บทที่ 4
ผลการดำเนินงานวิจัย

4.1 ออกแบบเตาหลอมโลหะสำหรับงานหล่อแบบอินเวสเมนต์

หลังจากศึกษาทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับเตาหลอมโลหะสำหรับงานหล่อแบบอินเวสเมนต์แล้วทางคณะผู้ดำเนินงานวิจัยจึงได้ทำการออกแบบเตาหลอมโลหะสำหรับงานหล่อแบบอินเวสเมนต์ โดยแบ่งเป็น 3 ส่วนดังนี้

4.1.1 ออกแบบระบบความร้อน

ระบบความร้อนของเตาหลอมโลหะสำหรับงานหล่อแบบอินเวสเมนต์ ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ

4.1.1.1 ขดลวดความร้อน

เลือกใช้ขดลวดความร้อน Kanthal A-1 เนื่องจากขดลวดความร้อนชนิดนี้สามารถให้ความร้อนได้สูงถึง 1400 °C และคำนวณหาขนาดของขดลวดความร้อนที่จะใช้ในเตาหลอมโลหะสำหรับงานหล่อแบบอินเวสเมนต์ (ดูภาคผนวก ค.) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เส้นผ่าศูนย์กลางของลวด	1.5	มิลลิเมตร
เส้นผ่าศูนย์กลางของขดลวด	15	มิลลิเมตร
ความยาวของขดลวด	1431	มิลลิเมตร
ระยะพิทช์ของขดลวด	2	มิลลิเมตร
กำลังไฟฟ้าที่ใช้	2.709	กิโลวัตต์
กระแสไฟฟ้าที่ใช้	12.315	แอมแปร์
ค่าปริมาณความร้อนที่ใช้	228.15	กิโลจูล

4.1.1.2 ฉนวนความร้อน

ออกแบบและคำนวณหาความหนาของฉนวนกันความร้อน โดยเลือกใช้แผ่นฉนวนกันความร้อนและอิฐทนไฟ (ดูภาคผนวก ค.)

4.1.2 ออกแบบระบบไฟฟ้า

เนื่องจากต้องการให้เตาหลอมโลหะสำหรับงานหล่อโลหะแบบอินเวสเมนต์นี้ใช้ได้กับไฟฟ้าในอาคารทั่วไปอีกทั้งสามารถให้ความร้อนในการหลอมโลหะสม่ำเสมอ ดังนั้นทางคณะผู้ดำเนินงานวิจัยจึงออกแบบระบบไฟฟ้าของเตาหลอมโลหะสำหรับงานหล่อโลหะแบบอินเวสเมนต์ ที่ใช้ได้กับไฟฟ้าในอาคารทั่วไป และเลือกใช้ Solid state relay เป็นอุปกรณ์สำหรับจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่

ขดลวดความร้อน โดยมีอุณหภูมิเป็นตัวกำหนด ซึ่งสามารถควบคุมได้โดยใช้ Temperature Controller (ดูภาคผนวก ข.)

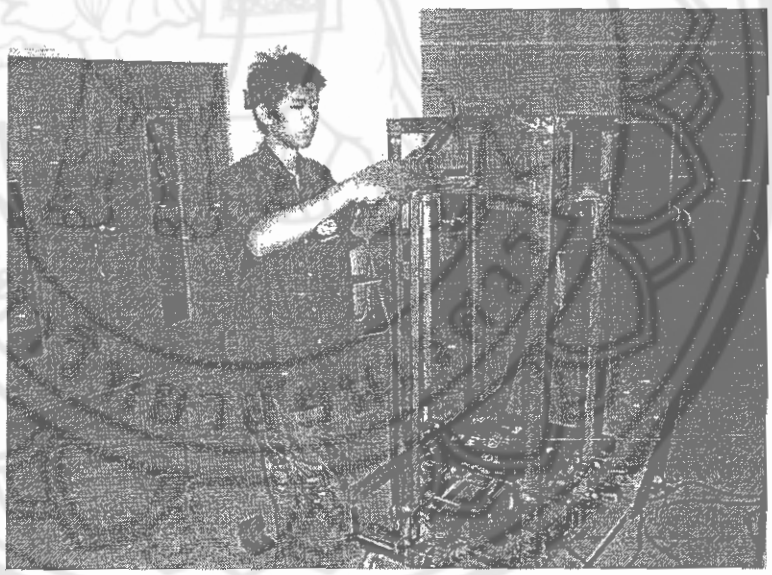
4.1.3 ออกแบบเตาหลอมโลหะ

หลังจากที่ได้ออกแบบระบบความร้อนและระบบไฟฟ้าแล้ว จึงทำการอออกแบบเตาหลอม โลหะ โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ตัวเตา และฝาเตา (ดูภาคผนวก ก.และภาคผนวก ค.)

4.2 จัดสร้างเตาหลอมโลหะสำหรับงานหล่อโลหะแบบอินเวสเมนต์

4.2.1 จัดสร้างโครงของเตาหลอมโลหะ

ใช้เหล็กฉากขนาดกว้าง×ยาว×หนา เท่ากับ 40×40×5 มิลลิเมตร เชื่อมติดกันเป็นโครงของเตาหลอมโลหะ แล้วเชื่อมเหล็กแผ่นหนา 2 มิลลิเมตร ปิดที่ผนังด้านนอกทั้ง 5 ด้าน (ยกเว้นด้านบน) ส่วนฝาเตา เลือกใช้เหล็กกล่องขนาด 1" และ 1 ½" เชื่อมติดกันเป็นโครงตามที่ได้ออกแบบไว้ แล้วปิดผนังด้วยเหล็กแผ่นหนา 2 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.1 เชื่อมโครงของเตาหลอมโลหะ

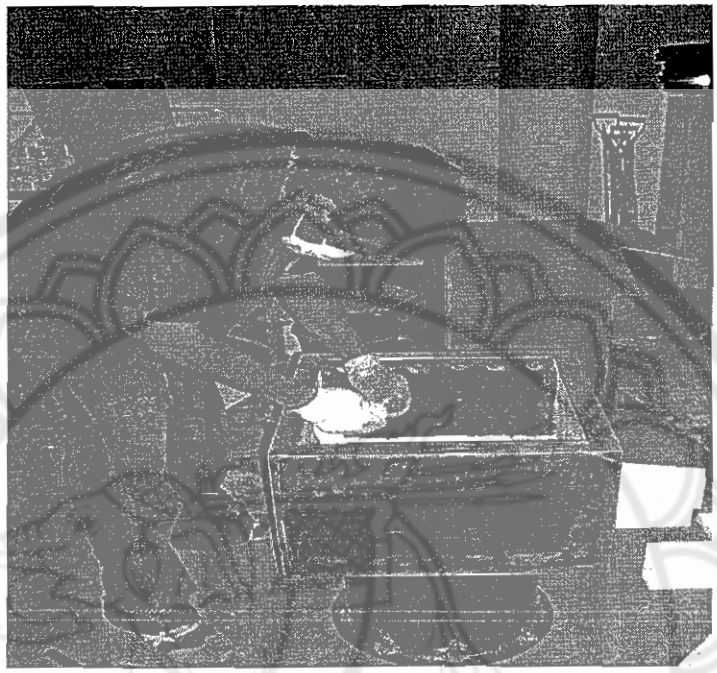
4.2.2 จัดสร้างระบบความร้อน

4.2.2.1 ฉนวนกันความร้อน

ก. ตัวเตา

เลือกใช้แผ่นฉนวนกันความร้อนหนา 1" บุที่พื้นและผนังด้านในของเตาทั้ง 4 ด้านก่อนจำนวน 2 ชั้น ดังรูปที่ 4.2 และ รูปที่ 4.3 จากนั้นจึงก่อผนังอิฐทนไฟ (อิฐเบา) ทับลงอีกชั้น

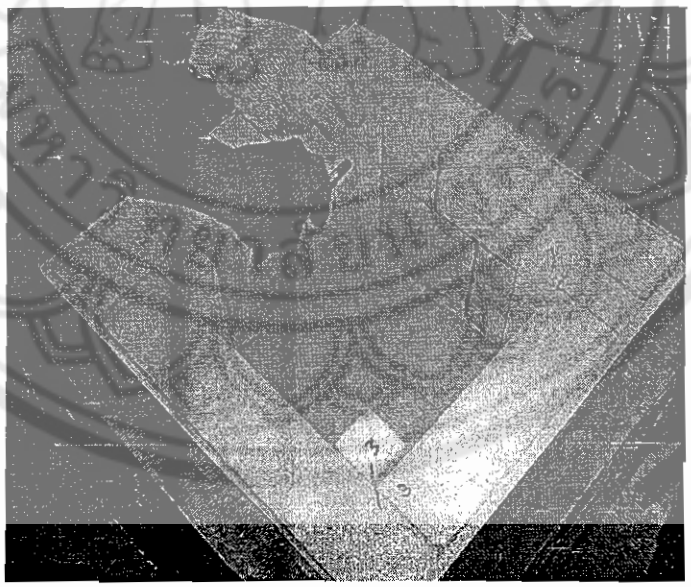
ดังรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 ส่วนบริเวณปากเตาติดปะเก็นซนิดใยสับปะรด ที่ขอบปากเตาทั้ง 4 ด้าน เพื่อป้องกันความร้อนรั่วไหลออกสู่ภายนอก ดังรูปที่ 4.6



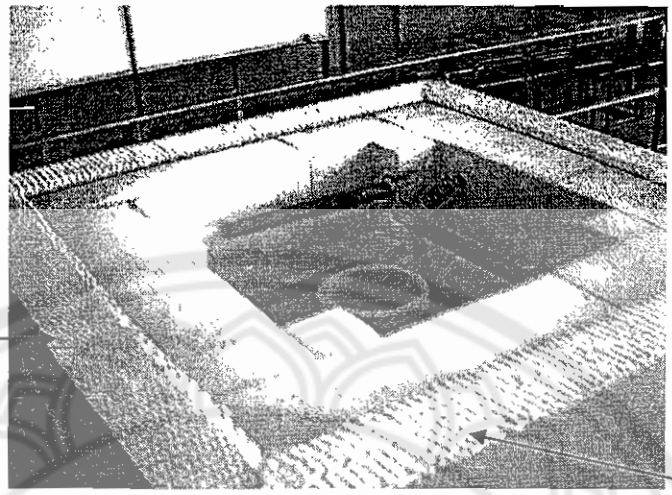
รูปที่ 4.2 บุฉนวนกันความร้อน

รูปที่ 4.3 เตาที่บุฉนวนกันความร้อนแล้ว

รูปที่ 4.4 การก่อผนังอิฐทนไฟ



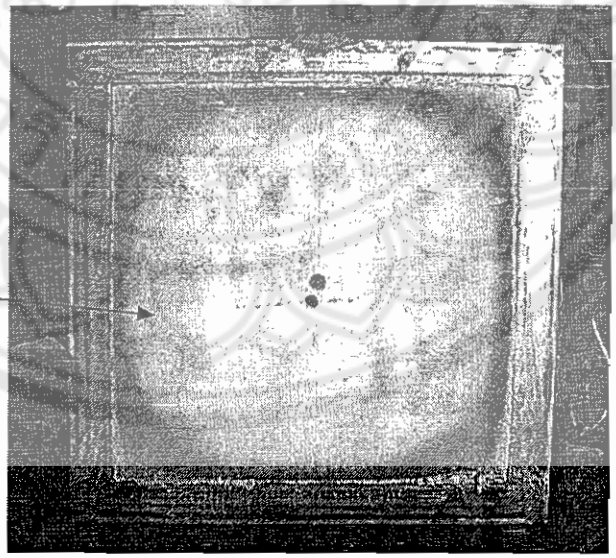
รูปที่ 4.5 ตั้งเสาอิฐสำหรับวางท่อเซรามิกที่พันด้วยขดลวดแล้ว



รูปที่ 4.6 การติดปะเก็นชนิดใยสับปะรด

ข. ฝาเตา

บุแผ่นฉนวนกันความร้อนหนา 1" จำนวน 2 ชั้น และวางฉนวนกันความร้อน ชนิดเส้นใยให้เต็มฝาเตา



รูปที่ 4.7 ฉนวนกันความร้อนของฝาเตา

4.2.2.2 **ขดลวดความร้อน**

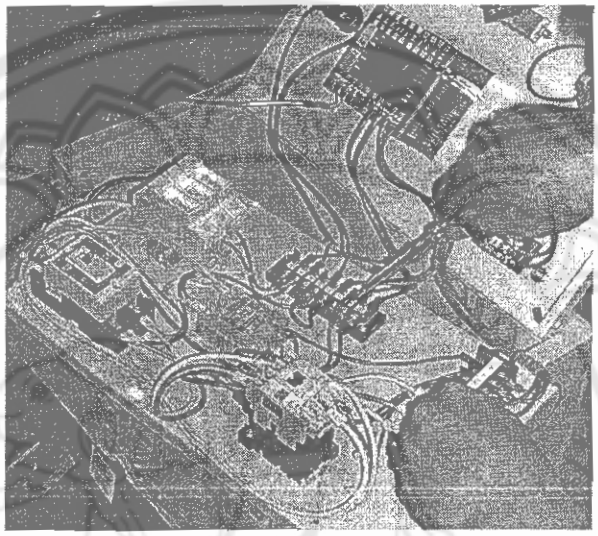
นำท่อเซรามิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร มาร้อยผ่านขดลวด และวางเรียงรอบ ๆ ภายในเตา จำนวน 2 ชั้น ดังรูปที่ 4.8 และ รูปที่ 4.9

รูปที่ 4.8 การร้อยท่อเซรามิกผ่านขดลวด

รูปที่ 4.9 การวางท่อเซรามิกที่พันขดลวดรอบๆเตา

4.2.3 **จัดสร้างระบบไฟฟ้า**

ต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ตามวงจรที่ได้ออกแบบไว้ แล้วนำไปใส่ในตู้ควบคุม จากนั้นจึงประกอบระบบไฟฟ้าเข้ากับระบบความร้อนและเตาหลอมโลหะดังรูปที่ 4.10 (ผังการต่อวงจรดูภาคผนวก ข.)



รูปที่ 4.10 การต่อวงจรไฟฟ้าของเตาหลอมโลหะ

4.3 ทดสอบเตาหลอมโลหะสำหรับงานหล่อแบบอินเวสเมนต์

หลังจากที่ทำการสร้างเตาหลอมโลหะสำหรับงานหล่อโลหะแบบอินเวสเมนต์ตามที่ออกแบบไว้แล้วขั้นตอนต่อไป คือการทำการทดสอบเตาหลอมโลหะ โดยมีขั้นตอนดังนี้

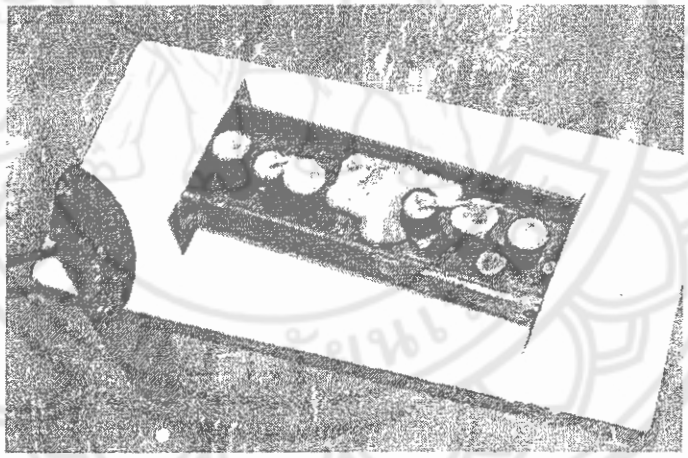
4.3.1 **ขั้นตอนการทดสอบ**

1. ชั่งเศษทองเหลือง (Raw Metrerial) ที่ต้องการหลอม น้ำหนัก 0.5 กิโลกรัม เตรียมไว้
2. ตรวจสอบเตาหลอมโลหะและอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น เบ้าหลอม ขดลวดความร้อน วงจรควบคุมเตาหลอมโลหะ เทอร์โมคัปเปิล ฯลฯ ให้อยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งาน
3. เปิดฝาเตา ใส่เศษทองเหลืองที่เตรียมไว้ลงในเบ้าหลอม ตรวจสอบดูว่าไม่มีสิ่งแปลกปลอมอื่น ๆ ปะปนลงไปด้วย แล้วจึงปิดล็อคฝาเตาให้สนิท
4. เปิดสวิทช์ควบคุมการทำงานของเตา ตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 150 °C เพื่อทำการอุ่นเตา บันทึกค่าอุณหภูมิของเตาในขณะนั้น พร้อมทั้งวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่ขดลวดและบันทึกผล

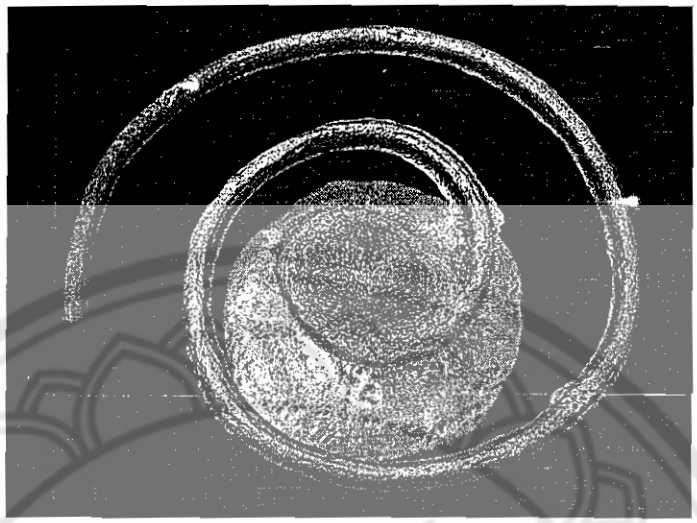
5. จับเวลาทุก 20 นาที เพิ่มค่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ครั้งละ 50 °C วัดค่ากระแสไฟฟ้าพร้อมทั้งบันทึกผล
6. เมื่อทองเหลืองหลอมละลายได้ถึงอุณหภูมิเทแล้ว จึงทำการเทลงแบบหล่อ
7. รอจนชิ้นงานเย็นตัวแล้วจึงแกะออกจากแบบหล่อ
8. ทำการทดลองซ้ำ โดยเปลี่ยนจากทองเหลืองเป็นอะลูมิเนียมน้ำหนัก 0.302 และ 0.41 กิโลกรัม
9. นำผลการทดสอบที่ได้มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิ และคำนวณหากำลังไฟฟ้าที่ใช้

4.4 ผลการทดสอบ

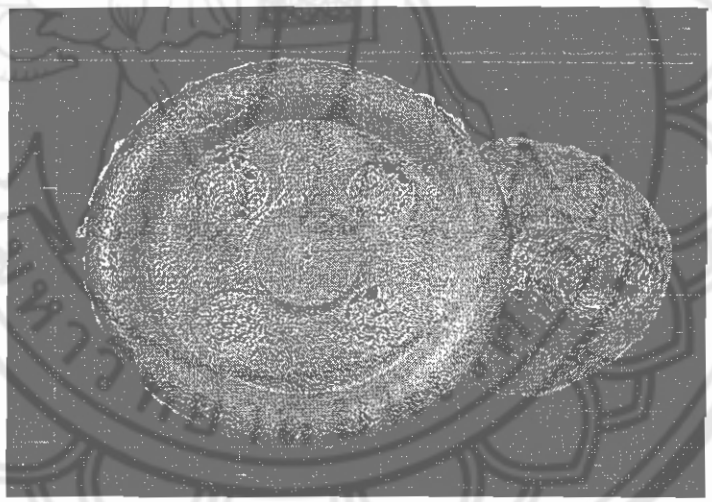
4.4.1 ชิ้นงานที่ได้จากการหลอมโลหะด้วยเตาหลอมโลหะสำหรับงานหล่อแบบอินเวสเมนต์



รูปที่ 4.11 ชิ้นงานทองเหลือง



รูปที่ 4.12 ชิ้นงานอะลูมิเนียมรูปก้นหอย



รูปที่ 4.13 ชิ้นงานอะลูมิเนียม

4.4.2 ผลการทดสอบเตาหลอมโลหะสำหรับงานหล่อแบบอินเวสเมนต์

4.4.2.1 ทดสอบโดยหลอมทองเหลืองน้ำหนัก 0.5 กิโลกรัม

ตารางที่ 4.1 ค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงขณะทำการหลอมทองเหลือง

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
0	54	12.8
20	132	13.2
40	203	13.2
60	255	13.1
80	303	13.2
100	406	13.1
120	597	13.1
140	750	13.1
160	847	13.1
180	920	13.1
200	945	13.1
220	960	13.1
240	960	13.1

ค่า I_{mean} = 13.1 A

4.4.2.2 ทดสอบโดยหลอมอะลูมิเนียมน้ำหนัก 0.302 กิโลกรัม

ตารางที่ 4.2 ค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงขณะทำการหลอมอะลูมิเนียม 0.302 กิโลกรัม

เวลา(นาที)	อุณหภูมิ (°C)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
0	46	13.3
20	148	13.5
40	191	13.4
60	240	13.5
80	315	13.4
100	407	13.1
120	503	13.3
140	601	13.3
160	707	13.1
180	801	13.0
200	804	13.3

ค่า I_{mean} = 13.29 A

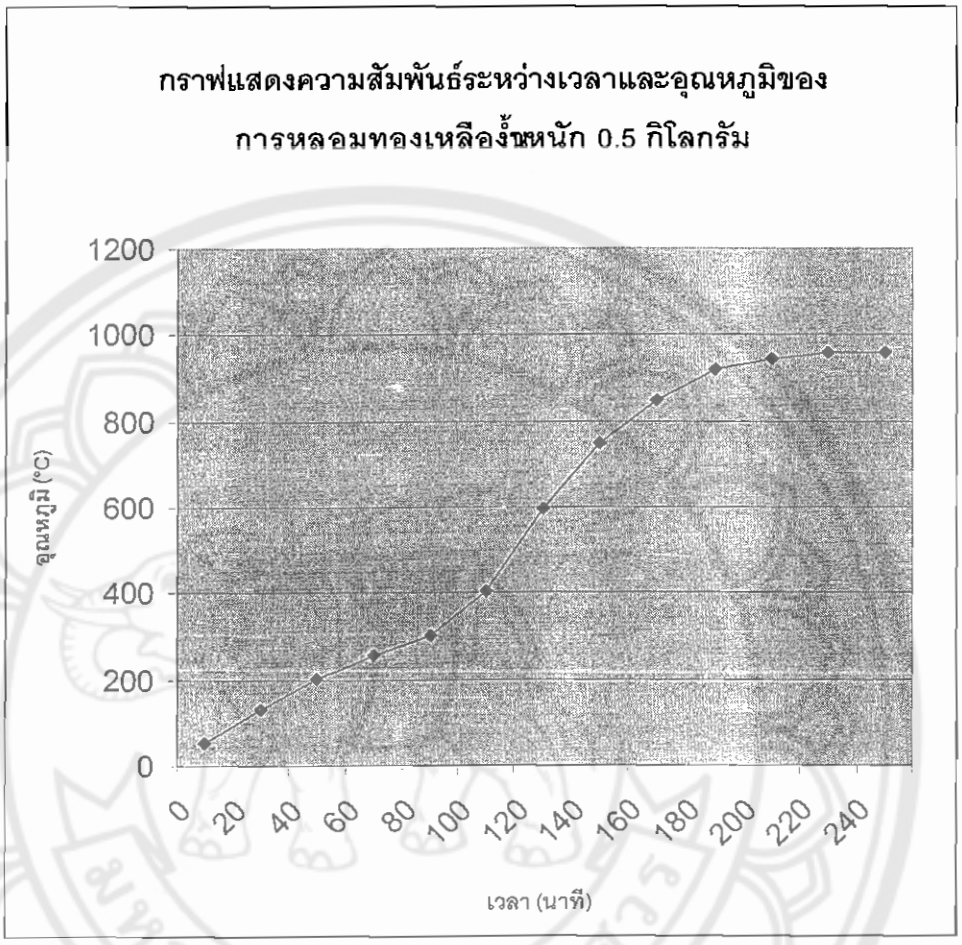
4.4.2.3 ทดสอบโดยหลอมอะลูมิเนียมน้ำหนัก 0.41 กิโลกรัม

ตารางที่ 4.3 ค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงขณะทำการหลอมอะลูมิเนียม 0.41 กิโลกรัม

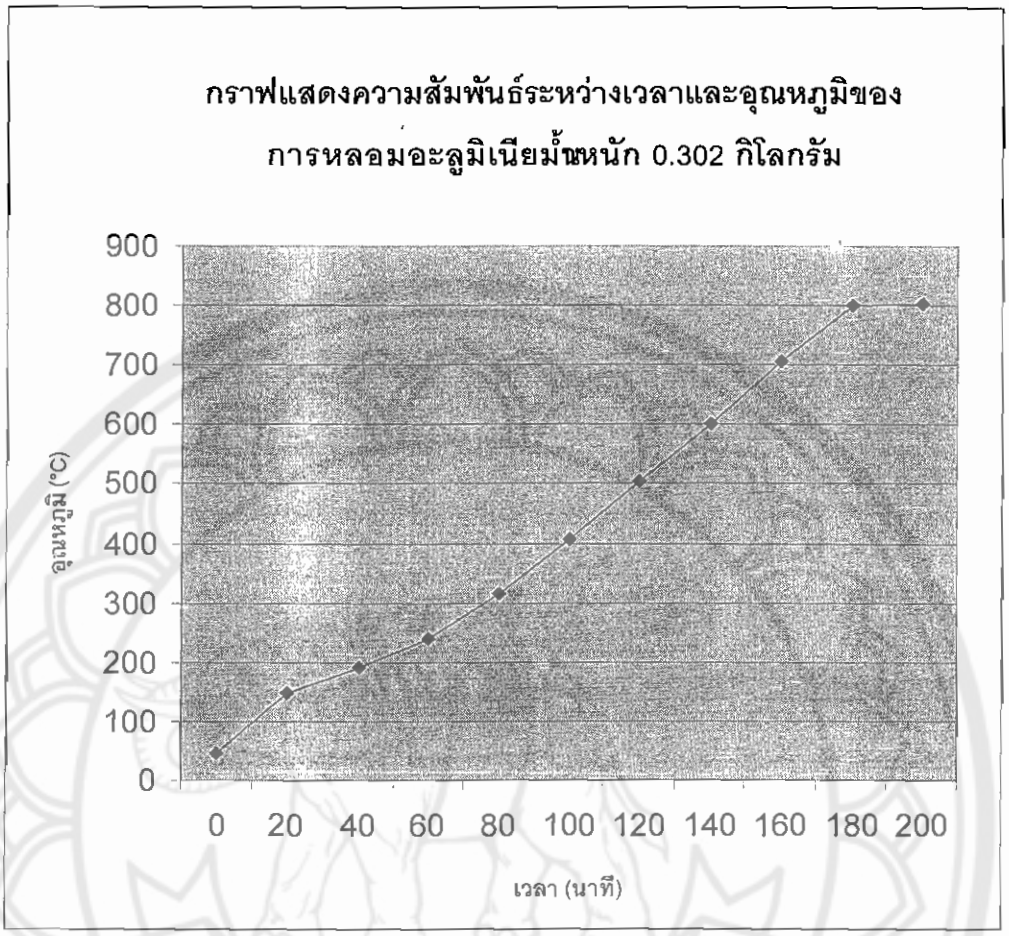
เวลา(นาที)	**อุณหภูมิ (°C)**	**กระแสไฟฟ้า** (แอมแปร์)
0	42	13.3
20	135	13.5
40	157	13.4
60	200	13.5
80	259	13.4
100	310	13.1
120	399	13.3
140	500	13.3
160	600	13.1
180	700	13.0
200	800	13.3
220	810	13.2
240	815	13.2

ค่า I_{mean} = 13.28 A

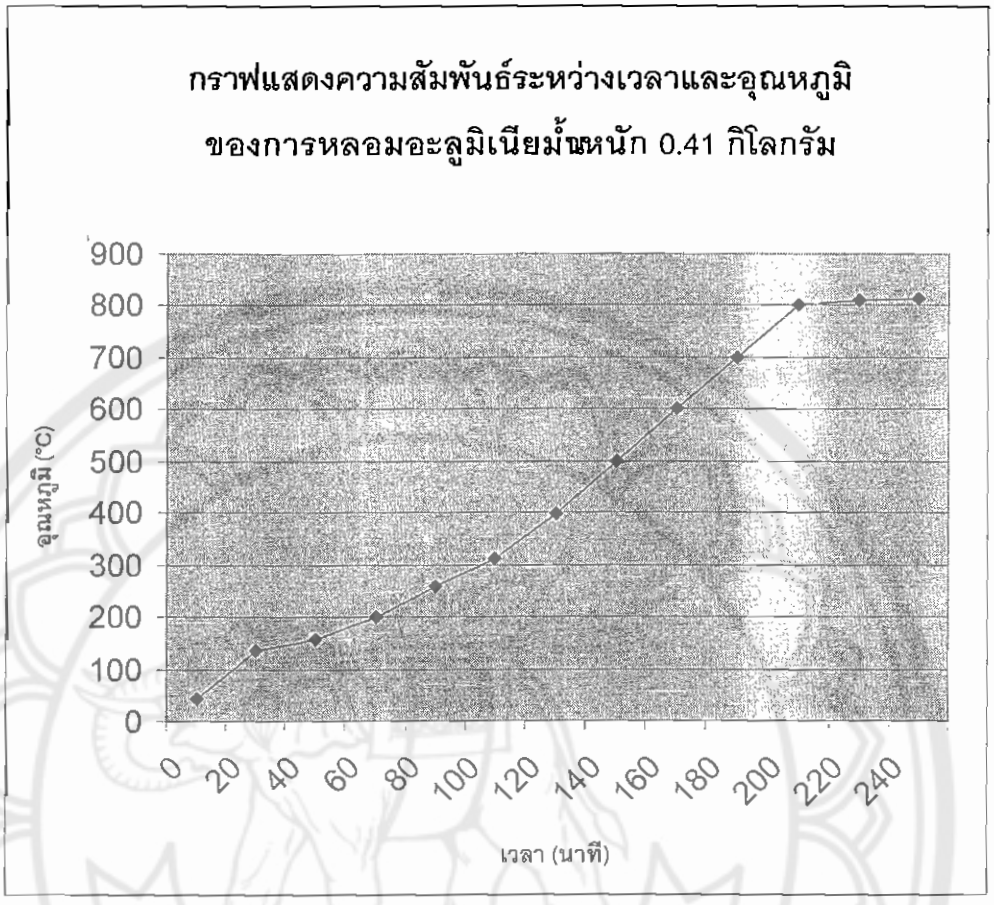
4.4.2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิ



รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิการหลอมทองเหลืองน้ำหนัก 0.5 กิโลกรัม



รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิการหลอมอะลูมิเนียม น้ำหนัก 0.302 กิโลกรัม



รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิการหลอมอะลูมิเนียม น้ำหนัก 0.41 กิโลกรัม

4.4.3 **กำลังไฟฟ้าที่ใช้**

นำค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ไปคำนวณหากำลังไฟฟ้าที่ใช้ โดยใช้สมการ

$$P_{mean} = I_{mean} V \qquad (4.1)$$

เมื่อ P คือ กำลังไฟฟ้าที่ขดลวดความร้อนใช้ในการหลอมโลหะ (มีหน่วยเป็น kW)

I คือ กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ขดลวดความร้อนใช้ในการหลอมโลหะ (มีหน่วยเป็น A)

V คือ แรงดันไฟฟ้า (มีค่าเท่ากับ 220 V)

4.4.3.1 กำลังไฟฟ้าที่ใช้ขณะหลอมทองเหลืองน้ำหนัก 0.5 กิโลกรัม

ค่า I_{mean} = 13.1 A

ดังนั้น P_{mean} = 2.882 kw

4.4.3.2 กำลังไฟฟ้าที่ขณะหลอมอะลูมิเนียมน้ำหนัก 0.302 กิโลกรัม

ค่า I_{mean} = 13.29 A

ดังนั้น P_{mean} = 2.924 kw

4.4.3.3 กำลังไฟฟ้าที่ขณะหลอมอะลูมิเนียมน้ำหนัก 0.41 กิโลกรัม

ค่า I_{mean} = 13.28 A

ดังนั้น P_{mean} = 2.922 kw

4.5 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

4.5.1 วิเคราะห์ระบบความร้อนของเตาหลอมโลหะสำหรับงานหล่อแบบอินเวสเมนต์

จากผลการทดสอบเตาหลอมโลหะสำหรับงานหล่อแบบอินเวสเมนต์ด้วยการหลอมทองเหลืองน้ำหนัก 0.5 กิโลกรัม และอะลูมิเนียมน้ำหนัก 0.302 และ 0.41 กิโลกรัม พบว่า เตาหลอมโลหะสามารถหลอมโลหะได้ชิ้นงานออกมาตามที่กำหนดไว้ได้ โดยแบ่งดำเนินการหลอมโลหะออกเป็น 3 ระยะ คือ

ระยะที่ 1 เรียกว่า ระยะอุ่นเตา (Warm Phase) เริ่มตั้งแต่เปิดสวิตช์การทำงาน จนถึงอุณหภูมิประมาณ 400-500 องศาเซลเซียส ที่ระยะนี้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิจะค่อยๆเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เนื่องจากต้องทำการไล่ความชื้นในชิ้นโลหะ (Raw materials) และเบ้าหลอมออกเสียก่อน อีกทั้งยังเป็นการป้องกันการเกิด Thermal Shock เพื่อช่วยยืดอายุการใช้งานของขดลวดอีกด้วย

ระยะที่ 2 เรียกว่า ระยะหลอมโลหะ (Melting Phase) เป็นระยะที่เริ่มดำเนินการหลอมโลหะ โดยเพิ่มอุณหภูมิขึ้นอย่างรวดเร็ว สังเกตได้จากกราฟที่มีความชันเพิ่มขึ้น ที่ระยะนี้จะมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 500 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิเทของโลหะที่ต้องการ เมื่อสิ้นสุดระยะนี้โลหะจะหลอมละลายกลายเป็นน้ำโลหะแล้ว

ส่วนระยะที่ 3 เรียกว่า ระยะเตรียมเท (Final Phase) หรือระยะสุดท้ายของการหลอมโลหะเป็นระยะที่อุณหภูมิเริ่มคงที่ กราฟมีลักษณะเกือบหรือเริ่มจะเป็นเส้นตรง กล่าวคือ ที่ระยะนี้เตาหลอมโลหะจะทำการรักษาอุณหภูมิให้คงที่เพื่อเตรียมเทลงแบบหล่อ ซึ่งอุณหภูมิเทนี้ถือได้ว่าเป็นสิ่งที่สำคัญต่อคุณภาพของชิ้นงานอย่างยิ่ง เพราะถ้าอุณหภูมิในการเทแต่ละครั้งไม่คงที่หรือไม่เท่ากัน ชิ้นงานที่ได้ออกมาก็มีคุณภาพที่ไม่เท่ากันไปด้วย

4.5.2 วิเคราะห์ชิ้นงานที่ได้จากการหลอมโลหะด้วยเตาหลอมโลหะสำหรับงานหล่อแบบอินเวสเมนต์

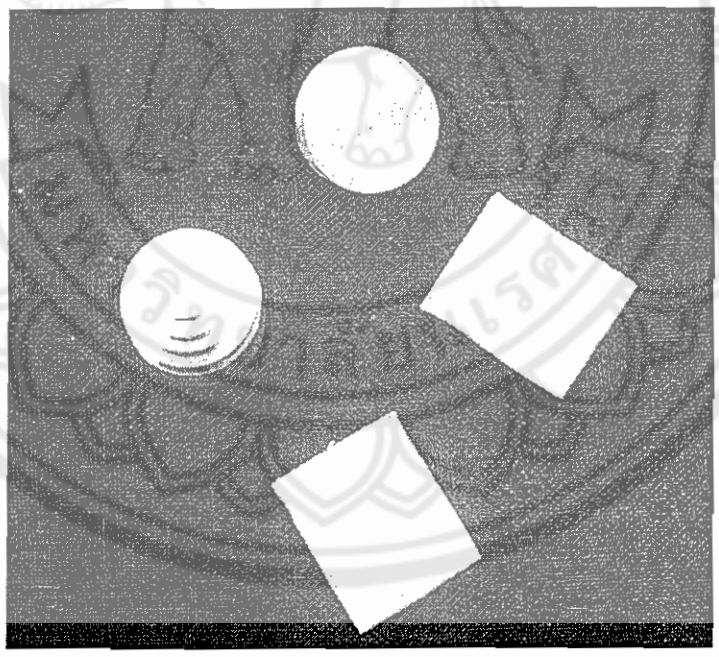
4.5.2.1 ทองเหลือง

ก. น้ำหนักของชิ้นงาน

จากการทดสอบหลอมทองเหลืองน้ำหนัก 0.5 กิโลกรัม พบว่าชิ้นงานที่ได้ออกมามีน้ำหนัก 0.488 กิโลกรัม คิดเป็น 97.60% ของน้ำหนักเดิมก่อนหลอม ส่วนที่เหลืออีก 2.4% เป็นเศษทองเหลืองที่ติดอยู่ในเบ้าหลอม ซึ่งหลุดออกมาเมื่อเบ้าหลอมเย็นตัวแล้ว

ข. รูปร่างและลักษณะผิวของชิ้นงาน

เมื่อแกะชิ้นงานออกจากแบบหล่อ พบว่า ชิ้นงานมีรูปร่างเหมือนกับแบบหล่อ ผิวของชิ้นงานค่อนข้างเรียบ มีสีเหลืองขุ่น มีคราบสีดำเกาะติดเป็นบางแห่ง ซึ่งนั่นก็คือคราบน้ำมันและสนิมของท่อเหล็กที่ใช้เป็นแบบหล่อ หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานไปทำการกลึง และขัดด้วยกระดาษทราย พบว่า ชิ้นงานมีผิวเรียบ สีเหลืองทองแวววาว ไม่มีรูพรุน และไม่มีคราบสีดำเกาะติดอยู่เลย



รูปที่ 4.17 ชิ้นงานทองเหลืองที่ผ่านการกลึงและขัดด้วยกระดาษทรายแล้ว

4.5.2.2 **อะลูมิเนียม**

ก. น้ำหนักของชิ้นงาน

จากการทดสอบหลอมอะลูมิเนียมน้ำหนัก 0.302 กิโลกรัม พบว่าชิ้นงานที่ได้ออกมามีน้ำหนัก 0.292 กิโลกรัม คิดเป็น 96.69% ของน้ำหนักเดิมก่อนหลอม ส่วนที่เหลืออีก 3.31% เป็นเศษทองเหลืองที่ติดอยู่ในเบ้าหลอม ซึ่งหลุดออกมาเมื่อเบ้าหลอมเย็นตัวแล้ว

จากการทดสอบหลอมอะลูมิเนียมน้ำหนัก 0.401 กิโลกรัม พบว่าชิ้นงานที่ได้ออกมามีน้ำหนัก 0.40 กิโลกรัม คิดเป็น 97.56% ของน้ำหนักเดิมก่อนหลอม ส่วนที่เหลืออีก 2.44% เป็นเศษทองเหลืองที่ติดอยู่ในเบ้าหลอม ซึ่งหลุดออกมาเมื่อเบ้าหลอมเย็นตัวแล้วเช่นกัน

ข. รูปร่างและลักษณะผิวของชิ้นงาน

เมื่อแกะชิ้นงานออกจากแบบหล่อ พบว่า ชิ้นงานมีรูปร่างเหมือนกับแบบหล่อ ผิวของชิ้นงานค่อนข้างเรียบ มีสีเงิน หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานไปทำการกัด พบว่า ชิ้นงานมีผิวเรียบ ไม่มีรูพรุน มีสีเงินแวววาว

4.5.3 **วิเคราะห์ระบบไฟฟ้าของเตาหลอมโลหะสำหรับงานหล่อแบบอินเวสเมนต์**

จากการทดสอบหลอมโลหะทั้ง 2 ชนิด คือ ทองเหลืองและอะลูมิเนียม แล้วทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าทุกๆ 20 นาที พบว่า กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดความร้อนนั้นมีค่าค่อนข้างคงที่ แสดงให้เห็นว่า ระบบไฟฟ้าของเตาหลอมโลหะสำหรับงานหล่อแบบอินเวสเมนต์ ได้จ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ขดลวดอย่างเต็มที่และคงที่ ซึ่งนับว่าเป็นผลดีต่อขดลวด เพราะป้องกันการเกิด Thermal Shock และการลัดวงจรอันเนื่องมาจากขดลวดขาดได้อีกด้วย