รายงานการวิจัย

การออกแบบและสร้างเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทาน สำหรับหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียม

Design and Construction of an Electric Resistance Furnace for Melting Aluminum Alloys

620.16
ร196
2554

รอมฎอน บูระพา Romadorn Burapa
สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์ Surasit Rawangwong
จักรนรินทร์ ฉัตรทอง Jaknarin Chudtong
ซูไฮดี สนิ Zuhaidee Sani

สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
งบประมาณเงินรายได้ ประจำปี พ.ศ. 2554

การออกแบบและสร้างเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานสำหรับหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียม

รอมฎอน บูระพา[1] สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์[1] จักรนรินทร์ ฉัตรทอง[1] และ ซูไฮดี สนิ[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาออกแบบและสร้างเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานสำหรับการหลอมเศษโลหะผสมอะลูมิเนียม โดยในการออกแบบเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานนี้จะออกแบบเตาเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมมีขนาด 60 × 60 ตารางเซนติเมตร สูง 55 เซนติเมตร ใช้ขดลวดความต้านทานเป็นตัวกำเนิดความร้อน แรงดันไฟฟ้า 380 โวลต์ 3 เฟส มีกำลังไฟฟ้า 6.6 กิโลวัตต์ อุณหภูมิใช้งานสูงสุดไม่เกิน 1,000 องศาเซลเซียส ใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K เป็นตัวตรวจวัดอุณหภูมิภายในเตา ใช้อิฐฉนวนความร้อน เซรามิกกันความร้อนแบบผืนผ้าและเซรามิกกันความร้อนแบบแผ่น เป็นฉนวนป้องกันการสูญเสียความร้อน ผลที่ได้จากการทดสอบเตาพบว่ามีการสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตาอยู่ที่ 7,920 กิโลจูลต่อชั่วโมง หรือคิดเป็น 33.4 เปอร์เซ็นต์ ของความร้อนที่เข้าสู่เตา และประสิทธิภาพทางความร้อนของการหลอมอะลูมิเนียม มีค่าเท่ากับ 14.8 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการหลอมของเศษโลหะผสมอะลูมิเนียมด้วยเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานที่ได้สร้างขึ้น ทำให้ได้อะลูมิเนียมอินกอตที่มีน้ำหนักรวมคิดเป็น 94 เปอร์เซ็นต์ และมีขี้โลหะเกิดขึ้นคิดเป็น 5 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อชั่วโมงเท่ากับ 23,695 กิโลจูลต่อชั่วโมง คิดเป็นค่าไฟฟ้าในการหลอมต่อชั่วโมงจะมีค่าใช้จ่ายอยู่ที่ 23.5 บาทต่อชั่วโมง และเมื่อคิดเป็นต้นทุนค่าไฟฟ้าในการหลอมเศษโลหะผสมอะลูมิเนียมจะมีค่าเท่ากับ 9.4 บาทต่อกิโลกรัม

คำสำคัญ: เตาหลอม โลหะผสมอะลูมิเนียม วัสดุทนไฟ

[1] สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

Design and Construction of an Electric Resistance Furnace for Melting Aluminum Alloys

Romadorn Burapa[1] Surasit Rawangwong[1] Jaknarin Chudtong[1] and Zuhaidee Sani[1]

Abstract

The purpose of this research is to study the design and construction of an electric resistance furnace for melting aluminum alloy scrap. In designing this furnace is designed as a square shape with a dimension 60 centimeters in width, 60 centimeters in length, and 55 centimeters in height. The furnace is heated by a resistance coil, the voltage is 380 volts, 3 phases and their power is 6.6 kilowatts. The maximum service temperature of the furnace is 1,000 degree Celsius which is detected by a thermocouple. The heat loss of the furnace is protected by insulation brick, ceramic fiber blanket and ceramic fiber board. Results of the furnace tests showed that the heat loss through the walls of the furnace is 7,920 kilojoules per hour, representing 33.4 percent of the heat entering the furnace. And thermal efficiency of aluminum melting is equal to 14.8 percent. The yield of melting from the aluminum alloy scrap with an electric resistance furnace is created when the aluminum molten is poured into the casting mold has resulted in aluminum ingot at 94 percent by weight and slag formed at 5 percent by weight. The electric energy used per hour equal to 23,695 kilojoules per hour, representing the cost for electricity of melting will be charged at 23.5 baht per hour. And as a fixed cost for electricity of aluminum alloy scrap melting is equal to 9.4 baht per kilogram.

Keywords: Melting furnace, Aluminum alloys, Refractory materials.

[1] Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย งบประมาณเงินรายได้ ประจำปี พ.ศ. 2554 และขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้สถานที่โรงฝึกปฏิบัติงานสำหรับการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ และขอบคุณคณาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมอุตสาหการ และคณะผู้บริหารคณะวิศวกรรมศาสตร์ ทุกท่านที่ให้กำลังใจในการวิจัย จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

รอมฎอน บูระพา
สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์
จักรนรินทร์ ฉัตรทอง
ซูไฮดี สนิ
18 สิงหาคม 2554

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ซ
สารบัญภาพ	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎี และเอกสารที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับโลหะผสมอะลูมิเนียม	3
2.2 การหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียม	5
2.3 การปรับปรุงคุณภาพของน้ำอะลูมิเนียมด้วยฟลักซ์	7
2.4 เตาหลอมที่ใช้ในการหลอมโลหะ	8
2.5 การเลือกใช้เตาหลอม	10
2.6 วัสดุทนไฟ	11
2.7 เทอร์โมคัปเปิล	14
2.8 ลวดความต้านทาน	16
2.9 ทฤษฎีเกี่ยวกับการนำความร้อน	18
2.10 การตรวจวัดกำลังไฟฟ้า	23
2.11 ส่วนประกอบอัตราค่าไฟฟ้า	24
2.12 การคิดค่าไฟฟ้า	25
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	26

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินงาน	29
3.1 การคำนวณและการออกแบบเตาหลอม	29
3.2 การสร้างเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทาน	38
3.3 วัตถุดิบที่ใช้ในการทดสอบเตา	45
3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	46
3.5 วิธีการทดลอง	46
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์	48
4.1 ผลการทดลอง	48
4.2 ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการหลอม	55
4.3 การหาค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อชั่วโมง เพื่อวิเคราะห์หาต้นทุนในการหลอม	56
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	60
5.1 สรุปผลการทดลอง	60
5.2 ข้อเสนอแนะ	61
บรรณานุกรม	62
ภาคผนวก ก	64
ข้อมูลทางเทคนิคของเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทาน	
ภาคผนวก ข	66
ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณและการออกแบบสร้างเตาไฟฟ้าแบบขดลวด ความต้านทาน	
ภาคผนวก ค	69
ตารางแสดงผลการทดลองของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณผนังเตาหลอม ด้านต่างๆ	
ภาคผนวก ง	79
อัตราค่าไฟฟ้าประเภทที่ 6 หน่วยราชการ และองค์กรที่ไม่แสวงหากำไร	

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก จ 82
วงจรไฟฟ้าสำหรับเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทาน

ภาคผนวก ฉ 84
แบบเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทาน

ภาคผนวก ช 102
การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี 2554

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	สัญลักษณ์กลุ่มโลหะผสม Wrought Aluminum	4
2.2	สัญลักษณ์กลุ่มของอะลูมิเนียมหล่อผสม	4
3.1	รายการวัสดุและชิ้นส่วนมาตรฐาน	38
3.2	การประมาณค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการสร้างเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทาน	40
4.1	ผลการทดลองระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาที่ใช้ไปในการให้ความร้อน	48
4.2	ค่าปริมาณความร้อนที่เข้าสู่เตาและปริมาณความร้อนที่ใช้ในเตาหลอม	51
4.3	ผลการทดลองเตา เพื่อหาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณผนังเตาหลอมด้านต่างๆ	52
4.4	ปริมาณสัดส่วนของอะลูมิเนียมที่ได้จากการหลอม	55

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	เตาที่ใช้พลังงานความร้อนจากกระแสไฟฟ้า	10
2.2	อิฐทนไฟ	12
2.3	เบ้าหลอม	14
2.4	เทอร์โมคัปเปิล	15
2.5	ลวดความต้านทาน	17
2.6	การนำความร้อนผ่านผนังราบที่ค่าการนำความร้อนมีขนาดสม่ำเสมอ	19
2.7	การนำความร้อนแบบมิติเดียวผ่านผนังหลายชั้นและการเปรียบเทียบกับวงจรไฟฟ้า	20
2.8	การนำความร้อนผ่านรูปทรงกระบอกหลายชั้นตามแนวรัศมี	21
2.9	เครื่องวัดกระแสไฟฟ้า	23
3.1	เบ้าหลอมชนิดกราไฟต์ ยี่ห้อ มอร์แกน รุ่น A25	30
3.2	แบบของเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานที่ได้ทำการออกแบบไว้	31
3.3	ทิศทางการไหลของความร้อนผ่านผนังพื้นด้านล่างของเตา	33
3.4	ทิศทางการไหลของความร้อนผ่านผนังด้านข้างของเตา	35
3.5	ทิศทางการไหลของความร้อนผ่านฝาปิดด้านบนของเตา	36
3.6	พื้นเตาเลือกใช้อิฐฉนวนความร้อน เกรด C2	42
3.7	แผงขดลวดความต้านทานแบบสำเร็จรูปที่ใช้ให้ความร้อนภายในเตาหลอม	42
3.8	ฉนวนกันความร้อนบุผนังเลือกใช้เซรามิกกันความร้อนแบบผืนผ้า	43
3.9	ฉนวนกันความร้อนด้านบนของเตาเลือกใช้เซรามิกกันความร้อนแบบแผ่น	43
3.10	เทอร์โมคัปเปิลสำหรับตรวจวัดอุณหภูมิภายในเตา	44
3.11	ตู้ควบคุมอุณหภูมิและวงจรไฟฟ้าภายในตู้ควบคุมอุณหภูมิ	44
3.12	เตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานที่ดำเนินการสร้างและประกอบเสร็จแล้ว	45
3.13	เศษโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ใช้ในการหลอมเพื่อทดสอบเตา	45
4.1	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาหลอมกับเวลาที่ใช้ไปในการให้ความร้อน	50
4.2	การตั้งอุณหภูมิในการหลอมและอะลูมิเนียมหลอมเหลวที่ได้	51

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.3	การเปรียบเทียบอุณหภูมิผนังเตาหลอมที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิภายในเตา	54
4.4	อะลูมิเนียมอินกอตที่ได้จากการหลอมและหล่อของเศษโลหะผสมอะลูมิเนียม	55
4.5	เปรียบเทียบปริมาณสัดส่วนของอะลูมิเนียมที่ได้จากการหลอมเศษโลหะผสมอะลูมิเนียม 10 กิโลกรัม	56

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการวิจัย

ปัจจุบันผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมงานหลอมและหล่อโลหะประเภทอะลูมิเนียมผสมในประเทศไทยส่วนใหญ่ นิยมใช้เตาหลอมโลหะชนิดที่สร้างความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงน้ำมันหรือเตาน้ำมัน เนื่องจากมีต้นทุนการผลิตและการใช้งานต่ำกว่าเตาไฟฟ้า และอุณหภูมิของเตาที่ใช้หลอมโลหะเพียงพอต่อการใช้งานกับโลหะดังกล่าว แต่เนื่องจากผลเสียจากการใช้เตาน้ำมันเกิดขึ้นได้หลายกรณี ทำให้เกิดปัญหาจากการขาดประสิทธิภาพในกระบวนการหลอม ที่มีปัจจัยหลักมาจากการใช้เตาน้ำมัน กล่าวคือ การสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงในกระบวนการหลอมเนื่องจากการขาดเทคนิคที่เหมาะสมสำหรับการป้อนน้ำมันเชื้อเพลิงเข้าสู้ระบบการเผาไหม้ เกิดการเผาไหม้ที่ไม่เหมาะสมทำให้เกิดความร้อนสู่เตาหลอมที่ไม่สม่ำเสมอ การเกิดเขม่าควันที่เป็นปัญหาอย่างยิ่งต่อการควบคุมบรรยากาศในบริเวณโรงงานหลอมอะลูมิเนียมทำให้เกิดมลพิษทางอากาศและเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน เกิดการแตกของเบ้าหลอมโลหะบ่อยครั้ง เนื่องจากการมีละอองน้ำมันจากการเผาไหม้ไม่หมดไปเกาะบนเบ้าหลอม ทำให้เกิดความร้อนสูงสะสมในระหว่างการหลอมซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เบ้าหลอมแตก และหากการแตกของเบ้าหลอมเกิดขึ้นในระหว่างการใช้งาน ผลเสียหายอาจขยายจากการเกิดที่ผลิตภัณฑ์ไปสู่อันตรายที่เกิดกับพนักงานที่เป็นผู้ปฏิบัติงานได้

จากที่กล่าวมาแล้วนั้น การพัฒนาเตาหลอมโลหะชนิดที่สร้างความร้อนจากไฟฟ้าด้วยขดลวดความต้านทานจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจและเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมงานหลอมและหล่อโลหะประเภทอะลูมิเนียมผสมได้ เนื่องจากเตาหลอมโลหะชนิดที่สร้างความร้อนจากไฟฟ้าด้วยขดลวดความต้านทานมีการให้ความร้อนภายในเตาหลอมที่สม่ำเสมอ ช่วยลดมลพิษทางอากาศเนื่องจากไม่ทำให้เกิดเขม่าควันในระหว่างการหลอมโลหะ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการหลอม มีความสะดวก ง่ายต่อการปฏิบัติงานและมีความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานมากกว่าเตาหลอมโลหะชนิดที่สร้างความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงน้ำมัน

และจากเหตุผลดังกล่าวคณะผู้วิจัยจึงขอเสนอโครงการ การออกแบบและสร้างเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานสำหรับหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียม เพื่อใช้ประโยชน์ในการทำวิจัยและการเรียนการสอนในวิชาที่เกี่ยวกับงานหล่อโลหะ ได้แก่ วิชาวัสดุวิศวกรรม วิชาการฝึกพื้นฐานทางวิศวกรรม วิชากรรมวิธีการผลิต วิชาโลหะวิทยา และวิชาปฏิบัติการวิศวกรรมอุตสาหการ ตามความต้องการของสาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อีกทั้งยังเป็นประโยชน์ในงานอุตสาหกรรมหลอมหล่อโลหะต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1) เพื่อออกแบบและสร้างเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานสำหรับหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียม

2) เพื่อศึกษาสมรรถนะของเตาโดยพิจารณาถึงอัตราการให้ความร้อนต่อหน่วยเวลาที่ใช้ในการหลอมและทดลองหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียม

3) เพื่อศึกษาและประเมินค่าใช้จ่ายในการหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียมด้วยเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทาน

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

ทำการออกแบบและสร้างเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานสำหรับหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียมขนาดห้องปฏิบัติการ โดยใช้ขดลวดความต้านทานเป็นตัวกำเนิดความร้อน สามารถให้อุณหภูมิภายในเตาสูงสุดที่ 1,000°C มีการควบคุมอุณหภูมิภายในเตาด้วยเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ชนิด K เป็นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิภายในเตา สามารถหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียมที่บรรจุอยู่ภายในเบ้าหลอมที่ทำด้วยกราไฟต์ (Graphite Crucible) ได้ในปริมาณสูงสุดครั้งละ 10 กิโลกรัม ส่วนผนังของเตานั้นกำหนดให้ใช้วัสดุที่เป็นฉนวนกันความร้อน คือ อิฐทนความร้อนและเซรามิกส์ไฟเบอร์บุผนังของเตา เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการหลอม มีการทดสอบประสิทธิภาพของเตาและทดลองหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียม เพื่อประเมินถึงประสิทธิภาพและค่าใช้จ่ายในการหลอมโลหะดังกล่าวด้วยเตาที่ได้ทำการออกแบบและสร้างขึ้นมา

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) ได้เตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานที่มีประสิทธิภาพสำหรับหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียม และทำให้เกิดความคิดในการพัฒนาเตาหลอมโลหะให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นต่อไป

2) ได้เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมวัตถุดิบเบื้องต้นสำหรับงานวิจัยต่อไป

3) ได้อุปกรณ์ที่ใช้ในการเรียนการสอนและการทำปริญญานิพนธ์ของนักศึกษา

4) ได้แนวทางในการนำไปพัฒนาสู่ภาคการผลิตในระดับอุตสาหกรรมได้ในอนาคต

บทที่ 2
ทฤษฎี และเอกสารที่เกี่ยวข้อง

ในการออกแบบและสร้างเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานสำหรับการหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียม โดยเบื้องต้นจะต้องทราบถึงกระบวนการในการหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียม เพื่อมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบและสร้างเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทาน ซึ่งการออกแบบจะให้ความสำคัญในเรื่องความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานเป็นสำคัญ รวมทั้งคำนึงถึงปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปโดยใช้ต้นทุนวัสดุที่คุ้มค่า การบำรุงรักษาที่เหมาะสม และง่ายต่อการปฏิบัติงาน

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับโลหะผสมอะลูมิเนียม (Aluminum Alloys)

อะลูมิเนียมประกอบด้วยสมบัติต่างๆ มากมายที่เป็นประโยชน์ต่องานด้านวิศวกรรมเป็นอย่างมาก อะลูมิเนียมมีความหนาแน่นต่ำ (2.7 g/cm^3) จึงทำให้อะลูมิเนียมมีประโยชน์อย่างมากต่ออุตสาหกรรมทางด้านคมนาคม นอกจากนี้อะลูมิเนียมยังมีความทนทานต่อการกัดกร่อนในทุกสภาวะแวดล้อมได้ดี เนื่องจากที่ผิวของอะลูมิเนียมมักจะเกิดแผ่นฟิล์มของออกไซด์ขึ้น และแม้ว่าอะลูมิเนียมที่บริสุทธิ์จะมีความแข็งแรงต่ำ แต่มันสามารถทำให้มีความแข็งแรงสูงขึ้นได้โดยการเติมธาตุอัลลอยด์ตัวอื่นเข้าไป อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่ไม่มีพิษ ดังนั้นจึงมักถูกใช้เป็นภาชนะบรรจุอาหาร นอกจากนี้อะลูมิเนียมยังมีสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ดี จึงเหมาะสมกับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมไฟฟ้า จากการที่อะลูมิเนียมมีสมบัติต่าง ๆ มากมายเช่นนี้ และราคาถูก จึงทำให้อะลูมิเนียมเป็นวัสดุโลหะที่สำคัญอย่างมากต่ออุตสาหกรรม

2.1.1 การแยกประเภทของโลหะผสม Wrought Aluminum

โลหะผสมอะลูมิเนียมที่ถูกผลิตในรูป Wrought (เช่น Sheet, Plate, Extrusions, Rod และ Wire) จะถูกแยกประเภทตามธาตุอัลลอยด์หลักที่มีอยู่ การแยกประเภทนั้นจะใช้ระบบตัวเลข 4 ตัว ตามตารางที่ 2.1 ได้รวบรวมกลุ่มโลหะผสม Wrought Aluminum ต่าง ๆ

ตัวเลขหลักที่หนึ่งจะบอกถึงกลุ่มโลหะผสมที่ประกอบด้วยธาตุอัลลอยด์เฉพาะ และตัวเลข 2 ตัวหลังจะบอกถึงความบริสุทธิ์ของโลหะผสมอะลูมิเนียมนั้น

ส่วนตัวเลขหลักที่สองจะบอกถึงการปรับปรุงในโลหะผสมเดิม หรือปริมาณจำกัดของสิ่งเจือปน (William F. Smith และ Javad Hashemi, 2008)

ตารางที่ 2.1 สัญลักษณ์กลุ่มโลหะผสม Wrought Aluminum (William F. Smith และ Javad Hashemi, 2008)

สัญลักษณ์	ธาตุที่เป็นส่วนผสมหลักในอะลูมิเนียม
1XXX	อะลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์ ไม่น้อยกว่า 99.00%
2XXX	ทองแดง (Copper, Cu)
3XXX	แมงกานีส (Manganese, Mn)
4XXX	ซิลิกอน (Silicon, Si)
5XXX	แมกนีเซียม (Magnesium, Mg)
6XXX	แมกนีเซียม (Magnesium, Mg) และ ซิลิกอน (Silicon, Si)
7XXX	สังกะสี (Zinc, Zn)
8XXX	ธาตุอื่นๆ (Other element)

2.1.2 การแยกประเภทของอะลูมิเนียมหล่อผสม (Aluminum Casting Alloy)

สามารถจำแนกกลุ่มของอะลูมิเนียมหล่อผสมตามมาตรฐานของ ASTM (American Society of Metals) ซึ่งเป็นการจำแนกตามระบบตัวเลข 4 หลัก ตามตารางที่ 2.2 ดังนี้

ตารางที่ 2.2 สัญลักษณ์กลุ่มของอะลูมิเนียมหล่อผสม (William F. Smith และ Javad Hashemi, 2008)

สัญลักษณ์	ธาตุที่เป็นส่วนผสมหลักในอะลูมิเนียม
1XX.X	อะลูมิเนียม ที่มีความบริสุทธิ์ ไม่น้อยกว่า 99.00%
2XX.X	ทองแดง (Copper, Cu)
3XX.X	ซิลิกอน (Silicon, Si) ร่วมกับการเติมทองแดง (Copper, Cu) และหรือ แมกนีเซียม (Magnesium, Mg)
4XX.X	ซิลิกอน (Silicon, Si)
5XX.X	แมกนีเซียม (Magnesium, Mg)
6XX.X	ยังไม่มีใช้ (Unused Series)
7XX.X	สังกะสี (Zinc, Zn)
8XX.X	ดีบุก (Tin, Sn)
9XX.X	ธาตุอื่นๆ (Other Element)

1) ตัวเลขตัวที่หนึ่ง เป็นสัญลักษณ์แสดงกลุ่มธาตุที่ผสม ธาตุหนึ่งเป็นหลัก เช่น 2XX.X เป็นกลุ่มธาตุผสมของอะลูมิเนียมที่มีทองแดงเป็นธาตุผสมหลัก เป็นต้น

2) ตัวเลขตัวที่สองและสาม เป็นสัญลักษณ์แสดงอะลูมิเนียมผสม ที่มีธาตุผสมชนิดอื่นผสมเข้าไป หรือแสดงอะลูมิเนียมบริสุทธิ์

3) ตัวเลขตัวที่สี่ เป็นสัญลักษณ์ซึ่งเป็นการแบ่งตามการผลิตอย่างอื่น โดยจะใช้จุดทศนิยมแสดงการผลิต เป็นต้น เช่น การหล่อ หรือ จากแท่งอินกอต การปรับปรุงจากธาตุผสมเดิม หรือ จำนวนสิ่งที่ปนเข้าไป อย่างไรก็ตามอะลูมิเนียมหล่อผสมทั่วไปจะใช้ตัวเลข 3 หลัก

2.2 การหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียม (Al-Alloy Melting)

การที่จะผลิตชิ้นงานโลหะหล่อขึ้นรูปให้มีคุณภาพดีได้นั้น จำเป็นจะต้องควบคุมตัวแปรสำคัญหลักสองอย่างคือ ควบคุมการหลอมและสภาพของแบบหล่อโลหะ ทั้งนี้เพื่อให้ได้น้ำโลหะที่ถูกต้องทั้งส่วนผสมเคมีและอุณหภูมิน้ำโลหะ ในขณะที่การควบคุมสภาพของแบบหล่อ ได้แก่ วัสดุแบบหล่อ การออกแบบระบบจ่ายน้ำโลหะ ทั้งรูเทและรูล้นจะต้องเหมาะสมและมีปริมาณน้ำโลหะเพียงพอที่จะป้อนชดเชยการหดตัวของน้ำโลหะที่เกิดขึ้นในระหว่างขั้นตอนการแข็งตัวของน้ำโลหะ

การหลอมโลหะไม่ใช่เป็นเพียงการให้ความร้อนกับก้อนโลหะเพื่อทำให้โลหะหลอมละลายเท่านั้น การหลอมจะมีผลกระทบต่อความสมบูรณ์ของเนื้อโลหะหลังการแข็งตัว ความแข็งแรงของเนื้อก้อนโลหะของชิ้นงานโลหะหล่อหลังการแข็งตัว สิ่งแรกที่มีความสำคัญมากสำหรับการหลอมโลหะคือ การมีอุปกรณ์และเครื่องมือในการหลอมที่ดี ใช้เทคนิคการหลอมที่ถูกต้อง องค์ประกอบทั้งสองนี้จะมีผลทำให้ชิ้นงานที่ได้มีความสมบูรณ์ในทุกด้านเมื่อเปรียบกับโลหะที่นำมาใช้เป็นวัสดุเริ่มต้นการหลอม

2.2.1 ปัญหาและองค์ประกอบในการหลอมอะลูมิเนียม

1) โดยทั่วๆ ไปอะลูมิเนียมจะไม่แสดงพฤติกรรมที่ดีในการหลอมทุกๆสภาวะ แต่อะลูมิเนียมแสดงพฤติกรรมที่ทำปฏิกิริยาเคมีได้ง่ายมากในขณะหลอมละลาย พฤติกรรมดังกล่าวจำเป็นจะต้องถูกควบคุมอย่างใกล้ชิดเพื่อให้ได้เนื้อโลหะชิ้นงานหลังการแข็งตัวที่ดี

2) ที่ระดับอุณหภูมิสูงๆ อะลูมิเนียมจะสามารถจับตัวกับออกซิเจน กลายเป็นสารประกอบออกไซด์ได้รวดเร็วมาก เมื่ออะลูมิเนียมหลอมละลาย ปริมาณออกไซด์จะเพิ่มมากขึ้นตามระดับอุณหภูมิที่สูงขึ้น รวมทั้งระยะเวลาที่น้ำโลหะอยู่ที่อุณหภูมิสูงมากๆเป็นระยะเวลาที่ยาวนานมากยิ่งขึ้นนอกจากนี้การที่ความถ่วงจำเพาะของน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมออกไซด์มีค่าใกล้เคียงกัน เป็นเหตุให้อะลูมิเนียมออกไซด์สามารถแขวนลอยในน้ำโลหะและติดปนกับน้ำโลหะเข้าสู่โพรงแบบหล่อได้โดยง่าย ดังนั้นการหลอมอะลูมิเนียมทั้งบริสุทธิ์และผสมจึงควร

หลีกเลี่ยงการกวนน้ำโลหะและการปล่อยทิ้งให้น้ำโลหะอยู่ที่ระดับอุณหภูมิหลอมละลายเป็นระยะเวลายาวนานเกินความจำเป็น

3) ปัญหาอื่นๆ ที่สำคัญในการหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียม คือ การที่น้ำโลหะอะลูมิเนียมทั้งบริสุทธิ์และโลหะผสมสามารถที่จะละลายก๊าซต่างๆ ที่รวมกันอยู่ในบรรยากาศเหนือโลหะได้ง่ายมากและละลายได้ในปริมาณมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งไฮโดรเจนที่ละลายปนในน้ำโลหะจะมีผลทำให้เกิดปัญหากับเนื้อโลหะได้มากทั้งในระหว่างการแข็งตัวและหลังการแข็งตัวของน้ำโลหะ ดังนั้นการหลอมโลหะอะลูมิเนียมผสมที่ใช้เปลวไฟให้ความร้อนกับก้อนโลหะและน้ำโลหะโดยตรง จะมีโอกาสเสี่ยงต่อการละลายของก๊าซเป็นอย่างมาก ทั้งนี้เพราะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจะให้ไอน้ำที่เป็นผลพลอยได้จากการเผาไหม้ น้ำโลหะจะทำปฏิกิริยากับไอน้ำทำให้ไฮโดรเจนแยกตัวออกจากไอน้ำและละลายปะปนในน้ำโลหะ (สุภชัย ประเสริฐสกุล, 2548)

2.2.2 การหลอมอะลูมิเนียมในงานหล่อโลหะ

อะลูมิเนียมผสมในงานหล่อโลหะโดยมากจะมี Cu, Si, Mg, และ Zn เป็นองค์ประกอบเคมีหลัก ซึ่งหลังจากการอุ่นผนังเตาที่กรุใหม่และเบ้าหลอมอย่างช้าๆ จนร้อนแดงแล้ว เตาหลอมโลหะดังกล่าวพร้อมที่จะทำการบรรจุโลหะที่ต้องการหลอม ในทางปฏิบัติช่วงเริ่มต้นการหลอมสามารถที่จะบรรจุเตาด้วยโลหะที่ไม่ได้ผ่านการเพิ่มอุณหภูมิเลยลงในเตาการหลอมด้วย Crucible Furnace โลหะที่บรรจุลงในเบ้าไม่ควรจะเบียดกันจนแน่น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อโลหะได้รับความร้อนจะเกิดการขยายตัว ซึ่งอาจจะทำให้ตัวเบ้าหลอมเกิดการแตกร้าวได้ นอกจากนี้โลหะที่เบียดอัดกันแน่นในบริเวณส่วนบนของเบ้าจะเลื่อนลงสู่ก้นเบ้า (Bridging) ทำให้น้ำโลหะที่ก้นเบ้ามีระดับอุณหภูมิสูงเกินควร หลังจากที่โลหะเริ่มหลอมละลายและมีน้ำโลหะรวมกันที่ก้นเบ้าแล้ว จะบรรจุโลหะลงในเบ้าเพิ่มขึ้นโดยปล่อยแท่งโลหะให้ค้างบนก้อนโลหะที่ยังไม่หลอมละลาย ทำให้โลหะที่บรรจุลงไปใหม่ถูกอุ่นให้ร้อน ก่อนที่จะจมลงในน้ำโลหะในเบ้า การอุ่นโลหะจัดเป็นสิ่งจำเป็นมาก ทั้งนี้เพราะความร้อนจะทำให้ทั้งไอน้ำและก๊าซที่ละลายปนหรือเกาะติดที่ผิวโลหะหนีออกไป นอกจากนี้การอุ่นโลหะยังทำให้คราบน้ำมันและความชื้นที่เกาะติดผิวโลหะสลายตัวหนีออกไป สารปนเปื้อนเหล่านี้จะเป็นแหล่งกำเนิดของก๊าซไฮโดรเจนที่มีผลทำให้เกิดตำหนิงานหล่อในขณะเกิดการแข็งตัวของน้ำโลหะได้ง่าย (สุภชัย ประเสริฐสกุล, 2548)

2.2.3 ผลกระทบอุณหภูมิหลอมและระยะเวลาหลอมแช่

ในระหว่างการเตรียมน้ำโลหะสำหรับงานหล่อ สิ่งที่ผู้ปฏิบัติพึงจะต้องระวังไว้เสมอคือจะต้องหลีกเลี่ยงการหลอมน้ำโลหะที่ระดับอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิหลอมละลายมาก พร้อมทั้งหลีกเลี่ยงการปล่อยแช่น้ำโลหะที่ระดับอุณหภูมิดังกล่าวเป็นระยะเวลายาวนานเกินความจำเป็น การออกแบบระบบจ่ายน้ำโลหะในโพรงแบบหล่อควรจะออกแบบ เพื่อให้สามารถเทน้ำโลหะด้วย

อุณหภูมิเทที่ต่ำที่สุดที่เพียงพอจะทำให้ น้ำโลหะไหลเต็มโพรงแบบหล่อได้เท่านั้น สิ่งเหล่านี้จัดเป็นสิ่งสำคัญมากในงานหล่อโลหะ ทั้งนี้เพราะการหลอมโลหะที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิหลอมละลายมาก ๆ เป็นระยะเวลายาวนานมาก ๆ จะทำให้เนื้อโลหะชิ้นงานที่ได้มีเกรนหยาบ เนื้อโลหะจะมีคุณสมบัติทางกลต่ำมาก นอกจากนี้การหลอมโลหะที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน ๆ จะมีผลทำให้น้ำโลหะละลายก๊าซชนิดต่าง ๆ ที่อยู่ในบรรยากาศเหนือน้ำโลหะในปริมาณมากขึ้น ซึ่งจะทำให้มีปัญหาตำหนิชิ้นงานหล่อที่เกิดจากก๊าซได้ง่ายขึ้น ในการหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียมอุณหภูมิของน้ำโลหะไม่ควรสูงเกินกว่า 760 องศาเซลเซียส ยกเว้นกรณีที่ชิ้นงานบางมากๆ หรือเทลงในแบบหล่อที่เป็นโลหะที่ต้องการอุณหภูมิ Superheat ที่ระดับสูงมาก ๆ จึงจะไหลเต็มโพรงแบบได้ อีกสิ่งหนึ่งที่ผู้ปฏิบัติควรจะต้องระลึกไว้คือหลังจากการที่ก้อนอะลูมิเนียมหลอมละลายหมดแล้ว อุณหภูมิของน้ำโลหะจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งทำให้เกิดอันตรายต่อน้ำโลหะได้ง่าย การใช้เตาหลอมที่มีอุปกรณ์ควบคุมที่ดีจะทำให้สามารถป้องกัน Superheat หรือ Overheat ที่จะเกิดขึ้นได้เป็นอย่างดี

2.2.4 สิ่งสกปรกที่เจือปนเข้าไปในน้ำโลหะอะลูมิเนียม (Inclusion)

สิ่งสกปรกที่เจือปนเข้าไปในน้ำโลหะอะลูมิเนียม ส่วนมากแล้วจะเป็นแผ่นฟิล์มอะลูมิเนียม เศษวัสดุทนไฟจากผนังเตาหลอมหรือเตาหลอม และสิ่งสกปรกที่ไม่ใช่โลหะปะปนเข้าไปในน้ำโลหะ ซึ่งสิ่งสกปรกเหล่านี้จะทำให้ความสามารถในการไหลตัวของน้ำโลหะอะลูมิเนียมลดลงและยังทำให้คุณภาพของชิ้นงานหล่อโลหะมีคุณสมบัติเชิงกลที่ลดลงอีกด้วย วิธีการป้องกันสามารถทำได้โดย จะต้องทำการดูแลรักษาความสะอาดในเตาหลอมหรือเตาหล่อที่บรรจุน้ำโลหะอะลูมิเนียมไว้อยู่เสมอ หลีกเลี่ยงการป้อนน้ำโลหะหรือการเติมน้ำโลหะไม่ให้มีการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Metal Transfers) ใช้ตัวกรอง (Filter) ในการดักสิ่งสกปรกก่อนน้ำโลหะอะลูมิเนียมจะไหลเข้าสู่แบบหล่อ หลีกเลี่ยงการหลอมน้ำโลหะอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิสูงเกินไป และอาจจะทำการใช้ฟลักซ์ (Flux) ในการกำจัดสิ่งสกปรกที่ปะปนอยู่ในน้ำโลหะอะลูมิเนียม (ธนากรณ์ ตั้งวานิชกพงษ์, 2549)

2.3 การปรับปรุงคุณภาพของน้ำอะลูมิเนียมด้วยฟลักซ์

การปรับปรุงคุณภาพของน้ำอะลูมิเนียมด้วยฟลักซ์ (Treatment with Cover and Cleaning Fluxes) ได้ถูกนำมาใช้ในกระบวนการหลอมโลหะอะลูเนียม ซึ่งฟลักซ์เป็นสารเคมีที่นำมาผสมกันเพื่อวัตถุประสงค์ในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำอะลูมิเนียมให้ดีขึ้น ในปัจจุบันฟลักซ์มากกว่า 150 ชนิดที่ใช้ในอุตสาหกรรมการหลอมโลหะอะลูมิเนียมซึ่งแต่ละชนิดจะมีส่วนผสมทางเคมีที่แตกต่างกันออกไป และผู้ผลิตแต่ละรายก็จะมีการใช้วัตถุดิบที่แตกต่างกันออกไปแต่โดยส่วนใหญ่แล้วส่วนผสมทางเคมีของฟลักซ์จะมีโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และโพรแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) เป็น

หลัก แล้วจะมีการเติมเกลือหรือสารเคมีชนิดอื่นลงไปอีกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของฟลักซ์หรือเพื่อวัตถุประสงค์ทางเทคนิคอื่น ๆ ซึ่งได้แก่ CaF_2, NaF, AlF_3, $AlCl_4$, $NaAlCl_4$, $KAlCl_4$, K_4AlF_6 เป็นต้น ฟลักซ์ส่วนมากในท้องตลาดจะมีการผสมอยู่ในรูปแบบของ NaCl-KCl-$AlCl_4$-NaF-KF-AlF_3 แต่ในปัจจุบันได้มีการวิเคราะห์และทำการทดลองปรับปรุงประสิทธิภาพของฟลักซ์ให้สามารถใช้งานได้หลากหลายมากขึ้น แต่ละโรงงานก็อาจจะมีสูตรของฟลักซ์ซึ่งคิดค้นและพัฒนาขึ้นมาเองตามวัตถุประสงค์ของการใช้งานและในปัจจุบันทางผู้ใช้งานก็สามารถที่จะให้ผู้ผลิตฟลักซ์ทำการผลิตตามสูตรที่ผู้ใช้งานให้ไปได้อีกด้วย ซึ่งฟลักซ์ตัวเดียวอาจทำหน้าที่ได้หลายอย่าง เช่น ทำหน้าที่ทั้งทำความสะอาดน้ำอะลูมิเนียมและทำหน้าที่ในการแยกน้ำอะลูมิเนียมออกจากดรอสได้ในขณะเดียวกัน

ฟลักซ์ทำความสะอาดน้ำอะลูมิเนียม (Cleaning Fluxes) ถูกออกแบบมาเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่เจือปนอยู่ในน้ำอะลูมิเนียม เช่นอะลูมิเนียมออกไซด์ โดยฟลักซ์ทำความสะอาดน้ำอะลูมิเนียมนี้จะมีส่วนผสมของโซเดียมฟลูออโรซิลิเกต (Na_2SiF_6) ซึ่งทำหน้าที่กำจัดอะลูมิเนียมออกไซด์ให้แยกตัวออกจากน้ำอะลูมิเนียมได้

อย่างไรก็ตามการเกิดปฏิกิริยาทำความสะอาดนั้นจะขึ้นอยู่กับพลังงานพื้นที่ผิวของน้ำอะลูมิเนียม (Surface Energy) โซเดียมฟลูออโรซิลิเกตจะไปเคลือบตรงบริเวณที่สัมผัสกันของอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) กับน้ำอะลูมิเนียมที่ไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ซึ่งจะอยู่ตรงกลางของอะลูมิเนียมออกไซด์ ทำให้อะลูมิเนียมออกไซด์หลุดออกจากน้ำอะลูมิเนียมที่ไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเนื่องจากกลไกการทำปฏิกิริยาของฟลักซ์ และลอยขึ้นมาที่ผิวหน้าของน้ำอะลูมิเนียม (ธนากรณ์ ตั้งวานิชกพงษ์, 2548)

2.4 เตาหลอมที่ใช้ในการหลอมโลหะ

เตาหลอมที่ใช้ในการหลอมโลหะนอกกลุ่มเหล็กที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมแบ่งออกได้ 3 ลักษณะ ดังนี้

2.4.1 เตาที่เปลวไฟสัมผัสโดยตรงกับโลหะ (Direct Fuel Fire Furnace)

เป็นเตาที่เปลวไฟจากการสันดาปสัมผัสโดยตรงกับโลหะในอ่างหลอม (Melting Bath) มีการสูญเสียของธาตุผสมประมาณ 5 ถึง 25 เปอร์เซ็นต์ ตัวอย่างคือ เตานอน (Reverberatory Furnace) ใช้หลอมโลหะในปริมาณมากส่งถ่ายพลังงานความร้อนโดยการพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน มีการแบ่งส่วนของเตาออกเป็น 3 ส่วนประกอบด้วย ส่วนที่ใช้ในการอุ่นเศษโลหะร้อน (Preheat Zone) ส่วนหลอมละลายโลหะ (Melting Zone) ส่วนควบคุมอุณหภูมิเทน้ำโลหะ (Holding Zone or Superheat Zone)

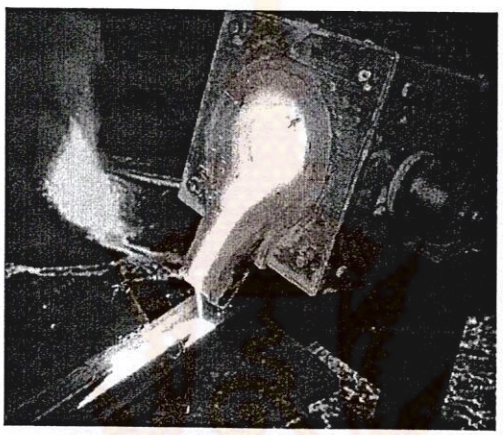
2.4.2 เตาที่เปลวไฟไม่สัมผัสโดยตรงกับโลหะ (Indirect Fuel Fire Furnace)

เป็นเตาที่มีภาชนะรูปทรงกระบอกสูง (Crucible) รูปร่างคล้ายกระทะ (Hearth) รูปร่างทรงกระบอกสูง (Shaft) เพื่อใช้บรรจุน้ำโลหะป้องกันก๊าซสันดาปสัมผัสโดยตรงกับน้ำโลหะที่หลอมเหลว เตาเบ้าแบบนี้สามารถใช้เชื้อเพลิงจากการสันดาปจากถ่านโค๊ก น้ำมัน และก๊าซเชื้อเพลิง สามารถติดตั้งหัวเผาแบบอัตโนมัติ (Automatic Burner) ที่สามารถควบคุมอัตราส่วนการเผาไหม้และควบคุมอุณหภูมิได้ตามที่ต้องการ หัวเผาสามารถปิด - เปิดด้วยระบบอัตโนมัติซึ่งทำให้ประหยัดพลังงานได้ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ เตาเบ้าแบบนี้มีการสูญเสียของธาตุผสมประมาณ 1 ถึง 2 เปอร์เซ็นต์ เบ้าหลอมทำจากวัสดุทนความร้อนต้องมีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง ส่งถ่ายความร้อนดี ทำจากวัสดุกราไฟต์ใช้กับเตาเกลือในงานอบชุบโลหะด้วยความร้อน ทำจากวัสดุดินทนไฟผสมกับกราไฟต์และวัสดุคาร์บอนผสมซิลิคอนคาร์ไบด์ ใช้กับการหลอมอะลูมิเนียมและทองแดงผสม และเบ้าโลหะที่ทำจากวัสดุเหล็กหล่อเหนียวเคลือบผิวด้วยวัสดุทนไฟใช้กับการหลอมโลหะแมกนีเซียมผสม แต่ต้องระวังการปนเปื้อนออกไซด์และเหล็กในน้ำโลหะ เตาเบ้าแบบนี้แบ่งออกได้ 5 ชนิด ประกอบด้วย เตาเบ้าแบบยกเบ้าหลอมได้ (Lift - Out Furnace) เตาเบ้าแบบยกเบ้าหลอมไม่ได้ (Bate - Out Furnace) เตาเบ้าแบบเอียงเทน้ำโลหะได้ (Tilting Furnace) เตาเบ้าแบบถ่ายความร้อน (Immersed Crucible Furnace) เตาเบ้าแบบหมุน (Rotary Crucible Furnace) การสร้างเตาเบ้าหลอมโลหะสำหรับงานหล่อด้วยแม่พิมพ์ (Die Casting) งานหล่อด้วยแบบหล่อถาวร (Permanent Mold) งานหล่อด้วยแบบทราย (Sand Casting) โดยการออกแบบสร้างพัดลมเป่าอากาศ (Combustion Blower) และหัวเผาอยู่ในชุดเดียวกัน มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันไฟย้อนกลับ (Flame Safety) อุปกรณ์จุดไฟอัตโนมัติ (Spark Ignition) และอุปกรณ์ควบคุมการจ่ายเชื้อเพลิงอัตโนมัติ (FM Approved Main Gas Valve) มีกลไกการยกฝาปิดเตาด้วยระบบใช้แรงดันอากาศ (Pneumatic) มีการออกแบบผนังวัสดุทนไฟ 4 ชั้น ใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ (Neutral Gas) หรือก๊าซโพรเพน (Propane Gas)

2.4.3 เตาที่ใช้พลังงานความร้อนจากกระแสไฟฟ้า (Electric Furnace)

เป็นเตาที่ใช้พลังงานความร้อนจากกระแสไฟฟ้า แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ประกอบด้วย – เตาแบบความต้านทานด้วยกระแสไฟฟ้า (Electric Resistance Furnace) ที่มีการออกแบบขดลวดความร้อนทำจากซิลิคอนคาร์ไบด์ซึ่งให้อุณหภูมิได้สูงถึง 1,600 องศาเซลเซียส และขดลวดทำจากโมลิบดินั่มไดซิลิไซด์ ($MoSi_2$) ให้อุณหภูมิได้สูงประมาณ 1,700 ถึง 1,900 องศาเซลเซียส และเตาแบบเหนี่ยวนำด้วยกระแสไฟฟ้า (Induction Furnace) ดังแสดงในภาพที่ 2.1 ที่แบ่งออกได้เป็นแบบมีแกนเหนี่ยวนำ (Core Induction Furnace) และแบบไม่มีแกนเหนี่ยวนำ (Coreless Induction Furnace) ซึ่งจะสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภท คือ เตาความถี่ต่ำ (Low Frequency) ใช้ความถี่อยู่ที่

50 เฮริทซ์ เตาความถี่ปานกลาง (Medium Frequency) ใช้ความถี่ 150 ถึง 500 เฮริทซ์ เตาความถี่สูง (High Frequency) ใช้ความถี่ 100 ถึง 10,000 เฮริทซ์ การออกแบบและสร้างเตาหลอมแบบ Induction Skull Melting (ISM) ใช้สำหรับหลอมโลหะไทเทเนียมและเซอร์โคเนียมที่ต้องการความบริสุทธิ์สูงด้วยเบ้าหลอมโลหะทองแดงที่มีระบบน้ำหล่อเย็นอยู่ในผนังเบ้า ภายใต้ภาวะสุญญากาศหรือบรรยากาศที่ควบคุมด้วยก๊าซเฉื่อยด้วยขดลวดเหนี่ยวนำไม่มีการใช้วัสดุทนไฟบุผนังเบ้าหลอม จึงไม่มีการปนเปื้อนในโลหะหลอม (สุรพล ชูสวัสดิ์, 2546)



ภาพที่ 2.1 เตาที่ใช้พลังงานความร้อนจากกระแสไฟฟ้า
ที่มา: Pan Drive Co., LTD. (2552)

2.5 การเลือกใช้เตาหลอม

การเลือกเตาหลอมโลหะที่ใช้ในการหลอมโลหะนอกกลุ่มเหล็ก มีข้อพิจารณา คือ การนำไปใช้งานจำนวนโลหะผสม ผลผลิตประจำวันของโลหะผสมแต่ละชนิด ปริมาณงานหล่อที่ใหญ่ที่สุดความต่อเนื่องในการป้อนน้ำโลหะ ขนาดของเตาหลอม และการเลือกเชื้อเพลิงที่ให้พลังงานความร้อนกับเตาหลอม การเลือกเตาหลอม (Melting Furnace) เตาที่ใช้หลอมอะลูมิเนียมมีหลายแบบ ขึ้นอยู่กับปริมาณของโลหะอะลูมิเนียม เช่น เตาแบบ Crucible, เตากระทะ (Reverberatory) และเตาไฟฟ้า (Electric Furnace)

ถ้าเป็นเตาแบบใช้ถ่านหรือน้ำมันเป็นเชื้อเพลิง ควรจะเป็นลักษณะที่เปลวความร้อนไม่สัมผัสกับโลหะ (Indirect Fired Furnace) เพราะเปลวไฟจะมีไอน้ำปนอยู่ด้วย จะทำให้ไอน้ำแยกตัวเมื่อสัมผัสกับอะลูมิเนียม ได้แก๊สไฮโดรเจนกับออกซิเจน และเนื่องจากอะลูมิเนียมสามารถละลายแก๊สไฮโดรเจนได้ดี และกลายเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ได้ง่ายเมื่อสัมผัสกับออกซิเจน ดังนั้นในขั้นตอนนี้จะต้องป้องกันแก๊สทั้งสองให้มากที่สุด

สำหรับเตาไฟฟ้า ถ้าเป็นแบบกระแสเหนี่ยวนำ (Induction) ไม่ว่าจะเป็นประเภทความถี่ต่ำหรือความถี่สูง จะมีผลทำให้เกิดการกวน (Stirring Effect) ในน้ำโลหะที่กำลังหลอมเหลว ทำให้มีโอกาสละลายแก๊สในอากาศได้มาก

เตาหลอมไฟฟ้าที่ดีที่สุดควรจะเป็นแบบใช้ลวดความต้านทาน (Resistance) เนื่องจากสามารถควบคุมได้ง่ายทั้งการละลายแก๊ส และการเกิดอะลูมิเนียมออกไซด์ เพราะไม่เกิดการกวนน้ำโลหะ

ในการหลอมโลหะจะประกอบด้วยขั้นตอนในการถ่ายเทความร้อนดังนี้

ก) การถ่ายเทความร้อนภายในเตาไปยังพื้นผิวของโลหะ จากการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนซึ่งเกิดจากการเผาไหม้

ข) การถ่ายเทความร้อนภายในชิ้นโลหะโดยการนำความร้อนจากบริเวณพื้นผิวเข้าไปภายในซึ่งจะขึ้นอยู่กับการนำความร้อนและค่าความจุความร้อนของโลหะชนิดนั้นๆ และแสดงโดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

เวลาที่ใช้ในการหลอมขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธ์การถ่ายเทความร้อน ขนาด และรูปร่างของชิ้นงานในการที่จะทำให้อุณหภูมิที่แกนกลางถึงจุดหลอมเหลว

การหลอมโลหะอะลูมิเนียมผสมขึ้นอยู่กับคุณภาพของน้ำโลหะ และจำนวนปริมาตรของอะลูมิเนียมที่จะหลอม มีเตาที่ใช้ในอุตสาหกรรมอยู่ 5 ประเภท คือ เตาเบ้าที่ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง โดยใช้เบ้ากราไฟต์หรือเซรามิกชนิดยกเทออกใช้สำหรับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก เตากะทะโดยใช้เหล็กหล่อหรือเหล็กกล้าพิเศษเป็นเบ้าใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง ใช้สำหรับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก เตานอนแบบสะท้อนความร้อนมีทั้งตั้งอยู่กับที่ และเอียงเทได้ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง ใช้สำหรับงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ และขนาดกลาง เตาไฟฟ้าที่ใช้มี 2 ประเภท คือ แบบใช้ความต้านทานด้วยไฟฟ้าเป็นเตาที่ดีที่สุดในการหลอมอะลูมิเนียม เพราะง่ายต่อการควบคุมการละลายก๊าซ และขี้โลหะ ส่วนเตาแบบเหนี่ยวนำด้วยไฟฟ้าแบบช่อง (Channel) จะทำให้เกิดการกวนน้ำโลหะทำให้เกิดการละลายก๊าซในน้ำโลหะ ใช้สำหรับอุตสาหกรรมขนาดกลาง

2.6 วัสดุทนไฟ (Refractory Materials)

วัสดุทนไฟเป็นวัสดุพวกอโลหะที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูงโดยไม่เกิดการหลอมเหลวเสียรูปทรงขณะใช้งานมีความแข็งแรงสามารถต้านทานหรือทนทานต่อการใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิสูง สมบัติที่สำคัญของวัสดุทนไฟสำหรับงานหลอมโลหะคือ มีความแข็งแรงและทนทานต่อความร้อนได้สูง ทนการขัดสีจากลม ฝุ่น หรือวัสดุต่างๆ ได้ดีที่อุณหภูมิสูง มีความแข็งแรง ไม่แตกหักง่ายจากน้ำหนักและแรงกระแทกที่อุณหภูมิสูง ทนต่อการกัดกร่อนจากปฏิกิริยาของสารเคมีที่อุณหภูมิสูง การ

กำหนดหลักการทดสอบวัสดุทนไฟที่ใช้ทำผนังเตาหลอมตามมาตรฐาน อังกฤษ ยุโรป และอเมริกา โดยการทดสอบความทนทานต่อการคืบ (Creep) ภายใต้แรงกดอัดที่อุณหภูมิ 1,750 องศาเซลเซียส โดยกำหนดขนาดชิ้นงานให้มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ความยาว 50 ถึง 75 มิลลิเมตร การทดสอบหาค่าโมดูลัสการแตกหัก (Modulus of Rupture) ภายใต้บรรยากาศปกติและบรรยากาศก๊าซเฉื่อย โดยกำหนดขนาดของชิ้นงาน 25 x 25 x 230 มิลลิเมตร สำหรับชิ้นงานขนาดใหญ่ กรณีชิ้นงานขนาดเล็กขนาด 5 ถึง 8 x 8 ถึง 10 x 50 ถึง 70 มิลลิเมตร การทดสอบการขยายตัวเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจะวัดอัตราการขยายตัวตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 1,600 องศาเซลเซียส วัสดุทนไฟที่ใช้เป็นส่วนประกอบของเตาหลอมจะพิจารณาสมบัติจากส่วนผสมทางเคมีอัตราการขยายตัวและหดตัว การนำความร้อนและรูปร่างลักษณะของวัสดุทนไฟ เช่น เป็นแท่งหน้าตัดรูปทรง (Prefabricated Shapes) เป็นฉนวนไฟเบอร์แผ่นม้วน (Blanket) ทำจากวัสดุอะลูมิเนียมซิลิเกตไฟเบอร์เป็นผงใช้ผสมกับวัสดุอื่น (Mortar) เป็นส่วนผสมข้นเหนียว (Plastic Mixes and Ramming Mill) และเป็นสารเคลือบ (Coating) การแบ่งวัสดุทนไฟตามสมบัติของสารประกอบ ได้แก่ วัสดุทนไฟประเภทกรด (Acid Refractory) วัสดุทนไฟประเภทด่าง (Basic Refractory) และวัสดุทนไฟประเภทกลาง (Neutral Refractory) (สุรพล ชูสวัสดิ์, 2546)

2.6.1 อิฐทนไฟ (Refractory Brick)

อิฐทนไฟคือ อิฐที่ใช้ก่อหรือบุผนังเตาภายในโครงสร้างเตาหลอมโลหะซึ่งอิฐทนไฟสำเร็จรูปจะมีรูปร่าง และขนาดมาตรฐานต่าง ๆ กันไว้เลือกใช้งานตามความเหมาะสม ดังแสดงในภาพที่ 2.2 ส่วนผสมทางเคมีของอิฐทนไฟจะมีผลต่ออุณหภูมิการใช้งานสูงสุด ตั้งแต่อุณหภูมิ 870 ถึง 1820 องศาเซลเซียส ส่วนผสมและเกรดของอิฐทนไฟส่วนใหญ่จะประกอบด้วย แมกนีเซีย ซิลิก้า อะลูมินา ซิลิคอนคาร์ไบด์ กราไฟต์ ดินขาวและดินทนไฟ เป็นต้น

ภาพที่ 2.2 อิฐทนไฟ (Refractory Brick)

ที่มา: Thai Furnaces Engineering Limited Partnership (2553)

2.6.2 เบ้าหลอม (Crucible)

เบ้าหลอมที่ใช้หลอมโลหะควรมีสมบัติถ่ายเทความร้อนได้ดีเพื่อประหยัดเชื้อเพลิง และทนความร้อนสูง ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วต้านทานต่อบรรยากาศที่มีออกซิเจนอยู่มากเพื่อไม่ให้กราไฟต์ถูกเผาไหม้ ต้านทานปฏิกิริยาเคมี มีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง ต้านทานการกระทบและเสียดสีของวัสดุและน้ำโลหะมีความแข็งแรงสูงที่อุณหภูมิต่ำเพื่อเคลื่อนย้ายได้ง่าย เบ้าหลอมมีการออกแบบสร้างหลายรูปร่างลักษณะการใช้งาน เบ้าสำหรับใช้กับเตาเบ้าหลอมโลหะแบ่งออกได้หลายกลุ่มตามชื่อการค้า เช่น Starrbide Crucible ทำจากซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปประกอบด้วยดินทนไฟผสมกับซิลิคอนคาร์ไบด์ Excel Crucible ทำจากซิลิกอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปประกอบด้วยเรซิ่นประสานกับซิลิคอนคาร์ไบด์ Syncarb Crucible ทำจากซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Isostatic Press Index Crucible ทำจากดินทนไฟผสมกับกราไฟต์ ใช้สำหรับเตาเหนี่ยวนำด้วยกระแสไฟฟ้า Salamander Crucible ทำจากดินทนไฟผสมกับกราไฟต์ Starr Cement Crucible ประกอบด้วย, Al_2O_3, SiO_2, TiO_2, R_2O, CaO และ MgO ในปริมาณ 76, 18, 3, 0.35, 0.08 และ 0.06 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ใช้สำหรับเตาเหนี่ยวนำด้วยกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 2.3 เบ้าหลอมที่นิยมใช้ในการหลอมโลหะนอกกลุ่มเหล็กมี 5 กลุ่ม ประกอบด้วย

1) Clay - Graphite ประกอบด้วยกราไฟต์ 35 เปอร์เซ็นต์ และใช้ดินเหนียวทนไฟเป็นตัวประสาน ถ่ายเทความร้อนดี ทนต่อความร้อน ต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วได้ดีแต่ทนทานต่อการเกิดออกไซด์ การกัดกร่อนของขี้ตะกรันและฟลักซ์ได้ไม่ดี มีความแข็งแรงปานกลางเหมาะสำหรับการหลอมโลหะสังกะสีผสมทองเหลือง และอลูมิเนียมผสม ใช้กับเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำด้วยไฟฟ้า

2) Super Clay - Graphite ประกอบด้วยกราไฟต์ 35 เปอร์เซ็นต์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) 12 เปอร์เซ็นต์ ใช้ดินเหนียวทนไฟเป็นตัวประสาน ถ่ายเทความร้อนดี ทนความร้อนสูงกว่าแบบแรกมี อุณหภูมิใช้งาน 750 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส ต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วได้ดี ต้านทานต่อการเกิดออกไซด์ การกัดกร่อนของขี้ตะกรันและฟลักซ์ได้ดี เหมาะสำหรับการหลอมโลหะอลูมิเนียม ทองแดง และเหล็กหล่อ ใช้กับเตาหลอมใช้ไฟฟ้าหรือเตาหลอมใช้เชื้อเพลิงก๊าซ

3) Carbon Bonded Silicon Carbide ประกอบด้วยกราไฟต์ 30 เปอร์เซ็นต์ ซิลิกอนคาร์ไบด์ 45 เปอร์เซ็นต์ และใช้คาร์บอนเป็นตัวประสาน ถ่ายเทความร้อนได้ดี ทนความร้อนได้สูง มีอุณหภูมิใช้งานสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส ต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วได้ดี ต้านทานต่อการเกิดออกไซด์ การกัดกร่อนของขี้ตะกรันและฟลักซ์ได้ดี เหมาะสำหรับการหลอมโลหะอลูมิเนียม อลูมิเนียมผสม และทองแดงผสมใช้กับเตาหลอมใช้เชื้อเพลิงก๊าซ หรือน้ำมัน

4) Alumina - Zirconia เบ้าหลอมที่ทำขึ้นจาก อลูมินาผสมสูง 99.7 เปอร์เซ็นต์ หรือทำจากเซอร์โคเนียที่มีสมบัติถ่ายเทความร้อนได้ดี ทนความร้อนได้สูง มีอุณหภูมิใช้งานสูงถึง 2,400 องศาเซลเซียส ต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วได้ดี ต้านทานต่อการเกิดออกไซด์ การกัดกร่อนของขี้ตะกรันและฟลักซ์ได้ดีใช้ในการหลอมโลหะเพื่อเตรียมตัวอย่างชิ้นงานวัสดุและการหลอมวัสดุเซรามิกใช้กับเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำด้วยไฟฟ้า

5) Platinum เป็นเบ้าหลอมที่ทำขึ้นจากโลหะ ถ่ายเทความร้อนได้ดี ทนความร้อนได้สูงมีอุณหภูมิใช้งานสูงถึง 1,400 องศาเซลเซียส ต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วได้ดี ต้านทานต่อการเกิดออกไซด์ การกัดกร่อนของขี้ตะกรันและฟลักซ์ได้ดี แต่มีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงน้อย ใช้ในการหลอมโลหะเพื่อเตรียมตัวอย่างชิ้นงานวัสดุและการหลอมวัสดุเซรามิกใช้กับเตาหลอมที่ใช้เชื้อเพลิงก๊าซ

ภาพที่ 2.3 เบ้าหลอม (Crucible)

ที่มา: Thai Furnaces Engineering Limited Partnership (2553)

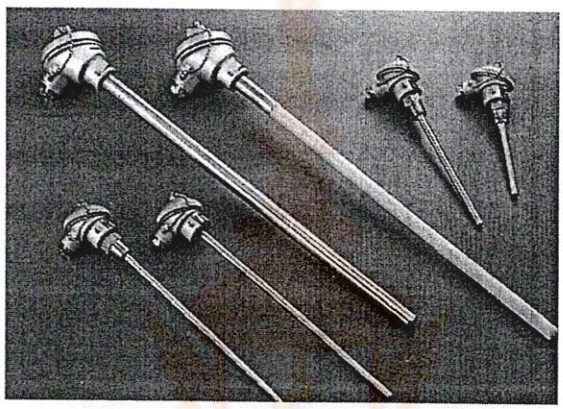
2.7 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

เทอร์โมคัปเปิลเป็นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่นิยมใช้งานกันมากในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถวัดอุณหภูมิได้ค่าต่ำใกล้ศูนย์องศาสัมบูรณ์และสูงกว่า 2,000 องศาเซลเซียส สามารถใช้กับระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ ดังแสดงในภาพที่ 2.4 ชนิดของเทอร์คัปเปิลที่ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิภายในเตามีหลายชนิดด้วยกัน แต่ละชนิดมีขอบเขตการใช้งานดังนี้

2.7.1 ชนิดของเทอร์โมคัปเปิล

1) ชนิดที่มีเหล็กผสม ประกอบไปด้วยลวดเหล็กเป็นขั้วบวกและคอนสแตนแตน (Constantan) เป็นขั้วลบใช้สำหรับลดความดันบรรยากาศเหมาะสำหรับใช้งานที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส ใช้งานไม่เกิน 871 องศาเซลเซียส ถ้าลวดมีขนาดเล็กจะใช้งานที่อุณหภูมิต่ำกว่า

2) ชนิดที่มีทองแดงผสม มีลวดทองแดงเป็นขั้วบวกและลวดคอนสแตนแตนเป็นขั้วลบ เหมาะสำหรับใช้งานที่มีการเกิดปฏิกิริยาลดออกซิเจนและลดความดันบรรยากาศ ส่วนอุณหภูมิไม่เกิน 399 องศาเซลเซียส เหมาะสำหรับงานที่มีความชื้นเกิดขึ้น ใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิต่ำเนื่องจากส่วนประกอบ (Copper Constantan) เกิดการถ่ายเทความร้อนสูง (Zone at Temperature Gradient) อุณหภูมิลดลงมาก



ภาพที่ 2.4 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

ที่มา: Thai Furnaces Engineering Limited Partnership (2553)

3) ชนิดที่โครเมลอลูเมลผสม มีลวดโครเมล (Chromel) เป็นขั้วบวกและลวด อลูเมล (Alumel) ซึ่งเป็นขั้วลบใช้ในปฏิกิริยาของออกซิเจนที่ไม่มีความดันบรรยากาศใช้งานในช่วงอุณหภูมิไม่เกิน 1,260 องศาเซลเซียส ถ้าลวดมีขนาดเล็กอาจใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า

4) ชนิดที่มีโครเมลผสมใช้งานได้ที่อุณหภูมิไม่เกิน 871 องศาเซลเซียส ในสุญญากาศหรือเกิดปฏิกิริยาเพียงเล็กน้อยหรือลดความดันบรรยากาศ 0 องศาเซลเซียส เทอร์โมคัปเปิลชนิดนี้จะไม่เกิดการกัดกร่อนที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส และให้ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงกว่าแบบอื่นๆ

5) ชนิดที่มีทองคำขาวบริสุทธิ์ผสม ช่วงอุณหภูมิใช้งานที่เหมาะไม่เกิน 1,800 องศาเซลเซียส ทนการกัดกร่อนและเกิดออกไซด์ได้ยาก เทอร์โมคัปเปิลชนิดนี้ที่ใช้งานทั่วๆไป ได้แก่ ชนิดที่ใช้ 90 เปอร์เซ็นต์แพลตตินั่ม 10 เปอร์เซ็นต์โรเดียมโดยโรเดียมเป็นขั้วบวกแพลตตินั่มบริสุทธิ์เป็นขั้วลบ ชนิดที่ใช้แพลตตินั่ม 18 เปอร์เซ็นต์ โรเดียม 13 เปอร์เซ็นต์ โดยโรเดียมเป็น

ขั้วบวกแพลลตินั่มเป็นขั้วลบ ชนิดที่ใช้แพลตตินั่ม 70 เปอร์เซ็นต์ โรเดียม 30 เปอร์เซ็นต์ เป็นขั้วบวกกับแพลตตินั่ม 90 เปอร์เซ็นต์ โรเดียม 30 เปอร์เซ็นต์ เป็นขั้วลบ

6) ชนิดที่มีทังสเตนผสม เทอร์โมคัปเปิลชนิดนี้เหมาะสำหรับวัดอุณหภูมิไม่เกิน 2,760 องศาเซลเซียส มีความต้านทานการเกิดออกไซด์ต่ำควรใช้ในงานสูญญากาศไฮโดรเจนหรือบรรยากาศเฉื่อย

2.7.2 ส่วนประกอบของเทอร์โมคัปเปิล

1) ตัวเทอร์โมคัปเปิล หลักในการเลือกวัสดุที่ใช้ทำเทอร์โมคัปเปิลตามสภาพของงานดังนี้คือ โลหะที่ใช้ทำต้องไม่สูญเสียธาตุผสมไปในเวลาอันรวดเร็ว ต้องให้แรงเคลื่อนเอาท์พุทที่มีเสถียรภาพ (Stable) ในการใช้งานไม่เปลี่ยนแปลง คุณสมบัติในช่วงการใช้งาน มีความแข็งแรงและทนต่อสภาวะแวดล้อมในการใช้งาน

2) ฉนวนของเทอร์โมคัปเปิล จะทำหน้าที่สำหรับตัวเทอร์โมคัปเปิลกับปลอกหุ้มที่เป็นโลหะ ส่วนใหญ่สารที่ใช้ทำฉนวนจะเป็นสารประเภทแมกนีเซียมออกไซด์ อลูมิเนียมออกไซด์ หรือเบอร์รีเลียมออกไซด์

3) สายต่อเทอร์โมคัปเปิล เนื่องจากการใช้งานจริง ระยะระหว่างตัววัดและจุดแสดงผลบางครั้งอยู่ห่างกัน สายต่อเทอร์โมคัปเปิลมีราคาแพงมากจึงต้องหาสายมาต่อในช่วงนี้ ทำให้ราคาถูกกว่าและคุณสมบัติทางการกำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าตามอุณหภูมิเหมือนกับสายเทอร์โมคัปเปิล (ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ และ ไพโรจน์ ฐานวิเศษ, 2542)

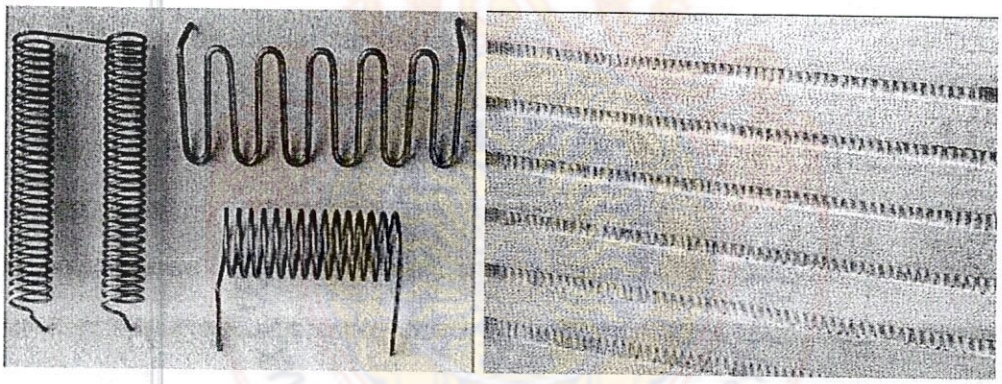
2.8 ลวดความต้านทาน (Wire Resistance)

ลวดความต้านทานในงานที่ต้องการอุณหภูมิใช้งานสูงๆ จะใช้ลวดความต้านทานเป็นตัวกำเนิดความร้อนดังแสดงในภาพที่ 2.5 โดยจะนำลวดความต้านทานมาขดเป็นขดลวดก่อน การขดลวดจะขดบนแกนหลักโดยแต่ละรอบของการขดจะติดกันจนได้ความยาวขดที่ต้องการ จากนั้นนำมาดึงให้ได้ระยะระหว่างรอบเท่าๆ กันตามความต้องการ ความไม่สม่ำเสมอของระยะห่างระหว่างรอบจะมีผลต่อการกระจายความร้อนขณะใช้งาน ข้อเสียอันนี้เกิดจากในขณะที่พันขดลวดเกิดความเค้นตกค้างมากกว่าเกิดจากความผิดปกติของขดลวด โดยอายุการใช้งานลวดต้านทาน จะขึ้นอยู่กับสภาวะการใช้งาน เช่น ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิสูง ผิวชิ้นงาน ความถี่ของรอบการทำงาน และการออกแบบตัวกำเนิดความร้อน (ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ และ ไพโรจน์ ฐานวิเศษ, 2542)

2.8.1 วิธีการพันขดลวด

หลังจากที่ทำการออกแบบและคำนวณ จะทราบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวด ความยาวของลวด เส้นผ่านศูนย์กลางนอกของขดลวด ขั้นต่อไปจะเป็นการพันลวดให้เป็นไปตาม

ต้องการ โดยวิธีการพันจะพิจารณาจากความต้องการขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดซึ่งแบ่งเป็น 2 ขนาด คือ วิธีการพันขดลวดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 1.0 มิลลิเมตร โดยเครื่องจักรและเครื่องมือที่ใช้สำหรับพันขดลวดขึ้นอยู่กับจำนวนขดลวดที่จะใช้พัน จำนวนขดลวดควรใช้อัตราส่วนเกียร์ (Gear Ratio) 1 : 5 แกนเหล็กจับด้วยหัวจับเครื่อง (Drill Brace) ปลายขดลวดด้านหนึ่งจับฟันของหัวจับ แล้วป้อนด้วยถุงมือหนัง เมื่อจำนวนของขดลวดมีจำนวนปานกลาง แนะนำให้ใช้เครื่องพันลวดแบบกึ่งอัตโนมัติแกนเหล็กขับด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าซึ่งสามารถหยุดได้ทันที การป้อนลวดอาจใช้มือหรือเครื่องช่วยถ้าแกนเหล็กยาวควรประคองแกนด้วย เช่น ยันศูนย์ท้ายแท่น ขณะที่พันเครื่องพันลวดแบบนี้สามารถวัดความยาวลวดที่พันได้และหากมีจำนวนขดลวดมากควรใช้เครื่องพันอัตโนมัติซึ่งสามารถพันได้ทั้งขดลวดติดกันและเว้นระยะพิตซ์จะเท่ากันตลอดขดความต้องการ ขดลวดจะถูกตัดด้วยเครื่องตัดที่มีความเที่ยงตรงสูง ดังนั้นความต้านทานของแต่ละขดลวดแตกต่างกันน้อยมาก การดึงขดลวดที่พันติดกันจากเครื่องพันขดลวดจะถูกนำมาดึงให้ยืดออกประมาณ 2 ถึง 4 เท่า หลังจากการดึงบางครั้งต้องทำการอบคืนตัวด้วยไฟฟ้า เพื่อป้องกันการดึงกลับ (String Back)



ภาพที่ 2.5 ลวดความต้านทาน (Wire Resistance)
ที่มา: Thai Furnaces Engineering Limited Partnership (2553)

และวิธีการพันขดลวดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 1.0 มิลลิเมตร อุปกรณ์นำลวดนี้จะพาเส้นลวดวิ่งไปตามแกนเหล็กอุปกรณ์จะไม่ทำด้วยโลหะเนื่องจากจะขัดสีลวดทำให้ลวดเสียคุณสมบัติใช้งานได้ไม่ดี ส่วนใหญ่นิยมทำด้วยไม้เนื้อแข็ง การพันลวดที่ทำจากการรีดเย็นจะพันที่อุณหภูมิห้องสำหรับลวดขนาดใหญ่จะพันที่อุณหภูมิประมาณ 200 ถึง 300 องศาเซลเซียส ความร้อนนี้อาจได้จากกระแสไฟฟ้าหรือเปลวไฟจากแก๊ส หรือทำการอบคืนตัวขณะทำการพันโดยเฉพาะเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนเหล็กน้อยกว่า 3 เท่า ของเส้นผ่านศูนย์กลางของลวด เมื่อสิ้นสุดการพัน

จะต้องระมัดระวังเรื่องการดึงกลับด้วย การดึงขดลวดที่ติดกันจะต้องนำมาดึงออกเพื่อเว้นระยะพิตช์ สำหรับลวดขนาดใหญ่จะต้องใช้ความร้อนถึง 1,000 องศาเซลเซียส ความร้อนได้จากการปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าไปเป็นวิธีการที่ดีที่สุด ขดลวดจะต้องดึงเล็กน้อยก่อนปล่อยกระแสไฟฟ้า เพื่อไม่ให้เกิดการลัดวงจร การดึงจะค่อยๆ ดึงอย่างช้าๆ ระยะห่างระหว่างเกลียวจึงจะมีความสม่ำเสมอและไม่มีการดีดกลับ

2.8.2 ข้อควรคำนึงในการพันขดลวด

1) ความเครียดขณะที่พันขดลวดจะต้องเกิดปานกลางและคงที่ความเครียดจะมากตรงจุดเริ่มต้นและสิ้นสุด การสั่นของแกนจะต้องไม่ทำให้เส้นลวดเกิดการแตกร้าว

2) มุมของเส้นลวดที่ทำกับแกนจะต้องคงที่ตลอดการพัน

3) อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดกับเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นลวดจะต้องพิจารณาให้เหมาะสม ถ้าอัตราส่วน (D/d) น้อยก็จะเกิดความเครียดในขดลวดสูง ถ้าอัตราส่วนมากเกินไปจะทำให้ขดลวดไม่เกิดการเสถียร

4) ผิวสำเร็จ วัสดุที่ใช้ในลวดต้านทานซึ่งเป็นตัวที่ก่อให้เกิดความร้อนในเตาหลอมจะต้องมีการทำผิวสำเร็จ ซึ่งโดยทั่วไป จะมีการทำ 4 วิธี คือ

4.1) การอบอ่อนในแอมโมเนีย

4.2) วัสดุจะถูกทำให้มีชั้นของออกไซด์โดยขบวนการทางเคมี ทำให้คุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี จนถึงอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส

4.3) วัสดุจะถูกเคลือบด้วยฉนวนไฟฟ้าหลังการทำการอบอ่อน

4.4) วัสดุจะถูกนำไปชุบในกรดหลังจากทำการอบอ่อน

2.9 ทฤษฎีเกี่ยวกับการนำความร้อน

การนำความร้อน คือ วิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำภายในตัวกลางเดียวกันหรือการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างตัวกลางที่ติดกัน ความร้อนจะเคลื่อนที่ผ่านโมเลกุลของสาร โดยที่โมเลกุลไม่เคลื่อนที่ การนำความร้อนจะเกิดขึ้นได้ดีในตัวกลางที่เป็นของแข็งตามกฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ (Fourier Law of Conduction)

$$q_x = -kA\left(\frac{dT}{dX}\right) \qquad (2.1)$$

เมื่อ q_x คือ ปริมาณความร้อนโดยการนำความร้อน มีหน่วยเป็น วัตต์

k คือ ค่าการนำความร้อนของผนัง มีหน่วยเป็น วัตต์ต่อเมตร เคลวิล

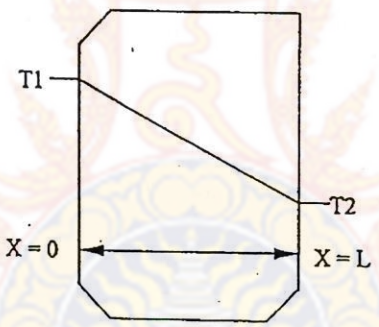
A คือ พื้นที่ที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของความร้อน มีหน่วยเป็น ตารางเมตร

T คือ ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างจุดที่เกิดการนำความร้อน มีหน่วยเป็น เคลวิล

X คือ ระยะของการเกิดการนำความร้อนทั้งหมด มีหน่วยเป็น เมตร

2.9.1 การนำความร้อนในผนังราบ (Plane Wall)

การพิจารณาการนำความร้อนผ่านผนังราบ ที่ผิวคงที่และขนาดสม่ำเสมอทั่วทั้งผิวทั้งสองมีอุณหภูมิแตกต่างกัน ความร้อนจะไหลจากผิวที่มีอุณหภูมิสูงไปยังผิวที่มีอุณหภูมิต่ำ ดังแสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 การนำความร้อนผ่านผนังราบที่ค่าการนำความร้อนมีขนาดสม่ำเสมอ
ที่มา: ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ และ ไพโรจน์ ฐานวิเศษ (2542)

ถ้าค่าการนำความร้อนของผนังคงที่แล้ว จะสามารถคำนวณหาค่าปริมาณการนำความร้อนได้จากสมการที่ 2.2

$$q_k = \left(\frac{kA}{L}\right)(T_1 - T_2) \qquad (2.2)$$

เมื่อ q_k คือ ปริมาณความร้อนที่ไหลผ่านผนัง มีหน่วยเป็น วัตต์

k คือ ค่าการนำความร้อนของผนัง มีหน่วยเป็น วัตต์ต่อเมตร เคลวิล

A คือ พื้นที่หน้าตัดของผนังที่ตั้งฉากกับทิศทางของการไหล

มีหน่วยเป็น ตารางเมตร

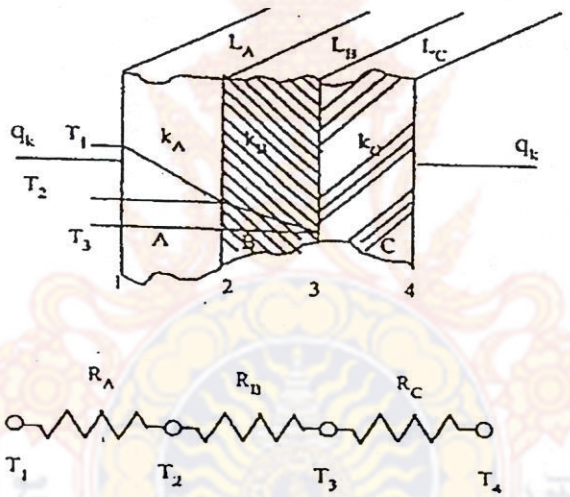
L คือ ความหนาของผนัง มีหน่วยเป็น เมตร

T_1 คือ อุณหภูมิของผิวทางด้านซ้ายที่ X = 0 มีหน่วยเป็น เคลวิล

T_2 คือ อุณหภูมิของผิวทางด้านขวาที่ X = L มีหน่วยเป็น เคลวิล

2.9.2 การนำความร้อนในผนังราบซ้อนกันแบบต่ออนุกรม (Plane Wall in Series)

ถ้าความร้อนไหลผ่านผนังที่ซ้อนกันหลายชั้นโดยการนำในกรณีที่สภาวะต่างๆ คงที่หรือไม่แปรผันตามเวลาแล้วนั้นอัตราความร้อนที่ไหลผ่านแต่ละชั้นจะมีขนาดเท่าๆ กันทั้งๆ ที่ความลาดชันของอุณหภูมิในผนังแต่ละชั้นมีความแตกต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 การนำความร้อนแบบมิติเดียวผ่านผนังหลายชั้นและการเปรียบเทียบกับวงจรไฟฟ้า
ที่มา: ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ และ ไพโรจน์ ฐานวิเศษ (2542)

ในกรณีการนำความร้อนแบบมิติเดียวผ่านผนังหลายชั้นนี้ ปริมาณการนำความร้อนที่ไหลผ่านผนังแต่ละชั้น จะสามารถหาค่าได้จากสมการที่ 2.3

$$q_x = \frac{T_1 - T_2}{\left[\left(\frac{L_A}{k_A A_A}\right) + \left(\frac{L_B}{k_B A_B}\right) + \left(\frac{L_C}{k_C A_C}\right)\right]} \qquad (2.3)$$

เมื่อ q_x คือ ปริมาณความร้อนที่ไหลผ่านผนัง มีหน่วยเป็น วัตต์

T_1 คือ อุณหภูมิของผิวผนังชั้นใน มีหน่วยเป็น เคลวิล

T_2 คือ อุณหภูมิของผิวผนังชั้นนอก มีหน่วยเป็น เคลวิล

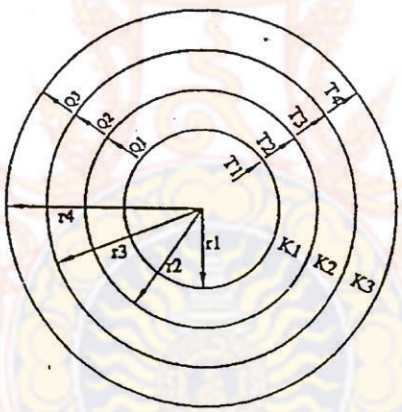
$L_{A, B, C}$ คือ ความหนาของผนัง A, B, C ตามลำดับ มีหน่วยเป็น เมตร

$k_{A, B, C}$ คือ ค่าการนำความร้อนของผนัง A, B, C ตามลำดับ มีหน่วยเป็น วัตต์ต่อเมตร เคลวิล

$A_{A, B, C}$ คือ พื้นที่หน้าตัดของผนัง A, B, C ตามลำดับ ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล มีหน่วยเป็น ตารางเมตร

2.9.3 การนำความร้อนตามแนวรัศมี

ความต้านทานที่ใช้หาอัตราการนำความร้อน ก็จะเป็นความต้านทานจากการนำความร้อนของท่อและฉนวน ดังแสดงในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 การนำความร้อนผ่านรูปทรงกระบอกหลายชั้นตามแนวรัศมี

ที่มา: ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ และ ไพโรจน์ ฐานวิเศษ (2542)

และสามารถหาปริมาณการนำความร้อนตามแนวรัศมีที่ไหลผ่านผนังหลายชั้นได้จากสมการที่ 2.4

$$q_r = \frac{T_1 - T_2}{\left[\frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_1 L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_2 L} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi k_3 L}\right]} \qquad (2.4)$$

เมื่อ q_L คือ ปริมาณความร้อนที่ไหลผ่านผนัง มีหน่วยเป็น วัตต์

T_1 คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของผนังด้านใน มีหน่วยเป็น เคลวิล

T_2 คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของผนังด้านนอก มีหน่วยเป็น เคลวิล

$k_{1,2,3}$ คือ ค่าการนำความร้อนของผนังชั้นที่ 1, 2, 3 ตามลำดับ มีหน่วยเป็น วัตต์ต่อเมตร เคลวิล

r_1 คือ รัศมีของผนังด้านในชั้นที่ 1 มีหน่วยเป็น เมตร

$r_{2,3,4}$ คือ รัศมีของผนังด้านนอกชั้นที่ 2, 3, 4 ตามลำดับ มีหน่วยเป็น เมตร

L คือ ความยาวของท่อ มีหน่วยเป็น เมตร

2.9.4 การถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนของวัตถุภายใต้ปริมาตรคงที่ สามารถหาได้จากสมการที่ 2.5

$$q_L = \frac{mC_p(T_1 - T_2)}{t} \quad (2.5)$$

เมื่อ q_L คือ ปริมาณความร้อนที่ไหลผ่านวัตถุ มีหน่วยเป็น วัตต์

m คือ มวลของวัตถุ มีหน่วยเป็น กิโลกรัม

C_p คือ ความร้อนจำเพาะของวัตถุ มีหน่วยเป็น กิโลจูลต่อกิโลกรัม เคลวิล

T_1 คือ อุณหภูมิสุดท้ายของวัตถุ มีหน่วยเป็น เคลวิล

T_2 คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของวัตถุ มีหน่วยเป็น เคลวิล

t คือ เวลาในการให้ความร้อน มีหน่วยเป็น วินาที

และความร้อนที่ถ่ายเทเพื่อให้เกิดการหลอมละลายของวัตถุภายใต้ปริมาตรคงที่ สามารถหาอัตราการให้ความร้อนจากสมการที่ 2.6

$$q_L = \frac{mC_p(T_1 - T_2) + mLH}{t} \quad (2.6)$$

เมื่อ LH คือ ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย มีหน่วยเป็น กิโลจูลต่อกิโลกรัม

2.10 การตรวจวัดกำลังไฟฟ้า

อย่างไรก็ตาม หากโรงงานไม่มีเครื่องวัดกำลังไฟฟ้า อย่างน้อยที่สุดควรมีเครื่องวัดกระแสไฟฟ้า (Clamp Meter) ดังแสดงในภาพที่ 2.9 และเราสามารถประมาณกำลังไฟฟ้าได้จากค่ากระแสไฟฟ้า สามารถหาได้จากสมการที่ 2.7 และ 2.8

กรณีใช้ไฟ 3 เฟส $P = \sqrt{3} \times V \times I \times PF$ (2.7)

กรณีใช้ไฟเฟสเดียว $P = V \times I \times PF$ (2.8)

เมื่อ P คือ กำลังไฟฟ้ามีหน่วยเป็น วัตต์

V คือ แรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย อ่านจากหน้าตู้ไฟฟ้า มีหน่วยเป็น โวลต์

I คือ กระแสไฟฟ้าที่วัดได้ มีหน่วยเป็น แอมแปร์

PF คือ ค่าตัวประกอบกำลัง สำหรับการวัดมอเตอร์ประมาณ 0.85 และสำหรับการวัดฮีตเตอร์ไฟฟ้า ให้เท่ากับ 1.0

ภาพที่ 2.9 เครื่องวัดกระแสไฟฟ้า (Clamp Meter)

ที่มา: Ruby Electronics (2553)

2.11 ส่วนประกอบอัตราค่าไฟฟ้า

ค่าไฟฟ้าที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคหรือการไฟฟ้านครหลวงเรียกเก็บจากผู้ใช้ไฟฟ้าในแต่ละเดือนซึ่งปรากฏอยู่ในใบเสร็จรับเงินค่าไฟฟ้า ประกอบไปด้วย

2.11.1 ค่าความต้องการพลังไฟฟ้า (Demand Charge)

คิดจากความต้องการพลังไฟฟ้า เป็นกิโลวัตต์เฉลี่ยใน 15 นาที ที่สูงสุดของช่วงเวลาในแต่ละเดือน ตามประเภทของอัตราค่าไฟฟ้าที่ใช้ โดยมีหน่วยวัดเป็น บาทต่อกิโลวัตต์ สาเหตุของการเรียกเก็บเพื่อนำไปใช้ในการลงทุนขยายกำลังของระบบผลิต ระบบส่งและระบบจำหน่ายไฟฟ้าตามระดับแรงดัน เรียกว่าเป็น Capacity Cost

2.11.2 ค่าพลังงานไฟฟ้า (Energy Charge)

คิดตามปริมาณการใช้ไฟฟ้า ในรอบเดือนนั้น ๆ โดยมีหน่วยวัดเป็น บาทต่อกิโลวัตต์ สาเหตุของการเรียกเก็บเพื่อนำไปใช้จ่ายในการบำรุงรักษา การดำเนินการและค่าเชื้อเพลิง แบ่งตามระดับแรงดัน เรียกว่าเป็น Energy Cost

2.11.3 ค่าบริการ (Service Charge)

เป็นค่าบริการเกี่ยวกับเครื่องวัดฯ ค่าดำเนินการจดหน่วย จัดทำใบเสร็จเงินค่าไฟฟ้าและการดำเนินการจัดเก็บเงินค่าไฟฟ้าโดยมีหน่วยเป็น บาทต่อเดือน สาเหตุของการเรียกเก็บ เพื่อนำไปใช้จ่ายในเรื่องของต้นทุนค่าบริการของผู้ใช้ไฟฟ้าให้มีความชัดเจน เรียกว่าเป็น Customer Cost

2.11.4 ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ (Power Factor Charge)

ใช้สำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าตั้งแต่ 30 กิโลวัตต์ มีค่าแฟกเตอร์ไม่ต่ำกว่า 0.85 กล่าวคือในกรณีที่ผู้ใช้ไฟฟ้ามีค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor) ล้าหลัง (Lagging) ผู้ใช้ไฟฟ้ามีความต้องการไฟฟ้ารีแอคตีฟเฉลี่ยใน 15 นาทีสูงสุด เมื่อคิดเป็นกิโลวาร์เกินกว่าร้อยละ 61.69 ของความต้องการพลังงานไฟฟ้ารีแอคตีฟเฉลี่ยใน 15 นาทีสูงสุด เมื่อคิดเป็นกิโลวัตต์แล้ว เฉพาะกิโลวาร์ที่เกินจะต้องเสียค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ โดยมีหน่วยวัดเป็น บาทต่อกิโลวาร์ สาเหตุของการเรียกเก็บ เพื่อนำไปลงทุน บำรุงรักษาเครื่องฯ สำหรับติดตั้ง Capacitor ในระบบไฟฟ้า

2.11.5 ค่าไฟฟ้าต่ำสุด (Minimum Charge)

ค่าไฟฟ้าต่ำสุดในแต่ละเดือนต้องไม่ต่ำกว่าร้อยละ 70 ของค่าความต้องการพลังไฟฟ้าที่สูงสุดในรอบ 12 เดือนที่ผ่านมา โดยมีหน่วยวัดเป็น บาทต่อเดือน สาเหตุของการเรียกเก็บ เพื่อนำไปลงทุนขยายระบบไฟฟ้าเพื่อให้เพียงพอกับการใช้ไฟฟ้าแต่ผู้ใช้ไฟฟ้า กลับไม่ได้ใช้ไฟฟ้าตามที่แสดงความจำนงไว้

2.11.6 ค่าตัวประกอบการปรับอัตราค่าไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ (Ft)

เป็นค่าที่การไฟฟ้าเรียกเก็บจากผู้ใช้ไฟฟ้าซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายที่ไม่อยู่ในความควบคุมของการไฟฟ้า ฯ เช่น ราคาเชื่อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป โดยมีหน่วยวัดเป็น บาทต่อหน่วย

2.11.7 ภาษีมูลค่าเพิ่ม (VAT)

ส่วนประกอบของค่าไฟฟ้าในส่วนนี้ปัจจุบันเก็บในอัตราร้อยละ 7 ของค่าพลังงานไฟฟ้าที่เราใช้ไปการไฟฟ้าไม่ได้คิดค่าพลังงานไฟฟ้าในอัตราเดียวกันตลอดแต่ คิดในอัตราก้าวหน้า คือ เมื่อใช้พลังงานไฟฟ้ามากขึ้นจะต้องจ่ายเงินค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยมากขึ้น

2.12 การคิดค่าไฟฟ้า

ค่าไฟฟ้าที่ผู้ใช้ไฟฟ้าต้องชำระในแต่ละเดือนประกอบด้วย ค่าพลังงานไฟฟ้า ค่าปรับปรุงต้นทุนการผลิตหรือค่า Ft และภาษีมูลค่าเพิ่มหรือ VAT แต่สิ่งแรกที่ผู้ใช้ไฟฟ้าจะต้องรู้ในการคิดค่าไฟฟ้า คือ จำนวนหน่วยไฟฟ้าที่ใช้ จำนวนหน่วยไฟฟ้า 1 หน่วย หรือ 1 ยูนิต หมายถึง การใช้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 1,000 วัตต์ในเวลา 1 ชั่วโมง จำนวนหน่วยไฟฟ้าที่ใช้ไปสามารถหาค่าได้จากสมการที่ 2.9

จำนวนหน่วยหรือยูนิต = กำลังไฟฟ้า × จำนวนชั่วโมงที่ใช้ (2.9)

2.12.1 การคิดค่าพลังงานไฟฟ้า

การคิดค่าพลังงานไฟฟ้า สามารถหาได้จากสมการที่ 2.10

ค่าพลังงานไฟฟ้า = จำนวนหน่วยไฟฟ้าที่ใช้ × อัตราค่าไฟฟ้าต่อหน่วย (2.10)

– 2.12.2 การคิดค่าปรับปรุงต้นทุนการผลิต

การคิดค่าปรับปรุงต้นทุนการผลิต สามารถหาได้จากสมการที่ 2.11

ค่าปรับปรุงต้นทุนการผลิต = จำนวนหน่วยไฟฟ้าที่ใช้ × อัตราค่าปรับปรุงต้นทุนการผลิต (2.11)

2.12.3 การคิดค่าภาษีมูลค่าเพิ่ม

การคิดค่าภาษีมูลค่าเพิ่ม สามารถหาได้จากสมการที่ 2.12

$$\text{ค่าภาษีมูลค่าเพิ่ม} = (\text{ค่าไฟฟ้าพื้นฐาน} + \text{ค่าปรับปรุงต้นทุนการผลิต}) \times \frac{7}{100} \quad (2.12)$$

ดังนั้น ค่าไฟฟ้าที่ต้องชำระ สามารถหาได้จากสมการที่ 2.13

$$\text{ค่าไฟฟ้าที่ต้องชำระ} = \text{ค่าพลังงานไฟฟ้า} + \text{ค่าปรับปรุงต้นทุนการผลิต} + \text{ภาษีมูลค่าเพิ่ม} \quad (2.13)$$

2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากปัญหาของการใช้เตาที่สร้างความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงน้ำมัน มีข้อเสียคือ การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ทำให้ความร้อนเข้าสู่เตาหลอมที่ไม่สม่ำเสมอ เกิดเขม่าควันซึ่งเป็นมลพิษทางอากาศ เกิดการปนเปื้อนของน้ำโลหะระหว่างการหลอม ดังนั้นจึงมีแนวคิดในการออกแบบและสร้างเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานขึ้นมา ซึ่งมีการให้ความร้อนภายในเตาหลอมที่สม่ำเสมอ ไม่ทำให้เกิดเขม่าควัน การปนเปื้อนของน้ำโลหะระหว่างการหลอมเกิดขึ้นน้อย มีความสะดวกและง่ายต่อการปฏิบัติงาน โดยมีการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

ประกอบ จันทร์มา และ วรรณชัย พร้อมมูล (2538) ทำการออกแบบและสร้างเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานสำหรับหลอมอะลูมิเนียม เบ้าหลอมเป็นกราไฟต์ ใช้หลอมอะลูมิเนียมได้ประมาณ 10 กิโลกรัม ผนังเตาด้านข้างเป็นเซรามิกไฟเบอร์ชนิด Blanket มีความหนารวม 12.5 เซนติเมตร พื้นของเตาก่อด้วยอิฐฉนวนกันความร้อนชนิด C2 ระบบให้ความร้อนของเตาใช้ขดลวดความต้านทาน ใช้กับไฟฟ้า 380 โวลต์ โดยต่อกันแบบเดลต้า มีกำลังไฟฟ้า 6.27 กิโลวัตต์ จากการทดสอบการใช้งานพบว่ามีอัตราการสูญเสียความร้อนประมาณ 2.9 กิโลวัตต์ เมื่ออุณหภูมิในห้อง Heater ประมาณ 900 องศาเซลเซียส และอะลูมิเนียมในเบ้ากราไฟต์มีอุณหภูมิประมาณ 800 องศาเซลเซียส

ชุษณะ รักษ์วงศ์ และคณะ (2539) ออกแบบและสร้างเตาหลอมโลหะด้วยขดลวดความต้านทาน โดยการสร้างเตาหลอมโลหะที่สามารถเอียงเทได้ โดยใช้ระบบเชิงกลช่วยในการผ่อนแรงให้ความร้อนด้วยขดลวดความต้านทานแบบแบนเป็นตัวกำเนิดความร้อน ใช้ไฟ 380 โวลต์ 3 เฟส กำลังไฟฟ้า 15.4 กิโลวัตต์ อุณหภูมิสูงสุดของเตา 1,200 องศาเซลเซียส มีขนาดภายนอกเตา 900 × 1,150 × 1,400 มิลลิเมตร น้ำหนักรวมของเตา 430 กิโลกรัม โดยมีขั้นตอนในการดำเนินงานคือ ศึกษาการออกแบบและการสร้างเตาหลอมโลหะ การคำนวณและการออกแบบและขั้นสุดท้ายคือ

การสร้างเตาหลอมโลหะ โดยสามารถหลอมอะลูมิเนียมได้ 40 กิโลกรัม ภายในเวลา 120 นาที ผนังเตาก่อด้วยอิฐทนความร้อน C2 และบุด้วยฉนวนกันความร้อนมีผลทำให้สามารถป้องกันการสูญเสียความร้อนได้ดีจากการทำการทดลองหลอมอะลูมิเนียม 3 ครั้ง โดยแต่ละการทดลองจะหลอมอะลูมิเนียมครั้งละ 10 กิโลกรัม จำนวน 4 ครั้ง รวมทั้งสิ้น 40 กิโลกรัม สรุปได้ว่า สามารถหลอมอะลูมิเนียมเหลวได้ 40 กิโลกรัม ภายในเวลา 71 นาที

ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ และ ไพโรจน์ ฐานวิเศษ (2542) ออกแบบและสร้างเตาอบชุบความร้อนฟลูอิดไดซ์เบด และการให้ความร้อนด้วยขดลวดความต้านทานรวมกัน คุณสมบัติของเตาคืออุณหภูมิใช้งานไม่เกิน 900 องศาเซลเซียส ใช้ไฟฟ้าที่มีแรงเคลื่อน 220 โวลต์ ใช้กระแสไฟฟ้า 49 แอมแปร์ คิดเป็นกำลังไฟฟ้า 10.78 กิโลวัตต์ และจากการทดสอบอัตราการให้ความร้อน โดยจะให้ความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 8.4 องศาเซลเซียสต่อนาที สามารถประยุกต์ใช้ในกระบวนการอบชุบหลายกระบวนการ เช่น การชุบแข็ง การทำออสเทมเปอร์ริงและมาร์เทมเปอร์ริง

พรชัย ตั้งจิตปรารถนา (2544) ออกแบบและสร้างเตาอบชุบโลหะแบบต้านทาน ใช้ลวดความต้านทานเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนโดยการเปลี่ยนจากพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับความต่างศักย์ 220 โวลต์ 3 เฟส โดยใช้อิฐทนไฟและเซรามิกไฟเบอร์บุผนังของเตา อุณหภูมิใช้งานสูงสุดเท่ากับ 1,000 องศาเซลเซียส จากการทำงานของเตาที่จัดสร้างขึ้นสามารถทำอุณหภูมิได้ถึงตามที่ต้องการ จากการทดสอบโดยอัตราการให้ความร้อนต่อหน่วยเวลาอยู่ที่ 6.56 กิโลวัตต์ และมีประสิทธิภาพของฉนวนความร้อนขณะที่ภาวะคงตัว 36.31 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

สุรพล ชูสวัสดิ์ (2546) ออกแบบและสร้างเตาเบ้าที่ใช้หัวเผาเชื้อเพลิงก๊าซ ออกซิเจน-อะเซทิลีน เพื่อใช้ในการทดสอบหลอมโลหะบริสุทธิ์และโลหะผสมโดยได้ทดสอบสมรรถนะของเตาทดสอบและได้ทดสอบการเตรียมโลหะผสม ปริมาณโลหะที่ใช้หลอมแต่ละครั้งอยู่ในช่วง 200 ถึง 300 กรัมต่อครั้ง การทดสอบสมรรถนะของเตาทดสอบโดยเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการหลอมโลหะกับพลังงานที่เข้าในเตาทดสอบ ปรากฏว่าให้ผลเป็นที่น่าพอใจ สามารถใช้ในการหลอมโลหะบริสุทธิ์และโลหะผสมที่จุดหลอมเหลวไม่เกิน 1,200 องศาเซลเซียส ได้และจากการทดสอบประสิทธิภาพเตาทดสอบพบว่า ขึ้นอยู่กับปริมาตรการไหล อัตราส่วนผสมของก๊าซเชื้อเพลิง ความเร็วอากาศจากพัดลมเป่าอากาศ และอุณหภูมิก๊าซไอเสีย

M. Samuel (2003) ทำการศึกษาเทคนิคใหม่สำหรับการรีไซเคิลเศษอะลูมิเนียม โดยแนะนำเทคนิคโดยตรงแบบใหม่สำหรับรีไซเคิลอะลูมิเนียมซึ่งใช้พลังงานต่ำและไม่แทรกแซงกระบวนการแปรรูปโลหะ รวมถึงการวัดคุณสมบัติความหนาแน่น กำลังรับแรงอัดและความแข็ง ผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าเทคนิคโดยตรงแบบแบบใหม่สำหรับการรีไซเคิลเศษอะลูมิเนียมให้ผลผลิตและ

ความหนาแน่นสูงประมาณ 80 เปอร์เซ็นก่อนการเผา นอกจากนี้เทคนิคแบบใหม่ทำให้เกิดมลพิษทางอากาศต่ำและรักษาเนื้อโลหะมากกว่าเมื่อเทียบกับวิธีทั่วไป

K.C. Bala (2005) ทำการออกแบบการวิเคราะห์เตาหลอมเหนี่ยวนำไฟฟ้าสำหรับการหลอมเศษอะลูมิเนียม ได้เสนอกลไกการทำงานและระบบไฟฟ้าที่ต้องการใช้สำหรับการผลิตเตาแบบเหนี่ยวนำ ด้านกลไกได้พิจารณาองค์ประกอบทางเรขาคณิต ระบบหล่อเย็นและกลไกการเอียงเทโดยการออกแบบได้พิจารณาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและการประยุกต์การใช้งาน ผลที่ได้สามารถพัฒนาเทคโนโลยีการหล่อโลหะและการเตรียมชิ้นส่วนทดแทน

H. Amini Mashhadi และคณะ (2009) ศึกษาทดลองการรีไซเคิลเศษกลึงอะลูมิเนียมผสม AA336 ที่ความดันต่างกันและการป้องกันด้วยฟลักซ์ประเภทต่างๆของกลุ่มตัวอย่างบดอัด และมีการหลอมละลายที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เพื่อให้เข้าใจถึงปริมาณการรีไซเคิลของตัวอย่างที่แตกต่างกัน จึงมีการประยุกต์ใช้การวัดการสูญเสียน้ำหนักจากความสามารถในการรีไซเคิล แสดงให้เห็นว่าการใช้ฟลักซ์ป้องกันน้ำโลหะเป็นสิ่งที่ดีที่สุด สมบัติเชิงกลและการวิเคราะห์ทางเคมีของตัวอย่างที่ได้จากการรีไซเคิลจะมีค่าใกล้เคียงกับโลหะใหม่ที่ได้จากกระบวนการผลิตแบบทั่วไป

จากการศึกษางานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นทางคณะผู้จัดทำจึงได้แนวความคิดในการออกแบบและสร้างเตาหลอมโลหะแบบขดลวดความต้านทาน เพื่อใช้ในการหลอมเศษโลหะอะลูมิเนียม โดยใช้ขดลวดความต้านทานเป็นแหล่งกำเนิดความร้อน ใช้อิฐฉนวนความร้อนและเซรามิกกันความร้อนแบบผืนผ้าบุผนังของเตาป้องกันการสูญเสียความร้อนและใช้ระบบไฟฟ้าสำหรับควบคุมการทำงานของเตา

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

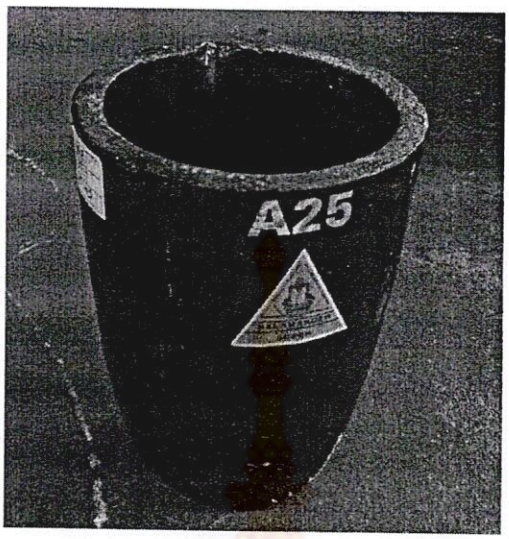
จากการลงฝึกปฏิบัติงานวิชาปฏิบัติการวิศวกรรมอุตสาหการที่ผ่านมาของนักศึกษา ณ โรงฝึกปฏิบัติงานสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ซึ่งมีเศษโลหะผสมอะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่องมือกลเป็นจำนวนมาก แต่โรงฝึกปฏิบัติงานยังไม่สามารถนำเศษโลหะดังกล่าวมาใช้ประโยชน์ต่อได้ เนื่องจากโรงฝึกปฏิบัติงานยังขาดเตาหลอมเพื่อมาใช้ในการหลอมเศษโลหะผสมอะลูมิเนียมดังกล่าว ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการออกแบบและสร้างเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานสำหรับการหลอมเศษโลหะผสมอะลูมิเนียม ให้สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ใหม่ในการเรียนการสอนและทำวิจัยได้ต่อไป

3.1 การคำนวณและการออกแบบเตาหลอม

3.1.1 การกำหนดขนาดของเบ้าหลอมที่เหมาะสม

ด้วยการเลือกใช้เบ้ากราไฟต์ ซึ่งทนอุณหภูมิได้สูงสุดประมาณ 1,400 องศาเซลเซียส และเลือกใช้เบ้าหลอมโลหะยี่ห้อ มอร์แกน รุ่น A25 ซึ่งมีขนาดภายนอกเส้นผ่านศูนย์กลางที่ปากของเบ้าหลอมเท่ากับ 21 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางที่ก้น ของเบ้าเท่ากับ 15 เซนติเมตร และความสูงของเบ้าหลอมเท่ากับ 27 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.1 เบ้านี้มีความหนาประมาณ 2 เซนติเมตร ดังนั้นจะมีขนาดภายในเบ้าคิดเป็นเส้นผ่านศูนย์กลางที่ปากของเบ้าเท่ากับ 17 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางที่ก้นของเบ้าเท่ากับ 11 เซนติเมตร และมีความลึกของเบ้าเท่ากับ 25 เซนติเมตร น้ำหนักของเบ้าหลอมนี้หนักประมาณ 5.5 กิโลกรัม

ดังนั้นน้ำหนักของอะลูมิเนียมเหลวที่บรรจุเต็มเบ้าหลอมชนิดกราไฟต์ รุ่น A25 จะมีค่าประมาณ 12 กิโลกรัม ซึ่งสามารถเลือกใช้เบ้าหลอมดังกล่าวนี้ได้ตามขอบเขตที่กำหนดไว้ว่าสามารถหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียมได้ในปริมาณสูงสุดครั้งละ 10 กิโลกรัม



ภาพที่ 3.1 เบ้าหลอมชนิดกราไฟต์ ยี่ห้อ มอร์แกน รุ่น A25

3.1.2 การออกแบบโครงสร้างของเตาหลอมและฉนวนบุเตา

1) กำหนดชนิดและความหนาของฉนวนพื้นเตา พื้นเตาต้องรับน้ำหนักของเบ้ากราไฟต์และน้ำหนักอะลูมิเนียม รวมกันแล้วประมาณ 16 กิโลกรัม และต้องทำหน้าที่เป็นฉนวนกันความร้อนด้วย จึงเลือกใช้อิฐฉนวนความร้อน (Insulation Brick) เกรด C2 ซึ่งมีขนาดความกว้างเท่ากับ 11.5 เซนติเมตร ความยาวเท่ากับ 23 เซนติเมตร ความสูงเท่ากับ 7.6 เซนติเมตร โดยเรียงซ้อนกัน 2 ชั้น ได้พื้นเตาที่มีความหนาเท่ากับ 15.2 เซนติเมตร

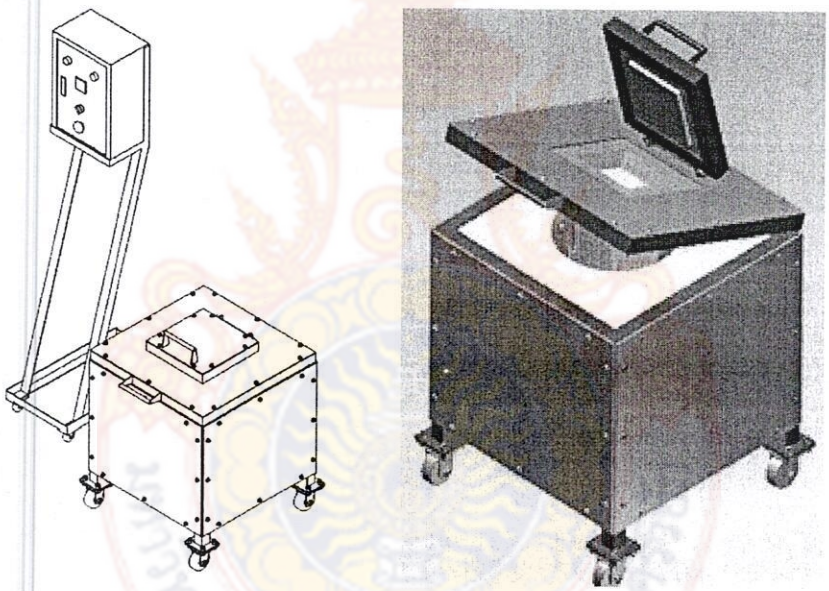
2) กำหนดชนิดและความหนาของฉนวนบุผนังเตา ต้องการวัสดุน้ำหนักเบาและเป็นฉนวนความร้อน เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนภายในเตา จึงเลือกใช้เซรามิกกันความร้อนแบบผืนผ้า (Ceramic Fiber Blanket) ซึ่งมีความหนา 5 เซนติเมตร วางเรียงซ้อนกัน 2 ชั้นครึ่ง ได้ความหนารวมเท่ากับ 12.5 เซนติเมตร

3) กำหนดชนิดและความหนาของฉนวนด้านบนของเตา เลือกใช้เซรามิกกันความร้อนแบบแผ่น (Ceramic Fiber Vacuum Board) ซึ่งมีความหนา 5 เซนติเมตร วางเรียงซ้อนกัน 2 ชั้น ได้ความหนารวมเท่ากับ 10 เซนติเมตร

4) ชุดตรวจวัดอุณหภูมิภายในเตา เลือกใช้เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) โดยมีชนิดของไส้แบบ K (CA) ขนาดของปลอกป้องกัน เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และยาว 300 มิลลิเมตร

5) ชุดให้ความร้อน (Heater) เลือกใช้ขดลวดความต้านทานแบบสำเร็จรูป เป็นแผงขดลวดที่มีกำลังไฟฟ้า 1.1 กิโลวัตต์ จำนวน 6 แผง กำลังไฟฟ้ารวมเท่ากับ 6.6 กิโลวัตต์ ใช้กับไฟฟ้า 3 เฟส ที่มีแรงดัน 380 โวลต์

6) โครงเตา ออกแบบเป็นรูปร่างเหมือนกล่องสี่เหลี่ยมที่มีขนาดกว้างเท่ากับ 60 เซนติเมตร ยาวเท่ากับ 60 เซนติเมตร และสูงเท่ากับ 55 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 แบบ (Drawing) ของเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานที่ได้ทำการออกแบบไว้

3.1.3 การคำนวณปริมาณความร้อนที่เตาต้องการใช้

1) การคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ให้กับอะลูมิเนียม ปริมาณของอะลูมิเนียมที่ใช้ในการหลอม 10 กิโลกรัม ซึ่งมีความร้อนจำเพาะเท่ากับ 0.91 กิโลจูลต่อกิโลกรัมเคลวิน และมีความร้อนแฝงของการหลอมละลายเท่ากับ 398 กิโลจูลต่อกิโลกรัม โดยจะให้ความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส หรือ 303 เคลวิน จนถึงอุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส หรือ 1,023 เคลวิน

จากนั้นกำหนดเวลาในการหลอมอะลูมิเนียม 10 กิโลกรัม ได้ทั้งหมดภายในเวลาไม่เกิน 180 นาที ซึ่งสามารถคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ใช้เพื่อทำให้อะลูมิเนียม 10 กิโลกรัม หลอมละลายได้จากสมการที่ 2.6 ดังนี้

$$q_{k} = \frac{mC_p(T_1 - T_2) + mLH}{t}$$

แทนค่าในสมการที่ 2.6 จะได้ปริมาณความร้อนเท่ากับ

$$q_{k1} = \frac{[10 \times 0.91 \times (1023 - 303)] + (10 \times 398)}{180 \times 60}$$

$$= 0.975 \text{ กิโลจูลต่อวินาที}$$

$$= 975 \text{ วัตต์}$$

เพราะฉะนั้นปริมาณความร้อนที่ใช้กับอะลูมิเนียม 10 กิโลกรัม หลอมละลายที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ในเวลา 180 นาที จะมีค่าเท่ากับ 975 วัตต์

2) การคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ให้กับเบ้ากราไฟต์ น้ำหนักของเบ้ากราไฟต์ 5.5 กิโลกรัม ซึ่งมีความร้อนจำเพาะของเบ้ากราไฟต์เท่ากับ 0.83 กิโลจูลต่อกิโลกรัม เคลวิล โดยให้ความร้อนจากอุณหภูมิ 303 เคลวิล จนถึงอุณหภูมิ 1,023 เคลวิล จะสามารถคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ให้กับเบ้ากราไฟต์ ในเวลา 180 นาที ได้จากสมการที่ 2.5 ดังนี้

$$q_{k} = \frac{mC_p(T_1 - T_2)}{t}$$

แทนค่าในสมการที่ 2.5 จะได้ปริมาณความร้อนเท่ากับ

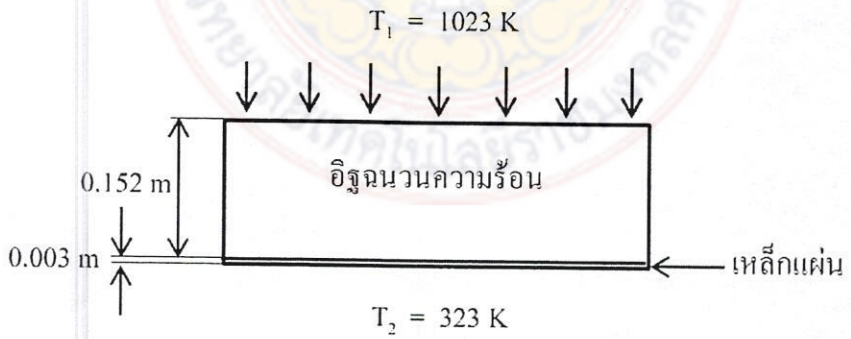
$$q_{k2} = \frac{5.5 \times 0.83 \times (1023 - 303)}{(180 \times 60)}$$

$$= 0.304 \text{ กิโลจูลต่อวินาที}$$

$$= 304 \text{ วัตต์}$$

เพราะฉะนั้นปริมาณความร้อนที่ให้กับเบ้ากราไฟต์ ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ในเวลา 180 นาที จะมีค่าเท่ากับ 304 วัตต์

3) การคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านพื้นด้านล่างของเตา เมื่อต้องการความร้อนภายในเตาเท่ากับ 750 องศาเซลเซียส หรือ 1,023 เคลวิล และอุณหภูมิผิวนอกของเตาไม่เกิน 50 องศาเซลเซียส หรือ 323 เคลวิล โดยพื้นด้านล่างของเตามี 2 ชั้น คือ ชั้นในเป็นอิฐฉนวนความร้อน มีความหนาเท่ากับ 0.152 เมตร มีค่าการนำความร้อนเท่ากับ 0.45 วัตต์ต่อเมตรเคลวิล ชั้นที่ 2 คือ เหล็กแผ่นหนา 0.003 เมตร มีค่าการนำความร้อนเท่ากับ 36 วัตต์ต่อเมตรเคลวิล พื้นที่ของผนังพื้นด้านล่างของเตาที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อนเท่ากับ 0.36 ตารางเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 ทิศทางการไหลของความร้อนผ่านผนังพื้นด้านล่างของเตา

จากสมการที่ 2.3 สามารถคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านพื้นด้านล่างของเตาได้ดังนี้

$$q_{k} = \frac{T_1 - T_2}{\left[\left(\frac{L_A}{k_A A_A}\right)+\left(\frac{L_B}{k_B A_B}\right)+\left(\frac{L_C}{k_C A_C}\right)\right]}$$

แทนค่าในสมการที่ 2.3 จะได้ปริมาณความร้อนเท่ากับ

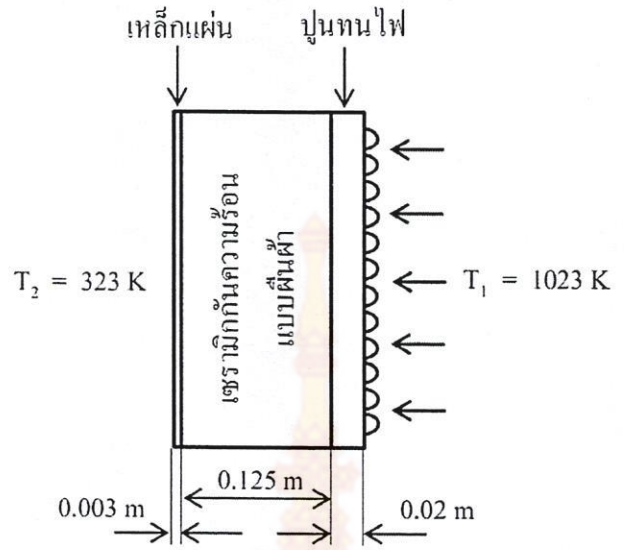
$$q_{k3} = \frac{(1023 - 323)}{\left[\left(\frac{0.152}{0.45 \times 0.36}\right)+\left(\frac{0.003}{36 \times 0.36}\right)\right]}$$

$$= \frac{700}{0.938 + (2.315 \times 10^{-4})}$$

$$= 746 \text{ วัตต์}$$

เพราะฉะนั้นอัตราการส่งผ่านความร้อนที่พื้นล่างของเตามีค่าเท่ากับ 746 วัตต์

4) การคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านผนังเตาทั้ง 4 ด้าน เมื่อความร้อนภายในเตาเท่ากับ 1,023 เคลวิล และต้องการอุณหภูมิผิวนอกของเตาไม่เกิน 323 เคลวิล โดยผนังด้านข้างจะมี 3 ชั้น คือ ด้านในจะมีปูนทนไฟมีความหนาเท่ากับ 0.02 เมตร มีค่าการนำความร้อนเท่ากับ 0.76 วัตต์ต่อเมตรเคลวิล ชั้นที่ 2 คือ เซรามิกกันความร้อนแบบผืนผ้ามีความหนาเท่ากับ 0.125 เมตร มีค่าการนำความร้อนเท่ากับ 0.18 วัตต์ต่อเมตร เคลวิล และชั้นนอกสุดคือเหล็กแผ่นหนา 0.003 เมตร มีค่าการนำความร้อนเท่ากับเท่ากับ 36 วัตต์ต่อเมตรเคลวิล พื้นที่ของผนังด้านข้างที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อนเท่ากับ 0.72 ตารางเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 ทิศทางการไหลของความร้อนผ่านผนังด้านข้างของเตา

จากสมการที่ 2.3 สามารถคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านผนังด้านข้างของเตาได้ดังนี้

$$q_{k} = \frac{T_1 - T_2}{\left[\left(\frac{L_A}{k_A A_A}\right) + \left(\frac{L_B}{k_B A_B}\right) + \left(\frac{L_C}{k_C A_C}\right)\right]}$$

แทนค่าในสมการที่ 2.3 จะได้ปริมาณความร้อนเท่ากับ

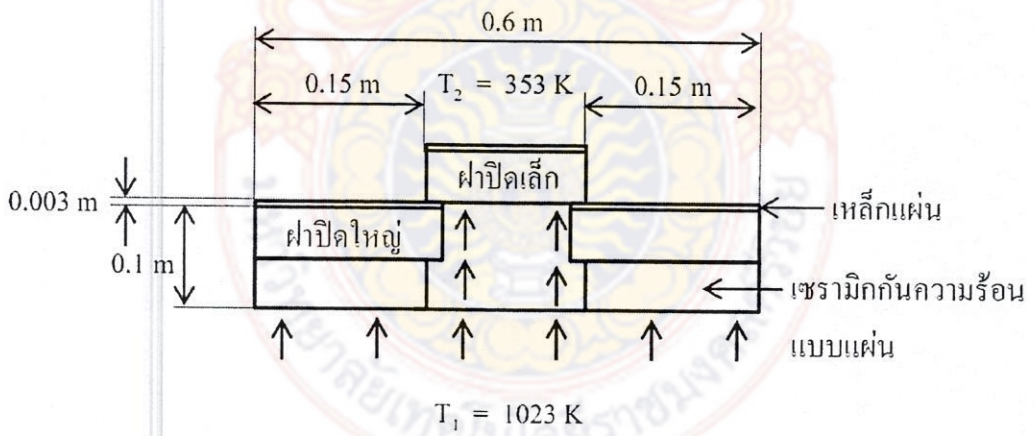
$$q_{k4} = \frac{(1023 - 323)}{\left[\left(\frac{0.02}{0.76 \times 0.72}\right) + \left(\frac{0.125}{0.18 \times 0.72}\right) + \left(\frac{0.003}{36 \times 0.72}\right)\right]}$$

$$= \frac{700}{0.037 + 0.965 + (1.157 \times 10^{-4})}$$

= 699 วัตต์

เพราะฉะนั้นอัตราการส่งผ่านความร้อนที่ผนังเตาทั้ง 4 ด้าน มีค่าเท่ากับ 699 วัตต์

5) การคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านผนังด้านบนของเตา เมื่อความร้อนภายในเตาเท่ากับ 1,023 เคลวิล และต้องการอุณหภูมิผิวนอกของเตาไม่เกิน 80 องศาเซลเซียส หรือ 353 เคลวิล โดยฝาด้านบนของเตาจะมี 2 ชั้น คือชั้นในเป็นเซรามิกกันความร้อนแบบแผ่นมีความหนาเท่ากับ 0.1 เมตร สำหรับฝาปิดใหญ่ และความหนาเท่ากับ 0.05 เมตร สำหรับฝาปิดเล็ก โดยเซรามิกกันความร้อนแบบแผ่นที่จะใช้มีค่าการนำความร้อนเท่ากับ 0.25 วัตต์ต่อเมตร เคลวิล ชั้นที่ 2 คือ เหล็กแผ่นหนา 0.003 เมตร มีค่าการนำความร้อนเท่ากับ 36 วัตต์ต่อเมตรเคลวิล พื้นที่ของฝาด้านบนของเตาสำหรับฝาปิดใหญ่เท่ากับ 0.27 ตารางเมตร และพื้นที่ของฝาด้านบนของเตาสำหรับฝาปิดเล็กเท่ากับ 0.09 ตารางเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 ทิศทางการไหลของความร้อนผ่านฝาปิดด้านบนของเตา

จากสมการที่ 2.3 สามารถคำนวณปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านฝาด้านบนของเตาได้ดังนี้

$$q_{k} = \frac{T_1 - T_2}{\left[\left(\frac{L_A}{k_A A_A}\right) + \left(\frac{L_B}{k_B A_B}\right) + \left(\frac{L_C}{k_C A_C}\right)\right]}$$

แทนค่าในสมการที่ 2.3 จะได้ปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านฝาปิดใหญ่เท่ากับ

$$q_{k5} = \frac{(1023 - 353)}{\left[\left(\frac{0.1}{0.25 \times 0.27}\right) + \left(\frac{0.003}{36 \times 0.27}\right)\right]}$$

$$= \frac{670}{1.48 + (3.086 \times 10^{-4})}$$

$$= 453 \text{ วัตต์}$$

แทนค่าในสมการที่ 2.3 จะได้ปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านฝาปิดเล็กเท่ากับ

$$q_{k6} = \frac{(1023 - 353)}{\left[\left(\frac{0.05}{0.25 \times 0.09}\right) + \left(\frac{0.003}{36 \times 0.09}\right)\right]}$$

$$= \frac{670}{2.22 + (9.26 \times 10^{-4})}$$

$$= 302 \text{ วัตต์}$$

เพราะฉะนั้นอัตราการส่งผ่านความร้อนที่ฝาด้านบนของเตามีค่าเท่ากับ 453 วัตต์ สำหรับฝาปิดใหญ่ และ 302 วัตต์ สำหรับฝาปิดเล็ก

ดังนั้นปริมาณความร้อนที่ใช้กับเตาทั้งหมด เพื่อทำให้อะลูมิเนียม 10 กิโลกรัม หลอมละลายที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ในเวลา 180 นาที จะเท่ากับ $q_{k1} + q_{k2} + q_{k3} + q_{k4} + q_{k5} + q_{k6}$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3,479 วัตต์ หรือประมาณ 3.5 กิโลวัตต์ ซึ่งปริมาณความร้อนดังกล่าวนี้มีค่าน้อยกว่ากำลังไฟฟ้ารวมของเตาที่มีค่าเท่ากับ 6.6 กิโลวัตต์ ทำให้เตาหลอมที่ได้สร้างขึ้นสามารถหลอมอะลูมิเนียม 10 กิโลกรัม ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ในเวลา 180 นาที ตามที่กำหนดไว้ได้

3.2 การสร้างเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทาน

การสร้างเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทาน จะสร้างตามที่ได้ออกแบบและคำนวณเอาไว้ โดยได้ทำการจัดซื้อจัดหาวัสดุและชิ้นส่วนต่างๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในการสร้างเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทาน ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 รายการวัสดุและชิ้นส่วนมาตรฐาน

ลำดับที่	รายการ	จำนวน	ราคาต่อหน่วย (บาท)	จำนวนเงิน (บาท)
1	เหล็กฉาก 3 mm. × 1 1/2" × 6 m.	3 เส้น	333	999
2	เหล็กแผ่น 3 mm. × 4" × 8"	1 แผ่น	2,360	2,360
3	ลวดเชื่อม RB-26 2.6 mm.	1 ห่อ	126	126
4	บรูชประตู 1"	4 ตัว	26	104
5	ตัวหนอน STL M5 × 10	30 ตัว	15	450
6	น๊อต 1/4"	60 ตัว	2	120
7	สีสเปรย์ทนความร้อน	2 กระป๋อง	120	240
8	สีน้ำมันออสการ์ 147	2 กระป๋อง	140	280
9	เบ้าหลอมโลหะ ยี่ห้อ มอร์แกน A25	1 ใบ	3,046	3,046
10	อิฐทนไฟ C2 (H126) ST 76 (size: 76 × 115 × 230 mm.)	18 ก้อน	125	2,250

ตารางที่ 3.1 รายการวัสดุและชิ้นส่วนมาตรฐาน (ต่อ)

ลำดับที่	รายการ	จำนวน	ราคาต่อหน่วย (บาท)	จำนวนเงิน (บาท)
11	Ceramic fiber Board (Max. Temp. 1260□C) (size: 610 × 914 × 50t. mm.)	1 แผ่น	2,300	2,300
12	Ceramic fiber Blanket (Max. Temp. 1260□C) (size: 600 × 3600 × 50t. mm.)	1 ม้วน	1,500	1,500
13	เทอร์โมคัพเปิ้ล แบบรุ่น JB-35C Dia. 10 x 300 mm. Type K (CA) พร้อมสาย ซิลิโคน 7/0.2 × 2 ยาว 2 m. Plug DP-50	1 อัน	2,950	2,950
14	ตู้ไฟ TC4 (12 × 18 × 6")	1 ตู้	1,065	1,065
15	เบรกเกอร์ EA33AC 3P 30A FUJI	1 ตัว	460	460
16	คอนแทคเตอร์ SC-5-1 220V FUJI	1 ตัว	675	675
17	โซลิดสเตทรีเลย์/3 เฟส ยี่ห้อ : SHINKO รุ่น SGD340	1 อัน	3,500	3,500
18	Heat sink ยี่ห้อ : SANGI รุ่น KH104-104	1 อัน	520	520
19	เครื่องวัดอุณหภูมิ ยี่ห้อ: SHINKO รุ่น ACS-13A-S/M	1 อัน	4,000	4,000
20	ลิมิทสวิทซ์ TZ-8122 TEND	1 ตัว	415	415
21	ปลั๊กเพาเวอร์ตัวผู้ 3P + N + E 16A 015 CEE	1 ตัว	110	110
22	เทอร์มินอลมีฝาปิด 12P 25A TB-2512L	3 แถว	50	150
23	ไฟล็อตแลมป์ AD-16-22E R, Y, G	2 ดวง	25	50
24	ปุ่มกดดอกเห็ดล็อดได้ T2BKR 22 mm.	1 ตัว	135	135
25	สวิทช์ลูกศร 25 mm. TSS-25 TEND	1 ตัว	60	60
26	ฐานฟิวส์ช็อกเก็ต 10 × 38 RT18-32/1P	4 อัน	45	180
27	ฟิวส์กระบอก 2A 10 × 38 mm.OEZ	1 ตัว	12	12

ตารางที่ 3.1 รายการวัสดุและชิ้นส่วนมาตรฐาน (ต่อ)

ลำดับที่	รายการ	จำนวน	ราคาต่อหน่วย (บาท)	จำนวนเงิน (บาท)
28	ฟิวส์กระบอก 16A 10 × 38 RO15 mm. OEZ	3 ตัว	12	36
29	สายทนความร้อน ø 6 mm.	5 เมตร	72	360
30	สายทนความร้อน ø 4 mm.	5 เมตร	49	245
31	สายทนความร้อน ø 2.5 mm.	5 เมตร	33	165
32	สายไฟ VSF 1 × 4 NATION	25 เมตร	18	450
33	สายไฟ VSF 1 × 6 NATION	5 เมตร	27	135
34	สายไฟ VSF 1 × 0.5 NATION	15 เมตร	3	45
35	ท่ออ่อนกันน้ำ 3/4"	5 เมตร	48	240
36	คอนเน็คเตอร์ท่ออ่อนกันน้ำ 3/4"	4 ตัว	36	144
37	ปลอกสายใยแก้ว	5 เส้น	47	235
38	รางแมกเนติก/รีเลย์	1 เส้น	43	43
39	หางปลากลม/แฉกหุ้ม	100 ตัว	2.5	250
40	รางวายดัก 40 × 40 EURODUCT โปร่ง	1 เส้น	145	145

ตารางที่ 3.2 การประมาณค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการสร้างเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทาน

ลำดับที่	รายการ	ราคา (บาท)
1	โครงสร้างเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทาน	16,725.00
2	ระบบไฟฟ้าของเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทาน	13,825.00
	รวมเป็นเงิน	30,550.00
	ภาษีมูลค่าเพิ่ม 7 %	2,138.50
	รวมเป็นเงินทั้งสิ้น	**32,688.50**

จากตารางที่ 3.2 ทำให้ทราบต้นทุนการสร้างเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานในครั้งนี้ รวมเป็นเงินทั้งสิ้น 32,688.50 บาท

เมื่อดำเนินการจัดซื้อจัดหาวัสดุและชิ้นส่วนต่างๆ ที่จำเป็นแล้ว ในส่วนของการดำเนินการสร้างเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทาน จะประกอบด้วย

3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

ในส่วนของการดำเนินการสร้างจะประกอบไปด้วยเครื่องมือ เครื่องจักรที่เข้ามาเกี่ยวข้องดังนี้

1) เครื่องกลึง เฮอร์ริสัน รุ่น เอ็ม 300 อาร์ (Harrison Model M 300R)

2) แท่นตัดไฟเบอร์ บ๊อช รุ่น จีซีโอ 2000 (BOSCH Model GCO 2000)

3) เครื่องเชื่อมไฟฟ้า ไดซิ รุ่น ดี เอ.-ซี.ดี. 400 (Daichi Model DA.- C.D. 400)

4) เครื่องมือกลพื้นฐาน มีดังต่อไปนี้

4.1) กลุ่มเครื่องมือมีดังต่อไปนี้ ตะไบ ค้อน ประแจปากตาย เลื่อย แคล้มจับยึดชิ้นงาน

4.2) กลุ่มเครื่องมือกลมีดังต่อไปนี้ เครื่องเจียระไนมือ สว่านมือ

4.3) กลุ่มเครื่องมือวัดมีดังต่อไปนี้ เวอร์เนียคาลิปเปอร์ เวอร์เนียไฮเกต ตลับเมตร ฟุตเหล็ก ฉาก

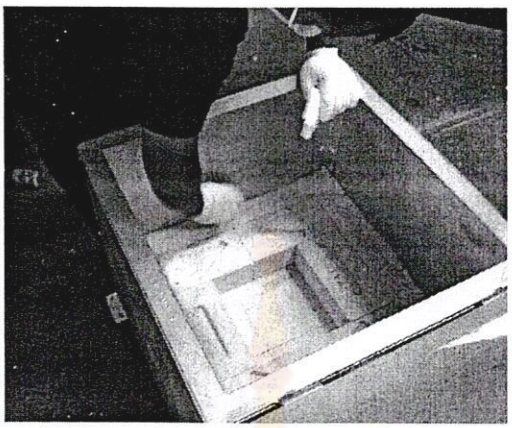
4.4) กลุ่มอุปกรณ์ป้องกันมีดังต่อไปนี้ ถุงมือหนัง แว่นตา จุกอุดหู

3.2.2 ดำเนินการสร้างและประกอบเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทาน

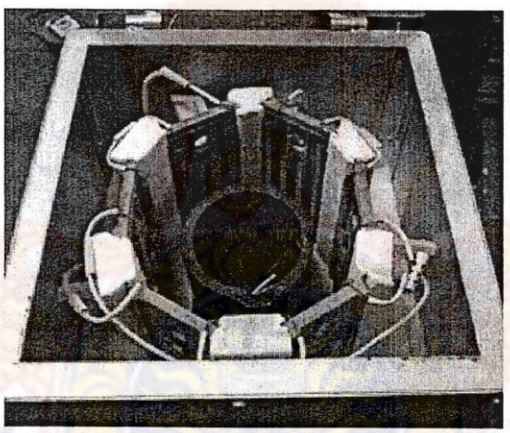
ด้วยการติดตั้งขดลวดความต้านทานกับผนังเตา บุผนังเตาด้วยวัสดุฉนวนกันความร้อน และติดตั้งตู้ควบคุมวงจรไฟฟ้าสำหรับเตาหลอม

1) พื้นเตาเลือกใช้อิฐฉนวนความร้อน (Insulation Brick) เกรด C2 ดังแสดงในภาพที่ 3.6 ซึ่งมีขนาดความกว้างเท่ากับ 11.5 เซนติเมตร ความยาวเท่ากับ 23 เซนติเมตร ความสูงเท่ากับ 7.6 เซนติเมตร โดยเรียงซ้อนกัน 2 ชั้น ได้พื้นเตาที่มีความหนาเท่ากับ 15.2 เซนติเมตร

2) ใช้ขดลวดความต้านทานแบบสำเร็จรูป เป็นแผงขดลวดที่มีกำลังไฟฟ้า 1.1 กิโลวัตต์ จำนวน 6 แผง กำลังไฟฟ้ารวมเท่ากับ 6.6 กิโลวัตต์ ใช้กับไฟฟ้า 3 เฟส ที่มีแรงดัน 380 โวลต์ ดังแสดงในภาพที่ 3.7



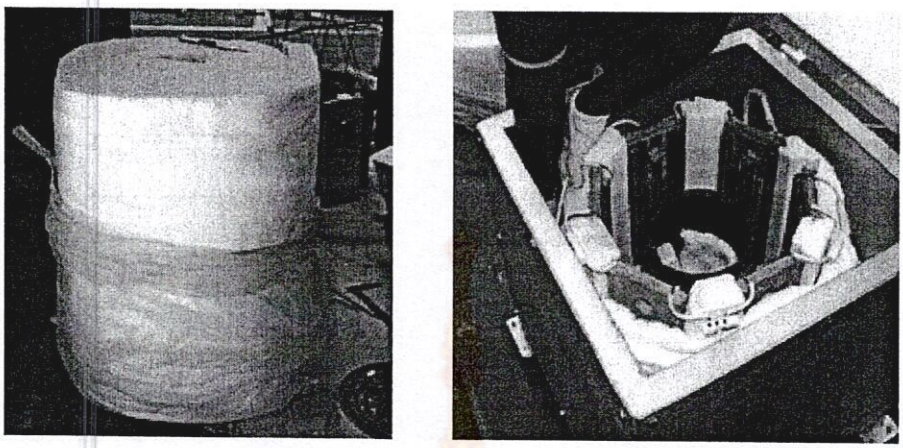
ภาพที่ 3.6 พื้นเตาเลือกใช้อิฐฉนวนความร้อน (Insulation Brick) เกรด C2



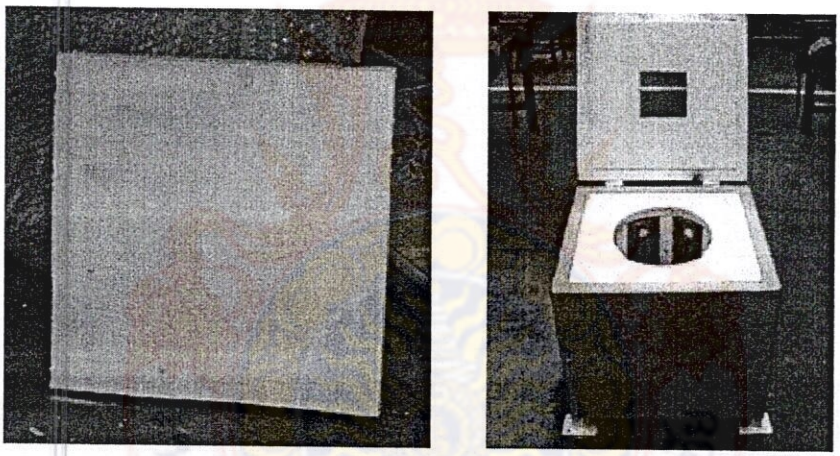
ภาพที่ 3.7 แผงขดลวดความต้านทานแบบสำเร็จรูปที่ใช้ให้ความร้อนภายในเตาหลอม

3) ฉนวนกันความร้อนบุผนัง เลือกใช้เซรามิกกันความร้อนแบบผืนผ้า (Ceramic Fiber Blanket) ซึ่งมีความหนา 5 เซนติเมตร วางเรียงซ้อนกัน 2 ชั้นครึ่ง ได้ความหนารวมเท่ากับ 12.5 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.8

4) ฉนวนกันความร้อนด้านบนของเตา เลือกใช้เซรามิกกันความร้อนแบบแผ่น (Ceramic Fiber Vacuum Board) ซึ่งมีความหนา 5 เซนติเมตร วางเรียงซ้อนกัน 2 ชั้นได้ความหนารวมเท่ากับ 10 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.9



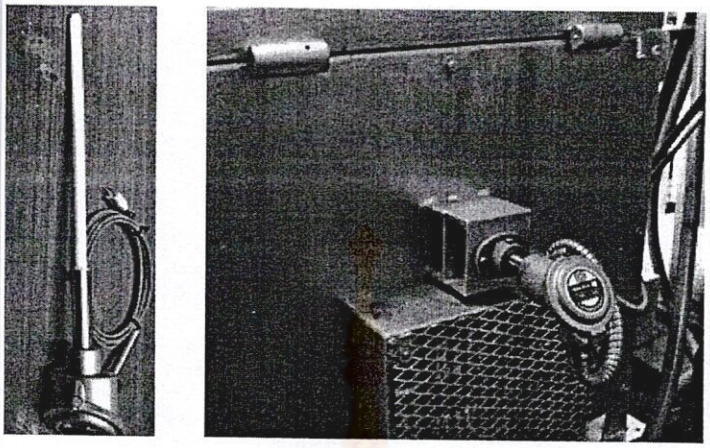
ภาพที่ 3.8 ฉนวนกันความร้อนบุผนัง เลือกใช้เซรามิกกันความร้อนแบบผืนผ้า



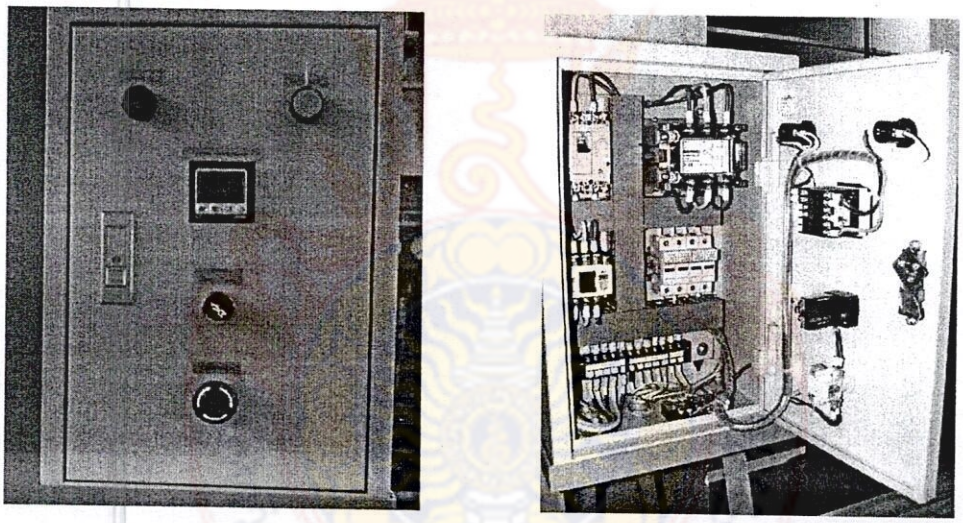
ภาพที่ 3.9 ฉนวนกันความร้อนด้านบนของเตา เลือกใช้เซรามิกกันความร้อนแบบแผ่น

5) เลือกใช้เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) โดยมีชนิดของไส้แบบ K (CA) ขนาดของปลอกป้องกัน เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และยาว 300 มิลลิเมตร เพื่อตรวจวัดอุณหภูมิภายในเตา ดังแสดงในภาพที่ 3.10

6) ตู้ควบคุมอุณหภูมิและวงจรไฟฟ้า ลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยม กว้าง 20 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร และสูง 45 เซนติเมตร ตั้งอยู่บนฐานรองรับ ที่สูง 120 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.11



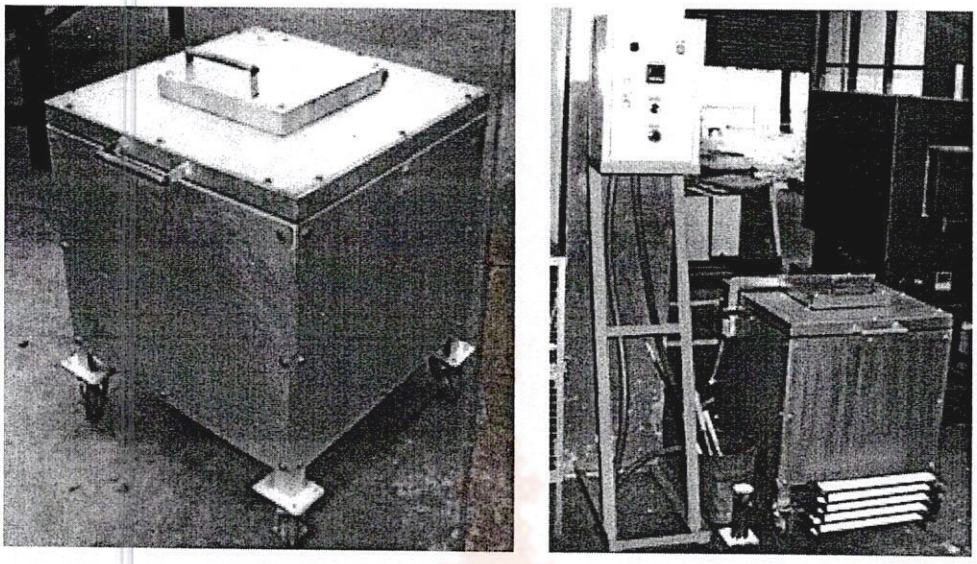
ภาพที่ 3.10 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) สำหรับตรวจวัดอุณหภูมิภายในเตา



(ก) (ข)

ภาพที่ 3.11 (ก) ตู้ควบคุมอุณหภูมิ และ (ข) วงจรไฟฟ้าภายในตู้ควบคุมอุณหภูมิ

7) โครงเตา ทำการเชื่อมประกอบเป็นรูปร่างเหมือนกล่องสี่เหลี่ยมที่มีขนาดกว้างเท่ากับ 60 เซนติเมตร ยาวเท่ากับ 60 เซนติเมตร และสูงเท่ากับ 55 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.12 เตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานที่ดำเนินการสร้างและประกอบเสร็จแล้ว

3.3 วัตถุดิบที่ใช้ในการทดสอบเตา

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดสอบเตา จะใช้เศษโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่องมือกล ดังแสดงในภาพที่ 3.13 ในปริมาณ 10 กิโลกรัมต่อครั้ง นำมาทำการหลอมด้วยเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานที่สร้างขึ้น

ภาพที่ 3.13 เศษโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ใช้ในการหลอมเพื่อทดสอบเตา

3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.4.1 เตาหลอมไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานที่ได้สร้างขึ้น

3.4.2 เศษโลหะผสมอะลูมิเนียม

3.4.3 เบ้าหลอม

3.4.4 เทอร์โมคัปเปิลแบบจุ่ม

3.4.5 เทอร์โมมิเตอร์อินฟราเรด

3.4.6 หน้ากากกันสะเก็ต

3.4.7 ถุงมือหนังกันความร้อน

3.4.8 นาฬิกาจับเวลา

3.4.9 ปูนทนไฟ

3.4.10 กระบวยสเตนเลสสำหรับตักอะลูมิเนียมเหลว

3.4.11 กระบวยสเตนเลสเจาะรูสำหรับตักสแล็กออก

3.4.12 รางหล่ออลูมิเนียมแท่ง

3.4.13 เครื่องชั่งน้ำหนัก

3.4.14 ฟลักซ์ทำความสะอาดน้ำโลหะ

3.4.15 ฟลักซ์ไล่แก๊สไฮโดรเจนในน้ำโลหะ

3.5 วิธีการทดลอง

ทำการทดลองหลอมเศษโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่องมือกล ในปริมาณ 10 กิโลกรัมต่อครั้ง ด้วยเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานที่สร้างขึ้น โดยตั้งอุณหภูมิภายในเตาหลอมที่ 750 องศาเซลเซียส

3.5.1 การทดลองเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทาน เพื่อหาอัตราการให้ความร้อนต่อหน่วยเวลาที่ใช้ในการหลอมเศษโลหะผสมอะลูมิเนียม 10 กิโลกรัม ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส

3.5.2 ทำการหาค่าประสิทธิภาพของเตาหลอมเพื่อใช้ในการประเมินสมรรถนะทางความร้อนของเตาหลอม

3.5.3 การทดลองเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทาน เพื่อตรวจวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณผนังเตาหลอมด้านต่างๆ โดยจะใช้อุณหภูมิภายในเตาหลอมในการทดลองที่ 200, 400, 600, 800, 900 และ 1,000 องศาเซลเซียส โดยแต่ละอุณหภูมิจะเปิดค้างไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ระยะเวลาการตรวจวัดอุณหภูมิช่วงละ 10 นาที

3.5.4 ทำการหาค่าปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการหลอม (Yield of Melting) ของเศษโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ 10 กิโลกรัม เพื่อเปรียบเทียบปริมาณของอะลูมิเนียมที่ได้และปริมาณขี้โลหะ (Slag) ที่เกิดขึ้น

3.5.5 ทำการหาค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อชั่วโมง เพื่อวิเคราะห์หาต้นทุนในการหลอมเศษโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ 10 กิโลกรัม ด้วยเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานดังกล่าว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

บทที่ 4
ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์

จากการทดสอบการทำงานของเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทาน และได้ทำการออกแบบการทดลองโดยการศึกษาหาอัตราการให้ความร้อนต่อหน่วยเวลาที่ใช้ในการหลอมเศษโลหะผสมอะลูมิเนียม หาค่าประสิทธิภาพของเตาหลอมเพื่อใช้ในการประเมินสมรรถนะทางความร้อนของเตาหลอม ตรวจวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณผนังเตาหลอมด้านต่างๆ และหาค่าใช้จ่ายในการหลอมเศษโลหะผสมอะลูมิเนียมในแต่ละครั้ง โดยมีรายละเอียดการดำเนินงานและการทดสอบประสิทธิภาพของเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานที่ได้สร้างขึ้นดังนี้

4.1 ผลการทดลอง

4.1.1 การทดลองเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทาน เพื่อหาอัตราการให้ความร้อนต่อหน่วยเวลาที่ใช้ในการหลอมเศษโลหะผสมอะลูมิเนียม 10 กิโลกรัม ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส จับเวลาช่วงละ 5 นาที แล้วทำการตรวจวัดอุณหภูมิภายในเตาหลอม จนอุณหภูมิภายในเตาหลอมถึง 750 องศาเซลเซียส ทำการทดลองหลอม 3 ครั้ง ซึ่งผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาที่ใช้ไปในการให้ความร้อน

เวลา (นาที)	อุณหภูมิในเตา (องศาเซลเซียส)			อุณหภูมิเฉลี่ย (องศาเซลเซียส)	อัตราการให้ความร้อน (องศาเซลเซียสต่อนาที)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	30	30	30	30.0	-
5	190	192	166	182.7	30.5
10	307	306	291	301.3	23.7
15	405	403	399	402.3	20.2
20	488	485	487	486.7	16.9
25	557	555	560	557.3	14.1
30	615	613	623	617.0	11.9
35	665	666	677	669.3	10.5
40	714	713	716	714.3	9.0

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาที่ใช้ไปในการให้ความร้อน (ต่อ)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิในเตา (องศาเซลเซียส)			อุณหภูมิเฉลี่ย (องศาเซลเซียส)	อัตราการให้ความร้อน (องศาเซลเซียสต่อนาที)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
45	731	730	733	731.3	3.4
50	742	742	742	742.0	2.1
55	747	747	747	747.0	1.0
60	750	750	750	750.0	0.6
75	750	750	750	750.0	-
90	750	750	750	750.0	-
105	750	750	750	750.0	-
120	750	750	750	750.0	-
135	750	750	750	750.0	-
150	750	750	750	750.0	-
165	750	750	750	750.0	-
180	750	750	750	750.0	-

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อเปิดใช้งานเตาไฟฟ้าดังกล่าวเพื่อหลอมเศษโลหะผสมอะลูมิเนียม ภายในระยะเวลา 60 นาที เตาไฟฟ้าดังกล่าวสามารถเพิ่มอุณหภูมิภายในเตาจาก 30 องศาเซลเซียส ไปอยู่ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ดังนั้นอัตราการให้ความร้อนเฉลี่ยของเตาไฟฟ้าในช่วงระยะเวลา 60 นาทีแรก สามารถหาค่าได้จากสมการที่ 4.1 ดังนี้

$$\text{อัตราการให้ความร้อนเฉลี่ย} = \frac{T_f - T_s}{t_f - t_s} = \frac{\Delta T}{\Delta t} \qquad (4.1)$$

เมื่อ T_f คือ อุณหภูมิสุดท้าย (Final Temperature) มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส

T_s คือ อุณหภูมิเริ่มต้น (Start Temperature) มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส

t_f คือ เวลาสุดท้าย (Final Time) มีหน่วยเป็น นาที

t_s คือ เวลาเริ่มต้น (Start Time) มีหน่วยเป็น นาที

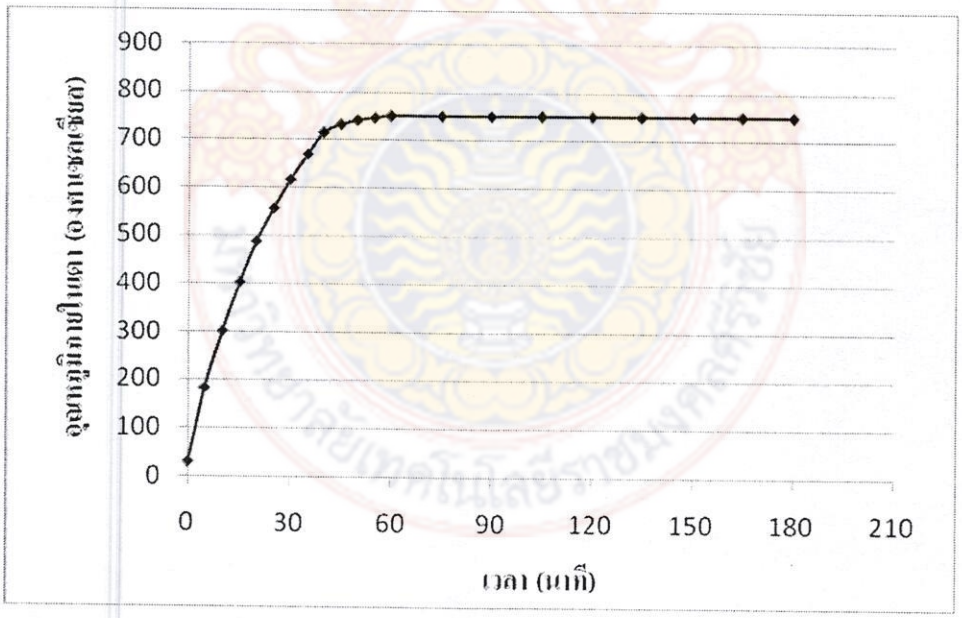
แทนค่าในสมการที่ 4.1 จะได้อัตราการให้ความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ

$$\text{อัตราการให้ความร้อนเฉลี่ย} = \frac{750-30}{60-0}$$

$$= 12.0 \text{ องศาเซลเซียสต่อนาที}$$

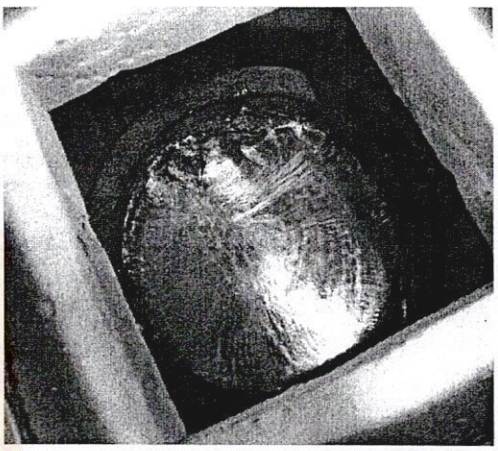
ดังนั้นอัตราการให้ความร้อนเฉลี่ยของเตาไฟฟ้า จากอุณหภูมิเริ่มต้นที่อุณหภูมิห้องเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส ให้เพิ่มขึ้นไปอยู่ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ในช่วงระยะเวลา 60 นาทีแรก จะทำให้อัตราการให้ความร้อนเฉลี่ยของเตาไฟฟ้าดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 12 องศาเซลเซียสต่อนาที

และเมื่ออุณหภูมิภายในเตาเพิ่มสูงขึ้นถึงอุณหภูมิที่ตั้งไว้คือ 750 องศาเซลเซียสแล้ว หรือหลังจากเวลา 60 นาทีผ่านไป อุณหภูมิภายในเตาจะคงที่ ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส จนถึงเวลาครบ 180 นาที ดังแสดงในภาพที่ 4.1 เพื่อทำให้เศษโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมละลายกลายเป็นของเหลวทั้งหมด ดังแสดงในภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาหลอมกับเวลาที่ใช้ไปในการให้ความร้อน

(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.2 (ก) การตั้งอุณหภูมิในการหลอม และ (ข) อะลูมิเนียมหลอมเหลวที่ได้

4.1.2 การหาค่าประสิทธิภาพของเตาหลอมเพื่อใช้ในการประเมินสมรรถนะทางความร้อนของเตาหลอม ผลลัพธ์ที่ได้จากการวัดค่าต่างๆ และการคำนวณปริมาณความร้อนที่เข้าสู่เตาและปริมาณความร้อนที่ใช้ในเตา แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าปริมาณความร้อนที่เข้าสู่เตาและปริมาณความร้อนที่ใช้ในเตาหลอม

ชนิดของความร้อน	ปริมาณความร้อน		ประสิทธิภาพ
	(W)	(kJ/hr)	(%)
ความร้อนเข้าสู่เตา			
ความร้อนจาก Heater	6,582	23,695	100.0
ความร้อนที่ใช้ในเตา			
ความร้อนที่สูญเสียผ่านผนังเตา	2,200	7,920	33.4
ความร้อนสะสมของวัสดุในเตา	3,407	12,265	51.8
ความร้อนที่ถ่ายเทเพื่อทำให้อะลูมิเนียมหลอมเหลว	975	3,510	14.8
ความร้อนที่ใช้ในเตารวม	6,582	23,695	100.0

จากตารางที่ 4.2 พบว่าในการหลอมเศษโลหะผสมอะลูมิเนียม 10 กิโลกรัม ด้วยเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทาน ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส มีการสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตาอยู่ที่ 7,920 กิโลจูลต่อชั่วโมง หรือคิดเป็น 33.4 เปอร์เซ็นต์ของความร้อนที่เข้าสู่เตา และประสิทธิภาพทางความร้อนของการหลอมอะลูมิเนียมมีค่าเท่ากับ 14.8 เปอร์เซ็นต์

4.1.3 การทดลองเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทาน เพื่อหาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณผนังเตาหลอมด้านต่างๆ โดยจะใช้อุณหภูมิภายในเตาหลอมในการทดลองคือ 200, 400, 600, 800, 900 และ 1,000 องศาเซลเซียส โดยแต่ละอุณหภูมิจะเปิดค้างไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ระยะเวลาการทดลองช่วงละ 10 นาที ทำการทดลอง 3 ครั้ง ซึ่งผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองเตาเพื่อหาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณผนังเตาหลอมด้านต่างๆ

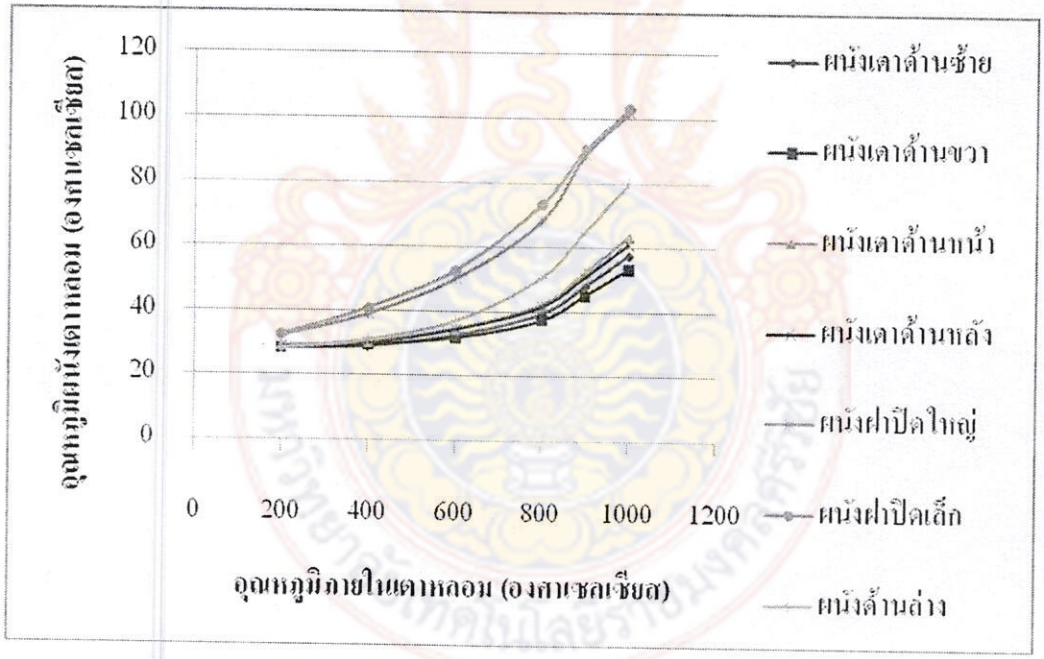
อุณหภูมิภายในเตา (องศาเซลเซียส)	ผนังเตาด้าน	อุณหภูมิผนังเตา (องศาเซลเซียส)			อุณหภูมิเฉลี่ย (องศาเซลเซียส)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
200	ซ้าย	27	29.5	28.1	28.2
	ขวา	26.9	29.7	28.3	28.3
	หน้า	27.3	30.0	29.5	28.9
	หลัง	26.8	29.6	29.6	28.7
	ฝาปิดใหญ่	30.6	33.1	32.1	31.9
	ฝาปิดเล็ก	30.5	33.6	32.8	32.4
	ล่าง	27.0	29.2	28.8	28.3
400	ซ้าย	27.2	30.6	28.3	28.8
	ขวา	27.1	31.0	30.7	29.6
	หน้า	28.0	31.9	30.9	30.3
	หลัง	28.6	31.3	30.3	30.1
	ฝาปิดใหญ่	35.2	40.9	40.0	38.7
	ฝาปิดเล็ก	36.3	43.6	42.1	40.7
	ล่าง	29.1	32.6	31.8	31.1

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองเตาเพื่อหาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณผนังเตาหลอมด้านต่างๆ (ต่อ)

อุณหภูมิภายในเตา (องศาเซลเซียส)	ผนังเตาด้าน	อุณหภูมิผนังเตา (องศาเซลเซียส)			อุณหภูมิเฉลี่ย (องศาเซลเซียส)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
600	ซ้าย	29.8	34.4	33.3	32.5
	ขวา	28.8	33.9	32.9	31.9
	หน้า	31.9	37.1	34.7	34.6
	หลัง	32.2	36.5	34.7	34.5
	ฝาปิดใหญ่	44.8	53.7	51.2	49.9
	ฝาปิดเล็ก	46.4	58.1	53.3	52.6
	ล่าง	34.7	39.4	37.0	37.0
800	ซ้าย	35.5	42.1	40.3	39.3
	ขวา	33.3	40.2	38.8	37.4
	หน้า	38.2	45.4	42.7	42.1
	หลัง	38.8	44.1	41.8	41.6
	ฝาปิดใหญ่	63.3	72.1	69.1	68.2
	ฝาปิดเล็ก	66.4	79.0	75.1	73.5
	ล่าง	43.3	55.6	52.8	50.6
900	ซ้าย	43.6	51.1	49.0	47.9
	ขวา	40.3	48.3	46.3	44.9
	หน้า	47.2	56.2	53.4	52.3
	หลัง	48.3	53.0	50.8	50.7
	ฝาปิดใหญ่	82.3	93.8	90.3	88.8
	ฝาปิดเล็ก	83.3	94.4	93.3	90.3
	ล่าง	56.2	70.5	67.8	64.8

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองเตาเพื่อหาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณผนังเตาหลอมด้านต่างๆ (ต่อ)

อุณหภูมิภายในเตา (องศาเซลเซียส)	ผนังเตาด้าน	อุณหภูมิผนังเตา (องศาเซลเซียส)			อุณหภูมิเฉลี่ย (องศาเซลเซียส)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
1,000	ซ้าย	52.6	61.3	59.1	57.7
	ขวา	47.6	57.3	54.6	53.2
	หน้า	58.1	66.9	65.3	63.4
	หลัง	55.4	61.3	66.2	60.9
	ฝาปิดใหญ่	96.5	106.4	102.5	101.8
	ฝาปิดเล็ก	98.8	105.2	104.8	102.9
	ล่าง	69.1	87.0	83.7	79.9



ภาพที่ 4.3 การเปรียบเทียบอุณหภูมิผนังเตาที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิภายในเตา

จากการทดลองหาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณผนังเตาด้านต่าง ๆ เพิ่มเติม ค่าของอุณหภูมิที่ได้โดยเฉลี่ยเมื่อนำมาทำการเขียนกราฟแผนภูมิเชิงเส้น ดังแสดงในภาพที่ 4.3 จากกราฟแผนภูมิเชิงเส้นแสดงได้ว่า ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงสุดที่สามารถให้อุณหภูมิภายในเตาได้ มีการถ่ายเทความร้อนออกสู่ผนังเตาด้านต่างๆ ซึ่งสามารถวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนผนังเตาด้านต่างๆ

ได้ดังนี้ ที่ผนังเตาด้านซ้าย, ขวา, หน้า, หลัง, ฝาปิดใหญ่, ฝาปิดเล็ก และผนังด้านล่าง อยู่ที่ 57.7, 53.2, 63.4, 60.9, 101.8, 102.9 และ 79.9 องศาเซลเซียส ตามลำดับ คิดเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยของผนังเตาทุกด้านมีค่าเท่ากับ 74.3 องศาเซลเซียส

4.2 ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการหลอม (Yield of Melting)

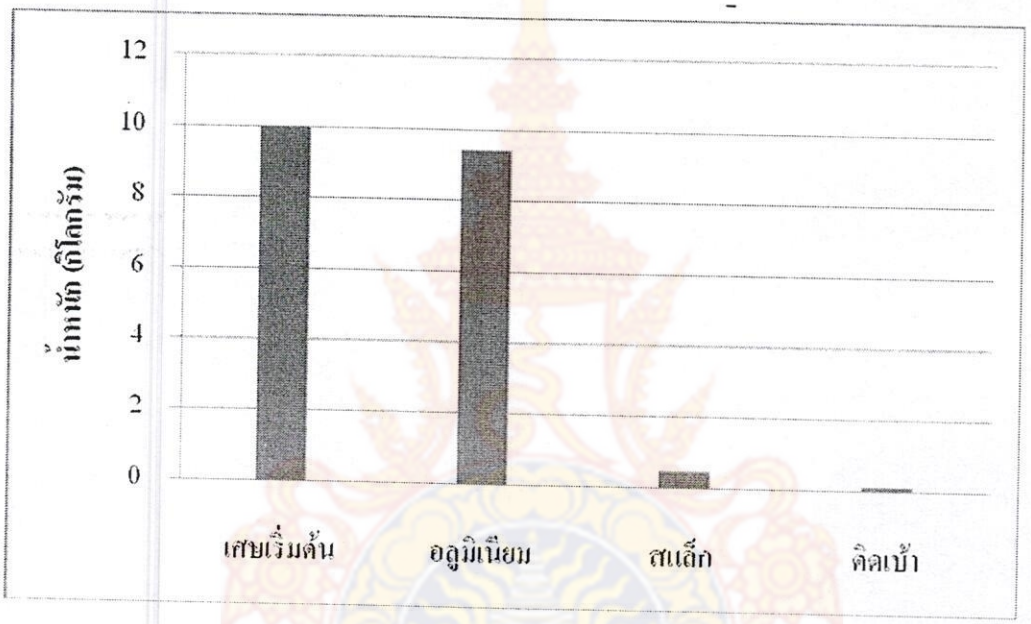
ค่าปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการหลอม (Yield of melting) ของเศษโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ 10 กิโลกรัม ผลที่ได้จากการหลอมและหล่อเป็นอะลูมิเนียมอินกอต ดังแสดงในภาพที่ 4.4 และทำให้ได้อะลูมิเนียมอินกอต สแล็กหรือขี้โลหะ และส่วนที่ติดค้างในเบ้าหลอม ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ภาพที่ 4.4 อะลูมิเนียมอินกอตที่ได้จากการหลอมและหล่อของเศษโลหะผสมอะลูมิเนียม

ตารางที่ 4.4 ปริมาณสัดส่วนของอะลูมิเนียมที่ได้จากการหลอม

การหลอมครั้งที่	น้ำหนักของโลหะผสมอะลูมิเนียม (กิโลกรัม)			
	เศษโลหะผสมอะลูมิเนียมเริ่มต้น	อะลูมิเนียมอินกอต	สแล็ก	ติดเบ้า
1	10.0	9.3	0.6	0.1
2	10.0	9.5	0.4	0.1
3	10.0	9.5	0.4	0.1
เฉลี่ย	**10.0**	**9.4**	**0.5**	**0.1**

และเมื่อทำการเปรียบเทียบอัตราส่วนน้ำหนักของอะลูมิเนียมอินกอตที่ได้ ปริมาณขี้โลหะ (Slag) ที่เกิดขึ้น และอะลูมิเนียมส่วนที่ติดเบ้า ด้วยกราฟแผนภูมิแท่งดังแสดงในภาพที่ 4.5 จากกราฟแผนภูมิแท่งแสดงได้ว่า จากการหลอมเศษโลหะผสมอะลูมิเนียม 10 กิโลกรัม ด้วยเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานที่สร้างขึ้น ที่อุณหภูมิภายในเตาหลอม 750 องศาเซลเซียส ทำให้ได้อะลูมิเนียมอินกอตที่มีน้ำหนักรวม 9.4 กิโลกรัม คิดเป็น 94 เปอร์เซ็นต์ เกิดสแล็กหรือขี้โลหะขึ้น 0.5 กิโลกรัม คิดเป็น 5 เปอร์เซ็นต์ และติดค้างในเบ้าหลอมอีก 0.1 กิโลกรัม คิดเป็น 1 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4.5 เปรียบเทียบปริมาณสัดส่วนของอะลูมิเนียมที่ได้จากการหลอมเศษโลหะผสมอะลูมิเนียม 10 กิโลกรัม

4.3 การหาค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อชั่วโมง เพื่อวิเคราะห์หาต้นทุนในการหลอม

จากการทดสอบเตาไฟฟ้าที่สร้างขึ้นด้วยการหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียม 10 กิโลกรัม ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการหลอม 180 นาที เมื่อรวมเวลาที่ใช้ในการทำความสะอาดน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมและเทลงในรางหล่อซึ่งจะใช้เวลาอีกประมาณ 60 นาที ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการเปิดเตาเพื่อทำการหลอมและหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียมในแต่ละครั้ง จะใช้เวลาทั้งหมด 240 นาที หรือคิดเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

และเมื่อใช้เครื่องวัดกระแสไฟฟ้า วัดค่ากระแสไฟขณะทำการหลอมพบว่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 10 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้าระหว่างสายเท่ากับ 380 โวลต์ และค่าตัวประกอบกำลัง

สำหรับฮีตเตอร์ไฟฟ้า เท่ากับ 1 สามารถคำนวณกำลังไฟฟ้ากรณีใช้ไฟ 3 เฟส ได้จากสมการที่ 2.7 ดังนี้

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times PF$$

แทนค่าในสมการที่ 2.7 ได้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ

$$P = \sqrt{3} \times 380 \times 10 \times 1$$

$$= 6.6 \text{ กิโลวัตต์}$$

หาจำนวนหน่วยไฟฟ้า โดยเตาหลอมทำงานวันละ 8 ชั่วโมง ได้จากสมการที่ 2.9

จำนวนหน่วยหรือยูนิต = กำลังไฟฟ้า × จำนวนชั่วโมงที่ใช้ 1 วัน

$= 6.6 \times 8$

$= 52.8$ หน่วยต่อวัน

หาก 1 เดือนทำงาน 30 วัน $= 52.8 \times 30$

$= 1{,}584$ หน่วยต่อเดือน

หากคิดค่าไฟฟ้าต่อหน่วยโดยการคิดค่าไฟฟ้าประเภทที่ 6 ส่วนราชการ และองค์กรที่ไม่แสวงหากำไร แบบอัตราปกติ ที่แรงดันต่ำกว่า 12 กิโลโวลต์ สามารถคิดค่าไฟฟ้าต่อหน่วยได้จากสมการที่ 2.10

10 หน่วยแรก $= 10 \times 1.3576$

$= 13.576$ บาท

หน่วยที่ 11 ถึง 1,584 $= (1{,}584 - 10) \times 2.4482$

$= 3{,}853.46$ บาท

ค่าบริการ = 20 บาทต่อเดือน

ค่าไฟฟ้าพื้นฐาน = ค่าไฟฟ้าพื้นฐาน 10 หน่วยแรก + ค่าไฟฟ้าพื้นฐานเกิน 10 หน่วย + ค่าบริการต่อเดือน

= 13.576 + 3,853.46 + 20

= 3,887.05 บาท

หาค่าปรับปรุงต้นทุนการผลิตหรือค่า Ft ได้จากสมการที่ 2.11

ค่าปรับปรุงต้นทุนการผลิต = จำนวนหน่วยที่ใช้ต่อเดือน × ค่า Ft

= 1,584 × 0.8688

= 1,376.18 บาท

หาค่าภาษีมูลค่าเพิ่ม 7 เปอร์เซ็นต์ ได้จากสมการที่ 2.12

ค่าภาษีมูลค่าเพิ่ม = (ค่าไฟฟ้าพื้นฐาน + ค่า Ft) × $\frac{7}{100}$

= (3,887.05 + 1,376.18) × $\frac{7}{100}$

= 368.43 บาท

หาค่าไฟฟ้าที่ใช้ในระยะเวลา 1 เดือน ได้จากสมการที่ 2.13

ค่าไฟฟ้าที่ต้องชำระ = ค่าพลังงานไฟฟ้า + ค่า Ft + ภาษีมูลค่าเพิ่ม

= 3,887.05 + 1,376.18 + 368.43

= 5,631.66 บาท

ดังนั้นค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการหลอมอะลูมิเนียมต่อเดือนคิดเป็นเงินเท่ากับ 5,631.66 บาท

จากค่าไฟฟ้าในการหลอมอะลูมิเนียมต่อเดือน หาก 1 เดือนทำงาน 30 วันสามารถหาค่าไฟฟ้าในการหลอมอะลูมิเนียมต่อครั้งได้จาก

ค่าไฟฟ้าในการหลอมอะลูมิเนียมต่อวัน $= \frac{5,631.66}{30}$

$= 187.72$ บาทต่อวัน

1 วันสามารถหลอมได้ 2 ครั้ง $= \frac{187.72}{2}$

$= 93.86$ บาทต่อครั้ง

ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อชั่วโมง สามารถหาได้จากปริมาณความร้อนที่เข้าสู่เตา ซึ่งมีค่าเท่ากับ 23,695 กิโลจูลต่อชั่วโมง (6,582 วัตต์) หรือคิดเป็นจำนวนหน่วยไฟฟ้าที่ใช้เท่ากับ 6.6 หน่วยต่อชั่วโมง เมื่อคิดเป็นค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการหลอมเศษอะลูมิเนียม 10 กิโลกรัมต่อครั้ง จะมีค่าเท่ากับ 93.86 บาท และเนื่องจากในการหลอมแต่ละครั้งจะใช้เวลาในการเปิดเตาทำงานรวมทั้งหมด 4 ชั่วโมง ดังนั้นเมื่อคิดเป็นค่าไฟฟ้าในการหลอมต่อชั่วโมงจะมีค่าใช้จ่ายอยู่ที่ 23.5 บาทต่อชั่วโมง หรือเมื่อคิดเป็นต้นทุนค่าไฟฟ้าในการหลอมเศษโลหะผสมอะลูมิเนียมดังกล่าวจะมีค่าเท่ากับ 9.4 บาทต่อกิโลกรัม

บทที่ 5
สรุปและข้อเสนอแนะ

จากการออกแบบและสร้างเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานสำหรับการหลอมเศษโลหะผสมอะลูมิเนียม มีรายละเอียดดังกล่าวมาข้างต้นแล้ว สามารถสรุปผลการสร้างเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทาน และข้อเสนอแนะเพื่อการปรับปรุงพัฒนาให้เตาหลอมมีประสิทธิภาพในการทำงานมากยิ่งขึ้นได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทาน จากการทดลองเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานจะนำเศษโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่องมือกล มาทำการหลอมด้วยเตาดังกล่าวนี้ ซึ่งสามารถสรุปผลการทดสอบประสิทธิภาพของเตาและการทดลองหลอมเศษโลหะผสมอะลูมิเนียมได้ดังนี้

5.1.1 เตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานที่สร้างขึ้นมา สามารถหลอมเศษโลหะผสมอะลูมิเนียมได้สูงสุดครั้งละไม่เกิน 10 กิโลกรัม

5.1.2 เตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานที่สร้างขึ้นมา สามารถให้อุณหภูมิภายในเตาหลอมสูงสุดไม่เกิน 1,000 องศาเซลเซียส

5.1.3 เตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานที่สร้างขึ้นมา มีอัตราการให้ความร้อนเมื่อทำการหลอมเศษโลหะผสมอะลูมิเนียมอยู่ที่ 12.0 องศาเซลเซียสต่อนาที

5.1.4 เมื่อให้ความร้อนภายในเตามีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอยู่ที่ 1,000 องศาเซลเซียส เตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานที่ได้สร้างขึ้น จะมีอุณหภูมิเฉลี่ยของผนังเตาทุกด้านเท่ากับ 74.3 องศาเซลเซียส

5.1.5 เตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานที่สร้างขึ้นมีการสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตาอยู่ที่ 7,920 กิโลจูลต่อชั่วโมง หรือคิดเป็น 33.4 เปอร์เซ็นต์ ของความร้อนที่เข้าสู่เตา และประสิทธิภาพทางความร้อนของการหลอมอะลูมิเนียม ด้วยเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานที่สร้างขึ้นมา มีค่าเท่ากับ 14.8 เปอร์เซ็นต์

5.1.6 ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการหลอมของเศษโลหะผสมอะลูมิเนียม ทำให้ได้อะลูมิเนียมอินกอตที่มีน้ำหนักรวมคิดเป็น 94 เปอร์เซ็นต์ และมีขี้โลหะเกิดขึ้นคิดเป็น 5 เปอร์เซ็นต์ของวัตถุดิบที่ใช้ในการหลอม

5.1.7 ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อชั่วโมงเท่ากับ 23,695 กิโลจูลต่อชั่วโมง คิดเป็นค่าไฟฟ้าในการหลอมต่อชั่วโมงจะมีค่าใช้จ่ายอยู่ที่ 23.5 บาทต่อชั่วโมง และเมื่อคิดเป็นต้นทุนค่าไฟฟ้าในการหลอมเศษโลหะผสมอลูมิเนียมจะมีค่าเท่ากับ 9.4 บาทต่อกิโลกรัม

5.2 ข้อเสนอแนะ

เพื่อให้เตาหลอมมีประสิทธิภาพในการหลอมเศษโลหะผสมอะลูมิเนียมได้มากยิ่งขึ้น ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมดังต่อไปนี้

5.2.1 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณผนังเตาหลอมด้านต่างๆ มีอุณหภูมิที่สูง ควรมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันอันตราย เพื่อไม่ให้ผู้ปฏิบัติงานสัมผัสกับผนังเตาได้โดยตรง

5.2.2 เพื่อความปลอดภัยในการใช้งานเตาหลอม ผู้ปฏิบัติงานจะต้องสวมใส่อุปกรณ์ป้องกันความร้อนระหว่างปฏิบัติงานทุกครั้ง

5.2.3 การยกเบ้าออกจากเตาเพื่อทำการเทน้ำโลหะ ควรมีอุปกรณ์ที่สามารถทำการยกเบ้าได้สะดวกและเหมาะสม เพื่อความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน

บรรณานุกรม

ชุษณะ รักษ์วงศ์, นิพนธ์ อมรโฆษิต, ปณิธิ เลียบจันทร์, และอนุวัฒน์ จุติลาภถาวร. (2539). **การออกแบบและสร้างเตาหลอมโลหะด้วยขดลวดความต้านทาน.** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ และไพโรจน์ ฐานวิเศษ. (2542). **เตาอบชุบความร้อนฟลูอิดไดซ์เบด.** รายงานการวิจัย. คณะวิชาเทคโนโลยีการผลิต สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ นครราชสีมา.

ธนากรณ์ ตั้งวานิชกพงษ์. (2548). **การปรับปรุงคุณภาพของน้ำอลูมิเนียมด้วยฟลักซ์.** วารสารงานหล่อโลหะไทย 15(3): 45-47.

ธนากรณ์ ตั้งวานิชกพงษ์. (2549). **การปฏิบัติการทางด้านโลหะวิทยาของโลหะอลูมิเนียม.** วารสารงานหล่อโลหะไทย 16(1): 37-42.

ธวัชชัย สิทธิสระดู่ และสมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์. (2548). **การปรับปรุงสมรรถนะของเตาหลอมทองแดงโดยใช้อุปกรณ์อุนอากาศ.** การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 1, ชลบุรี, ประเทศไทย, 11-13 พฤษภาคม 2548: ECI02-1-6.

ประกอบ จันทร์มา และวรรณชัย พร้อมมูล. (2538). **การออกแบบและสร้างเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานสำหรับหลอมอลูมิเนียม.** สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลและโลหะการ กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.

พรชัย ตั้งจิตปรารถนา. (2544). **เตาอบชุบโลหะแบบต้านทาน.** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

สุภชัย ประเสริฐกุล. (2548). **เทคโนโลยีงานหล่อโลหะ 2 ฉบับมาตรฐาน.** กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ไซน์แอนด์เอ็นจิเนียริ่ง.

สุรพล ชูสวัสดิ์. (2546). **การออกแบบสร้างเตาหลอมโลหะขนาดห้องปฏิบัติการโดยใช้เชื้อเพลิงก๊าซออกซิเจน-อะเซทิลีน.** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิศวกรรมเหมืองแร่ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

Amini, M.H., Moloodi, A., Golestanipour, M., and Karimi, E.Z.V. (2009). **Recycling of aluminium alloy turning scrap via cold pressing and melting with salt flux.** Journal of Materials Processing Technology. 209: 3138-3142.

Bala, K.C. (2005). **Design Analysis of an Electric Induction Furnace for Melting Aluminum Scrap.** AU J.T. 9(2): 83-88.

Samuel, M. (2003). **A new technique for recycling aluminium scrap.** Journal of Materials Processing Technology. 135: 117-124.

Supakiat, S., Sumpun, C., Saritporn, V., and Lin, L. (2009). **Feasibility study of lard oil and LPG as fuels for aluminum crucible furnace.** Proceeding of the 3rd Thailand Metallurgy Conference, Bangkok, Thailand, 26-27 October 2009. DF-03.

William, F. Smith., and Javad Hashemi. (2008). Principles of Material Science and Engineering. English edition. The McGraw-Hill.

Pan Drive Co., LTD. (2009). Induction Furnace (Online). Available : http://pandrive-sale.blogspot.com/2009/02/inverter.html [2010, October 20]

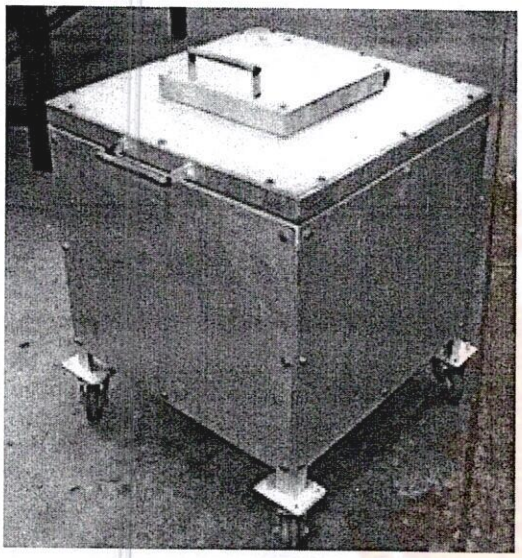
Thai Furnaces Engineering Limited Partnership. (2010). Equipments for Furnace (Online). Available : http://www.thaifurnaces.com [2010, October 23]

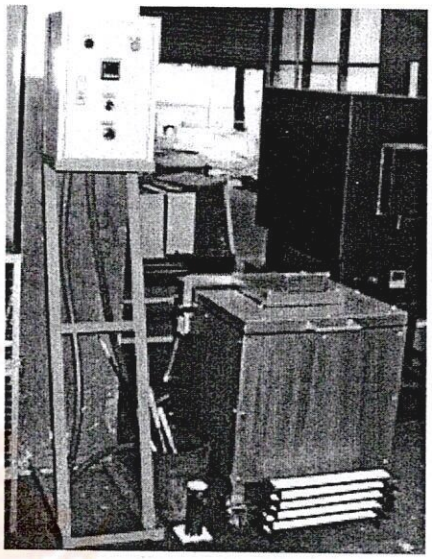
Ruby Electronics. (2010). Clamp Meter (Online). Available : http://ruby-electronics.com [2010, October 25]

ภาคผนวก ก

ข้อมูลทางเทคนิคของเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทาน

ข้อมูลทางเทคนิคของเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทาน





ภาพที่ ก-1 เตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานที่ได้สร้างขึ้นเพื่อใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

ข้อมูลทั่วไป

ชื่อเครื่องจักร	เตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทาน
ลักษณะการใช้งาน	สำหรับหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียม

รายละเอียดทางเทคนิค

ขนาดภายนอกเตา (กว้าง × ยาว × สูง)	60 × 60 × 55 เซนติเมตร
ขนาดใช้งานภายในเตา (เส้นผ่านศูนย์กลาง × สูง)	Ø 35 × 32 เซนติเมตร
อุณหภูมิใช้งานสูงสุดไม่เกิน	1,000 องศาเซลเซียส
อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิภายในเตา	เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K

ระบบไฟฟ้า

กำลังไฟฟ้าที่ใช้	6.6 กิโลวัตต์
แรงดันไฟฟ้า ที่ใช้	380 โวลต์ 3 เฟส
กระแสไฟฟ้าที่ใช้	10 แอมแปร์

ภาคผนวก ข

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณและการออกแบบสร้างเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทาน

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณและการออกแบบสร้างเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทาน

1. คุณสมบัติของอะลูมิเนียม (Aluminum)

1.1	ความหนาแน่น (Density, ρ)	:	2700 kg/m^3
1.2	อุณหภูมิจุดหลอมเหลว (Melting Point Temperature)	:	660°C (933 K)
1.3	ความร้อนจำเพาะ (Specific Heat Capacity, C_p)	:	0.91 kJ/kg.K
1.4	การนำความร้อน (Thermal Conductivity, k)	:	210 W/m.K
1.5	ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย (Latent Heat of Fusion)	:	398 kJ/kg

2. คุณสมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel, 1.5%C)

2.1	ความหนาแน่น (Density, ρ)	:	7753 kg/m^3
2.2	ความร้อนจำเพาะ (Specific Heat Capacity, C_p)	:	0.49 kJ/kg.K
2.3	การนำความร้อน (Thermal Conductivity, k)	:	36 W/m.K

3. คุณสมบัติของกราไฟต์ (Graphite)

3.1	ความหนาแน่น (Density, ρ)	:	2100 kg/m^3
3.2	ความร้อนจำเพาะ (Specific Heat Capacity, C_p)	:	0.83 kJ/kg.K
3.3	การนำความร้อน (Thermal Conductivity, k)	:	5 W/m.K

4. คุณสมบัติของอิฐฉนวนความร้อน (Insulation Brick)

4.1	ความหนาแน่น (Density, ρ)	:	1200 kg/m^3
4.2	ความร้อนจำเพาะ (Specific Heat Capacity, C_p)	:	0.88 kJ/kg.K
4.3	การนำความร้อน (Thermal Conductivity, k)	:	0.45 W/m.K

5. คุณสมบัติของเซรามิกกันความร้อนแบบแผ่น (Ceramic Fiber Vacuum Board)

5.1	ความหนาแน่น (Density, ρ)	:	250 kg/m^3
5.2	อุณหภูมิใช้งานสูงสุด (Maximum Service Temperature)	:	1200°C (1,473 K)
5.3	การนำความร้อน (Thermal Conductivity, k) ที่ 800°C	:	0.25 W/m.K

6. คุณสมบัติของเซรามิกกันความร้อนแบบผืนผ้า (Ceramic Fiber Blanket)

6.1	ความหนาแน่น (Density, ρ)	:	160 kg/m^3
6.2	อุณหภูมิใช้งานสูงสุด (Maximum Service Temperature)	:	1200°C (1,473 K)
6.3	การนำความร้อน (Thermal Conductivity, k) ที่ 800°C	:	0.18 W/m.K

7. คุณสมบัติของปูนทนไฟ

7.1	อุณหภูมิใช้งานสูงสุด (Maximum Service Temperature)	:	1200°C (1,473 K)
7.2	การนำความร้อน (Thermal Conductivity, k) ที่ 800°C	:	0.76 W/m.K

ภาคผนวก ค

ตารางแสดงผลการทดลองของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณผนังเตาหลอมด้านต่างๆ

ตารางที่ ค-1 ผลการทดลองเตาหลอม ที่อุณหภูมิภายในเตา 200 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1 เพื่อหาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณผนังเตาหลอมด้านต่างๆ

วัดอุณหภูมิครั้งที่	อุณหภูมิผนังเตา (องศาเซลเซียส)						
	ซ้าย	ขวา	หน้า	หลัง	ฝาใหญ่	ฝาเล็ก	ล่าง
1	27.0	26.5	27.0	26.5	27.0	26.5	27.0
2	27.0	27.0	27.0	26.5	30.0	30.0	27.0
3	27.0	27.0	27.0	27.0	31.5	31.5	27.0
4	27.0	27.0	27.5	27.0	31.5	31.5	27.0
5	27.0	27.0	28.0	27.0	31.5	31.5	27.0
6	27.0	27.0	27.5	27.0	32.0	32.0	27.0
เฉลี่ย	27.0	26.9	27.3	26.8	30.6	30.5	27.0

ตารางที่ ค-2 ผลการทดลองเตาหลอม ที่อุณหภูมิภายในเตา 200 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2 เพื่อหาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณผนังเตาหลอมด้านต่างๆ

วัดอุณหภูมิครั้งที่	อุณหภูมิผนังเตา (องศาเซลเซียส)						
	ซ้าย	ขวา	หน้า	หลัง	ฝาใหญ่	ฝาเล็ก	ล่าง
1	30.0	29.5	30.0	29.5	30.0	30.0	29.0
2	30.0	30.0	30.0	30.0	33.0	33.0	29.0
3	29.0	30.0	29.5	30.0	33.5	34.0	29.5
4	30.0	29.5	30.5	30.0	34.0	34.0	29.5
5	29.0	29.5	30.0	29.0	34.0	35.5	29.0
6	29.0	29.5	30.0	29.0	34.0	36.0	29.0
เฉลี่ย	29.5	29.7	30.0	29.6	33.1	33.6	29.2

ตารางที่ ค-3 ผลการทดลองเตาหลอม ที่อุณหภูมิภายในเตา 200 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 3 เพื่อหาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณผนังเตาหลอมด้านต่างๆ

วัดอุณหภูมิครั้งที่	อุณหภูมิผนังเตา (องศาเซลเซียส)						
	ซ้าย	ขวา	หน้า	หลัง	ฝาใหญ่	ฝาเล็ก	ล่าง
1	28.0	28.0	29.5	29.5	30.0	30.0	29.0
2	27.5	28.5	29.5	30.0	32.0	32.5	28.5
3	28.0	28.0	30.0	30.0	32.5	33.0	29.0
4	28.5	28.5	29.5	29.5	32.0	33.0	29.0
5	28.0	28.0	29.0	29.0	33.0	34.0	28.5
6	28.5	29.0	29.5	29.5	33.0	34.5	29.0
เฉลี่ย	28.1	28.3	29.5	29.6	32.1	32.8	28.8

ตารางที่ ค-4 ผลการทดลองเตาหลอม ที่อุณหภูมิภายในเตา 400 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1 เพื่อหาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณผนังเตาหลอมด้านต่างๆ

วัดอุณหภูมิครั้งที่	อุณหภูมิผนังเตา (องศาเซลเซียส)						
	ซ้าย	ขวา	หน้า	หลัง	ฝาใหญ่	ฝาเล็ก	ล่าง
1	27.0	27.5	27.5	27.0	32.0	32.5	28.0
2	27.0	27.0	27.5	28.0	34.0	34.5	28.0
3	27.0	27.0	28.0	29.0	34.0	36.5	29.0
4	27.5	27.0	28.5	29.5	36.0	37.5	29.5
5	27.5	27.0	28.5	29.0	37.0	38.5	30.0
6	27.0	27.0	28.0	29.0	38.0	38.5	30.0
เฉลี่ย	27.2	27.1	28.0	28.6	35.2	36.3	29.1

ตารางที่ ค-5 ผลการทดลองเตาหลอม ที่อุณหภูมิภายในเตา 400 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2 เพื่อหาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณผนังเตาหลอมด้านต่างๆ

วัดอุณหภูมิครั้งที่	อุณหภูมิผนังเตา (องศาเซลเซียส)						
	ซ้าย	ขวา	หน้า	หลัง	ฝาใหญ่	ฝาเล็ก	ล่าง
1	29.5	30.5	30.5	29.5	37.0	38.0	30.5
2	30.0	31.0	30.5	30.0	38.5	40.0	30.0
3	30.5	30.5	32.0	31.0	41.0	44.0	31.0
4	32.0	31.5	32.5	32.5	42.5	46.5	34.0
5	30.0	30.0	32.0	32.0	42.0	45.0	34.0
6	32.5	32.5	34.0	33.0	44.5	48.0	36.0
เฉลี่ย	30.6	31.0	31.9	31.3	40.9	43.6	32.6

ตารางที่ ค-6 ผลการทดลองเตาหลอม ที่อุณหภูมิภายในเตา 400 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 3 เพื่อหาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณผนังเตาหลอมด้านต่างๆ

วัดอุณหภูมิครั้งที่	อุณหภูมิผนังเตา (องศาเซลเซียส)						
	ซ้าย	ขวา	หน้า	หลัง	ฝาใหญ่	ฝาเล็ก	ล่าง
1	28.0	29.5	29.5	29.0	36.0	37.0	29.5
2	28.0	30.0	30.5	29.0	37.0	39.0	30.0
3	28.5	30.0	30.5	29.5	40.0	42.0	31.0
4	28.0	31.0	31.0	30.5	41.5	44.0	32.5
5	28.5	31.5	31.5	31.5	43.0	44.5	33.0
6	29.0	32.0	32.5	32.0	42.5	46.0	34.5
เฉลี่ย	28.3	30.7	30.9	30.3	40.0	42.1	31.8

ตารางที่ ค-7 ผลการทดลองเตาหลอม ที่อุณหภูมิภายในเตา 600 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1 เพื่อหาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณผนังเตาหลอมด้านต่างๆ

วัดอุณหภูมิครั้งที่	อุณหภูมิผนังเตา (องศาเซลเซียส)						
	ซ้าย	ขวา	หน้า	หลัง	ฝาใหญ่	ฝาเล็ก	ล่าง
1	29.5	28.5	31.0	31.5	40.0	40.5	32.5
2	29.5	28.5	31.0	31.0	41.0	42.5	33.0
3	29.5	28.5	32.0	31.0	43.5	45.0	34.0
4	29.5	28.5	31.5	32.0	46.0	48.0	34.5
5	30.5	29.0	32.5	33.0	49.0	51.0	36.0
6	30.5	30.0	33.5	34.5	49.0	51.5	38.0
เฉลี่ย	29.8	28.8	31.9	32.2	44.8	46.4	34.7

ตารางที่ ค-8 ผลการทดลองเตาหลอม ที่อุณหภูมิภายในเตา 600 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2 เพื่อหาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณผนังเตาหลอมด้านต่างๆ

วัดอุณหภูมิครั้งที่	อุณหภูมิผนังเตา (องศาเซลเซียส)						
	ซ้าย	ขวา	หน้า	หลัง	ฝาใหญ่	ฝาเล็ก	ล่าง
1	32.5	32.5	35.0	34.5	47.0	50.0	37.0
2	33.5	33.0	35.0	35.0	49.5	54.0	38.0
3	34.0	33.5	36.0	36.0	53.0	57.5	38.0
4	34.0	35.0	37.5	37.0	56.0	60.0	39.5
5	36.0	34.0	39.0	37.5	57.5	61.5	41.0
6	36.5	35.5	40.0	39.0	59.0	65.5	43.0
เฉลี่ย	34.4	33.9	37.1	36.5	53.7	58.1	39.4

ตารางที่ ค-9 ผลการทดลองเตาหลอม ที่อุณหภูมิภายในเตา 600 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 3 เพื่อหาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณผนังเตาหลอมด้านต่างๆ

วัดอุณหภูมิครั้งที่	อุณหภูมิผนังเตา (องศาเซลเซียส)						
	ซ้าย	ขวา	หน้า	หลัง	ฝาใหญ่	ฝาเล็ก	ล่าง
1	32.0	32.5	33.5	34.0	46.0	48.0	35.0
2	33.0	32.5	34.0	33.5	47.5	50.5	36.5
3	33.5	33.0	34.0	34.5	50.0	53.0	36.0
4	33.0	33.0	34.5	35.0	53.0	55.0	37.0
5	34.0	33.5	36.0	35.0	54.0	55.5	38.5
6	34.5	33.0	36.0	36.0	56.5	58.0	39.0
เฉลี่ย	33.3	32.9	34.7	34.7	51.2	53.3	37.0

ตารางที่ ค-10 ผลการทดลองเตาหลอม ที่อุณหภูมิภายในเตา 800 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1 เพื่อหาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณผนังเตาหลอมด้านต่างๆ

วัดอุณหภูมิครั้งที่	อุณหภูมิผนังเตา (องศาเซลเซียส)						
	ซ้าย	ขวา	หน้า	หลัง	ฝาใหญ่	ฝาเล็ก	ล่าง
1	33.5	32.0	37.0	38.0	52.0	55.0	39.0
2	33.5	32.0	36.0	36.5	60.0	62.5	39.5
3	34.5	33.0	37.0	38.0	62.0	67.0	44.0
4	36.0	33.5	38.5	39.0	63.5	71.0	44.5
5	36.5	34.0	39.5	40.0	71.5	69.0	46.0
6	39.0	35.5	41.0	41.5	71.0	74.0	47.0
เฉลี่ย	35.5	33.3	38.2	38.8	63.3	66.4	43.3

ตารางที่ ค-11 ผลการทดลองเตาหลอม ที่อุณหภูมิภายในเตา 800 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2 เพื่อหาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณผนังเตาหลอมด้านต่างๆ

วัดอุณหภูมิครั้งที่	อุณหภูมิผนังเตา (องศาเซลเซียส)						
	ซ้าย	ขวา	หน้า	หลัง	ฝาใหญ่	ฝาเล็ก	ล่าง
1	39.5	38.0	42.5	41.5	65.0	69.5	51.0
2	40.0	38.5	43.5	42.0	67.5	73.0	53.0
3	41.0	38.5	44.0	43.0	70.0	76.0	55.0
4	43.0	41.0	46.5	45.0	74.0	84.0	57.0
5	43.5	42.0	47.5	46.0	76.0	85.5	58.5
6	45.5	43.0	48.5	47.0	80.0	86.0	60.0
เฉลี่ย	42.1	40.2	45.4	44.1	72.1	79.0	55.6

ตารางที่ ค-12 ผลการทดลองเตาหลอม ที่อุณหภูมิภายในเตา 800 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 3 เพื่อหาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณผนังเตาหลอมด้านต่างๆ

วัดอุณหภูมิครั้งที่	อุณหภูมิผนังเตา (องศาเซลเซียส)						
	ซ้าย	ขวา	หน้า	หลัง	ฝาใหญ่	ฝาเล็ก	ล่าง
1	38.0	37.0	41.0	39.5	63.5	67.0	49.0
2	39.0	37.5	41.5	40.5	65.0	71.0	49.5
3	40.5	38.5	42.0	41.0	67.5	73.0	52.5
4	41.0	39.0	43.0	42.0	71.0	76.0	53.0
5	41.0	40.5	43.5	43.0	72.5	80.0	55.0
6	42.0	40.0	45.0	44.5	75.0	83.5	57.5
เฉลี่ย	40.3	38.6	42.7	41.8	69.1	75.1	52.6

ตารางที่ ค-13 ผลการทดลองเตาหลอม ที่อุณหภูมิภายในเตา 900 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1 เพื่อหาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณผนังเตาหลอมด้านต่างๆ

วัดอุณหภูมิครั้งที่	อุณหภูมิผนังเตา (องศาเซลเซียส)						
	ซ้าย	ขวา	หน้า	หลัง	ฝาใหญ่	ฝาเล็ก	ล่าง
1	40.0	37.5	43.0	43.5	75.0	73.0	50.0
2	42.0	39.0	44.5	44.5	79.0	78.0	55.0
3	43.5	40.0	46.0	46.5	81.0	83.0	57.0
4	44.0	41.0	48.0	57.0	84.0	89.0	58.5
5	46.0	42.0	51.0	48.5	87.5	89.0	59.5
6	46.0	42.0	50.5	50.0	87.0	87.5	57.0
เฉลี่ย	43.6	40.3	47.2	48.3	82.3	83.3	56.2

ตารางที่ ค-14 ผลการทดลองเตาหลอม ที่อุณหภูมิภายในเตา 900 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2 เพื่อหาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณผนังเตาหลอมด้านต่างๆ

วัดอุณหภูมิครั้งที่	อุณหภูมิผนังเตา (องศาเซลเซียส)						
	ซ้าย	ขวา	หน้า	หลัง	ฝาใหญ่	ฝาเล็ก	ล่าง
1	47.5	45.5	51.5	49.5	83.5	88.5	66.0
2	48.0	46.5	53.0	49.5	94.0	88.0	66.5
3	50.0	48.0	55.5	52.0	94.5	94.0	71.0
4	51.5	48.5	57.0	53.5	94.0	99.5	72.0
5	54.5	50.0	59.0	56.0	98.0	98.5	72.5
6	55.0	51.5	61.0	57.5	98.5	98.0	75.0
เฉลี่ย	51.1	48.3	56.2	53.0	93.6	94.4	70.5

ตารางที่ ค-15 ผลการทดลองเตาหลอม ที่อุณหภูมิภายในเตา 900 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 3 เพื่อหาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณผนังเตาหลอมด้านต่างๆ

วัดอุณหภูมิครั้งที่	อุณหภูมิผนังเตา (องศาเซลเซียส)						
	ซ้าย	ขวา	หน้า	หลัง	ฝาใหญ่	ฝาเล็ก	ล่าง
1	46.0	43.0	48.0	47.5	81.0	86.5	62.5
2	47.0	44.5	50.0	48.5	87.5	87.5	64.0
3	48.5	46.0	53.5	49.0	89.5	92.0	68.5
4	49.0	46.5	54.0	51.5	92.0	97.0	69.0
5	50.5	48.0	56.5	52.5	94.5	97.5	70.5
6	53.0	49.5	58.5	55.5	97.5	99.0	72.0
เฉลี่ย	49.0	46.3	53.4	50.8	90.3	93.3	67.8

ตารางที่ ค-16 ผลการทดลองเตาหลอม ที่อุณหภูมิภายในเตา 1,000 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1 เพื่อหาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณผนังเตาหลอมด้านต่างๆ

วัดอุณหภูมิครั้งที่	อุณหภูมิผนังเตา (องศาเซลเซียส)						
	ซ้าย	ขวา	หน้า	หลัง	ฝาใหญ่	ฝาเล็ก	ล่าง
1	50.5	42.0	54.0	52.5	89.0	90.0	63.0
2	51.5	46.5	55.5	51.5	92.5	94.0	68.5
3	51.5	48.5	57.0	54.5	93.0	99.5	64.0
4	52.5	48.0	59.0	55.5	97.0	99.0	72.0
5	53.0	50.0	61.0	58.0	101.5	106.0	74.0
6	57.5	51.5	62.0	60.0	106.0	104.5	73.0
เฉลี่ย	52.8	47.8	58.1	55.3	96.5	98.8	69.1

ตารางที่ ค-17 ผลการทดลองเตาหลอม ที่อุณหภูมิภายในเตา 1,000 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2 เพื่อหาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณผนังเตาหลอมด้านต่างๆ

วัดอุณหภูมิครั้งที่	อุณหภูมิผนังเตา (องศาเซลเซียส)						
	ซ้าย	ขวา	หน้า	หลัง	ฝาใหญ่	ฝาเล็ก	ล่าง
1	58.0	54.0	64.0	59.0	101.0	100.0	83.0
2	59.5	55.5	64.5	60.0	103.0	100.0	83.5
3	60.0	56.0	65.5	60.5	104.0	105.0	84.0
4	61.0	58.0	67.5	62.0	110.0	107.0	85.0
5	64.0	59.5	70.0	63.0	110.0	109.0	93.5
6	65.0	60.5	70.0	63.0	110.5	110.0	93.0
เฉลี่ย	61.3	57.3	66.9	61.3	106.4	105.2	87.0

ตารางที่ ค-18 ผลการทดลองเตาหลอม ที่อุณหภูมิภายในเตา 1,000 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 3 เพื่อหาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณผนังเตาหลอมด้านต่างๆ

วัดอุณหภูมิครั้งที่	อุณหภูมิผนังเตา (องศาเซลเซียส)						
	ซ้าย	ขวา	หน้า	หลัง	ฝาใหญ่	ฝาเล็ก	ล่าง
1	54.5	50.0	62.0	57.0	99.5	100.0	81.5
2	57.0	52.0	63.5	58.5	101.0	102.5	82.0
3	58.5	53.5	64.0	60.0	101.5	104.0	82.0
4	59.0	56.5	65.5	61.5	101.5	105.5	83.0
5	61.5	57.0	67.5	62.0	105.0	107.0	85.5
6	64.0	58.5	69.0	62.0	106.5	109.5	88.0
เฉลี่ย	59.1	54.6	65.3	66.2	102.5	104.6	83.7

ภาคผนวก ง

อัตราค่าไฟฟ้าประเภทที่ 6 หน่วยราชการ และองค์กรที่ไม่แสวงหากำไร

อัตราค่าไฟฟ้าประเภทที่ 6 หน่วยราชการ และองค์กรที่ไม่แสวงหากำไร ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

สำหรับการใช้ไฟฟ้าประเภทที่ 6 หน่วยราชการ สำนักงาน หรือหน่วยงานอื่นใดของรัฐ หน่วยงานตามกฎหมายว่าด้วยระเบียบบริหารราชการส่วนท้องถิ่น ซึ่งมีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 3 เดือนไม่เกิน 250,000 หน่วยต่อเดือน รวมถึงองค์กรที่ไม่ใช่ส่วนราชการ แต่มีวัตถุประสงค์ในการให้บริการ โดยไม่คิดค่าตอบแทน แต่ไม่รวมหน่วยงานของรัฐวิสาหกิจ สถานทูต สถานที่ทำการของหน่วยราชการต่างประเทศ และสถานที่ทำการขององค์กรระหว่างประเทศ โดยต่อผ่านเครื่องวัดไฟฟ้าเครื่องเดียว

ตารางที่ ง-1 ประเภทที่ 6.1 อัตราปกติ

แรงดันไฟฟ้า	ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาทต่อหน่วย)	ค่าบริการ (บาทต่อเดือน)
1. แรงดันตั้งแต่ 69 กิโลโวลต์ขึ้นไป	1.9712	228.17
2. แรงดัน 22-33 กิโลโวลต์	2.1412	228.17
3. แรงดันต่ำกว่า 22 กิโลโวลต์	-	20.00
- 10 หน่วยแรก (หน่วยที่ 0 - 10)	1.3576	-
- เกิน10 หน่วยขึ้นไป (หน่วยที่ 11 เป็นต้นไป)	2.4482	-

ตารางที่ ง-2 ประเภทที่ 6.2 อัตราตามช่วงเวลาของการใช้ (Time of Use Rate: TOU)

แรงดันไฟฟ้า	ค่าความต้องการพลังไฟฟ้า (บาท/กิโลวัตต์)	ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/หน่วย)		ค่าบริการ (บาท/เดือน)
	Peak	Peak	Off Peak	
1. แรงดันตั้งแต่ 69 กิโลโวลต์ขึ้นไป	74.14	2.6136	1.1726	228.17
2. แรงดัน 22-33 กิโลโวลต์	132.93	2.6950	1.1914	228.17
3. แรงดันต่ำกว่า 22 กิโลโวลต์	210.00	2.8408	1.2246	228.17

หมายเหตุ Peak หมายถึง วันจันทร์ ถึง วันศุกร์ ตั้งแต่เวลา 09.00 น. ถึง 22.00 น. Off Peak หมายถึงวันจันทร์ ถึง วันศุกร์ ตั้งแต่เวลา 22.00 น. ถึง 09.00 น. และวันเสาร์ วันอาทิตย์ วันหยุดราชการตามปกติ ไม่รวมวันหยุดชดเชย ทั้งวัน

อัตราขั้นต่ำ หมายถึง ค่าไฟฟ้าต่ำสุดต้องไม่ต่ำกว่าร้อยละ 70 ของค่าความต้องการพลังไฟฟ้าสูงสุดในรอบ 12 เดือนที่ผ่านมาสิ้นสุดในเดือนปัจจุบัน

1. วัด สถานประกอบศาสนกิจ ที่คิดอัตราประเภทบ้านอยู่อาศัย หากมีการใช้ไฟฟ้าตั้งแต่ 350 หน่วยติดต่อกัน 3 เดือน ในเดือนถัดไปจะจัดเข้าประเภทที่ 6.1 และเมื่อใดที่การใช้ไฟฟ้าไม่ถึง 350 หน่วยติดต่อกัน 3 เดือน ในเดือนถัดไปจะจัดเข้าประเภทที่ 1

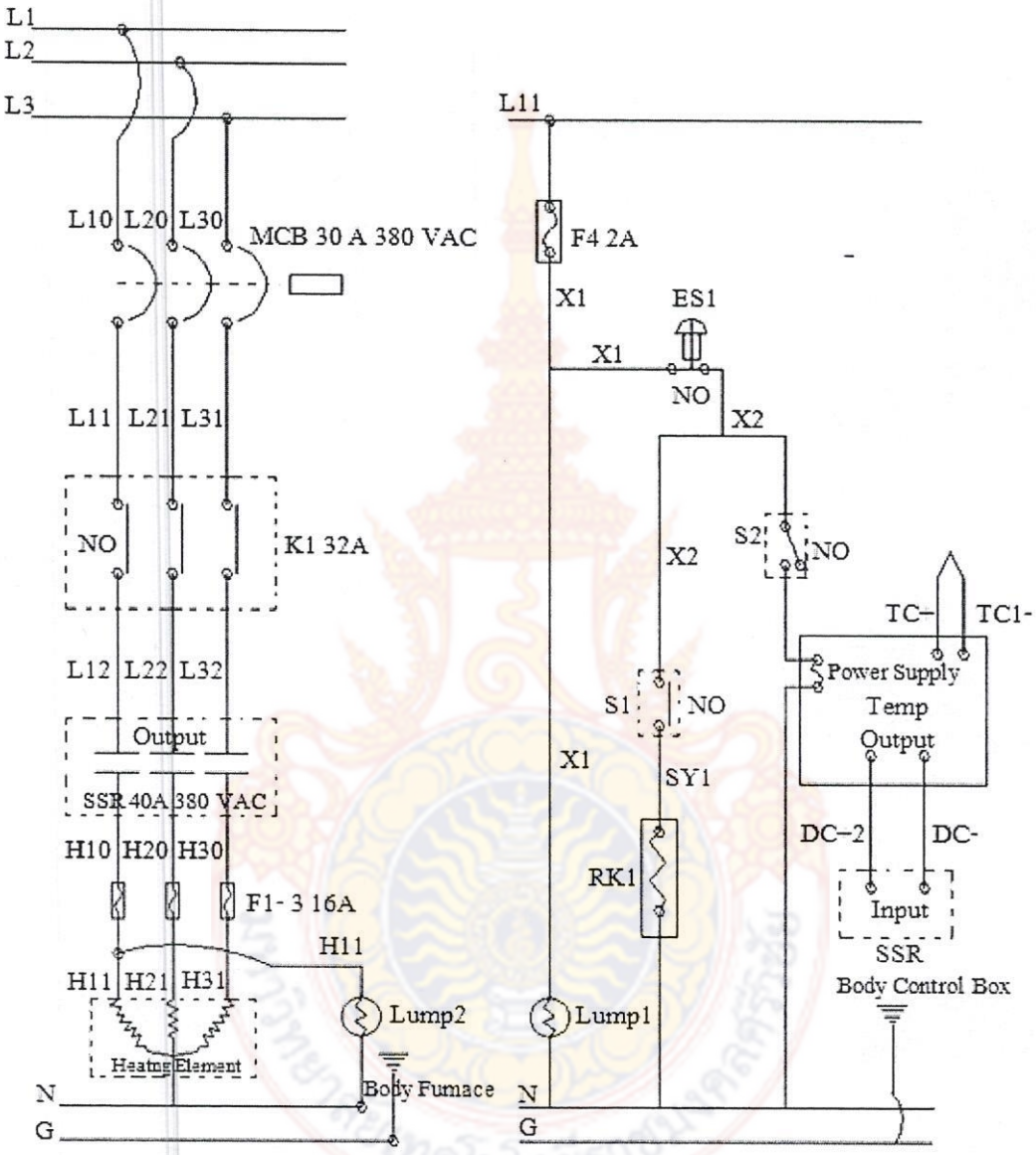
2. กรณีติดตั้งเครื่องวัดไฟฟ้าทางด้านแรงต่ำ ของหม้อแปลงซึ่งเป็นสมบัติของผู้ใช้ไฟฟ้า ให้คำนวณกิโลวัตต์ และหน่วยคิดเงินเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 2 เพื่อครอบคลุมการสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งมิได้วัดรวมไว้ด้วย

3. ประเภทที่ 6.2 เป็นอัตราเลือก เมื่อใช้แล้วจะกลับไปใช้อัตราประเภทที่ 6.1 ไม่ได้ ทั้งนี้ ผู้ใช้ไฟฟ้าจะต้องชำระค่าเครื่องวัด TOU และหรือค่าใช้จ่ายอื่นตามที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคกำหนด

ภาคผนวก จ

วงจรไฟฟ้าสำหรับเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทาน

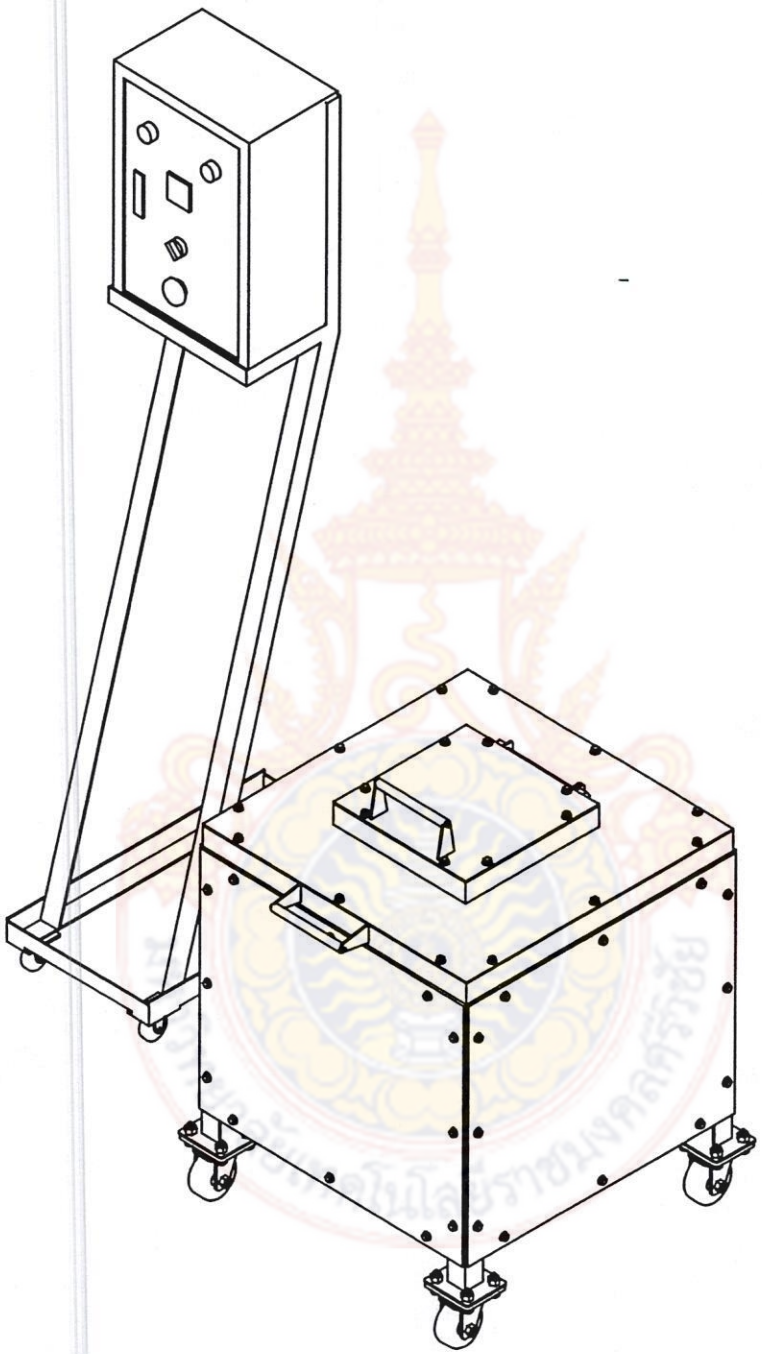
วงจรไฟฟ้าสำหรับเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทาน



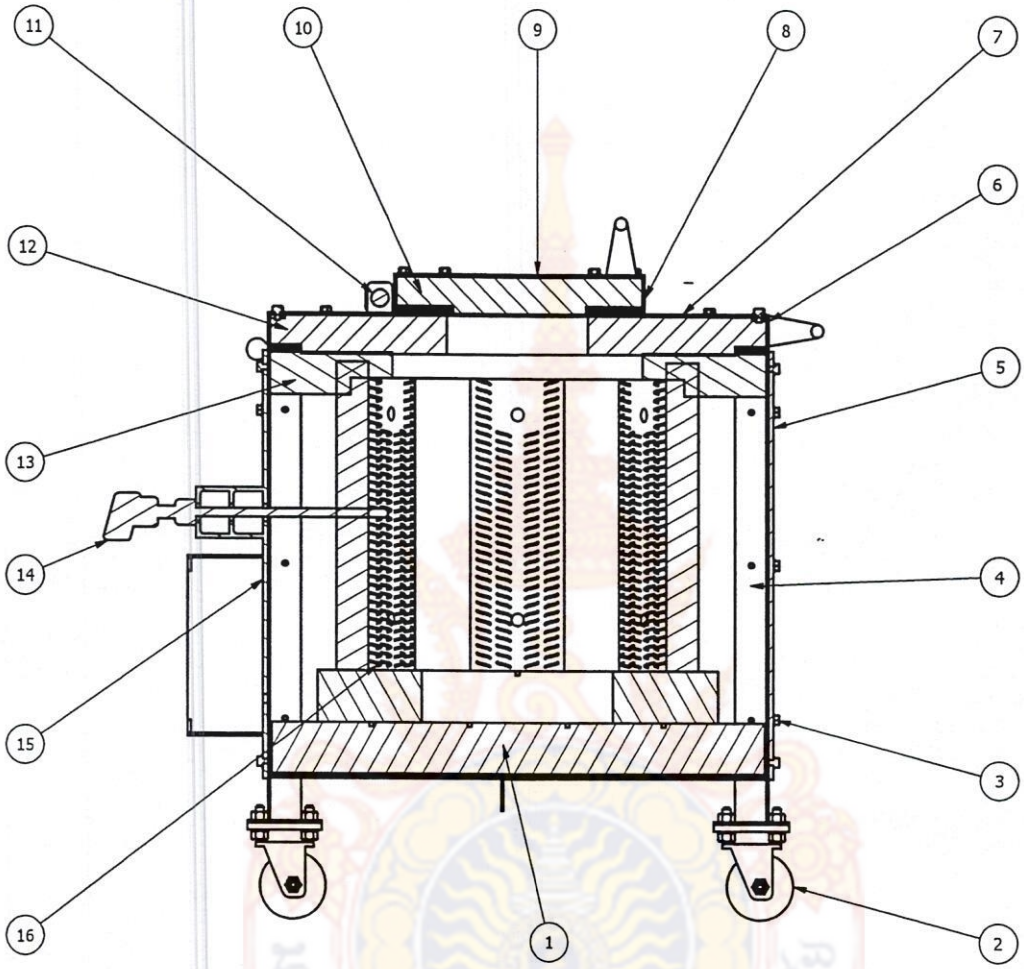
ภาพที่ จ-1 วงจรไฟฟ้า 6.6 กิโลวัตต์ 380 โวลต์ 3 เฟส

ภาคผนวก ฉ

แบบเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทาน

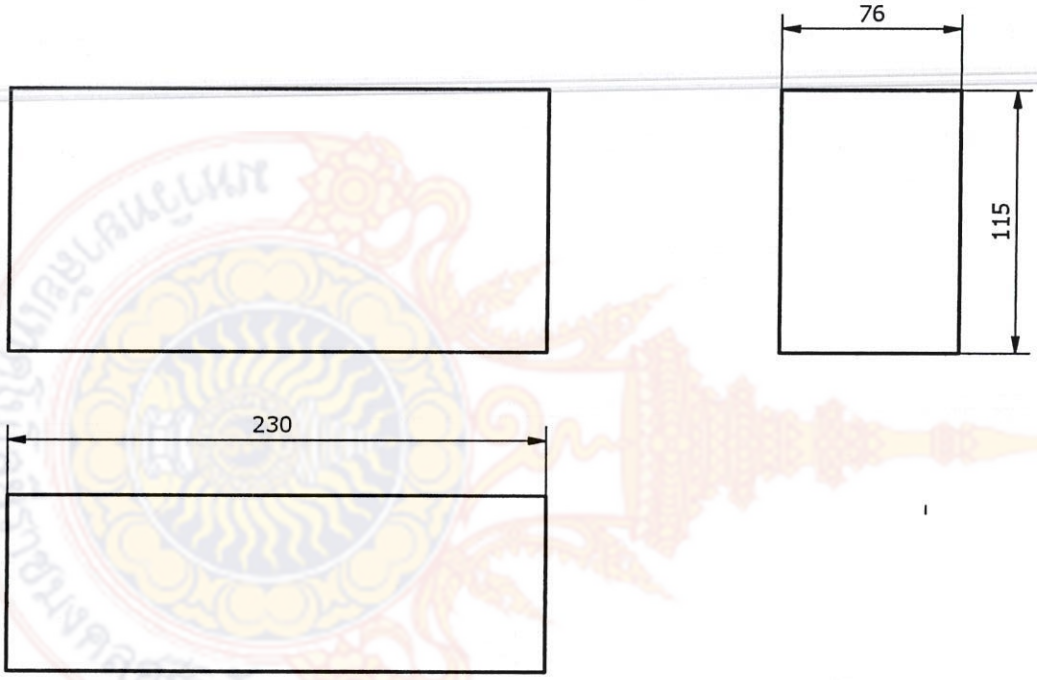


Pos	Part Name and Remark		Dimension	Material	Req	Drawing No
Scale: 1:8	Draw	W.Smaoh		Rajamangala University of Technology Srivijaya		
	Checked	R.Burapa				
Gen.Tolerences ISO2768	Checked					
	Title: Electric Resistance Furnace			Drawing No. ERF-A		



Pos	Part Name and Remark	Dimension	Material	Req	Drawing No
16	Heater	130x25x300	Standard	6	-
15	Back wall	600x500x3	st 37	1	ERF-11
14	Thermocouple	Ø 1x30	Standard	1	-
13	Ceramic Fiber Board	594x594x50	Standard	1	ERF-10
12	Ceramic Fiber Board	594x594x50	Standard	1	ERF-09
11	Screw	Ø 1" x 7"	Standard	1	-
10	Ceramic Fiber Board	294x294x50	Standard	1	ERF-08
9	small top wall	300x300x3	st 37	1	ERF-07
8	Small Cover	300x300x40	st 37	1	ERF-06
7	Top Wall	600x600x3	st 37	1	ERF-05
6	Large Cover	600x600x40	st 37	1	ERF-04
5	Side Wall	600x500x3	st 37	3	ERF-03
4	Furnace Structure	600x600x500	st 37	1	ERF-02
3	Screw	Ø 1 4x1"	Standard	68	-
2	Wheel OKU-434	Ø 3"	Standard	4	-
1	Insulatior Brick	76x115x230	Standard	20	ERF-01

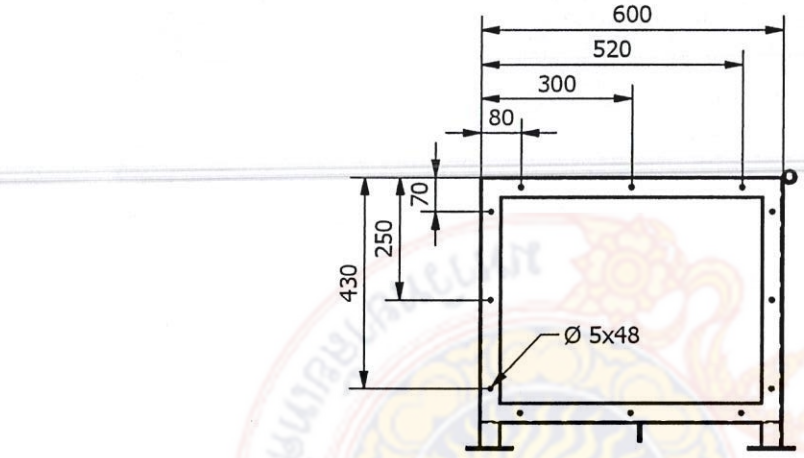
Scale: 1:6	Draw	W.Smaoh	Rajamangala University of Technology Srivijaya
	Checked	R.Burapa	
Gen.Tolerences ISO2768	Checked		
	Title: Electric Resistance Furnace		Drawing No. ERF-B

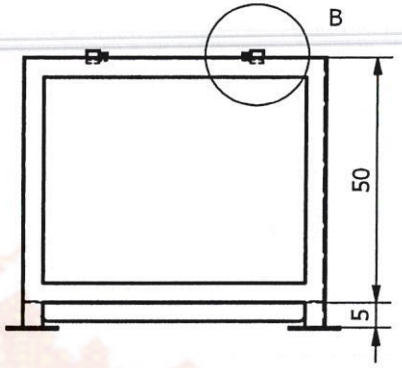


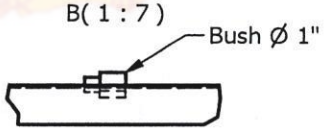
1	Insulator Brick	76x115x230	Standard	20	ERF-01
Pos	Part Name and Remark	Dimension	Material	Req	Drawing No

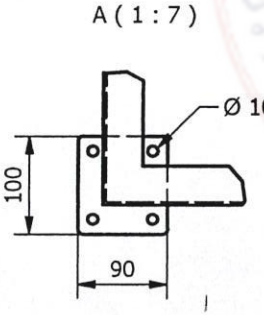
Scale: 1:3	Draw	W.Smaoh		Rajamangala University of Technology Srivijaya
	Checked	R.Burapa		
Gen.Tolerences ISO2768	Checked			

	Title: Electric Resistance Furnace	Drawing No. ERF-01





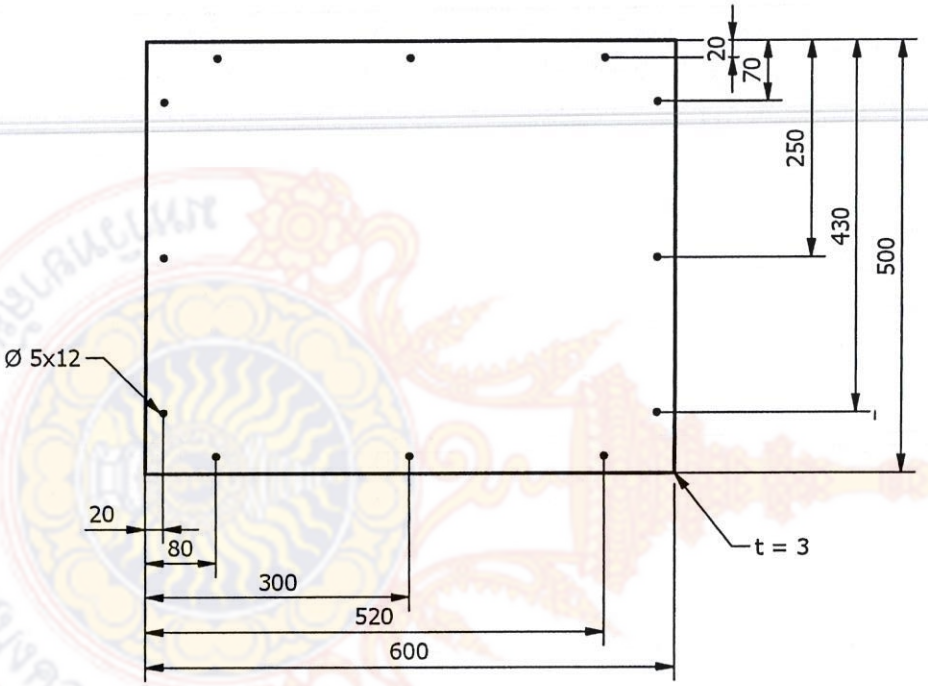




4	Furnace Structure	600x600x500	st 37	1	ERF-02
Pos	Part Name and Remark	Dimension	Material	Req	Drawing No

Scale: 1:14	Draw	W.Smaoh	Rajamangala University of Technology Srivijaya
Gen.Tolerences	Checked	R.Burapa	
	Checked		

	Title: Electric Resistance Furnace	Drawing No. ERF-02

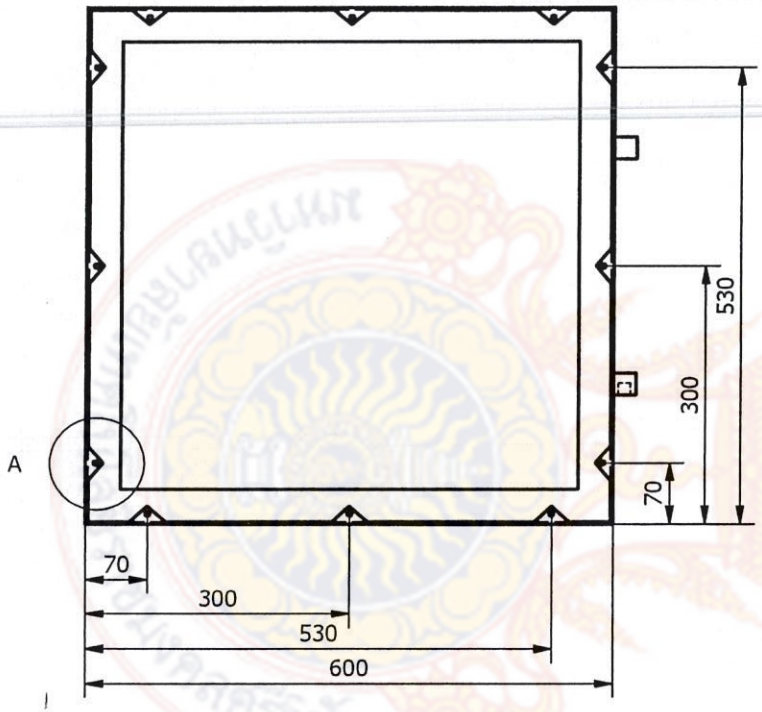


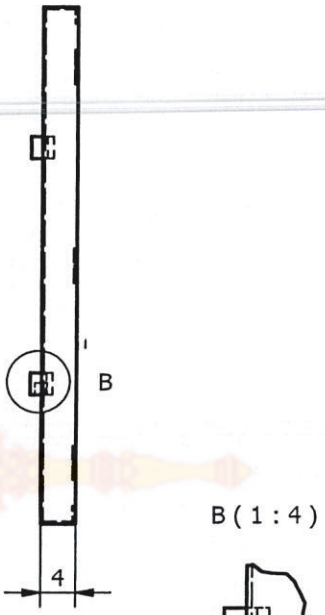
5	Side Wall	600x500x3	st 37	3	ERF-03
Pos	Part Name and Remark	Dimension	Material	Req	Drawing No

Scale: 1:8	Draw	W.Smaoh	Rajamangala University of Technology Srivijaya Songkhla Campus
	Checked	R.Burapa	
Gen.Tolerences ISO2768	Checked		

Title: Electric Resistance Furnace

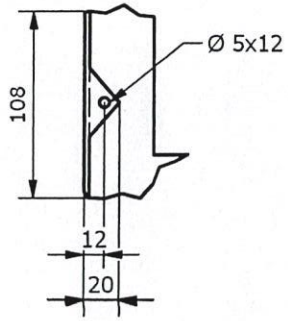
Drawing No. ERF-03





B (1 : 4)

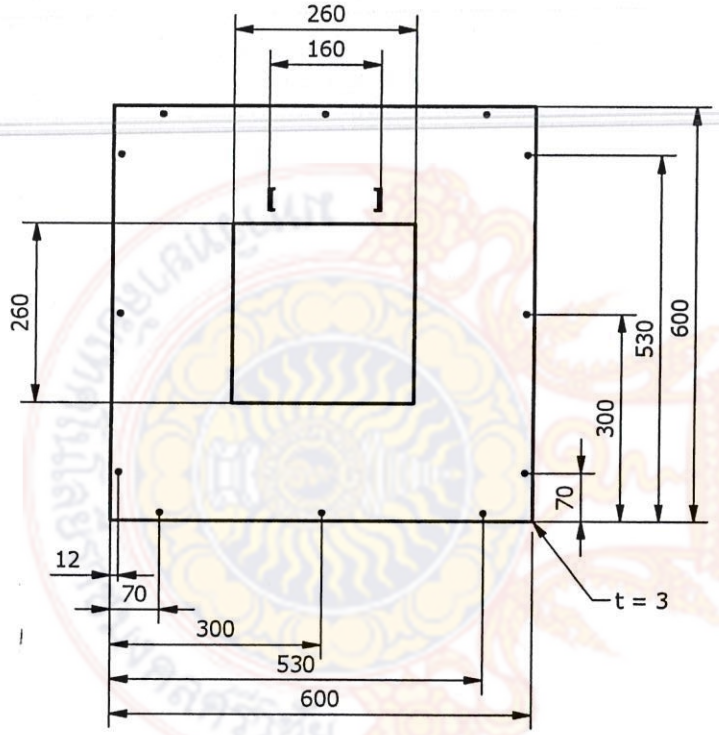
A (1 : 4)



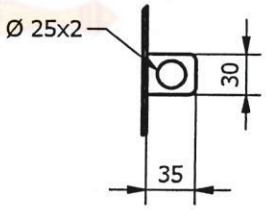
6	Large Cover	600x600x40	st 37	1	ERF-04
Pos	Part Name and Remark	Dimension	Material	Req	Drawing No

Scale: 1:8	Draw	W.Smaoh	Rajamangala University of Technology Srivijaya
	Checked	R.Burapa	
Gen.Tolerences ISO2768	Checked		

	Title: Electric Resistance Furnace	Drawing No. ERF-04



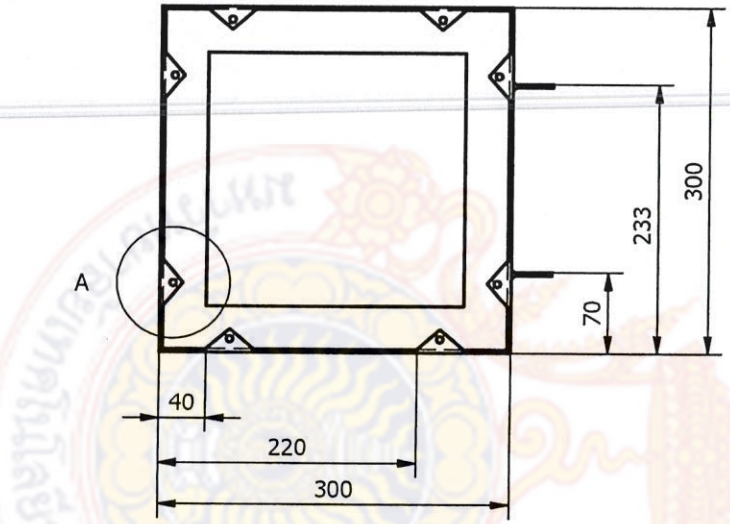
A (1 : 5)



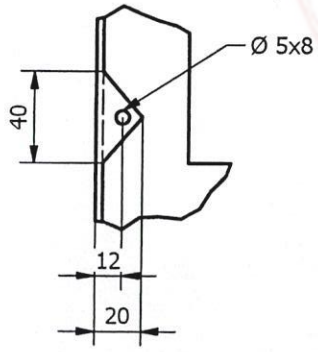
7	Top Wall	600x600x3	st 37	1	ERF-05
Pos	Part Name and Remark	Dimension	Material	Req	Drawing No

Scale: 1:10	Draw	W.Smaoh		Rajamangala University of Technology Srivijaya
	Checked	R.Burapa		
Gen.Tolerences ISO2768	Checked			

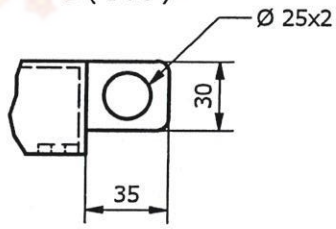
	Title: Electric Resistance Furnace	Drawing No. ERF-05



A (1 : 3)



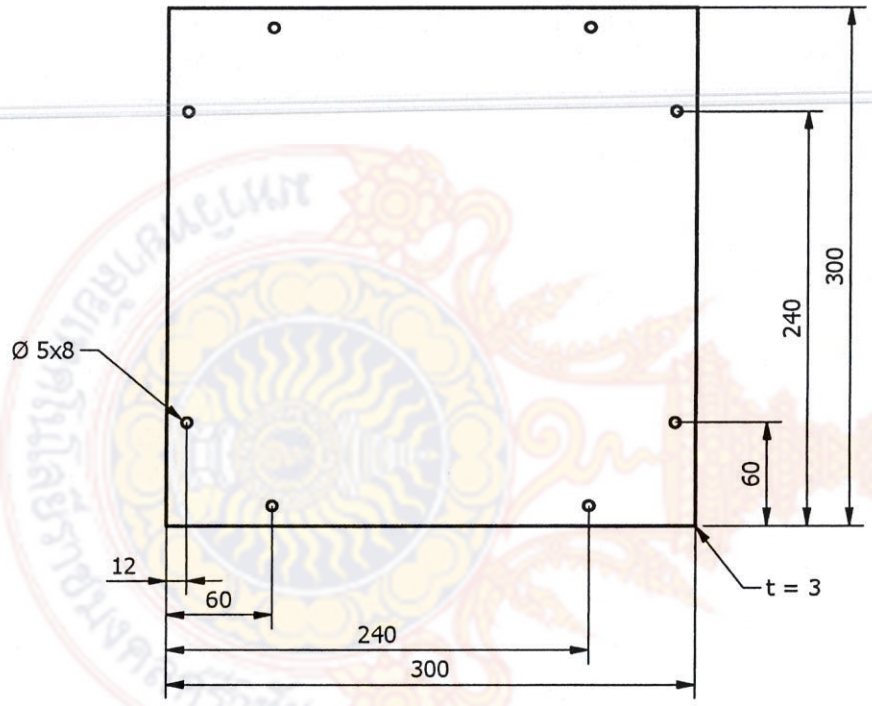
B (1 : 3)



8	Small Cover	300x300x40	st 37	1	ERF-06
Pos	Part Name and Remark	Dimension	Material	Req	Drawing No

Scale: 1:6	Draw	W.Smaoh	Rajamangala University of Technology Srivijaya
	Checked	R.Burapa	
Gen.Tolerences ISO2768	Checked		

Title: Electric Resistance Furnace	Drawing No. ERF-06

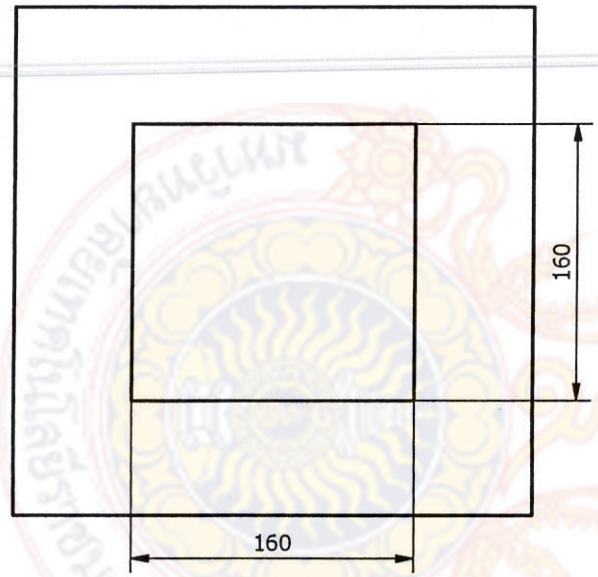


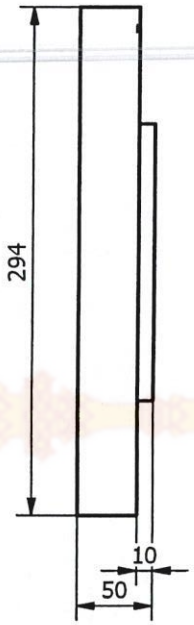
9	small top wall	300x300x3	st 37	1	ERF-07
Pos	Part Name and Remark	Dimension	Material	Req	Drawing No

Scale: 1:4	Draw	W.Smaoh		Rajamangala University of Technology Srivijaya
	Checked	R.Burapa		
Gen.Tolerences ISO2768	Checked			

Title: Electric Resistance Furnace

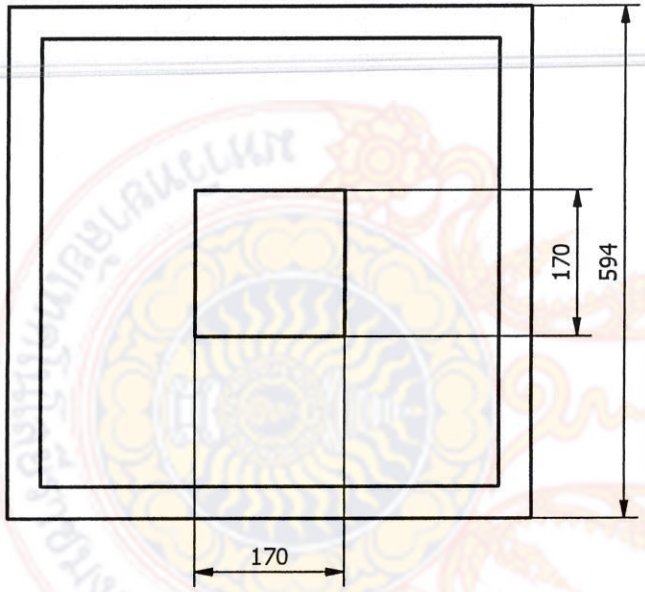
Drawing No. ERF-07

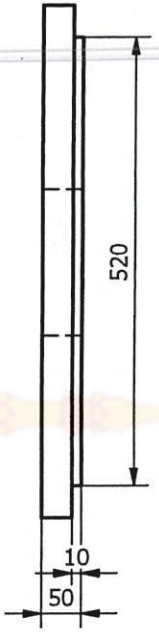




10	Ceramic Fiber Board	294x294x50	Standard	1	ERF-08
Pos	Part Name and Remark	Dimension	Material	Req	Drawing No

Scale: 1:4	Draw	W.Smaoh		Rajamangala University of Technology Srivijaya
	Checked	R.Burapa		
Gen.Tolerences ISO2768	Checked			
	Title: Electric Resistance Furnace			Drawing No. ERF-08

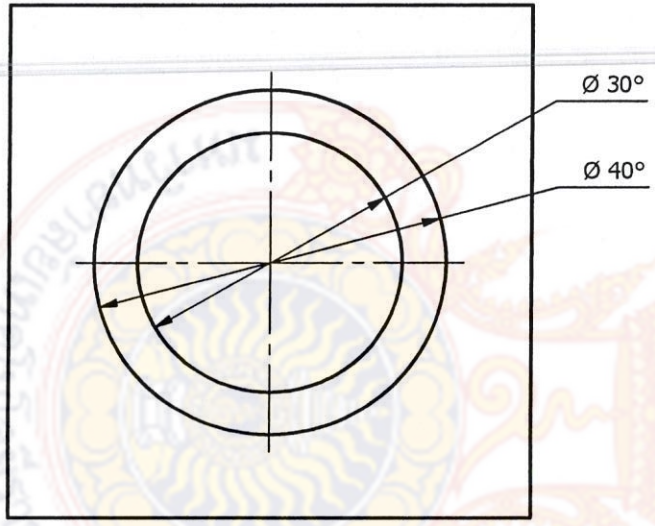


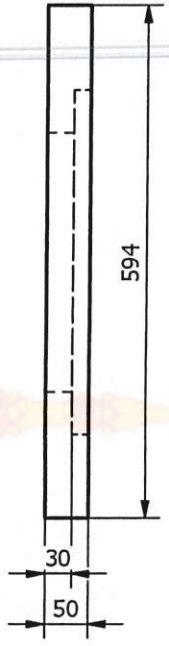


11	Ceramic Fiber Board	594x594x50	Standard	1	ERF-09
Pos	Part Name and Remark	Dimension	Material	Req	Drawing No

Scale: 1:8	Draw	W.Smaoh	Rajamangala University of Technology Srivijaya
	Checked	R.Burapa	
Gen.Tolerences ISO2768	Checked		

	Title: Electric Resistance Furnace	Drawing No. ERF-09

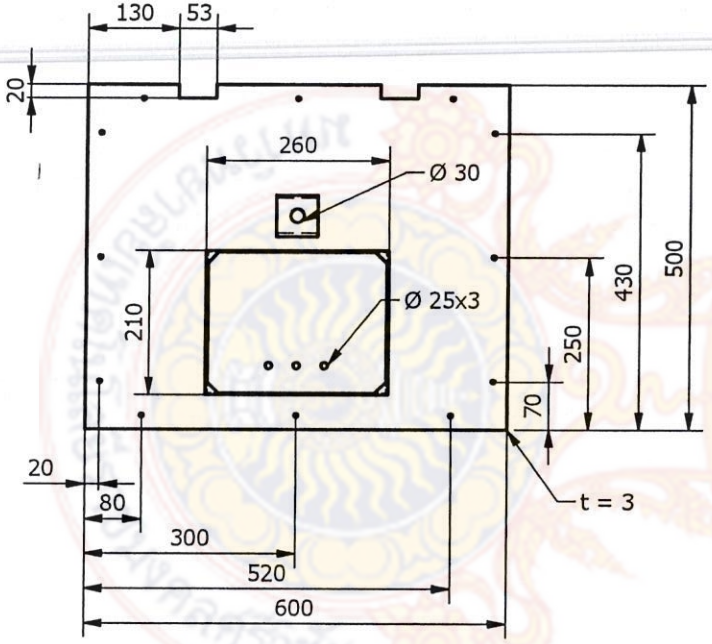


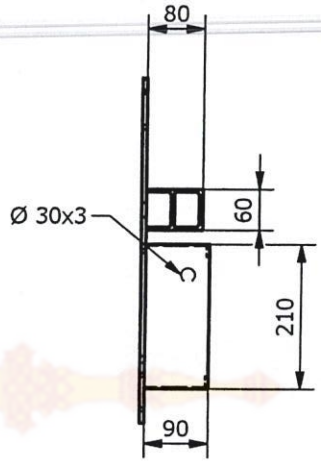


12	Ceramic Fiber Board	594x594x50	Standard	1	ERF-10
Pos	Part Name and Remark	Dimension	Material	Req	Drawing No

Scale: 1:8	Draw	W.Smaoh		Rajamangala University of Technology Srivijaya
	Checked	R.Burapa		
Gen.Tolerences ISO2768	Checked			

	Title: Electric Resistance Furnace	Drawing No. ERF-10

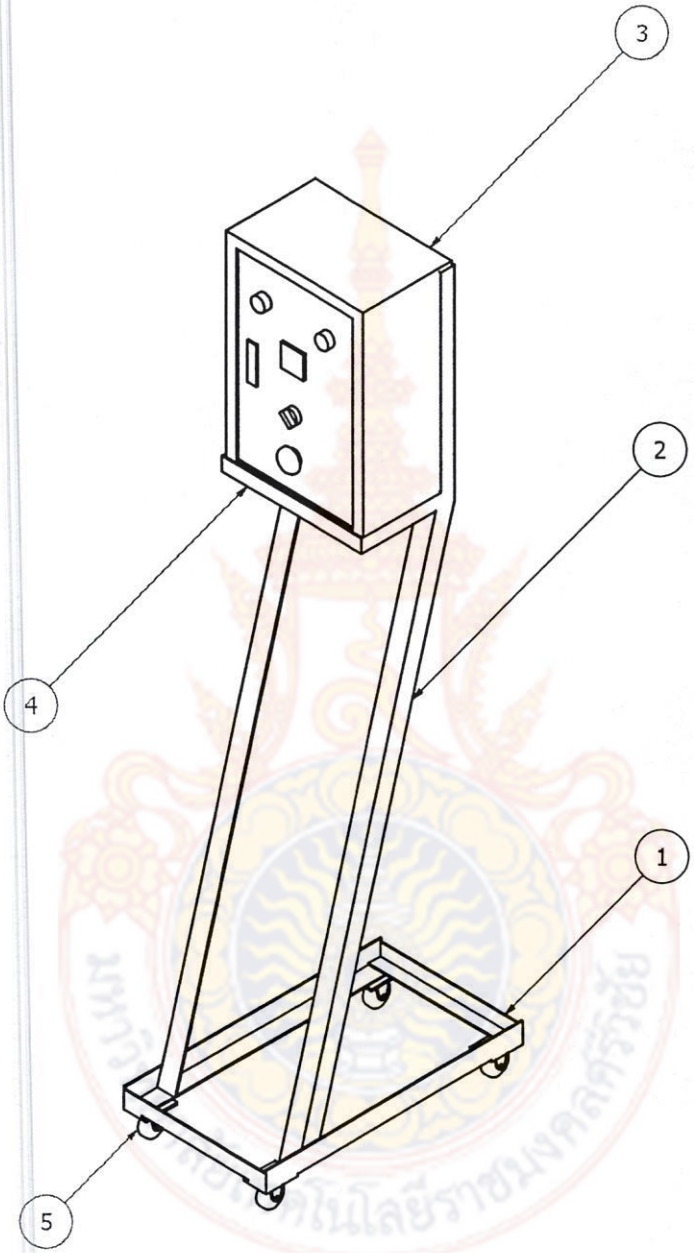




14	Back wall	600x500x3	st 37	1	ERF-11
Pos	Part Name and Remark	Dimension	Material	Req	Drawing No

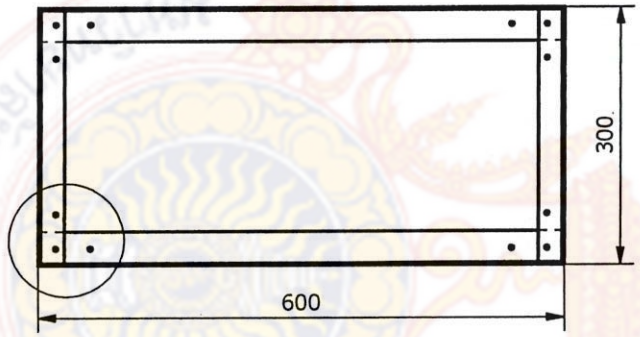
Scale: 1:10	Draw	W.Smaoh	Rajamangala University of Technology Srivijaya
	Checked	R.Burapa	
Gen.Tolerences ISO2768	Checked		

	Title: Electric Resistance Furnace	Drawing No. ERF-11

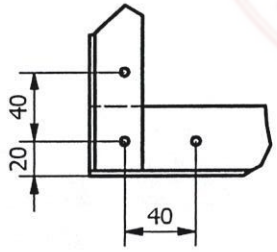


Pos	Part Name and Remark	Dimension	Material	Req	Drawing No
21	Wheel OKU-434	Ø 2"	Standard	4	-
20	Top Structure	300X210X450	st 37	1	ERF-14
19	Electrical Control Box	300x200x450	Standard	1	-
18	Central pillar structure	50X50X1170	st 37	2	ERF-13
17	Bottom Structure	600X300X50	st 37	1	ERF-12

Scale: 1:8	Draw	W.Smaoh	Rajamangala University of Technology Srivijaya
	Checked	R.Burapa	
Gen.Tolerences ISO2768	Checked		
	Title: Controller		Drawing No. ERF-C

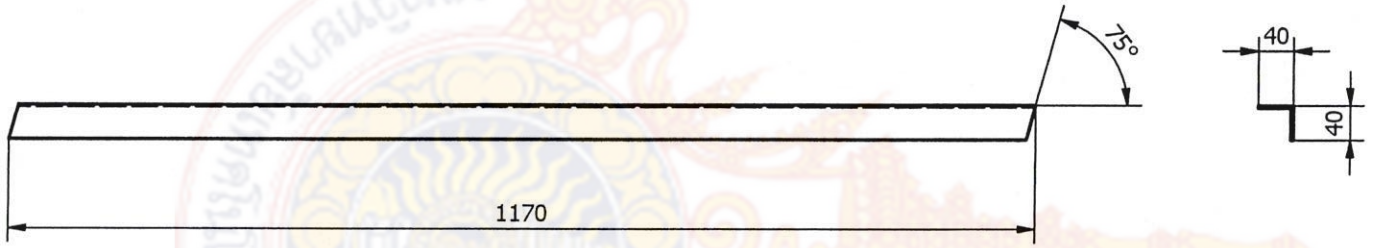


A (1 : 4)

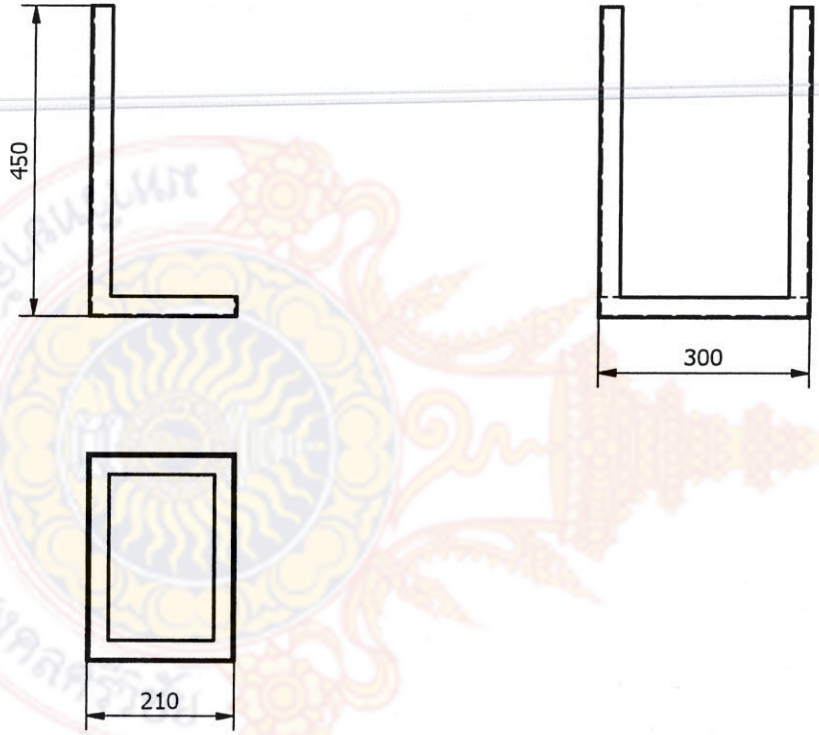


17	Bottom Structure	600x300x40	St 37	1	ERF-12
Pos	Part Name and Remark	Dimension	Material	Req	Drawing No

Scale: 1:8	Draw	W.Smaoh	Rajamangala University of Technology Srivijaya
	Checked	R.Burapa	
Gen.Tolerences ISO2768	Checked		
Title: Controller			Drawing No. ERF-12



18	Central pillar structure		40x40x1170	St 37	2	ERF-13
Pos	Part Name and Remark		Dimension	Material	Req	Drawing No
Scale: 1:8	Draw	W.Smaoh		Rajamangala University of Technology Srivijaya		
	Checked	R.Burapa				
Gen.Tolerences ISO2768	Checked					
	Title: Controller			Drawing No. ERF-13		



4	Top Structure	300x210x450	St 37	1	ERF-14
Pos	Part Name and Remark	Dimension	Material	Req	Drawing No

Scale: 1:8	Draw	W.Smaoh		Rajamangala University of Technology Srivijaya
	Checked	R.Burapa		
Gen.Tolerences ISO2768	Checked			
	Title: Controller			Drawing No. ERF-14

ภาคผนวก ช

การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี 2554

แบบตอบรับบทความวิชาการ ในการประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี 2554

26 สิงหาคม 2554

ที่ IENET.MPM083/2554
เรื่อง ตอบรับบทความวิชาการ
เรียน คุณ รอมฎอน บูระพา

ตามที่ท่านได้ส่งบทความวิชาการ เรื่อง **"การออกแบบและสร้างเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานสำหรับการหลอมเศษโลหะผสมอลูมิเนียม"** เข้าร่วมการประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี 2554 (IE Network 2011) ระหว่างวันที่ 20-21 ตุลาคม 2554 ณ โรงแรมแอมบาสเดอร์ซิตี้ จอมเทียม พัทยา จังหวัดชลบุรี

ในการนี้ คณะกรรมการดำเนินการ การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี 2554 มีความยินดีที่จะเรียนให้ท่านทราบว่า บทความเรื่องดังกล่าวได้ **ผ่านการพิจารณา** โดยผู้ทรงคุณวุฒิให้นำเสนอในการประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี 2554 แล้ว

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

ขอแสดงความนับถือ

(นายจงกล สุภารัตน์)
ประธานคณะกรรมการดำเนินการ
การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี 2554

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เลขที่ 39 หมู่ 1
ถนนรังสิต-นครนายก ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ 02-549-3440 โทรสาร 02-549-3442
เว็บไซท์: www.ienetwork2011.com อีเมล์: ienetwork2011@gmail.com

การออกแบบและสร้างเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานสำหรับการหลอมเศษโลหะผสมอลูมิเนียม

Design and Construction of an Electric Resistance Furnace for Melting Aluminum Alloy Scrap

รอมฎอน บูระพา[1]* สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์[2] จักรนรินทร์ ฉัตรทอง[3] ซูไฮดี สนิ[4]
[1,2,3,4]สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา รหัสไปรษณีย์ 90000
E-mail: romadorn.b@hotmail.com*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาออกแบบและสร้างเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานสำหรับการหลอมเศษโลหะผสมอลูมิเนียม เพื่อนำไปใช้ในการลงฝึกปฏิบัติงานหลอมและหล่อโลหะของนักศึกษา โดยในการออกแบบเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทาน จะออกแบบเตาหลอมเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมมีขนาด 60 × 60 ตารางเซนติเมตร สูง 55 เซนติเมตร ใช้ขดลวดความต้านทานเป็นตัวกำเนิดความร้อน แรงดันไฟฟ้า 380 โวลต์ 3 เฟส มีกำลังไฟฟ้า 6.6 กิโลวัตต์ อุณหภูมิใช้งานสูงสุดไม่เกิน 1,000 องศาเซลเซียส ใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K เป็นตัวตรวจวัดอุณหภูมิภายในเตา ใช้อิฐฉนวนความร้อน เซรามิกกันความร้อนแบบผืนผ้าและเซรามิกกันความร้อนแบบแผ่น เป็นฉนวนป้องกันการสูญเสียความร้อน ผลที่ได้จากการทดสอบเตาพบว่ามีการสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตาอยู่ที่ 7,920 กิโลจูลต่อชั่วโมง หรือคิดเป็น 33.4 เปอร์เซ็นต์ ของความร้อนที่เข้าสู่เตา และประสิทธิภาพทางความร้อนของการหลอมอลูมิเนียม มีค่าเท่ากับ 14.8 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อชั่วโมงเท่ากับ 23,695 กิโลจูลต่อชั่วโมง คิดเป็นค่าไฟฟ้าในการหลอมต่อชั่วโมงจะมีค่าใช้จ่ายอยู่ที่ 23.5 บาทต่อชั่วโมง และเมื่อคิดเป็นต้นทุนค่าไฟฟ้าในการหลอมเศษโลหะผสมอลูมิเนียมจะมีค่าเท่ากับ 9.4 บาทต่อกิโลกรัม นอกจากนี้ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการหลอมของเศษโลหะผสมอลูมิเนียม ด้วยเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานที่ได้สร้างขึ้น ทำให้ได้อลูมิเนียมอินกอตที่มีน้ำหนักรวมคิดเป็น 94 เปอร์เซ็นต์ และมีขี้โลหะเกิดขึ้นคิดเป็น 5 เปอร์เซ็นต์

คำหลัก เตาหลอม โลหะผสมอลูมิเนียม วัสดุทนไฟ

1. บทนำ

อลูมิเนียมนับเป็นโลหะที่ได้รับความนิยมในการใช้งานอย่างกว้างขวางและต่อเนื่อง เพราะสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น มีน้ำหนักเบา แข็งแรง ไม่เป็นสนิมได้ง่าย ไม่เป็นพิษ นำความร้อนได้ดีและเมื่อนำไปผสมกับธาตุผสมอื่น ทำให้ได้ความแข็งแรงต่อหน่วยน้ำหนักที่สูงและมีความเหนียวมาก สามารถขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีต่าง ๆ ได้ง่ายจึงนิยมใช้ทำผลิตภัณฑ์และชิ้นส่วนต่าง ๆ

จากการขึ้นรูปอลูมิเนียมด้วยกรรมวิธีต่าง ๆ เพื่อผลิตผลิตภัณฑ์หรือชิ้นส่วนทำให้เกิดเศษโลหะผสมอลูมิเนียม ซึ่งเศษโลหะผสมอลูมิเนียมเหล่านี้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยผ่านกรรมวิธีการหลอมโลหะด้วยความร้อนภายในเตาหลอม และในการลงฝึกปฏิบัติงานของนักศึกษาที่ผ่านมา โรงฝึกปฏิบัติงานมีเศษโลหะผสมอลูมิเนียมจากกระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่องมือกลเป็นจำนวนมาก แต่โรงฝึกปฏิบัติงานยังไม่สามารถนำเศษโลหะผสมอลูมิเนียมดังกล่าวมาใช้ประโยชน์ต่อได้ เนื่องจากไม่มีเครื่องมือเพื่อมาใช้ในการหลอมเศษโลหะผสมอลูมิเนียม คณะผู้วิจัยจึงได้มีแนวคิดในการออกแบบและสร้างเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานสำหรับการหลอมเศษโลหะผสมอลูมิเนียม เพื่อนำเศษโลหะอลูมิเนียมเหลือใช้มาทำการหลอมและหล่อเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ในการลงฝึกปฏิบัติงานของนักศึกษา และประโยชน์ในการทำวิจัยการเรียนการสอนในวิชาที่เกี่ยวกับการหล่อโลหะต่อไปได้ในอนาคต

2. ทฤษฎี

การคำนวณหาค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในเตาหลอมรายละเอียดของสมการต่างๆ สามารถดูได้จาก [2,3,7,9]

2.1 ปริมาณความร้อนเข้า (Q_{input})

ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเตาหลอมเป็นปริมาณความร้อนที่ได้จากขดลวดความต้านทาน (Heater) ซึ่งคำนวณได้จากค่ากำลังไฟฟ้าของขดลวดความต้านทานที่ใช้ตามสมการที่ (1)

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times PF \quad (1)$$

เมื่อ P คือ กำลังไฟฟ้า (W)
V คือ แรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย (V)
I คือ กระแสไฟฟ้า (A)
PF คือ ค่าตัวประกอบกำลัง สำหรับฮีตเตอร์ เท่ากับ 1

2.2 ปริมาณความร้อนออก (Q_{output})

1. ปริมาณความร้อนที่สูญเสียผ่านผนังเตา (Q_{wall})

การคำนวณหาปริมาณความร้อนที่สูญเสียผ่านผนังเตา

สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$Q_{Wall} = \frac{T_2 - T_1}{\left[\left(\frac{L_1}{k_1 A_1}\right) + \left(\frac{L_2}{k_2 A_2}\right) + \left(\frac{L_3}{k_3 A_3}\right)\right]} \quad (2)$$

เมื่อ Q_{Wall} คือ ปริมาณความร้อนที่สูญเสียผ่านผนังเตา (W)
T_1 คือ อุณหภูมิภายนอกของผนังเตา (K)
T_2 คือ อุณหภูมิภายในของผนังเตา (K)
$L_{1,2,3}$ คือ ความหนาของผนังเตาชั้นที่ 1, 2, และ 3 (m)
$k_{1,2,3}$ คือ ค่าการนำความร้อนของผนังเตาชั้นที่ 1, 2, และ 3 (W/m-K)
$A_{1,2,3}$ คือ พื้นที่หน้าตัดของผนังเตาชั้นที่ 1, 2, และ 3 ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อน (m^2)

2. ปริมาณความร้อนที่สะสมไว้กับวัสดุภายในเตา (Q_C)

เป็นการสะสมความร้อนของวัตถุภายใต้ปริมาตรคงที่ ดังนั้นการคำนวณหาปริมาณความร้อนที่สะสมไว้กับวัสดุภายในเตาสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$Q_C = \frac{mC_p(T_2 - T_1)}{t} \quad (3)$$

เมื่อ Q_C คือ ปริมาณความร้อนที่สะสมไว้กับวัสดุในเตา (W)
m คือ มวลของวัตถุ (kg)
C_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะของวัตถุ (kJ/kg-K)
T_1 คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของวัตถุก่อนรับความร้อน (K)
T_2 คือ อุณหภูมิสุดท้ายของวัตถุหลังรับความร้อน (K)
t คือ เวลาในการให้ความร้อน (s)

3. ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทให้กับอลูมิเนียม (Q_{Al})

เป็นการถ่ายเทความร้อนเพื่อให้เกิดการหลอมละลายของวัตถุภายใต้ปริมาตรคงที่ ดังนั้นการคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทให้กับอลูมิเนียม สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$Q_{Al} = \frac{mC_p(T_2 - T_1) + mLH}{t} \quad (4)$$

เมื่อ Q_{Al} คือ ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทให้กับอลูมิเนียม (W)
LH คือ ค่าความร้อนแฝงของวัตถุ (kJ/kg)

2.3 ประสิทธิภาพของเตาหลอม

ค่าประสิทธิภาพของเตาหลอมเป็นค่าที่ใช้ในการประเมินสมรรถนะทางความร้อนของเตาหลอม ซึ่งคำนวณได้จาก (5)

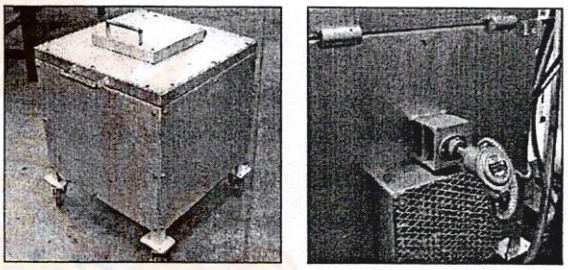
$$\eta_{furnace} = \frac{Q_{useful}}{Q_{input}} \quad (5)$$

เมื่อ $\eta_{furnace}$ คือ ประสิทธิภาพทางความร้อน (%)
Q_{useful} คือ ปริมาณความร้อนที่ใช้ในเตา (W)
Q_{input} คือ ปริมาณความร้อนที่เข้าเตา (W)

3. วิธีการดำเนินการ

3.1 การสร้างเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทาน

ทำการออกแบบและสร้างเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานสำหรับการหลอมเศษโลหะผสมอลูมิเนียมเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมมีขนาด 60 × 60 ตารางเซนติเมตร สูง 55 เซนติเมตร ดังรูปที่ 1 โดยใช้ขดลวดความต้านทานเป็นตัวกำเนิดความร้อน แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ 380 โวลต์ 3 เฟส มีกำลังไฟฟ้า 6.6 กิโลวัตต์ อุณหภูมิใช้งานสูงสุดไม่เกิน 1,000 องศาเซลเซียส ฝาปิดบุด้วยเซรามิกกันความร้อนแบบแผ่น ผนังเตาด้านข้างบุด้วยเซรามิกกันความร้อนแบบผืนผ้า พื้นของเตาก่อด้วยอิฐฉนวนความร้อนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน และติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K เพื่อเป็นตัวตรวจวัดอุณหภูมิภายในเตา



(ก) (ข)

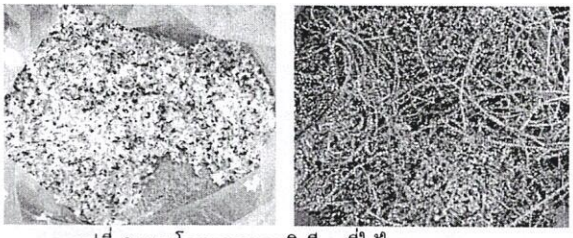
รูปที่ 1 (ก) เตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้าน และ (ข) การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเพื่อตรวจวัดอุณหภูมิภายในเตา

3.2 การทดลอง

ทำการทดลองหลอมเศษโลหะผสมอลูมิเนียมที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่องมือกล ดังรูปที่ 2 ในปริมาณ 10 กิโลกรัมต่อครั้ง ด้วยเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานที่สร้างขึ้น โดยตั้งอุณหภูมิภายในเตาหลอมที่ 750 องศาเซลเซียส

ทำการหาค่าประสิทธิภาพของเตาหลอมเพื่อใช้ในการประเมินสมรรถนะทางความร้อนของเตาหลอม

ทำการหาค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อชั่วโมง เพื่อวิเคราะห์หาต้นทุนในการหลอมเศษโลหะผสมอลูมิเนียมที่ 10 กิโลกรัมด้วยเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานดังกล่าว

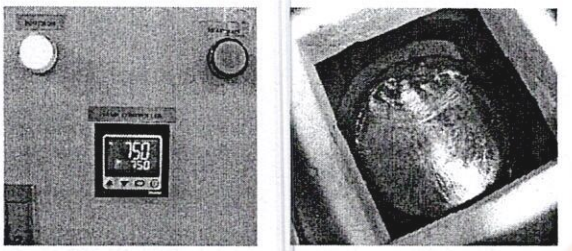


รูปที่ 2 เศษโลหะผสมอลูมิเนียมที่ใช้ในการหลอม

และทำการหาค่าปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการหลอม (Yield of melting) ของเศษโลหะผสมอลูมิเนียมที่ 10 กิโลกรัม เพื่อเปรียบเทียบปริมาณของอลูมิเนียมที่ได้และปริมาณขี้โลหะ (Slag) ที่เกิดขึ้น

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

จากการทดลองหลอมเศษโลหะผสมอลูมิเนียมที่ 10 กิโลกรัม ด้วยเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ทำให้ได้อลูมิเนียมหลอมเหลว ดังรูปที่ 3 ผลลัพธ์ที่ได้จากการวัดค่าต่างๆ และการคำนวณปริมาณความร้อนที่เข้าสู่เตาและปริมาณความร้อนที่ใช้ในเตาแสดงในตารางที่ 1



(ก) (ข)

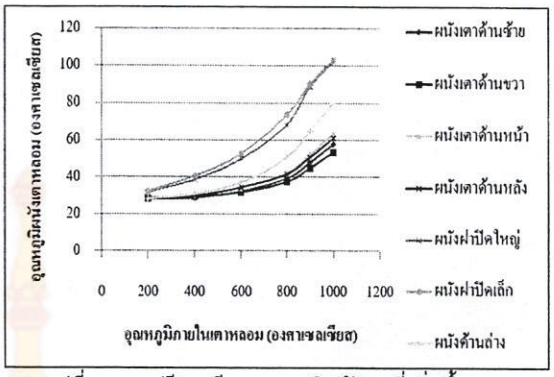
รูปที่ 3 (ก) การตั้งอุณหภูมิในการหลอม และ (ข) อลูมิเนียมหลอมเหลวที่ได้

ตารางที่ 1 ค่าปริมาณความร้อนที่เข้าสู่เตาและปริมาณความร้อนที่ใช้ในเตาหลอม

ชนิดของความร้อน	ปริมาณความร้อน		ประสิทธิภาพ
	(W)	(kJ/hr)	(%)
ความร้อนเข้าสู่เตา			
ความร้อนจาก Heater	6,582	23,695	100.0
ความร้อนที่ใช้ในเตา			
ความร้อนที่สูญเสียผ่านผนังเตา	2,200	7,920	33.4
ความร้อนสะสมของวัสดุในเตา	3,407	12,265	51.8
ความร้อนที่ถ่ายเทให้กับ Al	975	3,510	14.8
ความร้อนที่ใช้ในเตารวม	6,582	23,695	100.0

จากตารางที่ 1 พบว่าในการหลอมเศษโลหะผสมอลูมิเนียม 10 กิโลกรัม ด้วยเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส มีการสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตาอยู่ที่ 7,920 กิโลจูลต่อชั่วโมง หรือคิดเป็น 33.4 เปอร์เซ็นต์ของความร้อนที่เข้าสู่เตา และประสิทธิภาพทางความร้อนของการหลอมอลูมิเนียมมีค่าเท่ากับ 14.8 เปอร์เซ็นต์

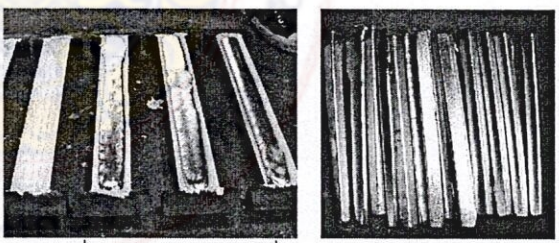
จากการทดลองหาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณผนังเตาด้านต่าง ๆ เพิ่มเติม ค่าของอุณหภูมิที่ได้โดยเฉลี่ยเมื่อนำมาทำการเขียนกราฟแผนภูมิเชิงเส้น ดังรูปที่ 4 จากกราฟแผนภูมิเชิงเส้นแสดงได้ว่า ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงสุดที่สามารถให้อุณหภูมิภายในเตาได้ มีการถ่ายเทความร้อนออกสู่ผนังเตาด้านต่าง ๆ ซึ่งสามารถวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนผนังเตาด้านต่าง ๆ ได้ดังนี้ ที่ผนังเตาด้านซ้าย, ขวา, หน้า, หลัง, ฝาปิดใหญ่, ฝาปิดเล็ก และผนังด้านล่าง อยู่ที่ 57.7, 53.2, 63.4, 60.9, 101.8, 102.9 และ 79.9 องศาเซลเซียส ตามลำดับ คิดเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยของผนังเตาทุกด้านมีค่าเท่ากับ 74.3 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบอุณหภูมิผนังเตาที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิภายในเตา

ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อชั่วโมง สามารถหาได้จากปริมาณความร้อนที่เข้าสู่เตา ซึ่งมีค่าเท่ากับ 23,695 กิโลจูลต่อชั่วโมง (6,582 วัตต์) หรือคิดเป็นจำนวนหน่วยไฟฟ้าที่ใช้เท่ากับ 6.6 หน่วยต่อชั่วโมง เมื่อคิดเป็นค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการหลอมเศษอลูมิเนียม 10 กิโลกรัมต่อครั้งจะมีค่าเท่ากับ 93.86 บาท และเนื่องจากในการหลอมแต่ละครั้งจะใช้เวลาในการเปิดเตาทำงานรวมทั้งหมด 4 ชั่วโมง ดังนั้นเมื่อคิดเป็นค่าไฟฟ้าในการหลอมต่อชั่วโมงจะมีค่าใช้จ่ายอยู่ที่ 23.5 บาทต่อชั่วโมง หรือเมื่อคิดเป็นต้นทุนค่าไฟฟ้าในการหลอมเศษโลหะผสมอลูมิเนียมดังกล่าวจะมีค่าเท่ากับ 9.4 บาทต่อกิโลกรัม

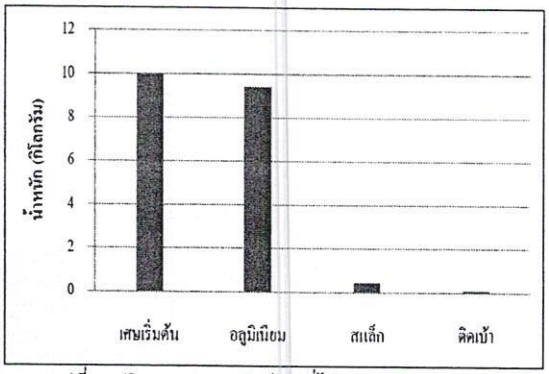
ค่าปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการหลอม (Yield of melting) ของเศษโลหะผสมอลูมิเนียมที่ 10 กิโลกรัม ผลที่ได้จากการหลอมและหล่อเป็นอลูมิเนียมอินกอต ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 อลูมิเนียมอินกอตที่ได้จากการหลอมและหล่อของเศษโลหะผสมอลูมิเนียม

และเมื่อทำการเปรียบเทียบอัตราส่วนน้ำหนักของอลูมิเนียมที่ได้ และปริมาณขี้โลหะ (Slag) ที่เกิดขึ้นด้วยกราฟแผนภูมิแท่ง ดังรูปที่ 6 จากกราฟแผนภูมิแท่งแสดงได้ว่า จากการหลอมเศษโลหะผสมอลูมิเนียม 10 กิโลกรัม ด้วยเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานที่สร้างขึ้น ที่อุณหภูมิภายในเตาหลอม 750 องศาเซลเซียส ทำให้ได้อลูมิเนียมอินกอตที่มีน้ำหนักรวม 9.4 กิโลกรัม คิดเป็น 94 เปอร์เซ็นต์ เกิดสแล็กหรือขี้โลหะขึ้น 0.5 กิโลกรัม คิด

เป็น 5 เปอร์เซ็นต์ และติดค้างในเบ้าหลอมอีก 0.1 กิโลกรัม คิดเป็น 1 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 6 ปริมาณของอลูมิเนียมที่ได้จากการหลอมเศษโลหะผสมอลูมิเนียม 10 กิโลกรัม

4. สรุปผล

ผลการทดลองเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทาน จากการทดลองเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานจะนำเศษโลหะผสมอลูมิเนียมที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่องมือกล มาทำการหลอมด้วยเตาดังกล่าวนี้ ซึ่งสามารถสรุปผลการทดสอบประสิทธิภาพของเตาและการทดลองหลอมเศษโลหะผสมอลูมิเนียมได้ดังนี้

1) เตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานที่สร้างขึ้นมาสามารถหลอมเศษโลหะผสมอลูมิเนียมได้สูงสุดครั้งละไม่เกิน 10 กิโลกรัม

2) เตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานที่สร้างขึ้นมาสามารถให้อุณหภูมิภายในเตาหลอมสูงสุดไม่เกิน 1,000 องศาเซลเซียส

3) เตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานที่สร้างขึ้นมีการสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตาอยู่ที่ 7,920 กิโลจูลต่อชั่วโมง หรือคิดเป็น 33.4 เปอร์เซ็นต์ ของความร้อนที่เข้าสู่เตา

4) ประสิทธิภาพทางความร้อนของการหลอมอลูมิเนียม ด้วยเตาไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานที่สร้างขึ้นมา มีค่าเท่ากับ 14.8 เปอร์เซ็นต์

5) ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อชั่วโมงเท่ากับ 23,695 กิโลจูลต่อชั่วโมง คิดเป็นค่าไฟฟ้าในการหลอมต่อชั่วโมงจะมีค่าใช้จ่ายอยู่ที่ 23.5 บาทต่อชั่วโมง และเมื่อคิดเป็นต้นทุนค่าไฟฟ้าในการหลอมเศษโลหะผสมอลูมิเนียมจะมีค่าเท่ากับ 9.4 บาทต่อกิโลกรัม

6) ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการหลอมของเศษโลหะผสมอลูมิเนียม ทำให้ได้อลูมิเนียมอินกอตที่มีน้ำหนักรวมคิดเป็น 94 เปอร์เซ็นต์ และมีขี้โลหะเกิดขึ้นคิดเป็น 5 เปอร์เซ็นต์

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากงบประมาณรายได้ประจำปีงบประมาณ 2554 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย และต้องขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ เครื่องจักร และห้องปฏิบัติการเครื่องมือกล ตลอดจนคณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการทุกท่าน ที่ให้กำลังใจและแนะแนวทางจนทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] ธนากรณ์ ตั้งวานิชกพงษ์. 2548. การปรับปรุงคุณภาพของน้ำอลูมิเนียมด้วยฟลักซ์. วารสารหล่อโลหะไทย. 15(3): 45-47.

[2] ธวัชชัย สิทธิสระดู่ และ สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์. 2548. การปรับปรุงสมรรถนะของเตาหลอมทองแดงโดยใช้อุปกรณ์อุนอากาศ. การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 1, ชลบุรี, ประเทศไทย, 11-13 พฤษภาคม 2548: ECI02-1-6.

[3] ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ และ ไพโรจน์ ฐานวิเศษ. 2542. เตาอบชุบความร้อนฟลูอิดไดซ์เบด. สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, นครราชสีมา.

[4] สุภชัย ประเสริฐกุล. 2548. เทคโนโลยีงานหล่อโลหะ 2 ฉบับมาตรฐาน. สำนักพิมพ์ไซน์ แอนด์ เอ็นจิเนียริ่ง, กรุงเทพฯ.

[5] พรชัย ตั้งจิตปรารถนา. 2544. เตาอบชุบโลหะแบบต้านทาน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.

[6] Samuel M. 2003. A new technique for recycling aluminium scrap. Journal of Materials Processing Technology, 135: 117-124.

[7] Bala K. C. 2005. Design Analysis of an Electric Induction Furnace for Melting Aluminum Scrap. AU J.T., 9(2): 83-88.

[8] Amini Mashhadi H., Moloodi A., Golestanipour M., and Karimi E.Z.V. 2009. Recycling of aluminium alloy turning scrap via cold pressing and melting with salt flux. Journal of Materials Processing Technology, 209: 3138-3142.

[9] Supakiat S., Sumpun C., Saritporn V., and Lin L. 2009. Feasibility study of lard oil and LPG as fuels for aluminum crucible furnace. Proceeding of the 3rd Thailand Metallurgy Conference, Bangkok, Thailand, Oct. 26-27, 2009: DF-03.