.7	20.0x1.0	0.0695	143	6043
1.3	1.05	9.49	39.0	10.0x1.2	0.1158	86	1934
1.4	0.903	11.0	48.7	12.0x1.2	0.0965	103	2735
1.5	0.787	12.6	59.9	15.0x1.2	0.0772	129	4196
1.6	0.691	14.4	72.7	15.0x1.5	0.0618	161	5342
1.7	0.612	16.2	87.2	20.0x1.5	0.0463	215	9281
1.8	0.546	18.2	104	25.0x1.5	0.0371	268	14302
2.0	0.442	22.5	142	15.0x2.0	0.0463	215	7339
2.2	0.366	27.2	189	20.0x2.0	0.0346	286	12684
2.3	0.335	29.7	216	25.0x2.0	0.0275	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	0.0151	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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KANTHAL D

Wire and strip. Standard stock items.

Resistivity $1.35 \Omega \text{ mm}^2 \text{ m}^{-1}$. 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 $\Omega/\text{m } 20^\circ\text{C}$	Weight g/m	cm^2/Ω 20°C	Strip*) WxT mm	Resistance $\Omega/\text{m } 20^\circ\text{C}$	Weight g/m	cm^2/Ω 20°C
1.0	1.72	5.7	18.3	5.0x0.1	2.70	8.6	43
1.1	1.42	6.9	24.3	5.0x0.2	1.35	7.3	76
1.2	1.19	8.2	31.6	5.0x0.3	0.900	10.9	118
1.3	1.02	9.6	40.2	5.0x0.4	0.657	14.5	160
1.4	0.877	11.2	50.2	10.0x1.2	0.113	87	1990
1.5	0.764	12.8	61.7	12.0x1.2	0.0938	104	2320
1.6	0.671	14.6	74.9	15.0x1.2	0.0750	131	4320
1.7	0.595	16.5	89.8	15.0x1.5	0.0600	168	5500
1.8	0.531	18.4	107	20.0x1.5	0.0450	218	9560
2.0	0.430	22.8	146	15.0x2.0	0.0450	218	7560
2.5	0.275	35.6	286	20.0x2.0	0.0338	290	13000
2.8	0.219	44.6	401	25.0x2.0	0.0270	363	20000
3.0	0.191	51.2	493	20.0x2.5	0.0270	363	16700
3.25	0.163	60.1	627				
3.5	0.140	69.8	784				
3.75	0.122	80.1	964				
4.0	0.107	91.1	1170				
4.25	0.0952	103	1403				
4.5	0.0849	115	1666				
4.75	0.0762	128	1959				
5.0	0.0688	142	2285				
5.5	0.0568	172	3041				
6.0	0.0477	205	3948				
6.5	0.0407	241	5019				
7.35	0.0318	308	7257				
8.0	0.0269	364	9358				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NIKROTHAL 80

Wire and Strip. Standard stock items.

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

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

Wire dia mm	Resistance $\Omega/\text{m } 20^\circ\text{C}$	Weight g/m	cm^2/Ω 20°C	Strip*) WxT mm	Resistance $\Omega/\text{m } 20^\circ\text{C}$	Weight g/m	cm^2/Ω 20°C
1.0	1.39	6.52	22.6	15.0x1.0	0.0727	125	4404
1.2	0.964	9.39	39.1	20.0x1.0	0.0545	165	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	518	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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NIKROTHAL 70

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

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

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

Wire dia mm	Resistance 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	30.6	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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Terminals

Resistance and Weight Data

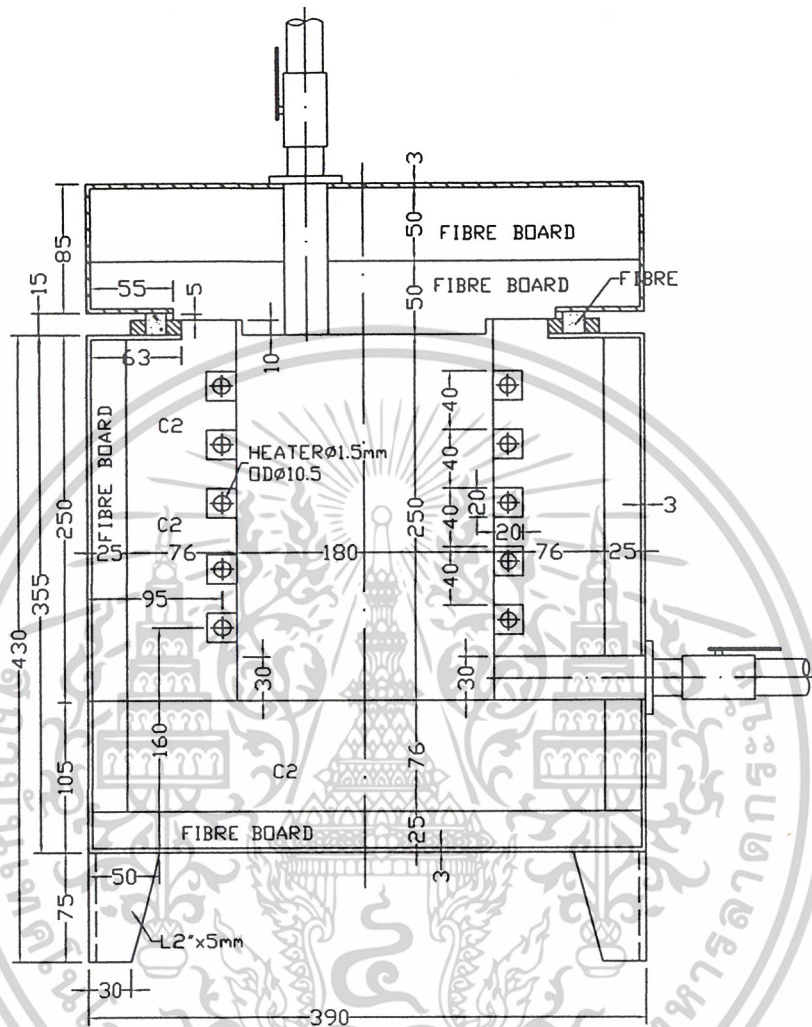
Material	Resistivity $\Omega \text{ mm}^2 \text{ m}^{-1}$	Density g/cm^3
KANTHAL APM	1.45	7.10
KANTHAL D	1.35	7.25
KANTHAL A-1	1.45	7.10
NIKROTHAL 80	1.09	8.30
NIKROTHAL 40	1.04	7.90

Material	Resistance Ω/m	Weight g/m
KANTHAL D		
8	0.0269	364
10	0.0172	569
12	0.0119	820
16	0.0067	1460
20	0.0043	2280
KANTHAL A-1 and APM		
8	0.0238	357
10	0.0185	558
12	0.0128	803
16	0.0072	1428
20 (APM only)	0.0046	2231
30 (A-1 only)	0.0021	5019
40 (APM only)	0.0012	8922
NIKROTHAL 80		
8	0.0217	417
10	0.0172	652
12	0.0119	939
16	0.0067	1670
20	0.0043	2610
NIKROTHAL 40		
8	0.0207	397
10	0.0132	620
12	0.0092	893
20	0.0033	2482
30	0.0015	5584

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

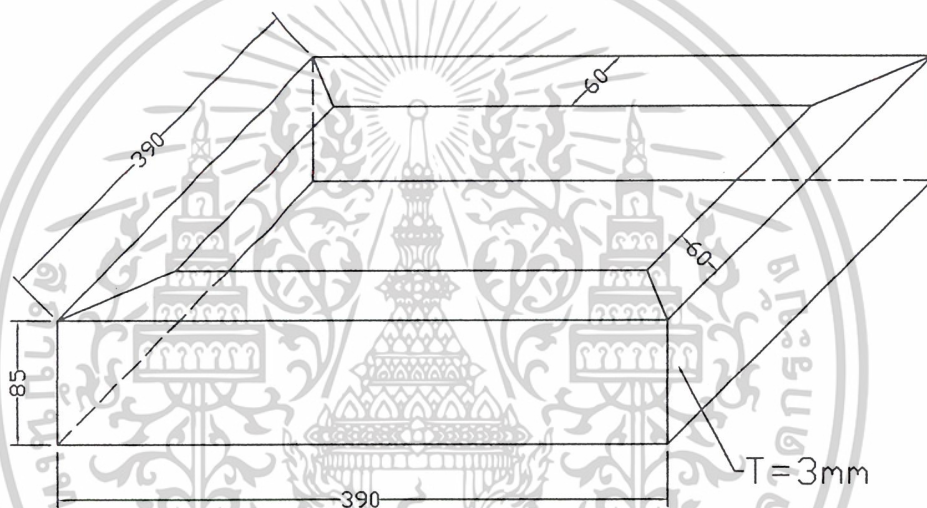


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



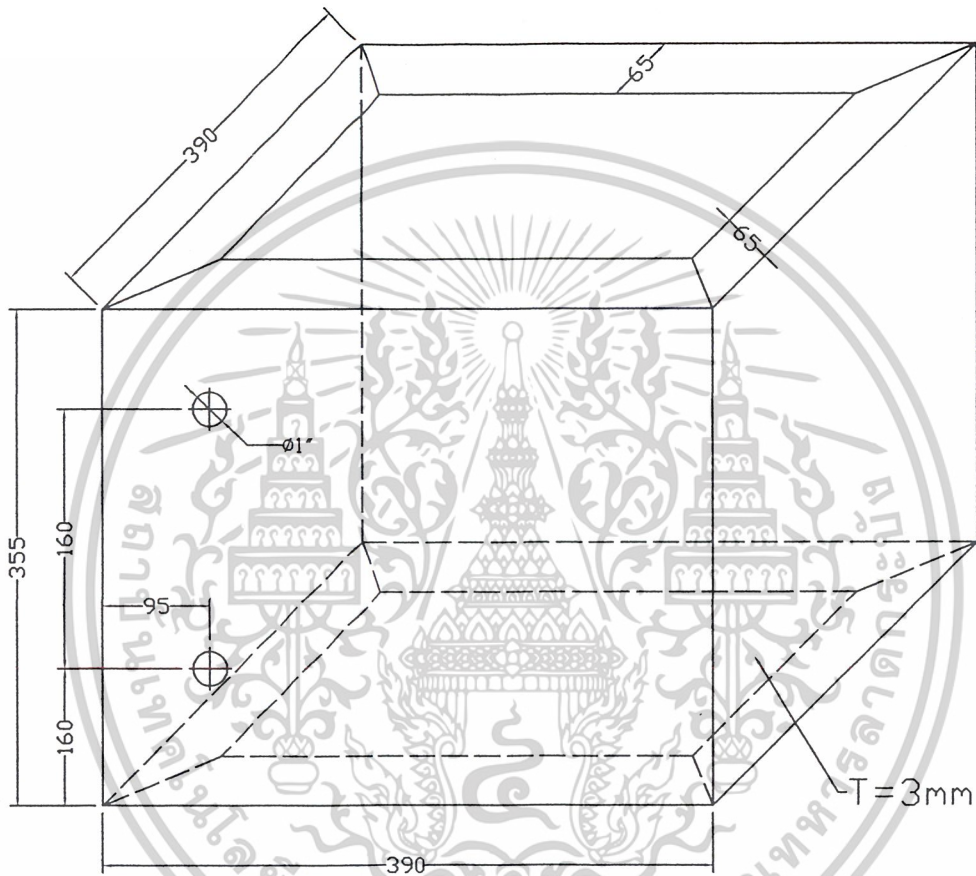
Design	Manon Sentiyanont	
Draw	Isara Chaisard	
Scale	Size (mm)	KMITL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



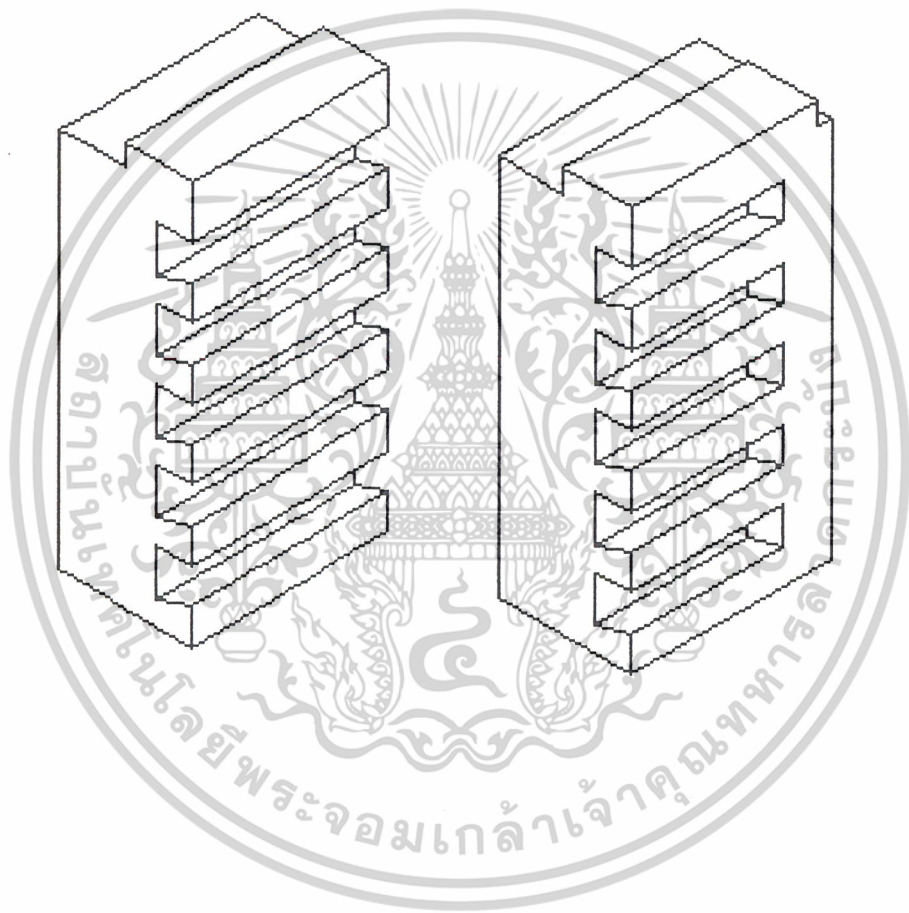
Design	Manon Sentiyanont	
Draw	Isara Chaisard	
Scale	Size (mm)	KMITL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



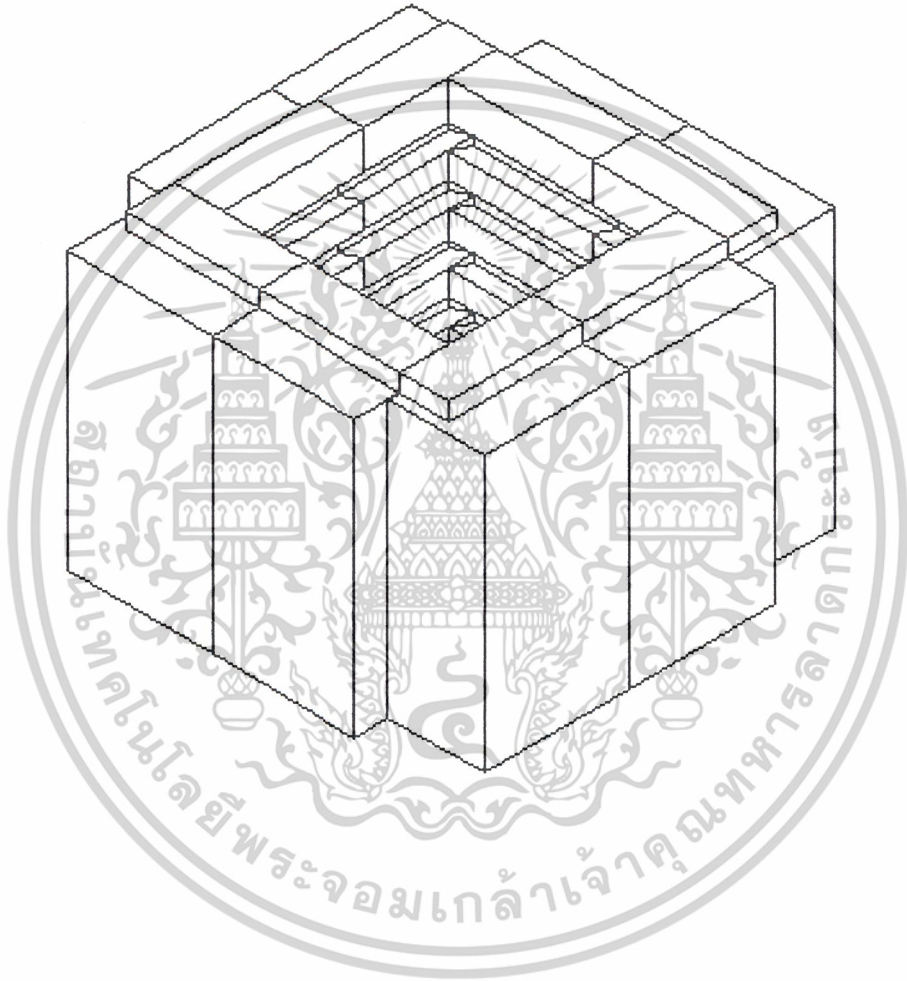
Design	Manon Sentiyantont	
Draw	Isara Chaisard	
Scale	Size (mm)	KMITL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Design	Manon Sentyanont	
Draw	Isara Chaisard	
Scale	Size (mm)	KMITL

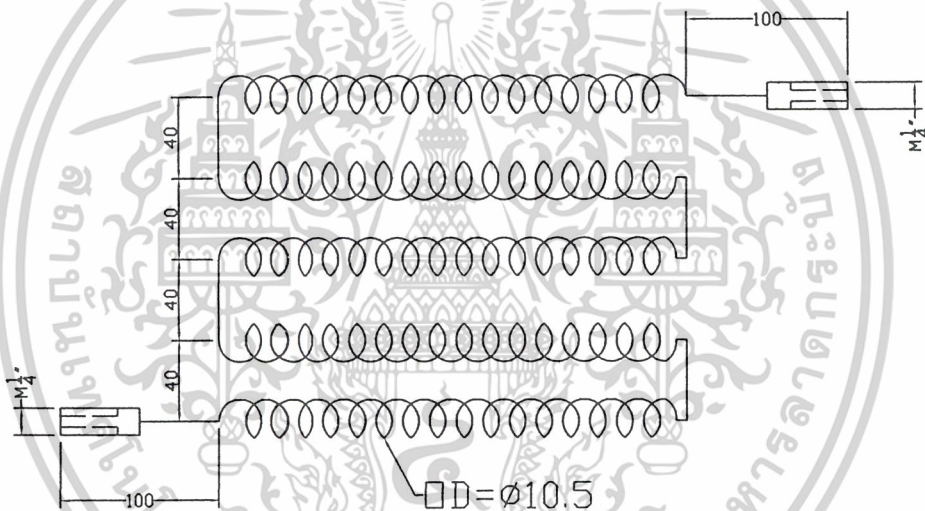
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Design	Manon Sentiyanont	
Draw	Isara Chaisard	
Scale	Size (mm)	KMITL

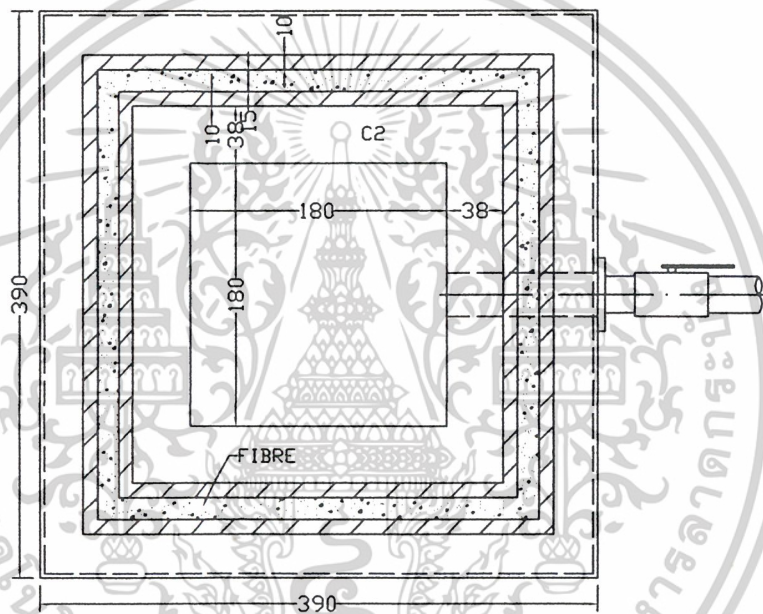
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HEATER $\phi 1.5\text{mm}$
 $L=23.2\text{m}/\phi$
 $\square\text{D}=\phi 10.5\text{mm}$



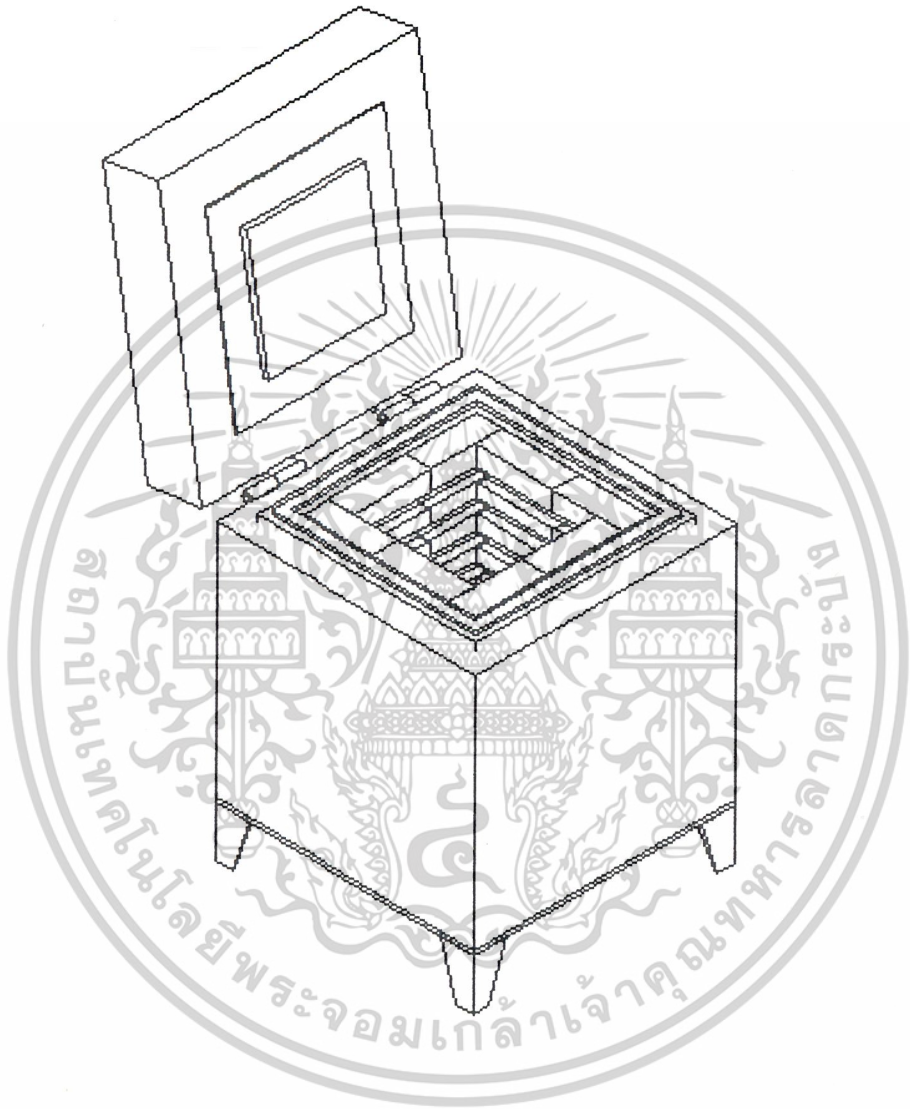
Design	Manon Sentiyantont	
Draw	Isara Chaisard	
Scale	Size (mm)	KMITL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Design	Manon Sentiyantont	
Draw	Isara Chaisard	
Scale	Size (mm)	KMITL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Design	Manon Sentiyantont	
Draw	Isara Chaisard	
Scale	Size (mm)	KMITL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนนจตุรทิศ แขวงลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

เรียน

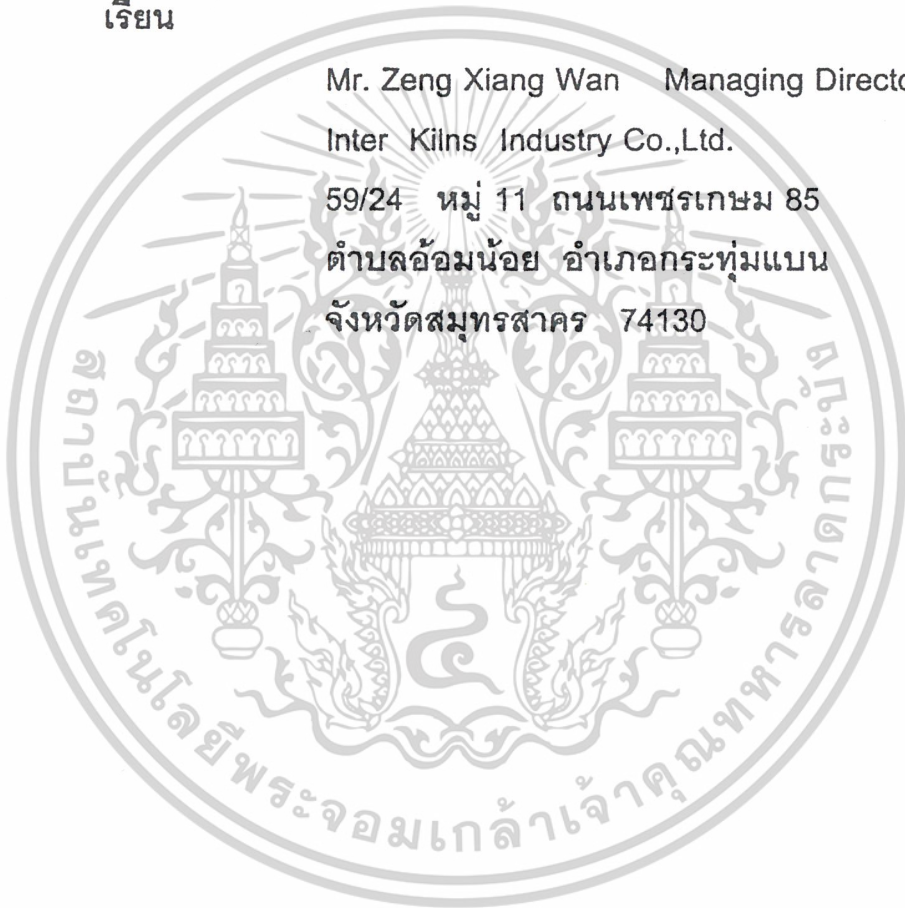
Mr. Zeng Xiang Wan Managing Director

Inter Kilns Industry Co.,Ltd.

59/24 หมู่ 11 ถนนเพชรเกษม 85

ตำบลอ้อมน้อย อำเภอกระทุ่มแบน

จังหวัดสมุทรสาคร 74130



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ที่ ทม.1502.17/50

โครงการภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง
กรุงเทพฯ 10520

8 เมษายน 2546

เรื่อง ขอบขออนุญาตที่ท่านได้อนุเคราะห์วัสดุอุปกรณ์เครื่องมือและสถานที่ในการสร้างเตาอบในบรรยากาศอาร์กอน

เรียน Mr. Zeng Xiang Wan Managing Director Inter Kilns Industry Co., Ltd.

ตามที่ นายอิสระ ไซสอาด และนายมานนท์ เชนติยะนนท์ นักศึกษาภาควิชาวิศวกรรม
อุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้รับความอนุเคราะห์
จากท่านที่ใช้วัสดุอุปกรณ์ เครื่องมือ และสถานที่ ในการสร้างเตาอบในบรรยากาศอาร์กอน จนเสร็จสมบูรณ์ตาม
เป้าหมาย

จึงเรียนมาเพื่อขอบพระคุณในความอนุเคราะห์ของท่าน ที่ทำให้ปริญญานิพนธ์เป็นผลสำเร็จ

ขอแสดงความนับถือ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สรรพสิทธิ์ ถิ่นนรินทร์)

รักษาการหัวหน้าโครงการภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

อิสระ ไซสอาด

(นายอิสระ ไซสอาด)

นักศึกษาโครงการภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

มานนท์ เชนติยะนนท์

(นายมานนท์ เชนติยะนนท์)

นักศึกษาโครงการภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

โทร. 0-2739-0653 แฟกซ์ 0-2739-2392

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้