

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การพัฒนาเตาอุณหภูมิสูงแบบปรับบรรยากาศได้
สำหรับการเผาพลอย

Development of High Temperature Furnace with
Variable Atmosphere for Gemstone Heat Treatment

คณะผู้วิจัย

นายพิเชษฐ	ถัมสุวรรณ
นายมงคล	ราชนิยม
นายวิยะพล	พัฒนะเศรษฐกุล
นายสถาพร	จันทน์หอม

สิงหาคม 2543

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การพัฒนาเตาอุณหภูมิสูงแบบปรับบรรยากาศได้
สำหรับการเผาพลอย

Development of High Temperature Furnace with
Variable Atmosphere for Gemstone Heat Treatment

คณะผู้วิจัย

นายพิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ
นายมงคล ราชนิคม
นายวิยะพล พัฒนเศรษฐกุล
นายสถาพร จันทน์หอม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ชุดโครงการอัญมณีและเครื่องประดับ

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยและพัฒนานี้ได้ออกแบบและสร้างเตาไฟฟ้า 1800 °C แบบใส่เบ้าเผาพลอยจากคอนกรีตและปรับบรรยากาศภายในเบ้าเผาเผาพลอยได้ รวมทั้งเตาแก๊สที่ทำงานด้วยระบบอัตโนมัติและควบคุมปริมาณแก๊สออกซิเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เบ้าเผาพลอยได้ โดยเตาทั้งสองแบบนี้มีจุดประสงค์เพื่อใช้ในการเผาพลอยทับทิมและพลอยแซปไฟร์ สำหรับเตาไฟฟ้าที่สร้างเป็นแบบใส่เบ้าเผาพลอยจากคอนกรีต เพื่อให้สามารถเอาพลอยออกจากเบ้าเผาที่อุณหภูมิสูงได้ โดยเบ้าเผาและลดความร้อนไม่ชำรุดเสียหาย นอกจากนั้นภายในเบ้าเผายังมีเบ้าอะลูมินาครอบเบ้าเผาพลอย สำหรับปรับบรรยากาศที่เบ้าเผาพลอยให้เป็นออกซิเคชั่นหรือรีดักชั่นได้ตามชนิดของแก๊สที่ใส่เข้าไป ส่วนเตาแก๊สได้ออกแบบให้สามารถควบคุมบรรยากาศภายในเบ้าเผาหรือปริมาณแก๊สออกซิเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ได้

Abstract

A bottom loading 1800 °C electric furnace with variable atmosphere and a 1800 °C gas furnace with fully automatic control of O₂ and CO for the heat treatment of ruby and sapphire have been designed and constructed. The bottom loading electric furnace is designed for rapid cooling of gemstones without the damage of heating elements and heating chamber. A high-purity alumina crucible is used as a cover of gemstones crucible to control the atmosphere of gemstones during the heat treatment. The electric furnace can operate under the oxidation or reduction conditions by purging suitable gasses.

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยโครงการนี้ ทำให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีสูงแบบปรับบรรยากาศได้ ขึ้นเป็นครั้งแรกในประเทศ ขอขอบคุณศาสตราจารย์ ดร.ปิยะวัติ บุญ-หลง อดีตผู้อำนวยการฝ่าย 2 สกว. ที่เป็นผู้ริเริ่มจนเกิดชุดโครงการพัฒนาอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ และ สุดท้ายนี้ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ทวีป ศิริรัศมิ์ ผู้ประสานงานชุดโครงการนี้ ที่ช่วยเหลือประสานงานตั้งแต่ข้อเสนอโครงการจนกระทั่งการดำเนินงานวิจัยเสร็จเรียบร้อย

คณะผู้วิจัย

สิงหาคม 2543

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 เตาอุณหภูมิสูงประเภทต่างๆ	1
1.1.1 เตาไฟฟ้าแบบลวดความต้านทาน (Resistance-heated Furnace)	1
1.1.2 เตาไฟฟ้าที่ใช้แท่งซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon Carbide Muffle Furnace)	1
1.1.3 เตาไฟฟ้าที่ใช้ลวดโมลิบดีนัมไดซิลิไซด์ (Molybdenum Disilicide Box-Furnace)	2
1.1.4 เตาไฟฟ้าที่ใช้ท่อกราไฟต์ (Graphite-tube Furnace)	3
1.1.5 เตาแก๊ส (Gaseous Fuel Furnace)	4
1.1.6 เตาเหนี่ยวนำด้วยความถี่สูง (Induction Furnace)	5
1.2 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	6
1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ	8
1.4 ขอบเขตและขั้นตอนของการวิจัย	9
1.5 ผลประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	9
1.5.1 ผลกระทบทางเศรษฐศาสตร์	10
1.5.2 ผลกระทบต่อสังคม	10
1.5.3 ผลกระทบต่อการจ้างแรงงาน	11
1.5.4 ผลกระทบต่อการพัฒนาชนบท	11
บทที่ 2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเตาอุณหภูมิสูง	12
2.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเตาไฟฟ้า	12
2.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเตาแก๊ส	23
บทที่ 3 การคำนวณและการออกแบบ	26
3.1 การคำนวณและการออกแบบเตาไฟฟ้า	26
3.2 การออกแบบเตาแก๊ส	37
บทที่ 4 การสร้างและการทดสอบเตา	41
4.1 การสร้างเตาไฟฟ้า	41
4.2 การทดสอบการทำงานของเตาไฟฟ้า	44
4.3 การสร้างเตาแก๊ส	45

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 ขั้นตอนการทดสอบการทำงานของเตาแก๊ส	50
บทที่ 5 ผลการทดลองและอภิปราย	55
5.1 ผลการทดลองการทำงานของเตาไฟฟ้า	55
5.2 ผลการทดลองการทำงานของเตาแก๊ส	58
บทที่ 6 สรุป	62
เอกสารอ้างอิง	64
ภาคผนวก ก.	65
ภาคผนวก ข.	66
ภาคผนวก ค.	70
ภาคผนวก ง.	74

สารบัญรูป

หน้า

บทที่ 1 บทนำ

รูปที่ 1.1	ลักษณะของเตาไฟฟ้าที่ใช้แท่งซิลิกอนคาร์ไบด์เป็นตัวให้ความร้อน	2
รูปที่ 1.2	ลักษณะของเตาไฟฟ้าที่ใช้ลวดโมลิบดีนัมไดซิลิไซด์เป็นตัวให้ความร้อน	3
รูปที่ 1.3	ลักษณะของเตาไฟฟ้าที่ใช้ท่อกราไฟต์เป็นตัวให้ความร้อน	4
รูปที่ 1.4	ลักษณะของเตาแก๊ส	5

บทที่ 2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเตาอุณหภูมิสูง

รูปที่ 2.1	ส่วนต่างๆ ของลวดความร้อน Kanthal	13
รูปที่ 2.2	แสดง contact strap	16
รูปที่ 2.3	แสดง element holder	16
รูปที่ 2.4	แสดง passage brick	17
รูปที่ 2.5	แสดงแผ่นฉนวนกันความร้อน	18
รูปที่ 2.6	แสดงรูปแบบของการควบคุมอุณหภูมิ	19
รูปที่ 2.7	วิธีการต่อขั้วของเทอร์โมคัปเปิล	22

บทที่ 3 การคำนวณและการออกแบบ

รูปที่ 3.1	ภาพตัดขวางของเตาไฟฟ้า	26
รูปที่ 3.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเตากับค่า Surface load ของลวด Kanthal ชนิดต่างๆ และขนาดต่างๆ ที่ค่ากระแสต่างๆ กัน	30
รูปที่ 3.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเตากับค่าความต้านทานต่อหนึ่งหน่วยความยาวของลวด Kanthal ชนิดต่างๆ และขนาดต่างๆ	30
รูปที่ 3.4	ภาพตัดขวางของเตาไฟฟ้าแบบเปิด-ปิด ทางคอนล่าง	36
รูปที่ 3.5	ไดอะแกรมแสดงระบบของเตาแก๊ส	38
รูปที่ 3.6	ภาพตัดขวางของระบบเตาแก๊ส	39
รูปที่ 3.7	ไดอะแกรมของระบบแก๊ส	40

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 การสร้างและการทดสอบเตา

รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายของโมเดลจำลองของเตาไฟฟ้าที่สร้างโดยใช้โฟม โฟมสีแดงจะเป็นส่วนที่เลื่อนขึ้น – ลง จากตอนล่าง	42
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายของโมเดลจำลองของเตาไฟฟ้า พร้อมระบบขับเคลื่อนและโครงยึดเตา	42
รูปที่ 4.3 โค้ดอะแกรมแสดงหลักการควบคุมการทำงานของเตาไฟฟ้า	43
รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายของเตาไฟฟ้าแบบเปิด-ปิดตอนล่างที่สร้างเสร็จสมบูรณ์แล้ว	43
รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายของเตาไฟฟ้าแบบเปิด-ปิดตอนล่าง ที่สร้างและติดตั้งใช้งานแล้ว ที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	44
รูปที่ 4.6 แสดงชั้นต่างๆ ของผนังเตาซึ่งอยู่ระหว่างการสร้าง	47
รูปที่ 4.7 แสดงโครงสร้างเตาและระบบขับเคลื่อน	47
รูปที่ 4.8 แสดงการติดตั้งหัวพันไฟและระบบวาล์ว	48
รูปที่ 4.9 ผู้ควบคุมการทำงานของระบบเตาแก๊ส	48
รูปที่ 4.10 ระบบแก๊ส LPG และแก๊ส O ₂	49
รูปที่ 4.11 ระบบเตาแก๊สที่สร้างเสร็จสมบูรณ์ แสดงให้เห็นหัวพันไฟ และระบบวาล์ว เพียง 1 ชุด	49
รูปที่ 4.12 โค้ดอะแกรมของผู้ควบคุมการทำงานของเตาแก๊ส	50

บทที่ 5 ผลการทดลองและอภิปราย

รูปที่ 5.1 ตัวอย่างการตั้งโปรแกรมควบคุมอุณหภูมิของเตาไฟฟ้าในการเผาพลอย	55
รูปที่ 5.2 โปรแกรมการเพิ่มอุณหภูมิและลดอุณหภูมิของเตาด้วยอัตราที่คงที่	57
รูปที่ 5.3 ตัวอย่างการตั้งโปรแกรมควบคุมอุณหภูมิของเตาแก๊สในการเผาพลอย	58
รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับอุณหภูมิของเตาแก๊ส	61

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ขนาดมาตรฐานของลวดความร้อน Kanthal	13
ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติของแผ่นฉนวน SALI-2	18
ตารางที่ 2.3 การแบ่งประเภทของเทอร์โมคัปเปิ้ลตามมาตรฐาน ANSI	20
ตารางที่ 2.4 ลักษณะสภาพของการใช้งานและข้อจำกัดของเทอร์โมคัปเปิ้ล	21
ตารางที่ 3.1 ค่าความต้านทานต่อหนึ่งหน่วยความยาวของลวด Kanthal Super ST, N และ Super 33	31
ตารางที่ 5.1 ข้อมูลการทำงานของเตาแก๊ส	60

บทที่ 1

บทนำ

1.1 เตาอุณหภูมิสูงประเภทต่าง ๆ [1-3]

เตาความร้อน ที่ใช้ความร้อนในการหลอมโลหะ หรือการเผาผลาย ในอดีตจะใช้เชื้อเพลิงจำพวก ถ่านหิน ไม้ฟืน เป็นแหล่งให้ความร้อนกับการหลอมหรือเผา ซึ่งทำให้ต้องใช้เชื้อเพลิงในปริมาณมาก เนื่องจากยังไม่รู้จักการนำเอาฉนวนกันความร้อนเข้ามาใช้ และต้องการจากทรัพยากรธรรมชาติ มีผลทำให้เกิดมลภาวะต่อสภาพแวดล้อมขึ้นด้วย และเตาความร้อนนี้ยังให้ความร้อนที่ไม่คงที่ อีกทั้งยังมีขนาดของเตาที่ใหญ่มาก ซึ่งต่อมาได้มีการนำหลอดความร้อน (heater) มาเป็นแหล่งให้ความร้อนแทนแหล่งเชื้อเพลิง โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่หลอดความร้อน ซึ่งทำให้หลอดความร้อนผลิตความร้อนออกมาให้แก่เตาความร้อน และยังไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถทำให้เตามีขนาดเล็กได้ง่าย จึงมีความสะดวกในการเคลื่อนย้าย

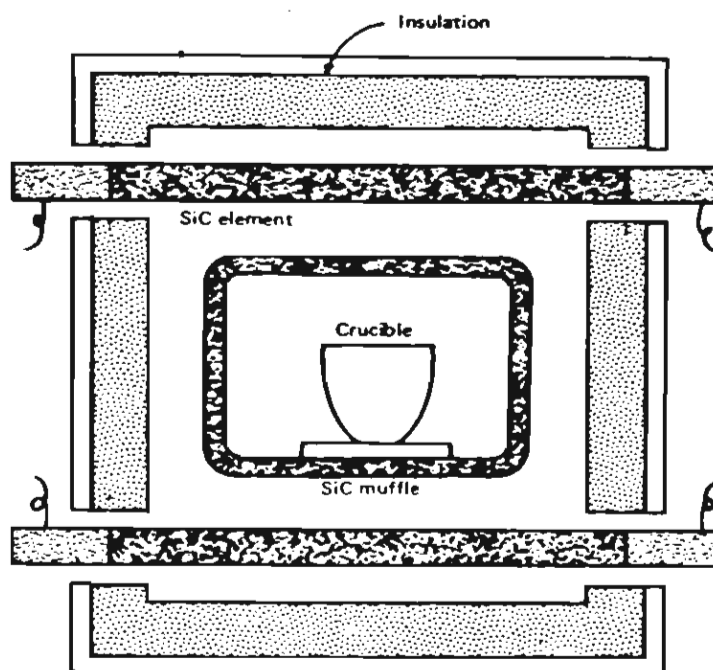
ปัจจุบันเตาอุณหภูมิสูงที่นิยมใช้มีหลายประเภท เช่น เตาไฟฟ้าแบบหลอดความร้อนต้านทาน (Resistance-heat Furnace), เตาไฟฟ้าที่ใช้แท่งซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon Carbide Muffle Furnace), เตาไฟฟ้าที่ใช้หลอดความร้อนโมลิบดีนัมไดซิลิไซด์ (Molybdenum Disilicide Box-Furnace), เตาไฟฟ้าที่ใช้ท่อกราไฟต์ (Graphite-tube Furnace) และเตาแก๊ส (Gaseous Fuel Furnace)

1. เตาไฟฟ้าแบบหลอดความร้อนต้านทาน (Resistance-heated Furnace)

เป็นเตาที่รู้จักกันดีและใช้กันอย่างกว้างขวางมากที่สุด เตาอุณหภูมิสูงชนิดนี้จะใช้หลอดความร้อน (heater) ที่มีความต้านทานสูงเป็นแหล่งให้ความร้อน โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่หลอดความร้อน และหลอดความร้อนนั้นจะให้ความร้อนออกมา โดยที่ค่าความต้านทานของหลอดความร้อนแต่ละชนิดจะเป็นตัวกำหนดอุณหภูมิสูงสุด ที่หลอดความร้อนจะให้ได้ ซึ่งลักษณะของเตาแบบนี้จะเป็นเตาที่ปิดหมด ไม่มีควันเกิดขึ้น และสามารถให้ความร้อนได้อย่างคงที่ สม่าเสมอ และต่อเนื่อง

2. เตาไฟฟ้าที่ใช้แท่งซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon Carbide Muffle Furnace)

เตาประเภทนี้จะใช้หลอดความร้อนที่ทำด้วยแท่งซิลิกอนคาร์ไบด์ โดยจะให้อุณหภูมิได้ประมาณ 1500 °C ลักษณะการใช้งานในช่วงแรกๆ ของระบบนี้ ต้องจ่ายความต่างศักย์ต่ำๆ ก่อน ทั้งนี้เพื่อเตรียมหลอด เมื่อหลอดมีอุณหภูมิสูงขึ้นความต้านทานไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม คือ มีความต้านทานลดลงเล็กน้อย ดังนั้นในการจ่ายกำลังไฟฟ้าควรคำนึงถึงคุณสมบัตินี้ด้วย เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายแก่หลอด



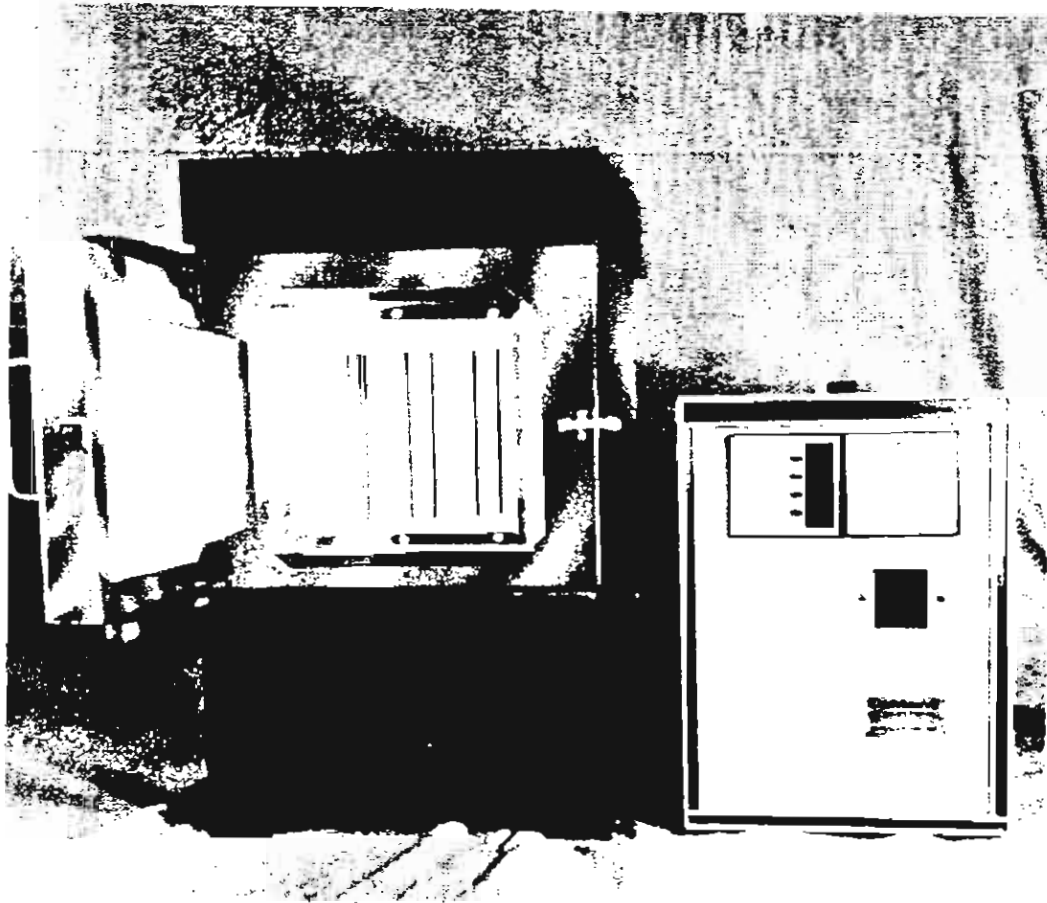
รูปที่ 1.1 ลักษณะของเตาไฟฟ้าที่ใช้แท่งซิลิกอนคาร์ไบด์เป็นตัวให้ความร้อน

ลักษณะโครงสร้างของเตาจะมีลักษณะเป็นกล่อง ภายในจะเป็นช่องว่างสำหรับวางวัสดุชิ้นงานในการทดลอง และมีช่องเปิดด้านหน้าเพื่อเป็นช่องทางในการบรรจุ ส่วนด้านท้ายจะมีช่องว่างเล็กน้อย เพื่อสอคเทอร์โมคัปเปิ้ล เพื่อทำการวัดอุณหภูมิ ถ้าลดความร้อนแต่ละชุดเกิดความเสียหายจะต้องทำการจัดเปลี่ยนใหม่ทั้งชุด ทั้งนี้ เนื่องจากว่าคุณสมบัติของขดลวดใหม่ที่เปลี่ยนเข้าไปแทนที่ไม่สามารถผลิตความร้อนได้ในอัตราเดียวกับขดลวดชุดเก่า สำหรับตัวเชื่อมระหว่างขั้วของลวดจะใช้แถบอะลูมิเนียมเชื่อมต่อขดลวดโดยตรง เตาความร้อนนี้จะให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิต่อเวลาได้สูงในเวลาสั้นๆ ซึ่งหมายถึงอัตราการได้ขึ้นของอุณหภูมิ (heat-up rate) เร็วมาก

3. เตาไฟฟ้าที่ใช้ลวดโมลิบดีนัมไดซิลิไซด์ (Molybdenum Disilicide Box-Furnace)

เตาชนิดนี้ใช้ขดลวดความร้อนที่มีส่วนประกอบเป็นเซรามิก คือ Molybdenum Disilicide ซึ่งผลิตโดยบริษัท KANTHAL ประเทศสวีเดน สำหรับรุ่น KANTHAL SUPER สามารถให้อุณหภูมิถึง 1900°C และมีความสะดวกในการใช้งานอย่างมาก ลักษณะโครงสร้างของลวดจะเป็นรูปตัวยู (U Shape) เป็นส่วนใหญ่ การติดตั้งขดลวดจะติดตั้งจากด้านบน โดยวางตามยาวในลักษณะแนวดิ่ง คุณสมบัติที่พิเศษของขดลวดชนิดนี้คือ มีความสามารถในการเพิ่มอุณหภูมิได้ในเวลาที่รวดเร็ว นั่นคือมีการได้ขึ้นของอุณหภูมิได้เร็วมาก ซึ่งสามารถให้อุณหภูมิ 1200°C ได้ภายใน 1 ชั่วโมง นอกจากนี้ การเปลี่ยนขดลวดยังสามารถทำการเปลี่ยนใหม่ได้ในแต่ละเส้น

และการเชื่อมต่อระหว่างเส้น จะใช้แถบลวดเงินเชื่อมต่อระหว่างขั้วของเส้นลวด เช่นเดียวกับเส้น
ลวดชนิด Silicon Carbide



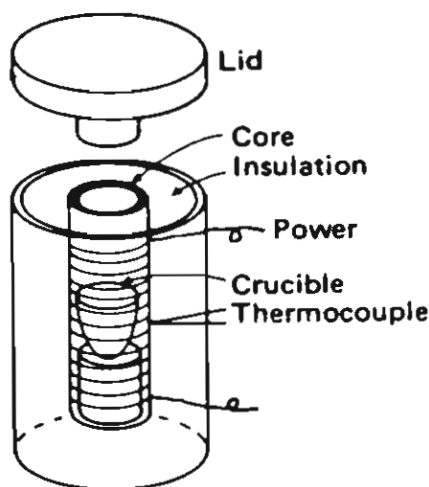
รูปที่ 1.2 ลักษณะของเตาไฟฟ้าที่ใช้ลวดโมลิบดีนัมไดซิลิไซด์เป็นตัวให้ความร้อน

4. เตาไฟฟ้าที่ใช้ท่อกราไฟต์ (Graphite-tube Furnace)

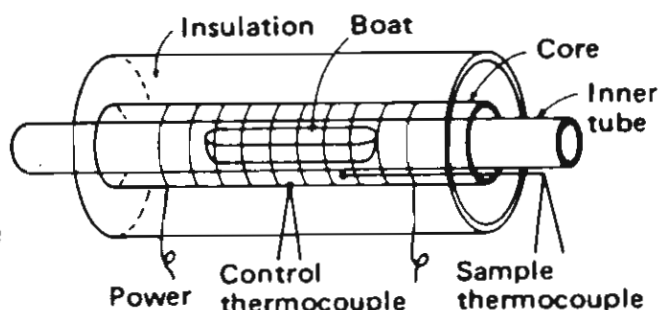
โครงสร้างของเตาจะมีตัวให้ความร้อน (heating element) เป็นสารคาร์บอน ที่อยู่ใน
รูป กราไฟต์ มีลักษณะเป็นท่อหรือทรงกระบอกกลวง ซึ่งจะมีช่องว่างกลวงอยู่ภายใน สำหรับวาง
ภาชนะทดลอง การจ่ายกำลังไฟฟ้าจะต้องป้อนความต่างศักย์ที่ปลายแต่ละด้านของท่อทรง
กระบอก ซึ่งเตาชนิดนี้สามารถให้อุณหภูมิถึง 3000°C รูปที่ 1.3 เป็นโคอะแกรมของเตา
ไฟฟ้าที่ใช้ท่อ กราไฟต์ เพียงแค่ลวดที่เห็นในรูปจะแทนด้วยท่อกราไฟต์ เนื่องจากตัวผลิตความ
ร้อนของเตาเป็นสารคาร์บอน ดังนั้นขณะที่เตากำลังทำงานอยู่ จะเกิดแก๊สไฮโดรคาร์บอน เนื่อง
จากการรวมตัวของแก๊สไฮโดรคาร์บอนกับสารคาร์บอน และอาจเกิดแก๊สไซยาโนเจนจากแก๊ส
ไนโตรเจนที่อยู่รอบๆ เตาได้ ดังนั้นการใช้งานของเตาชนิดนี้จึงต้องมีการระบายอากาศบริเวณรอบ
เตาที่ดี เพื่อป้องกันการเกิดแก๊สต่างๆ สำหรับภาชนะที่ใช้ทดลอง จะทำจากสารอลูมินาที่มีความ

บริสุทธิ์สูง ซึ่งเป็นสารทน ความร้อนได้ถึง 1900°C ซึ่งถ้าในกรณีที่ต้องการใช้งานสูงกว่านี้ ภาชนะทดลอง (crucible) จะทำจากสาร Stabilized Zirconia ซึ่งสามารถทนอุณหภูมิได้มากกว่า 2000°C

ส่วนในกรณีที่ท่อทรงกระบอกกลวงเกิดรอยแตกร้าวขณะที่เตาทำงานอยู่ จะมีผลทำให้ แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนที่บริเวณรอบๆ เตา รั่วไหลเข้าสู่ภายในเตา เกิดการรวมตัวใน สภาวะอุณหภูมิสูง เป็นผลให้เกิดการระเบิดขึ้นได้ ดังนั้นในการใช้งานของเตาชนิดนี้จึงควร ระมัดระวังเรื่องการเพิ่มหรือการลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาสั้นๆ ทั้งนี้เพื่อป้องกันการแตก ร้าวของท่อทรงกระบอก



(ก) เตาในแนวดิ่ง



(ข) เตาในแนวนอน

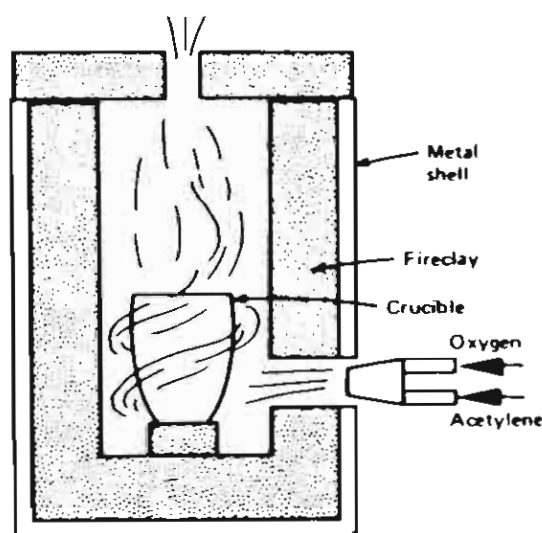
รูปที่ 1.3 ลักษณะของเตาไฟฟ้าที่ใช้ทอกราไฟต์เป็นตัวให้ความร้อน

5. เตาแก๊ส (Gaseous Fuel Furnace)

เตาชนิดนี้จะใช้เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ในการผลิตความร้อน เช่น propane, acetylene, hydrogen เป็นต้น ปริมาณความร้อนหรืออุณหภูมิที่สามารถผลิตขึ้นได้ จะขึ้นกับชนิดของแก๊ส โดยตรง ตัวอย่างเช่น ใช้ acetylene ผสมกับ O_2 เป็นเชื้อเพลิง จะสามารถให้อุณหภูมิสูงถึง 3000°C ทั้งนี้ ต้องขึ้นอยู่กับขนาดและประสิทธิภาพของเตาที่ใช้ด้วยว่าเหมาะสมกับปริมาณเชื้อเพลิงหรือไม่ ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิจะใช้ pyrometer

ลักษณะโครงสร้างของเตา คิวเตาจะทำจากดินเหนียวที่ผ่านการเผาแล้ว ภายในเตาจะเป็นช่องว่าง เพื่อบรรจุด้วยไส้ขี้งาน (crucible) โดยจะมีช่องรู สำหรับเพิ่มไฟที่ได้จากการเผาไหม้ผ่านท่อแก๊สสู่ภายในเตา เพื่อให้ความร้อนโดยตรงแก่ด้วยที่ไส้ขี้งาน ส่วนบนของเตาจะมีการเว้นช่องเป็นรูเพื่อระบายแก๊สออกจากคิวเตา ด้วยวิธีการนี้จะสามารถทำให้อุณหภูมิเท่ากันโดยรอบ

เตาชนิดนี้มีลักษณะการใช้ที่ควบคุมอุณหภูมิลำบาก เนื่องจากอุณหภูมินั้นจะขึ้นกับปริมาณของไฟที่พ่นเข้าไปโดยตรง จึงเป็นการยากที่จะควบคุมอัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงให้มีความละเอียด ซึ่งโดยปกติแล้วจุดประสงค์ใหญ่ของเตาชนิดนี้ต้องการใช้งานที่อุณหภูมิสูงมาก จึงทำให้ไม่มีความจำเป็นในการควบคุมอุณหภูมิที่ละเอียด



รูปที่ 1.4 ลักษณะของเตาแก๊ส

6. เตาเหนี่ยวนำด้วยความถี่สูง (Induction Furnace)

เตาเหนี่ยวนำด้วยความถี่สูงที่ได้รับการคิดค้นและพัฒนาในยุคต้นๆ เพื่อใช้ในการหลอมโลหะ เตาเหนี่ยวนำไฟฟ้านี้เกิดจากความคิดของนายเฟอร์รันติ (Ferranti) ซึ่งเป็นชาวอังกฤษ เมื่อปี พ.ศ. 2430 ต่อมาชาวสวีเดน ชื่อ เค. ลิน (Kjellin) ได้คิดค้นต่อจนสามารถใช้หลอมโลหะได้ที่เมืองโกซิง (Gysinge) ประเทศสวีเดน

ในปี พ.ศ. 2443 ได้มีการออกแบบโดยใช้ระบบหม้อแปลงไฟฟ้า (A.C. transformer) ซึ่งคิวเตามีขดลวดปฐมภูมิ (primary coil) อยู่ตรงกลางและตรงบริเวณที่จะหลอมโลหะจะเป็นขดลวดทุติยภูมิ (secondary coil)

จากหลักการอันนี้ ก็ได้มีผู้คิดค้นหาวิธีการใหม่ๆ เพิ่มขึ้นอีกหลายท่าน และหลายบริษัท คือ ในปี พ.ศ. 2448 ชาวเยอรมันนี ชื่อ รอสซ์ลิงค์ (Roechling) และโรเดนเฮาเซอร์ (Rodennauser) ได้คิดค้นให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น นอกจากนั้นยังมีเกรินวอลล์ (Groenwall),

ลินด์บลัด (Lind Blad), สตาลเฮน (Stalhane), ฮอร์ธ (Hjorth), ฟรีก (Frick) พยายามทำให้ประสิทธิภาพของเตาสูงขึ้น ส่วนที่เป็นบริษัทก็มีบริษัท เอเจ็กซ์ (Ajax) และบริษัท เจนเนอรัลอิเล็กทริก (General Electric) ของสหรัฐอเมริกา, เบอรัลเลค (Birlec) ของอังกฤษ, บีบีซี (BBC) ของสวิสเซอร์แลนด์, โอโคบูเกอร์ ของเยอรมัน และฟูจิ ของญี่ปุ่น เป็นต้น ที่ได้มีส่วนร่วมในการพัฒนาเตาเหนี่ยวนำด้วยความถี่สูงสำหรับใช้ในงานด้านโลหะ

เตาที่พัฒนาขึ้นมาใช้ในอุตสาหกรรมจริงๆ ก็คือในปี พ.ศ. 2468 ซึ่งใช้หลอมพวกทองแดง และโลหะผสมนิเกิล-เงิน ของบริษัท American Brass ส่วนเตาที่ใช้หลอมเหล็กกล้าเตาแรกเริ่มในประเทศอังกฤษ ที่บริษัท Messrs. Edgar Allen ที่เมือง Sheffield ในปี พ.ศ. 2470 ซึ่งถือว่าเป็นจุดเริ่มต้นของการหลอมเหล็กด้วยเตาชนิดนี้

วิวัฒนาการล่าสุดคือราวในปี พ.ศ. 2520 ได้มีเทคโนโลยีสมัยใหม่ซึ่งเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เรียกว่า solid state electronic เช่น SCR และไคโอด ซึ่งสามารถผลิตพลังงานและความถี่สูงได้ ความถี่ที่ผลิตขึ้นมาก็คือ 200 Hz - 10 kHz คอนเริ่มแรกระบบ solid state นี้ต้องใช้ชิ้นส่วนจำนวนมากพันชิ้นมาประกอบถึงจะทำงานได้ ในช่วงนั้น พวก SCR และไคโอด มีขีดจำกัดในการทำงาน ในปัจจุบันได้มีการผลิต IC, SCR และไคโอดที่ใช้งานที่ความถี่สูง และมีความสามารถในการใช้งานมากขึ้น ทำให้เตาสมัยใหม่เป็นระบบอัตโนมัติ SCR 1 ตัว สามารถทำงานได้ถึง 500 kW เมื่อระบบ solid state electronic เข้ามามีบทบาทมากขึ้น ทำให้ระบบของเตาสมัยใหม่ไม่ยุ่งยาก และใช้งานง่าย ในปัจจุบันได้มีการผลิตเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำด้วยความถี่สูง ตั้งแต่ขนาดกำลัง 1 kW ถึง 20,000 kW ความถี่ตั้งแต่ 50 Hz ถึง 10 MHz

อย่างไรก็ตาม เตาเหนี่ยวนำด้วยความถี่สูงที่ได้รับการออกแบบและพัฒนาเพื่อใช้ในการเผาหลอม และถูกนำมาใช้งานในประเทศไทยเป็นครั้งแรก ได้แก่ เตาเหนี่ยวนำของบริษัท Inductoheat ประเทศออสเตรเลีย

1.2 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในการเพิ่มคุณภาพของพลอยโดยการเผาจำเป็นต้องใช้เตาอุณหภูมิสูง ในอุตสาหกรรมการเผาพลอยในประเทศไทยเตาอุณหภูมิสูงที่ใช้ในการเผาพลอยจำพวกคอรันดัม เช่นทับทิม และไพลิน แบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ เตาไฟฟ้า และเตาแก๊ส โดยเตาไฟฟ้าจะใช้ในการเผาทับทิม ส่วนเตาแก๊ส (รวมถึงเตาน้ำมัน) จะใช้ในการเผาไพลิน

คณะผู้วิจัยมีประสบการณ์ในการสร้างและพัฒนาเตาอุณหภูมิสูงแบบต่าง ๆ ตั้งแต่ปี 2527 ดังนี้

1. ปี 2527-2528 เตาไฟฟ้าที่ให้อุณหภูมิสูงสุด 1200 °C เพื่อใช้ในการปลูกผลึกโซเดียมคลอไรด์

2. ปี 2529-2531 เตาไฟฟ้าที่ให้อุณหภูมิสูงสุด 1450°C เพื่อใช้ในการเผาหลอม
3. ปี 2531-2533 เตาไฟฟ้าที่ให้อุณหภูมิสูงสุด 1600°C ซึ่งใช้ลวด Kanthal Super 1700 เพื่อใช้ในการเผาหลอม
4. ปี 2534-2536 เตาไฟฟ้าที่ให้อุณหภูมิสูงสุด 1800°C ซึ่งใช้ลวด Kanthal Super 1900 ในโครงการวิจัยเรื่อง “การสร้างและพัฒนาเตาไฟฟ้าอุณหภูมิสูงสำหรับใช้ในการเผาหลอม” โดยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทพัฒนาเศรษฐกิจและสังคม ประจำปี 2534 จากสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติและได้ดำเนินการเรียบร้อยแล้วตั้งแต่ปี 2536

อย่างไรก็ตามเตาไฟฟ้าที่ได้สร้างขึ้นในโครงการนี้ หรือเตาไฟฟ้าที่มีจำหน่ายทั่วไป ซึ่งสั่งซื้อจากต่างประเทศ จะไม่สามารถควบคุมบรรยากาศภายในเตาได้ และโดยทั่วไปจะเปิดทางด้านหน้า สำหรับนำพลอยเข้าออกจากเตา ดังนั้นไม่สามารถนำพลอยที่เผาแล้วออกจากเตาได้ที่อุณหภูมิสูง ๆ ได้ เพราะลวดความร้อนอาจเกิด thermal shock และหักได้ แต่ผู้ประกอบการจำนวนมากต้องการเตาไฟฟ้าที่สามารถปรับบรรยากาศภายในเตาได้ และสามารถนำพลอยที่เผาออกจากเตาที่อุณหภูมิสูง ๆ ได้ โดยลดความร้อนและเตาไม่ชำรุดเสียหาย

สำหรับเตาไฟฟ้าที่ใช้กันโดยทั่วไป จะเป็นเตาไฟฟ้าที่สั่งซื้อจากต่างประเทศเกือบทั้งสิ้น ซึ่งมีราคาแพง และไม่ได้ออกแบบไว้สำหรับใช้ในการเผาหลอม ดังนั้นไม่สามารถใช้ในการเผาหลอมเป็นระยะเวลานานอย่างต่อเนื่อง เช่น 24-72 ชั่วโมงได้ แต่เมื่อผู้ประกอบการจำเป็นต้องสั่งซื้อเข้ามาใช้และถ้าจำเป็นต้องใช้ที่อุณหภูมิสูง เช่น $1700-1800^{\circ}\text{C}$ อย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน ๆ ดังกล่าวข้างต้นพบว่าเตาไฟฟ้าที่สั่งซื้อจากต่างประเทศ (ไม่ว่าจากสหรัฐอเมริกา, อังกฤษ, เยอรมันนี, สวิตเซอร์แลนด์และญี่ปุ่น) ลวดความร้อนอาจจะชำรุดเสียหายหลังจากการใช้งานเพียงครั้งเดียว หรือ 2-3 ครั้ง เท่านั้น และเมื่อเกิดการชำรุดเสียหายแล้วจะต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงมากในการซ่อมแซม หรืออาจจะหาผู้ซ่อมแซมไม่ได้เลย ยิ่งกว่านั้นเตาไฟฟ้าที่สั่งซื้อจากต่างประเทศโดยทั่วไปไม่สามารถควบคุมบรรยากาศได้ นั่นคือต้องเผาในสภาพที่มี O_2 เท่านั้น ซึ่งอาจจะเหมาะสมสำหรับการใช้ในการเผาหลอมสีแดง (ทับทิม) หรือสีเหลือง (บุษราคัม) เท่านั้น

ส่วนเตาแก๊สที่ใช้กันโดยทั่วไปในอุตสาหกรรมการเผาหลอมในประเทศ ผู้ประกอบการส่วนใหญ่ได้สร้างขึ้นมาใช้เอง ซึ่งปัญหาที่ผู้ประกอบการประสบอยู่ก็คือการขาดความรู้ด้านวิชาการในการวัดและควบคุมอุณหภูมิ และการควบคุมอัตราการไหลของแก๊สระหว่างการเผา ทำให้ในการเผาแต่ละครั้งได้ผลไม่เหมือนกันและอาจทำให้พลอยเสียหายได้

จากปัญหาดังกล่าวข้างต้น ซึ่งคณะผู้วิจัยได้รับทราบจากการที่ได้รับเชิญให้ไปช่วยแก้ปัญหาเรื่องเตา ให้แก่ผู้ประกอบการหลายรายที่ได้สั่งซื้อเตาไฟฟ้าจากต่างประเทศ ทั้งจากสหรัฐอเมริกา, อังกฤษ, เยอรมันนี, สวิตเซอร์แลนด์ และญี่ปุ่น แล้วเกิดชำรุดเสียหาย คณะผู้วิจัยจึงเห็นว่า ควรจะมีการวิจัยและพัฒนาเตาไฟฟ้าอุณหภูมิสูงที่ได้รับการออกแบบและสร้างสำหรับใช้ในการเผา

พลอยชนิดต่าง ๆ ได้อย่างกว้างขวาง (โดยไม่จำกัดเฉพาะพลอยสีแดง และสีเหลืองเท่านั้น) และมีความทนต่อการเผาเป็นระยะเวลานาน นั่นคือควรจะเป็นเตาไฟฟ้าที่สามารถควบคุมบรรยากาศได้ เพื่อจะได้ใช้ในการศึกษาการเผาพลอยในบรรยากาศของแก๊สต่าง ๆ ได้อย่างกว้างขวาง

ดังนั้นโครงการวิจัยที่เสนอขอจาก สกว. จึงเป็นโครงการต่อเนื่อง เพื่อพัฒนาเตาไฟฟ้าให้สามารถใช้ในการเผาพลอยต่าง ๆ ได้กว้างขวางมากยิ่งขึ้น และมีประสิทธิภาพของการเผาสูงขึ้น เพราะเตาไฟฟ้าแบบใหม่นี้จะสามารถปรับบรรยากาศ หรือเลือกใช้แก๊สชนิดต่าง ๆ ภายในเตาได้ และเป็นเตาไฟฟ้าซึ่งเปิดทางคอนล่างของเตา ทำให้เอาพลอยออกจากเตาที่มีอุณหภูมิสูง ๆ ได้ โดยเตาไม่แตกร้าว ซึ่งจะเป็นการศึกษาผลของการลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วต่อสีของพลอย

นอกจากการพัฒนาเตาไฟฟ้าแล้ว ในโครงการวิจัยนี้จะพัฒนาเตาแก๊สที่ปรับบรรยากาศภายในเตาได้ควบคู่พร้อมกันไปด้วย โดยเตาแก๊สที่สร้างสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องและใช้งานสะดวก กล่าวคือสามารถวัดและควบคุมอุณหภูมิ และอัตราการไหลของแก๊สชนิดต่าง ๆ ที่ต้องการศึกษาอย่างถูกต้องแน่นอน ผู้ประกอบการจะได้ใช้ในการเผาพลอยอย่างมีประสิทธิภาพ และได้พลอยที่มีคุณภาพสูงขึ้น

1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.3.1 เพื่อสร้างและพัฒนาต้นแบบของเตาไฟฟ้าอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 1800°C และสามารถควบคุมบรรยากาศได้
- 1.3.2 เพื่อสร้างและพัฒนาต้นแบบของเตาแก๊สอุณหภูมิสูงประมาณ 2000°C และสามารถควบคุมบรรยากาศได้
- 1.3.3 เพื่อใช้เตาต้นแบบที่สร้างทั้งสองชนิดนี้ ในการเผาพลอย ทับทิม และจิวไฟร์ตัวอย่างจากแหล่งต่าง ๆ เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิ เวลา และบรรยากาศที่เผาพลอย ต่อการเปลี่ยนแปลงของสีของพลอย, สมบัติทางกายภาพ, สมบัติทางแสง และสมบัติทางเคมีของพลอย

หมายเหตุ วัตถุประสงค์ข้อ 1.3.3 จะเป็นการพัฒนาเทคนิคการเผาพลอย และเชื่อมโยงโครงการนี้กับโครงการอื่นที่ต้องการศึกษาผลของอุณหภูมิ เวลา และบรรยากาศที่เผาพลอย ต่อการเปลี่ยนแปลงของสีพลอย และสมบัติทางกายภาพ, สมบัติทางแสง และสมบัติทางเคมีของพลอย โดยการวิเคราะห์ในเชิงวิทยาศาสตร์ด้วยเครื่องมือที่ทันสมัย ซึ่งโครงการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคการเผาพลอย ได้แก่ โครงการวิจัยเรื่อง “การวิจัยและพัฒนาสถานะของการเผาพลอยจิวไฟร์” โดย รศ.ดร.สุรชาติพิทย์ ศิริไพศาลพิพัฒน์ (หัวหน้าโครงการ)

1.4 ขอบเขตและขั้นตอนของการวิจัย

เนื่องจากในโครงการวิจัยนี้ เป็นการสร้างและพัฒนาเตาอุณหภูมิสูง 2 แบบพร้อมกัน คือ เตาไฟฟ้า และเตาแก๊ส ซึ่งมีขั้นตอนการวิจัยดังนี้

1.4.1.1 เตาไฟฟ้า

1. คำนวณและออกแบบส่วนต่าง ๆ ของตัวเตา, ขนาดของเบ้าเตา, กำลังไฟฟ้า, ชุดจ่ายกระแสไฟฟ้าสำหรับลดความร้อน
2. จัดหาวัสดุและอุปกรณ์ที่ต้องการใช้ในการสร้างเตาไฟฟ้า เช่น ผนังเตา, ลดความร้อน, หม้อแปลงไฟฟ้า, หัววัดอุณหภูมิ, ชุดควบคุมการไหลของแก๊ส และวัสดุที่ใช้เป็นโครงสร้างของเตา เป็นต้น
3. ทำการสร้างส่วนต่าง ๆ ของตัวเตาแล้วประกอบทุก ๆ ส่วนเข้าด้วยกันเป็นตัวเตาที่สมบูรณ์
4. ทดสอบการทำงาน โดยการทดสอบอุณหภูมิว่าได้ตามวัตถุประสงค์หรือไม่
5. ทดสอบการเผาผลาญจริง โดยการปรับบรรยากาศภายในเบ้าเตาระหว่างที่มีการเผา
6. ประเมินประสิทธิภาพของเตาไฟฟ้าที่สร้างทั้งในเชิงวิชาการและเชิงพาณิชย์

1.4.2 เตาแก๊ส

1. คำนวณและออกแบบส่วนต่าง ๆ ของเตาแก๊ส
2. จัดหาวัสดุและอุปกรณ์ที่ต้องการใช้ในการสร้างเตาแก๊ส ได้แก่ เบ้าเตา, หัวพ่นไฟชนิดใช้แก๊ส, ถังแก๊ส, ชุดตรวจวัดและควบคุมชนิดของแก๊ส, ชุดควบคุมการระบายความร้อนสำหรับเตา, ชุดควบคุมอุณหภูมิ เป็นต้น
3. ทำการสร้างส่วนต่าง ๆ ของตัวเตา แล้วประกอบทุก ๆ ส่วนเข้าด้วยกันเป็นเตาแก๊สพร้อมระบบควบคุมที่สมบูรณ์
4. ทดสอบการทำงานของเตา
5. ทดสอบการเผาผลาญจริง โดยการปรับบรรยากาศภายในเบ้าเตาระหว่างที่มีการเผา
6. ประเมินประสิทธิภาพของเตาแก๊สที่สร้างทั้งในเชิงวิชาการและเชิงพาณิชย์

1.5 ผลประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลจากงานวิจัยและพัฒนาครั้งนี้ นอกจากจะได้ต้นแบบของเตาอุณหภูมิสูงทั้งสองแบบแล้ว คณะผู้วิจัยยังได้เรียนรู้ถึงเทคนิคการเผาผลาญทับทิมและพลอยไพฑูริ เพื่อเป็น know how ที่สามารถถ่ายทอดความรู้ต่างๆ ทั้งทางด้านการสร้างตัวเตา และการเผาผลาญทับทิมและพลอยไพฑูริให้แก่ผู้ประกอบการทางด้านอัญมณีต่อไป ซึ่งถ้าผลงานวิจัยและพัฒนาได้รับการเผยแพร่อย่างกว้างขวางแล้ว เชื่อว่าจะมีผลกระทบทางด้านเศรษฐศาสตร์ สังคม การจ้างแรงงาน และการพัฒนาชนบทในอนาคต ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1.5.1 ผลกระทบทางเศรษฐศาสตร์

อุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับของไทย เป็นอุตสาหกรรมที่ผลิตเพื่อการส่งออกเป็นสำคัญ คือประมาณร้อยละ 80 ของมูลค่าการผลิตทั้งหมด และทำรายได้เข้าประเทศอยู่ใน 10 อันดับแรกของสินค้าส่งออกทั้งหมดของประเทศไทยในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา อุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ จึงเป็นอุตสาหกรรมหลักที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศ จากข้อมูลการส่งออกอัญมณีและเครื่องประดับของไทย จากปี 2527 ถึง 2538 จะเห็นว่าการขยายตัวที่รวดเร็วมาก ซึ่งโครงการวิจัยและพัฒนาจะมีผลต่อการพัฒนาเพิ่มคุณภาพและเพิ่มคุณค่าของอัญมณี อันจะมีผลต่อการเพิ่มรายได้การส่งออกอัญมณีและเครื่องประดับของไทย

ปี	มูลค่าส่งออก (ล้านบาท)
2527	7,390
2528	8,530
2529	13,181
2530	19,827
2531	24,982
2532	30,225
2533	36,929
2534	38,169
2535	39,266
2536	43,495
2537	47,500
2538	55,000

ที่มา : ศูนย์สถิติการพาณิชย์ โดยความร่วมมือของกรมศุลกากร

1.5.2 ผลกระทบต่อสังคม

1. เป็นอุตสาหกรรมที่ใช้แรงงานมาก ก่อให้เกิดการจ้างงานสูง
2. เป็นอุตสาหกรรมในครัวเรือนไม่ต้องย้ายถิ่น
3. เป็นอุตสาหกรรมที่สามารถเพิ่มมูลค่าสูง ก่อให้เกิดการสร้างงานที่เกี่ยวข้องกัน นับตั้งแต่ระดับการทำเหมือง การเจียรไน การออกแบบ การประกอบตัวเรือน จนกระทั่งการส่งออก
4. เป็นอุตสาหกรรมที่ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม

1.5.3 ผลกระทบต่อการจ้างแรงงาน

การประกอบอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ สามารถดำเนินการได้ตั้งแต่ระดับครัวเรือนจนถึงระดับโรงงานขนาดใหญ่ อุตสาหกรรมนี้ต้องใช้แรงงานเป็นจำนวนมาก เนื่องจากเป็นสินค้าที่ต้องใช้ฝีมือ ทักษะ ความชำนาญ และความปราณีตละเอียดอ่อน ซึ่งเครื่องจักรไม่สามารถทดแทนฝีมือและทักษะของช่างได้ ทั้งนี้จึงก่อให้เกิดการจ้างแรงงาน ซึ่งกระจายอยู่ทั่วไปทั้งในกรุงเทพมหานครและส่วนภูมิภาคประมาณไม่ต่ำกว่า 1,307,000 คน โดยแบ่งเป็น

- ช่างเจียรไนพลอย 1,00,000 คน
- ช่างเจียรไนเพชร 7,000 คน
- ช่างประกอบตัวเรือน 300,000 คน

ทั้งนี้ไม่รวมแรงงานมืออีกจำนวนหนึ่งที่อยู่ในขั้นตอนจัดหาวัตถุดิบ ได้แก่ การขุดหาพลอย การทำเหมือง ซึ่งคาดว่าจะมีจำนวนคนไม่น้อยกว่า 50,000 คน

สำหรับจำนวนผู้ประกอบการในธุรกิจอัญมณีและเครื่องประดับ ที่ได้จดทะเบียนไว้กับกรมโรงงานอุตสาหกรรมในปัจจุบันนี้ประมาณ 282 ราย แยกเป็น

- โรงงานเจียรไน เพชร พลอย และหินมีค่า จำนวน 109 ราย
- โรงงานผลิตเครื่องประดับ จำนวน 173 ราย

ที่มา : สมาคมผู้ค้าอัญมณีไทยและเครื่องประดับ

1.5.4 ผลกระทบต่อการพัฒนาชนบท

จากข้อมูลว่าจ้างแรงงานเฉพาะช่างเจียรไนพลอยทั่วประเทศ (ในปี 2538) ประมาณ 1,000,000 คน และขณะนี้มีการนำวัตถุดิบ (พลอย) ไปเจียรไนในต่างจังหวัดมากขึ้น เช่น อุตรดิตถ์, นครราชสีมา, อุรุษยา เป็นต้น ทำให้แรงงานจากต่างจังหวัดไม่ต้องเดินทางเข้ามาหางานทำในกรุงเทพฯ การเจียรไนพลอยในต่างจังหวัดจะก่อให้เกิดรายได้แก่ชาวบ้านในท้องถิ่นนั้นๆ ซึ่งก่อให้เกิดการพัฒนาชนบทหรือท้องถิ่นนั้นๆ

โครงการวิจัยและพัฒนานี้ จะช่วยเพิ่มคุณภาพและคุณค่าของพลอยให้สูงขึ้น เมื่อทางผู้ประกอบการมีรายได้เพิ่มขึ้น ก็สามารถกระจายอุตสาหกรรมการเจียรไนพลอยไปสู่ชนบทมากขึ้น และการว่าจ้างแรงงานมากขึ้นด้วย

บทที่ 2

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเตาอุณหภูมิสูง

2.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเตาไฟฟ้า

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างเตาไฟฟ้า จะเลือกใช้วัสดุอุปกรณ์ที่หาซื้อได้ภายในประเทศเป็นหลัก ซึ่งวัสดุและอุปกรณ์หลักที่ใช้มีดังนี้

1. ลวดความร้อนจะใช้ลวด Kanthal Super 1900 ขนาด 6/12 mm
2. อุปกรณ์ที่ใช้ร่วมกับลวดความร้อน ได้แก่ contact strap ซึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้าที่จะเชื่อม ต่อระหว่างลวดความร้อนแต่ละเส้น, element holder จะใช้สำหรับยึดลวดความร้อนและ passage brick จะใช้เพื่อความสะดวกในการติดตั้งและถอดเปลี่ยนลวดความร้อน
3. หม้อแปลง (Transformer) แบบแปลงลง (step-down) ขนาด 3.60 kVA โดย input : AC 220 V และ output : 24 V, 150 A
4. ชุดจ่ายไฟแบบปรับค่ากระแสได้ (SCR Power Regulator) ขนาด 4 kW, 0-220 V
5. แผ่นฉนวนกันความร้อนเพื่อใช้เป็นผนังของเตา
6. เครื่องควบคุมอุณหภูมิชนิดตั้งโปรแกรมข้อมูลได้ (programable temperature controller) ของบริษัท Shimaden ประเทศญี่ปุ่น รุ่น FP 21
7. หัววัดอุณหภูมิซึ่งเป็นเทอร์โมคัปเปิ้ล Type B (Pt-Pt/Rh 30%) จะใช้วัดอุณหภูมิภายในเตาแล้วส่งสัญญาณที่เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าเข้าสู่เครื่องควบคุมอุณหภูมิ เพื่อแสดงค่าและควบคุมอุณหภูมิให้ได้ตามที่ตั้งโปรแกรมไว้

2.1.1 ลวดความร้อน (Heater) [4,5]

ลวดความร้อนที่ใช้กับเตาที่ได้ออกแบบไว้มีชื่อเรียกทางการค้าว่า Kanthal Super 1900 ขนาด 6/12 mm ของบริษัท KANTHAL ประเทศสวีเดน สำหรับอุณหภูมิสูงสุดที่ผิวของลวดความร้อนจะมีค่าประมาณ 1900 °C และไม่มีช่วงอุณหภูมิใด ๆ ในขณะที่ใช้งานที่ลวดความร้อนนี้จะเกิดการเปราะตัว (embrittlement) ทำให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน

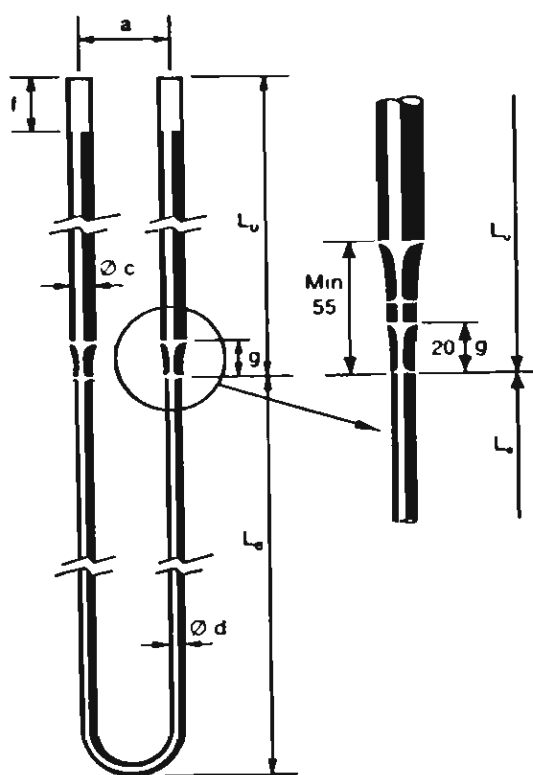
สำหรับเนื้อสารของลวดความร้อนนี้ มีส่วนประกอบหลักคือ Molybdenum Disilicide (MoSi_2) โดยจะมีคุณสมบัติที่ทนทานต่อการเกิด oxidation ที่อุณหภูมิสูง ๆ ได้ดี

ลวดความร้อน Kanthal มีรูปร่างเป็นรูปตัวยู (Ushape) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และมีขนาดต่าง ๆ กัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ในการติดตั้งลวดความร้อนชนิดนี้ในเตา โดยทั่วไป

จะติดตั้งตามแนวตั้ง (vertical mount) แต่ก็สามารถติดตั้งตามแนวนอน (horizontal mount) ได้ ถ้ามีวัสดุรองรับหลอด (supporter) ที่เหมาะสม โดยที่อุณหภูมิใช้งานในเตาสูงสุดจะมีค่าประมาณ 1200°C เท่านั้น เนื่องจากหลอดความร้อนจะเกิดการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 1200°C นั้นเอง

ตารางที่ 2.1 ขนาดมาตรฐานของหลอดความร้อน Kanthal

ขนาดของหลอด (mm)	a (mm)	c (mm)	d (mm)	f (mm)	g (mm)
9/18	50, 60	18	9	75	20
6/12	40, 45, 50, 60	12	6	40	20
3/6	20, 25, 40	6	3	25	15



รูปที่ 2.1 ส่วนต่างๆ ของหลอดความร้อน Kanthal

จากรูปที่ 2.1 แสดงส่วนต่างๆ ของลวดความร้อน ซึ่งได้แก่

- (1) ที่ปลายบนสุด (f) จะเป็นชั้นอะลูมิเนียมที่หุ้มอยู่เพื่อเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี สำหรับ ป้องกัน กระแสและความต่างศักย์ให้กับลวดความร้อน
- (2) ส่วนที่เรียกว่า Terminal (c) ซึ่งจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดโคที่สุก ทำให้มี ค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงที่สุด
- (3) ส่วนที่เรียกว่า Taper Part (g) ที่มีลักษณะทรงกรวย (cone) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงระหว่างส่วนที่ 2 และ 3 ไม่ให้แตกหักได้ง่าย และส่วนนี้จะต้องยื่นเข้าไปภายในเตาอย่างเต็มที่ เพื่อป้องกันการ overheat ที่ terminal ของลวด
- (4) ส่วนที่เรียกว่า Heating zone (d) ซึ่งเป็นส่วนที่ให้ความร้อนแก่เตา จะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำที่สุด และจะเกิดการร้อนแดงเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิมากกว่า 500°C ขึ้นไป

2.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ร่วมกับลวดความร้อน [4,5] ได้แก่

(1) Contact Straps

จะทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้า และเชื่อมต่อระหว่างลวดความร้อนแต่ละแท่ง ให้อนุกรมหรือขนานกัน ซึ่งจะทำได้ด้วยอะลูมิเนียมที่สานกันเป็นแถบ โดยแต่ละ contact strap จะประกอบด้วยแถบอะลูมิเนียม 2 ชั้น และจะมีแผ่นอะลูมิเนียมหุ้มปิดไว้ที่ปลายทั้งสองข้าง โดยจะยึด contact strap เข้ากับ terminal ส่วนที่มีชั้นอะลูมิเนียมหุ้มอยู่ ของลวดความร้อน ด้วย screw-clamp

Contact strap ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีอยู่ 2 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยแบบแรกจะใช้สำหรับเชื่อมต่อลวดความร้อนแต่ละ element ซึ่งปลายทั้งสองข้างจะเป็น screw-clamp และแบบที่สองนั้น ที่ปลายข้างหนึ่งจะเป็น screw-clamp ส่วนอีกปลายข้างหนึ่งจะเป็นแผ่นอะลูมิเนียม หุ้มปิดแถบอะลูมิเนียมอยู่ และมีรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.3 mm ไว้สำหรับเชื่อมต่อกับสายไฟ เพื่อจ่ายกระแสและศักย์ไฟฟ้าให้กับลวดความร้อน

เนื่องจากจะต้องไม่มี mechanical stress เกิดขึ้นกับลวดความร้อนที่จะส่งผ่านมาจาก contact strap ดังนั้นความยาวของ contact strap ควรจะยาวกว่า ระยะระหว่างแต่ละ element อย่างน้อย 25 mm เพื่อป้องกันไม่ให้ลวดความร้อนแตกหักได้ และในขณะที่ขันสกรูของ screw-clamp เพื่อยึด contact strap กับ terminal จะต้องระมัดระวังไม่ให้ลวดความร้อนเกิดการบิดหรืองอ โดยจะต้องขันสกรูให้แน่นเต็มที่ นอกจากนี้ สกรูที่ใช้เชื่อมต่อ contact strap กับสายไฟ จะต้องเป็น stainless screw ด้วย

อุณหภูมิของ contact strap ในการใช้งาน จะต้องไม่เกิน 300°C และ contact strap สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้งานได้อย่างต่อเนื่องกับกระแสไฟฟ้าที่ไม่เกิน 200 A ถ้าหาก contact strap เกิดการ overheat จนเสียหาย ก็ควรจะถอดเปลี่ยนเสียใหม่ และสาเหตุของการ overheat นั้น อาจจะมาจากการซีล (seal) ที่ไม่ดีระหว่าง terminal และฉนวนกันความร้อนก็ควรจะแก้ไขเสีย หรือมาจากการระบายอากาศโดยอาจใช้พัดลมเป่าที่บริเวณ contact strap ถ้าหากไม่สามารถเปลี่ยนฉนวนกันความร้อนใหม่ให้เหมาะสมได้

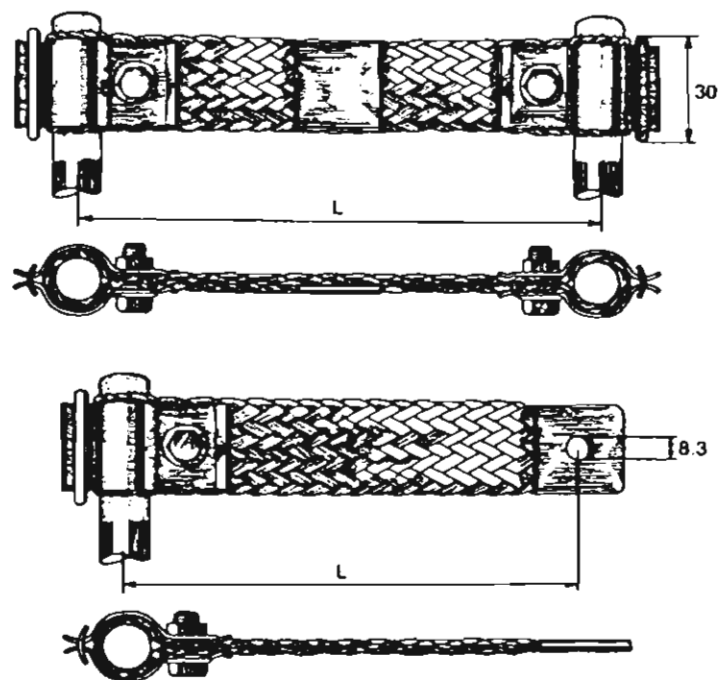
(2) Element Holders

มีไว้สำหรับยึด terminal ของลวดความร้อนเพื่อความสะดวกในการถอดหรือเปลี่ยนลวดความร้อนได้ง่าย ซึ่งที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบ Two-shank holders ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยจะประกอบด้วย ชิ้นเซรามิก (ceramic pieces) ที่ยึดอยู่ด้วยแผ่น stainless รูปตัว U ซึ่งชิ้นเซรามิกจะเป็นตัวยึดจับกับ terminal ของลวด สำหรับความยาวของ holder จะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่าง shank ทั้งสอง (a) ดังนั้น element holder ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะมีขนาด

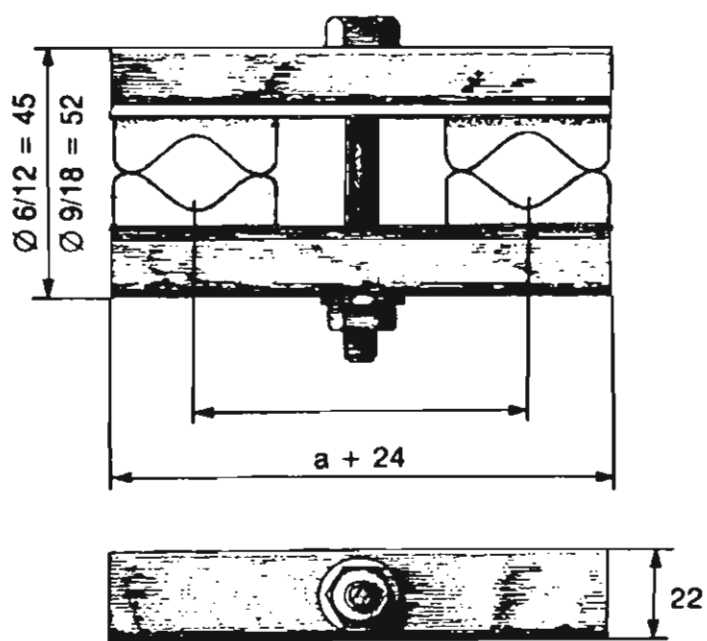
$$\text{กว้าง (W) : สูง (H) : ยาว (L)} = 45 \text{ mm} : 22 \text{ mm} : 74 \text{ mm}$$

(3) Passage Brick

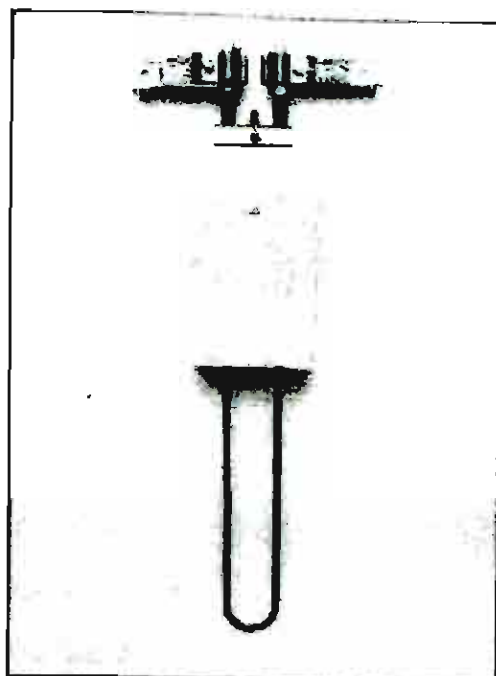
จะใช้เพื่อความสะดวกในการติดตั้งและถอดเปลี่ยนลวดความร้อน โดย passage brick เป็นส่วนหนึ่งของฝาบน (roof) ของเบ้าเตา โดยจะใส่ไว้ในช่องว่างที่ฝาบนของเบ้าเตา ซึ่งจะมีบ่า (shoulder) รองรับอยู่ที่ passage brick จะมีรูที่ทำไว้อยู่ 2 รู ดังรูปที่ 2.4 เพื่อให้ terminal ของลวดโผล่ออกมาภายนอกเบ้าเตาได้ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูนี้ จะขึ้นกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ terminal (d) ซึ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ terminal ของลวดที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ 12 mm ดังนั้นรูปบนของ passage brick จะต้องมีความเส้นผ่านศูนย์กลางอย่างน้อยเท่ากับ 15 mm และรูทั้งสองจะต้องมีความขนานกันด้วย เพื่อไม่ให้ลวดความร้อนที่เสียบเกิดการบิดตัว เพราะอาจหักได้



รูปที่ 2.2 แสดง contact strap



รูปที่ 2.3 แสดง element holder



รูปที่ 2.4 แสดง passage brick

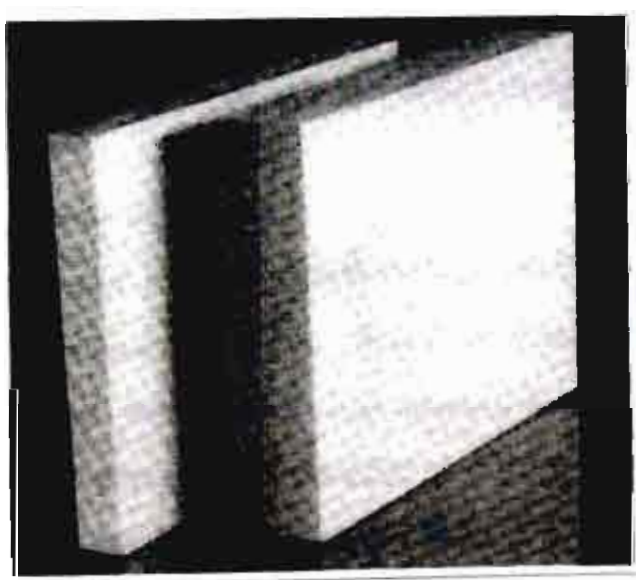
2.1.3 แผ่นฉนวนกันความร้อน (Insulation Board) [6]

ฉนวนกันความร้อนที่ใช้ทำเตาเผาทั้งหมด 4 ชั้น แต่ละชั้นหนา 1 นิ้ว โดยผนังแต่ละชั้น มีรายละเอียดดังนี้

1. แผ่นฉนวนชั้นที่ 1 เป็น Alumina Insulation Board Type SALI-2 ผลิตจากบริษัท Zircar Products, Inc ประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นฉนวนที่มีส่วนผสมของ อลูมินา (Al_2O_3) 80% และ ซิลิกา (SiO_2) 20% สามารถทนอุณหภูมิได้สูงสุด $1800^{\circ}C$
2. แผ่นฉนวนชั้นที่ 2 เป็น Alumina Insulation Board Type ECO 40 ผลิตจากบริษัท Zircar Products, Inc เช่นกัน มีส่วนผสมของอลูมินา 87%, ซิลิกา 13% สามารถทนอุณหภูมิได้ถึง $1600^{\circ}C$
3. แผ่นฉนวนชั้นที่ 3 เป็นฉนวนอลูมินา Type ZAL-15 เป็นผนังเตาที่มีส่วนผสมของ อลูมินา 85%, และ ซิลิกา 15% ทนอุณหภูมิได้ถึง $1350^{\circ}C$
4. แผ่นฉนวนชั้นที่ 4 เป็นฉนวนอลูมินา Type ZAL-15 เช่นกัน

ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติของแผ่นฉนวน SALI-2

Color	White
Composition : Al_2O_3	80%
SiO_2	20%
Open Porosity	84%
Compressive Strength :	
At 10% Compression	150 psi
Isothermal Shrinkage :	
24 hrs. at 1700°C	0%
1 hr. at 1800°C	2% Length & Width
Thermal Conductivity :	6% Thickness
At 1650°C	$0.39 \text{ W/m}^\circ\text{K}$

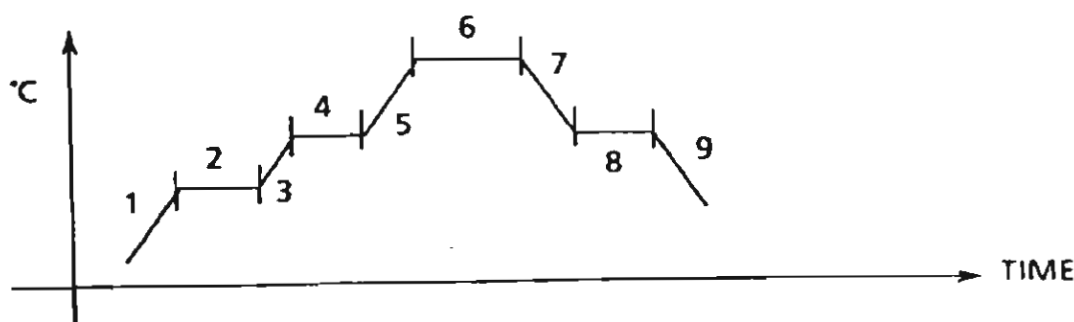


รูปที่ 2.5 แสดงแผ่นฉนวนกันความร้อน

2.1.4 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ

เครื่องควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นเครื่องควบคุมอุณหภูมิรุ่น FP 21 ผลิตภัณฑ์ของบริษัท Shimaden ประเทศญี่ปุ่น ซึ่งสามารถวัดอุณหภูมิได้สูงสุด 1800°C โดยรับสัญญาณที่เป็นค่าแรงดันไฟฟ้า จากหัววัดอุณหภูมิซึ่งเป็นเทอร์โมคัปเปิ้ลประเภท B (Pt-Pt/Rh 30%) คุณสมบัติเฉพาะของเครื่องควบคุมอุณหภูมิ มีดังนี้

- (1) สามารถตั้งโปรแกรมควบคุมอุณหภูมิได้ 9 รูปแบบ (patterns) แต่ละรูปแบบยังสามารถ set ได้ 9 ขั้นตอน (steps) รวมเป็น 81 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงรูปแบบของการควบคุมอุณหภูมิ

- (2) มีความถูกต้องสูงถึง $\pm 0.1\%$
- (3) ค่า PID control สามารถกำหนดขึ้นเองได้อย่างอัตโนมัติ โดยใช้ PID automatic tuning function ของเครื่อง ซึ่งจะทำได้ง่ายและช่วยประหยัดเวลา แต่ก็สามารถจะตั้งค่า PID เองตามต้องการ (manual setting) โดยผู้ใช้ก็ได้
- (4) มี Interface RS-422A หรือ RS-232C
- (5) สามารถใช้กับเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิดต่าง ๆ ได้

2.1.5 เทอร์โมคัปเปิ้ล (Thermocouple) [7,8]

ในปัจจุบัน หัววัดอุณหภูมิมีอยู่หลายประเภท เช่น เทอร์โมมิเตอร์แบบหลอดแก้ว, Bimetallic Thermometer, Thermocouple, Radiation Pyrometer เป็นต้น แต่ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ เทอร์โมคัปเปิ้ล เนื่องจากเป็นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ใช้งานได้กว้างขวางที่สุด เมื่อเทียบกับหัววัดอุณหภูมิชนิดอื่น โดยสามารถใช้วัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ อุณหภูมิต่ำสุดใกล้ศูนย์องศาสัมบูรณ์ (0°K) และสูงกว่า 2000°C ซึ่งในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 630°C ถึง 1064°C International Temperature Scale ได้จัดอันดับให้เทอร์โมคัปเปิ้ลเป็นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ละเอียด ถูกต้อง และน่าเชื่อถือมากที่สุด

ตารางที่ 2.3 การแบ่งประเภทของเทอร์โมคัปเปิ้ลตามมาตรฐาน ANSI

ประเภท	วัสดุด้านบวก (+)	วัสดุด้านลบ (-)	อุณหภูมิสูงสุด ($^{\circ}\text{C}$) ⁴⁾
B	Platinum-30% Rhodium	Platinum-6% Rhodium	1800
R	Platinum-13% Rhodium	Platinum	1600
S	Platinum-10% Rhodium	Platinum	1600
K	Chromel ¹⁾	Alumel ²⁾	1260
E	Chromel	Constantan ³⁾	870
J	Iron	Constantan	760
T	Copper	Constantan	370
หมายเหตุ 1) Chromel คือ โลหะผสม Nikel-10% Chromium 2) Alumel คือ โลหะผสม Nikel-10% Aluminium หรือ Silicon 3) Constantan คือ โลหะผสม 45% Nikel-55% Copper 4) อุณหภูมิสูงสุดขึ้นกับขนาดของสายเทอร์โมคัปเปิ้ลด้วย ในตารางนี้อุณหภูมิสูงสุดสำหรับสายเทอร์โมคัปเปิ้ลขนาด 3.25 mm ยกเว้นประเภท B, R, S จะเป็นสายขนาด 0.51 mm			

ตามมาตรฐาน ANSI ได้แบ่งเทอร์โมคัปเปิ้ลออกเป็น 7 ประเภท ตามชนิดวัสดุของเทอร์โมคัปเปิ้ล ดังในตารางที่ 2.3 ซึ่งจะมีลักษณะสภาพของการใช้งานและข้อจำกัดของเทอร์โมคัปเปิ้ลแต่ละประเภท อาจจะสรุปได้ดังตารางที่ 2.4

นอกจากเทอร์โมคัปเปิ้ลมาตรฐานทั้ง 7 ประเภทแล้ว ยังมีเทอร์โมคัปเปิ้ลที่ไม่ได้จัดเข้ามาตรฐาน สำหรับใช้งานเฉพาะบางประเภท ซึ่งมีสภาพใช้งานยุ่งยากกว่า เช่น การใช้งานต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 1400-1800 °C จะใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลแบบ Platinum-40% Rhodium กับ Platinum-20% Rhodium ซึ่งจะใช้งานได้ดี เมื่อพิจารณาในแง่ความทนต่อสภาพแวดล้อม แต่อย่างไรก็ตามในสภาพที่เทอร์โมคัปเปิ้ลประเภท B สามารถใช้ได้ ก็ควรใช้ประเภท B มากกว่า เพราะให้ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงกว่า (สะดวกในการวัดและวัดได้ละเอียดกว่า) และยังมีราคาถูกกว่าด้วย

ตารางที่ 2.4 ลักษณะสภาพของการใช้งานและข้อจำกัดของเทอร์โมคัปเปิ้ล

ประเภทของเทอร์โมคัปเปิ้ล	ลักษณะสภาพการใช้งานและข้อจำกัด
ประเภท B	- ใช้งานต่อเนื่องในสภาพแวดล้อม oxidizing หรือ inert ถึง 1760 °C - ใช้งานระยะสั้นในสุญญากาศ - ไม่ควรใช้ในสภาพแวดล้อม reducing หรือ มีไอของโลหะหรืออโลหะเว้นแต่จะมีท่อป้องกันที่ไม่ใช่โลหะ
ประเภท R และ S	- สภาพการใช้งานโดยทั่วไปเหมือนประเภท B แต่อุณหภูมิสูงสุดต่ำกว่าประเภท B ไม่ได้
ประเภท E	- ใช้งานต่อเนื่องในสภาพแวดล้อม oxidizing หรือ inert ถึง 870 °C - ใช้งานได้ดีสำหรับอุณหภูมิต่ำกว่า 0 ถึง -250 °C เนื่องจากไม่มีปัญหาของการผุกร่อนจากความชื้น อย่างไรก็ตามที่ช่วงอุณหภูมินั้นไม่มีมาตรฐานจำกัดค่าคลาดเคลื่อนสำหรับเทอร์โมคัปเปิ้ลประเภทนี้ ในสภาพแวดล้อม reducing หรือ สภาพแวดล้อมที่มีกำมะถันจะต้องมีท่อป้องกันที่เหมาะสม
ประเภท J	- ใช้งานต่อเนื่องในสภาพแวดล้อม oxidizing, reducing, inert หรือ สภาพสุญญากาศ ถึง 760 °C - สายเทอร์โมคัปเปิ้ลเปลี่ยนไม่ควรใช้ในสภาพที่มีกำมะถัน และที่อุณหภูมิสูงกว่า 540 °C - ใช้ได้ในอุณหภูมิต่ำกว่า 0 ถึง -200 °C แต่มีข้อจำกัดด้านความละเอียดเช่นเดียวกับประเภท E

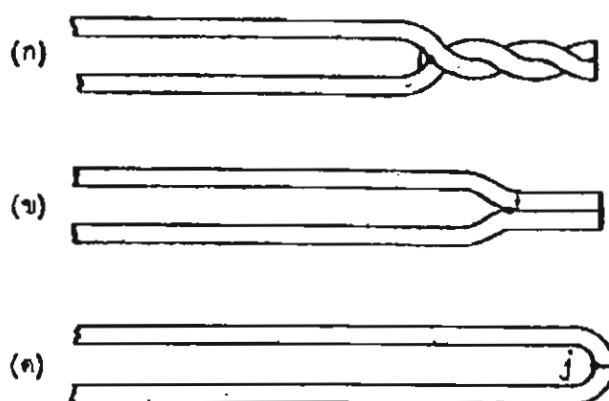
ตารางที่ 2.4 ลักษณะสภาพของการใช้และข้อจำกัดของเทอร์โมคัปเปิ้ล (ต่อ)

ประเภท K	- ใช้งานต่อเนื่องในสภาพ oxidizing หรือ inert ถึง 1260°C - ใช้งานมากที่สุดสำหรับช่วงอุณหภูมิเกิน 540°C
ประเภท T	- ใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0 ถึง -250°C ไม่มีปัญหาความผุกร่อนจากความชื้น และยังเป็นเทอร์โมคัปเปิ้ลประเภทเดียวที่มีมาตรฐานจำกัดความคลาดเคลื่อนสำหรับอุณหภูมิในช่วงนี้ - ใช้งานต่อเนื่องในสภาพ oxidizing, reducing หรือ inert ถึง 370°C

เทอร์โมคัปเปิ้ลที่ไม่ได้จัดเข้ามาตรฐาน ANSI ที่มีขายในท้องตลาด นอกจากประเภทที่ได้กล่าวมาแล้ว ได้แก่ Iridium-Rhodium, Nickel-Chromium, Nickel-Molybdenum และ Tungsten-Rhodium

การต่อขั้วเทอร์โมคัปเปิ้ล

ในการต่อขั้วของเทอร์โมคัปเปิ้ล มีหลายวิธี ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 วิธีการต่อขั้วของเทอร์โมคัปเปิ้ล

ในการต่อแบบรูปที่ 2.7 ก. โดยการพันควั่นสายทั้งสองเข้าด้วยกัน แล้วเชื่อมด้วยแก๊สไฟฟ้าหรือบัดกรีให้ยึดกันแน่น เพื่อไม่หลวมหลุมหรือมีผิวสัมผัสไม่ดีระหว่างการใช้งาน วิธีนี้เหมาะสำหรับสายเทอร์โมคัปเปิ้ลทั่ว ๆ ไป ที่ขนาดสายไม่ใหญ่นัก

สำหรับการต่อแบบ ข. ใช้สำหรับกรณีที่สายมีขนาดใหญ่ ไม่สะดวกต่อการพันเข้าหากัน เพียงแค่เชื่อมให้ติดกันไว้เท่านั้นก็เพียงพอแล้ว

ส่วนการต่อแบบ ค. ใช้สำหรับเชื่อมต่อสายโลหะมีตระกูล (จำพวกแพลตินัม) โปรดัลกัตจุด j ในรูป เป็นจุดซึ่งเรียกว่า “effective junction” ซึ่งเป็นจุดเชื่อมต่อระหว่างสายเทอร์โมคัปเปิ้ล

ฉนวนหุ้มเทอร์โมคัปเปิ้ล

จุดประสงค์หลักของการหุ้มฉนวนเทอร์โมคัปเปิ้ลคือ เพื่อเป็นฉนวนไฟฟ้าสำหรับวงจร เพราะถ้าสายเทอร์โมคัปเปิ้ลแตะกันตรงกลางหรือเกิด short circuit อุณหภูมิที่อ่านได้จะไม่ใช่อุณหภูมิของจุดที่ต้องการจะวัด วัสดุของฉนวนนี้จะต้องเหมาะสมกับงาน โดยปกติจะสามารถป้องกันความชื้นไม่ให้สึกหรองง่าย ทนความร้อนถึงอุณหภูมิใช้งาน และทนการกัดกร่อนทางเคมี ในงานวิจัยนี้ฉนวนที่ใช้หุ้มเทอร์โมคัปเปิ้ลเป็นท่อเซรามิกส์ ทำด้วยอะลูมินา (Al_2O_3)

2.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเตาแก๊ส

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างเตาแก๊ส ได้แก่

1. ชุดจุดไฟ (Pilot burner ignitor) พร้อมชุดควบคุมการจุดไฟ
2. ชุดตรวจจับเปลวไฟ (UV detector)
3. หัวพ่นไฟ (Burner)
4. ชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller)
5. ชุดวัดอุณหภูมิ (Temperature sensor)
6. ชุดวิเคราะห์แก๊สออกซิเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ (O_2 , CO gas analyzer)
7. คอนกรีตทนไฟ (Castable refractories)
8. เครื่องทำน้ำเย็น (Chiller)
9. เครื่องปั๊มอากาศ (Air compressor)
10. ชุดขับเคลื่อน (Motor driver)
11. เครื่องอัดอากาศ (Blower)
12. ระบบแก๊ส (Gas station) พร้อมชุดปรับแรงดัน
13. ระบบออกซิเจน (Oxygen station) พร้อมชุดปรับแรงดัน

14. วาล์วป้องกันอุบัติเหตุ (Safety valves)

15. วาล์วควบคุมปริมาตรการไหลของแก๊ส (Variable valves)

สำหรับรายละเอียดโดยย่อของแต่ละวัสดุอุปกรณ์มีดังนี้ (รายละเอียดเพิ่มเติมของแต่ละอุปกรณ์จะอยู่ในภาคผนวก ก)

2.2.1 ชุดจุดไฟพร้อมชุดควบคุมการจุดไฟ

ชุดจุดไฟ จะใช้ไฟฟ้าแรงดันสูงขนาด 20 กิโลวัตต์ เพื่อให้เกิดประกายไฟที่หัวเทียน (spark plug) ในขณะที่มีการจ่ายเชื้อเพลิงมาที่หัวฉีด โดยขั้นตอนนี้จะมีชุดควบคุมการจุดไฟ จุดเปลวไฟขนาดเล็กให้ติดเป็นเวลานาน 5 วินาที หลังจากนั้นหัวพ่นไฟจึงจะทำงาน

2.2.2 ชุดตรวจจับเปลวไฟ

เพื่อตรวจจับว่ามีเปลวไฟเกิดขึ้นหลังจากจุดไฟหรือไม่ หากพบว่าไม่มีเปลวไฟเกิดขึ้นหลังจากชุดจุดไฟทำงาน ชุดตรวจจับเปลวไฟส่งสัญญาณไปยังโซลินอยด์วาล์วทุกตัวให้ปิดเพื่อตัดการจ่ายเชื้อเพลิงทันที

2.2.3 หัวพ่นไฟ

จะมี 2 หัว ติดตั้งตรงข้ามกันในเบ้าเตาแบบเอียงศูนย์ แต่ละหัวจะทำหน้าที่พ่นความร้อนที่ได้จากแก๊สหุงต้มผสมอากาศ ส่วนแก๊สออกซิเจนสามารถใส่เข้าไปที่หัวพ่นไฟได้เช่นกัน เพื่อเพิ่มความร้อนในเบ้าเตาให้สูงขึ้น

2.2.4 ชุดควบคุมอุณหภูมิ

หลังจากที่ตัวอ่านอุณหภูมิ อ่านอุณหภูมิภายในเบ้าเตาแล้วจะส่งสัญญาณมาที่ชุดควบคุมอุณหภูมิ เพื่อสั่งให้ชุดควบคุมการเปิด-ปิดวาล์ว ซึ่งควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วหมายเลข 1 (วาล์วอะแกรมของระบบแก๊ส) สำหรับอากาศและวาล์วหมายเลข 2 สำหรับแก๊สหุงต้ม (LPG) เพื่อให้ได้อุณหภูมิตามโปรแกรมที่ตั้งไว้ก่อนทำการเผาผลาญ

2.2.5 ชุดวัดอุณหภูมิ

จะมี 2 ชุด คือ เทอร์โมคัปเปิลสำหรับอ่านอุณหภูมิในช่วงต่ำ และไพโรมิเตอร์สำหรับอ่านอุณหภูมิในช่วงสูง

2.2.6 ชุดวิเคราะห์แก๊สหรือชุดควบคุมบรรยากาศของการเผา

เป็นชุดวิเคราะห์ปริมาณแก๊สออกซิเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ (O_2 , CO) ประกอบด้วยหัววัดแก๊สออกซิเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ ทั้งนี้เมื่ออ่านปริมาณของแก๊สออกซิเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ในขณะนั้น ๆ ได้แล้ว จะส่งผลไปยังชุดวิเคราะห์แก๊สออกซิเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ เพื่อสั่งให้เปิด-ปิดวาล์วแก๊สออกซิเจนหมายเลข 3 ให้ได้ปริมาณออกซิเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ หรือบรรยากาศที่เบ้าเผาผลาญตามที่ต้องการหรือตามที่กำหนดไว้

2.2.7 คอนกรีตทนไฟ

เพื่อใช้ในการหล่อเป็นเบ้าเตา ซึ่งมี 4 ชั้นด้วยกัน แต่ละชั้นจะใช้คอนกรีตทนไฟชนิดต่างกัน โดยชั้นในสุดจะต้องใช้คอนกรีตที่ทนไฟได้สูงไม่น้อยกว่า 1800°C ซึ่งงานวิจัยนี้จะใช้คอนกรีตทนไฟตราช้าง Cast-18 ผนึ่งของเบ้าเตาทำด้วยเหล็กอ่อนหนา 6 มิลลิเมตร ขนาดของเบ้ามีเส้นผ่านศูนย์กลาง 82 เซนติเมตร สูง 85 เซนติเมตร โดยช่องว่างของเบ้าเตาสำหรับวางถ้วยเผาพลอยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 24 เซนติเมตร และสูง 38 เซนติเมตร ในการนำถ้วยเผาพลอยเข้าไปในเบ้าเตา ทำได้โดยการเลื่อนที่วางถ้วยเผาพลอยจากทางคอนล่าง ซึ่งขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์กระแสสลับ

2.2.8 เครื่องทำน้ำเย็น

ขนาด 10 คัน ใช้ระบายความร้อนที่หัวพ่นไฟ เพื่อมิให้หัวพ่นไฟหลอมละลาย

2.2.9 เครื่องปั๊มอากาศ

ใช้สำหรับอัดอากาศเพื่อช่วยในการควบคุมการเปิด-ปิดวาล์ว

2.2.10 ชุดขับเคลื่อน

เป็นมอเตอร์กระแสสลับแบบ 3 เฟส ขนาด 0.4 กิโลวัตต์ ความเร็วรอบ 180 รอบ/นาที ใช้ในการเลื่อนที่วางถ้วยเผาพลอยขึ้น-ลงจากทางคอนล่างของเบ้าเตา

2.2.11 เครื่องอัดอากาศ

สำหรับอัดอากาศเข้าไปผสมกับแก๊สหุงต้ม

2.2.12 ระบบแก๊ส

แก๊สที่ใช้ คือ แก๊สหุงต้ม ซึ่งจะมี 2 ชุด ๆ ละ 5 ถัง รวม 10 ถัง

2.2.13 ระบบออกซิเจน

ประกอบด้วย ถังแก๊ส ออกซิเจน จำนวน 2 ชุด ๆ ละ 6 ถัง รวม 12 ถัง

2.2.14 วาล์วป้องกันอุบัติเหตุ

เป็นโซลินอยด์วาล์ว (Solenoid valves) จำนวน 2 ตัว ที่ต่ออยู่กับท่อแก๊สหุงต้ม แต่ละตัวจะจ่ายแก๊สให้แก่หัวพ่นไฟแต่ละชุด โซลินอยด์วาล์วนี้นี้ควบคุมการทำงานโดยชุดควบคุมการจุดไฟ ถ้าชุดตรวจจับเปลวไฟตรวจพบว่าไม่มีเปลวไฟเกิดขึ้นในหัวพ่นไฟ ชุดตรวจจับเปลวไฟจะส่งสัญญาณไปยังชุดควบคุมการจุดไฟ เพื่อสั่งให้โซลินอยด์วาล์วทั้ง 2 ตัวปิดเพื่อตัดการจ่ายเชื้อเพลิงทันที

2.2.15 วาล์วควบคุมปริมาตรการไหลของแก๊ส

สำหรับวาล์วที่ใช้ในการควบคุมปริมาตรการไหลของแก๊สหุงต้มและออกซิเจนจะเป็นไดอะแฟรมวาล์ว (diaphragm valves) ส่วนวาล์วที่ใช้ควบคุมปริมาตรการไหลของอากาศเป็น บัตเตอร์ฟลายวาล์ว (butterfly valves)

บทที่ 3

การคำนวณและการออกแบบ

3.1 การคำนวณและการออกแบบเตาไฟฟ้า

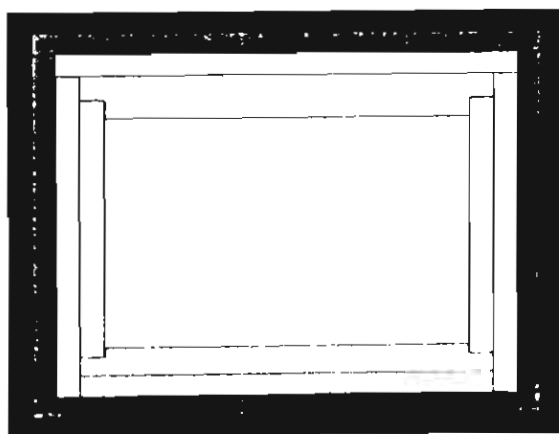
ในการออกแบบเตาไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ เราจะใช้หลักการของการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) ซึ่งมีทั้งการนำ (Conduction) และการแผ่รังสี (Radiation) ของความร้อน แต่ในการคำนวณการสูญเสียความร้อนออกจากผนังเตา เกิดขึ้นจากการนำความร้อนผ่านเบ้าเตาเกือบทั้งหมด ดังนั้นในการคำนวณการสูญเสียความร้อนจะคิดเฉพาะการนำความร้อนเท่านั้น

เราจะได้กำหนดคุณสมบัติของเตาที่ต้องการสร้าง ดังนี้

1. มีอุณหภูมิใช้งานในช่วงระหว่าง $1000-1800^{\circ}\text{C}$
2. สามารถเก็บกักความร้อนได้ดี และมีการสูญเสียความร้อนสู่บรรยากาศน้อย
3. มีน้ำหนักและขนาดที่เหมาะสมในการใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเผาลอย
4. มีความสามารถในการควบคุมอุณหภูมิใช้งานได้ตามต้องการ
5. วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้สามารถหาซื้อได้ภายในประเทศในราคาที่เหมาะสม

จากข้อกำหนดดังกล่าวข้างต้น เรานำคุณสมบัติของวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างเตาไฟฟ้า ดังที่กล่าวแล้วในหัวข้อ 2.1 มาทำการคำนวณและออกแบบให้เหมาะสมกับการใช้งาน

เนื่องจากว่าแผ่นฉนวนกันความร้อนชั้นในสุด (ดังที่กล่าวแล้วในหัวข้อ 2.1) เป็นอะลูมินา SALI-2 ของบริษัท Zircar Products ซึ่งบริษัทได้ผลิตแผ่นที่มีขนาด 9 นิ้ว $\times$ 12 นิ้วหนา 1 นิ้ว และ 2 นิ้ว ดังนั้นขนาดของเบ้าเตาจะได้จากการนำแผ่นอะลูมินา 6 แผ่น มาประกบซ้อนกัน โดยให้ได้ปริมาตรภายในมากที่สุด ซึ่งรูปที่ 3.1 เป็นภาพตัดขวางของเบ้าเตาแสดงให้เห็นแผ่นฉนวนกันความร้อนแต่ละชั้น โดยขนาดของเบ้าเตาในแต่ละชั้น แสดงในภาคผนวก (ก)



รูปที่ 3.1 ภาพตัดขวางของเบ้าเตาไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.1 และภาคผนวก (ก) เราจะทราบขนาดของแบตเตอรี่ในแต่ละชั้น ในขั้นตอนต่อไปจะเป็นการคำนวณหาความร้อนที่จะสูญเสียจากตัวเตา เพื่อจะพิจารณาว่าผนังเตาที่ใช้สามารถกันความร้อนสูญเสียได้ดีเพียงใด จะต้องใช้ลดความร้อนจำนวนกี่เส้น และแต่ละเส้นมีกำลังวัตต์เท่าใด

3.1.1 การคำนวณหาความร้อนที่สูญเสียจากเตา

ในการคำนวณหาความร้อนที่สูญเสียจากเตา จะพิจารณาเฉพาะการสูญเสียความร้อน เนื่องจากการนำความร้อนเท่านั้น โดยที่การนำความร้อน (Q) ที่เกิดขึ้น คำนวณได้จากสมการ [9]

$$Q = k A \frac{\Delta T}{L} = \frac{\Delta T}{R}$$

ในเมื่อ k = สภาพนำความร้อน (Thermal Conductivity) ของแผ่นฉนวน
กันความร้อน ($\text{W/m}^\circ\text{K}$)

A = พื้นที่ผิวของแผ่นฉนวนกันความร้อน

L = ความหนาของแผ่นฉนวนกันความร้อน

ΔT = ความแตกต่างของอุณหภูมิที่ใช้งานภายในเตากับอุณหภูมิห้อง

R = ความต้านทานการนำความร้อนของแผ่นฉนวนกันความร้อน
 $= \frac{L}{kA}$

จากการคำนวณหาความต้านทานการนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนแต่ละชั้น และ
ทุก ๆ ด้าน จะได้ความต้านทานรวม

$$R = 0.697 \quad \text{Ohm}$$

(รายละเอียดการคำนวณอยู่ในภาคผนวก (ข))

ถ้ากำหนดให้อุณหภูมิสูงสุดภายในเตา 1800°C

อุณหภูมิห้อง 30°C

$$\Delta T = (1800 - 30) = 1770^\circ\text{C}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad Q = \frac{\Delta T}{R} = \frac{1770}{0.697} = 2539 \quad \text{W}$$

นั่นคือ ถ้าเราใช้งานเตาที่อุณหภูมิ 1800°C จะมีความร้อนสูญเสียจากตัวเตาประมาณ
2539 W

การคำนวณหาจำนวนลวดความร้อน [4,5]

สิ่งที่เราจะต้องทราบก่อนการคำนวณหาจำนวนลวดความร้อน คือ

- 1) อุณหภูมิภายในเตาที่ต้องการ
- 2) กำลังวัตต์ของเตา
- 3) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดความร้อน
- 4) ขนาด L_c , L_u , a ของลวดความร้อน

ในการเลือกลวดความร้อน จะต้องมีการพิจารณาถึง surface load ของลวดด้วยซึ่งจะเกี่ยวข้องกับการออกแบบเตา, สภาพะของการใช้งาน, สภาพบรรยากาศ และแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยจำเป็นที่จะต้องลดค่าของ surface load ลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิภายในเตาให้สูงขึ้น แต่ไม่มากกว่าค่าอุณหภูมิใช้งานสูงสุด (1800°C) นอกจากนี้ อุณหภูมิที่บริเวณขั้วต่อไฟฟ้า (connection) ของ terminal จะต้องไม่เกิน 300°C ดังนั้น จะต้องมีการจำกัดกระแสไฟฟ้าเพื่อให้ความร้อนที่เกิดขึ้นที่ terminal ไม่ทำให้เกิดการ overheat ขึ้นที่ขั้วต่อ โดยกระแสไฟฟ้าสูงสุดสำหรับการใช้งานอย่างต่อเนื่องของลวดความร้อน Kanthal Super 1900 ก็คือ 200 A

เพื่อความสะดวกในการคำนวณต่อไป จะขอกำหนดสัญลักษณ์ของเทอมต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณค่าต่าง ๆ สำหรับลวดความร้อน ดังต่อไปนี้

- L_u = ความยาวส่วน terminal ของลวดความร้อน (Terminal length), mm
- L_c = ความยาวส่วน heating zone ของลวดความร้อน (Heating zone length), mm
- a = ระยะห่างระหว่าง shank ของลวดความร้อน (Distance between shanks), mm
- d = เส้นผ่านศูนย์กลางของ heating zone (Heating zone diameter), mm
- c = เส้นผ่านศูนย์กลางของ terminal (Terminal diameter), mm
- g = ความยาว taper part ของลวดความร้อน (Taper part length), mm
- f = ความยาวของขั้วต่อไฟฟ้าของลวดความร้อน (Terminal connection length), mm
- L_H = ความยาวทั้งหมดของ heating zone (Total rod-length in heating zone), mm
- L_T = ความยาวทั้งหมดของ terminal (Total length of terminals), m
- P = กำลังวัตต์รวมทั้งหมดของลวดความร้อนที่ใช้ภายในเตา (Total power), kW
- P_e = กำลังวัตต์ของลวดความร้อนแต่ละเส้น (Power per element), Watt
- U_e = ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อเส้นลวดความร้อน (Voltage per element), Volt
- I = กระแสไฟฟ้าที่ใช้สำหรับลวดความร้อน (Current), Amp
- R_h = ความต้านทานที่อุณหภูมิสูงต่อเส้นลวดความร้อน (Hot resistance per element), Ohm

R_{Lc} = ความต้านทานรวมของ heating zone (Total heating zone resistance), Ohm

R_{Lu} = ความต้านทานรวมของ terminal (Total terminal resistance), Ohm

r_c = ความต้านทานต่อความยาวของ heating zone (Heating zone resistance), Ohm/m

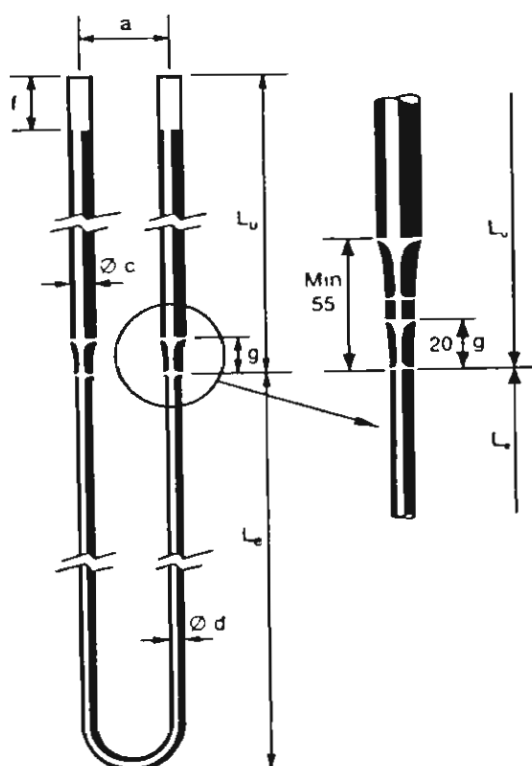
r_u = ความต้านทานต่อความยาวของ terminal (Terminal resistance), Ohm/m

t = อุณหภูมิที่ผิวของลวดความร้อน (Temperature of the heating zone), $^{\circ}\text{C}$

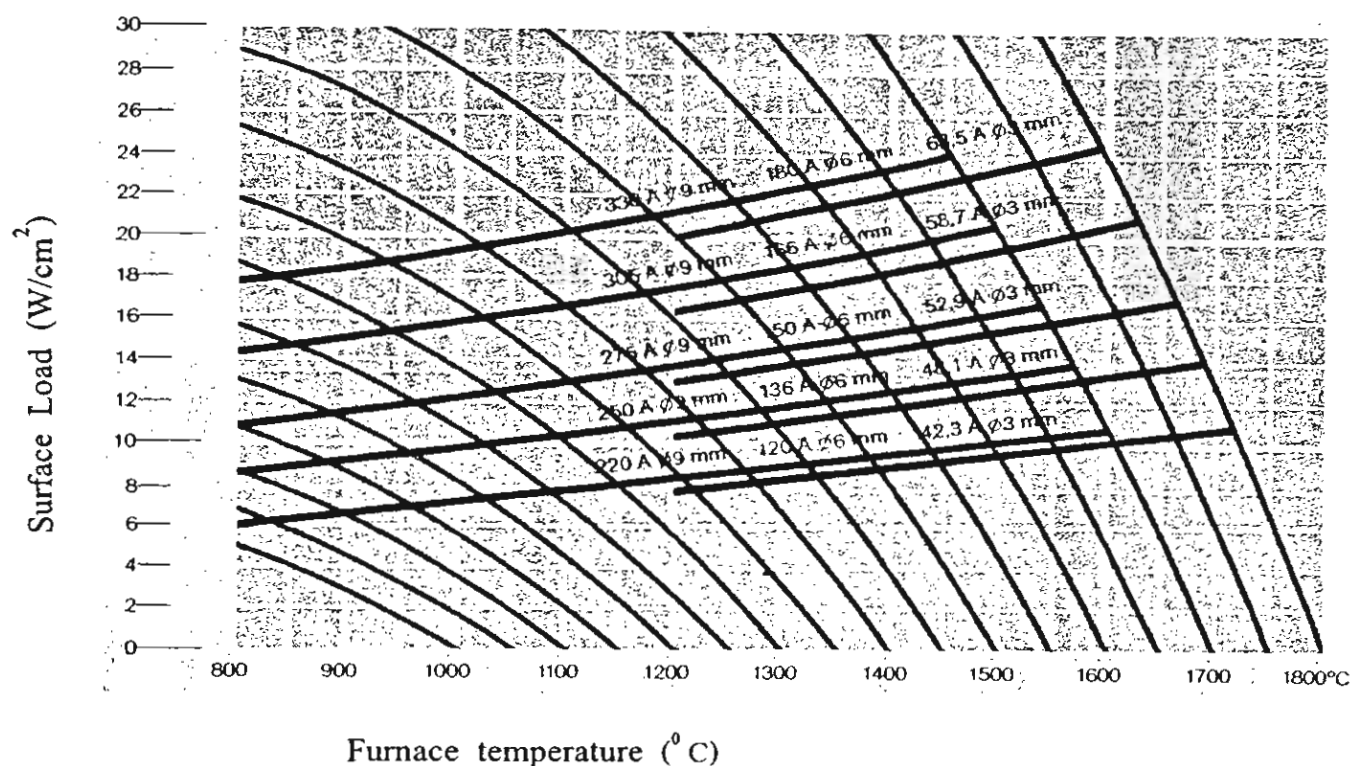
A = พื้นที่ทั้งหมดของ heating zone (Total surface of the heating zone), cm^2

p = ค่า surface load ที่ผิวของ heating zone (Surface load of the heating zone), W/cm^2

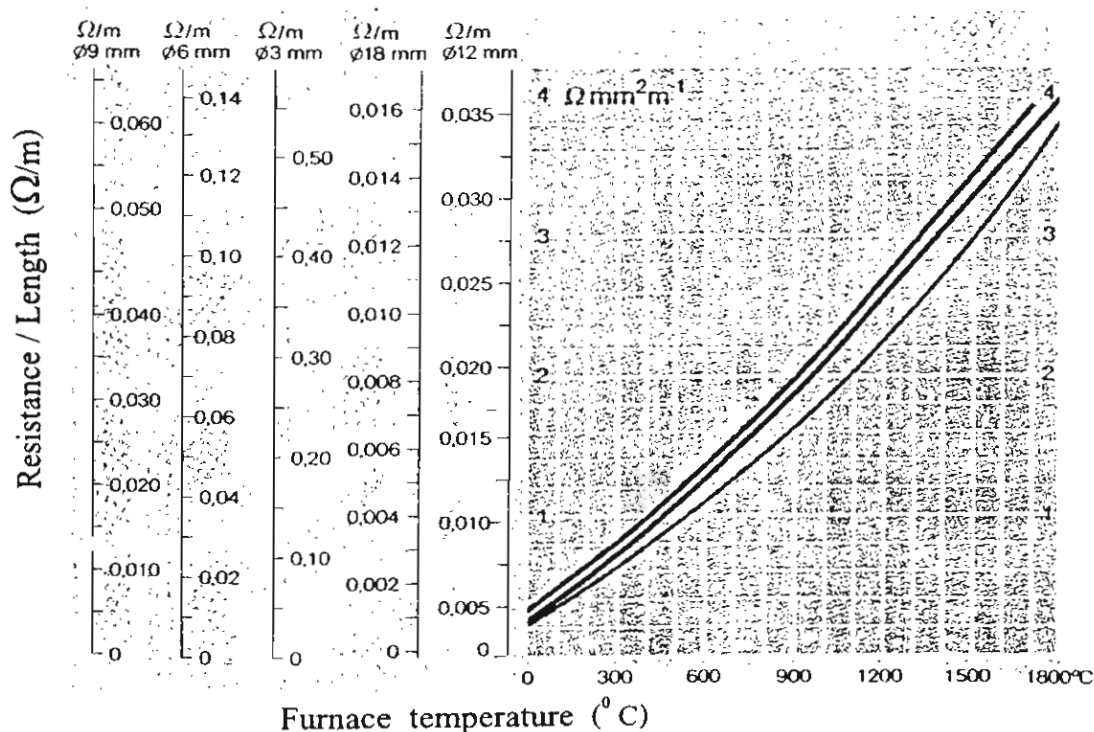
n = จำนวนของลวดความร้อนที่ใช้ทั้งหมด (Number of elements)



เนื่องจากลวดความร้อนของบริษัท KANTHAL มี 3 ขนาดด้วยกัน ดังที่กล่าวไว้แล้วในตารางที่ 2.1 แต่ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ลวดความร้อนชนิด Kanthal Super 1900 ขนาด 6/12 mm โดยที่จะมีค่า $a = 50 \text{ mm}$, $c = 12 \text{ mm}$, $d = 6 \text{ mm}$, $f = 40 \text{ mm}$ และ $g = 20 \text{ mm}$



รูปที่ 3.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเตากับค่า Surface load ของลวด Kanthal ชนิดต่าง ๆ และขนาดต่าง ๆ ที่ค่ากระแสต่าง ๆ กัน (เส้นบนเป็นลวด Super ST,N เส้นล่างเป็นลวด Super 33)



รูปที่ 3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเตากับค่าความต้านทานต่อหนึ่งหน่วยความยาวของลวด Kanthal ชนิดต่าง ๆ และขนาดต่าง ๆ (เส้นบนเป็นลวด Super ST,N เส้นกลาง Super 33 และเส้นล่าง Super 1900)