บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

ในอุตสาหกรรมงานหล่อ – หลอมโลหะถือว่าเป็นสาขาหนึ่งซึ่งมีบทบาทและมีความสำคัญในกระบวนการอุตสาหกรรมการผลิต (Industrial production process) ที่จะเสริมและช่วยในการผลิตอุปกรณ์ชิ้นส่วนอะไหล่เครื่องจักรกล และเครื่องมือต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์โลหะที่เป็นกลุ่มเหล็ก (Ferrous) และโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Non – ferrous) ในประเทศไทยได้มีการค้นคว้า การวิจัย และพัฒนาทางด้านเทคนิคในการหล่อหลอมโลหะด้วยกรรมวิธีต่าง ๆ ตลอดเวลา โดยจะเห็นได้จากผู้ประกอบการทางด้านโลหะต่างให้ความสำคัญ ในการที่จะหาเทคโนโลยีสมัยใหม่มาจากประเทศมหาอำนาจทางด้านโลหะมาปรับปรุงผลผลิตเพื่อเป็นการเพิ่มคุณภาพ เพิ่มผลผลิต

การศึกษาด้านหล่อ – หลอมโลหะนั้น ในปัจจุบันและอนาคตถือว่ามีความสำคัญและมีบทบาทต่อวิชาชีพทางด้านวิศวกรรมวัสดุ วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมโลหะการ วิศวกรรมการผลิต วิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมและวิศวกรรมเครื่องกล เป็นอย่างยิ่ง เพราะจำเป็นที่จะต้องศึกษาชนิดของโลหะผสม วิธีการหล่ออย่างถูกวิธี การออกแบบชิ้นงานได้อย่างเหมาะสมกับการใช้งานในสภาวะการต่าง ๆ โดยได้ผลผลิตที่ออกมาสามารถควบคุมส่วนผสม โครงสร้างทางจุลภาคที่ปราศจากรอยตำหนิและจุดบกพร่อง มีสมบัติทางกลตามที่ต้องการ ทั้งนี้จะมีผลถึงการลดต้นทุน ประหยัดวัตถุดิบ ประหยัดเวลา ค่าใช้จ่าย และค่าแรงงาน

การที่จะกำหนดว่าต้องใช้โลหะชนิดใด มีส่วนผสมอย่างไรนั้น ขึ้นอยู่กับชนิดของงาน เมื่อกำหนดชนิดและส่วนผสมของโลหะได้ ก็จะเปรียบเทียบกับแผนภาพสมดุล (Phase diagram) ของโลหะผสมโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะ ก็จะรู้ได้ว่าควรใช้ความร้อนในการหลอมเหลวมากน้อยแค่ไหนเพื่อที่สามารถเลือกใช้เตาหลอมได้เหมาะสม และจำเป็นที่จะต้องศึกษาถึงกระบวนการหลอมโลหะ เตาที่จะใช้หลอมโลหะควรมีประสิทธิภาพในการทำงานดีและประหยัด กรรมวิธีหลอมโลหะนั้นมีอยู่มากมาย การเลือกชนิดของเตาหลอมเพื่อใช้งาน จะต้องพิจารณาตามเหตุผลสำคัญดังนี้

1. ต้นทุนการผลิต จะพิจารณาถึง ราคาของเครื่องมือและอุปกรณ์ทั้งหมด ราคาเชื้อเพลิงและแหล่งจัดหา ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง และค่าใช้จ่ายในกระบวนการหลอม
2. ปริมาณโลหะที่ต้องการผลิต ขนาดความจุของเตา อัตราการเร่ง และความร้อนของเตา
3. คุณภาพของน้ำโลหะ จะพิจารณาถึง อุณหภูมิของเตา การควบคุมส่วนผสมทางเคมีของ

โลหะเหลว และการทำความสะอาดและกำจัดมลทินในโลหะ

4. ชนิดของโลหะและโลหะผสม จะพิจารณาถึง จุดหลอมเหลว การเกิดออกไซด์ และการดูดซับก๊าซในบรรยากาศ

5. เทคนิคการปฏิบัติงาน จะพิจารณาถึง ความยากง่ายหรือความสะดวกในการใช้เตา การสูญเพลิงของโลหะที่หลอม บริเวณเนื้อที่ปฏิบัติงาน และมลภาวะของกระบวนการ

จากเหตุผลต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้ว การออกแบบเพื่อสร้างเตาหลอมโลหะขนาดห้องปฏิบัติการ โดยใช้หลักการของเตาเบ้า (Crucible furnace) ที่ใช้พลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงก๊าซ และเป็นเตาหลอมที่ปฏิบัติงานที่ใช้หลักการหรือเทคนิคธรรมดา มีต้นทุนสร้างต่ำและสามารถควบคุมคุณภาพของโลหะเหลวได้ง่าย เพราะสามารถควบคุมเปลวไฟจากการสันดาปไม่ให้สัมผัสโดยตรงกับน้ำโลหะได้ ในกระบวนการหลอมโลหะด้วยเตาเบ้า เบ้าหลอม (Crucible) เป็นอุปกรณ์สำคัญในกระบวนการหลอมโลหะซึ่งใช้เป็นภาชนะสำหรับบรรจุโลหะในการเปลี่ยนสภาวะ การหลอมโลหะด้วยเตาเบ้านั้น ในขั้นต้นจะต้องมีการเตรียมวัสดุโลหะที่จะหลอมบรรจุในเบ้าหลอม และให้ความร้อนกับเบ้าหลอมเพื่อเกิดการส่งถ่ายความร้อนให้กับโลหะที่บรรจุอยู่ภายใน ทำให้อะตอมของโลหะมีอุณหภูมิสูงขึ้น จนโมเลกุลเกิดการสั่นอย่างรุนแรงเกินกำลังยึดเหนี่ยวของแรงระหว่างอะตอมและแรงภายในอะตอม อะตอมในโลหะจะอยู่ห่างกันมากขึ้นและกลายเป็นน้ำโลหะเหลว

รูปแบบกระบวนการหลอมด้วยเตาเบ้าที่ใช้ในอุตสาหกรรมมีความยืดหยุ่นไปตามชนิดโลหะที่จะหลอม ปริมาณการหลอม เชื้อเพลิง เทคนิค และวิธีควบคุมการหลอม เตาเบ้าที่ใช้การสันดาปเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนจะใช้ในการหลอมโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ เช่น ตะกั่ว อะลูมิเนียม อะลูมิเนียมผสม ทองเหลือง บรอนซ์ ทองแดง แมกนีเซียม สังกะสี และสังกะสีผสม ส่วน เหล็กหล่อ เหล็กเหนียว เหล็กกล้า โมเนล นิเกิล โลหะผสมทนความร้อนสูง และโลหะผสมอื่น ๆ จะใช้เตาเบ้าที่ใช้การเหนี่ยวนำด้วยกระแสไฟฟ้า สมรรถนะของเตาเบ้าสามารถจัดแบ่งได้ตั้งแต่ขนาดระดับห้องปฏิบัติการ 500 กรัม ไปจนถึงขนาด1400 กิโลกรัม (3000ปอนด์ เมื่อหลอมอะลูมิเนียม) สามารถเลือกเชื้อเพลิงที่ใช้ได้ เช่น ถ่านหิน ถ่านโค๊ก ก๊าซเชื้อเพลิง น้ำมันและกระแสไฟฟ้า

ในยุคปัจจุบันมีการออกแบบและสร้างเตาเบ้าเพื่อใช้ในการผลิตทับทิมสังเคราะห์ที่ทำขึ้นด้วยกระบวนการปลูกฟลักซ์ต่าง ๆ โดยใช้เบ้าหลอมที่ทำขึ้นจาก อะลูมินา (Al_2O_3) หรือทำจาก เซอร์โคเนีย (ZrO_2) แล้วบุภายในด้วยแพลทินัม สามารถทนอุณหภูมิได้ถึง 2400 °C หรือใช้ในการเผาพลอยซึ่งจะใช้เกลือโบแรกซ์ ($Na_2B_4O_7$) และ ซิลิก้า (SiO_2) ใส่ลงในเบ้าหลอมเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นซิลิก้าจะหลอม เหลวและเข้าไปอุดในรอยแตกของพลอย จากการศึกษาค้นคว้าในเรื่องการให้ความร้อนกับเตาเบ้าที่ใช้หลอมโลหะนั้น มีกระบวนการให้ความร้อนแก่โลหะเพื่อให้หลอมละลายอยู่มากมายหลายวิธีขึ้นอยู่กับรูป

แบบ และข้อจำกัดต่าง ๆ ซึ่งการให้ความร้อนกับโลหะภายในเตาเบ้าหลอมโลหะโดยการใช้การสันดาปจากก๊าซเชื้อเพลิงนับว่าเป็นวิธีการที่สะดวก และให้ประสิทธิภาพที่ดีวิธีหนึ่ง จึงเป็นแรงบันดาลใจให้เกิดความต้องการที่จะออกแบบและสร้างเตาทดสอบที่ใช้หลักการของเตาเบ้า เพื่อให้เหมาะสมในการใช้งาน และทดสอบสมรรถนะประสิทธิภาพของเตาทดสอบ เพื่อทำให้เกิดการพัฒนาเตาเผาให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นต่อไปในอนาคต

1.2 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในการที่จะพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านโลหะ และการศึกษาทางโลหะกรรมเพื่อนำไปใช้ในงานวิศวกรรม และอุตสาหกรรมนั้น เรื่องของโลหะผสม แผนภาพสมดุลของโลหะผสม โครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางกลนับว่ามีความสำคัญมาก การที่จะให้มีความรู้ความเข้าใจจะต้องเน้นทั้งทางทฤษฎี และทางปฏิบัติควบคู่กันไป เนื่องจากปัจจุบันการพัฒนาเทคโนโลยีเครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาทางโลหะกรรม และการพัฒนาวัสดุทางด้านโลหะของกลุ่มประเทศพัฒนาที่เป็นมหาอำนาจทางด้านโลหะได้มีการพัฒนาไปอย่างต่อเนื่อง ส่วนใหญ่ที่ใช้ในวงการอุตสาหกรรม และวงการศึกษาจะต้องซื้อหรือนำเข้ามาจากต่างประเทศ ในประเทศไทยได้มีการศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านโลหะการตามประเทศผู้คิดค้นและพัฒนาโดยต่อเนื่อง

เทคนิคที่สำคัญในการผลิตโลหะ โลหะผสมหรือการที่จะนำโลหะเสื่อมสภาพกลับมาทำใหม่ (Recycle) ประกอบด้วย การหลอม การทำให้บริสุทธิ์ (Refining) และการควบคุมส่วนผสมให้ได้ตามที่กำหนดไว้ ส่วนใหญ่รายละเอียดทางด้านเทคนิคความรู้ความชำนาญพิเศษ (Know - how) ที่ปรากฏอยู่ในเอกสารอ้างอิงจะอธิบายรายละเอียดตามหลักการเท่านั้นหรือบางกรณีก็เป็นการปกปิดเทคโนโลยีเพื่อผลทางด้านธุรกิจหรือการตลาด ฉะนั้นการที่จะพัฒนาได้จึงต้องมีการค้นคว้า การทดลอง การทดสอบในประเทศไทย กระบวนการหลอมโลหะเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมมีการใช้เตาหลอมโลหะหลายประเภทแล้วแต่ชนิด และขนาดของอุตสาหกรรม การออกแบบและสร้างเตาหลอมโลหะที่ใช้กันเองในโรงงานจะใช้หลักการของเตาเบ้าที่ใช้การเผาไหม้จาก น้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซลหรือน้ำมันเตา หรือก๊าซธรรมชาติที่มีต้นทุนการสร้างไม่สูงมากนัก กลไกการทำงานไม่ซับซ้อน แต่มีข้อจำกัดคือ ใช้หลอมโลหะที่มีจุดหลอมเหลวไม่เกิน 1400 °C สามารถใช้หลอมโลหะที่มีอุณหภูมิสูงในกลุ่มทองแดงผสม และบรอนซ์เท่านั้น โดยใช้วัสดุอุปกรณ์ภายในประเทศและจากต่างประเทศบางชิ้นส่วน ในปัจจุบันเทคโนโลยีการพัฒนาเตาหลอมโลหะของบริษัทในต่างประเทศส่วนใหญ่ใช้ระบบการเหนี่ยวนำด้วยกระแสไฟฟ้าที่สามารถทำอุณหภูมิได้สูงถึง 3000 °C ที่ติดตั้งอุปกรณ์สามารถจะหลอมโลหะในสภาวะสุญญากาศได้

และสามารถควบคุมการทำงานของเตาด้วยระบบไมโครโพรเซสเซอร์ เพื่อที่จะใช้ในการที่จะหลอมโลหะที่มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูง และต้องการความบริสุทธิ์สูงได้ แต่มีราคาสูงมากซึ่งต้องใช้ผู้ที่ผ่านการฝึกอบรมเฉพาะทางมาควบคุมการใช้งาน ในประเทศไทยถ้าได้รับการพัฒนาในส่วนนี้จะส่งผลดีในอนาคตคือ เกิดการพัฒนาเทคนิคในการออกแบบ และสร้างเตาหลอมโลหะอุณหภูมิสูงเพื่อใช้ในการศึกษาทางด้านโลหะกรรมต่อไปในอนาคต และพัฒนาความรู้ความสามารถของบุคลากรภายในประเทศเพื่อจะส่งเสริมการพัฒนาเทคโนโลยีภายในประเทศ และสามารถที่จะผลิตวัสดุโลหะผสมที่มีจุดหลอมเหลวสูงเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมภายในประเทศได้

1.3 การตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบและสร้างเตาเบ้าในการหลอมโลหะมีผนังด้านนอกทำจากโลหะ ภายในเตาบุด้วยวัสดุทนไฟและวัสดุฉนวนกันความร้อน (Insulation brick) ส่วนผนังด้านในสุดที่เป็นห้องเผาไหม้จะบุด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) หรือวัสดุทนไฟที่หล่อขึ้นรูปได้ (Castable refactory) มีความหนา 4 – 16 นิ้ว (ASM International handbook, 1996) เตาเบ้าสามารถใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือได้หลายส่วน คือ ส่วนเตาหลอม (Melting furnance) ส่วนเบ้าพักน้ำโลหะ (Pouring ladle) ส่วนตัวกรองน้ำโลหะ (Filtration) ส่วนอุปกรณ์ควบคุมปริมาณก๊าซ และส่วนอุปกรณ์เติมฟลั๊กซ์ (บัณฑิต ใจชื่น และสุทน พัฒนศิริ, 2531) เตาหลอมที่ใช้ในการหลอมโลหะนอกกลุ่มเหล็กที่นิยมใช้ในอุต สาหกรรมแบ่งออกได้ 3 ลักษณะประกอบด้วย

1.3.1 เตาที่เปลวไฟสัมผัสโดยตรงกับโลหะ (Direct fuel fire furnace) เป็นเตาที่เปลวไฟจากการสันดาปสัมผัสโดยตรงกับโลหะในอ่างหลอม (Melting bath) มีการสูญเพลิงของธาตุผสมประมาณ 5 – 25% (ASM International handbook, 1996) ตัวอย่างคือ เตานอน (Reverberatory furnace) ใช้หลอมโลหะในปริมาณมากส่งถ่ายพลังงานความร้อนโดยการพาความร้อน และการ แผ่รังสีความร้อน มีการแบ่งส่วนของเตาออกเป็น 3 ส่วนประกอบด้วย ส่วนที่ใช้ในการอุ่นเศษโลหะร้อน (Preheat zone) ส่วนหลอมละลายโลหะ (Melting zone) ส่วนควบคุมอุณหภูมิเทน้ำโลหะ (Holding zone or Supperheat zone) (ASM International handbook, 1996)

1.3.2 เตาที่เปลวไฟไม่สัมผัสโดยตรงกับโลหะ (Indirect fuel fire furnace) เป็นเตาที่มีภาชนะรูปทรงกระบอกสูง (Crucible) รูปร่างคล้ายกะทะ (Hearth) รูปร่างทรงกระบอกสูง (Shaft) เพื่อใช้บรรจุน้ำโลหะป้องกันก๊าซสันดาปสัมผัสโดยตรงกับน้ำโลหะที่หลอมเหลวเรียกว่า เบ้าหลอม เตาเบ้าแบบนี้สามารถใช้เชื้อเพลิงจากการสันดาปจากถ่านโค๊ก น้ำมัน และก๊าซเชื้อเพลิง สามารถติดตั้งหัวเผาแบบ

อัตโนมัติ (Automatic burner) ที่สามารถควบคุมอัตราส่วนการเผาไหม้ และควบคุมอุณหภูมิได้ตามที่ต้องการ หัวเผาสามารถปิด – เปิดด้วยระบบอัตโนมัติซึ่งทำ ให้ประหยัดพลังงานได้ถึง 30% (Corona corporation, 1996) เตาเบ้าแบบนี้มีการสูญเพลิงของธาตุผสมประมาณ 1 – 2% (ASM International handbook, 1996) เบ้าหลอมทำจากวัสดุทนความร้อนต้องมีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง ส่งถ่ายความร้อนดี ทำจากวัสดุกราไฟต์ ใช้กับเตาเกลือในงานอบชุบโลหะด้วยความร้อน ทำจากวัสดุดินทนไฟผสมกับกราไฟต์ และวัสดุคาร์บอนผสมซิลิคอนคาร์ไบด์ใช้กับการหลอมอะลูมิเนียม และทองแดงผสม (Mammut – wetro, 2000) ทำจากวัสดุอะลูมินาผสมสูงใช้กับการหลอมโลหะบริสุทธิ์ และเบ้าโลหะที่ทำจากโลหะพลาตินัมใช้กับการเผาสินแร่ในการวิเคราะห์ส่วนผสมของธาตุ (Leco corporation, 1996) ทำจากวัสดุเหล็กหล่อเหนียวเคลือบผิวด้วยวัสดุทนไฟใช้กับการหลอมโลหะแมกนีเซียมผสม (John Pearce, 1999) แต่ต้องระวังการปนเปื้อนออกไซด์ และเหล็กในน้ำโลหะ เตาเบ้าแบบนี้แบ่งออกได้ 5 ชนิด ประกอบด้วย เตาเบ้าแบบยกเบ้าหลอมได้ (Lift – out furnace) เตาเบ้าแบบยกเบ้าหลอมไม่ได้ (Bate – out furnace) เตาเบ้าแบบเอียงเทน้ำโลหะได้ (Tilting furnace) เตาแบบถ่ายความร้อน (Immersed crucible furnace) เตาเบ้าแบบหมุน (Rotary crucible furnace) (บัณฑิต ใจชื่น และสุทน พัฒนศิริ, 2531) การสร้างเตาเบ้าหลอมโลหะสำหรับงานหล่อด้วยแม่ พิมพ์ (Die casting) งานหล่อด้วยแบบหล่อถาวร (Permanent mold) งานหล่อด้วยแบบทราย (Sand casting) โดยการออกแบบสร้างพัดลมเป่าอากาศ (Combustion blower) และหัวเผาอยู่ในชุดเดียวกัน มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันไฟย้อนกลับ (Flame safety) อุปกรณ์จุดไฟอัตโนมัติ (Spark ignition) และ อุปกรณ์ควบคุมการจ่ายเชื้อเพลิงอัตโนมัติ (FM approved main gas valve) มีกลไกการยกฝาปิดเตาด้วยระบบใช้แรงดันอากาศ (Pneumatic) มีการออกแบบผนังวัสดุทนไฟ 4 ชั้น ใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ (Neutral gas) หรือก๊าซโพรเพน (Propane gas) (Baker furnace , Inc. 2000)

1.3.3 เตาที่ใช้พลังงานความร้อนจากกระแสไฟฟ้าแบ่งออกได้ 2 ชนิด ประกอบด้วย เตาแบบความต้านทานด้วยกระแสไฟฟ้า (Resistance furnace) ที่มีการออกแบบขดลวดความร้อนทำจากซิลิคอนคาร์ไบด์ซึ่งให้อุณหภูมิได้สูงถึง 1600 °C และขดลวดทำจากโมลิบดินั่มไดซิลิไซด์ ($MoSi_2$) ให้อุณหภูมิได้สูงถึง 1700 – 1900 °C (Kanthal industrial, 2000) และเตาแบบเหนี่ยวนำ ด้วยกระแส ไฟฟ้า (Induction furnace) ที่แบ่งออกได้เป็นแบบมีแกนเหนี่ยวนำ (Core induction furnace) และแบบไม่มีการเหนี่ยวนำ (Coreless induction furnace) ซึ่งจะสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภท คือ เตาความถี่ต่ำ (Low frequency) ใช้ความถี่ 50 เฮริทซ์ เตาความถี่ปานกลาง (Medium frequency) ใช้ความถี่ 150 – 500 เฮริทซ์ เตาความถี่สูง (High frequency) ใช้ความถี่ 100 – 10000 เฮริทซ์ (Linn high therm Co., 1972) การออกแบบและสร้างเตาหลอมแบบ Induction skull melting (ISM) ใช้สำหรับหลอมโลหะไทเทเนียม

และเซอร์โคเนียม ที่ต้องการความบริสุทธิ์สูงด้วยเบ้าหลอมโลหะ ทองแดงที่มีระบบน้ำหล่อเย็นอยู่ในผนังเบ้า ภายใต้ภาวะสุญญากาศหรือบรรยากาศที่ควบคุมด้วย ก๊าซเฉื่อย ด้วยขดลวดเหนี่ยวนำไม่มีการใช้วัสดุทนไฟบุผนังเบ้าหลอม จึงไม่มีการปนเปื้อนในโลหะ หลอม (Consarc engineering limited, 2000)

1.3.4 วัสดุทนไฟ (Refractory) เป็นวัสดุพวกอโลหะที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูงโดยไม่เกิดการหลอมเหลวเสียรูปทรงไปขณะใช้งาน มีความแข็งแรงสามารถต้านทานหรือทนทานต่อการใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิสูง ๆ สมบัติที่สำคัญของวัสดุทนไฟสำหรับงานหลอมโลหะ คือ มีความ แข็งแรงและทนทานต่อความร้อนได้สูง ทนการขัดสีจากลม ฝุ่น หรือวัสดุต่าง ๆ ได้ดีที่อุณหภูมิสูง มีความแข็ง แรงไม่แตกหักง่ายจากน้ำหนัก และแรงกระแทกที่อุณหภูมิสูง ทนต่อการกัดกร่อนจากปฏิกิริยาของสารเคมีที่อุณหภูมิสูง (สยามอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ, 2542) การกำหนดหลักการทดสอบวัสดุทน ไฟที่ใช้ทำผนังเตาหลอมตามมาตรฐาน อังกฤษ ยุโรป และอเมริกา โดยการทดสอบความทนทานต่อการคืบ (Creep) ภายใต้แรงกดอัดที่อุณหภูมิ 1750 $^{\circ}$C โดย กำหนดขนาดชิ้นงานให้มีเส้นผ่าศูนย์ กลาง 50 ม.ม. ความยาว 50 – 75 ม.ม. การทดสอบหาค่าโมดูลัสการแตกหัก (Modulus of rupture) ภายใต้บรรยากาศปกติและบรรยากาศก๊าซเฉื่อย โดยกำหนดขนาดของชิ้นงาน 25 × 25 × 230 ม.ม.สำหรับชิ้นงานขนาดใหญ่ กรณีชิ้นงานขนาดเล็กขนาด 5 ∼ 8 × 8 ∼ 10 × 50 ∼ 75 ม.ม. การทดสอบการขยายตัวเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง จะวัดอัตราการขยายตัวตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 1600 $^{\circ}$C (Burntstone ceramic limited, 2000) วัสดุทนไฟที่ใช้เป็นส่วนประกอบของเตาหลอมจะพิจารณาสมบัติจากส่วนผสมทางเคมี

อัตราการขยายตัวและหดตัว การนำความร้อน และรูปร่างลักษณะของวัสดุทนไฟ เช่น เป็นแท่งหน้าตัดรูปทรง (Prefabricated shapes) เป็นฉนวนไฟเบอร์แผ่นม้วน (Blanket) ทำจากวัสดุอะลูมิเนียมซิลิเกตไฟเบอร์ (Rath technology, 2000) เป็นผงใช้ผสมกับวัสดุอื่น (Mortar) เป็น ส่วนผสมข้นเหนียว (Plastic mixes and ramming mill) เป็นสารเคลือบ (Coating) การแบ่งวัสดุทนไฟตามสมบัติของสารประกอบได้ 3 ชนิด คือ (สยามอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ, 2542)

1.3.4.1 วัสดุทนไฟประเภทกรด (Acid refractory) ได้แก่ออกไซด์ของอโลหะ เช่น ซิลิก้า (SiO_2) เซอร์โคเนีย (ZrO_2) โครไมต์ ($Cr_2O_3.FeO$)

1.3.4.2 วัสดุทนไฟประเภทด่าง (Basic refractory) ได้แก่ออกไซด์ของโลหะ เช่น แมกนีเซีย (MgO) แคลเซีย (CaO)

1.3.4.3 วัสดุทนไฟประเภทกลาง (Neutral refractory) สารทนไฟชนิดนี้จะมีปฏิกิริยาเคมีเฉื่อยต่อขี้ตะกรันทั้งเป็นกรดหรือด่าง เช่น อะลูมินา (Al_2O_3)

1.3.5 อิฐทนไฟ (Refractory brick) คืออิฐที่ใช้ก่อหรือบุผนังเตาภายในโครงสร้างเตาหลอมโลหะ ซึ่งอิฐทนไฟสำเร็จรูปจะมีรูปร่าง และขนาดมาตรฐานต่าง ๆ กันไว้เลือกใช้งานตามความเหมาะสม ส่วนผสมทางเคมีของอิฐทนไฟจะมีผลต่ออุณหภูมิการใช้งานสูงสุด ตั้งแต่ 870 – 1820°C ส่วนผสมและเกรดของอิฐทนไฟ ส่วนใหญ่จะประกอบด้วย แมกนีเซีย ซิลิก้า อะลูมินา ซิลิคอนคาร์ไบด์ กราไฟต์ ดินขาว และดินทนไฟ เป็นต้น (สยามอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ, 2542)

1.3.6 เบ้าหลอม ที่ใช้หลอมโลหะควรมีสมบัติถ่ายความร้อนได้ดีเพื่อประหยัดเชื้อเพลิง และเวลา ทนความร้อนสูง ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว ต้านทานต่อบรรยากาศที่มีออกซิเจนอยู่มากเพื่อไม่ให้กราไฟท์ถูกเผาไหม้ ต้านทานปฏิกิริยาเคมี มีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงต้านทานการกระทบและเสียดสีของวัสดุและน้ำโลหะ มีความแข็งแรงสูงที่อุณหภูมิต่ำเพื่อเคลื่อน ย้ายได้ง่าย เบ้าหลอมมีการออกแบบสร้างหลายรูปร่างลักษณะการใช้งาน เบ้าสำหรับใช้กับเตาเบ้าหลอมโลหะแบ่งออกได้หลายกลุ่มตามชื่อการค้า เช่น Starrbide crucible ทำจากซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปประกอบด้วยดินทนไฟผสมกับซิลิคอนคาร์ไบด์ Excel crucible ทำจากซิลิกอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปประกอบด้วยเรซิ่นประสานกับซิลิคอนคาร์ไบด์ Syncarb crucible ทำจากซิลิคอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Isostatic press Index crucible ทำจากดินทนไฟผสมกับกราไฟต์ ใช้สำหรับเตาเหนี่ยวนำด้วยกระแสไฟฟ้า Salamander crucible ทำจากดินทนไฟผสมกับกราไฟต์ Starr cement crucibleประกอบด้วย Al_2O_3 76% , SiO_2 18% , TiO_2 3% , R_2O 0.35% , CaO 0.08% , MgO 0.06% ใช้สำหรับเตาเหนี่ยวนำด้วยกระแสไฟฟ้า (Morganite crucible furnace, 2000) เบ้าหลอมที่นิยมใช้ในการหลอมโลหะนอกกลุ่มเหล็กมี 5 กลุ่ม ประกอบด้วย (Mammut - wetro, 2000)

1.3.6.1 Clay – graphite ประกอบด้วยกราไฟท์ 35% และใช้ดินเหนียวทนไฟเป็นตัวประสาน ถ่ายเทความร้อนดี ทนต่อความร้อน ต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ อย่างรวดเร็วได้ดี แต่ทนทานต่อการเกิดออกไซด์ การกัดกร่อนของขี้ตะกรันและฟลักซ์ได้ไม่ดีมีความแข็งแรงปานกลาง เหมาะสำหรับการหลอมโลหะสังกะสีผสมทองเหลือง และอะลูมิเนียมผสม ใช้กับเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำด้วยไฟฟ้า (Mammut - wetro, 2000)

1.3.6.2 Super clay – graphite ประกอบด้วยกราไฟต์ 35% ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) 12% ใช้ดินเหนียวทนไฟเป็นตัวประสาน ถ่ายเทความร้อนดี ทนความร้อนสูงกว่าแบบแรกมี อุณหภูมิใช้งาน 750 – 1000°C ต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วได้ดี ต้านทานต่อการเกิดออกไซด์ การกัดกร่อนของขี้ตะกรันและฟลักซ์ได้ดี เหมาะสำหรับการหลอมโลหะ อะลูมิเนียม ทองแดง และเหล็กหล่อ ใช้กับเตาหลอมใช้ไฟฟ้าหรือเตาหลอมใช้เชื้อเพลิงก๊าซ (Mammut - wetro , 2000)

1.3.6.3 Carbon bonded silicon carbide ประกอบด้วยกราไฟต์ 30% ซิลิกอนคาร์ไบด์ 45% และใช้คาร์บอนเป็นตัวประสาน ถ่ายเทความร้อนได้ดี ทนความร้อนได้สูง มีอุณหภูมิใช้งานสูงกว่า 1000°C ต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วได้ดี ต้านทานต่อการเกิดออกไซด์ การกัดกร่อนของขี้ตะกรันและฟลักซ์ได้ดี เหมาะสำหรับการหลอมโลหะอะลูมิเนียม อะลูมิเนียมผสม และทองแดงผสมใช้กับเตาหลอมใช้เชื้อเพลิงก๊าซ หรือน้ำมัน (Mammut - wetro, 2000)

1.3.6.4 Alumina - zirconia เบ้าหลอมที่ทำขึ้นจาก อะลูมินาผสมสูง 99.7 % หรือทำจากเซอร์โคเนียที่มีสมบัติถ่ายเทความร้อนได้ดี ทนความร้อนได้สูง มีอุณหภูมิใช้งานสูงถึง 2400°C ต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วได้ดี ต้านทานต่อการเกิดออกไซด์ การกัดกร่อนของขี้ตะกรันและฟลักซ์ได้ดีใช้ในการหลอมโลหะเพื่อเตรียมตัวอย่างชิ้นงานวัสดุ และการหลอม วัสดุเซรามิก ใช้กับเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำด้วยไฟฟ้า (Leco corporation, 1996)

1.3.6.5 Platinum เป็นเบ้าหลอมที่ทำขึ้นจากโลหะ ถ่ายเทความร้อนได้ดี ทนความร้อนได้สูง มีอุณหภูมิใช้งานสูงถึง 1400°C ต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วได้ดี ต้าน ทานต่อการเกิดออกไซด์ การกัดกร่อนของขี้ตะกรันและฟลักซ์ได้ดี แต่มีความ แข็งแรงที่อุณหภูมิสูงน้อย ใช้ในการหลอมโลหะเพื่อเตรียมตัวอย่างชิ้นงานวัสดุ และการหลอมวัสดุเซรามิก ใช้กับเตาหลอมที่ใช้เชื้อเพลิงก๊าซ (Leco corporation, 1996)

1.3.7 ปูนทนไฟ (Mortar) เป็นวัสดุทนไฟที่ใช้ยึดประสานอิฐทนไฟแต่ละก้อนให้ติดกันช่วยให้โครงสร้างสามารถคงรูปร่างได้ช่วยป้องกันการรั่วไหลของเปลวไฟ และวัตถุดิบภายในเตามีสมบัติทนทานต่ออุณหภูมิสูง มีลักษณะเป็นผง มีส่วนผสมทางเคมีประกอบด้วย ซิลิก้า อะลูมินา เหล็ก ออกไซด์ (Fe_2O_3) และแมกนีเซียมออกไซด์ ปูนทนไฟที่ใช้ยึดประสานในเตาหลอม แบ่งออกได้ 2 ชนิด คือ (สยามอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ, 2542)

1.3.7.1 ปูนทนไฟชนิดที่ต้องเผาเพื่อให้แข็งแรง (Heat – setting mortar) เป็นปูนทนไฟชนิดผงแห้ง การใช้งานต้องนำไปผสมน้ำตามสัดส่วนที่กำหนดไว้ ปูนทนไฟชนิดนี้จะให้ความแข็งแรงสมบูรณ์เมื่อได้รับความร้อนสูงเกิน 1000 °C

1.3.7.2 ปูนทนไฟชนิดที่แข็งแรงได้เองที่อุณหภูมิห้อง (Air – setting mortar) เป็นปูนทนไฟชนิดผงแห้งต้องผสมน้ำตามสัดส่วนที่กำหนดไว้ก่อนใช้งาน และชนิดเปียกที่ผสมเสร็จพร้อมใช้งานทันที ปูนทนไฟชนิดนี้จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีให้ความแข็งแรง ณ อุณหภูมิห้อง

1.3.8 การเลือกเตาหลอมโลหะที่ใช้ในการหลอมโลหะนอกกลุ่มเหล็ก มีข้อพิจารณา คือ การนำไปใช้งาน จำนวนโลหะผสม ผลผลิตประจำวันของโลหะผสมแต่ละชนิด ปริมาณงานหล่อที่ใหญ่ที่สุด

ความต่อเนื่องในการป้อนน้ำโลหะ ขนาดของเตาหลอม และการเลือกเชื้อเพลิงที่ให้พลังงานความร้อนกับเตาหลอม (พยูร เกตุกราย, 2523)

1.3.8.1 การหลอมโลหะทองแดงผสม ทองเหลือง (Brass) และบรอนซ์ (Bronze) นิยมใช้เตาอยู่ 3 ประเภท คือ เตาไฟฟ้าที่ใช้การอาร์ค หรือการเหนี่ยวนำด้วยกระแสไฟฟ้าใช้ สำหรับงานอุตสาหกรรมหนัก เตานอนที่ใช้การสะท้อนความร้อนใช้สำหรับอุตสาหกรรมขนาดกลาง เตาเบ้าที่ใช้เชื้อเพลิงจากน้ำมัน ถ่านโค้ก และก๊าซใช้สำหรับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก (พยูร เกตุกราย, 2523) การหลอมทองแดงผสมในบรรยากาศที่มีออกซิเจนอยู่สูงกว่าปกติเล็กน้อย เพื่อให้ใช้ฟลักซ์ที่เพิ่มออกซิเจนน้อยที่สุด และก่อนเทน้ำโลหะต้องลดออกซิเจนเสียก่อน โดยใช้ฟอสฟอรัสเป็นตัวดึงออกซิเจน หรือใช้ก๊าซไนโตรเจนแห้งผ่านเข้าไปในน้ำโลหะก่อนเท (บัณฑิต ใจชื่น และสุทน พัฒนศิริ, 2531)

1.3.8.2 การหลอมโลหะอะลูมิเนียมผสมขึ้นอยู่กับคุณภาพของน้ำโลหะ และจำนวนปริมาตรของอะลูมิเนียมที่จะหลอม มีเตาที่ใช้ในอุตสาหกรรมอยู่ 5 ประเภท คือ เตาเบ้าที่ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงใช้เบ้ากราไฟต์หรือเซรามิกชนิดยกเทออกใช้สำหรับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก เตากะทะโดยใช้เหล็กหล่อหรือเหล็กกล้าพิเศษเป็นเบ้าใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง ใช้สำหรับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก เตานอนแบบสะท้อนความร้อนมีทั้งตั้งอยู่กับที่ และเอียงเทได้ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง ใช้สำหรับงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ และขนาดกลาง เตาไฟฟ้าที่ใช้มี 2 ประเภท คือ แบบใช้ความต้านทานด้วยไฟฟ้าเป็นเตาที่ดีที่สุดในการหลอมอะลูมิเนียม เพราะง่ายต่อการควบคุมการละลายก๊าซ และขี้โลหะ ส่วนเตาแบบเหนี่ยวนำด้วยไฟฟ้าแบบช่อง (Channel) จะทำให้เกิดการกวนน้ำโลหะทำให้เกิดการละลายก๊าซในน้ำโลหะ ใช้สำหรับอุตสาหกรรมขนาดกลาง (พยูร เกตุกราย, 2523)

1.3.8.3 การหลอมโลหะแมกนีเซียมผสม ขึ้นอยู่คุณภาพน้ำโลหะ และปริมาณการหลอม มีเตาที่ใช้ในอุตสาหกรรมอยู่ 3 ประเภท คือ เตาเบ้าที่เบ้าหลอมทำจากเหล็กหล่อคาร์บอนต่ำหรือเหล็กเหนียวที่สามารถเอียงเทใช้พลังงานความร้อนจากความต้านทานไฟฟ้าใช้สำหรับอุตสาหกรรม ขนาดเล็ก และขนาดกลาง เตาเหนี่ยวนำด้วยไฟฟ้าชนิดไม่มีแกนใช้สำหรับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่เตาที่หลอมโลหะแมกนีเซียมจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนทำความสะอาดน้ำโลหะ (Refinning zone) และส่วนหลอมละลาย (Melting zone) น้ำโลหะแมกนีเซียมจะทำปฏิกิริยากับวัสดุทนไฟ และเบ้าหลอมอย่างรุนแรง นอกจากนี้ยังทำปฏิกิริยาอย่างรุนแรงกับเหล็กออกไซด์ และต้องระวังก๊าซออกซิเจนหรือความชื้นจากน้ำเพราะอาจเกิดการระเบิดขึ้นได้ และต้องป้องกันปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในแบบหล่อทรายในการหลอมจะใช้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) หรือใช้ก๊าซคาร์บอนไดออก ไซด์ (CO_2) ในงานคุณภาพสูงจะใช้ก๊าซอาร์กอน (Ar) ควบคุมบรรยากาศในการหลอมโลหะแมกนีเซียม (John Pearce, 1999)

1.3.9 การใช้งานของฟลักซ์ในโลหะหลอมทองแดงผสม และมีการเติมโลหะสังกะสีเพื่อผลิตเป็นทองเหลือง จะเกิดการรวมตัวของสังกะสีกับออกซิเจนเป็นสังกะสีออกไซด์ (ZnO) ซึ่งเป็นไอพิษ ทำให้สัดส่วนผสมของโลหะเจือไม่เป็นไปตามที่คาดการณ์ไว้ จะใช้การปกคลุมผิวหน้าน้ำโลหะด้วยฟลักซ์ที่ผสมขึ้นจากโซดาแอส หรือเกลือโบแรกซ์ (วีรพันธ์ สิทธิพงศ์, 2535) และอาจใช้การปกคลุมด้วยผงถ่านไม้เพื่อลดการสูญเสียธาตุสังกะสี (หริส สูตะบุตร และเคนยิ จิยิอิวา, 2523) ในการหลอมโลหะผสมบรอนซ์ จะต้องกำจัดการดูดก๊าซไฮโดรเจนในบรรยากาศเข้าไปในน้ำโลหะที่หลอมละลายให้น้อยที่สุด เพราะจะทำให้เกิดจุดเสีย คือ รูพรุน (Blow holes) รูเข็มภายในโครง สร้าง (Pin holes) โดยการเติมคอปเปอร์ออกไซด์ประมาณ 0.2 % แมงกานีสไดออกไซด์ประมาณ 0.3 % หรือโปแตสเซียมเปอร์แมงกาเนตประมาณ 0.1 % (หริส สูตะบุตร และเคนยิ จิยิอิวา, 2523) ในการหลอมโลหะผสมฟอสเฟอร์บรอนซ์ จะป้องกันการดูดก๊าซไฮโดรเจนในบรรยากาศเข้าไปในน้ำโลหะด้วยการเติมแมงกานีสไดออกไซด์ ประมาณ 0.1 – 0.5 % และทำการลดก๊าซออก ซิเจนในน้ำโลหะ (Deoxidize) ด้วยการเติมฟอสเฟอร์คอปเปอร์ (หริส สูตะบุตร และเคนยิ จิยิอิวา, 2523) ในการหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียมบรอนซ์ จะป้องกันการดูดก๊าซไฮโดรเจนในบรรยากาศเข้าไปในน้ำโลหะจะใช้ฟลักซ์พวกเกลือคลอไรด์และเกลือโบแรกซ์ และควบคุมอุณหภูมิในการหลอมละลายไม่ให้สูงเกินไป (หริส สูตะบุตร และเคนยิ จิยิอิวา, 2523) ในการหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียมจะใช้ ฟลักซ์เพื่อป้องกันการละลายของก๊าซไฮโดรเจนในน้ำโลหะ โดยฟลักซ์ที่ผสมขึ้นจากแมกนิเซียมคลอไรด์ แคลเซียมฟลูออไรด์ โซเดียมคลอไรด์ เคเลียมคลอไรด์ เคเลียมฟลูออไรด์ เฮกซาฟลูออโรซิลิซิคเอซิค โซเดียม และ เฮกซาฟลูออโรซิลิซิคเอซิคแคลเซียม (หริส สูตะบุตร และเคนยิ จิยิอิวา, 2523) การหลอมอะลูมิเนียมผสมสามารถรวมตัวกับก๊าซออกซิเจนได้ดี เกิดเป็นผิวออกไซด์ปกคลุมไว้ทำให้ดูดเอาก๊าซไฮโดรเจนได้น้อย และสามารถกำจัดเอาก๊าซไฮโดรเจนออกได้โดยใช้ก๊าซไนโตรเจนแห้ง หรือก๊าซคลอรีนผ่านเข้าไปในน้ำโลหะ และการใช้อะลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$) หรือ เฮกซาโคลโรอีเทน (C_2Cl_6) กดลงใต้ผิวน้ำโลหะก่อนที่จะเทน้ำโลหะ (พยูร เกตุกราย, 2523) เพราะเมื่อไอน้ำหรือความชื้นในบรรยากาศเมื่อสัมผัสกับอะลูมิเนียมเหลวจะเกิดก๊าซไฮโดรเจน และขี้ตะกรัน

1.3.10 การแข็งตัวของโลหะหล่อ (Solidification of cast metals) โลหะหล่อเป็นโลหะผสมที่ได้จากการแข็งตัวของน้ำโลหะภายในเบ้าหล่อ กระบวนการแข็งตัวมีอิทธิพลต่อ สมบัติของโลหะหล่อ เช่น การแยกแข็ง (Segregation) โครงสร้างจุลภาค และความพรุนของโลหะหล่อ โครงสร้างของโลหะหล่อประกอบด้วย 3 โซน (ศิริกุล วิสุทธิ์เมธางกูร, 2543) คือ

1.3.10.1 โซนเย็น (Chill zone) เมื่อโลหะเหลวถูกเทลงในแบบหล่อน้ำโลหะที่สัมผัสผนังแบบหล่อจะเย็นตัวลงเกิดการฟอร์มนิวเคลียสของของแข็งขึ้น เมื่ออุณหภูมิผนังแบบหล่อ สูงขึ้น

ผลึกของแข็งเหล่านี้อาจหลุดเมื่อกระทบการไหลแบบปั่นป่วนของโลหะเหลว และกลายเป็นผลึกจำนวนมากต่อไป ถ้าอุณหภูมิเทน้ำโลหะต่ำผลึกเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสและมีการเติบ โตต่อไปจะได้โครงสร้างแบบเท่ากันทุกทิศทาง (Equiaxed grains) และไม่มีโซนของคอลัมนาร์ (Columnar zone) ถ้าอุณหภูมิเทน้ำโลหะสูง ผลึกที่หลุดออกมาก็จะถูกหลอมละลายอีกครั้งแทนที่จะเติบโตต่อ ไปมีเพียงบางส่วนเท่านั้นที่ติดผนังที่เติบโตต่อไป และฟอร์มเกรนที่มีขนาดเท่ากันกลาย เป็นของของ แข็งติดผนังแบบหล่อเรียกว่า โซนเย็น

1.3.10.2 โซนคอลัมนาร์ (Columnar zone) เมื่อเกรเดียนต์อุณหภูมิที่ผนังแบบหล่อลดต่ำลง ผลึกบริเวณโซนเย็นจะโตแบบเดนไดรต์ (Dendrite) โดยมีทิศทางการเรียงตัวที่แน่ นอนในโลหะที่มีโครงสร้างผลึกเป็นลูกบาศก์ทิศทางการเติบโตของเดนไดรต์คือ <100> ทิศทางนี้เป็นทิศทางเดียวกับทิศทางการถ่ายเทความร้อน ผลึกที่เรียงตัวในทิศทาง <100> นี้จะโตด้วยอัตราที่เร็วกว่าเกรนข้างเคียงที่ไม่ได้เรียงตัวในทิศดังกล่าวทำให้เกรนที่โตมีลักษณะเป็นแท่งยาว แต่ละผลึกของคอลัมนาร์ประกอบด้วยเดนไดรต์ปฐมภูมิ (Primary dendrites) หลาย ๆ แขน เมื่อรัศมีของเกรนเพิ่มขึ้นจำนวนของเดนไดรต์ปฐมภูมิภายในเกรนก็เพิ่มขึ้นด้วย โดยที่แขนบางแขนของเดนไดรต์ปฐมภูมิโตมาจากการเติบโตของเดนไดรต์ตติยภูมิ (Tertiary dendrites) ที่รวดเร็วกว่าแขนข้าง เคียง

1.3.10.3 โซนของเกรนที่ขนาดใกล้เคียงกันทุกทิศทาง (Equiaxed zone) โซนนี้จะอยู่บริเวณตรงกลางของแบบหล่อ อินเตอร์เฟสระหว่างของแข็ง และของเหลวของเกรนเหล่านี้มีลักษณะเป็นเดนไดรต์ เกรนเหล่านี้เติบโตมาจากกิ่งก้านสาขาองเดนไดรต์ที่หลุดออกมาจากบริเวณโซนเย็น เมื่อถูกกระแสการพา (Convection current) ของโลหะเหลวไหลผ่านกระแสนี้เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิในของเหลว การไหลวนจะหยุดก็ต่อเมื่อน้ำโลหะมีอุณหภูมิเท่ากันหมดทำให้แขนเดนไดรต์เล็ก ๆ หลุดออกมา และเป็นจุดกำเนิดของเกรนที่มีขนาดเท่ากันทุกทิศทาง แขนเดนไดรต์เหล่านี้มีปริมาณตัวถูกละลายที่สูงกว่าแขนเดนไดรต์หลัก ปัจจัยที่ช่วยเสริมโซนนี้ให้กว้างขึ้นคือ การลดขนาดของซูเปอร์ฮีท (Superheat) เพราะที่ซูเปอร์ฮีทสูงเศษของเดนไดรต์ที่หลุดออก มาจะละลายไปอีก

W.J. Boettinger , S.R.Coriell , R.J. Schaefer , J.A. Warren (1958) ได้ศึกษากระบวนการแข็งตัวของโลหะผสมที่ดีที่สุดซึ่งแสดงผลด้วยโครงสร้างจุลภาค และสมบัติหลายอย่างของโลหะผสม โดยเน้นถึง (1) การเริ่มต้นของกระบวนการแข็งตัว คือ การเกิดนิวเคลียส และการเติบโตของเฟสโลหะผสมจากกระบวนการหลอมไปจนถึงการแข็งตัวในระหว่างเย็นตัว (2) สัดส่วนของโลหะหลอมและผลการแยกแข็งในระดับโครงสร้างจุลภาค และระดับมหภาค (3) ผลของกระบวนการแข็งตัวที่เปลี่ยนแปลงต่อโครงสร้างที่มีต่อสมบัติของโลหะ

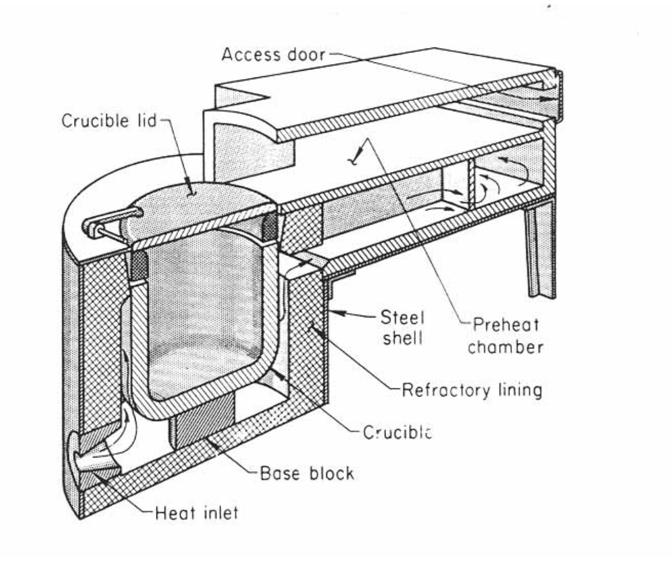
MCDowell , C.S. and Basu , S.N. (1994) ได้ศึกษาถึงขนาดเกรนผลึกของโลหะผสมที่ต้านทานต่อการเกิดการรวมตัวกับออกซิเจนของเหล็กกล้าไร้สนิม ที่เคลือบผิวด้วยซิลิก้าโดยทำการทดสอบที่

สภาพบรรยากาศ ณ อุณหภูมิ 900 °C และศึกษาการฟอร์มรูปของผิวออกไซด์พบว่าขนาดอนุภาคซิลิก้าขนาดเล็กจะเป็นตัวกั้นการแพร่ของออกซิเจนได้ดีกว่าอนุภาคซิลิก้าขนาดใหญ่

D.E. Groh and Henry C. (1994) ได้ศึกษาถึงการแสดงผลของพลังงานภายในโครงสร้างอะตอมว่ามีผลอย่างไรต่อพฤติกรรมการเริ่มแข็งตัว และกำหนดผลลัพธ์ความเป็นไปได้ของพฤติกรรมทิศทางการแข็งตัวของแท่งอินก๊อท และผลกระทบที่เกิดขึ้นโดยนำโลหะผสมตะกั่ว – ดีบุก มาศึกษาพฤติกรรมเมื่อเปลี่ยนส่วนผสม เพราะเป็นโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ มีคุณลักษณะและสมบัติดีเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง

1.3.11 การเพิ่มประสิทธิภาพการหลอมโลหะในเตาเบ้า สามารถทำได้โดยการออกแบบรูปแบบของเตาให้สามารถใช้ประโยชน์ทางความร้อนของก๊าซไอร้อนที่ได้จากการสันดาปที่ปล่อยออกมาใช้งานมีหลายวิธี คือ

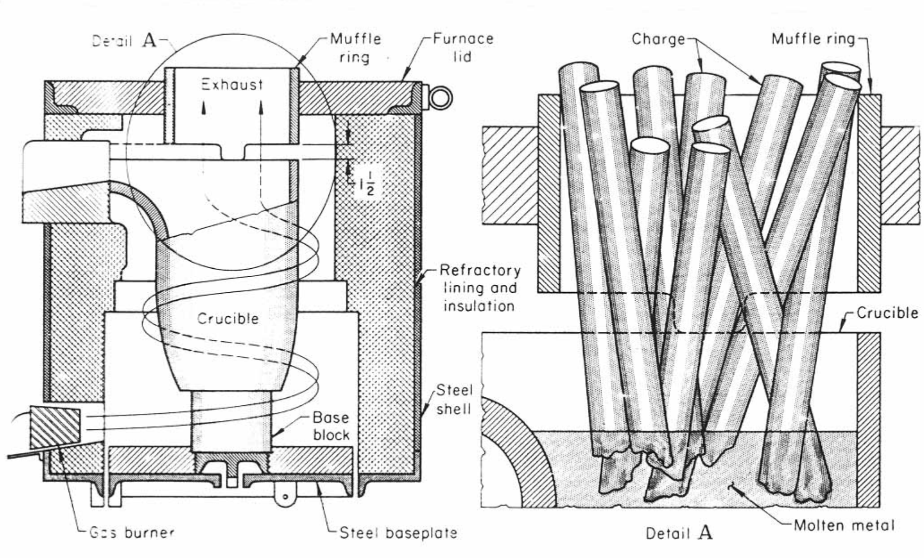
1.3.11.1 วิธีการออกแบบพื้นที่ไว้ที่บริเวณปากปล่องไอเสียโดยมีห้องไว้สำหรับอุ่นชิ้นเศษวัสดุก่อนที่จะนำบรรจุลงในเบ้าหลอม แต่ไม่ให้ชิ้นงานสัมผัสกับก๊าซที่สันดาป ซึ่งวิธีการนี้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการหลอมโลหะอะลูมิเนียมผสมได้ถึง 60.5 % เมื่อเปรียบเทียบกับการหลอมแบบธรรมดาจะมีประสิทธิภาพ ประมาณ 33 % เท่านั้น และมีข้อดีคือไม่มีการดูดซึมก๊าซปนเปื้อนเข้าที่ในเนื้อโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 เตาเบ้าที่มีการออกแบบพื้นที่สำหรับการอุ่นชิ้นงาน
ที่มา : ASM International handbook, 1996

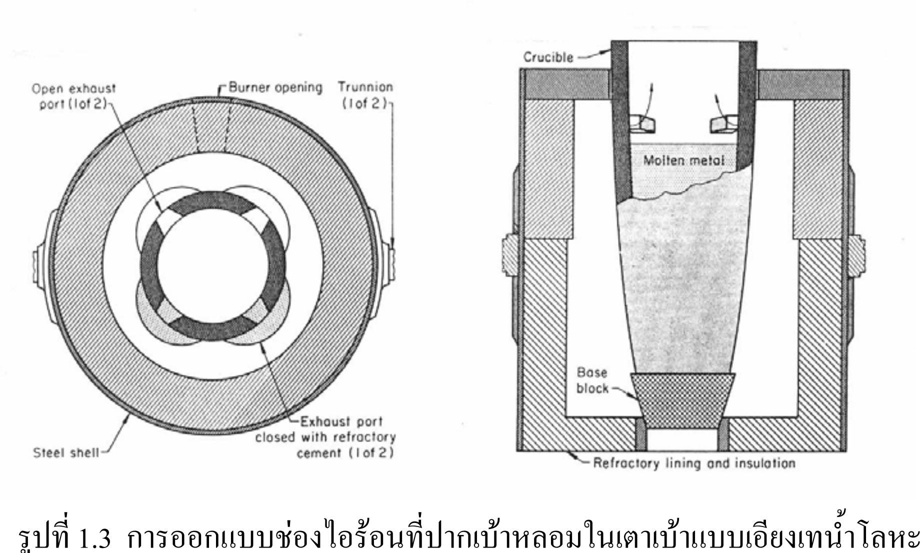
1.3.11.2 วิธีการออกแบบให้มีแหวนครอบเบ้า (Muffle ring) ในเตาเบ้าแบบเอียงเทน้ำโลหะ (Tilting furnace) เพื่อเป็นช่องให้ก๊าซจากการสันดาปเข้ามาที่บริเวณปากเบ้า เพื่อใช้ไอ

ร้อนอุ่นชิ้นวัสดุให้ร้อนก่อนจะละลายลงในเบ้าหลอม วิธีการนี้ไม่เหมาะสำหรับโลหะผสมที่มีส่วนผสมสังกะสีมากกว่า 20 % หรือตะกั่วมากกว่า 30 % เพราะจะทำให้เกิดการสูญเพลิงระเหยเป็นไอ ดังแสดงในรูปที่ 1.2 หรือการออกแบบให้เบ้าหลอมมีช่องด้านบน สำหรับไว้ให้ก๊าซสันดาปไหลผ่าน จำนวน 2 – 4 ช่อง เพื่อให้ไอร้อนบางส่วนเข้าไปด้านบนใช้อุ่นชิ้นวัสดุขนาดกลาง ให้ร้อนก่อนละลายลงสู่เบ้าหลอมด้านล่าง แต่จะต้องคำนึงถึงการเอียงเทน้ำโลหะออกจากเตาด้วย ดังแสดงในรูปที่ 1.3 (ASM International handbook, 1996)



รูปที่ 1.2 การออกแบบส่วนใช้อุ่นชิ้นงานของเตาเบ้าแบบเอียงเทน้ำโลหะ
และลักษณะการวางชิ้นงานลงในเบ้าหลอม

ที่มา : ASM International handbook, 1996



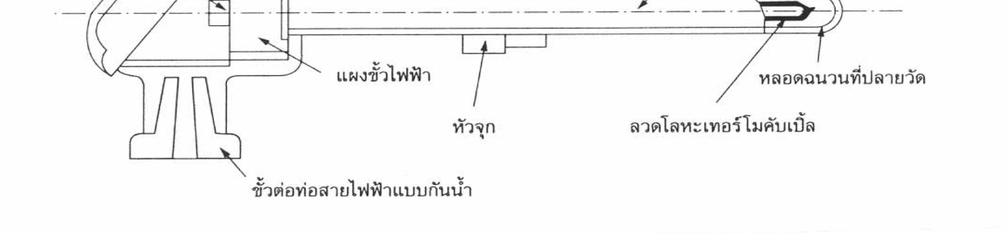
รูปที่ 1.3 การออกแบบช่องไอร้อนที่ปากเบ้าหลอมในเตาเบ้าแบบเอียงเทน้ำโลหะ

ที่มา : ASM International handbook, 1996

1.3.11.3 วิธีการออกแบบให้มีอุปกรณ์นำความร้อนมาใช้ในการอุ่นก๊าซเชื้อเพลิงและอากาศ (Heat exchanger) ก่อนที่จะเข้าห้องสันดาปหรือนำกลับมาใช้งานในห้องเผาไหม้ วิธีการนี้มีการติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่เสียค่าใช้จ่ายสูง เหมาะสำหรับ โรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ แต่สามารถลดค่าใช้จ่ายของก๊าซเชื้อเพลิงได้ถึง 25 %

1.3.12 เครื่องวัดอุณหภูมิในเตาหลอมโลหะแบบเทอร์โมคัปเปิล ที่ใช้วัดโดยการสัมผัสโดยตรงกับวัตถุที่ต้องการวัดอุณหภูมิ ซึ่งเป็นเครื่องวัดแบบไบเมทัล (Bimetal) เป็นเครื่องวัดที่อาศัยหลักการยืดหดตัวของไบเมทัลเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เครื่องวัดอุณหภูมิแบบความต้านทานไฟฟ้าเป็นเครื่องวัดที่อาศัยสมบัติที่ความต้านทานไฟฟ้าของโลหะ หรือสารกึ่งตัวนำเปลี่ยนแปรไปตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ส่วนเครื่องวัดแบบเทอร์โมคัปเปิลนั้นอาศัยปรากฏการณ์ที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าเชิงความร้อน (Thermal emf.) ที่เกิดขึ้นระหว่างจุดต่อทั้งสองของโลหะสองชนิดจะเปลี่ยนแปรไปตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่จุดต่อทั้งสอง และแบบที่ใช้วัดรังสีความร้อนที่แผ่ออกจากวัตถุที่มีอุณหภูมิสูง โดยการเปรียบเทียบความเข้มของแสงหรือรังสีที่รับเข้ามากับความเข้มของแสงที่กำเนิดจากหลอดไฟมาตราฐาน ที่สามารถปรับได้แล้วเทียบหาค่าอุณหภูมิออกมาซึ่งเป็นวิธีวัดแบบไม่สัมผัสกับวัตถุโดยตรง (โยชิฮิโกะ ทากามูระ, 2543)

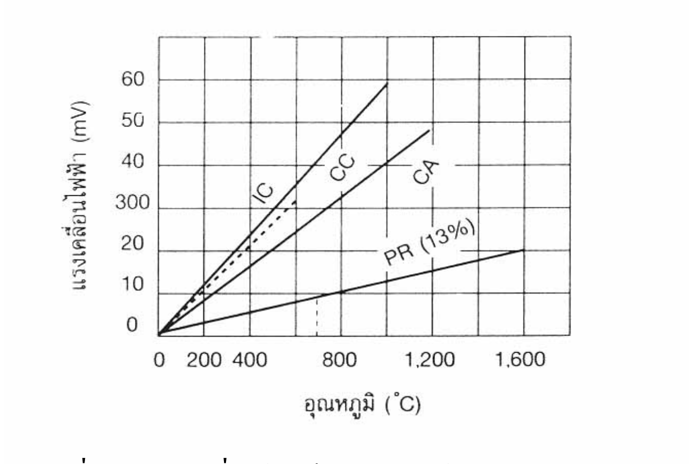
โดยทั่วไปตัวเทอร์โมคัปเปิลจะบรรจุไว้ในหลอดป้องกันดังแสดงในรูปที่ 1.4 เทอร์โมคัปเปิลแบบที่ใช้ในอุตสาหกรรมต้องมีลักษณะและสมบัติ คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นต้องสูงและแปรเป็นเชิงเส้นกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น มีเสถียรภาพดีทนต่อการใช้งานในเวลานาน และไม่มีปรากฏการณ์ ฮีสเตอร์ซีส ทนทานต่อความร้อนสูง มีความแข็งแรง เชิงกลสูงในสภาพอากาศสูง และทนทานต่อการกัดกร่อนหรือเป็นสนิมเมื่ออยู่ในอากาศหรือก๊าซที่มีอุณหภูมิสูง และมีความต้านทานไฟฟ้าต่ำและสัมประสิทธิ์ความต้านทานไฟฟ้าต่ออุณหภูมิต่ำและสภาพการนำความร้อนต่ำ



รูปที่ 1.4 โครงสร้างเทอร์โมคัปเปิล

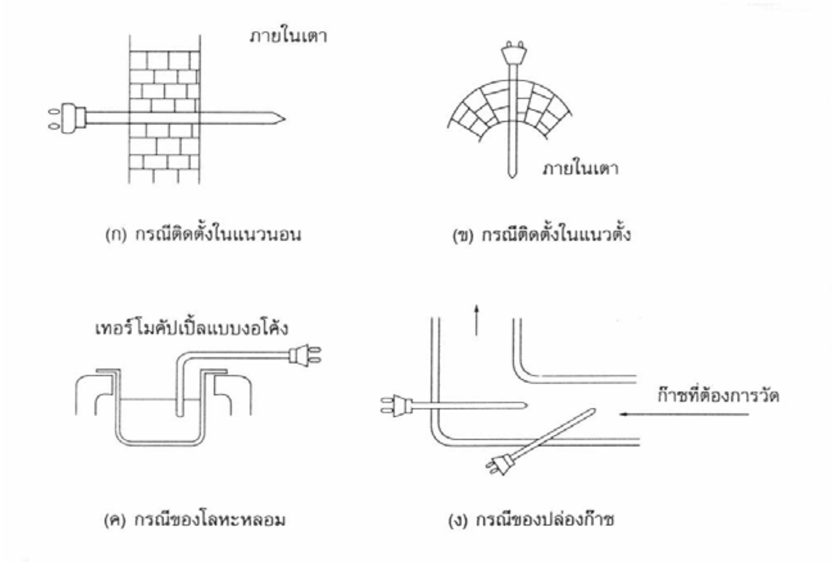
ที่มา : โยชิฮิโกะ ทากามูระ, 2543

สมบัติของแรงเคลื่อนไฟฟ้าของวัสดุที่นำมาทำไบเมทัลในเครื่องวัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมคัปเปิล และการใช้งานของเทอร์โมคัปเปิลแบบต่าง ๆ แสดงไว้ในรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.5 แรงเคลื่อนไฟฟ้าของโลหะไบเมทัล และอุณหภูมิ
การใช้งานของเทอร์โมคัปเปิล
ที่มา : โยชิฮิโกะ ทากามูระ, 2543

เครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบเทอร์มิสเตอร์เป็นแบบที่มีความแม่นยำสูง และใช้ออกไซด์ของกลุ่มโลหะพวกแมงกานีส นิกเกิลและโคบอลต์ ออกไซด์โลหะพวกนี้มีความต้านทานไฟฟ้าสูง และมีค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานไฟฟ้าต่ออุณหภูมิเป็นลบ การใช้งานเครื่องมือวัดขึ้นอยู่กับจุดประสงค์การใช้งานและการตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัด ดังแสดงในรูปที่ 1.6



รูปที่ 1.6 ตัวอย่างตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิ
ที่มา : โยชิฮิโกะ ทากามูระ, 2543

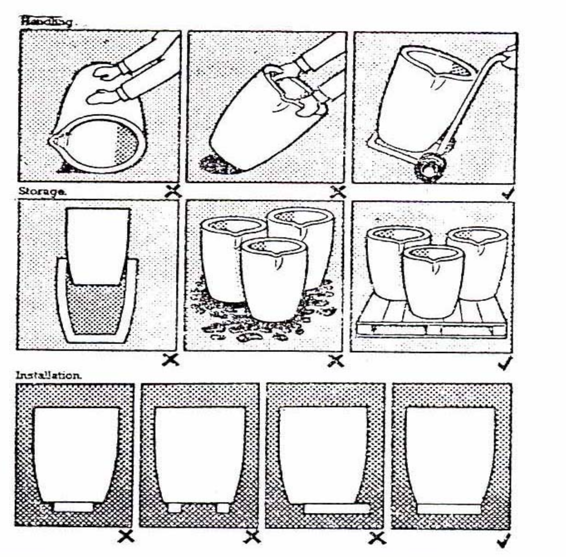
1.3.13 การใช้งานเบ้าหลอมโลหะ

ในการเลือกใช้งานเบ้าหลอมโลหะมีปัจจัยที่ต้องพิจารณา คือการนำไปใช้งานหลอมโลหะชนิดใด ส่วนผสม ปริมาณน้ำโลหะที่ทำการหลอมในแต่ละครั้ง อัตราการป้อนน้ำโลหะ ขนาดของเตา ชนิดของเชื้อเพลิง การใช้เบ้าหลอมให้มีประสิทธิภาพ และมีอายุการใช้งานยาวนานมีหลักการดังนี้

1.3.13.1 การเก็บรักษาเบ้าหลอม ควรเก็บในที่แห้ง ที่อุณหภูมิประมาณ 30 – 40 °C การขนย้ายเบ้าหลอมควรทำให้ถูกวิธี และการจัดเก็บต้องวางบนไม้แผ่นเรียบ ดังแสดงในรูปที่ 1.7

1.3.13.2 การตรวจสอบเบ้าหลอม ก่อนเก็บและก่อนนำเบ้าหลอมออกไปใช้ต้องตรวจดูเสมอว่ามีรอยแตกร้าวเสียหายหรือไม่ ถ้ามีรอยแตกร้าวแม้จะเล็กน้อยไม่ควรนำไปใช้งาน

1.3.13.3 การติดตั้งเบ้าหลอมควรตั้งไว้กึ่งกลางเตาและให้ห่างจากผนังเตาพอสมควรเพื่อ ให้เบ้ามีโอกาสการขยายตัวอย่างอิสระ และที่ก้นเบ้าหลอมต้องวางลงกับแผ่นรอง (Support box) ในเตาหลอมควรใช้เศษผ้าและทรายรองเอาไว้ เพื่อให้ยกเบ้าหลอมออกได้ง่าย

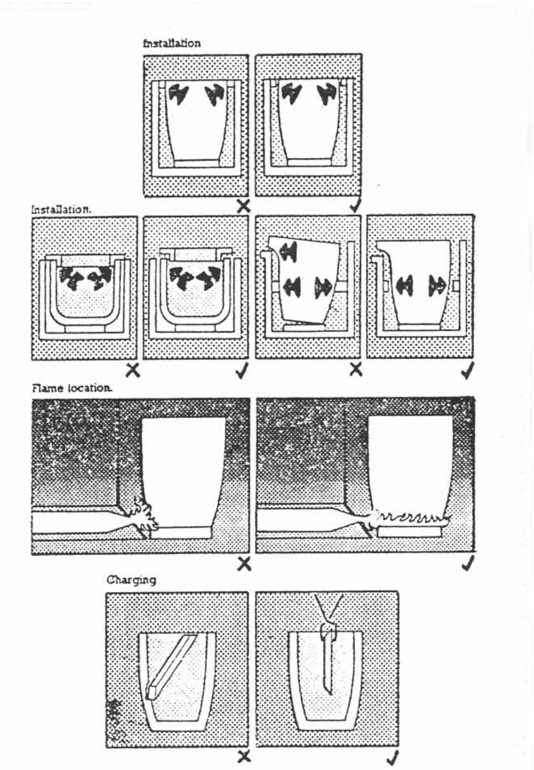


รูปที่ 1.7 การขนย้าย การจัดเก็บและการติดตั้งเบ้าหลอมโลหะ

ที่มา : Mammut - wetro, 2000

1.3.13.4 ก่อนจุดเตาควรตรวจดูเส้นแนวกึ่งกลางของหัวเผาต้องอยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง

1.3.13.5 การจุดเตาเบ้ามักจะเกิดการแตกร้าวเนื่องจากความร้อนเปลี่ยนแปลงทันทีเสมอ ทำให้เบ้าเสียหายได้ ดังนั้นจะต้องอุ่นเบ้าหลอมอย่างระมัดระวังอย่าให้เปลวไฟกระทบกับเบ้าหลอมโดยตรง ถ้าเป็นเตาเอียงอย่าเคลื่อนไหวเตาจนกว่าเบ้าหลอมจะร้อนแดงเสียก่อน เพื่อให้แน่ใจว่าวัสดุที่ยึดเบ้ามีความแข็งแรงพอเพียง ดังแสดงในรูปที่ 1.8

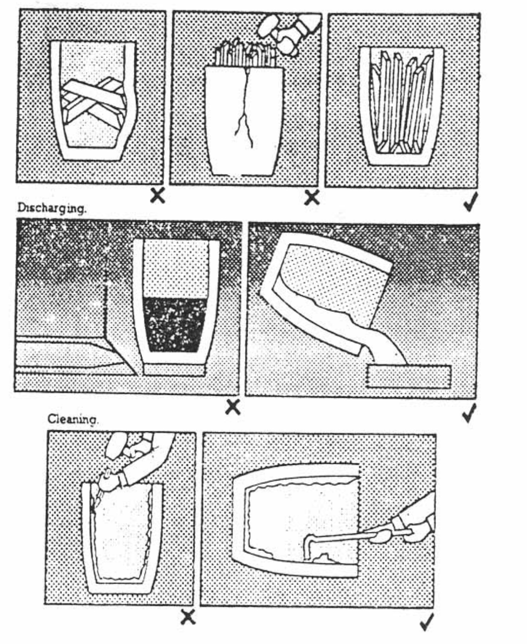


รูปที่ 1.8 การวางตำแหน่งเบ้าหลอม การจุดเปลวไฟ
และการบรรจุวัสดุลงในเบ้าหลอม
ที่มา : Mammut - wetro, 2000

1.3.13.6 การบรรจุวัสดุลงในเบ้าหลอม ต้องบรรจุวัสดุลงทันทีที่เบ้าร้อนแดง โลหะจะเริ่มหลอมและต้องคอยเติมวัสดุเพื่อให้วัสดุเต็มเบ้าอยู่เสมอ การบรรจุอย่าให้เกิดอันตรายกับเบ้าหลอม อย่าตอกเศษโลหะลงไปจนแน่นเบ้า อย่าเติมฟลักซ์ใด ๆ ลงไปจนกว่าวัสดุจะเริ่มหลอมเพราะฟลักซ์ส่วนใหญ่มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าโลหะหลอม ถ้าเติมขณะโลหะยังไม่หลอมจะทำปฏิกิริยาซึมเข้าไปในเบ้าและกัดกร่อนผนังเบ้า ดังแสดงในรูปที่ 1.9

1.3.13.7 การหลอมและเทน้ำโลหะ ต้องปรับอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงให้เหมาะสมและพยายามหลอมเร็วที่สุดเท่าที่ทำได้เมื่ออุณหภูมิได้ตามต้องการแล้วเททันทีอย่าปล่อยไว้นาน เมื่อเทน้ำโลหะออกจากเบ้าหมดแล้วทำความสะอาดทันที อย่าปล่อยให้น้ำโลหะแข็งตัวอยู่ในเบ้า การทำความสะอาดเบ้าควรทำในขณะที่เบ้ายังร้อนอยู่ ถ้าปล่อยให้เย็นตัวเศษโลหะจะแข็งติดเบ้าทำให้เอายาก และอาจทำให้เบ้าแตกร้าวได้

1.3.13.8 การทำความสะอาดเบ้า ควรทำในขณะที่เบ้ายังร้อนอยู่ โดยใช้โลหะแข็งขูดออก ถ้าปล่อยให้เย็นตัวเศษโลหะจะแข็งติดเบ้าทำให้เอาออกยาก และอาจทำให้เบ้าแตกร้าวได้ เนื่อง จากขี้โลหะ (Slag) จะฝังลึกเข้าในผนังเบ้าหลอม



รูปที่ 1.9 การบรรจุวัสดุลงเบ้าหลอม การเทน้ำโลหะ
และการทำความสะอาดเบ้าหลอม

ที่มา : Mammut - wetro, 2000

1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.4.1 ออกแบบและสร้างเตาเบ้าขนาดห้องปฏิบัติการเพื่อใช้หลอมโลหะที่สามารถทำอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 1200 °C

1.4.2 ศึกษาสมรรถนะของเตาและทดลองหลอมโลหะโดยการควบคุมบรรยากาศการหลอม

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1.5.1 ได้แนวทางในการศึกษาขั้นตอน และวิธีการออกแบบและสร้างเตาหลอมโลหะแบบเตาเบ้า

1.5.2 ได้ความรู้ และเข้าใจถึงสมรรถนะของเตาเผาชนิดนี้ตลอดจนรู้เทคนิควิธีการหลอมโลหะและการควบคุมสภาพบรรยากาศภายในเบ้าหลอมด้วยก๊าซเฉื่อย

1.5.3 ทำให้เกิดความคิดในการพัฒนาเตาเผาให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นต่อไป

1.6 ขอบเขตของการวิจัย

1.6.1 ประเมินความเป็นไปได้ของเตาทดสอบที่ใช้หลอมโลหะเพื่อนำหลักการไปใช้ในการหลอมโลหะที่สามารถควบคุมธาตุส่วนผสมต่าง ๆ ให้เกิดการสูญเพลิงน้อย และประโยชน์การนำไปใช้งานถ้าจะนำมาใช้ในการเตรียมตัวอย่างชิ้นงานโลหะผสม

1.6.2 ประเมินค่าใช้จ่ายในการหลอมโลหะในเตาทดสอบ

1.7 สถานที่ทำการวิจัย

1.7.1 โรงฝึกงานแผนกโลหะวิทยา สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคใต้

1.7.2 โรงฝึกงานภาควิชาครุศาสตร์อุตสาหการเครื่องมือกล สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคใต้

1.7.3 ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์