

ตารางที่ 3.1 ค่าความต้านทานต่อหนึ่งหน่วยความยาวของลวด

Kanthal Super ST, N และ Super 33

Hot resistance of KANTHAL SUPER rods									
°C	KANTHAL SUPER ST and N				KANTHAL SUPER 33				
	6 mm $\varnothing$ r_s Ω/m	9 mm $\varnothing$ r_s Ω/m	12 mm $\varnothing$ r_u Ω/m	18 mm $\varnothing$ r_u Ω/m	3 mm $\varnothing$ r_s Ω/m	6 mm $\varnothing$ r_s, r_u Ω/m	9 mm $\varnothing$ r_s Ω/m	12 mm $\varnothing$ r_u Ω/m	18 mm $\varnothing$ r_u Ω/m
20	0.0106	0.00472	0.00265	0.00118	0.0396	0.00990	0.00440	0.00248	0.00110
100	0.0156	0.00691	0.00371	0.00173	0.0552	0.0138	0.00613	0.00345	0.00153
200	0.0216	0.00959	0.00539	0.00246	0.0764	0.0191	0.00849	0.00477	0.00212
300	0.0283	0.0126	0.00707	0.00314	0.100	0.0251	0.0112	0.00628	0.00279
400	0.0354	0.0157	0.00893	0.00393	0.126	0.0315	0.0140	0.00787	0.00350
500	0.0424	0.0189	0.0106	0.00472	0.153	0.0382	0.0170	0.00955	0.00424
600	0.0495	0.0220	0.0124	0.00556	0.181	0.0453	0.0201	0.0113	0.00503
700	0.0566	0.0252	0.0141	0.00629	0.209	0.0523	0.0233	0.0131	0.00582
800	0.0640	0.0285	0.0160	0.00711	0.238	0.0594	0.0264	0.0149	0.00666
900	0.0718	0.0319	0.0179	0.00798	0.267	0.0668	0.0297	0.0167	0.00743
1000	0.0792	0.0352	0.0198	0.00880	0.297	0.0743	0.0330	0.0186	0.00825
1100	0.0867	0.0387			0.328	0.0821	0.0365		
1200	0.0948	0.0421			0.361	0.0902	0.0401		
1300	0.103	0.0459			0.393	0.0983	0.0437		
1400	0.112	0.0499			0.426	0.106	0.0473		
1500	0.121	0.0538			0.460	0.115	0.0511		
1600	0.130	0.0577			0.495	0.124	0.0550		
1700	0.140	0.0621			0.529	0.132	0.0588		
1800					0.566	0.141	0.0628		

ดังนี้

ในการคำนวณหาค่าของเทอมต่าง ๆ สำหรับลวดความร้อนแต่ละเส้น มีขั้นตอนตามลำดับ

- (1) กำลังวัตต์ของลวดความร้อนแต่ละเส้น (P_c) ซึ่งจะมีค่าเท่ากับกำลังวัตต์รวม (P) ที่ต้องการหารด้วยจำนวนของเส้นลวดความร้อน (n) นั่นคือ

$$P_c = (P \times 1000) / n \quad \text{W} \quad (3.1)$$

- (2) ค่า surface load (p) ของแต่ละเส้นลวดความร้อน โดยจะคิดค่า 10% ของค่า p จะสูญเสียไปในการเกิดความร้อนขึ้นที่ terminal เพราะฉะนั้นอีก 90% ของ p_c จะถูกนำมาใช้ในการคำนวณหา surface load ของ heating zone ซึ่งจะได้ว่า

Total rod-length (L_H) ของ heating zone คือ

$$L_H = (2L_c - d + 0.57a) / 1000 \quad \text{m} \quad (3.2)$$

ก็จะได้ Total surface (A) ของ heating zone คือ

$$A = (2L_c - d + 0.57a) \pi d / 100 = 10L_H \pi d \quad \text{W/cm}^2 \quad (3.3)$$

ดังนั้น surface load (p) ของ heating zone คือ

$$p = 90p_c / (2L_c - d + 0.57a) \pi d = (0.9p_c) / A \quad \text{W/cm}^2 \quad (3.4)$$

- (3) จากรูปที่ 3.2 (เส้นตรงเส้นล่าง) จะเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเตา, อุณหภูมิของลวดความร้อน, surface load และกระแสไฟฟ้าสำหรับลวดขนาดต่าง ๆ กัน ดังนั้นเมื่อทราบอุณหภูมิของเตาที่ต้องการใช้งาน และ surface load ก็จะสามารถหาค่ากระแสไฟฟ้า (I) และอุณหภูมิผิวของลวดความร้อน (heating zone, t) ได้ ซึ่งจะมีค่ามากกว่าอุณหภูมิภายในเตา ซึ่งอ่านได้จากเครื่องวัดและควบคุมอุณหภูมิภายในเตา

- (4) การหาค่าความต้านทานไฟฟ้าของลวดความร้อน ซึ่งจะแบ่งออกเป็น

ก) จากค่าความต้านทานต่อหนึ่งหน่วยความยาวของ heating zone (r_c) ซึ่งมีหน่วยเป็น Ohm/m ซึ่งจะหาได้โดยอาศัยเส้นกราฟในรูปที่ 3.3 (เส้นล่าง) และตารางที่ 3.1 โดยจะต้องทราบ อุณหภูมิของ heating zone และขนาดของลวดความร้อนที่ใช้และจากค่า L_H ที่คำนวณได้จากสมการ (3.2) ดังนั้นก็จะสามารถหาค่าความต้านทานรวมของ Heating zone (R_{Lc}) ได้จากความสัมพันธ์ที่ว่า

$$R_{Lc} = L_H \cdot r_c \quad \text{Ohm} \quad (3.5)$$

ข) จากค่าความต้านทานต่อหนึ่งหน่วยความยาวของ terminal (r_u) ที่มีหน่วยเป็น Ohm/m ซึ่งจะหาค่าได้จากรูปที่ 3.3 เช่นกัน โดยอุณหภูมิของ terminal จะมีค่าประมาณ

$$(t/2) + 100 \text{ } ^\circ\text{C}$$

เมื่อ t คือ อุณหภูมิของ heating zone

และจะหาค่าความยาวของ terminal ทั้งหมด (L_T) ได้ว่า

$$L_T = 2L_u / 1000 \quad \text{m} \quad (3.6)$$

ดังนั้น ค่าความต้านทานของ terminal รวม (R_{Lu}) จะหาได้จาก

$$R_{Lu} = (2L_u / 1000) \cdot r_u \quad \text{Ohm} \quad (3.7)$$

(เมื่อ L_u มีหน่วย mm และ r_u มีหน่วย Ohm/m)

ค) ความต้านทานรวมของลวดความร้อน (R_t) คือ

$$R_t = R_{Le} + R_{Lu} \quad \text{Ohm} \quad (3.8)$$

(5) ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อเส้นลวดความร้อน (U_e) จะหาค่าได้เมื่อทราบค่ากระแสไฟฟ้า (I) จากข้อ (3) และ ความต้านทานรวมของลวดความร้อน (R_t) จากข้อ (4) โดยอาศัยความสัมพันธ์ ดังนี้

$$U_e = I \cdot R_t \quad \text{Volt} \quad (3.9)$$

ในงานวิจัยนี้ ได้กำหนดคุณสมบัติของเตา ดังนี้

(1) อุณหภูมิภายในเตาประมาณ $1800 \text{ } ^\circ\text{C}$

(2) กำลังวัตต์ของเตาประมาณ 2400 W

(3) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดความร้อน 6/12 mm

(4) L_e = ความยาวของ heating zone = 160 mm

L_u = ความยาวของ terminal = 200 mm

a = ระยะห่างระหว่าง shank ของลวดความร้อน

= 50 mm

ดังนั้น จากรูปที่ 3.2 สามารถคำนวณค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้

(1) ที่อุณหภูมิภายในเตา (Furnace temperature) 1800°C จะได้ค่า surface load ของ
 ลวดความร้อน (p) เท่ากับ 7 W/cm^2

(2) อ่านค่ากระแสของลวดความร้อนได้ประมาณ 110 A

(3) อ่านค่าอุณหภูมิของลวดความร้อนได้ประมาณ 1800°C

(4) จากรูปที่ 3.3 ที่อุณหภูมิ 1700°C

$$\text{จะได้ } r_c = 0.132 \quad \text{Ohm/m}$$

$$r_u = 0.035 \quad \text{Ohm/m}$$

(5) จากสมการ (3.2) คำนวณ L_H ได้

$$L_H = (2 L_c - d + 0.57a) / 1000 \quad \text{m}$$

$$= 342 / 1000 \quad \text{m}$$

(6) คำนวณหา R_{Lc} จากสมการ (3.5)

$$\begin{aligned} R_{Lc} &= L_H r_c \\ &= (342 / 1000 \text{ m}) (0.13 \text{ Ohm/m}) \\ &= 0.0445 \quad \text{Ohm} \end{aligned}$$

คำนวณหา R_{Lu} จากสมการ (3.7)

$$\begin{aligned} R_{Lu} &= (2 R_{Lu} / 1000 \text{ m}) (0.035 \text{ Ohm / m}) \\ &= 0.014 \quad \text{Ohm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } R_i &= R_{Lc} + R_{Lu} \\ &= 0.0445 + 0.014 = 0.0585 \quad \text{Ohm} \end{aligned}$$

(7) คำนวณหาความต่างศักย์ไฟฟ้าของลวดความร้อนแต่ละเส้น

$$\begin{aligned} U_c &= I R_i \\ &= 110 \times 0.0585 = 6.4 \quad \text{V} \end{aligned}$$

(8) คำนวณกำลังของลวดความร้อนแต่ละเส้น

$$\begin{aligned}
 p_c &= U_c I \\
 &= 6.4 \times 110 = 704 \quad \text{W}
 \end{aligned}$$

(9) คำนวณหาจำนวนเส้นของลวดความร้อน

เนื่องจากเราได้กำหนดให้กำลังของเตา (p) เท่ากับ 2400 W

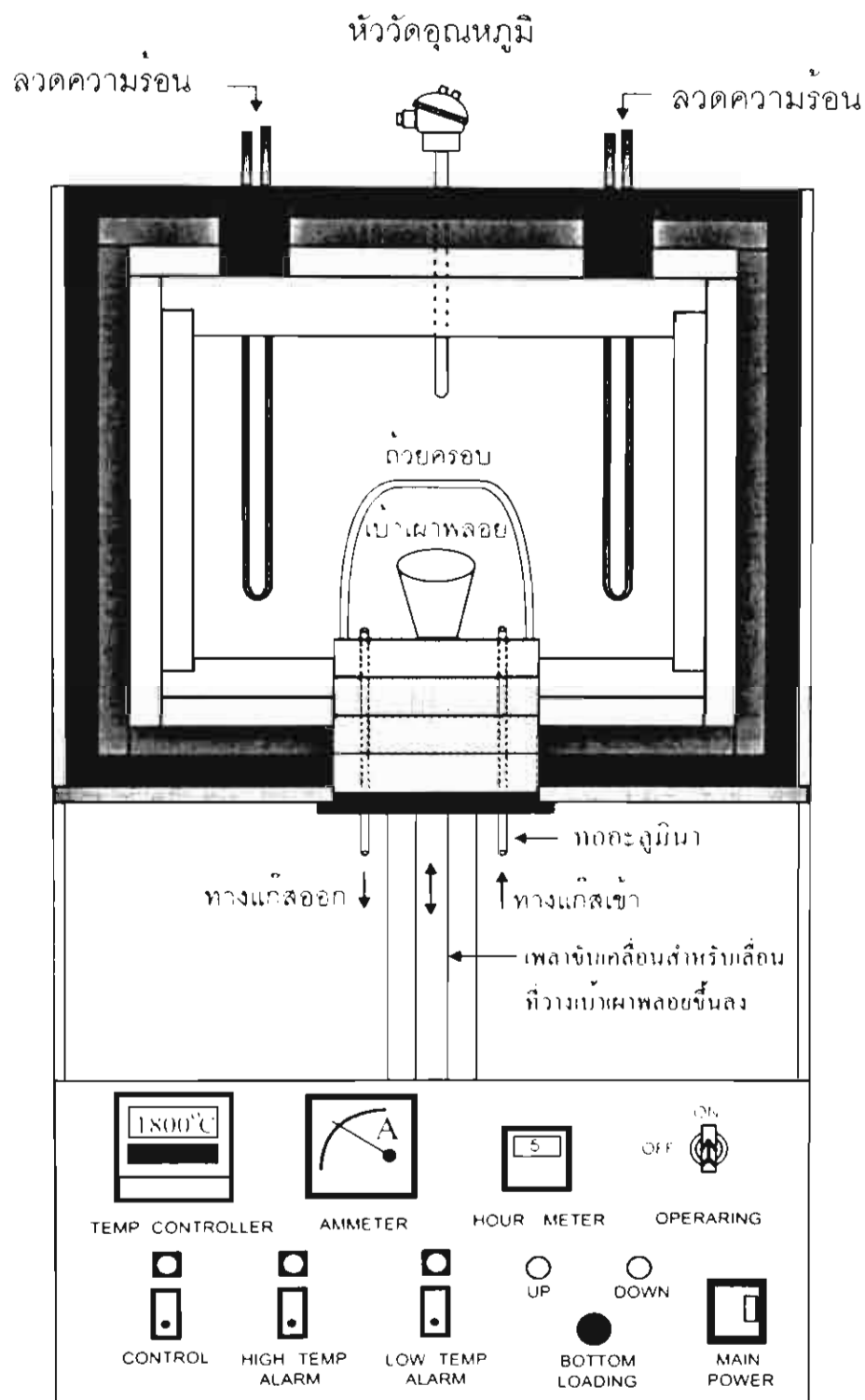
$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้นจำนวนเส้นของลวดความร้อน } (n) &= 2400 / 704 \\
 &\approx 4 \quad \text{เส้น}
 \end{aligned}$$

สรุปรายละเอียดของเตาไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณ

จากการคำนวณตามขั้นตอนดังกล่าวข้างต้น ทำให้เราทราบข้อมูลต่าง ๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในการสร้างเตาไฟฟ้า ซึ่งสรุปได้ดังนี้

1. ขนาดของเบ้าเตาหรือปริมาตรชั้นในสุด กว้าง × ยาว × สูง = 10"×8"×8"
2. อุณหภูมิสูงสุดภายในเตา 1800 °C
3. ลวดความร้อนที่ใช้เป็นลวด Kanthal Super 1900 จำนวน 4 เส้น แต่ละเส้นมีความยาวของ heating zone (L_c) เท่ากับ 160 mm และความยาวของ terminal (L_u) เท่ากับ 200 mm ซึ่งจากเอกสารอ้างอิงหมายเลข 4 จะได้ว่าลวดความร้อนแต่ละเส้นมีกำลัง 619 W และแรงดันไฟฟ้า 6.2 V ดังนั้นถ้าใช้ลวดความร้อน 4 เส้น จะได้กำลังของเตา 2476 W ซึ่งจะเห็นว่าใกล้เคียงกับค่าความร้อนที่สูญเสียจากเบ้าเตาซึ่งได้จากการคำนวณ คือ 2539 W เมื่อใช้งานที่ 1800 °C
4. จากลวดความร้อนที่เราเลือกใช้งานข้างต้น ค่อยไปต้องตรวจสอบคุณสมบัติของลวดนี้ว่า แต่ละเส้นต้องการกำลังไฟฟ้าขนาดเท่าใด ซึ่งปรากฏว่าแต่ละเส้นต้องการแรงดันไฟฟ้าประมาณ 6 V กระแสประมาณ 100 A ดังนั้น 4 เส้น ต้องใช้แรงดันไฟฟ้าประมาณ 24 V ในการออกแบบชุดจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่ลวดความร้อน จึงได้ออกแบบหม้อแปลงขนาด 24 V, 150 A (กำลัง 3.6 kW)
5. เครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบตั้งโปรแกรมได้ ได้เลือกใช้ผลิตภัณฑ์ของบริษัท Shimaden ประเทศญี่ปุ่น ซึ่งมีความสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ละเอียดถึง 0.1% และสามารถตั้งโปรแกรมรูปแบบของการเพิ่มและลดอุณหภูมิของเตาได้ โปรแกรม โปรแกรม 9 ขั้นตอนหรือ 81 จุด

รูปที่ 3.4 แสดงภาพตัดขวางของเตาไฟฟ้าแบบเปิด-ปิดทางคอนล่างที่จะสร้างในงานวิจัยนี้



รูปที่ 3.4 ภาพตัดขวางของเตาไฟฟ้าแบบเปิด-ปิด ทางตอนล่าง

3.2 การออกแบบเตาแก๊ส

เนื่องจากเตาแก๊สที่สร้างในโครงการนี้ เป็นเตาแก๊สที่มีระบบควบคุมการทำงานที่ค่อนข้างซับซ้อนมาก ซึ่งจะมีการควบคุมปริมาณต่าง ๆ ดังนี้

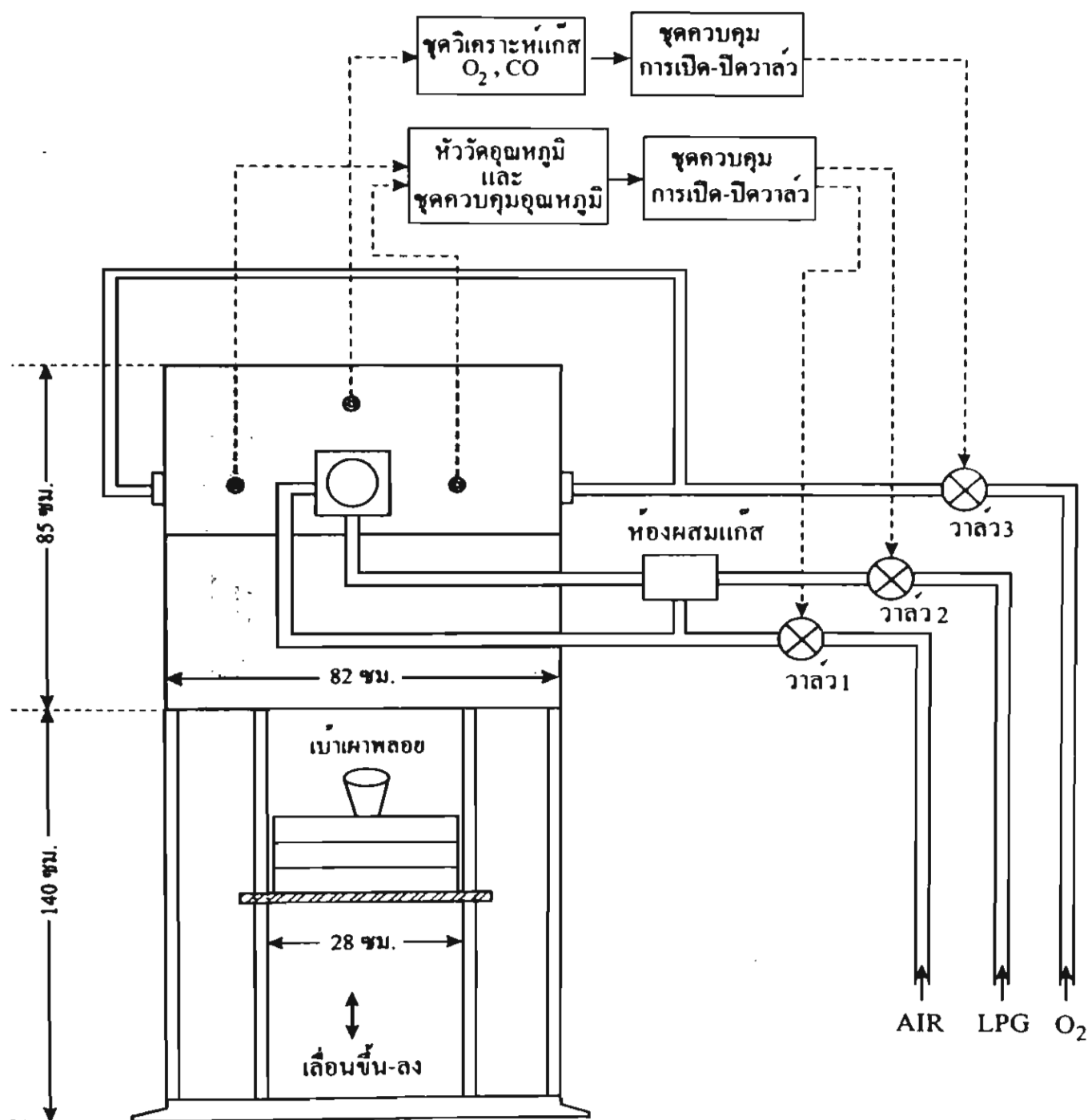
1. อุณหภูมิภายในเตา
2. ปริมาณแก๊สต่าง ๆ ที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผา ได้แก่ แก๊สหุงต้ม (LPG), แก๊สออกซิเจน (O_2) และอากาศ (Air)
3. ปริมาณของแก๊สออกซิเจนที่หลงเหลืออยู่ตรงตำแหน่งที่วางเข้าเผาผลาญ

โดยการควบคุมปริมาณทั้ง 3 ข้อดังกล่าวข้างต้นระบบควบคุมทั้งหมดจะต้องมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน กล่าวคือ ในตอนเริ่มต้นจะต้องทำให้ภายในเตามีอุณหภูมิสูงสุดตามต้องการก่อน หลังจากนั้นต้องตรวจวัดและวิเคราะห์ว่าตรงตำแหน่งที่วางเข้าเผาผลาญ มีปริมาณแก๊สออกซิเจนหลงเหลืออยู่มากน้อยเพียงใด เพื่อควบคุมให้ได้สภาวะการเผาผลาญที่เป็นออกซิเดชัน (oxidation) หรือ รีดักชัน (reduction) ตามที่ต้องการ

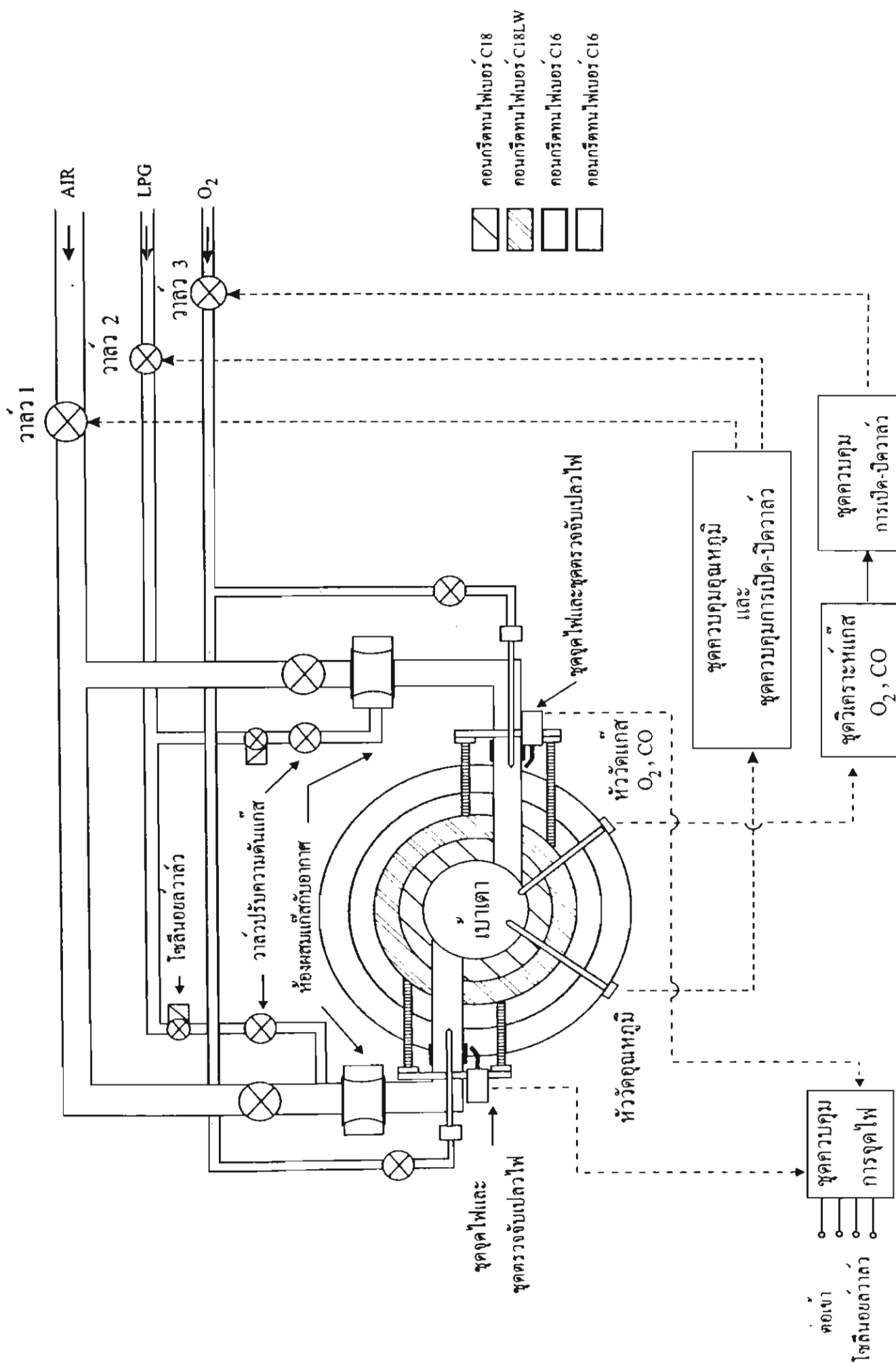
ยิ่งกว่านั้นในการออกแบบเตาแก๊สจะต้องกำหนดคุณลักษณะเฉพาะของเตาแก๊สที่จะสร้างขึ้นมาก่อน ซึ่งโครงการวิจัยนี้ได้กำหนดคุณลักษณะของเตาแก๊สเบื้องต้นดังนี้

- กำหนดอุณหภูมิสูงสุดภายในเตาที่เราต้องการใช้งาน ซึ่งในโครงการวิจัยนี้ คือ $1800^{\circ}C$ และสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง
- มีแก๊สหุงต้ม, ออกซิเจนและอากาศ ช่วยในการเผาไหม้และควบคุมอุณหภูมิด้วยไมโครโปรเซสเซอร์ที่มีความละเอียดประมาณ $\pm 5^{\circ}C$
- สามารถควบคุมบรรยากาศภายในเตาด้วยชุดควบคุมบรรยากาศ หรือชุดวิเคราะห์ปริมาณแก๊สออกซิเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์
- มีระบบความปลอดภัยที่สมบูรณ์

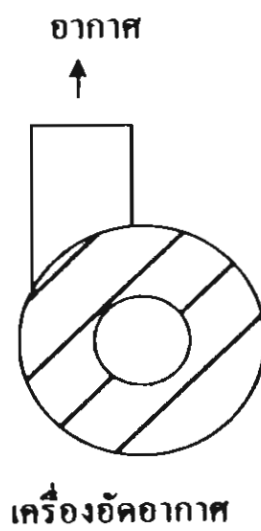
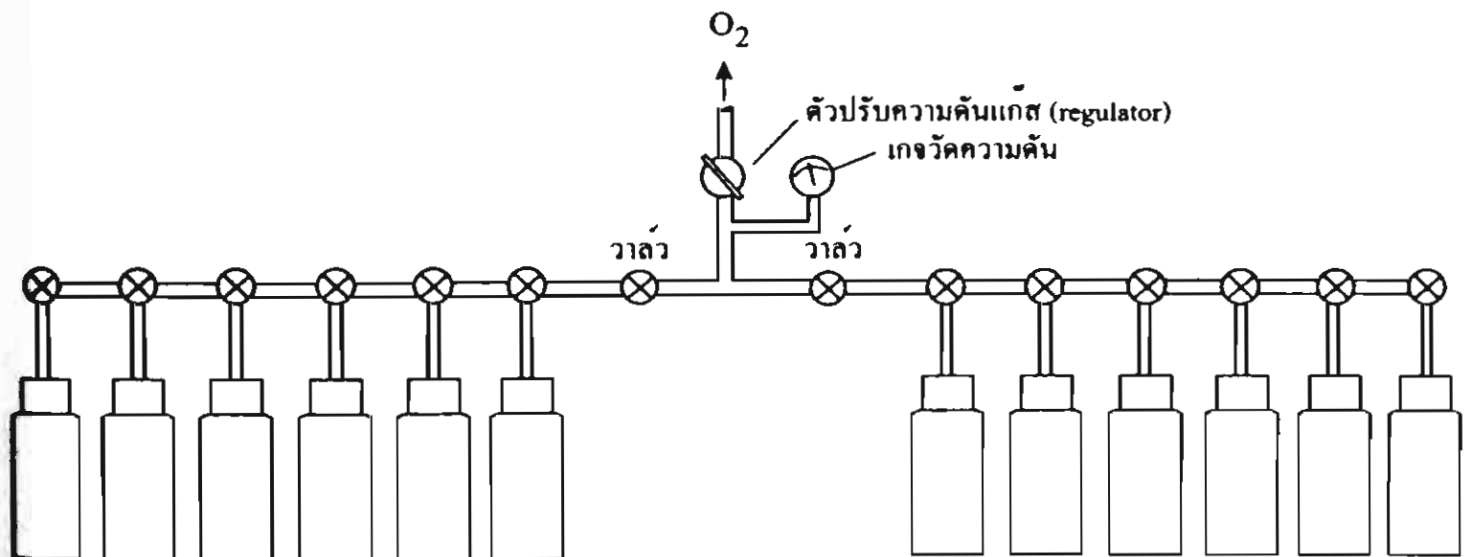
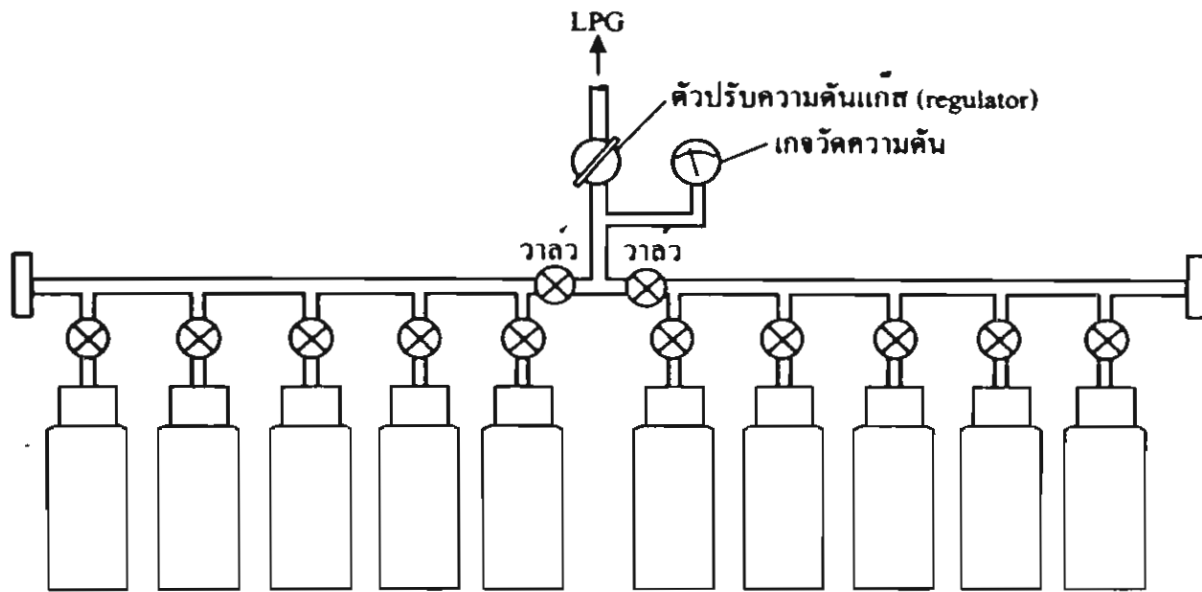
ระบบของเตาแก๊สที่ได้ออกแบบแสดงโดย ไลอะแกรมในรูปที่ 3.5 และแสดงโดยภาพตัดขวางในรูปที่ 3.6 สำหรับระบบแก๊สแสดงโดยไลอะแกรมในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.5 โคอะแกรมแสดงระบบของเตาแก๊ส



รูปที่ 3.6 ภาพตัดขวางของระบบเตาแก๊ส (เมื่อมองทางด้านบน)



รูปที่ 3.7 โคอะแกรมของระบบแก๊ส

บทที่ 4

การสร้างและการทดสอบเตา

4.1 การสร้างเตาไฟฟ้า

ภายหลังจากที่ได้มีการออกแบบ การคำนวณ ตลอดจนการจัดหาอุปกรณ์สำหรับเตาไฟฟ้าเสร็จเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการสร้างส่วนต่างๆ ของเตาไฟฟ้า ซึ่งมีขั้นตอนการสร้างดังต่อไปนี้

4.1.1 ขั้นตอนการสร้างเบ้าเตาไฟฟ้า

จากการออกแบบขนาดของเบ้าเตา ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ก่อนที่จะทำการประกอบผนังเบ้าเตาชั้นต่างๆ เพื่อป้องกันความผิดพลาดในการตัดแผ่นฉนวนกันความร้อนชั้นต่างๆ ของเบ้าเตา เราจะสร้างโมเดลจำลองเบ้าเตา โดยใช้แผ่นโฟมที่มีความหนาและขนาดเท่ากับแผ่นฉนวนจริงของแต่ละชั้นมาตัด แล้วประกอบตามแบบในรูปที่ 3.1 ก็จะได้โมเดลของเบ้าเตาที่มีขนาดเท่ากับเบ้าเตาจริงทุกประการ ดังแสดงในรูปที่ 4.1

จากโมเดลของเตาในรูปที่ 4.1 เราสามารถเห็นการวางและการติดตั้งแผ่นฉนวนแต่ละชั้น การรับน้ำหนักของผนังเตาอย่างชัดเจน ซึ่งง่ายต่อการปรับปรุงเปลี่ยนแปลงรูปแบบ ตลอดจนทั้งการซ่อมแซมผนังเตา และการเปลี่ยนหลอดความร้อนเมื่อชำรุดเสียหาย

ในขั้นตอนต่อไป เป็นการนำแผ่นฉนวนจริงมาตัดทีละชั้น โดยตัดแผ่นฉนวนที่จะประกอบเป็นผนังชั้นนอก แล้วประกอบชั้นนอกให้เสร็จก่อน หลังจากนั้นจะเป็นการตัดแผ่นฉนวนที่จะประกอบเป็นผนังชั้นถัดไป แล้วประกอบเป็นผนังเตา ทำเช่นนี้จนกระทั่งถึงผนังเบ้าเตาชั้นในสุด ก็จะได้ส่วนที่เป็นเบ้าเตาเสร็จสมบูรณ์

4.1.2 ขั้นตอนการสร้างระบบขับเคลื่อน สำหรับเปิด-ปิดเตาทางตอนล่าง

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ lead ball screw พร้อมมอเตอร์ AC ซึ่งกลับทิศทางการหมุนได้ และมีความเร็วรอบ 140 รอบ/นาที

4.1.3 ขั้นตอนการสร้างชุดจ่ายกำลังไฟฟ้าแก่หลอดความร้อน

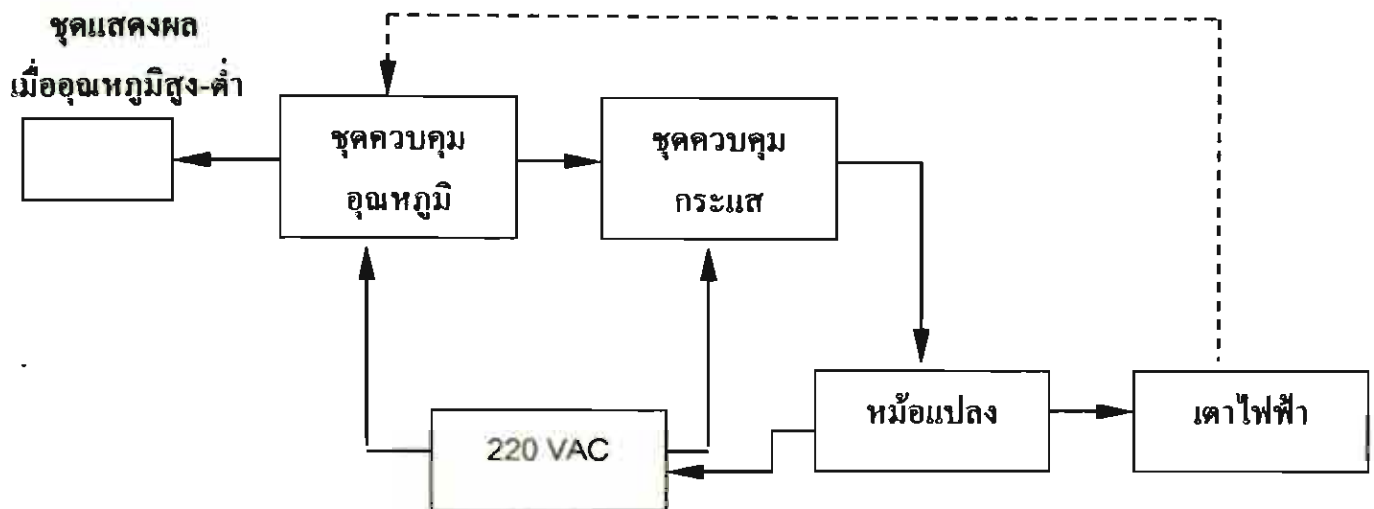
ในขั้นตอนนี้จะเป็นการประกอบชุดควบคุมกระแสที่จ่ายให้แก่หลอดความร้อน ชุดวัดและชุดควบคุมอุณหภูมิ ตลอดจนทั้งระบบไฟฟ้าต่างๆ และชุดแสดงผล เข้าด้วยกัน ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.3 ส่วนไดอะแกรมของวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้า และระบบควบคุมการทำงานของเตา แสดงในภาคผนวก ง.



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายของโมเดลจำลองของเบ้าเตาไฟฟ้าที่สร้างโดยใช้โฟม
โฟมสีแดงจะเป็นส่วนที่เลื่อนขึ้น - ลง จากตอนล่าง



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายของโมเดลจำลองของเบ้าเตาไฟฟ้า
พร้อมระบบขับเคลื่อนและ โครงยึดเคา



รูปที่ 4.3 โค้ดแกรมแสดงหลักการควบคุมการทำงานของเตาไฟฟ้า

4.1.4 ขั้นตอนการประกอบส่วนต่างๆ ของตัวเตาเข้าด้วยกันเป็นเตาไฟฟ้าที่สมบูรณ์
ซึ่งเมื่อประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว จะได้เตาไฟฟ้าแบบเปิด - ปิดตอนล่าง ดังแสดง

ในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายของเตาไฟฟ้าแบบเปิด-ปิดตอนล่างที่สร้างเสร็จสมบูรณ์แล้ว

4.2 การทดสอบการทำงานของเตาไฟฟ้า

ภายหลังจากที่ได้สร้างเตาไฟฟ้าแบบเปิด-ปิดคอนล่างเสร็จเรียบร้อยแล้ว ก็ได้ใช้เตาไฟฟ้านี้ในการเผาผลาญทับทิม ให้แก่โครงการวิจัยเรื่อง การวิจัยและพัฒนาสถานะของการเผาผลาญไฟฟ้า ซึ่งมี รศ.ดร.สุรชาติ ศิริไพศาลพัฒน์ และคณะ แห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เป็นผู้วิจัย ทั้งนี้ เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิ เวลา และบรรยากาศที่เผาผลาญ ต่อการเปลี่ยนแปลงสีของผลาญ ซึ่งจากการใช้เตาไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องตั้งแต่สร้างเสร็จจนถึงปัจจุบันปรากฏว่า ยังใช้งานได้ดี โดยไม่มีส่วนใดของเตาชำรุดเสียหาย ซึ่งอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้งานคือ 1700°C เป็นเวลานาน 20 ชั่วโมง

อย่างไรก็ตามในเวลาต่อมา ทางสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ได้ให้เงินสนับสนุนส่วนหนึ่งสมทบกับเงินอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์เป็นเงิน 600,000 บาท เพื่อให้คณะผู้วิจัยในโครงการนี้ สร้างเตาไฟฟ้าแบบเปิด-ปิดคอนล่างให้แก่คณะผู้วิจัยจากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งคณะผู้วิจัยชุดนี้ได้สร้างและติดตั้งเตาไฟฟ้าแบบเปิด-ปิดคอนล่างใบใหม่ให้แก่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เสร็จเรียบร้อยแล้ว และได้ใช้งานมาอย่างต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบันเป็นเวลานานประมาณ 1 ปี โดยไม่มีส่วนใดของเตาชำรุดเสียหายเช่นกัน สำหรับเตาไฟฟ้าที่สร้างใหม่ให้แก่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ แสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายของเตาไฟฟ้าแบบเปิด-ปิดคอนล่าง ที่สร้างและติดตั้งใช้งานแล้วที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4.3 การสร้างเตาแก๊ส

ภายหลังจากที่ได้ออกแบบและจัดหาวัสดุอุปกรณ์สำหรับเตาแก๊สเสร็จเรียบร้อยแล้ว ขั้นต่อไปจะเป็นการสร้างส่วนต่างๆ ของระบบเตาแก๊ส ซึ่งมีขั้นตอนการสร้าง ดังนี้

4.3.1 ขั้นตอนการสร้างเบ้าเตาแก๊ส

ผนังของเบ้าเตาทำด้วยเหล็กอ่อนหนา 6 มิลลิเมตร เป็นรูปทรงกระบอกสูง 85 เซนติเมตร และมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 82 เซนติเมตร ผนังแต่ละชั้นประกอบด้วยคอนกรีตทนไฟหลายก้อน ซึ่งแต่ละก้อนได้จากการหล่อขึ้นเองในงานวิจัยนี้ เพื่อให้จะได้ความหนาและความโค้งของคอนกรีตที่หล่อแต่ละก้อนตามที่ต้องการ หลังจากหล่อผนังคอนกรีตในรูปก้อนอิฐโค้งแต่ละก้อนแล้ว หลังจากนั้นก็นำมาประกอบซ้อนกันเป็นผนังแต่ละชั้น โดยอิฐที่เรียงต่อกันได้ออกแบบหล่อให้เป็นจิกเหมือนฟันเลื่อยขบกันอยู่ ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดช่องว่างระหว่างการเรียงคอนกรีตเป็นวงกลม โดยอิฐแต่ละก้อนจะมีความหนาประมาณ $2\frac{1}{2}$ นิ้ว นั่นคือผนังแต่ละชั้นจะมีความหนา $2\frac{1}{2}$ นิ้ว ทั้งหมดมี 4 ชั้น จะได้ความหนาของชั้นคอนกรีตทนไฟเท่ากับ 10 นิ้ว อย่างไรก็ตามผนังชั้นในสุดได้ใช้คอนกรีตทนไฟตราช้าง Cast-18 ซึ่งทนความร้อนได้สูง ผนังชั้นที่ 2 เป็น Cast-18 LW ซึ่งมีน้ำหนักเบาและเป็นฉนวนได้ดีกว่า Cast-18 ส่วนผนังชั้นที่ 3 และ 4 เป็น Cast-16 รูปที่ 4.6 เป็นภาพถ่ายของผนังเบ้าเตาแก๊สแต่ละชั้น ขณะที่อยู่ระหว่างการสร้าง

4.3.2 ขั้นตอนการสร้างโครงสร้างเตาและระบบขับเคลื่อน

เนื่องจากเตาแก๊สที่ออกแบบไว้เป็นระบบเปิด-ปิดทางตอนล่าง เหมือนกับเตาไฟฟ้า ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการเอาพลอยออกจากเตาได้ที่อุณหภูมิสูง โดยเตาไม่ชำรุดเสียหาย ในโครงการวิจัยนี้จึงต้องสร้างโครงเหล็ก เพื่อวางเบ้าเตาแก๊สให้สูงจากพื้น 140 เซนติเมตร ส่วนระบบขับเคลื่อนที่วางเบ้าเตาพลอยจากตอนล่างของเบ้าเตา เป็น lead ball screw พร้อมมอเตอร์กระแสสลับแบบ 3 เฟสขนาด 0.4 กิโลวัตต์ และมีความเร็วรอบ 180 รอบ/นาที รูปที่ 4.7 แสดงโครงสร้างเตาและระบบขับเคลื่อน

4.3.3 ขั้นตอนการติดตั้งหัวพันไฟ ชุดจุดไฟและชุดตรวจจับเปลวไฟ เข้ากับเบ้าเตา

จะต้องเจาะเบ้าเตาให้ได้ขนาดเท่ากับขนาดของหัวพันไฟ แล้วสวมท่อเซรามิกให้เป็นช่องทะลุเข้าไปถึงภายในช่องว่างของห้องเผา (ดูไดอะแกรมในรูปที่ 3.6) ทำการติดตั้งหัวพันไฟ พร้อมชุดจุดไฟและชุดตรวจจับเปลวไฟเข้ากับเบ้าเตา โดยหัวพันไฟเล็งเข้าไปในท่อเซรามิก แต่ปลายของหัวพันไฟอยู่ห่างจากปลายท่อหรือผนังชั้นนอกของเบ้าเตาประมาณ 1 นิ้ว โดยที่หัวพันไฟไม่ได้แห่เข้าไปในท่อเซรามิก หลังจากติดตั้งหัวพันไฟ ชุดจุดไฟและชุดตรวจจับเปลวไฟเข้ากับ

ผนังชั้นนอกของเบ้าเตาแล้ว ต่อไปทำการต่อหัวพันไฟเข้ากับระบบวาล์ว และระบบท่อแก๊สซึ่งได้แก่ O_2 , LPG และอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.8

4.3.4 ขั้นตอนการติดตั้งหัววัดอุณหภูมิ และหัววัดแก๊ส O_2 และ CO

โดยการเจาะผนังชั้นนอกของเบ้าเตา ให้เป็นช่องเท่ากับขนาดของท่อที่ใส่หัววัดอุณหภูมิ และหัววัดแก๊ส O_2 และ CO แล้วต่อสายไปยังตู้ควบคุมการเปิด-ปิดวาล์ว และชุดวิเคราะห์แก๊ส O_2 และ CO (ดังไดอะแกรมในรูปที่ 3.6) รูปที่ 4.9 เป็นห้องควบคุมการทำงานของระบบเตาแก๊ส ซึ่งประกอบด้วยตู้ควบคุมที่มีชุดควบคุมอุณหภูมิ , ชุดวิเคราะห์แก๊ส O_2 และ CO , ชุดควบคุมการจุดไฟ ตลอดจนทั้งสวิทช์เปิด-ปิดระบบต่างๆ ได้แก่ สวิทช์ไฟหลัก (main power) , สวิทช์ปั๊มลม และสวิทช์น้ำหล่อเย็น, สวิทช์ควบคุมหัวพันไฟ, สวิทช์เครื่องวิเคราะห์แก๊ส

4.3.5 ขั้นตอนการติดตั้งระบบแก๊ส LPG และระบบ O_2

ทำการติดตั้งท่อทองแดงพร้อมสร้างจุดเชื่อมต่อกับถังแก๊สเข้ากับระบบท่อที่ส่งไปยังหัวพันไฟ 2 หัวที่ติดกับผนังเบ้าเตาเรียบร้อยแล้ว สำหรับระบบแก๊ส LPG จะมีจุดเชื่อมต่อ 10 จุด สำหรับต่อเข้าถังแก๊ส LPG 10 ถังพร้อมกัน โดยแต่ละถังจะมีวาล์วควบคุมการเปิด-ปิดถังแก๊ส 1 ชุด และตรงท่อรวมของแก๊สทุกถังจะมีตัวปรับความดันแก๊ส และเกจวัดความดัน (ดูรูปที่ 3.7) ส่วนระบบแก๊ส O_2 จะมีจุดเชื่อมต่อ 12 จุด สำหรับต่อเข้ากับถังแก๊ส O_2 12 ถังพร้อมกัน โดยแต่ละถังจะมีวาล์วควบคุมการเปิด-ปิดถังแก๊ส 1 ชุด และตรงท่อรวมของแก๊สทุกถังจะมีตัวปรับความดันแก๊สและเกจวัดความดันเช่นเดียวกับแก๊ส LPG ซึ่งระบบแก๊สแสดงในรูปที่ 4.10

4.3.6 ขั้นตอนการติดตั้งส่วนที่เหลือของระบบเตาแก๊ส

ซึ่งได้แก่ เครื่องทำน้ำเย็น เครื่องปั๊มอากาศและเครื่องอัดอากาศเข้ากับระบบเตาแก๊ส แต่ไม่มีภาพแสดงในรายงานนี้



รูปที่ 4.6 แสดงชั้นต่างๆ ของผนังเตาซึ่งอยู่ระหว่างการสร้าง



รูปที่ 4.7 แสดงโครงสร้างตาและระบบขับเคลื่อน



รูปที่ 4.8 แสดงการติดตั้งหัวพัน ไฟและระบบวาล์ว



รูปที่ 4.9 ตู้ควบคุมการที่งานของระบบเผาแก๊ส



รูปที่ 4.10 ระบบแก๊ส LPG และแก๊ส O_2



รูปที่ 4.11 ระบบเตาแก๊สที่สร้างเสร็จสมบูรณ์
แสดงให้เห็นหัวพ่นไฟ และระบบวาล์ว เพียง 1 ชุด
(ส่วนอีก 1 ชุดจะอยู่ด้านตรงข้ามของผนังเตา)

4.4 ขั้นตอนการทดสอบการทำงานของเตาแก๊ส

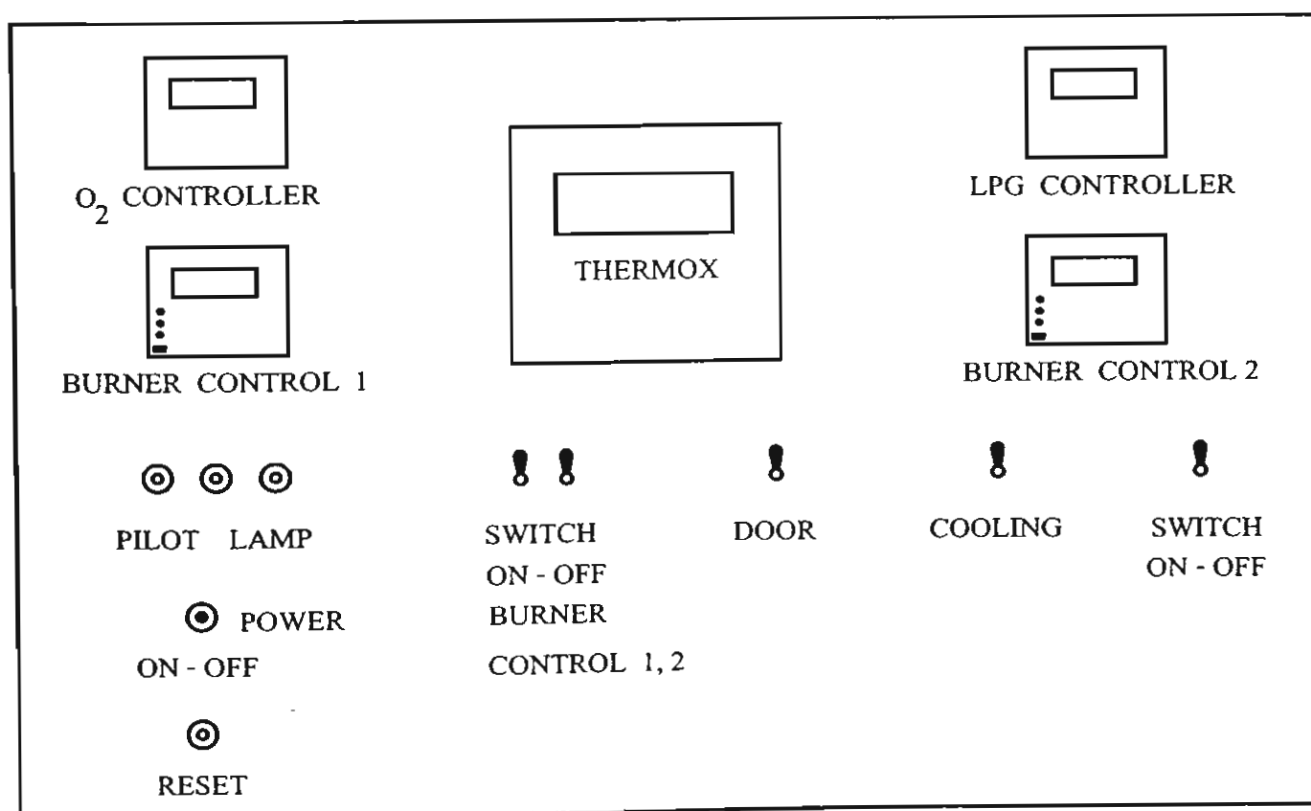
เนื่องจากเตาแก๊สที่สร้างในโครงการนี้ เป็นเตาแก๊สที่มีขนาดใหญ่ และมีระบบควบคุมการทำงานอย่างอัตโนมัติ ซึ่งค่อนข้างซับซ้อนมาก ยิ่งกว่านั้นได้ออกแบบไว้เพื่อให้มีระบบความปลอดภัยสูงสุด ในการใช้งานจึงมีขั้นตอนต่างๆ ที่ต้องเตรียมการดังนี้

การเตรียมงานก่อนการเปิดเตา (จุดไฟ)

1. ตรวจสอบสภาพความเรียบร้อยของสถานีจ่ายแก๊ส LPG และท่อต่างๆ
2. ตรวจสอบสภาพความเรียบร้อยของสถานีจ่ายแก๊ส O₂ และท่อต่างๆ
3. ตรวจสอบสภาพความเรียบร้อยของระบบหล่อเย็น
4. ตรวจสอบสภาพความเรียบร้อยของระบบปรับอากาศ
5. ตรวจสอบสภาพความเรียบร้อยของอุปกรณ์อื่นๆ

ขั้นตอนการเปิดเตา

เพื่อความเข้าใจ การอธิบายขั้นตอนการเปิดเตาแก๊สได้ง่ายขึ้น ขอให้พิจารณาไดอะแกรมของตู้ควบคุมการทำงานของเตาแก๊สในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ไดอะแกรมของตู้ควบคุมการทำงานของเตาแก๊ส

สำหรับการเปิดเตา มีลำดับขั้นตอนดังนี้

1. เปิดประตูด้านหลังของตู้ควบคุม เพื่อยก main breaker ขึ้น เมื่อสัญญาณไฟเตือนหน้าตู้ (PILOT LAMP) ติดทั้ง 3 ดวงแล้วจึงปิดประตู
2. หมุนสวิตช์สัญญาณหน้าตู้ควบคุม (POWER ON-OFF) มาอยู่ที่ตำแหน่ง ON บนหน้าจอของ BURNER CONTROL ทั้ง 2 ชุด จะแสดงผลดังนี้

STAND BY	00:01
Flame Signal Switch	0.0 V

หมายความว่า BURNER CONTROL ทั้ง 2 ชุดพร้อมที่จะทำงาน

3. เปิดสวิตช์ปั๊มลม (แรงดันใช้งานต้องไม่ต่ำกว่า 60 psi)
4. เปิดสวิตช์ระบบน้ำหล่อเย็น (COOLING) ให้อุณหภูมิน้ำเย็นประมาณ 5-15 °C
5. เปิดถังแก๊ส LPG ที่สถานีทั้งหมด ปรับเรกกูเลเตอร์ให้ได้แรงดันใช้งานประมาณ 40 psi
6. เปิดถังแก๊ส O₂ ที่สถานีทั้งหมด ปรับเรกกูเลเตอร์ให้ได้แรงดันใช้งานประมาณ 10 psi

หมายเหตุ การปรับแรงดันใช้งานของแก๊ส LPG และ O₂ นั้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับว่าต้องการอุณหภูมิสูงสุดภายในเตาเท่าใด ถ้าต้องการอุณหภูมิสูงมากก็ให้ปรับแรงดันแก๊สสูง แต่ถ้าต้องการอุณหภูมิใช้งานไม่สูงมากนักก็ให้ปรับแรงดันต่ำ

7. เมื่อทำตามขั้นตอนข้อ 1-6 เรียบร้อยแล้วจึงทำการเปิดเตา (จุดไฟ)
8. เปิดสวิตช์ ของ BURNER CONTROL 1 และของ BURNER CONTROL 2 พร้อมกัน หน้าจอของ BURNER CONTROL ทั้ง 1 และ 2 จะขึ้นคำว่า SAFE START CHECK ต่อจากนั้นภายใน 1 วินาที หน้าจอก็จะแสดงผลดังนี้

PURGE	00:01
Flame Signal Switch	0.0 V

หมายความว่า ขั้นตอนนี้จะทำการไล่ลมหรือแก๊สที่ตกค้างอยู่ภายในเตาออกให้หมด ก่อนไฟจะถูกจุด โดยจะใช้เวลา 30 วินาที และต่อจากนั้นหน้าจอของ BURNER CONTROL จะแสดงผลดังนี้

PURGE HOLD	00:01
Low Fire Switch	0.0 V

หมายความว่า ขั้นตอนนี้จะทำการป้อนวาล์วลงเพื่อที่จะทำการจุดไฟ โดยจะใช้เวลาประมาณ 15 วินาที ต่อจากนั้นหน้าจอของ BURNER CONTROL จะแสดงผลดังนี้

PREIGNITION	00:01
Flame Signal Switch	0.0 V

หมายความว่า หัวเทียนจะทำการจุดประกายไฟที่หัวจุดไฟเล็ก (PILOT BURNER IGNITOR) และต่อจากนั้นหน้าจอของ BURNER CONTROL จะแสดงผลดังนี้

SAFETY 1	00:01
Flame Signal Switch	0.0 V

หมายความว่า โซลินอยด์วาล์วของแก๊ส LPG จะทำการเปิดแก๊ส LPG ให้ออกมาผสมกับอากาศ ทำให้เกิดการลุกไหม้ที่หัว PILOT เกิดขึ้น (หัว PILOT จุดไฟติด) ต่อจากนั้น BURNER CONTROL จะแสดงผลดังนี้

PILOT STAB	00:01
Flame Signal Switch	0.0 V

หมายความว่า หัว PILOT จุดไฟติดแล้ว หัวเทียนจะหยุดจุดประกายไฟ และหน้าจอของ BURNER CONTROL จะแสดงผลดังนี้

MAIN TRIAL	00:01
Flame Signal Switch	0.0 V

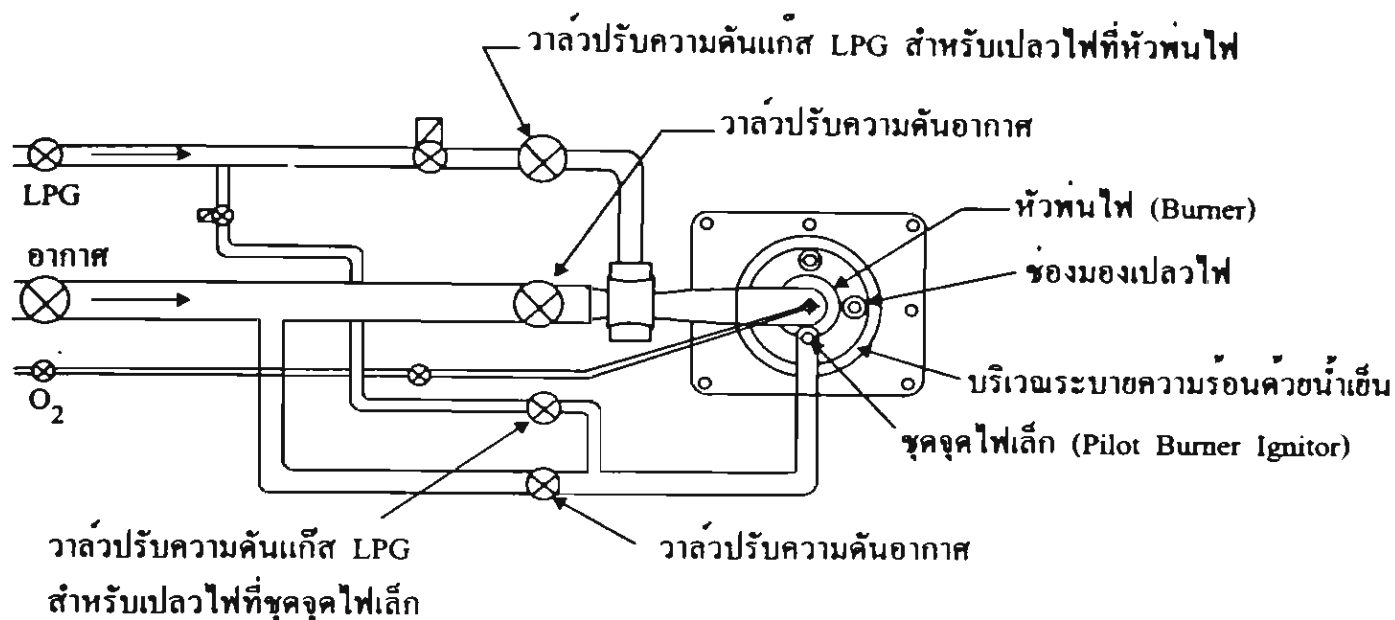
หมายความว่า โซลินอยด์วาล์วของเมนแก๊ส LPG จะทำการเปิดให้แก๊ส LPG มาผสมกับอากาศ ทำให้เกิดการลุกไหม้ที่หัวพ่นไฟ (BURNER) เมื่อหัวพ่นไฟจุดไฟติดเรียบร้อยแล้ว หน้าจอของ BURNER CONTROL จะแสดงผลดังนี้

RUN	00:01
Flame Signal Switch	0.0 V

9. หลังจากนั้น เตาจะถูกจุดให้ไฟติดโดยสมบูรณ์

การปรับแต่งเปลวไฟหลังจากเตาถูกจุดไฟติดแล้ว

เมื่อเตาเปิดหรือถูกจุดไฟติดแล้ว ในระยะแรกของการใช้งาน จำเป็นต้องปรับวาล์วต่างๆ ให้ได้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ เพื่อความเข้าใจการอธิบายขั้นตอนการปรับวาล์วต่างๆ ได้ง่ายขึ้น ขอให้พิจารณาไดอะแกรมของวาล์วต่างๆ ที่ต่อเข้ากับชุดจุดไฟเล็ก (Pilot Burner Ignitor) และหัวพ่นไฟในรูปที่ 4.13 (ซึ่งแสดงให้เห็นด้านเดียว แต่หัวพ่นไฟอีกด้านหนึ่งของผนังเตาจะต่อกับระบบแก๊สเดียวกันกับหัวพ่นไฟด้านที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.13)



รูปที่ 4.13 โคอะแกรมของระบบวาล์วที่ต่อเข้าหัวพ่นไฟ

สำหรับการปรับแต่งเปลวไฟ มีลำดับขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนการปรับแต่งเปลวไฟที่หัว PILOT (จุดจุดไฟเล็ก)

1. ปรับวาล์วแก๊ส LPG ซึ่งต่อเข้าชุดจ่ายไฟเล็ก (Pilot gas adjustable valve) จนได้เปลวไฟเป็นสีแดงออกเหลืองลักษณะเปลวไฟพุ่งยาวไม่แตกและเปลวไฟนิ่ง เมื่อได้ลักษณะเช่นนี้แล้ว ค่อยไปให้
2. ปรับวาล์วอากาศ ซึ่งต่อเข้าชุดจ่ายไฟเล็ก (Pilot air adjustable valve) จนได้เปลวไฟที่หัวจ่าย PILOT เป็นสีฟ้าออกม่วงเล็กน้อย มีเปลวไฟที่ขาวไม่แตกและเปลวไฟค้องนิ่ง เมื่อได้ลักษณะเปลวไฟดังที่กล่าวมาแล้วเป็นอันเสร็จขั้นตอนการปรับแต่งเปลวไฟที่หัว PILOT

ขั้นตอนการปรับแต่งเปลวไฟที่หัวพ่นไฟ

1. ปรับวาล์วแก๊ส LPG ซึ่งต่อเข้าหัวพ่นไฟ จนได้เปลวไฟที่มีลักษณะเดียวกับที่หัว PILOT แต่จะมีขนาดใหญ่
2. ปรับวาล์วอากาศ ซึ่งต่อเข้าหัวพ่นไฟ จนได้เปลวไฟที่มีลักษณะเดียวกับที่หัว PILOT แต่จะมีขนาดใหญ่กว่า ก็เป็นอันสิ้นสุดการปรับเปลวไฟที่หัวพ่นไฟ

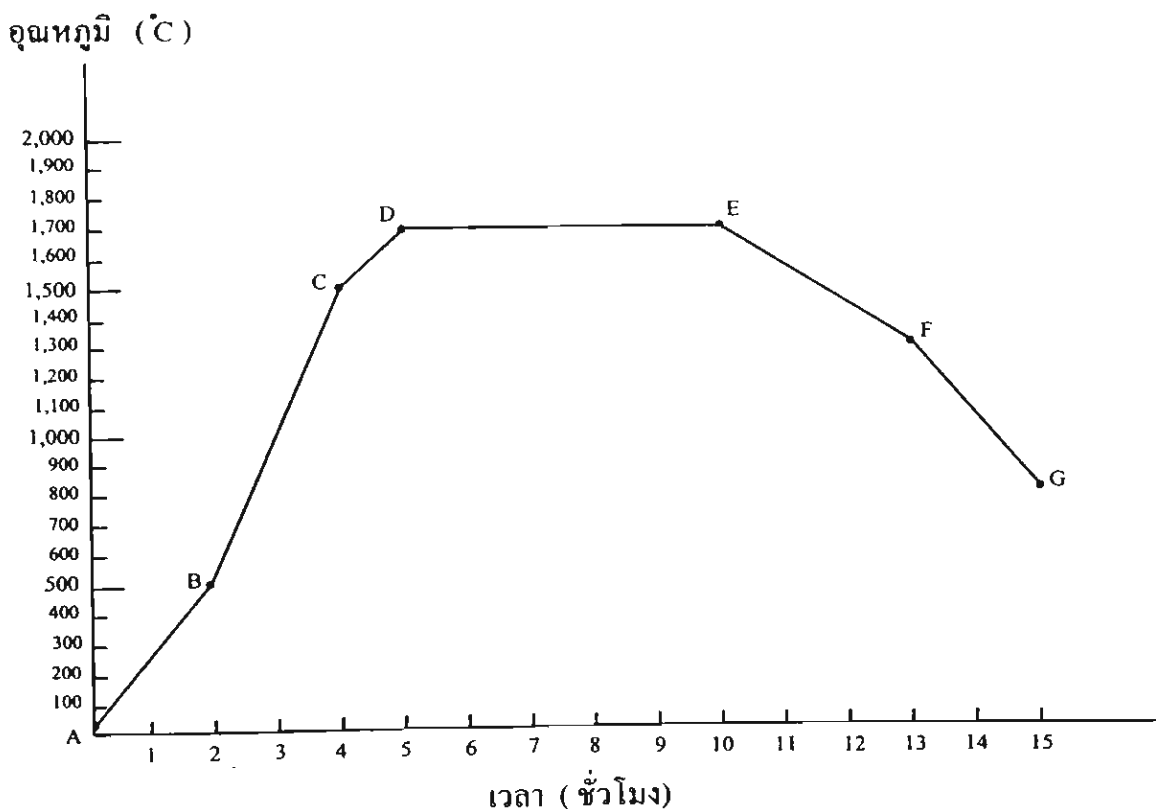
การปรับเปลวไฟของหัว PILOT และหัว BURNER ทำเหมือนกันทั้งสองหัว โดยทำทีละหัว เมื่อปรับหัวที่หนึ่งได้แล้วก็ไปทำการปรับหัวที่สองตามลำดับ

บทที่ 5

ผลการทดลองและอภิปราย

5.1 ผลการทดลองการทำงานของเตาไฟฟ้า

ดังที่ได้กล่าวแล้วในหัวข้อ 4.2 เรื่องการทดสอบการทำงานของเตาไฟฟ้าที่สร้าง โดยการใช้ในการเผาพลอยทับทิมให้แก่ โครงการวิจัยเรื่อง การวิจัยและพัฒนาสถานะของการเผาพลอยซัฟไฟร์ ซึ่งมี รศ.ดร. สุชาติพษ์ ศิริไพศาลพิพัฒน์ และคณะ แห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์เป็นผู้วิจัย โดยการเผาที่อุณหภูมิตั้งแต่ $1200 - 1700^{\circ}\text{C}$ ในช่วงระยะเวลาต่างๆ ตั้งแต่ 2 - 10 ชั่วโมง นอกจากนั้นในลำดับต่อมายังได้ปรับบรรยากาศของการเผาโดยการผ่านแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในเตาด้วย เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิ เวลา และบรรยากาศที่เผาพลอยต่อการเปลี่ยนแปลงสีของพลอย ซึ่งก่อนที่จะทำการเผาแต่ละครั้ง จะต้องกำหนดรูปแบบ (patterns) ของการเผา โดยการตั้งโปรแกรมของเครื่องควบคุมเสียก่อน รูปที่ 5.1 เป็นตัวอย่างรูปแบบหนึ่งของการทดลอง



รูปที่ 5.1 ตัวอย่างการตั้งโปรแกรมควบคุมอุณหภูมิของเตาไฟฟ้าในการเผาพลอย

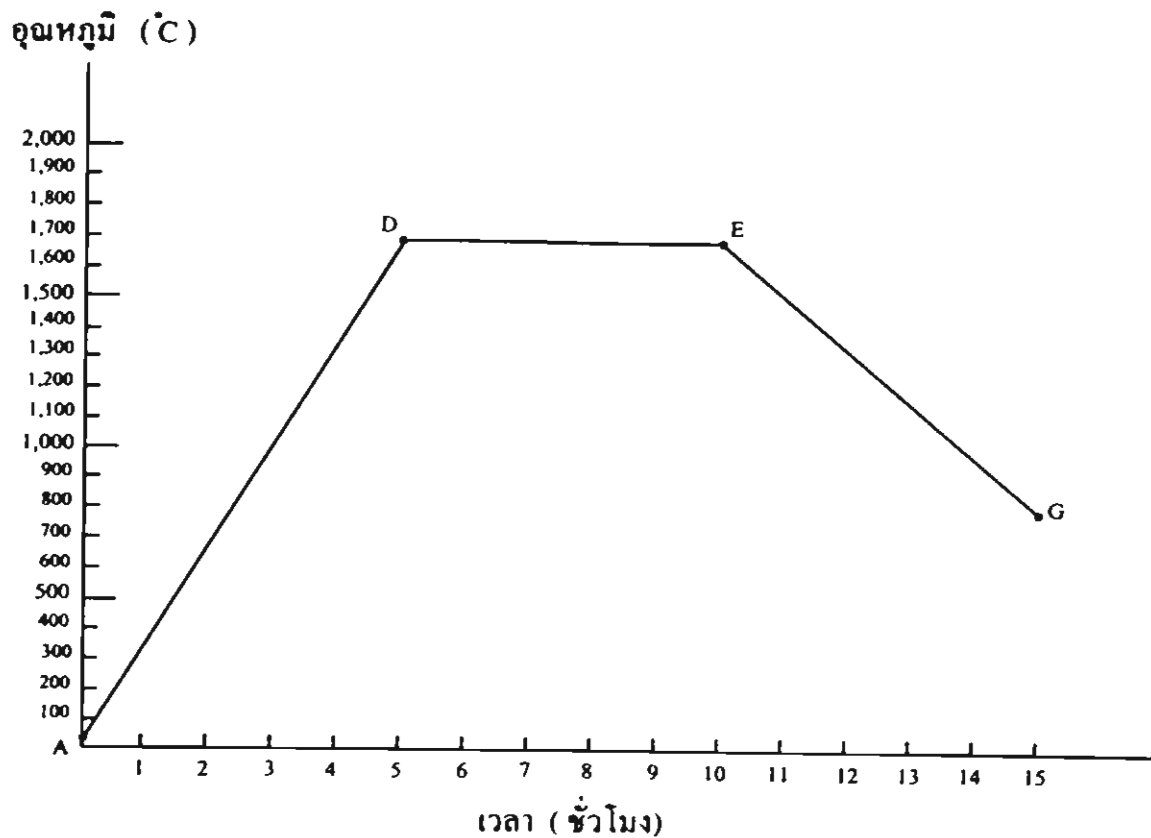
จากรูปแบบการตั้งโปรแกรมควบคุมอุณหภูมิในรูปที่ 5.1 จะมีขั้นตอนการเผาดังนี้

1. เริ่มจากจุด A หรือที่อุณหภูมิห้อง ได้ตั้งโปรแกรมให้เตามีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงจุด B ที่อุณหภูมิ 500°C ในเวลา 2 ชั่วโมง หรืออัตราการเพิ่มอุณหภูมิประมาณ 4.2°C/นาท
2. จากจุด B ได้ตั้งโปรแกรมให้เตามีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงจุด C ที่อุณหภูมิ 1500°C ในเวลา 2 ชั่วโมง หรืออัตราการเพิ่มอุณหภูมิในช่วงนี้ประมาณ 8.3°C/นาท
3. จากจุด C ได้ตั้งโปรแกรมให้เตามีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงจุด D ที่อุณหภูมิ 1700°C ในเวลา 1 ชั่วโมง หรืออัตราการเพิ่มอุณหภูมิในช่วงนี้ประมาณ 3.3°C/นาท
4. จากจุด D จนถึงจุด E เตาถูกตั้งโปรแกรมไว้ให้อุณหภูมิคงที่ที่ 1700°C เป็นเวลานาน 5 ชั่วโมง
5. จากจุด E เป็นขั้นตอนของการลดอุณหภูมิ ซึ่งได้ตั้งโปรแกรมให้อุณหภูมิลดลงถึงจุด F ที่อุณหภูมิ 1300°C ในเวลา 3 ชั่วโมง หรืออัตราการลดอุณหภูมิประมาณ 2.2°C/นาท
6. จากจุด F ได้ตั้งโปรแกรมให้อุณหภูมิลดลงจนถึงจุด G ที่อุณหภูมิ 800°C ในเวลา 2 ชั่วโมง หรืออัตราการลดอุณหภูมิประมาณ 4.2°C/นาท

หลังจากนี้ โดยปกติจะเอาพลอยออกจากเตาที่อุณหภูมิสูงประมาณ 800°C แต่ถ้าต้องการให้อุณหภูมิของเตาเย็นลงอีก ก็สามารถตั้งจำนวนจุดภายในรูปแบบของโปรแกรมควบคุมอุณหภูมิดังที่ยกตัวอย่างข้างต้นได้ตามที่ต้องการ

อย่างไรก็ตาม เพื่อความสะดวกต่อการวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิต่อสีของพลอย เราอาจจะตั้งโปรแกรมการเพิ่มอุณหภูมิ และการลดอุณหภูมิด้วยอัตราที่คงที่ ดังตัวอย่างในรูปที่ 5.2

จากรูปที่ 5.2 จะเห็นว่าจากจุด A หรือที่อุณหภูมิห้องเตาจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงจุด D ที่ 1700°C ในเวลา 5 ชั่วโมง ดังนั้นอัตราการเพิ่มอุณหภูมิประมาณ 5.6°C/นาท ในทำนองเดียวกันในช่วงของการลดอุณหภูมิจากจุด E ที่ 1700°C จนถึงจุด F ที่ 800°C ในเวลา 5 ชั่วโมง หรืออัตราการลดอุณหภูมิ 3°C/นาท

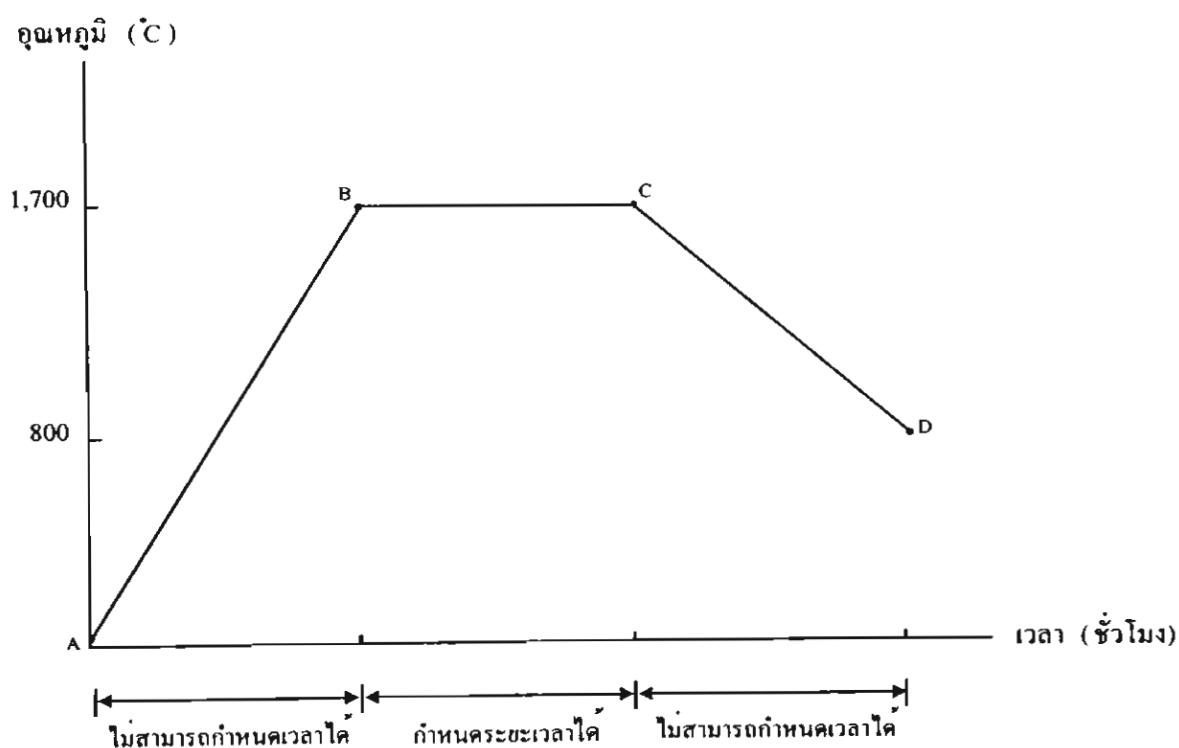


รูปที่ 5.2 โปรแกรมการเพิ่มอุณหภูมิและลดอุณหภูมิของเตาด้วยอัตราที่คงที่

ในทางปฏิบัติหรือการเผาหลอมจริง ในช่วงของการลดอุณหภูมิ ถือได้ว่าไม่มีผลต่อการเผาหลอม ดังนั้นเราไม่จำเป็นต้องตั้งโปรแกรมการลดอุณหภูมิ กล่าวคือ เมื่อเตาทำงานจากจุด A จนถึงจุด E (ตามโปรแกรมในรูปที่ 5.1 หรือรูปที่ 5.2) ค่อยไปให้ปิดเตาได้เลย นั่นคือ ดัดกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่หลอดความร้อน หลังจากนั้นอุณหภูมิของเตาจะลดลงโดยธรรมชาติ อย่างไรก็ตามด้วยแสดงค่าอุณหภูมิยังคงเปิดทิ้งไว้ เพื่อดูค่าอุณหภูมิที่ลดลง จนกระทั่งอุณหภูมิลดลงถึงค่าที่ต้องการ เช่น 800°C ก็ให้เอาพลอยออกจากเตา แต่ถ้าต้องการเอาพลอยออกที่อุณหภูมิห้องที่จุด E ก็ให้ปิดกำลังไฟฟ้า (power) ที่จ่ายให้แก่เตาทั้งหมดได้เลย โดยไม่สนใจการลดอุณหภูมิของเตา ซึ่งตัวอย่างการตั้งโปรแกรมการเผาดังที่กล่าวในรูปที่ 5.1 และรูปที่ 5.2 ตลอดทั้งการเอาพลอยออกจากเตาที่อุณหภูมิสูงขณะที่พลอยยังร้อนมาก หรือที่อุณหภูมิต่ำ (อุณหภูมิห้อง) กล่าวได้ว่า เป็นเทคนิคหรือ know how ของการเผาหลอม สำหรับนักเผาหลอมแต่ละคน แต่สรุปได้ว่าเตาไฟฟ้าที่ได้สร้างขึ้นในงานวิจัยและพัฒนานี้ จะสนองความต้องการของนักเผาหลอมเหล่านั้นได้เป็นอย่างดี เพราะสะดวกต่อการใช้งาน และมีการควบคุมการทำงานโดยอัตโนมัติ ไม่จำเป็นต้องเฝ้าดูแลระหว่างทำการเผา ซึ่งใช้เวลานานมากและในบางครั้งอาจจะใช้เวลาในการเผานานถึง 30 – 40 ชั่วโมง

5.2 ผลการทดสอบการทำงานของเตาแก๊ส

ในการใช้งานหรือการเผาผลาญด้วยเตาแก๊ส จะต้องกำหนดอุณหภูมิสูงสุด และเมื่อถึงอุณหภูมิสูงสุดจะใช้เวลานานเท่าใด ที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากว่าชุดควบคุมอุณหภูมิด้วยเตาแก๊สไม่สามารถกำหนดรูปแบบโปรแกรมการเผาที่ซับซ้อน ดังรูปที่ 5.1 ของเตาไฟฟ้าได้ เพราะว่าการควบคุมอุณหภูมิของเตาแก๊ส มาจากการควบคุมความดันของแก๊ส LPG, O₂ และอากาศพร้อมกัน ซึ่งเกี่ยวข้องกับระบบควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วจำนวนมาก และหลายขั้นตอนดังที่กล่าวแล้วในหัวข้อ 4.4 ตัวอย่างของการตั้งโปรแกรมการเผา แสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ตัวอย่างการตั้งโปรแกรมควบคุมอุณหภูมิของเตาแก๊สในการเผาผลาญ

จากรูปที่ 5.3 ในการใช้เตาแก๊สจะต้องมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1. เตรียมความพร้อมของเตาดังที่กล่าวแล้วในหัวข้อ 4.4
2. กำหนดอุณหภูมิสูงสุด (set point ของอุณหภูมิสูงสุด) ที่ต้องการเผาผลาญ เช่น ในรูปที่ 5.3 ได้ set อุณหภูมิสูงสุดไว้ที่จุด B หรือ 1700 °C นั่นคือหลังจากที่สั่งให้เตาทำงาน อุณหภูมิของเตาจะเพิ่มขึ้นจากจุด A ที่อุณหภูมิห้อง ถึงจุด B โดยไม่สามารถกำหนดระยะเวลาที่ใช้ในช่วงนี้ได้

3. กำหนดว่าจะให้เตามีอุณหภูมิคงที่ที่ 1700°C นานเท่าใด นั่นคือจากจุด B ถึงจุด C เราสามารถกำหนดระยะเวลาที่ใช้ในช่วงนี้ได้
4. จากจุด C ถึงจุด D เป็นช่วงของการลดอุณหภูมิ เราไม่สามารถกำหนดระยะเวลาที่ใช้ในช่วงนี้ได้ เช่นเดียวกันกับในช่วงที่อุณหภูมิเพิ่มจากจุด A ถึงจุด B ดังนั้น ในทางปฏิบัติอุณหภูมิของเตาแก๊สจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมาก และจะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่ช้าลงเมื่ออุณหภูมิเข้าหาจุด set point หรืออุณหภูมิสูงสุดที่ตั้งไว้ แล้วอุณหภูมิจะเริ่มคงที่ไปตลอดช่วงเวลาที่กำหนดไว้ (คือจากจุด B ถึงจุด C ในรูปที่ 5.3)

ตารางที่ 5.1 เป็นผลการทดลองการทำงานของเตาแก๊สซึ่ง set ค่าต่างๆ ก่อนการจุดเตา ดังนี้

1. อุณหภูมิสูงสุดของเตา ซึ่งในการทดลองนี้คือ 1600°C
2. ความดันของแก๊ส O_2 คอนเริ่มต้น ตั้งไว้ที่ 50 psi
3. ความดันของแก๊ส LPG คอนเริ่มต้น ตั้งไว้ที่ 40 psi
4. อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น คอนเริ่มต้น ตั้งไว้ที่ 10°C
5. ตำแหน่งของหัววัดปริมาณแก๊ส O_2 และ CO อยู่ตรงกึ่งกลางของด้านบนสุดของเตา หรือกึ่งกลางของปล่องไฟของเตา

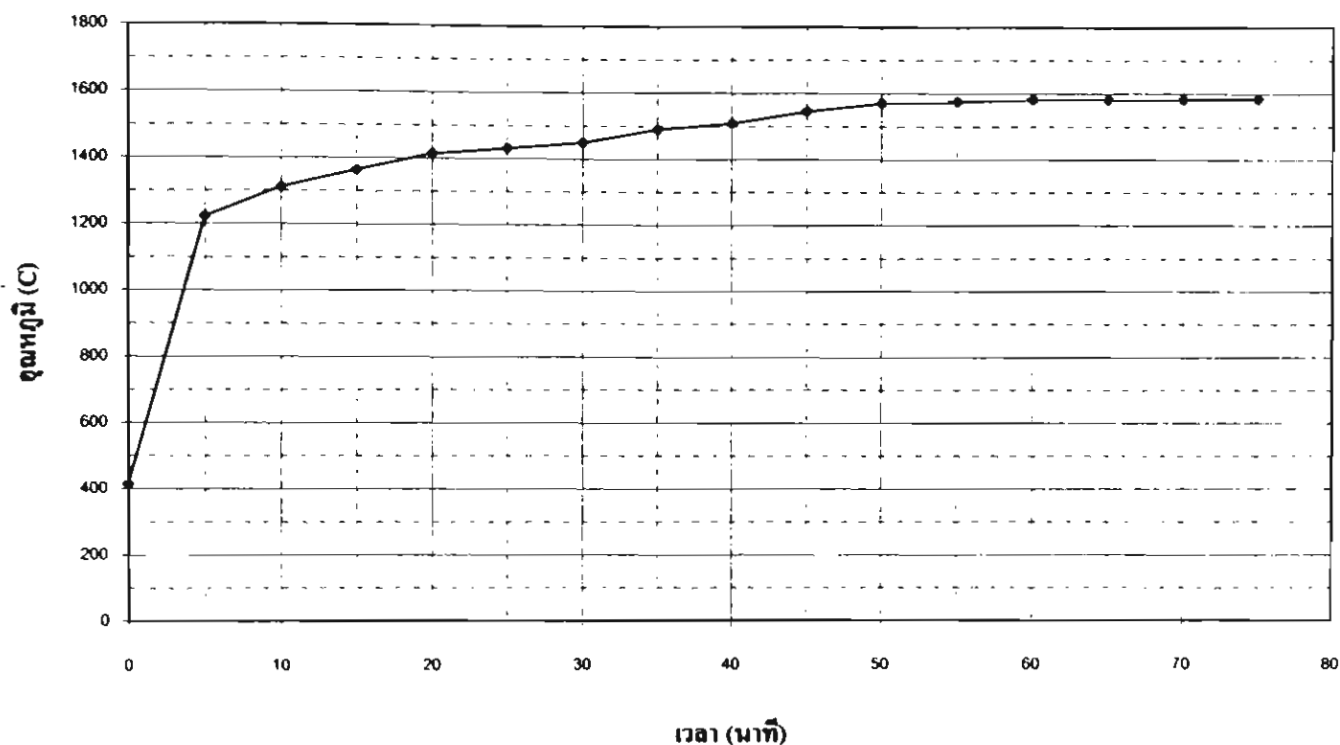
จากตารางที่ 5.1 เมื่อเตาถูกจุดไฟติดแล้ว อุณหภูมิภายในเตาจะเพิ่มขึ้นทันทีทันใด คือ 414°C ซึ่งจะนับเวลาเริ่มต้นนี้เป็นเวลาที่ 0 (ศูนย์) หลังจากนั้นจะบันทึกอุณหภูมิของเตาทุกๆ 5 นาที ตลอดทั้งอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น ความดันของแก๊ส O_2 และความดันของแก๊ส LPG

เมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 5.1 มาเขียนกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับอุณหภูมิของเตา จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 5.4

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลการทำงานของเตาแก๊ส

เวลา (นาที)	อุณหภูมิเตา (°C)	อุณหภูมิน้ำ (°C)	ความดันแก๊ส O ₂ (psi)	ความดันแก๊ส LPG (psi)	ปริมาณแก๊ส O ₂ ที่เหลือ (%)
0	414.00	10	50	40	20.7
5	1,222.00	10	50	40	20.7
10	1,311.00	10	46	38	20.7
15	1,363.00	10	46	38	20.9
20	1,414.00	10	46	38	21.2
25	1,431.00	10	46	38	21.4
30	1,449.00	10	46	38	21.9
35	1,490.00	10	46	38	22.0
40	1,509.00	10	46	38	22.0
45	1,546.00	10	46	38	21.9
50	1,570.00	10	46	38	21.9
55	1,575.00	10	46	38	21.6
60	1,582.00	10	46	38	21.3
65	1,582.00	10	46	38	21.2
70	1,582.00	10	46	38	21.0
75	1,585.00	10	46	38	21.0

ช่วงสุดท้ายของตารางที่ 5.1 เป็นปริมาณแก๊ส O₂ ที่เหลือจากการเผาไหม้ ซึ่งวัดโดยหัววัดที่ติดตั้งอยู่เหนือเบ้าเตา จะเห็นว่าปริมาณแก๊ส O₂ ที่เหลือจากการเผาไหม้ประมาณ 21% ซึ่งต่ำกว่าปริมาณ O₂ ในอากาศที่มีอยู่ 32% เพียงเล็กน้อย เนื่องจากว่าตำแหน่งที่ติดตั้งหัววัดอยู่เหนือเบ้าเตาดังนั้นหัววัดปริมาณ O₂ จึงวัดปริมาณ O₂ ที่มีอยู่ในอากาศหรือรอบๆ เบ้าเตารวมเข้าไปด้วย ทำให้ปริมาณ O₂ ที่เหลือจากการเผาไหม้ค่อนข้างสูงผิดปกติ ในการปรับปรุงเตาต่อไป จะต้องติดตั้งหัววัดปริมาณ O₂ ให้อยู่เหนือเบ้าที่เผาผลาญ จึงจะอ่านค่าถูกต้อง



รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับอุณหภูมิของเตาแก๊ส

จากรูปที่ 5.4 จะเห็นว่า เมื่อเตาถูกจุดไฟติด อุณหภูมิภายในเตาจะเพิ่มทันทีทันใดถึง 414°C หลังจากนั้นอุณหภูมิภายในเตายังคงเพิ่มด้วยอัตราเร็วมาก คือถึงอุณหภูมิ 1200°C ภายในเวลา 5 นาทีเท่านั้น และต่อจากนั้นอุณหภูมิเตาจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เพื่อให้ถึงอุณหภูมิที่กำหนดไว้คือ 1600°C แต่อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิภายในเตาค่อยๆ ลดลง และอุณหภูมิของเตาจะเข้าใกล้อุณหภูมิสูงสุดที่ set ไว้อย่างช้าๆ ซึ่งจะเห็นว่าจาก $1200 - 1582^{\circ}\text{C}$ ใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง แล้วอุณหภูมิจะเริ่มคงที่ที่ 1585°C

บทที่ 6

สรุป

ผลจากงานวิจัยและพัฒนาในโครงการนี้ ได้พัฒนาเตาอุณหภูมิสูงที่ใช้ในการเผาผลาย 2 แบบด้วยกัน คือ

1. เตาไฟฟ้าอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 1800°C และสามารถควบคุมบรรยากาศของการเผาผลายได้
2. เตาแก๊สอุณหภูมิสูงประมาณ 1800°C และสามารถควบคุมบรรยากาศได้

ในส่วนของเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นใหม่จากโครงการวิจัยและพัฒนา มี 2 ส่วน คือ

1. เตาไฟฟ้าที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไปนั้น วิธีการนำผลายเข้า – ออกจากเตา จะใช้วิธีการเปิดประตูด้านหน้าทั้งสิ้น แต่ในงานวิจัยและพัฒนานี้ได้พัฒนาวิธีการนำผลายเข้า – ออกจากเตาจากทางคอนล่าง ซึ่งมีข้อดีกว่าเตาไฟฟ้าแบบเก่า 2 ประการคือ (1) สามารถนำผลายที่เผาแล้ว ออกจากเตาที่อุณหภูมิสูง เช่น $1000 - 1300^{\circ}\text{C}$ ได้โดยผนังเตาและลดความร้อนไม่ชำรุดเสียหาย และ (2) สามารถส่งแก๊ส (flow gas) ชนิดต่างๆ ตามที่ต้องการผ่านท่ออะลูมินา เข้าไปยังตำแหน่งที่วางเบ้าใส่ผลาย เพื่อปรับบรรยากาศของการเผาผลายได้สะดวก ทั้งนี้เพื่อเพิ่มสีและคุณภาพของผลายที่เผาให้สูงกว่ากรรมวิธีการเผาที่ใช้กันอยู่ทั่วไป
2. ในส่วนของเตาแก๊สที่ใช้เผาผลาย โดยผู้ประกอบการทั่วไป จะไม่มีระบบวัดอุณหภูมิภายในเตา และวิธีการนำผลายเข้า – ออกจากเตาจะใช้วิธีเปิดฝาปิดเตาจากด้านบน ซึ่งถ้าเปิดฝาเตาด้านบน เพื่อเอาผลายที่เผาแล้วออกจากเตาที่อุณหภูมิสูง จะทำได้ลำบาก และค่อนข้างอันตรายต่อผู้ทำงาน และเกิดอุบัติเหตุต่อคนงานที่เผาผลายบ่อยๆ เช่น เปลวไฟร้อนทำให้ผิวหนัง ล้าง และผมไหม้

ในปัจจุบันนักเผาผลาย จะต้องหาซื้อเชื้อเพลิงราคาแพงหรืออะลูมิเนียมมาใช้งานเฉพาะตอนที่เอาผลายออกจากเตา ซึ่งเชื้อเพลิงเหล่านี้จะต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศ ทำให้เสียเงินตราต่างประเทศเพิ่มขึ้น

สำหรับคุณลักษณะเฉพาะ (specifications) ของเตาไฟฟ้าและเตาแก๊ส ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยและพัฒนานี้ มีดังนี้

เตาไฟฟ้า

1. สามารถให้ความร้อนสูงสุดถึงระดับอุณหภูมิ 1800°C
2. มีปริมาตรห้องเผา (กว้าง x ยาว x สูง) = $10'' \times 8'' \times 8''$

3. ใช้ลวดความร้อน Kanthal Super 1900 จำนวน 4 เส้น
4. ในกรณีที่ลวดความร้อนเส้นใดเส้นหนึ่งชำรุดหรือแตกหัก เราสามารถถอดเปลี่ยนลวดความร้อนเฉพาะเส้นที่แตกหักได้สะดวก โดยไม่ต้องถอดเส้นลวดความร้อนที่ยังใช้งานได้
5. นำพลอยเข้า – ออกทางคอนล่างของเตา
6. สามารถปรับความดันบรรยากาศในการเผา โดยใช้แก๊สต่างๆ ได้ เช่น ไฮโดรเจน อาร์กอน หรือไฮโดรเจน (หมายเหตุ ในกรณีที่จะใช้ไฮโดรเจน จะต้องศึกษาข้อมูลให้ละเอียดเสียก่อนว่า ต้องใช้ปริมาณเท่าใดจึงจะไม่เกิดการระเบิด)
7. ควบคุมการเพิ่มและลดอุณหภูมิด้วยไมโครโปรเซสเซอร์ ซึ่งมีความละเอียด 1 – 2 °C โดยมีหน้าปัดแสดงผลเป็นตัวเลขหรือกราฟฟิก
8. ใช้ไฟฟ้าเฟสเดียว แรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ 50 เฮิรตซ์
9. กำลังไฟฟ้าประมาณ 2400 วัตต์
10. มีน้ำหนักรวมประมาณ 150 กิโลกรัม

เตาแก๊ส

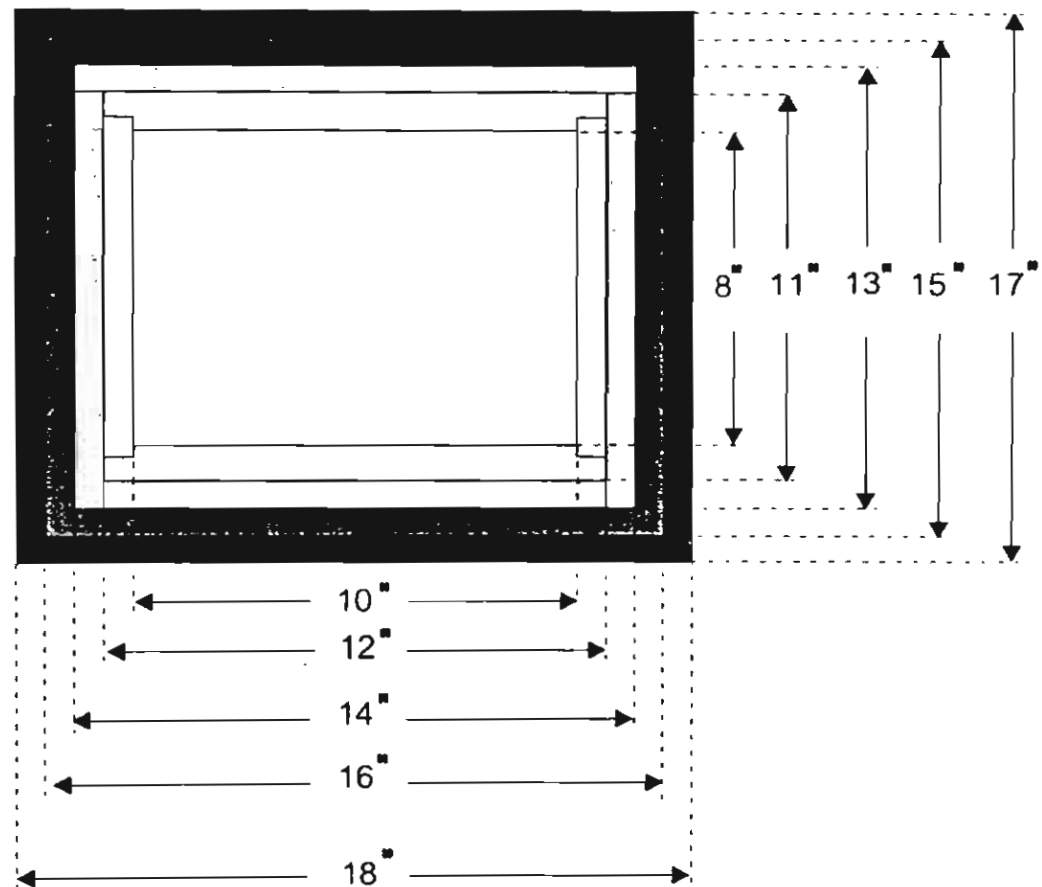
1. สามารถให้ความร้อนสูงสุดถึงระดับอุณหภูมิ 1800 °C
2. มีปริมาตรห้องเผา (เส้นผ่าศูนย์กลาง x สูง) 24 x 38 ตารางเซนติเมตร
3. นำพลอยเข้า – ออกทางคอนล่างของเตา
4. ควบคุมอุณหภูมิด้วยไมโครโปรเซสเซอร์ที่มีความละเอียดประมาณ ± 5 °C
5. สามารถควบคุมบรรยากาศภายในเตาด้วยชุดวิเคราะห์ปริมาณแก๊สออกซิเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์
6. ทำงานด้วยระบบอัตโนมัติ และมีระบบความปลอดภัยที่สมบูรณ์

ในส่วนองราคเตาที่สร้าง ภายหลังจากเสร็จสิ้นงานวิจัยนี้แล้ว คณะผู้วิจัยเชื่อว่าจะสามารถสร้างเตาทั้ง 2 แบบในราคาที่ถูกกลงได้ โดยราคาเตาไฟฟ้าจะอยู่ในวงเงิน 5 แสนบาท ส่วนเตาแก๊ส จะอยู่ในวงเงิน 1.5 ล้านบาท เท่านั้น ถึงแม้ว่าเงินสนับสนุนการวิจัยที่ใช้ในการพัฒนาเตาทั้ง 2 แบบนี้จะสูงถึง 6 ล้านบาทก็ตาม แต่ผลจากการศึกษาวิจัยและพัฒนาตั้งแต่เริ่มโครงการจนกระทั่งเสร็จสิ้นโครงการ ทำให้คณะผู้วิจัยได้เรียนรู้การทำงานของเตาและเข้าใจการทำงานของเตาทั้ง 2 แบบ ตลอดจนทำให้ทราบปัญหาในส่วนต่างๆ ของเตาทั้ง 2 แบบ ได้อย่างดี ดังนั้นถ้าต้นทุนการสร้างเตาถูกกลง เชื่อว่าเมื่อผลงานวิจัยนี้ได้รับการเผยแพร่ ผู้ประกอบการทางด้านอัญมณีจะให้ความสนใจที่จะสั่งทำ ยิ่งกว่านั้นในส่วนของการเผาพลอยโดยเตาทั้ง 2 แบบ สามารถที่จะถ่ายทอดเทคโนโลยีการเผาให้แก่ผู้ประกอบการได้ทันที ซึ่งคณะผู้วิจัยได้รับเชิญจากหอการค้าไทยให้ไปบรรยายแก่ผู้ประกอบการที่จังหวัดบุรีรัมย์ 2 ครั้งแล้วก่อนที่โครงการวิจัยนี้จะเสร็จสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

1. Kurt Nassau, Gemstone Enhancement, Butterworths, London, 1984.
2. John Davies and Peter Simpson, Induction Heating Handbook, McGraw-Hill, London, 1987.
3. P.G. Simpson, Induction Heating, Coil and System Design, McGraw-Hill, New York, 1960.
4. KANTHAL SUPER HANDBOOK, Kanthal Furnace Product, Sweden, 1984.
5. KANTHAL SUPER 1900, Kanthal Furnace Product, Sweden, 1989.
6. Technical Data, Zircar Products, Inc.
7. สว่าง ประกายรุ่งทอง, เทอร์โมคัปเปิ้ล : ตัววัดอุณหภูมิสูง ตอนที่ 1, กรกฎาคม 2532. วารสารเคมีคอนดักเตอร์ อิเล็กทรอนิกส์, ฉบับที่ 93, หน้า 246-249.
8. จุไรรัตน์ ดวงเดือน, เทอร์โมคัปเปิ้ล, มีนาคม 2527, วารสารเทคนิคการจัดการและวิศวกรรม, ฉบับที่ 1, หน้า 106-111.
9. Frank Kreith and William Z. Black, Basic Heat Transfer, Harper, New York,

ภาคผนวก (ก)



ภาพตัดขวางของเบ้าเตาไฟฟ้า
แสดงขนาดของเบ้าเตาในแต่ละชั้น

ผนังชั้นที่	หนึ่ง	สอง	สาม	สี่
ผนังด้าน				
ด้านซ้าย - ด้านขวา	7.5"×9"×1"	8.5"×11"×1"	10.5"×13"×1"	12.5"×15"×1"
ด้านหน้า - หลัง	9"×12"×1"	11"×14"×1"	13"×16"×1"	15"×18"×1"
ด้านบน	8.5"×12"×1.5"	10.5"×14"×1"	12.5"×16"×1"	14.5"×18"×1"
ด้านล่าง	8.5"×12"×1"	10.5"×14"×1"	12.5"×16"×1"	14.5"×18"×1"
ฐานล่าง	5"×5"×2.5"	5"×5"×2.5"	7.5"×8"×1"	10.5"×10"×1"

ภาคผนวก (ข)

การคำนวณหาค่าความร้อนที่สูญเสียจากเตาเผา

ในการคำนวณหาค่าความร้อนที่สูญเสียจากเตาเผา จะคิดเฉพาะการสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อน โดยที่ความต้านทานการนำความร้อนของแผ่นฉนวนกันความร้อนหาได้จากสูตร

$$R = L / k A$$

โดยที่ L คือ ความหนาของแผ่นฉนวน

k คือ ค่าสภาพการนำความร้อนของแผ่นฉนวนที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ

A คือ พื้นที่ผิวของแผ่นฉนวน

ดังนั้น $R_{รวม} =$ ความต้านทานรวมของผนัง 4 ชั้น $= R_1 + R_2 + R_3 + R_4$

(1) การหาค่า ความต้านทานการนำความร้อนของผนังชั้นที่หนึ่ง ซึ่งใช้แผ่นฉนวนกันความร้อน Alumina SALI-2 โดยที่มีค่าสภาพการนำความร้อน k ที่อุณหภูมิ 1650 °C เท่ากับ 0.39 W/m °k

ขนาดของแผ่นฉนวนด้านภายใน	ชั้นที่หนึ่ง	10"×7"×8"
ขนาดของแผ่นฉนวนด้านภายนอก	ชั้นที่หนึ่ง	12"×9"×11"
ขนาดเฉลี่ยของแผ่นฉนวน	ชั้นที่หนึ่ง	11"×8"×9.5"
	หรือ	27.97 cm×20.32 cm×24.13 cm

$$\begin{aligned}
 \text{หาพื้นที่ผิวของแผ่นฉนวน } A &= 2 (\text{กว้าง} \times \text{ยาว}) + 2 (\text{กว้าง} \times \text{สูง}) \\
 &\quad + 2 (\text{ยาว} \times \text{สูง}) \\
 &= 2(0.294 \times 0.2032) + 2(0.2794 \times 0.2413) \\
 &\quad + 2(0.2032 \times 0.2413) \\
 &= 0.3494 \quad \text{m}^2
 \end{aligned}$$

หาค่าความต้านทานการนำความร้อนของแผ่นฉนวนชั้นที่หนึ่ง

$$\begin{aligned}
 R_1 &= L / k A \\
 &= 0.0254 / (0.39 \times 0.3464) \\
 &= 0.188 \quad \text{Ohm}
 \end{aligned}$$

(2) การหาค่า ความต้านทานการนำความร้อนของผนังชั้นที่สอง ซึ่งใช้วัสดุฉนวนกันความร้อน Alumina ECO 40 โดยมีค่าสภาพการนำความร้อน k ที่อุณหภูมิ 1200°C เท่ากับ $0.32 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$

ขนาดของแผ่นฉนวนด้านภายใน	ชั้นที่สอง	12"×9"×11"
ขนาดของแผ่นฉนวนด้านภายนอก	ชั้นที่สอง	14"×11"×13"
ขนาดเฉลี่ยของแผ่นฉนวน	ชั้นที่สอง	13"×10"×12"
	หรือ	33.02 cm×25.4 cm×30.48 cm

$$\begin{aligned}
 \text{หาค่าพื้นที่ผิว } A &= 2 (\text{กว้าง} \times \text{ยาว}) + 2 (\text{กว้าง} \times \text{สูง}) \\
 &\quad + 2 (\text{ยาว} \times \text{สูง}) \\
 &= 2(0.3302 \times 0.254) + 2(0.3302 \times 0.3048) \\
 &\quad + 2(0.254 \times 0.3048) \\
 &= 0.5238 \quad \text{m}^2
 \end{aligned}$$

หาค่า ความต้านทานการนำความร้อนของฉนวนชั้นที่สอง

$$\begin{aligned}
 R_2 &= L / k A \\
 &= 0.0254 / (0.32 \times 0.5238) \\
 &= 0.152 \quad \text{Ohm}
 \end{aligned}$$

(3) การหาค่า ความต้านทานการนำความร้อนของแผ่นฉนวนชั้นที่สาม ซึ่งใช้วัสดุที่เป็น ฉนวนกันความร้อน Alumina ZAL 15 โดยมีค่าสภาพการนำความร้อน k ที่อุณหภูมิ 1100°C เท่ากับ $0.18 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$

ขนาดของแผ่นฉนวนด้านภายใน	ชั้นที่สาม	14"×11"×13"
ขนาดของแผ่นฉนวนด้านนอก	ชั้นที่สาม	16"×12"×15"
ขนาดเฉลี่ยของแผ่นฉนวน	ชั้นที่สาม	15"×11.5"×14"
	หรือ	38.1 cm×29.27cm×35.56 cm

$$\begin{aligned}
 \text{หาค่าพื้นที่ผิว } A &= 2 (\text{กว้าง} \times \text{ยาว}) + 2 (\text{กว้าง} \times \text{สูง}) \\
 &\quad + 2 (\text{ยาว} \times \text{สูง}) \\
 &= 2(0.381 \times 0.2921) + 2(0.381 \times 0.3556) \\
 &\quad + 2(0.2921 \times 0.3556) \\
 &= 0.7012 \quad \text{m}^2
 \end{aligned}$$

หาค่า ความต้านทานการนำความร้อนของแผ่นฉนวนชั้นที่สาม

$$\begin{aligned}
 R_3 &= L / k A \\
 &= 0.0254 / (0.18 \times 0.7012) \\
 &= 0.201 \quad \text{Ohm}
 \end{aligned}$$

(4) การหาค่า ความต้านทานการนำความร้อนของแผ่นฉนวนชั้นที่สี่ ซึ่งใช้วัสดุที่เป็นแผ่นฉนวนกันความร้อน Alumina ZAL 15 โดยมีค่าสภาพการนำความร้อน k ที่อุณหภูมิ 1100°C เท่ากับ $0.18 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$

ขนาดของแผ่นฉนวนด้านใน	ชั้นที่สี่	16"×12"×15"
ขนาดของแผ่นฉนวนภายนอก	ชั้นที่สี่	18"×14"×17"
ขนาดเฉลี่ยของแผ่นฉนวน	ชั้นที่สี่	17"×13"×16"
	หรือ	43.18 cm×33.02cm×40.64 cm

$$\begin{aligned}
 \text{หาค่าพื้นที่ผิว } A &= 2 (\text{กว้าง} \times \text{ยาว}) + 2 (\text{กว้าง} \times \text{สูง}) \\
 &\quad + 2 (\text{ยาว} \times \text{สูง}) \\
 &= 2(0.4318 \times 0.3302) + 2(0.4318 \times 0.4064) \\
 &\quad + 2(0.3302 \times 0.4064) \\
 &= 0.9046 \quad \text{m}^2
 \end{aligned}$$

หาค่า ความต้านทานการนำความร้อนของแผ่นฉนวนชั้นที่สี่

$$\begin{aligned}
 R_4 &= L / k A \\
 &= 0.0254 / (0.18 \times 0.9046) \\
 &= 0.156 \quad \text{Ohm}
 \end{aligned}$$

หาค่า ความต้านทานการนำความร้อน จากสูตร

$$\begin{aligned}
 R_{\text{รวม}} &= R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \\
 &= 0.188 + 0.152 + 0.201 + 0.156 \\
 &= 0.697 \quad \text{Ohm}
 \end{aligned}$$

ภาคผนวก (ค)

รายละเอียดเพิ่มเติมของอุปกรณ์เตาแก๊ส

ชุดจ่ายกำลังไฟฟ้า

เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ

1. ไฟฟ้ากระแสสลับ ขนาด 380 V 3 เฟส 4 สาย ใช้สำหรับจ่ายให้กับอุปกรณ์ต่างๆ เช่น ชุดมอเตอร์เปิด-ปิด ประตู ชุดมอเตอร์ของเครื่องอัดอากาศ (blower) และเครื่องทำน้ำเย็นสำหรับระบายความร้อนของเตา
2. ไฟฟ้ากระแสสลับ ขนาด 220 V 1 เฟส 2 สาย ใช้สำหรับจ่ายให้กับอุปกรณ์ที่เป็นตัวควบคุมต่างๆ

หัวพ่นไฟ (Burner)

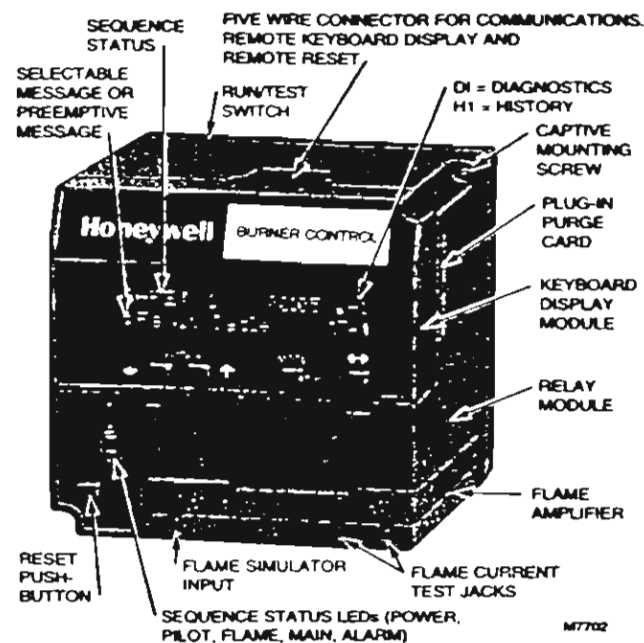
เป็นหัวพ่นไฟที่ทำด้วยวัสดุเหล็กหล่อ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 นิ้ว โดยหัวพ่นไฟสามารถสร้างความร้อนได้ 120,000 กิโลแคลอรีต่อชั่วโมงต่อหนึ่งหัว แต่เตาใบนี้มี 2 หัว ฉะนั้นสามารถสร้างความร้อนได้ถึง 240,000 กิโลแคลอรีต่อชั่วโมง โดยหัวพ่นไฟนี้จะมีน้ำหล่อเย็นคอยระบายความร้อนอยู่รอบๆ

ชุดควบคุมการจุดไฟ (BURNER CONTROL)

ชุดควบคุมการจุดไฟนี้เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท Honeywell รุ่น 7800-Series จะเป็นตัวควบคุมการจุดไฟและดับไฟให้เป็นไปตามลำดับขั้นตอนดังนี้

ลำดับขั้นตอนการจุดไฟ

1. ไกล่ลมหรือออกจากเตาโดยใช้เวลา 30 วินาที
2. เปิดโซลินอยด์วาล์ว เพื่อให้แก๊ส LPG และอากาศผสมกันและถูกส่งไปที่หัว Pilot (ชุดจุดไฟเล็ก) จากนั้นตัวจ่ายประกายไฟจะจ่ายประกายไฟมาที่บริเวณหัว Pilot เมื่อส่วนผสมของแก๊ส LPG กับอากาศมาเจอประกายไฟเข้าทำให้เกิดการลุกไหม้เกิดขึ้นที่หัว Pilot (หัวช่วยจุดไฟ) ช่วงนี้จะใช้เวลาประมาณ 10 วินาที
3. ต่อจากนั้นโซลินอยด์วาล์วของหัวพ่นไฟ จะเปิดให้แก๊ส LPG และอากาศออกมาผสมกันและถูกส่งไปที่หัวพ่นไฟ เมื่อเชื้อเพลิงออกมาจากหัวพ่นไฟ มาเจอกับเปลวไฟที่หัว Pilot จึงเกิดการลุกไหม้เป็นอันสิ้นสุดการจุดไฟ



ขั้นตอนการปิดเตา(ดับไฟ)

1. ให้ปิดสวิทช์ที่ตัวชุดควบคุมการจุดไฟ ตัวควบคุมการจุดไฟจะสั่งให้โซลินอยวาล์วทั้งของหัว Pilot และหัวพ่นไฟ ปิดวาล์วตัดการส่งแก๊สทำให้ไฟดับ
2. เครื่องอัดอากาศไถ่ลมค่ออีก 30 วินาที เป็นอันสิ้นสุดการปิดเตา (ไฟดับ)

หมายเหตุ การจุดเตาถ้าไฟไม่ติดหรือติดไปแล้วดับไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น จะมีเสียงออกเตือน ให้ทำการ Reset ที่ชุดควบคุมการจุดไฟใหม่ จึงจะทำการจุดเตาครั้งต่อไปได้

ตัวตรวจจับแสงยูวี (UV Detectors)

ตัวตรวจจับแสง UV ใช้ผลิตภัณฑ์ของ Honeywell รุ่น C-7027 ทำหน้าที่ในการตรวจจับแสง UV ที่เกิดจากการลุกไหม้ของเชื้อเพลิงในเตา แล้วส่งสัญญาณไปให้ชุดควบคุมการจุดไฟ (Burner Control)

ชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller)

ตัวควบคุมอุณหภูมิใช้ผลิตภัณฑ์ของ Honeywell รุ่น UBC-2000 จะทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของเตา โดยรับสัญญาณจากหัววัดอุณหภูมิ มาประมวลผลและส่งสัญญาณออกไปควบคุมการเปิดปิดของวาล์วแก๊ส LPG และ ออกซิเจน โดยตัวควบคุมอุณหภูมินี้สามารถควบคุมแบบ Manual และ automatic

ชุดวัดอุณหภูมิ มี 2 แบบ

1. ไพโรมิเตอร์ ซึ่งเป็น Heat-Radiation Detectors ผลิตภัณฑ์ของ Honeywell รุ่น 18890-0135-118-330-431-601 ช่วงวัดอุณหภูมิ 975 – 2200 °C ระบายความร้อนของตัวเรือนด้วยน้ำหรืออากาศ โดยไพโรมิเตอร์นี้จะส่งสัญญาณไปให้กับ Controllers UBC-2000
2. เทอร์โมคัปเปิ้ล Type B ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางลวด 0.5 มม. อยู่ในท่ออะลูมิเนียมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 10 มม. ยาว 350 มม. เทอร์โมคัปเปิ้ลนี้ทำหน้าที่ในการวัดอุณหภูมิและส่งสัญญาณไปให้กับ Controllers UBC-2000

Control Valve (วาล์วสี่สั้ม)

Control Valve นี้เป็น diaphragm valve ผลิตภัณฑ์ของ Honeywell รุ่น Series-2000 ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางหน้าวาล์ว เท่ากับ 15 มิลลิเมตร โดยวาล์วตัวนี้จะทำหน้าที่เปิด – ปิดหรือเพิ่มลด ปริมาณการไหลของแก๊ส LPG และออกซิเจน โดยรับสัญญาณ 4-20 mA.DC จากชุดควบคุมอุณหภูมิ (Controllers UBC-2000)

มอเตอร์ควบคุมวาล์วปีกผีเสื้อ (Motor Control Valve)

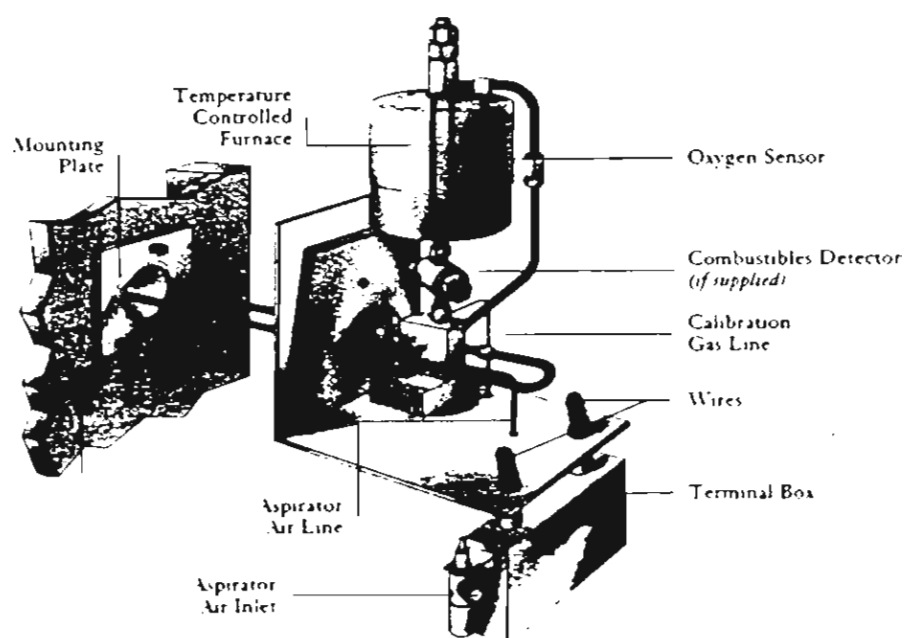
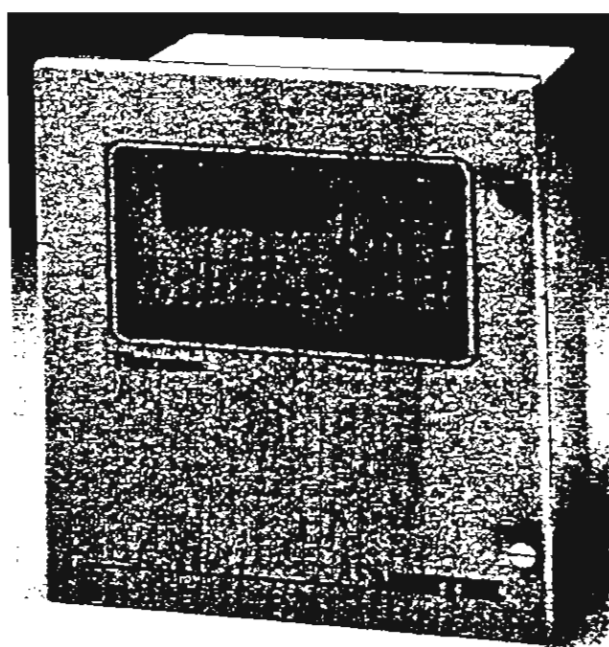
มอเตอร์รุ่น M-954 ใช้ร่วมกับวาล์วปีกผีเสื้อ (butterfly valve) รุ่น V-51 มอเตอร์ควบคุมวาล์วนี้จะทำการหมุนเปิด-ปิดวาล์วปีกผีเสื้อ เพื่อเพิ่มหรือลดลมที่จะใช้ผสมกับแก๊ส LPG ที่จะทำการเผาไหม้ โดยรับสัญญาณมาจากตัวควบคุมการจุดไฟ (Burner Control)

เครื่องอัดอากาศ (Side Channal Blower)

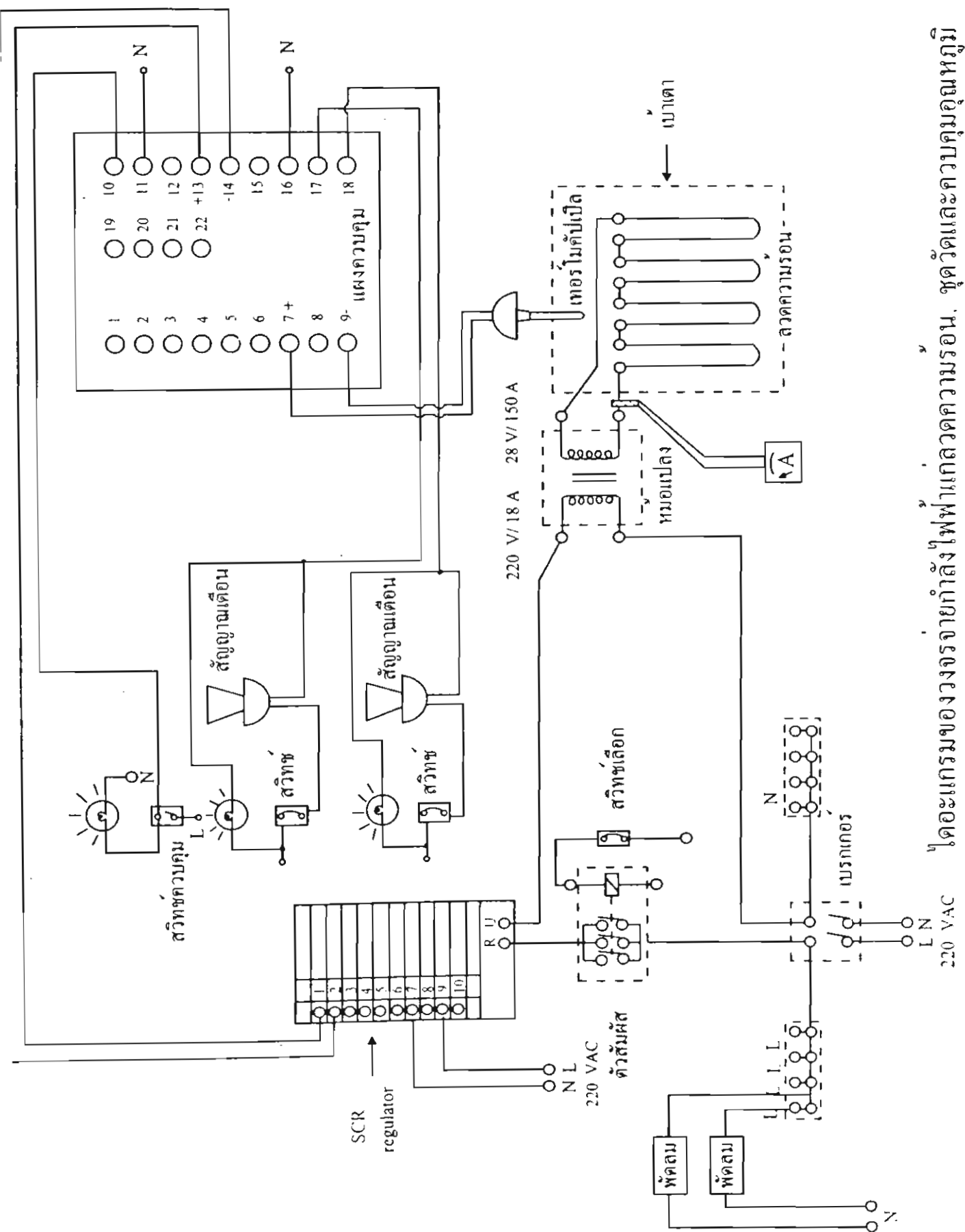
เครื่องอัดอากาศนี้เป็นรุ่น HB-329 Blower ใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนขนาด 380 VAC 4 สาย ขนาด 0.75 kW ในการหมุนตัวใบพัดของ Blower เพื่อทำการสร้างลมหรืออัดอากาศให้ได้ปริมาณ 200 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง อากาศนี้ทำหน้าที่ผสมกับแก๊ส LPG เพื่อทำการลุกไหม้

ชุดวิเคราะห์แก๊ส

เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท AMETEK ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งใช้เครื่องหมายการค้าว่า Thermox® Flue Gas Analyzers ในโครงการนี้ ได้เลือกใช้รุ่น WDG-IV ประกอบด้วย ชุดแสดงและประมวลผล (รูปบน) และชุดหัววัด (รูปล่างซ้ายมือ) โดยภายในชุดหัววัดจะมีอุปกรณ์ต่างๆ ดังแสดงโดยไดอะแกรมในรูปล่างด้านขวามือ จากไดอะแกรม รูปล่างขวามือ Mounting plate ก็คือแผ่นที่จะยึดชุดหัววัดเข้ากับผนังเตา และจะมีท่อกลวงต่ออยู่กับ oxygen sensor โดยปลายอีกข้างหนึ่งจะอยู่ในผนังเตา เพื่อวัดอุณหภูมิหรือเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้ภายในเตาเผา ยัง O_2 sensor เพื่อตรวจดูว่า O_2 ที่เหลือจากการเผาไหม้ มีปริมาณเท่าใด ถ้าใช้ท่ออะลูมินาที่แห้งเข้าไปในเตา จะสามารถวัดเปลวไฟที่มีอุณหภูมิสูงถึง $1760^\circ C$ ได้



ภาคผนวก (ง)



โต๊ะเก็บของวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าแก่หลอดความรอน. ชุดวัดและควบคุมอุณหภูมิ