



รายงานวิจัย

เตาอบโลหะอุณหภูมิสูง

สุชาติ เย็นวิเศษ

หอสมุดวิทยาเขตภาคใต้
รับเมื่อ - 6 ส.ค. 2544 เลขทะเบียน 047061
เลขเรียกหนังสือ 683.33
๗๖๖๕
๖๕๔๔

สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล

วิทยาเขตภาคใต้

พ.ศ. 2544

ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2543

หนังสือนี้เป็นสมบัติของห้องสมุด
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตภาคใต้
ผู้ใดพบเห็นกรุณาส่งคืน จักขอบคุณยิ่ง

เตาอบโลหะอุณหภูมิสูง

สุชาติ เย็นวิเศษ

บทคัดย่อ

การอบชุบโลหะด้วยความร้อนเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกลสามารถพิจารณาเลือกใช้แหล่งให้ความร้อนได้หลายแบบ การให้ความร้อนแก่โลหะชิ้นงานโดยใช้เตาแบบช่องจัดเป็นวิธีการที่สะดวกและให้ประสิทธิภาพสูงวิธีหนึ่ง การประดิษฐ์เตาอบโลหะอุณหภูมิสูงมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์การเรียนการสอนทางด้านโลหะวิทยา ในการออกแบบได้คำนึงถึงการใช้งานได้ง่าย ประหยัดพลังงาน และสามารถกำหนดรูปแบบการควบคุมอุณหภูมิได้หลายรูปแบบตามจุดประสงค์ที่กำหนด โดยช่องอบมีขนาด 300 X 250 X 600 มม. (กว้าง X สูง X ลึก) หรือ 45 ลิตร ส่วนประกอบของเตา เปลือกเตาออกแบบสร้างเป็นลักษณะสองชั้น ชั้นนอกทำด้วยแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ชั้นในทำด้วยอิฐฉนวนกันความร้อนหุ้มทับด้วยเซรามิกไฟเบอร์ ภายในติดตั้งขดลวดความร้อนแบบ Kanthal AF จำนวน 2 ชุด โดยใช้พลังงานชุดละ 5.67 kW ควบคุมการทำงานด้วยชุดควบคุมอุณหภูมิและเวลาแบบดิจิทัลที่สามารถตั้งค่าการเพิ่ม รักษาระดับและการลดของอุณหภูมิได้ 7 ขั้นตอน เมื่อทดลองใช้งานปรากฏผลคือสามารถให้อุณหภูมิได้สูงสุดถึง 1,200°C ภายในเวลาประมาณ 90 นาที ในการตั้งค่าการควบคุมอุณหภูมิตามระดับที่กำหนดในช่วงเวลาต่างๆปรากฏว่าสามารถให้ค่าอุณหภูมิได้ถูกต้องสอดคล้องกับเวลาที่กำหนด โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเพียง ± 5 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ : เตาอบแบบช่อง , การอบโลหะ

High Temperature Chamber Furnace

Suchat Yenwiset

ABSTRACT

The procedure of fumigating and hardening a metal to improve its mechanical property can be done in several ways. A use of heat treatment to a metal work piece in a Chamber Furnace is one of the convenient and effective ways. The purpose of inventing a Chamber Furnace with high temperature is to use as a teaching-learning instrument in metallurgy. In the procedure of a design an easy operation, energy save and a multi-temperature controlling as desired is taken into a high consideration. The dimension of the chamber is 300 x 250 x 600 mm. (width x height x depth) or 45 litres. The furnace consists of 2 parts. The outer part is made of rust-proofed steel whereas the inner part is made of insulated bricks cover with fiber ceramic and equipped with 2 sets of Kanthal AF, each of which consumes 5.67 KW. The furnace is operated with a digital temperature and a time controller which can be set to increase, maintain or decrease a temperature for 7 levels. In an experiment the result shows that the furnace is able to provide a maximum temperature of 1,200°C within approximately 90 minutes. An adjustment of a temperature within a time preset is also in consistency. The deviation is only ± 5 percent.

Key words: Chamber Furnace, Metals Heat Treatment

กิตติกรรมประกาศ

การพัฒนาเตาอบโลหะอุณหภูมิสูงได้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความร่วมมือช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่าย ผู้ประดิษฐ์ขอขอบคุณผู้บริหารระดับสูงของสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล สถาบันวิจัย และพัฒนา ที่ส่งเสริม สนับสนุน และอนุมัติทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อจัดสร้างสิ่งประดิษฐ์ขอขอบคุณอาจารย์เปรม ปล้องแก้ว ผู้ช่วยอธิการบดี อาจารย์ชาญดำรง ณ นคร ผู้อำนวยการวิทยาเขตภาคใต้ รศ.ดร.อัศวิน พรหมโสภา ผู้ช่วยผู้อำนวยการฝ่ายวิชาการ อาจารย์เกียรติคุณ สิทธิชัย หัวหน้าแผนกวิจัย ผู้บริหารทุกท่านที่ได้ให้คำปรึกษา และสนับสนุนมาโดยตลอด และที่จะขาดเสียมิได้คือ อาจารย์พิพัฒน์ บุญฤทธิ์ ซึ่งท่านเป็นทั้งผู้ประสิทธิประสาทวิชาและยังได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำมาโดยตลอดจน

สุชาติ เย็นวิเศษ

20 ตุลาคม 2544

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	๗
กิตติกรรมประกาศ	๘
สารบัญเรื่อง	๙
สารบัญตาราง	๗
สารบัญรูปภาพ	๗
บทที่ 1 บทนำ	1
ความเป็นมา และความสำคัญของโครงการ	1
วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
ขอบเขตของโครงการ	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
ทฤษฎีเกี่ยวกับการหาค่าความจุความร้อนของโลหะ	3
หลักการออกแบบและสร้างชุดลดความร้อน	4
ทฤษฎีเกี่ยวกับการกำหนดรูปแบบชุดควบคุมการทำงานของเตาอบโลหะ	7
ทฤษฎีเกี่ยวกับการออกแบบ และการกำหนดชนิดของวัสดุผนังเตาอบโลหะ	16
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	23
การออกแบบสร้างผนังกันความร้อน และโครงสร้างเตา	23
การกำหนดชนิด และขนาดของตัวให้ความร้อน	29
การกำหนดรูปแบบชุดควบคุมอุณหภูมิ	34
บทที่ 4 การวิเคราะห์ และการทดลอง	38
การทดลองวัดค่าการกินกระแสของชุดลดความร้อน	38
การทดลองหาค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ได้จากชุดลดความร้อน	39
การทดสอบความเที่ยงตรงของการควบคุมระดับอุณหภูมิ และเวลา	41
การตรวจวัดระดับอุณหภูมิที่ผนังเตา	44
การทดลองการปรับสภาพโครงสร้างชิ้นงานจริง	45
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และประเมินผล	50
ขีดความสามารถในการเพิ่ม – ลด และรักษาระดับอุณหภูมิของเตา	50
ประสิทธิภาพของผนังเตา และโครงสร้าง	50
สรุปผลการสร้างสิ่งประดิษฐ์	50

	หน้า
ข้อเสนอนั้นะ	51
บรรณานุกรม	52
ภาคผนวก	53

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 แสดงช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการชุบแข็งเหล็กกล้าคาร์บอน	14
รูปที่ 2 แสดงผลของอุณหภูมิที่ต่างกันบริเวณผิว และภายในใจกลางเมื่อเผาด้วยอัตราต่างๆกัน	16
รูปที่ 3 การนำความร้อน	17
รูปที่ 4 การเคลื่อนที่ของความร้อนผ่านผนังหลายชั้น	20
รูปที่ 5 แสดงการเรียงฉนวนกันความร้อน	24
รูปที่ 6 แสดงการวัดอุณหภูมิภายใน และภายนอก	26
รูปที่ 7 กราฟแสดงอุณหภูมิภายในช่องอบ และอุณหภูมิผิวภายนอก	27
รูปที่ 8 แสดงการประกอบผนังชั้นนอกสุด	28
รูปที่ 9 แสดงการจัดวางขดลวดความร้อน และลักษณะของการเรียงแผงฉนวนกันความร้อน	28
รูปที่ 10 แสดงการจัดวางขดลวด และระบบเปิด - ปิดประตูเตา	29
รูปที่ 11 แสดงการม้วนขดลวดความร้อน	34
รูปที่ 12 แสดงการต่อวงจรควบคุม	36
รูปที่ 13 แผนภูมิวงจรควบคุมอุณหภูมิ	36
รูปที่ 14 แสดงการวัดค่าความต้านทานของขดลวด และอัตราการกินกระแส	38
รูปที่ 15 กราฟแสดงการเพิ่มอุณหภูมิเตา	41
รูปที่ 16 กราฟแสดงค่าเบี่ยงเบนของอุณหภูมิจากการตั้งค่าตามตารางที่ 11	43
รูปที่ 17 แสดงการวัดอุณหภูมิภายใน และเปลือกเตาชั้นนอกสุด	45
รูปที่ 18 ชิ้นงานเหล็กหล่อสีขาวที่ปรับโครงสร้างเป็นเหล็กหล่ออบเหนียว	47
รูปที่ 19 แสดงภาพโครงสร้างชิ้นงานในรูปที่18ก่อนและหลังการปรับสภาพ	47

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ค่า C_p ของโลหะ และสารสามัญบางชนิดที่ 298 K	4
ตารางที่ 2 แสดงขนาดมาตรฐานของขดลวด	6
ตารางที่ 3 แสดงระยะเวลาในการเผาที่ความหนาต่างๆกัน	15
ตารางที่ 4 ความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุบางชนิด	18
ตารางที่ 5 แสดงรายละเอียดของวัสดุคูลิ่งเตาอบโลหะชนิดต่างๆเรียงจากด้านใน	23
ตารางที่ 6 แสดงค่าอุณหภูมิภายในช่องอบเทียบกับอุณหภูมิที่ส่งผ่านอิฐฉนวน	26
ตารางที่ 7 ข้อมูลเปรียบเทียบตัวให้ความร้อนแต่ละชนิด	31
ตารางที่ 8 แสดงตัวอย่างการใช้โปรแกรมควบคุม	35
ตารางที่ 9 แสดงแผนการดำเนินงาน	37
ตารางที่ 10 แสดงค่าความต้านทานของขดลวดความร้อน และอัตราการกินกระแส	39
ตารางที่ 11 แสดงระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นภายในช่องอบเมื่อตัดฟังก์ชันการควบคุมเวลาออก	40
ตารางที่ 12 แสดงค่าเบี่ยงเบนของอุณหภูมิโดยการทดลองควบคุมใช้ 1 Pattern 7 Step	42
ตารางที่ 13 แสดงข้อมูลเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในช่องอบขึ้นงานกับผิวภายนอก ที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ	44
ตารางที่ 14 แสดงข้อมูลการวัดอุณหภูมิที่เปลือกเตาชั้นนอกสุด	44
ตารางที่ 15 แสดงข้อมูลมาตรฐานการชุปแข็งของบริษัทผู้ผลิต	45
ตารางที่ 16 แสดงค่าความแข็งที่ได้จากวัด	46
ตารางที่ 17 แสดงตัวอย่างการใช้โปรแกรมควบคุมอุณหภูมิเพื่อทำเหล็กหล่ออบเหนียว	48
ตารางที่ 18 แสดงตัวอย่างการใช้โปรแกรมควบคุมอุณหภูมิเพื่ออบอ่อนอย่างสมบูรณ์	49

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

การจัดการเรียนการสอนในกลุ่มวิชาโลหะวิทยา มีเนื้อหาสาระครอบคลุมในหลายหัวข้อ ซึ่งผู้เรียนต้องศึกษาให้เกิดความเข้าใจอย่างถ่องแท้ จึงจะสามารถนำเอาความรู้ไปใช้ได้อย่างจริงจังและถูกต้อง เช่น ในหัวข้อเรื่อง การอบชุบโลหะด้วยความร้อน ผู้เรียนจะต้องศึกษาทั้งด้าน ทฤษฎีและหลักในการปฏิบัติที่ถูกต้อง โดยในด้านปฏิบัติการจะสัมผัสผลได้นั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการปฏิบัติ เครื่องมือที่มีประสิทธิภาพเพื่อให้การค้นคว้าทดลองเป็นไปอย่างถูกต้อง และเครื่องมือหลักที่จำเป็นต้องใช้ในการอบชุบโลหะ คือ เตาอบโลหะอุณหภูมิสูง ซึ่งจะต้องสามารถให้ความร้อนแก่โลหะชิ้นงาน ในระดับต่าง ๆ ได้อย่างถูกต้องเที่ยงตรง จึงจะสามารถทำการทดลองเพื่อศึกษาค้นคว้าและพิสูจน์ว่าการปฏิบัติได้ผลถูกต้องเป็นไปตามทฤษฎีหรือไม่

วิธีให้ความร้อนแก่โลหะ เพื่อการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลสามารถกระทำได้หลายวิธีซึ่งขึ้นอยู่กับเงื่อนไขต่าง ๆ เช่น รูปร่าง ขนาดและชนิดของโลหะ ซึ่งวิธีการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานโดยใช้เตาอบโลหะแบบช่องก้นเป็นวิธีการที่สะดวก และให้ประสิทธิภาพที่ดีวิธีหนึ่ง เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่น ๆ จัดว่ามีความประหยัดและง่ายต่อการใช้งาน ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบันหน่วยงานหรือองค์กรทั้งภาครัฐและเอกชน ที่จำเป็นต้องใช้งานเกี่ยวกับเตาอบอุณหภูมิสูง ($800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ขึ้นไป) ต่างต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศซึ่งมีราคาต่อหน่วยสูงมาก ในขณะที่รูปแบบการควบคุมการทำงาน ตลอดจนขนาดความจุของช่องอบชิ้นงานมักไม่สอดคล้องโดยตรงกับความต้องการในการใช้งาน ประกอบกับปัจจุบันทางแผนกวิชาโลหะวิทยา คณะเทคโนโลยีการผลิต เป็นหน่วยงานย่อยหน่วยหนึ่งในสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคใต้ ซึ่งทำหน้าที่ให้บริการทางการศึกษาในกลุ่มวิชาโลหะวิทยาทั้งหมด แก่นักศึกษาทั้งในระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง และระดับปริญญาตรี ซึ่งต้องเรียนวิชาโลหะวิทยา , การอบชุบโลหะด้วยความร้อน และปัจจุบันยังไม่มีเตาอบชุบโลหะอุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นเครื่องมือที่สำคัญอย่างหนึ่ง ด้วยสาเหตุที่กล่าวมาแล้วจึงเป็นแรงบันดาลใจที่ก่อให้เกิดโครงการสร้างสิ่งประดิษฐ์ เตาอบโลหะอุณหภูมิสูงขึ้น โดยได้ประยุกต์ความรู้ความเข้าใจทางเทคโนโลยีด้านต่าง ๆ ตลอดจนประสบการณ์ที่มีนำมาผสมผสานเข้าด้วยกันเพื่อใช้ในการออกแบบ และจัดสร้างเตาอบโลหะอุณหภูมิสูง โดยยืนอยู่บนพื้นฐานที่ว่าจะต้องสามารถให้ความร้อนได้สูงถึง $1,200\text{ }^{\circ}\text{C}$ สามารถควบคุมอัตราการเพิ่มขึ้น - การลดลง และรักษาระดับของอุณหภูมิได้อย่างถูกต้องเที่ยงตรง

และประหยัดพลังงาน ควบคุมการทำงานได้ง่าย และที่สำคัญที่สุด คือจะต้องมีราคาต้นทุนถูกกว่า การสั่งซื้อจากต่างประเทศ ซึ่งนอกจากจะช่วยให้เกิดการประหยัดงบประมาณที่จะต้องใช้จ่ายในการ จัดซื้อจากต่างประเทศ ซึ่งมีราคาสูงมากแล้วยังเป็นจุดเริ่มต้นในการที่จะช่วยพัฒนาการคิดค้นสิ่ง ประดิษฐ์ใหม่ ๆ และเพื่อการพัฒนาศักยภาพทางด้านอุตสาหกรรมในด้านต่าง ๆ ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. จัดสร้างเตาอบโลหะอุณหภูมิสูงที่สามารถให้ความร้อนได้สูงถึง 1,200 °C โดยที่สามารถ ควบคุมอุณหภูมิ และเวลาได้ตามต้องการ

1.3 ขอบเขตของโครงการ

โครงการนี้เป็นการออกแบบและจัดสร้างเตาอบโลหะแบบช่อง (Chamber Furnace) ที่มีความจุของอบชิ้นงาน 300X250X600 มม. (กว้างXยาวXสูง) หรือ 45 ลิตร สามารถให้ความร้อนได้สูง ถึง 1,200°C โดยนำเอาระบบการควบคุมการทำงานแบบโปรแกรมเมเบิลคอลลโทรลเลอร์มาใช้ เพื่อให้ การควบคุมการเพิ่มขึ้นและลดลงของอุณหภูมิตลอดจนการควบคุมให้คงที่ตามช่วงเวลาต่างๆ เป็น ไปอย่างถูกต้องแม่นยำ โดยเกิดการสูญเสียพลังงานน้อยซึ่งจะให้ผลโดยตรงกับการประหยัดพลังงาน

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. สามารถจัดสร้างเตาอบโลหะอุณหภูมิสูง โดยใช้เป็นประโยชน์ต่อการเรียนการสอนในวิชา ต่างๆ เช่น วิชาการอบชุบโลหะ, โลหะวิทยาและวัสดุวิศวกรรมในวิทยาเขตภาคใต้ได้เป็นอย่างดี
2. เป็นแนวทางสำหรับการคิดค้นและพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีการอบชุบโลหะตลอดจนเป็น ช่องทางในการลงทุนธุรกิจอุตสาหกรรมการผลิตโลหะและการผลิตเครื่องมือกลต่อไปในอนาคต
3. ประหยัดงบประมาณในการสั่งซื้อเตาอบโลหะอุณหภูมิสูง ที่จะนำมาใช้ในการเรียน การสอน

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ตามวัตถุประสงค์ของโครงการสร้างเตาอบโลหะอุณหภูมิสูง ความหมายคือ ภายในห้องอบชิ้นงานจะต้องสามารถให้ความร้อนได้สูงถึง $1,200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นระดับที่สูงพอต่อการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของเนื้อโลหะชนิดต่าง ๆ เพื่อเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลตามวัตถุประสงค์ต่าง ๆ โดยเฉพาะในโลหะกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน จะมีวิธีการให้ความร้อนกับชิ้นงานในระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกันไป ตามชนิดของเหล็กและคุณสมบัติทางกลที่ต้องการ ฉะนั้นเตาอบที่ใช้จึงจำเป็นต้องมีคุณสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

1. สามารถให้ความร้อนได้สูงถึง $1,200\text{ }^{\circ}\text{C}$
2. สามารถตั้งอัตราการเพิ่มขึ้น การรักษาระดับ และการลดลงของอุณหภูมิได้อย่างถูกต้อง
3. ค่าพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นภายในห้องอบชิ้นงาน ต้องเกิดการสูญเสียออกสู่ภายนอกน้อยที่สุด เพื่อเป็นการประหยัดพลังงาน ซึ่งทำให้เตาอบมีประสิทธิภาพสูงสุด

ในการจัดสร้างเตาอบโลหะอุณหภูมิสูง ให้มีคุณสมบัติทั้ง 3 ประการข้างต้น จำเป็นจะต้องนำหลักของทฤษฎีที่เกี่ยวข้องมาประกอบ ดังนี้

1. ทฤษฎีการหาค่าความจุความร้อนของโลหะ

เพื่อเป็นการนำไปสู่การออกแบบ และกำหนดขนาดของตัวให้ความร้อนโดยมีหลักของทฤษฎี และวิธีการนำมาประยุกต์ใช้งานดังนี้

เมื่อสารได้รับความร้อนเข้าไป โดยที่สารนั้นไม่มีการเปลี่ยนสถานะอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้น ปริมาณความร้อนที่ต้องใช้เพื่อทำให้สารจำนวนหนึ่งมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1°C (หรือ 1K) เรียกว่าความจุความร้อน (Heat Capacity) ของสารนั้น ถ้าปริมาณสารเป็น 1 โมล ความจุความร้อนนี้เรียกว่า ความจุความร้อนต่อโมล (Molar Heat Capacity) ซึ่งหน่วยที่นิยมใช้ คือ $\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$ แต่ถ้าปริมาณของสารที่ใช้เป็นกรัม เรียกว่าความร้อนจำเพาะ ดังนั้นความร้อนจำเพาะ คือ ปริมาณความร้อนที่ต้องใช้เพื่อทำให้สาร 1 กรัม มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1°C (หรือ 1K)

ถ้าให้ q แทนปริมาณความร้อนที่ต้องเพิ่มกับสาร n โมล ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก T_1 เป็น T_2 ($T_2 - T_1 = \Delta T$) จะได้

$$q = nC\Delta T$$

ซึ่ง C = ความจุความร้อนต่อโมลที่ความดันคงที่ เช่น ความดันบรรยากาศ จึงสามารถประยุกต์เป็น

$$q_p = nC_p\Delta T$$

ซึ่ง q_p = ความร้อนที่เพิ่มเข้าไปที่ความดันคงที่

C_p = ความจุความร้อนต่อโมลที่ความดันคงที่

ความจุความร้อนต่อโมล (C_p) เป็นสมบัติทางกายภาพจำเพาะของธาตุหรือสาร หาได้จากการทดลองค่า C_p ของโลหะตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่า C_p ของโลหะ และสารสามัญบางชนิดที่ 298 K

โลหะ	C_p	
	Cal/mol °deg	J/mol °deg
Ag	6.1	26
Al	5.8	24
Au	6.07	25.4
Bi	6.1	26
Cd	6.2	26
Cr	5.6	23
Cu	5.85	24.5
Fe	5.9	25
Pb	6.4	27
Sn	6.4	27
Zn	6.06	25.4

สูตรที่ใช้คำนวณหาขนาดและความยาวลวดความร้อน (Kanthal Handbook, 2000, p. 18)

- สูตรคำนวณหาขนาดความโตลวด (d) หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$d = \frac{1}{2.91} \sqrt[3]{\left(\frac{P}{U}\right)^2 \frac{\zeta C_t}{p}} \text{ mm}$$

เมื่อกำหนดให้

P = Power

U = Voltage

ζ = Resistivity

C_t = Temperature factor

p = Surface load of heating element

d = Wire Diameter

- สูตรคำนวณหาค่าความต้านทานรวม (R_T) ของลวดความร้อน

$$R_T = \frac{U^2}{P}$$

เมื่อกำหนดให้

R_T = Hot resistance (Ω)

U = Voltage (V)

P = Power (w)

- สูตรคำนวณหาความยาวรวมของขดลวดความร้อน หาได้จากการนำค่าความต้านทานต่อหน่วยความยาว (Ω/m or Ω/ft) ตามตารางที่ 2 โดยคิดที่ $20^\circ C$

$$\frac{R_{20}}{\Omega/m} \text{ m, } \frac{R_{20}}{\Omega/ft} \text{ ft}$$

- ข้อเสนอแนะในการม้วนขดลวดความร้อน

ระดับอุณหภูมิใช้งาน	ติดตั้งในร่อง	ติดตั้งบนแกน
$<1000^\circ C$ $1830^\circ F$	$D/d = 6-8$	12-14
$>1000^\circ C$ $1830^\circ F$	$D/d = 5-6$	12-14

เมื่อกำหนดให้ D = ความโตของขดม้วน , d = ความโตของเส้นลวด

- วิธีการคำนวณหาจำนวนขดม้วนเมื่อทราบความยาวรวมของลวด

$$W = \frac{1000 \times 1}{\pi(D-d)} \text{ (mm)} ; w = \frac{12 \times 1}{\pi(D-d)} \text{ (in)}$$

W = จำนวนขดม้วน

ตารางที่ 2 แสดงขนาดมาตรฐานของขดลวด (Wire and strip. Standart stock items.)

Resistivity $1.39 \Omega \text{ mm}^2 \text{ m}^{-1}$, Density 7.15 g cm^{-3}

To obtain resistivity at working temperature multiply by the factor C_t in the following table:

$^{\circ}\text{C}$	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
C_t	1.00	1.00	1.01	1.01	1.02	1.03	1.04	1.04	1.05	1.05	1.06	1.06	1.06	1.06	1.07

Diameter mm	Resistance Ω/m 20°C	cm^2/Ω 20°C	Weight g/m	Surface area cm^2/m	Cross sectional area mm^2	Diameter mm
7.0	0.0361	6090	275	220	38.5	7.0
6.5	0.0419	4870	237	204	33.2	6.5
6.0	0.0492	3830	202	188	28.3	6.0
5.5	0.0585	2950	170	173	23.8	5.5
5.0	0.0708	2220	140	157	19.6	5.0
4.75	0.0784	1900	127	149	17.7	4.75
4.5	0.0874	1620	114	141	15.9	4.5
4.25	0.0980	1360	101	134	14.2	4.25
4.0	0.111	1140	89.8	126	12.6	4.0
3.75	0.126	936	79.0	118	11.0	3.75
3.5	0.144	761	68.8	110	9.62	3.5
3.25	0.168	609	59.3	102	8.30	3.25
3.0	0.197	479	50.5	94.2	7.07	3.0
2.8	0.226	390	44.0	88.0	6.16	2.8
2.5	0.283	277	35.1	78.5	4.91	2.5
2.25	0.350	202	28.4	70.7	3.98	2.25
2.0	0.442	142	22.5	62.8	3.14	2.0
1.9	0.490	122	20.3	59.7	2.84	1.9
1.8	0.546	104	18.2	56.5	2.54	1.8
1.7	0.612	87.2	16.2	53.4	2.27	1.7
1.6	0.691	72.7	14.4	50.3	2.01	1.6
1.5	0.787	59.9	12.6	47.1	1.77	1.5
1.4	0.903	48.7	11.0	44.0	1.54	1.4
1.3	1.05	39.0	9.49	40.8	1.33	1.3
1.2	1.23	30.7	8.09	37.7	1.13	1.2
1.1	1.46	23.6	6.79	34.6	0.950	1.1
1.0	1.77	17.8	5.62	31.4	0.785	1.0

2. ทฤษฎีเกี่ยวกับการกำหนดรูปแบบชุดควบคุมการทำงานของเตาอบโลหะ

เนื่องจากการอบชุบโลหะ เพื่อเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลตามวัตถุประสงค์ต่าง ๆ มีรายละเอียดในการควบคุมระดับอุณหภูมิของชิ้นงาน ที่ค่อนข้างเข้มงวดตามลักษณะรูปร่าง ขนาด ชนิดของโลหะ และวัตถุประสงค์ของคุณสมบัติทางกลที่ต้องการ ซึ่งมีทฤษฎีและกฎเกณฑ์ในการให้ความร้อนกับชิ้นงานดังนี้

หลักการอบชุบความร้อนที่กระทำกับเหล็กกล้า มีความมุ่งหมายโดยทั่วไปเพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของเหล็ก ด้วยการเผาให้ความร้อนและปล่อยให้เย็นตัวในอัตราต่าง ๆ กัน โดยอาศัยคุณสมบัติของเหล็กที่สามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของระบบผลึก (Allotropy) ได้เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ทำให้เราสามารถควบคุมคุณภาพของเหล็กให้เปลี่ยนแปลงไปตามวัตถุประสงค์ ดังเช่น ต้องการให้เหล็กมีความอ่อนตัวสูง เพื่อความมุ่งหมายในการขึ้นรูปได้สะดวก ให้เหล็กมีความแข็งแรงสูง เพื่อทนต่อการเสียดสีและต้องการให้เหล็กมีความเหนียว ใช้งานที่มีแรงกระแทกและแรงบิดตัวสูงได้ ทนทาน คุณสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้ ด้วยการอบชุบความร้อน ซึ่งมีอยู่หลาย ๆ กรรมวิธี ดังนี้

2.1 การอบอ่อนหรือการอบให้อ่อนตัวสูง (Annealing)

มีความมุ่งหมายเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของเหล็กที่ผ่านการผลิตต่าง ๆ มา เช่น การขึ้นรูปร้อน (Forging, Hot Rolling) การขึ้นรูปเย็น (Cold Rolling, Drawing) การเชื่อม หรือผ่านการหล่อ (Casting) ซึ่งเหล็กที่ผ่านขั้นตอนการผลิตดังกล่าว จะมีคุณสมบัติที่ไม่ดีหลายประการ เช่น

เหล็กที่ผ่านการขึ้นรูปร้อน จะมีคุณสมบัติที่ไม่สม่ำเสมอส่วนที่มีมุมแหลม ซึ่งอัตราการเย็นตัวสูงจะมีความแข็งแรงมากกว่าส่วนอื่น ๆ โครงสร้างของเหล็กบริเวณผิวจะมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยเกรนขนาดเล็ก เพราะถูกแรงกระแทกและแรงอัดมากกว่าเนื้อเหล็กภายใน ทำให้มีคุณสมบัติไม่สม่ำเสมอ ถึงภายใน

เหล็กที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น มักจะมีความเครียดที่เกิดจากการถูกแรงอัด หรือบีบเหล็กค้างอยู่ มีส่วนทำให้มีความแข็งแรงไม่สม่ำเสมอ สูญเสียความเหนียว (Ductility)

เหล็กที่ผ่านการเชื่อม เช่นเดียวกัน การเชื่อมเป็นการทำให้เหล็กร้อนบางจุด การขยายตัวเมื่อถูกความร้อนและการหดตัวเมื่อถูกปล่อยให้เย็น ย่อมเป็นการยากที่จะทำให้ได้ทั่วถึงมักเกิดความเครียดเหลือค้าง และโครงสร้างของเนื้อเหล็กบริเวณจุดที่ทำการเชื่อม จึงต่างกับเนื้อเหล็กในส่วนอื่น ๆ ที่ไม่ถูกความร้อนจากการเชื่อม คุณสมบัติของเหล็กจะขาดความสม่ำเสมอ

เหล็กที่ผ่านงานหล่อ ยิ่งมองเห็นได้ง่ายว่าโครงสร้าง และคุณสมบัติของเหล็กจะมีส่วนที่แตกต่างกันมาก เพราะอัตราการเย็นตัวของเหล็กในแบบหล่อ (ซึ่งส่วนมากใช้ทรายเป็นวัสดุแบบหล่อ) จะแตกต่างกันทั้งส่วนที่หนา และส่วนที่บาง ยิ่งส่วนที่เป็นแ่งมุมการเย็นตัวจะยิ่งเร็วกว่าส่วนอื่น จึงมักจะมีค่าความแข็งแรงสูง

จะเห็นได้ว่า การที่จะนำเอาเหล็กที่ผ่านกรรมวิธีขึ้นรูปต่าง ๆ ไปใช้งาน หรือนำไปตัด เจาะ กลึง ไส ย่อมทำให้เกิดอุปสรรคในลักษณะต่าง ๆ ที่พอจะมองเห็นได้ชัดเจน เช่น การกลึง การไส ถ้าเหล็กมีความแข็งไม่เท่ากันทุกส่วน การปรับมุมของมีดกลึง หรือตั้งอัตราความเร็วในการตัดจะเกิดปัญหามาก และผลงานที่ได้ออกก็ไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นเหล็กที่ผ่านการขึ้นรูปมา ก่อนนำไปใช้งาน หรือפורมรูปร่างในขั้นต่อ ๆ ไป จำเป็นต้องผ่านการอบให้อ่อนตัว ซึ่งลักษณะของการทำงานมีหลายวิธีขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์สุดท้าย

2.1.1 การอบอ่อนอย่างสมบูรณ์ (Full Annealing)

มีความมุ่งหมายเพื่อให้เหล็กมีความอ่อนตัวสูงเพื่อช่วยให้กลึง หรือไสได้ง่าย เพื่อให้เหล็กมีคุณสมบัติด้านไฟฟ้า และแม่เหล็กได้สม่ำเสมอ

วิธีการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์จะเผาเหล็กให้มีอุณหภูมิสูงเหนือเส้น Ac_3 ประมาณ $30^\circ - 50^\circ C$ ในกรณีของเหล็กไฮโปยูเทคตอยด์ และเหนือเส้น Ac_1 ในกรณีของเหล็กไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ อัตราให้ความร้อนประมาณ $30^\circ - 200^\circ C$ ต่อชั่วโมงขึ้นอยู่กับลักษณะของชิ้นเหล็ก ถ้ารูปร่างเป็นแท่งตันอาจจะเผาที่อัตราสูงและควรจะใช้อัตราต่ำ และเมื่อแท่งเหล็กมีความหนาที่แตกต่างกันมาก เมื่อเผาถึงอุณหภูมิที่ต้องการแล้วควรทิ้งไว้ที่อุณหภูมิประมาณ 30-60 นาที ต่อความหนาเฉลี่ย 25 มม. หลังจากนั้นปล่อยให้เหล็กเย็นช้า ๆ ในอัตรา $150^\circ - 200^\circ C$ ต่อชั่วโมง ในทางปฏิบัติปล่อยให้เย็นในเตา (Furnace Cooled) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเหล็กจะเป็นไปในลักษณะใกล้เคียงสภาพสมดุลย์ โครงสร้างที่เป็นอยู่ก่อนการอบอ่อน ซึ่งอาจจะเป็นมาเทนไซต์ เบนไนท์ หรือซอร์ไบท์ จะเปลี่ยนเป็นเฟอไรท์ กับเพอร์ไรท์ สำหรับเหล็กไฮโปยูเทคตอยด์ จะเป็นเฟอไรท์กับซีเมนไตต์ สำหรับเหล็กไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ ส่วนยูเทคตอยด์ไม่มีปัญหาจะได้โครงสร้างเป็นเฟอไรท์เพียงอย่างเดียว

ข้อสังเกต

1. การที่เผาเหล็กเพียงให้อุณหภูมิเหนือเส้น Ac_3 ประมาณ $30^\circ - 50^\circ C$ สำหรับเหล็กไฮโป-ยูเทคตอยด์ เพื่อไม่ให้ออสเทนไนท์ขยายตัวมากจะมีเกรนโต ทำให้โครงสร้างสุดท้ายมีเกรนโตไปด้วย อันเป็นลักษณะที่เหล็กจะเสียคุณสมบัติด้านความเหนียว

2. ในกรณีของเหล็กไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ เผาที่อุณหภูมิเหนือเส้น Ac_1 ไม่เลยเส้น Ac_m เพราะถ้าเผาเหนือเส้น Ac_m เหล็กจะมีอัตราการขยายตัวของเกรนเร็วมากจะได้ออสเทนไนท์เกรนโตซึ่งไม่ต้องการ อีกประการหนึ่งเหล็กไฮเปอร์ยูเทคตอยด์โดยทั่ว ๆ ไป จะต้องประกอบด้วยเกรนของเฟอไรท์และมีซีเมนไตต์ประเภทโปรยูเทคตอยด์ (Proeutectoid หรือ Secondary) ล้อมรอบเกรนเฟอไรท์ มีลักษณะเกรนเป็นลูกโซ่จากเกรนหนึ่งต่อไปยังเกรนหนึ่ง ซึ่งซีเมนไตต์ มีความแข็งและ

เพราะ จึงทำให้เหล็กที่มีลักษณะโครงสร้างเช่นนี้ขาดคุณสมบัติด้านความเหนียว และทนแรงดึงได้น้อยลง เพราะจะเกิดการแตก หรือขาดตามขอบเกรนเสียก่อนที่เฟอไรท์รับแรงเต็มที่ ดังนั้นเราจึงไม่นิยมเผาเหล็กเลยเส้น Ac_m เพราะถ้าทำเช่นนี้เมื่อปล่อยให้เหล็กเย็นช้า ๆ จะได้โครงสร้างเหล็กดังกล่าว วิธีแก้ไข คือเผาเหล็กให้เหนือเส้น Ac_1 ซึ่งอุณหภูมิช่วงนี้จะอยู่ในช่วงโปรยูเทคตอยด์ ซีเมนต์ไวด์บางส่วนจะกลายเป็นออส-เตนไนท์ เมื่อพิจารณาโครงสร้างของเหล็กที่อุณหภูมินี้จะปรากฏเกรนของออสเตนไนท์ โดยมีโปรยูเทคตอยด์ซีเมนต์ไวด์อยู่ตามบริเวณขอบเกรน แต่จะขาดเป็นช่วง ๆ ไม่ต่อเนื่อง เมื่อทิ้งไว้ที่อุณหภูมินี้ระยะหนึ่ง ซีเมนต์ไวด์จะค่อย ๆ พอร์มตัวให้สั้นลง อาจจะมีลักษณะกลมบ้างเป็นบางส่วน ภายหลังเมื่อปล่อยให้เหล็กที่มีโครงสร้างเช่นนี้เย็นตัวลงช้า ๆ จะปรากฏว่าโปรยูเทคตอยด์ซีเมนต์ไวด์ที่เปลี่ยนมาจากออสเตนไนท์จะไปจับรวมกับซีเมนต์ไวด์ที่เหลืออยู่เดิม และไม่สามารถที่จะเกิดลักษณะเป็นลูกโซ่ได้อีก ทำให้โครงสร้างที่ประกอบด้วยเฟอไรท์กับโปรยูเทคตอยด์ซีเมนต์ไวด์ กระจัดกระจายไม่ต่อเนื่องกันเป็นลูกโซ่ตามขอบเกรนเหล็กจะมีคุณสมบัติด้านความเหนียวดีขึ้น และทนแรงดึงได้มากขึ้น

3. การที่ไม่ปล่อยให้เหล็กอยู่ในเตาที่อุณหภูมิเหนือเส้น Ac_3 นานเกินไป (60 นาทีต่อความหนา 25 มม.) เพราะถ้าเหล็กอยู่ในเตาที่อุณหภูมินี้นาน จะทำให้เกรนของออสเตนไนท์มีโอกาสขยายตัวได้มากเช่นเดียวกัน

4. อัตราการเย็นตัวกำหนดประมาณ $150^\circ - 200^\circ C$ ต่อชั่วโมง ถ้าอัตราการเย็นตัวน้อยกว่านี้ จะมีข้อเสียตรงที่เหล็กโดยเฉพาะไฮโปยูเทคตอยด์จะปรากฏเฟอไรท์ไปรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนไม่สม่ำเสมอ จะมีส่วนที่ทำให้เกิดจุดอ่อนตัวเป็นบางแห่ง จะเกิดผลเมื่อนำเหล็กเข้าไปชุบแข็ง ภายหลัง ความแข็งที่ได้จะไม่สม่ำเสมอ เพราะการแพร่ซึมของคาร์บอนในขณะที่เผาก่อนการชุบแข็ง อาจจะเป็นไปได้ไม่ดีพอ ถ้าอัตราการเย็นตัวเร็วกว่านี้จะเป็นการอบชุบอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อการทำงานออร์มัลไลซ์ ซึ่งการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์นอกจากที่กล่าวมาแล้ว ยังมีการอบอ่อนที่นำจะกล่าวถึงอีกสองลักษณะ คือ การอบอ่อนไอโซเทอร์มอล (Isothermal) มีวัตถุประสงค์ในการทำคล้ายคลึงกัน เพียงแต่วิธีการทำที่แตกต่างกัน คือ จะเผาเหล็กเหนือเส้น Ac_1 หรือ Ac_m แล้วแต่ชนิดของเหล็ก จากนั้นจะปล่อยให้เหล็กเย็นลงถึงอุณหภูมิประมาณ $600^\circ - 700^\circ C$ (ต่ำกว่าเส้น Ac_1) ทิ้งไว้ที่อุณหภูมินี้นานจนออสเตนไนท์แตกตัวหมดแล้ว จึงจะปล่อยให้เหล็กเย็นในอากาศ (Air Cooled) ด้วยวิธีนี้ได้โครงสร้างของเหล็กที่สม่ำเสมอ เช่นเดียวกัน และใช้เวลาในการอบอ่อนสั้นกว่า การแตกตัวของออสเตนไนท์เป็นเฟอไรท์เกิดที่อุณหภูมิกึ่งที่ เรียกการอบลักษณะนี้ว่า ไอโซเทอร์มอล (Isothermal Annealing) การอบอ่อนเพื่อความสม่ำเสมอ (Homogenising Annealing) เป็นการอบอ่อนที่กระทำกับเหล็กกล้าผสมที่หล่อเป็นแท่งขนาดใหญ่ (Alloy Steel Ingot) ซึ่งปริมาณของธาตุที่ผสมจะไม่สม่ำเสมอตั้งแต่ใจกลางของแท่งจนถึงผิวด้านนอก วิธีการที่ช่วยให้การผสมของเหล็ก

สม่ำเสมอกระทำได้ โดยการเผาเหล็กที่อุณหภูมิสูงประมาณ $1100^{\circ} - 1200^{\circ}\text{C}$ และใช้เวลานานประมาณ 10 - 15 ชั่วโมง เพื่อเปิดโอกาสให้อะตอมของธาตุที่ผสมมีโอกาสแพร่ซึมได้ทั่วถึงตลอดทั้งแท่ง ซึ่งเป็นวิธีเดียวที่จะกระทำได้ หลังจากที่ตั้งไว้ในเตานานพอแล้ว จะปล่อยให้เหล็กเย็นช้าภายในเตา การอบอ่อนลักษณะนี้จะสูญเสียเหล็กบางส่วนจากการเกิดออกซิเดชัน

2.1.2 การอบอ่อนไม่สมบูรณ์ (Incomplete Annealing)

หมายถึง การอบอ่อนที่กระทำที่อุณหภูมิต่ำกว่าเส้น A_{c1} หรือบางกรณีอาจสูงกว่าเส้น A_{c1} เล็กน้อย เพื่อทำลายความเครียดที่เหลืออยู่ อันเนื่องมาจากการขึ้นรูปเย็น หรือเพื่อต้องการปรับปรุงคุณสมบัติทางการกลึง หรือไสสำหรับเหล็กบางชนิด การอบอ่อนที่ไม่สมบูรณ์มี 2 ลักษณะคือ

1) การอบอ่อนเพื่อขจัดความเครียดเหลือค้าง (Stress – relief Annealing)

เป็นการอบอ่อน เพื่อทำลายความเครียดภายในแท่งเหล็กที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น เช่น เหล็กที่ผ่านรีดหรือการดึง จะทำให้กลุ่มอะตอมของเหล็กอยู่ในสภาพบิดเบี้ยว (Lattice Distortion) ทำให้เหล็กมีความแข็งเพิ่มขึ้นและสูญเสียความเหนียว ไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งานหรือไม่เหมาะที่จะนำไปขึ้นรูปในขั้นต่อไป จะต้องทำการอบอ่อนกำจัดความเครียดภายในเสียก่อน โดยเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่าเส้น A_{c1} ($500^{\circ} - 650^{\circ}\text{C}$) ใช้เวลาประมาณ 1 - 2 ชั่วโมง กลุ่มอะตอมที่ไม่อยู่ในสภาพสมดุลก็จะค่อย ๆ กลับสู่สภาพปกติ หรืออาจรวมตัวในเกรนใหม่ที่ปราศจากความเครียด โดยที่โครงสร้างส่วนใหญ่จะไม่เปลี่ยนแปลง เพราะอุณหภูมิไม่สูงจนเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเดิมเป็นออสเตนไนท์ภายหลังตั้งไว้ในอุณหภูมิ $550^{\circ} - 650^{\circ}\text{C}$ นานพอแล้วจะปล่อยให้เย็นในอากาศ

2) การอบอ่อนเพื่อความอ่อนตัวสูง (Spheroidising Anneals)

เป็นการอบอ่อนที่ใช้กับเหล็กที่มีคาร์บอนสูงประมาณ 0.7-1.2% ซึ่งโครงสร้างของเหล็กจะประกอบด้วยเฟอไรต์ และโปรยูเทคตอยด์ซีเมนไตต์ ตามขอบเกรนดังที่กล่าวมาแล้ว ลักษณะโครงสร้างเช่นนี้ เหล็กจะมีคุณสมบัติด้านความเหนียวลดลง และอีกประการหนึ่งคุณสมบัติทางการกลึงหรือไส (Machinability) จะไม่ดี จะกลึงให้ผิวเรียบได้ยากเพราะปลายแหลมของมีดกลึง ในขณะที่ตัดจะผ่านเนื้อเหล็กอ่อน (เฟอไรท์) และผ่านเนื้อเหล็กแข็ง (ซีเมนไตต์) สลับกัน ปลายของมีดจะเกิดการสั่น ทำให้ผิวของเหล็กไม่เรียบเมื่อดูด้วยกล้องขยายจะเห็นได้ชัดเจน เพื่อเป็นการแก้ไข จะต้องทำให้โปรยูเทคตอยด์ซีเมนไตต์เกิดลักษณะที่ไม่ต่อเนื่อง และยูเทคตอยด์ซีเมนไตต์ (ในเฟอไรท์) เกิดลักษณะเป็นเม็ดกลมเล็ก ๆ (Spheroid) ไม่เป็นลักษณะแถบบาง ๆ (Lamellar) ซึ่งกระทำได้โดยนำเหล็กไปเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่าเส้น A_{c1} เล็กน้อย ($730^{\circ} - 770^{\circ}\text{C}$) สำหรับเหล็กที่มีคาร์บอนสูงกว่า 0.8% หรือถ้าเหล็กมีคาร์บอนอยู่ใกล้ระหว่าง 0.7-0.8% จะเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่าเส้น A_{c1} เล็กน้อยและปล่อยให้สูงไปกว่า A_{c1} ทำสลับกันไปโดยใช้เวลาประมาณ 10 -15 ชั่วโมง จากนั้น

จึงปล่อยให้เย็นในอากาศในขณะที่เหล็กอยู่เหนือเส้น Ac_1 เล็กน้อยซีเมนต์ไตรไตโนเพอไรท์ จะขาดเสถียรภาพจะเกิดการขาดเป็นช่วงๆ และเมื่ออุณหภูมิลดต่ำกว่า Ac_1 ซีเมนต์ไตรไตโนที่เกิดการแตกตัวของออสเตนไนท์ จะไปรวมตัวกับซีเมนต์ไตรไตโนที่เหลืออยู่จะทำให้ไม่เกิดแถบบางๆ และเหล็กถูกเผาให้อยู่ในช่วงนี้เป็นระยะเวลาที่ซีเมนต์ไตรไตโนจะค่อยๆปรับตัวให้เสถียรภาพมากที่สุด คือค่อยๆ เปลี่ยนเป็นเม็ดกลมทำให้เหล็กมีความอ่อนตัวและความเหนียว การกลึง หรือการไสจะได้ผิวเรียบเพราะขณะที่มีดกลึงตัดผ่านจะไม่มีโอกาสตัดเม็ดเล็กๆ ของซีเมนต์ไตรไตโนโดยเม็ดเล็กๆ ของซีเมนต์ไตรไตโนจะหลุดออกหรือไม่ก็เบนหลบไปทำให้มีดกลึงตัดผ่านเฉพาะเนื้อเหล็กเพอไรท์อย่างเดียวไม่เกิดอาการลื่นที่ปลายมีดกลึงผิวของเหล็กจะเรียบ

2.2 การอบปกติหรือการทำนอร์มัลไลซิงเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ (Normalising)

มีวัตถุประสงค์ที่สำคัญหลายประการคล้ายคลึงกับการอบอ่อน คือ

- เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้น
- เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติการกลึงการไสหรือตัด
- เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านความเหนียว โดยเฉพาะเหล็กที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนหรือเย็น
- เพื่อปรับปรุงโครงสร้างให้สม่ำเสมอและเหมาะสมสำหรับการชุบแข็งในขั้นต่อไป
- เพื่อเป็นการทำลายความเครียดภายในที่เกิดจากการขึ้นรูปเย็น

จะเห็นได้ว่าการทำนอร์มัลไลซิง เป็นกรรมวิธีที่ใช้ทำกับงานที่ใช้กับงานสร้างชิ้นส่วนเครื่องจักรกลโดยทั่วไป ไม่ว่าจะเป็นงานผ่านการขึ้นรูปร้อน เช่น การรีด (Hot Rolling) หรือการตีขึ้นรูป (Hot Forging) เหล็กจะถูกเผาที่อุณหภูมิค่อนข้างสูงจะได้เหล็กที่มีเกรนโต คุณสมบัติเชิงกลที่ดีจะเสียไป (ทนแรงดึงแรงกระแทกได้น้อยลง) งานที่ผ่านการหลอมมาที่เช่นเดียวกัน จะมีขนาดเกรนโตมีลักษณะเป็นเดนไดรต์(คล้ายกิ่งไม้) และไม่สม่ำเสมอ มีข้อเสียที่ควรจะต้องปรับปรุงก่อนนำไปใช้งาน ยิ่งงานที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น เช่น การรีด (Cold Rolling) หรือการตีขึ้นรูปโครงสร้างภายในของเหล็กจะเกิดการบิดเบี้ยวไปตามทิศทางของแรงกระทำเกิดความเครียดภายใน สูญเสียความเหนียวและมีความแข็งเพิ่มขึ้นในลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอ สิ่งที่เกิดขึ้นในลักษณะที่ไม่ดีเหล่านี้สามารถทำให้หมดไปและปรับปรุงให้ดีขึ้น โดยเฉพาะขนาดของเกรนของเนื้อเหล็กทำให้เล็กละเอียดและสม่ำเสมอได้ด้วยการทำนอร์มัลไลซิง ซึ่งจะเน้นเรื่องการปรับปรุงโครงสร้างมากที่สุด (Grain Refinement)

การทำนอร์มัลไลซิง ใช้วิธีเผาเหล็กให้ร้อนจนมีอุณหภูมิสูงอยู่ในช่วงออสเตนไนท์ทั้งเหล็กที่มีคาร์บอนต่ำกว่า 0.8 % หรือสูงกว่า 0.8 % จะเผาจนกว่าอุณหภูมิอยู่เหนือเส้น Ac_3 สำหรับเหล็กไฮโปยูเทคตอยด์ และที่อุณหภูมิเหนือเส้น Ac_m สำหรับเหล็กไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ ประมาณ $30^\circ - 50^\circ C$ ที่อุณหภูมินี้ประมาณ 30-60 นาทีต่อความหนาเฉลี่ย 25 มม. เช่นเดียวกับการอบอ่อน จากนั้นนำเหล็กออกจากเตาปล่อยให้เย็นตัวในอากาศนิ่ง อัตราการเย็นตัวประมาณ

$1^{\circ} - 5^{\circ} \text{ C}$ ต่อวินาที ถ้าเป็นการเป่าอากาศ อัตราการเย็นตัวจะเพิ่มขึ้นประมาณ 10° C ต่อวินาที (อบอุ่นอัตราการเย็นตัวประมาณ $5^{\circ} - 10^{\circ} \text{ C}$ ต่อวินาที)

อัตราการเย็นตัวที่เร็วขึ้นจะมีผลต่อโครงสร้างของเหล็กโดยตรง ซึ่งพบว่ายิ่งอัตราการเย็นตัวยิ่งเร็วการเปลี่ยนแปลงจากออสเตนไนท์จะเกิดที่อุณหภูมิยิ่งต่ำลง จุดยูเต็คตอยด์ของเหล็กจะเปลี่ยนแปลงมาทางด้านคาร์บอนต่ำลงสำหรับไฮโปยูเต็คตอยด์ และจะย้ายไปด้านคาร์บอนมากขึ้น สำหรับเหล็กไฮเปอร์ยูเต็คตอยด์ทำให้ปริมาณของเฟอไรต์เพิ่มมากขึ้น และความละเอียดของเฟอไรต์จะยิ่งดีขึ้น (เปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิต่ำ) ความละเอียดของเฟอไรต์ หมายถึง แถบบาง ๆ ระหว่างเฟอไรต์และซีเมนต์ไต์ต์จะแคบมาก นอกจากนี้โปรยูเต็คตอยด์เฟอไรต์ในเหล็กไฮโปยูเต็คตอยด์จะมีปริมาณน้อยลง และเช่นเดียวกันในโปรยูเต็คตอยด์ซีเมนต์ไต์ต์ในเหล็กไฮเปอร์ยูเต็คตอยด์จะลดน้อยลง คุณสมบัติของโครงสร้างที่ประกอบด้วยเฟอไรต์ที่มีความละเอียดเช่นนี้ จะทำให้เหล็กมีความแข็งแรงและความแข็งสูงกว่าเหล็กที่ผ่านการอบอุ่น ดังตัวอย่างเหล็ก 0.5 % C ถ้าทำการอบอุ่นโครงสร้างประกอบด้วยโปรยูเต็คตอยด์เฟอไรต์ประมาณ 38 % ความแข็งประมาณ 10 H_{RC} เมื่อทำนอร์มัลไลซิง (อบปกติ) ที่อุณหภูมิเดียวกันจะได้โครงสร้างประกอบด้วยโปรยูเต็คตอยด์เฟอไรต์เพียง 10 % และมีความแข็ง 20 H_{RC} จากที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ว่าการทำงานนอร์มัลไลซิง เพื่อเป็นการปรับปรุงโครงสร้างให้สม่ำเสมอ เพื่อที่จะนำไปทำการชุบแข็งภายหลังนั้น ทั้งนี้เพื่อให้เหล็กภายหลังการชุบแข็งมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น หลีกเลี่ยงข้อเสียที่จะเกิดขึ้นปกติแล้วเหล็กยังมีเกรนละเอียดย่อมเป็นผลดีต่อการชุบแข็งมาก เพราะถ้าเหล็กมีเกรนหยาบและไม่สม่ำเสมอ ภายหลังการชุบแข็ง เหล็กจะมีความแข็งแรงไม่สม่ำเสมอเช่นเดียวกัน และบางทีอาจจะเกิดการบิดหรือแตกร้าวได้ ยิ่งเป็นเหล็กที่มีธาตุอื่น ๆ ผสมอยู่และปริมาณของธาตุที่ผสมขาดความสม่ำเสมอ การชุบแข็งอาจจะไม่ประสบผลดีตามที่ต้องการ ดังนั้นในกรณีที่ต้องการคุณภาพของเหล็กจากการชุบแข็งสูง จึงสมควรที่จะทำนอร์มัลไลซิงแล้วจึงนำไปทำการชุบแข็ง

2.3 การชุบแข็ง (Hardening)

คือ การอบชุบความร้อน เพื่อให้เหล็กภายหลังการชุบมีความแข็งเพิ่มขึ้น เพื่อทนต่อการเสียดสีในขณะที่ใช้งาน การชุบแข็งเป็นวิธีที่จะได้โครงสร้างของเหล็กชั้นสุดท้ายเป็นมาร์เทนไซต์ หรือเบนไนท์ ขึ้นกับความแข็งสุดท้ายที่ต้องการ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากออสเตนไนท์เป็นมาร์เทนไซต์ หรือเบนไนท์ ซึ่งการที่จะได้เหล็กที่มีความแข็งสูงจะต้องมีองค์ประกอบอย่างน้อย 3 ประการ คือ

1. ปริมาณคาร์บอนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ เพราะการที่ออสเตนไนท์เปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ ในลักษณะการชุบแข็งด้วยน้ำ เหล็กควรมีคาร์บอนมากกว่า 0.3% ส่วนธาตุที่ผสมในเหล็กอื่น ๆ เช่น นิเกิล โครเมียม และโมลิบดีนัม จะเพียงทำหน้าที่ช่วยให้การชุบแข็งได้ผลดีขึ้นเท่านั้น

ความแข็งของมาร์เทนไซต์จะขึ้นอยู่กับปริมาณของคาร์บอนดังอย่างเช่น เหล็กคาร์บอน 0.35% สามารถชุบให้แข็งได้ประมาณ 50 H_{RC} ตรงกันข้ามเหล็ก 0.02%C ,10%Cr ได้ความแข็งภายหลังการชุบแข็งเพียง 35 H_{RC}

2. อุณหภูมิก่อนการชุบ คือ อุณหภูมิเหล็กจะต้องเปลี่ยนเป็นออสเตนไนท์ ก่อนการชุบน้ำหรือน้ำมัน อุณหภูมิของเหล็กไม่สูงพอจนโครงสร้างเปลี่ยนเป็นออสเตนไนท์หมด เราจะชุบในน้ำ หรือน้ำเกลือ น้ำต่าง ความแข็งที่ได้จะไม่สูงเท่าที่ควร เพราะมาร์เทนไซด์ที่ได้จะต้องมาจากออสเตนไนท์เท่านั้น และเป็นการเปลี่ยนโครงสร้างโดยปราศจากการกำเนิดนิวเคลียส ไม่เหมือนอย่างเช่น เฟอร์ไรท์หรือซีเมนต์ไต์

3. อัตราการเย็นตัว เป็นองค์ประกอบที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่ออสเตนไนท์เปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซด์หรือเบนไนท์ จะต้องเป็นอัตราการเย็นตัวที่สูงพอ จึงจะปรากฏคำว่า อัตราการเย็นตัววิกฤติ (Critical Cooling Rate) หมายถึง อัตราการเย็นตัวที่ออสเตนไนท์เปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซด์หรือเบนไนท์ ถ้าอัตราการเย็นตัวช้ากว่านี้ ออสเตนไนท์ไม่มีโอกาสเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซด์หรือเบนไนท์ แต่จะได้เฟอร์ไรท์หรือซอร์ไบท์แทน

2.4 อุณหภูมิสำหรับการชุบแข็ง (Hardening Temperature)

ในที่นี้จะขอแยกกล่าวถึง อุณหภูมิที่ใช้สำหรับการชุบแข็งเหล็กออกเป็น 2 กรณี คือ

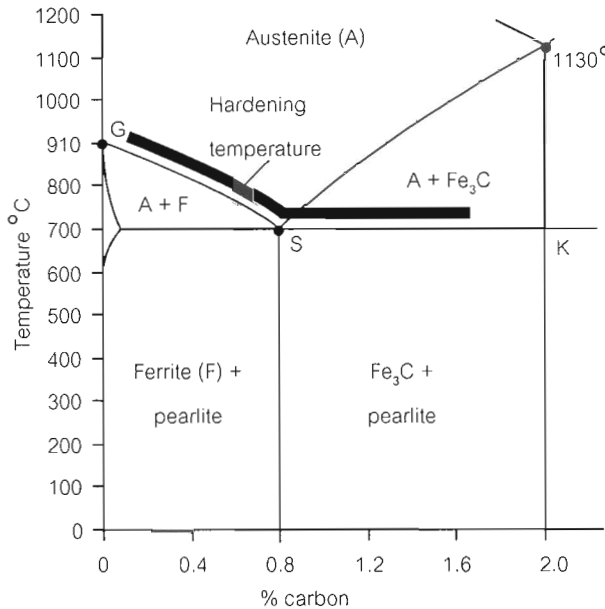
2.4.1 เหล็กไฮโปยูเตคตอยด์ ใช้อุณหภูมิเหนือเส้น Ac_3 30° - 50° C ซึ่งอุณหภูมินี้จะได้โครงสร้างเป็นออสเตนไนท์ทั้งหมด ถ้าพิจารณาในกรณีที่อุณหภูมิต่ำกว่านี้และอยู่ในช่วง Ac_1 - Ac_3 จะปรากฏมีเฟอร์ไรท์เหลืออยู่บางส่วน ถ้าทำการชุบที่อุณหภูมินี้ออสเตนไนท์จะเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซด์ แต่เฟอร์ไรท์จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงคงอยู่อย่างสภาพเดิม เหล็กภายหลังการชุบจะไม่ได้ความแข็งสูงเท่าที่ควร และบริเวณโครงสร้างที่เป็นเฟอร์ไรท์จะเป็นบริเวณที่อ่อน (Soft spots) ขาดคุณสมบัติต้านทานต่อการเสียดสี

ในกรณีที่เผาอุณหภูมิสูงเหนือเส้น Ac_3 ไปมาก (Overheating) จะได้โครงสร้างที่เป็นออสเตนไนท์ที่มีเกรนโต ภายหลังการชุบน้ำจะได้มาร์เทนไซด์ที่หยาบ (Coarse Martensite) ซึ่งจะทนแรงกระแทกได้น้อยลง อีกประการหนึ่งชิ้นงานในขณะที่ชุบน้ำจะเกิดการบิดงอหรือแตกร้าวได้ง่าย

2.4.2 เหล็กไฮเปอร์ยูเตคตอยด์ จะใช้อุณหภูมิสูงเหนือเส้น Ac_1 ประมาณ 30° - 50° C เท่านั้น จะเห็นได้ว่าในช่วงอุณหภูมินี้จะปรากฏโครงสร้างของโปรยูเตคตอยด์ซีเมนต์ไต์ที่เหลือเพียงบางส่วนเท่านั้น ที่กลายหรือสลายเป็นออสเตนไนท์ และซีเมนต์ไต์ที่เหลืออยู่นี้จะกระจุกกระจายอยู่ทั่วไปในโครงสร้างของออสเตนไนท์ เมื่อทำการชุบน้ำจะได้โครงสร้างของมาร์เทนไซด์ โดยมีโปรยูเตคตอยด์ซีเมนต์ไต์แทรกอยู่ ซึ่งจะปรากฏเป็นผลดีในส่วนที่เหล็กจะมีความแข็งสูง และทนต่อการ

เสียดสีในขณะที่ใช้งานได้ดี ทั้งนี้เพราะโปรยู่เต็คตอยดซีเมนต์ไตต์มีความแข็ง ประมาณ 700-800 H_B ซึ่งแข็งกว่ามาร์เทนไซต์ (650-700 H_B) ประเด็นที่สำคัญ คือ จะต้องเลือกอุณหภูมิที่จะไม่เกิดโปรยู่เต็คตอยดซีเมนต์ไตต์ในลักษณะต่อเนื่องเป็นลูกโซ่ตามขอบเกรน

ในกรณีที่เผาเหนือเส้น A_{cm} จะไม่เกิดผลดี นอกจากต้องใช้พลังงานมากขึ้นแล้วออกสเตนไนท์จะขยายตัวให้เกรนโตเร็วมาก จะทำให้ผลที่ได้ภายหลังการชุบไม่ดี เพราะจะได้มาร์เทนไซต์เกรนหยาบทนแรงกระแทกได้ไม่ดีและยังอาจจะเกิดการบิดงอและแตกร้าวได้โดยง่าย



รูปที่ 1 แสดงช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการชุบแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอน

2.5 อัตราการเผาและช่วงเวลาที่เหมาะสม (Heating rate & Holding time)

การกำหนดอัตราการเผา และช่วงเวลาที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับแฟคเตอร์หลายประการ เช่น ส่วนผสมของเหล็กโครงสร้างเดิม ความเครียดเหลือค้าง รูปร่างและขนาดของชิ้นงานที่จะทำการชุบ

ปกติเมื่อเหล็กบรรจุเข้าเตาเผา ความร้อนที่เหล็กได้รับที่ผิวกับใจกลาง จะไม่เท่ากันในตอนแรก เพราะกว่าความร้อนจะเคลื่อนที่ผ่านเนื้อเหล็กเข้ามายังใจกลางต้องใช้เวลา การเผาในอัตราสูง ความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวกับกับใจกลางจะมีค่ามาก การบิดงอมีมากซึ่งจะทำให้เกิดการแตกร้าวได้ง่าย โดยทั่วไปเราแบ่งอัตราการเผาไว้ 3 อัตรา ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของเตา

อัตราการเผาช้า เป็นวิธีที่เริ่มต้นโดยการบรรจุเหล็กเข้าเตาพร้อม ๆ กับการให้ความร้อนกับเตาเผาพร้อมๆ กัน อุณหภูมิทั้งของเตาและชิ้นงานจะร้อนขึ้นในอัตราใกล้เคียงกันในลักษณะเช่นนี้

อุณหภูมิแตกต่างกันระหว่างผิวกับใจกลางของแท่งเหล็กมีน้อย (ดูรูปที่ 2) การเผาในลักษณะเช่นนี้เหมาะสำหรับเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนสูงมีความเครียดเหลือค้างมาจากการขึ้นรูป รูปร่างซับซ้อน และมีส่วนที่หนาและบางต่างกันมาก

อัตราการเผาสูง วิธีนี้จะเผาเตาให้มีอุณหภูมิเท่าที่ต้องการ จากนั้นจึงจะบรรจุเหล็กเข้าเตาภายหลัง หรือเป็นในกรณีที่เตากำลังใช้งานอยู่ เมื่อนำเอาเหล็กไปชุบหมดแล้ว ก็เริ่มบรรจุเหล็กชุดต่อไปใหม่ ลักษณะเช่นนี้อัตราการเผาจะสูงอุณหภูมิระหว่างผิวกับใจกลางจะแตกต่างกันมากในตอนเริ่มต้น แต่จะไปเท่ากันในระยะเวลาที่สั้นกว่าวิธีแรกดังภาพแสดงการเผาในอัตราสูงเหมาะสำหรับงานชิ้นเล็ก ๆ รูปร่างไม่ซับซ้อน และเป็นเหล็กคาร์บอนปานกลาง จะใช้วิธีเอาเหล็กบรรจุเอาไว้ในหีบปิดคลุมมิดชิด บรรจุเข้าเตาจะช่วยลดอัตราการเผาลงได้อีก เพราะกว่าความร้อนจะผ่านหีบเข้าไปถึงใจกลางแท่งเหล็กจะช้าลง

สำหรับช่วงเวลาที่ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิที่ต้องการ (Holding Time) มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ออสเทนไนท์ที่สม่ำเสมอ และให้อุณหภูมิทั้งบริเวณผิวและใจกลางเท่ากัน ไม่มีกฎเกณฑ์ที่ตายตัวขึ้นอยู่กับหลักการปฏิบัติ ถ้าเป็นเหล็กคาร์บอนหรือเหล็กผสมต่ำ (Low Alloys) ซึ่งคาร์ไบด์สลายตัวได้ง่าย จะใช้เวลาประมาณ 5 - 15 นาที ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงานด้วย แต่ถ้าเป็นเหล็กผสมปานกลางหรือสูงซึ่งคาร์ไบด์มีเสถียรภาพจะต้องใช้เวลาให้นานพอที่คาร์ไบด์สลายตัวหมดซึ่งเวลาที่ใช้ควรเพิ่มขึ้นประมาณ 25 - 50% ของเวลาที่ใช้เกณฑ์ปกติดังตารางเวลาที่เหมาะสมนี้

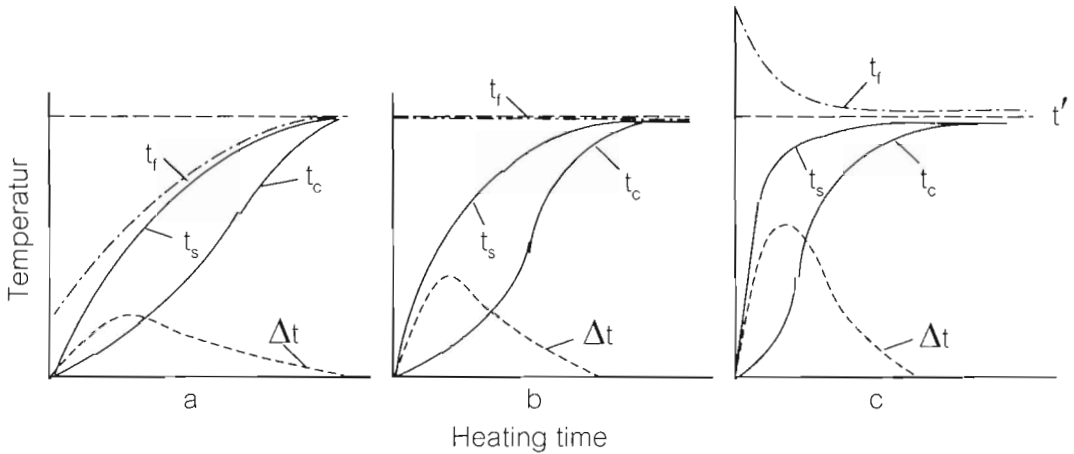
047061

683.33
๗ 767 ๗
2274

ตารางที่ 3 แสดงระยะเวลาในการเผาที่มีความหนาต่างๆกัน

Thickness or diameter of part. Mm	Box furnaces		Salt bath	
	heating. min	holding. min	Heating. min	holding. min
25	20	5	7	3
50	40	10	17	8
75	60	15	24	12
100	80	20	33	17
125	100	25	40	20
150	120	30	50	25
200	160	40	65	35

อัตราการเผาที่สูงมาก เป็นวิธีที่ไม่สู้จะนิยมใช้เพราะอัตราการเผาจะสูง อุณหภูมิระหว่างผิวกับใจกลางแห่งเหล็กจะแตกต่างกันมากในตอนเริ่มต้น โดยวิธีการเผาให้อุณหภูมิในเตาสูงเกินกว่าอุณหภูมิที่ต้องการดังภาพที่แสดง เมื่อบรรจุเหล็กเข้าเตาอุณหภูมิของเตาจะลดลงมาจนเท่ากับที่ต้องการ พร้อม ๆ กับอุณหภูมิของชิ้นงานร้อนขึ้น เวลาที่ใช้จะสั้นกว่าสองวิธี แต่อุณหภูมิระหว่างใจกลางกับผิวเหล็กจะแตกต่างกันมาก อาจจะทำให้เกิดการบิดงอหรือชิ้นงานแตกร้าวได้ง่าย วิธีนี้เหมาะสำหรับงานขนาดเล็ก และรูปร่างง่าย ๆ จำเป็นต้องบรรจุในหีบเหมือนวิธีที่สองเพื่อช่วยลดอัตราการเผาให้ช้าลง



รูปที่ 2 แสดงผลของอุณหภูมิที่ต่างกันบริเวณผิวและภายในใจกลางเมื่อเผาด้วยอัตราต่างๆ กัน (a อัตราต่ำ b อัตราปานกลาง และ c อัตราสูง)

3. ทฤษฎีเกี่ยวกับการออกแบบ และการกำหนดชนิดของวัสดุผนังเตาอบโลหะ

จากหลักการข้างต้นที่ต้องการสร้างเตาอบโลหะที่สามารถให้อุณหภูมิสูงถึง $1,200\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยที่เกิดการสูญเสียพลังงานความร้อนน้อยที่สุด เพื่อให้เกิดการประหยัดพลังงาน และมีประสิทธิภาพสูงสุด จึงนำเอาทฤษฎีเทอร์โมไดนามิกส์มาใช้อย่างละเอียดต่อไปนี้

3.1 ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำผนังกันความร้อนของช่องอบโลหะ

การเคลื่อนที่ของความร้อนแตกต่างกันกับการถ่ายเทความร้อน การถ่ายเทความร้อนเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์หรือปฏิกิริยาภายในระหว่างความร้อนและงาน แต่ไม่ได้ครอบคลุมถึงตัวประกอบที่ควบคุมตัวถ่ายเทความร้อน ซึ่งการเคลื่อนที่ของความร้อนครอบคลุมถึงตัวประกอบที่ควบคุมอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนด้วย และการพิจารณาเลือกชนิดของวัสดุที่ใช้ทำผนังเตาจะมีขั้นตอนต่างๆ ที่เกี่ยวข้องดังนี้

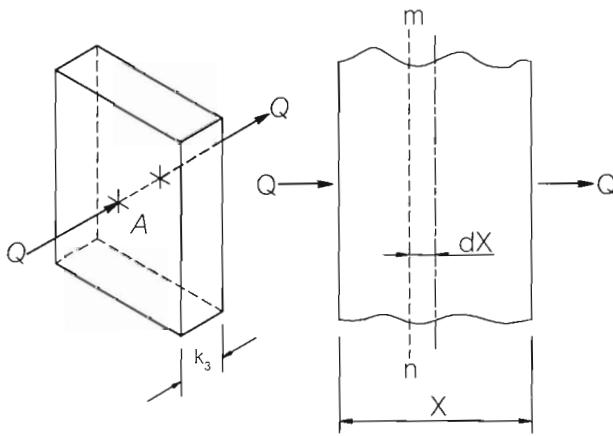
3.1.1 การเคลื่อนที่ของความร้อน โดยการนำความร้อน (Heat Conduction)

การนำความร้อน คือ การเคลื่อนที่ของความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำในวัตถุ แม้ว่าการนำความร้อนจะเกิดขึ้นได้ทั้งในตัวกลางที่เป็นของแข็ง ของเหลวและก๊าซ ความร้อนจะถูกส่งผ่านตัวกลางที่เป็นของแข็งได้ดีที่สุด และในตัวกลางที่เป็นของแข็งการถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นโดยการนำความร้อนเป็นส่วนใหญ่ หากตัวกลางเป็นวัตถุที่โปร่งใส โลหะจะนำความร้อนได้ดีกว่าโลหะ ทั้งนี้เพราะว่าโลหะมีโมเลกุลเรียงกันอยู่อย่างเป็นระเบียบ ความร้อนจึงถูกถ่ายเทผ่านไปเป็นลักษณะของพลังงานความสั่นสะเทือนได้อย่างสะดวก และโลหะยังมีจำนวนอิเล็กตรอนอยู่มากมาย ซึ่งจะช่วยในการถ่ายเทพลังงานความร้อนได้อย่างดี ส่วนโลหะนั้นโมเลกุลจะเรียงตัวกันอยู่ไม่เป็นระเบียบไม่สะดวกในการที่ความสั่นสะเทือนจะเคลื่อนที่ผ่านโมเลกุลไปได้ และอโลหะมีอิเล็กตรอนอยู่น้อยมากในการที่จะช่วยถ่ายเทความร้อน

3.1.2 กฎการนำความร้อนของฟูริเยร์ (Fourier 's Law of Conduction)

ฟูริเยร์กล่าวไว้ว่า "อัตราการไหลของความร้อนเมื่อผ่านของแข็งที่มีโมเลกุลเกาะกันอย่างสม่ำเสมอ จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับพื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อน และเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความแตกต่างของอุณหภูมิของระยะทางที่ความร้อนไหลผ่าน"

ตามกฎนี้สามารถเขียนเป็นรูปอธิบายได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การนำความร้อน

ตามรูปที่ 3 กำหนดให้

$$A = \text{พื้นที่หน้าตัด มีหน่วยเป็น } m^2$$

$$dx = \text{ความหนา มีหน่วยเป็น } m$$

$$(t-dt) = \text{อุณหภูมิสุดท้าย มีหน่วยเป็น } K$$

$t =$ อุณหภูมิเริ่มแรก มีหน่วยเป็น K

อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิเริ่มแรกกับอุณหภูมิสุดท้ายคือ

$$(t-dt)-t = -dt$$

จากกฎของฟูริเยร์เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$Q \propto A$$

และ $Q \propto -\frac{dt}{dx}$

ดังนั้น $Q = -KA \frac{dt}{dx}$ 1

เมื่อ $Q =$ การเคลื่อนที่ของความร้อนอย่างสม่ำเสมอ มีหน่วยเป็น W

$K =$ ความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุ (thermal conductivity of material) มีหน่วยเป็น Wm/m^2K หรือ W/mK

$A =$ พื้นที่ที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน มีหน่วยเป็น m^2

$\frac{dt}{dx} =$ ความแตกต่างของอุณหภูมิต่อหน่วยความหนา มีหน่วยเป็น K/m

ตารางที่ 4 ความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุบางชนิด

วัสดุ	ความสามารถในการนำความร้อน (thermal conductivity) : K	
อลูมิเนียมบริสุทธิ์ (Pure Al)	229	
แผ่นใยแก้ว (Asbestos Slab)	0.052	
แก้วหรือกระจก (Glass)	1.04	
เหล็กอ่อน (Mild Steel)	48.5	
อิฐก่อสร้าง (Building Brick)	0.35 - 0.7	
ไม้โอ๊ก (Wood Oak)	0.15 - 0.2	
ยาง (Rubber)	0.15	
อิฐฉนวนกลุ่ม C (Insulation Brick)	0.3 - 0.38	
เซรามิกไฟเบอร์ชนิดแผ่น (Blanket) C	600 °C	0.08
	800 °C	0.170
	1000 °C	0.215

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3 ความร้อนไหลผ่านชั้นส่วนของวัตถุที่ภาคตัด $m-n$ และพิจารณาจากสมการที่ 1

$$Q = -KA \frac{dt}{dx}$$

หรือ $Qdx = -KA dt$

ดังนั้น $\int_1^x Qdx = - \int_1^2 KA dt$

$$Qx = -KA(t_2 - t_1)$$

หรือ $Q = -KA \frac{(t_2 - t_1)}{x}$

$$Q = \frac{KA(t_1 - t_2)}{x} \dots\dots\dots 2$$

สำหรับค่าความสามารถในการนำความร้อนของวัตถุบางชนิดหาได้จากตารางที่ 4 และความสามารถในการนำความร้อนนี้ จะบอกคุณลักษณะว่าวัตถุใดที่มีความสามารถในการนำความร้อนสูงจะเป็นตัวนำความร้อนได้ดี ในทำนองเดียวกัน วัตถุใดมีความสามารถในการนำความร้อนต่ำจะเป็นตัวนำความร้อนที่ไม่ดี แต่เป็นฉนวนกั้นความร้อนที่ดี

3.1.3 กฎการระบายความร้อนของนิวตัน (Newton 's Law of Cooling)

ในการหาค่าการเคลื่อนที่ของความร้อน ซึ่งเคลื่อนที่ผ่านของไหลแล้วผ่านผนังซึ่งเป็นของแข็งและผ่านไปยังของไหลอีกครั้งหนึ่ง การที่จะรู้ว่าความร้อนเคลื่อนที่จากผนังซึ่งเป็นของแข็งไปสู่ของเหลวได้อย่างไร กรณีเช่นนี้ใช้กฎการระบายความร้อนของนิวตันหาได้ โดยใช้สูตรที่มีปริมาณความร้อนเคลื่อนที่ผ่านของแข็งที่มีพื้นที่หน้าตัด A อุณหภูมิ t_w ไปยังของเหลวที่มีอุณหภูมิ t ได้ดังนี้

$$Q = hA (t_w - t) \dots\dots\dots 3$$

เมื่อ h = สัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Coefficient)
มีหน่วย เป็น W/m^2k

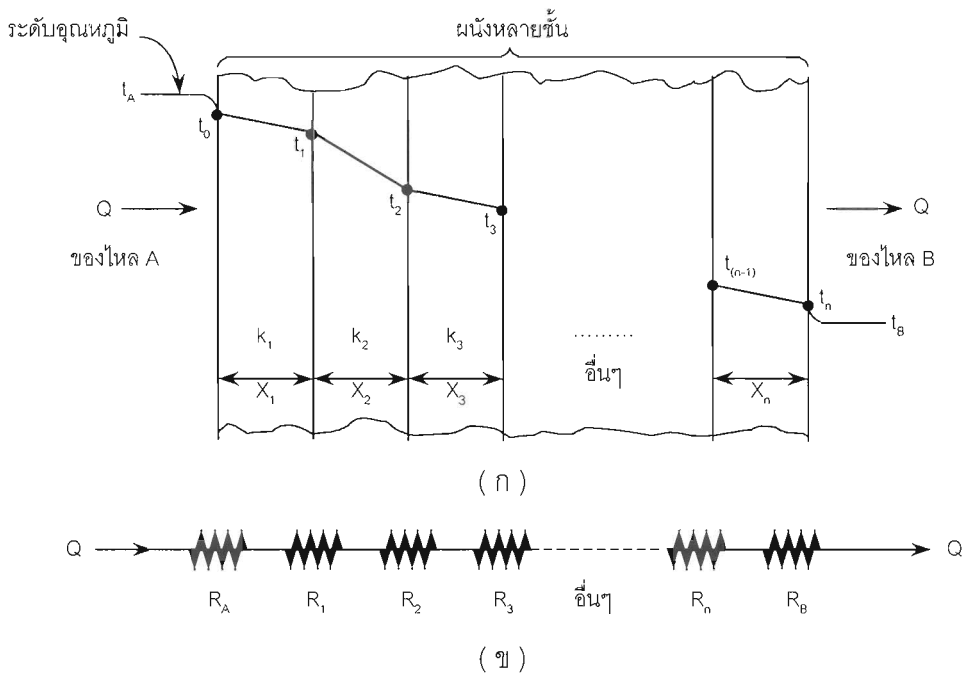
หรือ $h = \frac{k}{x}$

3.1.4 การเคลื่อนที่ของความร้อนผ่านผนังหลายชั้น (Heat Conduction Through a Composite Wall)

ผนังหลาย ๆ ชั้นที่วางซ้อนกันอยู่มีหลายแบบ เช่น ผนังกำแพงภายนอกอาจจะเป็นคอนกรีต ถัดจากนั้นก็เป็ฉนวน แล้วก็เป็นช่องว่างที่มีอากาศ ซึ่งช่องว่างอากาศนี้เป็นฉนวนอย่างดี ถัดไปก็เป็นฉนวนชั้นในสุดเป็นปูนที่โบกไว้ และอาจมีเครื่องตกแต่งภายใน เช่น แผ่นกระดาษพูนหรือฉนวนต่าง ๆ โดยที่ความร้อนจะต้องเคลื่อนที่ผ่านผนังดังกล่าวเหล่านั้น

พิจารณาผนังหลาย ๆ ชั้นที่วางซ้อนกันที่พบเห็นโดยทั่วไป ตามรูปที่ 4 (ก) ผนังที่ความร้อนจะต้องผ่านประกอบด้วยผนัง n ชั้น มีความหนา x_1, x_2, \dots, x_n และมีความสามารถในการนำความร้อน k_1, k_2, \dots, k_n ตามลำดับ อุณหภูมิภายนอกสุดของของไหล A เป็น t_A มีสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อน h_A ถัดไปเป็นผนังชั้นนอกที่มีอุณหภูมิถึงอุณหภูมิของของไหล B เป็น t_0, t_1, \dots, t_n ตามลำดับ ของไหล B มีอุณหภูมิ t_B มีสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อน h_B

การเคลื่อนที่ของความร้อนในกรณีนี้ จะเหมือนกันกับการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าผ่านความต้านทานที่ต่ออนุกรมกันอยู่ เปรียบเทียบคล้ายกับรูปที่ 4 (ข) ดังนั้นการคำนวณหาค่าต่างๆ จึงใช้วิธีเดียวกันคือใช้กฎของโอห์มในการคำนวณ



รูปที่ 4 การเคลื่อนที่ของความร้อนผ่านผนังหลายชั้น

จากกฎของโอห์ม $V = IR$

$$I = \frac{V}{R}$$

เมื่อ $V =$ แรงเคลื่อนไฟฟ้า

$I =$ กระแสไฟฟ้า

$R =$ ความต้านทาน

จากสมการที่ 2

$$Q = \frac{KA (t_1 - t_2)}{x}$$

ซึ่งเหมือนกับว่า

$$\frac{1}{R} = \frac{KA}{x}$$

หรือ

$$R = \frac{x}{KA}$$

.....4

แต่ในที่นี้จะเรียก $R = \frac{x}{KA}$ ว่าความต้านทานความร้อน (Thermal Resistance) เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบดูจะเห็นว่า

$$Q = I$$

$$(t_1 - t_2) = V$$

และ
$$\frac{x}{KA} = R$$

ในทำนองเดียวกันจากสมการที่ 3

$$Q = hA (t_w - t)$$

ซึ่งเหมือนกับว่า

$$R = \frac{1}{hA}$$

.....5

แต่ในที่นี้จะเรียก $R = \frac{1}{hA}$ ว่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มของของไหล เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบดูจะเห็นว่า

$$Q = I$$

$$(t_w - t) = V$$

และ
$$\frac{1}{hA} = R$$

จากกฎของโอห์ม ที่ใช้คำนวณหาค่าความต้านทานแบบอนุกรมสามารถนำมาดัดแปลงให้เข้ากับกรณีการเคลื่อนที่ของความร้อน ซึ่งจะเรียกค่าความต้านทานนี้ว่า ความต้านทานความร้อน (Thermal Resistance) มีหน่วยเป็น k/W ตามรูปที่ 4 จะได้ว่า

$$R_A = \frac{1}{h_A A} : R_1 = \frac{x_1}{k_1 A} : R_2 = \frac{x_2}{k_2 A} : R_3 = \frac{x_3}{k_3 A} : \dots : R_n = \frac{x_n}{k_n A} : R_B = \frac{1}{h_B A}$$

ความต้านทานรวมได้ดังนี้

$$R_T = R_A + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_B$$

ดังนั้น

$$R_T = \frac{1}{h_A A} + \frac{x_1}{k_1 A} + \frac{x_2}{k_2 A} + \dots + \frac{x_n}{k_n A} + \frac{1}{h_B A}$$

หรือ
$$R_T = \frac{1}{h_A A} + \frac{\sum x}{kA} + \frac{1}{h_B A} \quad \dots\dots\dots 6$$

จากสมการที่ 6 จะสังเกตเห็นว่า พื้นที่ A เป็นค่าคงที่และในการคำนวณจะถือว่าความร้อนเคลื่อนที่ผ่านหนึ่งหน่วยของพื้นที่ ดังนั้นจากสมการที่ 4

$$Q = \frac{(t_A - t_B)}{R_T} \quad \dots\dots\dots 7$$

ซึ่งเหมือนกับ $I = \frac{V}{R}$

จากสมการที่ 6 ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ของความร้อนทั้งหมดคือ U และถ้ากำหนดว่า

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{hA} + \frac{x}{k} + \frac{1}{h_B}$$

ในกรณีที่มีผนังหลายๆ ชั้น

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{hA} + \frac{\sum x}{k} + \frac{1}{h_B}$$

จะเห็นว่าส่วนกลับของ U คือความต้านทานความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ หรือ

$$\frac{1}{U} = R_T A \quad \dots\dots\dots 8$$

$$U = \frac{1}{R_T A} \quad \dots\dots\dots 9$$

ถ้ารู้ค่าของอุณหภูมิของผนังด้านนอกและด้านใน ดังนั้นค่าการเคลื่อนที่ของความร้อนหาได้โดยการคำนวณจากความต้านทานความร้อนของผนังเพียงอย่างเดียว คือ

$$R = \sum \frac{x}{kA}$$

ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ของความร้อนจากผนังด้านหนึ่งไปยังผนังอีกด้านหนึ่ง หาได้เมื่อคิดพื้นที่หนึ่งหน่วย ดังนี้

$$\frac{1}{U} = \sum \frac{x}{k}$$

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

ในการออกแบบสร้างเตาอบชุบโลหะอุณหภูมิสูง จะมีวิธีการดำเนินงานแบ่งเป็นขั้นตอนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. การออกแบบสร้างผนังกันความร้อนและโครงสร้างเตา
2. วิธีการกำหนดชนิดและขนาดของตัวให้ความร้อน
3. การกำหนดรูปแบบชุดควบคุมอุณหภูมิ

3.1 การออกแบบสร้างผนังกันความร้อนและโครงสร้างเตา

3.1.1 การออกแบบผนังเตาอบโลหะอุณหภูมิสูง

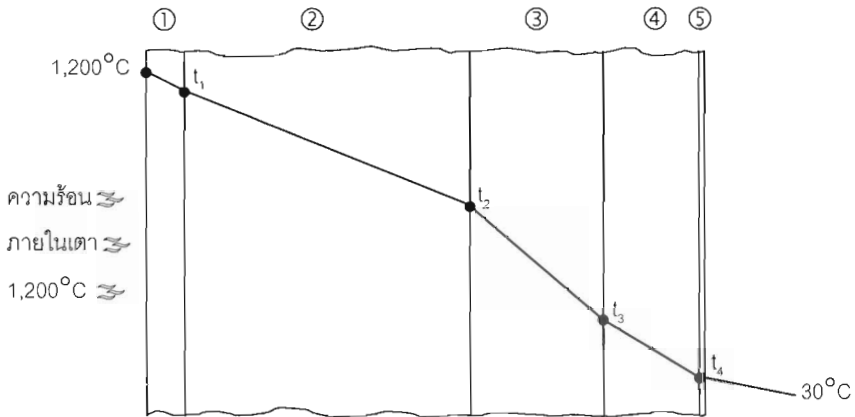
หลักการออกแบบผนังเตาอบโลหะหรือเตาเผาประเภทใด ๆ ก็ตาม ถ้าหากสามารถที่จะกั้นไม่ให้ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในช่องอบหรือช่องเผา ส่งผ่านผนังเตาออกมาภายนอกได้ก็จะทำให้สามารถประหยัดพลังงานความร้อนที่จะต้องเติมเข้าไป เพื่อเพิ่มหรือรักษาระดับอุณหภูมิได้มากเท่านั้น และจากแนวคิดอันนี้จึงได้ออกแบบและทำการทดลอง โดยได้นำเอาหลักทฤษฎีการส่งถ่ายความร้อน (Heat Transfer) ข้างต้นมาประยุกต์ใช้ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ตารางที่ 5 แสดงรายละเอียดของวัสดุผนังเตาอบโลหะชนิดต่าง ๆ เรียงจากด้านใน

ชั้นที่	ชนิดของวัสดุ	ความหนา (มม.)	ค่าการนำความร้อน (K)
1	คอนกรีตทนไฟ 13-LW	20	0.21
2	อิฐฉนวน C-2	150	0.15
3	เซรามิกไฟเบอร์	75	0.085
4	ช่องว่างอากาศ	50	0.16
5	แผ่นสแตนเลสตีล	1.2	Good

สมมติให้อุณหภูมิภายในเตาอบมีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ $1,200^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิภายนอกเท่ากับ 30°C กำหนดค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนจากภายในถึงภายนอก $17 \text{ W/m}^2\text{K}$ คำนวณหาสิ่งต่อไปนี้

1. ปริมาณความร้อนที่สูญเสียต่อตารางเมตร
2. อุณหภูมิของผนังเตาแต่ละชั้น



รูปที่ 5 แสดงการจัดเรียงฉนวนกันความร้อน

พิจารณาการเคลื่อนที่ของความร้อนผ่านพื้นที่ 1 ตารางเมตร จากสมการ

$$R = \frac{x}{KA}$$

ความต้านทานของผนังชั้นใน $R_1 = \frac{20}{0.21 \times 10^3} = 0.095 \text{ K/W}$

ความต้านทานของผนังชั้นที่ 2 $R_2 = \frac{150}{0.15 \times 10^3} = 1.0 \text{ K/W}$

ความต้านทานของผนังชั้นที่ 3 $R_3 = \frac{75}{0.085 \times 10^3} = 0.8824 \text{ K/W}$

หาความต้านทานของอากาศด้านนอก จากสมการ

$$R = \frac{1}{hA} = \frac{1}{17(1)} = \frac{1}{\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot \text{m}^2 \cdot 17}$$

$$\therefore R_B = \frac{1}{17} \text{ K/W}$$

ความต้านทานของช่องอากาศ

$$R_{\text{air}} = 0.16 \text{ K/W}$$

ดังนั้นความต้านทานรวม

$$R_T = 0.095 + 1.0 + 0.8824 + 0.16 + \frac{1}{17}$$

$$\therefore R_T = 2.158 \text{ K/W}$$

จากสมการ $q_w = \frac{t_A - t_B}{R_T}$

$$= \frac{1,200 - 30}{2.158} = 532.79 \text{ W หรือ J/s}$$

ดังนั้นปริมาณความร้อนสูญเสียต่อตารางเมตร = 532.79 J/s

จากสมการ $V = IR$ หรือ $Q = \frac{\Delta t}{R}$

- ความร้อนเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตชั้นใน

$$Q = \frac{t_A - t_1}{R_1}$$

ดังนั้น $532.79 = \frac{1,200 - t_1}{0.095}$

หรือ $t_1 = 1,200 - (532.79 \times 0.095) = 1,149.4^\circ\text{C}$

- ความร้อนเคลื่อนที่ผ่านอิฐฉนวน

$$Q = \frac{t_1 - t_2}{R_2}$$

$$532.79 = \frac{1,149.4 - t_2}{1.0}$$

หรือ $t_2 = 1,149.4 - 532.79 = 616.6^\circ\text{C}$

- ความร้อนเคลื่อนที่ผ่านเซรามิกไฟเบอร์

$$Q = \frac{t_2 - t_3}{R_3}$$

$$532.79 = \frac{616.6 - t_3}{0.8824}$$

หรือ $t_3 = 616.6 - (532.79 \times 0.8824) = 146^\circ\text{C}$

- ความร้อนเคลื่อนที่ผ่านช่องอากาศ

$$Q = \frac{t_3 - t_4}{R_4}$$

$$532.79 = \frac{146 - t_4}{0.16}$$

หรือ $t_4 = 146 - (532.79 \times 0.16) = 61.34^\circ\text{C}$

หรือ
$$Q = \frac{t_4 - t_B}{R_B}$$

$$532.79 = \frac{t_4 - 30}{\frac{1}{17}}$$

$$t_4 = (532.79 \times \frac{1}{17}) + 30 = 61.34^\circ\text{C}$$

สรุป จากค่าระดับอุณหภูมิที่ส่งผ่านผนังเตาชั้นต่างๆ จนถึงเปลือกเตาชั้นนอกสุดจากการคำนวณค่าอุณหภูมิที่เปลือกเตาชั้นนอกสุดจะมีอุณหภูมิเท่ากับ 61.34°C

จากผลการทดลองวัดค่าอุณหภูมิแตกต่างภายในช่องอบเทียบกับผนังเตาด้านนอกที่เกิดจริงจะปรากฏผลเป็นไปตามทฤษฎีที่คำนวณ ดังการแสดงค่าในตารางที่ 6

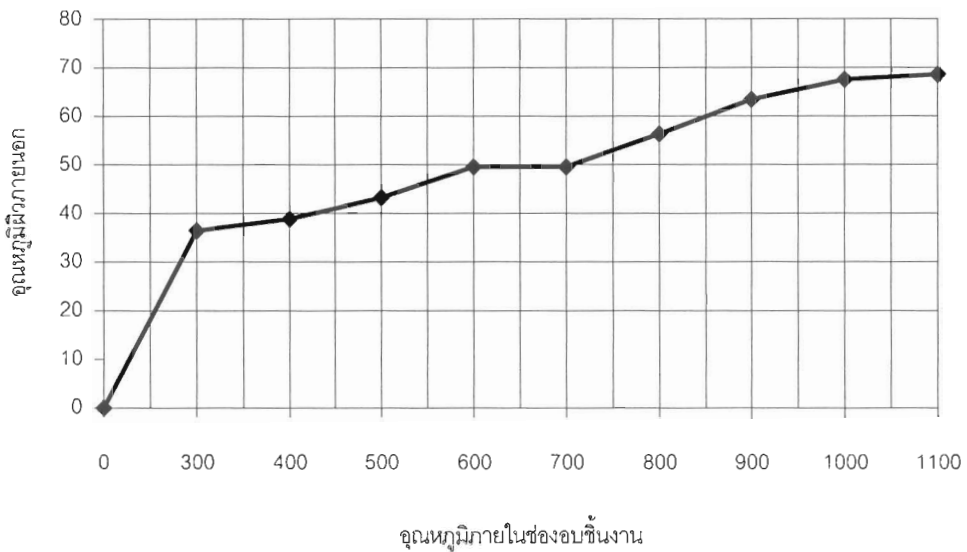
ตารางที่ 6 แสดงค่าอุณหภูมิภายในช่องอบเทียบกับอุณหภูมิที่ส่งผ่านอิฐฉนวน

ลำดับที่	อุณหภูมิภายใน ($^\circ\text{C}$)	อุณหภูมิผนังอิฐฉนวนภายนอก ($^\circ\text{C}$)
1.	300	34.6
2.	400	38.8
3.	500	43.2
4.	600	49.5
5.	700	54.8
6.	800	56.3
7.	900	61.4
8.	1,000	66.5
9.	1,100	67.5

หมายเหตุ ทำการวัดอุณหภูมิผิวภายนอกเตาโดยใช้ Holding time ของอุณหภูมิภายใน Step ละ 30 นาที



รูปที่ 6 แสดงการวัดอุณหภูมิภายในและภายนอก



รูปที่ 7 กราฟแสดงระดับจุดหมู่มิภายในห้องอบ และจุดหมู่มิมิวนอก

3.1.2 การออกแบบโครงสร้างเตา

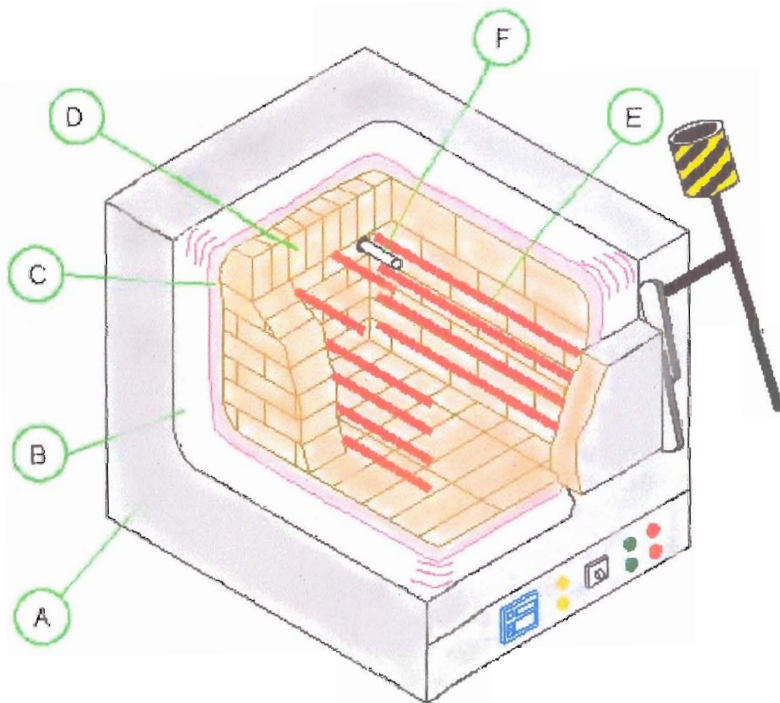
ตามที่ได้กำหนดขนาดของห้องอบชิ้นงาน และรูปแบบของการใช้วัสดุผนังเตาไปแล้วทำให้สามารถหามิติโดยรวมของตัวเตาได้ง่ายขึ้น และในการออกแบบโครงสร้างจะเน้นในด้านประโยชน์การใช้สอยเป็นองค์ประกอบสำคัญ ตามแนวทางต่อไปนี้

- มีประสิทธิภาพสูง
- มีความแข็งแรงทนทาน
- ง่ายต่อการซ่อมแซมและการบำรุงรักษา
- มีความสวยงาม

นั่นคือเปลือกเตาและโครงสร้างจะกำหนดใช้สแตนเลสสตีล โดยสามารถถอดประกอบได้ทุกด้าน เพื่อให้ง่ายต่อการบำรุงรักษาหรือซ่อมแซมชิ้นส่วนกรณีเกิดการชำรุดของชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ต่าง ๆ โดยเฉพาะประตูของห้องอบชิ้นงานได้ออกแบบการเปิด - ปิดแบบสวิงขึ้นด้านบน และมีลูกตุ้มน้ำหนักปรับสมดุลในการเปิด - ปิด (Counterbalanced Top - Opening) ซึ่งช่วยให้การใช้งานเป็นไปโดยง่ายดาย นอกจากนั้นยังติดตั้งสวิตซ์ตัดต่ออัตโนมัติ ซึ่งจะตัดการจ่ายกระแสไฟของระบบให้ความร้อนทันทีที่มีการเปิดประตู และจะเชื่อมต่อบระบบใหม่เมื่อปิดประตู ซึ่งจะช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานได้รับความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 8 แสดงการประกอบผนังชั้นนอกสุด



A = เปลือกเตาภายนอกทำด้วยสแตนเลสตีต

B = ช่องอากาศ

C = เซรามิกไฟเบอร์

D = อิฐทนความร้อน C-2 (Maximum Service Temperature 1400°C)

E = ขดลวดความร้อน KANTHAL AF ขนาด \varnothing 2.5 มม.

F = Thermocouple Type - K

รูปที่ 9 แสดงการจัดวางขดลวดความร้อน และลักษณะของการเรียงแผงฉนวนกันความร้อน



รูปที่ 10 แสดงการจัดวางชุดหลอด และระบบเปิด - ปิดประตูเตา

3.2 การกำหนดชนิด และขนาดของตัวให้ความร้อน

จากทฤษฎีของการหาค่าความจุความร้อน และวิธีการคำนวณหาขนาดของชุดหลอดความร้อน (จากบริษัทผู้ผลิตหลอดความร้อน KANTHAL) มีวิธีการคำนวณหาดังรายละเอียดต่อไปนี้

ในกระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลโลหะด้วยความร้อน โดยเฉพาะในกรณีของโลหะกลุ่มเหล็ก ซึ่งจะต้องใช้ช่วงอุณหภูมิของแต่ละกระบวนการแตกต่างกันค่อนข้างมาก และในการออกแบบสร้างเตาอบชุบโลหะนี้จะกำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ ในระดับสูงสุดของตัวเตา ดังนี้

1. ขนาดความจุของช่องอบชิ้นงาน 300×250×600 มม. (กว้าง×สูง×ลึก) หรือ 45 ลิตร
2. ปริมาตรของชิ้นงาน (เหล็กกล้า) สมมติเป็น 25 เปอร์เซ็นต์ของขนาดช่องอบ(45ลิตร) ซึ่งเท่ากับ 11.25 ลิตร คิดเทียบเป็นน้ำหนักได้โดยการคูณด้วยค่าความหนาแน่นของเหล็กกล้าคือ 7.8 นั่นคือเหล็กจะมีน้ำหนัก = 11.25×7.8 = 87,750 กรัม
3. ต้องการอบให้ความร้อนแก่ชิ้นเหล็กกล้าที่มีจำนวน 87,750 กรัม ให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น จาก 30°C เป็น 1,100°C เมื่อค่าความจุความร้อนต่อโมลของ Fe = 25 J mol⁻¹ °C⁻¹ คำนวณหาปริมาณความร้อนที่จะต้องใช้ในกระบวนการได้ ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Fe } 87,750 \text{ g} &= \frac{87,750 \text{ g}}{56 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \\ &= \frac{87,750}{56} \text{ mol} \end{aligned}$$

$$\Delta T = T_2 - T_1 = 1,100 - 30$$

$$\begin{aligned}
 &= 1,070^{\circ}\text{C} \\
 \text{ใช้สูตร } q_p &= nC_p\Delta T \\
 &= \left(\frac{87,750}{56}\text{ mol}\right)(25\text{ J mol}^{-1}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1})(1,070^{\circ}\text{C}) \\
 &= 41,916,294.64\text{ J} \\
 &= 41,916.29\text{ kJ}
 \end{aligned}$$

นั่นคือจะต้องให้ความร้อน = 41,916.29 kJ กับ Fe 87,750 กรัม เพื่อให้โลหะจำนวนนี้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 30°C เป็น $1,100^{\circ}\text{C}$

เมื่อทราบค่าพลังงานความร้อนที่ต้องใช้ ก็จะนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาขนาดของขดลวดความร้อน โดยคำนวณหาจากข้อมูลจำเพาะของบริษัทผู้ผลิต ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

จากค่าพลังงานความร้อนที่ต้องใช้เพื่อทำให้งานมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 30°C เป็น $1,100^{\circ}\text{C}$ และพลังงานความร้อนในส่วนของสูญเสียจากการส่งผ่านผนังเตา มีปริมาณรวมกันดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{พลังงานความร้อนที่ให้แก่งาน} & q_p = 41,916,294.64\text{ J} \\
 \text{พลังงานความร้อนที่ส่งผ่านผนังเตา} & q_w = 532.79\text{ J} \\
 \text{รวมพลังงานทั้งหมด} & Q = q_p + q_w \\
 &= 41,916,817.43\text{ J} \\
 &= 41,916.82\text{ kJ}
 \end{aligned}$$

นำค่าพลังงานความร้อนทั้งหมดที่ต้องใช้จำนวน 41,916.82 kJ ไปคิดคำนวณหาขนาดของขดลวดความร้อน ซึ่งจากรูปร่างและขนาดของช่องอบความร้อนภายในเตา มีความเหมาะสมที่จะติดตั้งขดลวดความร้อน 3 ด้าน คือ ผนังด้านข้างซ้าย-ขวาและด้านบน ทั้งนี้เพื่อให้ทุก ๆ ส่วนมีระดับอุณหภูมิแตกต่างกันน้อยที่สุด และจากการพิจารณาเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของตัวให้ความร้อนชนิดต่าง ๆ แล้ว ได้พิจารณาเลือกใช้ขดลวดความร้อนแบบ KANTHAL AF ดังข้อมูลเปรียบเทียบในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ข้อมูลเปรียบเทียบตัวให้ความร้อนแต่ละชนิด

สถานะภาพ	Wire Kanthal AF	Silicon Carbind double-ended	Kanthal super Molybdenum Disilicide
1. ความประหยัดค่าใช้จ่าย	A	B	C
2. อุณหภูมิใช้งานสูงสุด	B	B	A
3. ความยากง่ายในการติดตั้ง	B	B	A
4. ขอบเขตจำกัดของค่าแรงดันไฟฟ้า	A	B	C
5. ความยากง่ายในการออกแบบระบบควบคุม	A	B	C
6. อายุการใช้งานภายใต้สภาวะการณ์ต่างๆ	A	A	B
7. การบำรุงรักษา	A	B	C

หมายเหตุ A = ดีมาก
 B = ดี
 C = พอใช้

- การคำนวณหาขนาดขดลวด

พลังงานความร้อนที่ใช้ทั้งหมด = 41,916.82 kJ

กำหนดให้เวลาในการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจาก 30°C เป็น 1,100°C = 60 นาที

เพราะฉะนั้นพลังงานที่ใช้ทั้งหมด = $\frac{41,916.82}{60 \times 60}$

= 11.64 kW

Safety factor = 1.363

ประสิทธิภาพของขดลวด = 70%

จำนวนขดลวด = 2 ชุด

ค่า P ของแต่ละชุด = $\frac{5.82 \times 1.363}{0.7 \times 2}$

เพราะฉะนั้น P แต่ละขดลวด = 5.67 kW

หาขนาดความโตของเส้นลวดความร้อน

$$\text{สูตร} \quad d = \frac{1}{2.91} \sqrt[3]{\left(\frac{P}{U}\right)^2 \frac{\zeta C_t}{p}}$$

(Kanthal Handbook, 2000, p. 18)

$$\text{เมื่อ} \quad P = 5,670 \text{ W}$$

$$U = 220 \text{ V}$$

$$\zeta = 1.39$$

$$C_t = 1.06$$

$$p = 3 \text{ (เมื่อมีพื้นที่ผิวของลวดความร้อนเป็นสามด้าน)}$$

$$\therefore \quad d = \frac{1}{2.91} \sqrt[3]{\left(\frac{5,670}{220}\right)^2 \frac{1.39 \times 1.06}{3}}$$

$$= 2.37 \text{ mm.}$$

จากค่ามาตรฐานลวดความร้อน (ตารางที่ 2) พิจารณาเลือกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง

$$d = 2.5 \text{ mm.}$$

$$\text{จาก} \quad R_T = \frac{U^2}{P}$$

$$= \frac{220^2}{5,670} = 8.536 \text{ ohm}$$

$$\text{และ} \quad R_{20} = \frac{R_T}{C_t}$$

$$= \frac{8.536}{1.06} = 8.05 \text{ ohm}$$

- คำนวณหาความยาวลวดเส้นตรงที่ต้องใช้

จากตารางมาตรฐานลวดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 mm. มีค่าความต้านทาน $0.283 \Omega/\text{m}$

จากการคำนวณได้ความต้านทานรวมของขดลวด = 8.05Ω

$$\text{เพราะฉะนั้นความยาวลวดเส้นตรง} = \frac{8.05}{0.283} = 28.45 \text{ m}$$

นั่นคือขดลวดแต่ละชุดจะมีความยาวลวดเส้นตรง = 28.45 เมตร

- คำนวณหาค่ากระแสในขดลวดแต่ละชุด

$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad I &= \frac{E}{R} \\ &= \frac{220}{8.05} = 27.33 \text{ Amp} \end{aligned}$$

จากผลการคำนวณหาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของขดลวดความร้อน ซึ่งได้ขนาด 2.5 มม. ความต้านทาน 8.05Ω ที่ความยาวรวม 28.45 เมตร นำค่าความยาวลวดที่ได้มาออกแบบชุดขดลวดที่จะจัดวางในช่องอบของเตาดังนี้

เมื่อพิจารณาขนาดของช่องอบซึ่งได้ออกแบบให้มีขนาด $300 \times 250 \times 600$ (W×H×D) จะจัดวางชุดขดลวดตามที่แสดงในรูปที่ 10 ซึ่งได้จากการคำนวณดังต่อไปนี้

เลือกขนาดเส้นรอบวงของขดลวด(ตามหลักเกณฑ์ บทที่ 2 หน้าที่ 5)

กำหนดให้ $D = 14d$

$$d = 2.5 \text{ mm.}$$

$$\therefore D = 35 \text{ mm.}$$

ขนาดเส้นรอบวงนอกของขดลวด = 35 mm.

หาจำนวนของขด

$$\begin{aligned} \text{จำนวนขด} &= \frac{1000 \times L_2}{\pi(D-d)} \\ &= \frac{1000 \times 2.45}{3.1415(35 - 2.5)} \\ &= 278.65 \text{ ขด} \end{aligned}$$

หาความยาวขดปิดของขดลวด(จำนวนขด X ความโตเส้นลวด)

$$= 278.65 \times 2.5$$

$$= 696.63 \text{ mm.}$$

หาความยาวปกติของขดลวด

กำหนดให้ระยะ Pitch = 3 mm.

$$= 696.63 \times 3$$

$$= 2089.89 \text{ mm.}$$

แบ่งความยาวของขดลวดออกเป็น 5 ส่วนเพื่อให้สามารถติดตั้งตามความลึกของช่องอบ เพราะฉะนั้นความยาวในแต่ละส่วน = 417.98 mm. หรือ = 0.42 m.



รูปที่ 11 แสดงการม้วนขดลวดความร้อน

3.3 การกำหนดรูปแบบชุดควบคุมอุณหภูมิ

จากการที่ได้พิจารณาเลือกใช้ลวดความร้อนชนิด KANTHAL AF ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 mm. ซึ่งกินกระแส 27.33 Amp , 220 Volt/AC จำนวน 2 ชุด และเนื่องจากกระบวนการเพิ่มรักษาระดับและการลดลงของอุณหภูมิภายในช่องอบของเตา มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการที่จะส่งผลของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโลหะชิ้นงาน ฉะนั้นอุปกรณ์ควบคุมที่พิจารณานำมาใช้ควรมีฟังก์ชันต่างๆ ดังนี้

- สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ไม่ต่ำกว่า 1,200°C
- สามารถปรับการเพิ่ม-ลดของอุณหภูมิได้
- สามารถตั้งโปรแกรมควบคุมการเพิ่มและรักษาระดับอุณหภูมิได้
- แสดงผลชัดเจนและใช้งานได้ง่าย

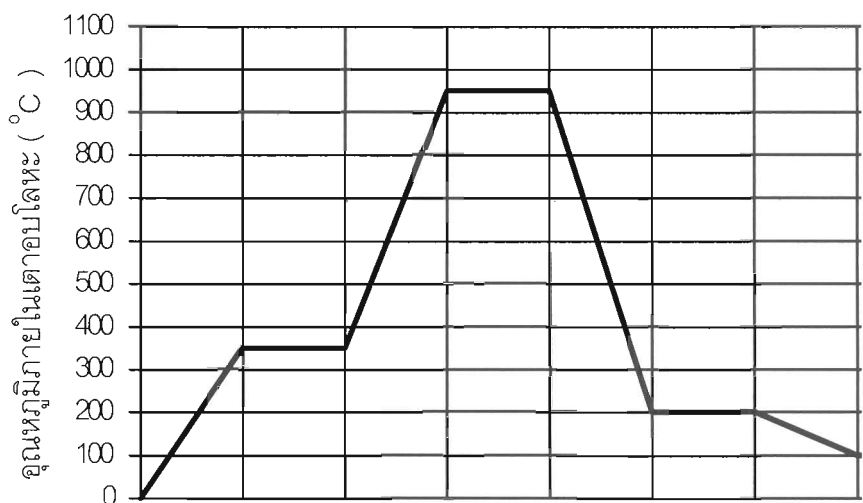
ตามหลักทฤษฎีในการให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน ที่ต้องการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของโลหะในแต่ละวัสดุประสงค์ข้างต้น จะเห็นว่าเตาอบโลหะที่ดีนั้นนอกจากจะสามารถให้อุณหภูมิได้สูงพอต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโลหะแล้ว ยังจะต้องสามารถควบคุมอุณหภูมิในการเผาแซ่ต่อการปรับเพิ่มอุณหภูมิในอัตราต่างๆ ได้ตามกฎเกณฑ์ของทฤษฎี โดยให้ความเที่ยงตรงสูง ดังนั้น อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิที่จะนำมาใช้จะต้องมีความสามารถควบคุมสิ่งต่างๆ ได้ดังนี้

- สามารถควบคุมอุณหภูมิได้เที่ยงตรงทุกระดับตั้งแต่ 100°C – 1.200°C
- แสดงผลชัดเจน และใช้งานได้ง่าย

จากความต้องการให้ชุดควบคุมอุณหภูมิ ที่สามารถทำงานได้ตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จึงพิจารณาเลือกใช้ชุดควบคุมอุณหภูมิมี่ห้อ Shinko รุ่น FCD – 15 A ซึ่งมีฟังก์ชันการทำงานแบบ Single Pattern Seven Step โดยแต่ละ Step สามารถตั้งค่าอุณหภูมิและเวลาได้อย่างต่อเนื่อง สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ตรงตามวัตถุประสงค์ด้านต่าง ๆ อย่างกว้างขวางดังตัวอย่าง แสดงรูปแบบการเพิ่ม รักษาระดับ และการลดลงของอุณหภูมิตามระยะเวลาที่กำหนดในแต่ละ Step เทียบกับค่าอุณหภูมิที่ระดับต่างๆ ตามตารางที่ 8

ตารางที่ 8 แสดงตัวอย่างการใช้โปรแกรมควบคุม

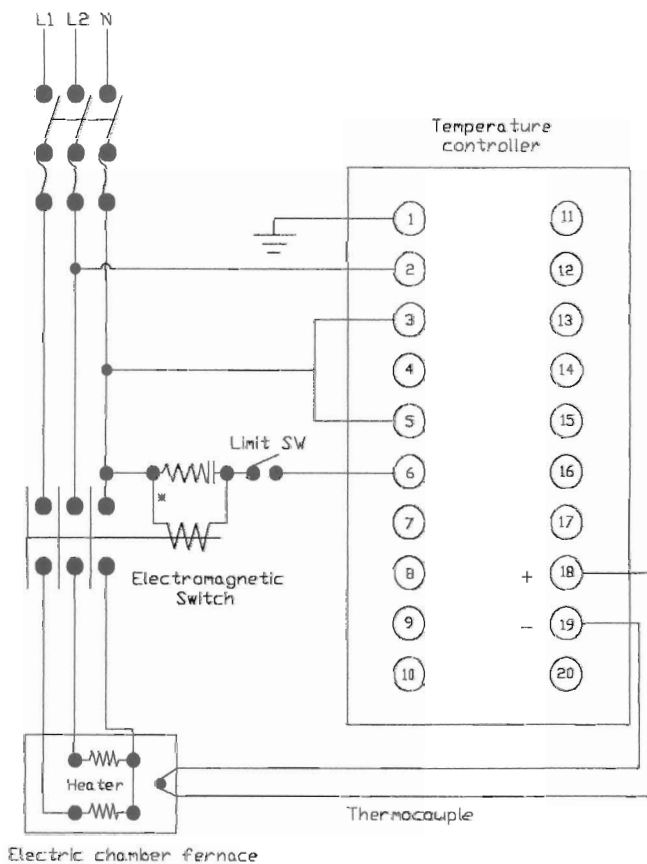
Step Number (Setting Value Memory)	1	2	3	4	5	6	7
Main Setting Value	350	350	950	950	200	200	100
Proportional Band	2	1.8	2	1.8	2.5	1.8	2
Integral Time	180	80	180	80	200	80	200
Derivative Time	30	20	30	20	50	20	50
Proportional Cycle	30	30	30	30	30	30	30
Step Time (hr.)	0:30	1:00	0:45	1:00	2:00	0:30	1:00



แกนแสดงเวลาในหน่วยชั่วโมง



รูปที่ 12 แสดงการต่อวงจร



รูปที่ 13 แผนภูมิวงจรควบคุมอุณหภูมิ

จากขั้นตอนในการจัดสร้างเตาอบโลหะอุณหภูมิสูงตามหลักทฤษฎีต่างๆที่นำมาประยุกต์ใช้
ได้ดำเนินงานตามแผนการดำเนินงานดังแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 แสดงแผนการดำเนินงาน

รายการ/กิจกรรม	มิถุนายน	กรกฎาคม	สิงหาคม	กันยายน
	2543	2543	2543	2543
1. ออกแบบตัวเตาและระบบควบคุม	■	■		
2. คำนวณรายการวัสดุและจัดซื้อ		■		
3. ดำเนินการจัดสร้างตามแบบ		■	■	
4. ทดลองและเก็บข้อมูล			■	■
5. ปรับปรุงแก้ไข			■	■
6. ทดลองและสรุปผล				■

บทที่ 4

การวิเคราะห์และการทดลอง

จากการดำเนินการจัดสร้างเตาอบโลหะอุณหภูมิสูงตามแบบที่กำหนดแล้ว ได้ทำการทดลองหาประสิทธิภาพการทำงานของเตาอบโลหะอุณหภูมิสูง โดยมีประเด็นสำคัญในการทดลองดังนี้

1. อัตราการกินกระแสของชุดขดลวดความร้อน
2. ระดับอุณหภูมิสูงสุดที่ได้จากชุดขดลวดความร้อน
3. ความเที่ยงตรงในการควบคุมอุณหภูมิและเวลา
4. ระดับอุณหภูมิที่ส่งผ่านผนังเตา
5. ทดลองปรับสภาพโครงสร้างชิ้นงานจริง

4.1 การทดลองวัดค่าการกินกระแสของชุดลวดความร้อน

จากการคำนวณหาขนาดและความยาวของลวดเส้นตรงมาแล้ว ภายหลังจากทำการติดตั้งชุดขดลวดความร้อนและอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ ทดลองจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าชุดลวดความร้อนแต่ละชุด และทำการวัดกระแสโดยใช้เครื่องมือวัดกระแสแบบแคลมป์มิเตอร์ ยี่ห้อ FLUKE Model 32 ซึ่งได้ค่าของกระแสตามตารางที่ 10



รูปที่ 14 แสดงการวัดความต้านทานของชุดลวด และอัตราการกินกระแส

ตารางที่ 10 แสดงค่าความต้านทานของชุดลดความร้อนและอัตราการกินกระแส (220V/AC=2ชุด)

ลำดับที่	ระดับอุณหภูมิ °C	ค่าความต้านทาน (Ω)		ค่ากระแส (Amp)	
		C ₁	C ₂	L ₁	L ₂
1.	200	7.7	7.6	27.5	27.4
2.	250	7.7	7.6	27.4	27.4
3.	300	7.7	7.6	27.4	27.3
4.	350	7.7	7.6	27.3	27.2
5.	400	7.7	7.6	27.3	27.2
6.	450	7.7	7.6	27.3	27.2
7.	500	7.7	7.6	27.2	27.0
8.	550	7.7	7.6	26.6	26.5
9.	600	7.6	7.6	26.4	26.4
10.	650	7.7	7.7	26.4	26.4
11.	700	7.7	7.7	26.3	26.2
12.	750	7.7	7.7	26.3	26.2
13.	800	7.8	7.8	26.3	26.3
14.	850	7.9	7.8	26.4	26.3
15.	900	8.0	7.9	26.3	26.2
16.	950	8.0	7.9	26.3	26.2
17.	1000	8.0	7.9	26.3	26.2

หมายเหตุ : อุณหภูมิผิวนอก Insulation Brick C₂ = 78°C เมื่ออุณหภูมิภายในช่อง Chamber = 950°C Holding Time 2 hr per Step

4.2 การทดลองหาค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ได้จากชุดลดความร้อน

จากการทดลองที่ 1 ซึ่งได้ผลถูกต้องเป็นที่น่าพอใจแล้ว ได้ทำการทดลองตั้งค่าอุณหภูมิที่ 1,200°C โดยตัดฟังก์ชันสวิตช์เวลาออก เพื่อให้การจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าชุดลดเป็นแบบต่อตรงไม่มีการตัด-ต่อ ปรากฏว่าชุดลดความร้อนสามารถเพิ่มอุณหภูมิภายในช่องอบขึ้นงาน จากอุณหภูมิ 38°C ไปเป็น 1,200°C โดยใช้เวลาเพียง 98 นาที ซึ่งจัดว่าการออกแบบติดตั้งชุดลดความร้อนมีประสิทธิภาพอยู่ในเกณฑ์ดี ทำให้สามารถกระจายความร้อนได้อย่างทั่วถึง โดยได้ใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิ

แบบมือถือยี่ห้อ Marlin Model 450 k สอดเข้าไปวัดอุณหภูมิภายในช่องอบเพื่อเปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิกับชุดควบคุมอุณหภูมิของตัวเตาที่อ่านได้เพื่อเปรียบเทียบค่าที่ถูกต้อง ซึ่งปรากฏผลดังนี้

ตารางที่ 11 แสดงระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นภายในช่องอบเมื่อตัดฟังก์ชันการควบคุมเวลาออก

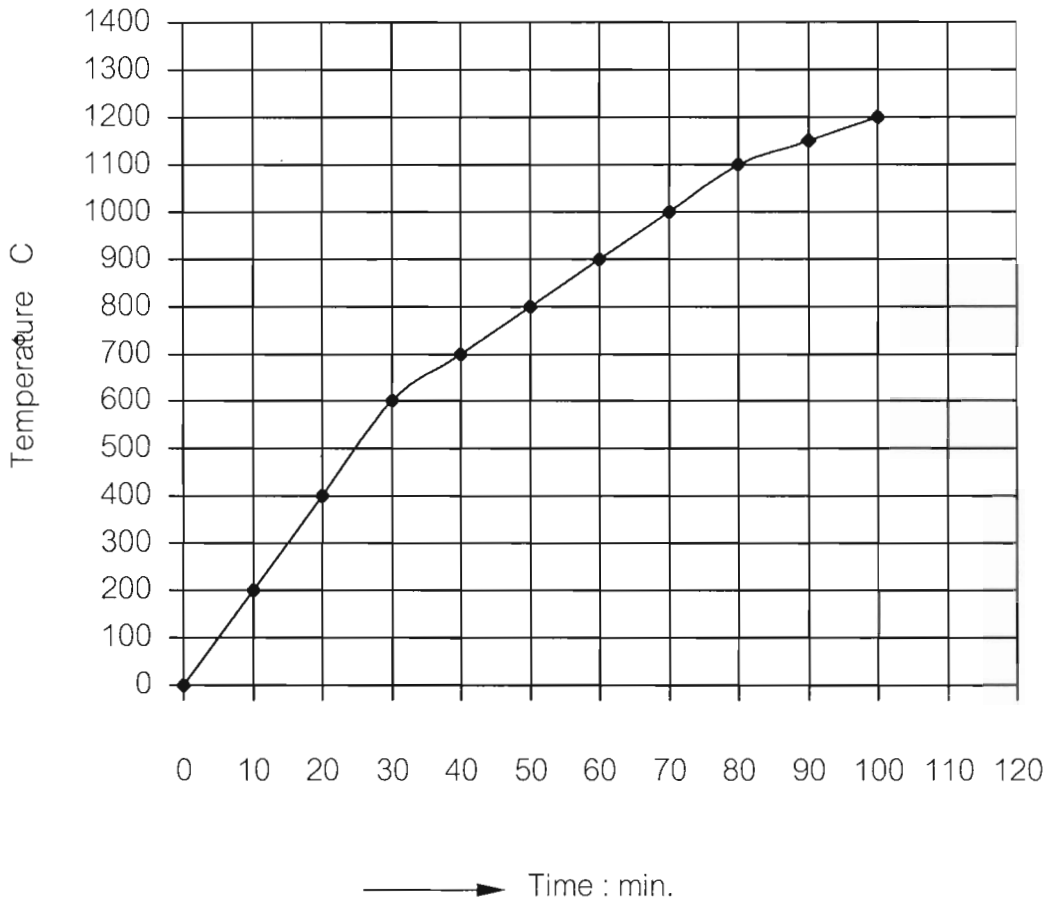
ลำดับที่	ระดับอุณหภูมิในช่องอบ จากชุดควบคุมของเตา(°C)	ระดับอุณหภูมิในช่องอบ อ่านจากเครื่องวัดมือถือ(°C)	เวลาที่ใช้ในการเพิ่ม อุณหภูมิ (Min)
1	38	38	0
2	180	182	10
3	360	363	20
4	538	538	30
5	740	741	40
6	860	862	50
7	976	978	60
8	1,068	1,067	70
9	1,120	1,124	80
10	1,180	1,178	90
11	1,200	1,192	98

ค่าที่อ่านได้จากชุดควบคุมอุณหภูมิของเตา 1,200°C

ค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดมือถือ 1,192°C

จากค่าอุณหภูมิที่วัดได้จะมีความแตกต่างเพียง 8°C ถือว่าน้อยมาก

จากการจัดบันทึกข้อมูลอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเทียบกับเวลาตามตารางที่ 11 เป็นไปดังกราฟที่แสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15 กราฟแสดงการเพิ่มอุณหภูมิเตา

4.3 การทดสอบความเที่ยงตรงของการควบคุมระดับอุณหภูมิและเวลา

หลังจากได้ทำการทดลองขั้นที่ 1 และ 2 แล้ว จะเป็นการทดสอบหาความเที่ยงตรงในการควบคุมระดับอุณหภูมิและเวลาของอุปกรณ์ควบคุม เนื่องจากอุปกรณ์ควบคุมที่นำมาใช้เป็นอุปกรณ์ที่มีฟังก์ชันต่าง ๆ ดังนี้

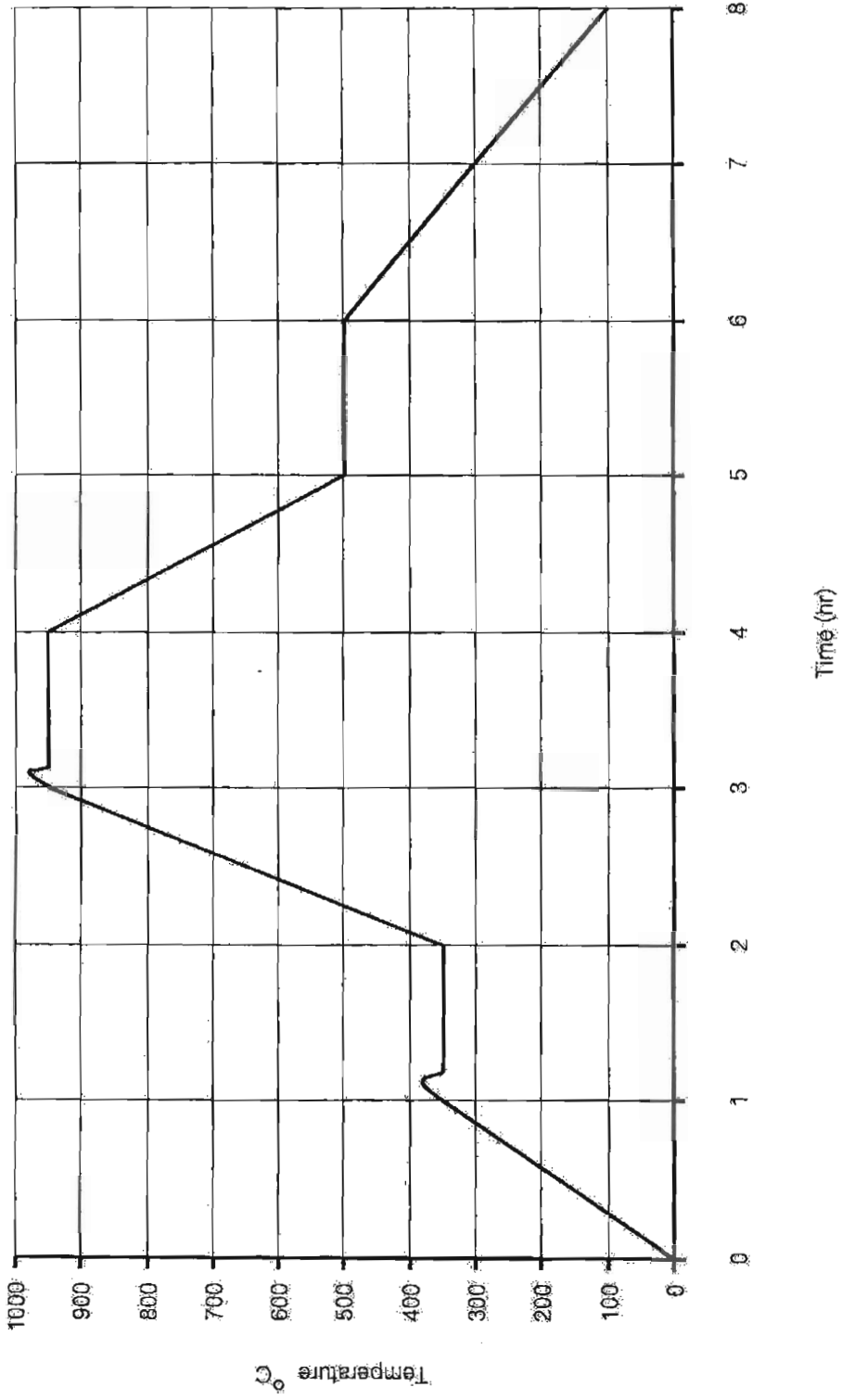
- มีย่านการวัดอุณหภูมิ -200° ถึง $1,370^{\circ}\text{C}$ เมื่อใช้ Input จากเทอร์โมคัปเปิล Type-K
- สามารถตั้งระดับอุณหภูมิและเวลาให้สามารถทำงานได้ต่อเนื่องได้ 7 ขั้นตอน

ซึ่งจากฟังก์ชันนี้นับว่าเป็นการเพียงพอสำหรับการควบคุมในงานอบชุบโลหะในวัสดุประสงค์ต่าง ๆ สำหรับการทดลองนี้ได้กำหนดให้มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในช่วงเวลาต่าง ๆ ตลอดจนมีการควบคุมให้มีการควบคุมการรักษาระดับอุณหภูมิคงที่ ตามระยะเวลาดังแสดงในตารางที่ 11

ตารางที่ 12 แสดงค่าเบี่ยงเบนของอุณหภูมิโดยการทดลองควบคุมใช้ 1 Pattern 7 step

Number of step	Main setting value (SV) °C	Process variable peak (PV-p) °C	Process variable low (PV-l) °C
1	350	387	-
2	350	352	348
3	950	978	-
4	950	953	942
5	200	-	197
6	200	208	189
7	100	-	98

จากการทดลองวัดค่าอุณหภูมิและการจับเวลา ปรากฏผลเป็นที่น่าพอใจอย่างยิ่งคือ มีค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิสำหรับขั้นตอนการเพิ่มอุณหภูมิเมื่อถึงค่าสูงสุดที่กำหนดไว้ในแต่ละขั้นตอน ค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจริงจะไหลต่อไปไม่เกิน 5% หลังจากนั้นระดับอุณหภูมิจะปรับลดลงมาที่ระดับซึ่งกำหนดไว้โดยตรง



รูปที่ 16 กราฟแสดงค่าเบี่ยงเบนของอุณหภูมิจากการตั้งค่าตามตารางที่ 11

4.4 การตรวจวัดระดับอุณหภูมิที่ผนังเตา

จากการคำนวณและออกแบบผนังเตา ภายหลังจากการติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ เป็นที่เรียบร้อยแล้ว ได้ทำการทดลองวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนผนังเตาโดยมีรายละเอียดดังนี้

1. ทำการวัดอุณหภูมิที่ส่งผ่านผนังอิฐฉนวน โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด 2 หัว ยี่ห้อ FLUKE Model 52 K/J เพื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในช่องอบชิ้นงานกับผิวภายนอก ที่ระดับอุณหภูมิต่าง ๆ ซึ่งได้ข้อมูลตามตาราง

ตารางที่ 13 แสดงข้อมูลเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในช่องอบชิ้นงานกับผิวภายนอกที่ระดับอุณหภูมิต่าง ๆ

ตำแหน่งการวัด	ระดับอุณหภูมิ °C				
อุณหภูมิในช่องอบชิ้นงาน	300	500	700	900	1,100
อุณหภูมิที่ผนังอิฐฉนวน	41	48	59	64	78

2. ทำการวัดอุณหภูมิที่เปลือกเตาชั้นนอกสุด ซึ่งทำด้วยสแตนเลสสตีลโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล ซึ่งการกำหนดระดับอุณหภูมิภายในเตา ได้กำหนดตามรูปแบบการอบชุบโลหะชิ้นงานจริง ซึ่งได้ข้อมูลตามตาราง

ตารางที่ 14 แสดงข้อมูลการวัดอุณหภูมิที่เปลือกเตาชั้นนอกสุด

ตำแหน่งการวัด	ระดับอุณหภูมิ °C	
อุณหภูมิในช่องอบ	300	950
อุณหภูมิที่เปลือกเตาชั้นนอกสุด	40	52



รูปที่ 17 แสดงการวัดอุณหภูมิภายใน และเปลือกเตาชั้นนอกสุด

4.5 การทดลองการปรับสภาพโครงสร้างชิ้นงานจริง

หลังจากที่ได้ทำการทดสอบเพื่อวัดค่าต่าง ๆ ทั้ง 4 ชั้นที่กล่าวมาแล้ว ในขั้นสุดท้ายเป็นการทดลองอบชุบชิ้นงานจริง เพื่อเป็นการพิสูจน์ประสิทธิภาพการทำงานของตัวเตาอบโลหะว่าสามารถทำงานปรับปรุงโครงสร้างของโลหะด้วยความร้อนว่าสามารถใช้งานได้ดีเพียงใด ซึ่งได้ทำการทดลอง 2 กรณี คือ

4.5.1 การชุบแข็งเหล็กกล้าเครื่องมือ

ตารางที่ 15 แสดงข้อมูลมาตรฐานการชุบแข็งของบริษัทผู้ผลิต

Material	Diamention (mm)	γ -Temp.	Quench media	H _{RC} (spec)	H _{RC} (real)
XW-5	10x50x100	950	Oil	64	63.75

วิธีการทดลอง โดยการปรับตั้งให้เตามีระดับอุณหภูมิเท่า 950^oC ซึ่งเป็นระดับอุณหภูมิที่เหล็ก XW-5 จะมีโครงสร้างออสเทนไนท์ (γ) และทำการเผาแช่ที่อุณหภูมิ 950^oC เป็นเวลานาน 20 นาที จึงนำชิ้นงานออกจากเตาเพื่อจุ่มชุบในอ่างน้ำมัน เพื่อให้โครงสร้างออสเทนไนท์เปลี่ยนโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ ต่อจากนั้นทำการอบคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 250^oC จึงนำไปวัดค่าความแข็งซึ่งค่าได้ตามตารางที่ 16

ตารางที่ 16 แสดงค่าความแข็งที่ได้จากการวัด

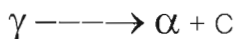
Material	1	2	3	4	Average
XW-5	63	64	65	63	63.75 H _{RC}

4.5.2 การทำเหล็กหล่ออบเหนียว (Malleable Cast Irons)

ในการทำเหล็กหล่ออบเหนียวดำ (Ferritic หรือ Black heart malleable) ซึ่งทำจากการนำเหล็กหล่อสีขาวมาอบด้วยความร้อนภายในเตาที่บรรยากาศเป็นแก๊สเฉื่อย หรืออาจใช้ทรายปิดคลุมเหล็กหล่อเอาไว้ในขณะทำการอบ ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ใช้วิธีการบรรจุชิ้นงานในกล่องเหล็กแล้วใช้ทรายซิลิกาคลุมไว้ ทั้งเพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชันที่ผิวของเหล็ก อุณหภูมิที่ใช้ออบในช่วงแรกอยู่ที่ระดับ 950°C ในเวลาในการอบประมาณ 30 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในเนื้อเหล็ก คือ



จากนั้นจะให้อุณหภูมิภายในเตามีระดับลดลงมาอยู่ที่ 730°C และอบแช่อยู่ที่ 730°C เป็นเวลา 30 ชั่วโมง ซึ่งการอบแช่ที่อุณหภูมิ 730°C เพื่อต้องการให้โครงสร้างออสเทนไนต์เปลี่ยนเป็นเฟอร์ไรต์อย่างสมบูรณ์ ดังสมการ

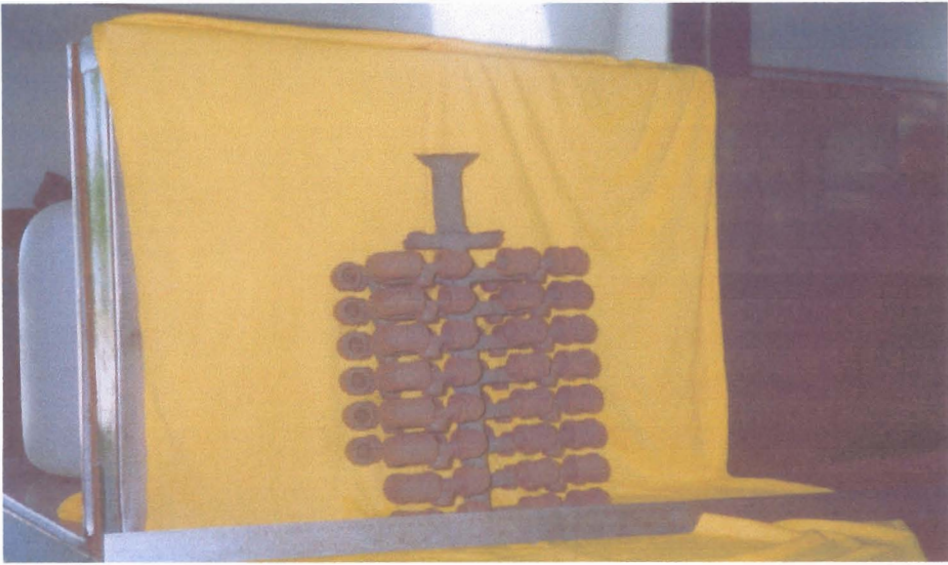


โดยการอบแช่ชิ้นงานแต่ละชิ้นตอนมีชื่อเรียกเฉพาะดังนี้

อบที่อุณหภูมิสูง (950°C) จะเรียกว่าการทำ First Stage Malleablization หรือ Graphitization (F.S.G)

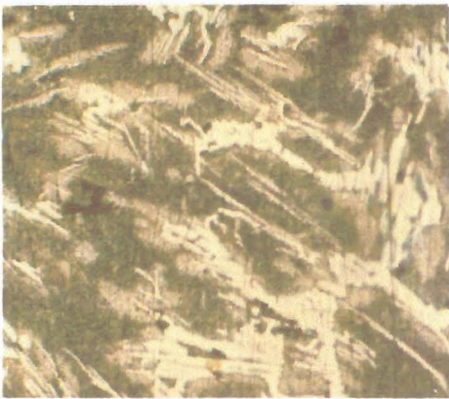
อบที่อุณหภูมิ 730°C จะเรียกว่าการทำ Second Stage Malleablization หรือ Graphitization (S.S.G)

จากการที่ต้องใช้ระดับอุณหภูมิสูงเป็นเวลานานถึงสองขั้นตอนอย่างต่อเนื่อง เตาอบโลหะที่ใช้ต้องสามารถควบคุมอุณหภูมิได้อย่างมีประสิทธิภาพ และที่สำคัญต้องป้องกันความร้อนส่งผ่านผนังเตาอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก เพราะหากความร้อนถูกส่งผ่านผนังเตาในระดับสูงจะส่งผลให้อุปกรณ์ควบคุมซึ่งติดตั้งอยู่ด้านล่างเกิดการชำรุดเสียหายได้ และอาจเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานเมื่อไปสัมผัสเปลือกเตา กรณีที่วัสดุที่ใช้ทำผนังกันความร้อนมีประสิทธิภาพไม่พอและการออกแบบไม่ถูกต้อง

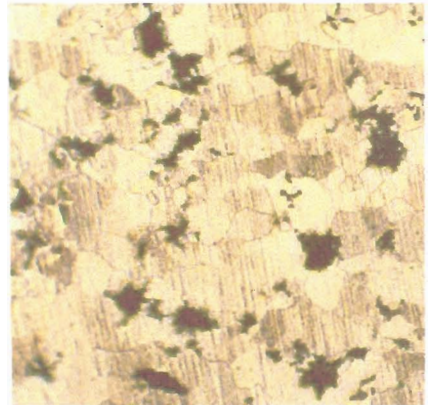


รูปที่ 18 ชิ้นงานเหล็กหล่อสีขาวที่ปรับโครงสร้างเป็นเหล็กหล่ออบเหนียว

ผลที่ได้จากการทดลอง เมื่อนำชิ้นงานไปตรวจสอบโครงสร้างปรากฏผลเป็นไปตามวัตถุประสงค์ กล่าวคือ สามารถเปลี่ยนโครงสร้างชิ้นงานจากเหล็กหล่อสีขาวไปเป็นเหล็กหล่ออบเหนียวได้อย่างสมบูรณ์ ทำให้โครงสร้างใหม่ที่ได้สามารถตกแต่งด้วยเครื่องจักรและมีความเหนียวเพิ่มขึ้น โดยในการทดลองประสิทธิภาพของเตาสำหรับกระบวนการนี้มีขั้นตอนการใช้โปรแกรมการควบคุม ดังแสดงในตารางที่ 17



รูปโครงสร้างชิ้นงานก่อนอบ (Whit cast Iron)

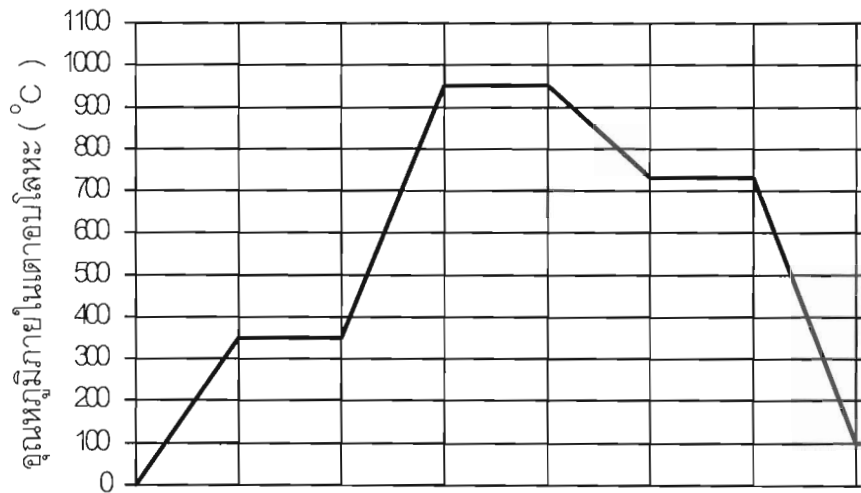


รูปโครงสร้างชิ้นงานหลังอบ (Malleable cast Iron)

รูปที่ 19 แสดงภาพโครงสร้างชิ้นงานในรูปที่ 18 ก่อน และหลังการปรับสภาพ

ตารางที่ 17 แสดงตัวอย่างการใช้โปรแกรมควบคุมอุณหภูมิเพื่อทำเหล็กหล่ออบเหนียว

Step Number (Setting Value Memory)	1	2	3	4	5	6	7
Main Setting Value (°C)	350	350	950	950	730	730	100
Proportional Band	2	1.8	2	1.8	2.5	1.8	2
Integral Time	180	80	180	80	200	80	200
Derivative	30	20	30	20	50	20	50
Proportional Cycle	30	30	30	30	30	30	30
Step Time (hr.)	0:30	1:00	0:45	30:00	2:00	30:00	6:00



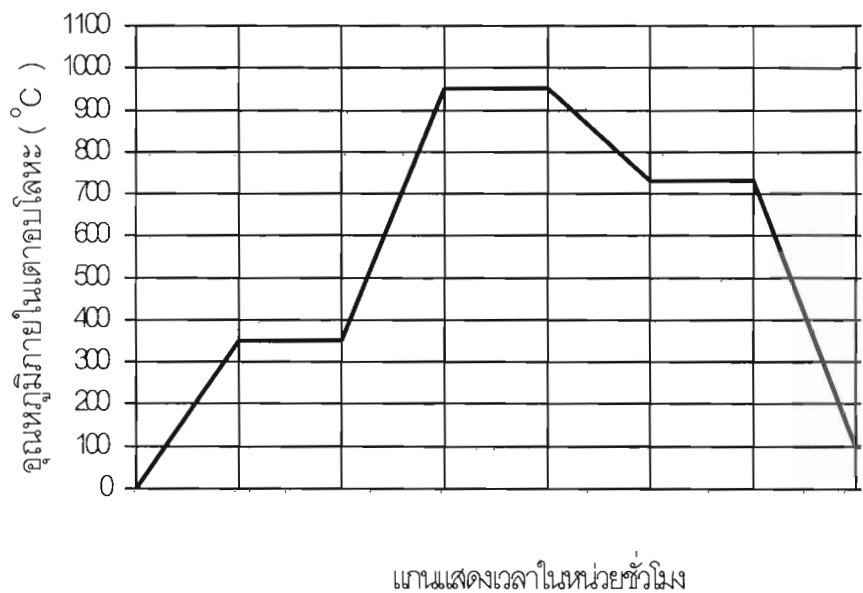
แกนแสดงเวลาในหน่วยชั่วโมง

4.5.3 การอบอ่อนเหล็กกล้าเครื่องมือ

จากที่ได้ทำการทดลองใช้เตาในการอบเหล็ก XW – 5 ที่อุณหภูมิ 950°C เพื่อทำการชุบแข็ง(ตามหัวข้อที่ 4.5.1) ซึ่งได้ค่าความแข็งของชิ้นงาน = 63.75H_{RC} มาทำการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์ (Full Annealing) โดยใช้อัตราการให้ความร้อน 200°Cต่อชั่วโมง เพื่อให้อุณหภูมิของเตาปรับเพิ่มจากระดับอุณหภูมิห้อง - 950° C ในเวลา 4.75 ชั่วโมงและอบแช่ชิ้นงานที่ระดับอุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงจึงปล่อยให้เย็นตัวอย่างช้าๆภายในเตาโดยใช้อัตราการลดลงของอุณหภูมิ 150°C ต่อชั่วโมง

ตารางที่ 18 แสดงตัวอย่างการให้โปรแกรมควบคุมอุณหภูมิเพื่ออบอ่อนอย่างสมบูรณ์

Step Number (Setting Value Memory)	1	2	3
Main Setting Value (°C)	950	950	50
Proportional Band	2	1.8	2
Integral Time	180	80	200
Derivative	30	20	50
Proportional Cycle	30	30	30
Step Time (hr.)	4.75	1	6.5



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและประเมินผล

จากผลการทดลองหาประสิทธิภาพในด้านต่าง ๆ ของเตาอบโลหะอุณหภูมิสูงสามารถสรุปผลแยกเป็นประเด็นต่างๆ ดังนี้

1. ขีดความสามารถในการเพิ่ม-ลดและรักษาระดับอุณหภูมิของเตา
2. ประสิทธิภาพของผนังเตาและโครงสร้าง
3. สรุปผลการคิดค้นสร้างสิ่งประดิษฐ์
4. ข้อเสนอแนะ

5.1 ขีดความสามารถในการเพิ่ม - ลด และรักษาระดับอุณหภูมิของเตา

จากผลการทดลองอบชุบเหล็กทั้งสองกรณี ซึ่งมีผลงานออกมาเป็นไปตามมาตรฐานที่ยอมรับ แสดงให้เห็นว่าการกำหนดขนาดและชนิดของตัวให้ความร้อน ตำแหน่งการติดตั้งและการเลือกใช้อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิเป็นไปอย่างเหมาะสม การให้ความร้อนกับชิ้นงานโดยการให้เตาอบไฟฟ้า(Electric Chamber Furnace) นับเป็นวิธีที่สะดวกและให้ประสิทธิภาพที่ดีวิธีหนึ่ง ซึ่งจากการทดลองหาประสิทธิภาพของการเพิ่ม - ลด และรักษาระดับอุณหภูมิของเตาในรูปแบบต่างๆ แล้ว ปรากฏผลสำเร็จตามวัตถุประสงค์

5.2 ประสิทธิภาพของผนังเตาและโครงสร้าง

จากผลการทดลองวัดค่าระดับอุณหภูมิที่ผนังเตาด้านนอก เปรียบเทียบกับอุณหภูมิภายในเตาปรากฏผลเป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้ นั่นคือ ค่าความร้อนที่สูญเสียออกไปทางผนังเตาเป็นไปตามที่เงื่อนไขที่วางไว้ซึ่งนับว่ามีค่าอยู่ในเกณฑ์ต่ำ ซึ่งเท่ากับเป็นการประหยัดพลังงาน และในส่วนของโครงสร้างเตาที่กำหนดเลือกใช้สแตนเลสสตีลนั้นมีเหตุผลสำคัญ คือ สถานที่ตั้งและใช้งานอยู่ริมทะเลประกอบกับลักษณะการใช้งานจริงจะมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทุกครั้ง ซึ่งการเลือกใช้สแตนเลสสตีลไม่จำเป็นต้องเคลือบผิวด้วยสีก็ให้ความสวยงาม และทำความสะอาดได้ง่าย

5.3 สรุปผลการสร้างสิ่งประดิษฐ์

ส่วนที่ 1 ค่าระดับความร้อนที่ได้

- สามารถให้พลังงานความร้อนภายในช่องเผาได้ถึง $1,200^{\circ}\text{C}$

- สามารถปรับเพิ่มอุณหภูมิจากระดับ 300°C จนถึง $1,200^{\circ}\text{C}$ ได้ภายในเวลาเพียง 1 ชั่วโมง
- สามารถตั้งโปรแกรมควบคุมการเพิ่ม – ลด และรักษาระดับการลดลงของอุณหภูมิได้ 7 ระดับ โดยทำการทดลองใช้เทอร์โมคัปเปิลแบบมือถือสอดเข้าไปตรวจวัดอุณหภูมิบริเวณกึ่งกลางของช่องเผา เพื่อเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่จุดควบคุมของตัวเตา ซึ่งอ่านได้และมีความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิเพียง ± 5 เฟอร์เซนต์

ส่วนที่ 2 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน

- ชุดชุดลดความร้อนได้ออกแบบให้ใช้กับระบบไฟฟ้าแบบ AC 220 V จำนวน 2 ชุด ซึ่งแต่ละชุดใช้ค่ากระแส 26.5 แอมแปร์ โดยเมื่อคิดเฉลี่ยทั้ง 2 ชุด จะมีค่าการใช้พลังงานเท่ากับ 11 kW ซึ่งเมื่อเทียบกับขนาดของช่องเผาแล้วจัดว่ามีความเหมาะสมดีมาก

ส่วนที่ 3 ค่าการสูญเสียพลังงานความร้อน

- ตัวเตาได้ออกแบบโดยใช้การสร้างผนังกันความร้อน 2 ชั้น (Double Skin) ซึ่งมีผลช่วยป้องกันความร้อนภายในช่องเผาผนังเตาออกมาได้น้อยมาก ซึ่งจากการวัดค่าอุณหภูมิเปรียบเทียบระหว่างภายในช่องเผาที่ $1,000^{\circ}\text{C}$ ปรากฏว่าผนังภายนอกของเตามีอุณหภูมิสูงเพียง 65°C จึงทำให้สามารถลดการสูญเสียพลังงานได้เป็นอย่างดี

ผลการวิจัยจัดสร้างสิ่งประดิษฐ์เป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ กล่าวคือ เตอบอบชุบโลหะสามารถให้อุณหภูมิได้สูงสุดถึง $1,200^{\circ}\text{C}$ โดยสามารถควบคุมระดับอุณหภูมิตามค่าที่ตั้งไว้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และจากวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยในตอนต้น คือ เพื่อออกแบบและจัดสร้างเตอบอบโลหะที่มีขนาด รูปแบบการควบคุมอุณหภูมิและประสิทธิภาพที่เหมาะสมกับการใช้งานจริง โดยสอดคล้องกับการจัดการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรม ซึ่งจากการทดสอบประสิทธิภาพในการใช้งานจริง ประสบผลสำเร็จดียิ่ง สามารถใช้เป็นเครื่องมือในการเรียนการสอนด้านการอบชุบโลหะด้วยความร้อน และสามารถนำไปสู่การพัฒนาด้านอุตสาหกรรมอื่น ๆ ได้อีก

5.4 ข้อเสนอแนะ

เพื่อให้การใช้งานเตอบอบโลหะอุณหภูมิสูงมีประสิทธิภาพสูงสุด ควรทำการอบไล่ความชื้นภายในช่องอบและผนังเตาที่ระดับอุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 30 – 60 นาที ก่อนการปฏิบัติงานทุกครั้ง

บรรณานุกรม

- ชัยวัฒน์ เจนวนิชย์. 2539. **หลักเคมี 1**. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.
- บัญญัติ ใจชื่น และสุวิทย์ แจ่มทวีกุล. 2527. **คู่มือโลหะวิทยา และการอบ**. สำนักพิมพ์ประกอบเมไตร์, กรุงเทพฯ.
- ประกอบ บุญยงค์. 2520. **โลหะวิทยา 1**. สำนักพิมพ์ประกอบเมไตร์, กรุงเทพฯ.
- ประเสริฐ เทียนนิมิตร และคณะ. 2539. **เทอร์โมไดนามิกส์**. บริษัทซีเอ็ดดูเคชั่น, กรุงเทพฯ.
- ปรีดา พิมพ์ขาวขำ. 2538. **วัตถุทนไฟ**. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- มนัส สติรจินดา. 2531. **วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก**. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- วีระพันธ์ สิทธิพงศ์. 2533. **โลหะวิทยากายภาพ 2**. สำนักพิมพ์นิยามวิทยา, กรุงเทพฯ.
- Charlie R. Brooks. 1979. **Heat Treatment of Ferrous Alloy**. Mc Graw – Hill Book Company, New York.
- George M. Enos. and William E. Fontaine. 1969. **Element of Heat Treatment**. John Willey & Sone. Inc, New York.
- Miton Ohring. 1995. **Engineering Material Science**. Academie Press. Inc, California.
- PRIMA tryck. 2000. **Kanthal Handbook**. Sweden.
- Robert Wilson. 1975. **Metallurgy and Heat Treatment of Tool Steels**. Mc Graw – Hill Book Company, New York.

ภาคผนวก



สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล

เกียรติบัตรฉบับนี้มอบไว้เพื่อแสดงว่า

นายสุชาติ เย็นวิเศษ

ได้เสนอผลงานวิจัย

เรื่อง เตาอบโลหะอุณหภูมิสูง

ในการประชุมสัมมนาทางวิชาการ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 18

"ราชมงคลวิชาการ'44"

ระหว่างวันที่ 14-18 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2544

ณ ศูนย์กลางสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล คลองหก จังหวัดปทุมธานี
ขอให้อำนาจอธิบดีฯ ประสงค์สำเร็จในหน้าที่การงานสืบไป

Q Usammak

รองศาสตราจารย์ ดร. อิศริย์ นรธราชอุไรเจน
ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

นายประพนธ์ กลิ่นจำปา
รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและฝึกอบรม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นำยุทธ สงค์ธนาพิทักษ์
อธิการบดีสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล



การประชุมสัมมนาทางวิชาการ “ราชมงคลวิชาการ” ครั้งที่ 18 “