

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงปัจจัยของสภาวะการหลอมที่มีผลต่อการควบคุมคุณภาพของงานหล่อ อะลูมิเนียมผสมโดยเตาไฟฟ้าประสิทธิภาพสูง ซึ่งออกแบบและจัดสร้างขึ้นมาใหม่ งานวิจัยนี้แบ่งออกได้ 2 ด้านคือ ด้านการใช้พลังงานและด้านปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพงานหล่อ งานวิจัยด้านการใช้พลังงานเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในงานใช้พลังงานความร้อนแก่เตาหลอมให้สูงขึ้น โดยหลักการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานแก่เตาหลอมได้จำแนกออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ การเลือกใช้วัสดุที่เป็นฉนวนความร้อนที่ดีและมีขนาดเหมาะสม การนำอากาศร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงภายในเตาหลอมกลับมาใช้ประโยชน์ และการออกแบบทางออกของเปลวไฟเพื่อลดโอกาสการสัมผัสโดยตรงของก๊าซกับน้ำโลหะ ส่วนงานด้านปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของงานหล่อนั้นผู้ดำเนินงานวิจัยได้ทำการศึกษาและทดลองในงานวิจัยคือ บรรยากาศในการหลอม อุณหภูมิในการหลอม การกำจัดก๊าซและอุณหภูมิในการเทน้ำโลหะ

ผลจากการทำงานวิจัยพบว่าเตาไฟฟ้าหลอมที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้นมาใหม่นี้มีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานความร้อนได้สูงถึง 67 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งดีกว่าเตาไฟฟ้าหลอมแบบเดิมที่ใช้อยู่ในโรงงานที่เข้าร่วมโครงการถึง 59 เปอร์เซ็นต์ ช่วยลดการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทำงานถึง 49 เปอร์เซ็นต์ ช่วยลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการทำงานลงด้วย และผลจากงานวิจัยยังพบว่าชิ้นงานหล่อที่ได้จากเตาไฟฟ้าที่ออกแบบและจัดสร้างนี้จะมีปริมาณรูพรุนโดยเฉลี่ยน้อยกว่าชิ้นงานหล่อที่ได้จากเตาแบบเดิมถึง 49 เปอร์เซ็นต์ และมีความแข็งแรงทางดึงของชิ้นงานหล่อที่ได้จากเตาที่ออกแบบและจัดสร้างโดยเฉลี่ยดีกว่าชิ้นงานหล่อที่ได้จากเตาแบบเดิมถึง 6.5 เปอร์เซ็นต์เมื่อนำชิ้นงานไปทดสอบการรับแรงดึง

คำหลัก : เตาไฟฟ้าหลอม / รูพรุน / โลหะผสมอะลูมิเนียม / ประสิทธิภาพทางความร้อน

Abstract

This research is the study of melting parameters in quality control of aluminum alloy casting by high efficiency crucible furnace. The high efficiency crucible furnace was designed and built as a part of this research. The research was divided into 2 parts, i.e. thermal efficiency and melting parameters in quality of control. To increase energy efficiency, we used three major improvements including using better insulation materials in the furnace body with proper sizes, using re-circulated hot air, and reducing direct flame contact on the melt. To study the melting parameters in quality control, the following factors are studied, i.e. melting atmosphere, melting temperature, degassing, and pouring temperature.

It was found that the new crucible furnace has the heating efficiency at about 67% as compared to the existing one at the involved factory which has about 59%. The fuel usage was decreased for 49%. In addition, the cycle time and expense in melting process were also decreased. Regarding the quality of the casting, the samples from new furnace had porosity 49% less than the existing furnace. The average tensile strength of the samples from new furnace was about 6.5 % better.

Keywords: crucible furnace / porosity / aluminum alloy / thermal efficiency

สรุปรงานวิจัยวิจัยฝ่ายอุตสาหกรรม

สรุปรงานวิจัยวิจัยฝ่ายอุตสาหกรรม (ฝ่าย 5)

สัญญาเลขที่ RDG 4550037 ชื่องานวิจัย การศึกษาการศึกษาถึงปัจจัยของสภาวะการหลอมที่มีผลต่อการควบคุมคุณภาพของงานหล่ออะลูมิเนียมผสมโดยใช้เตาหลอมประสิทธิภาพสูง

หัวหน้างานวิจัย นายชาวลิต ลิ้มมณีวิจิตร สถาบัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

โทรศัพท์ 02-4709188 โทรสาร 02-4709198 E-Mail address : chaowalit.lim@kmutt.ac.th

ความสำคัญ/ความเป็นมา

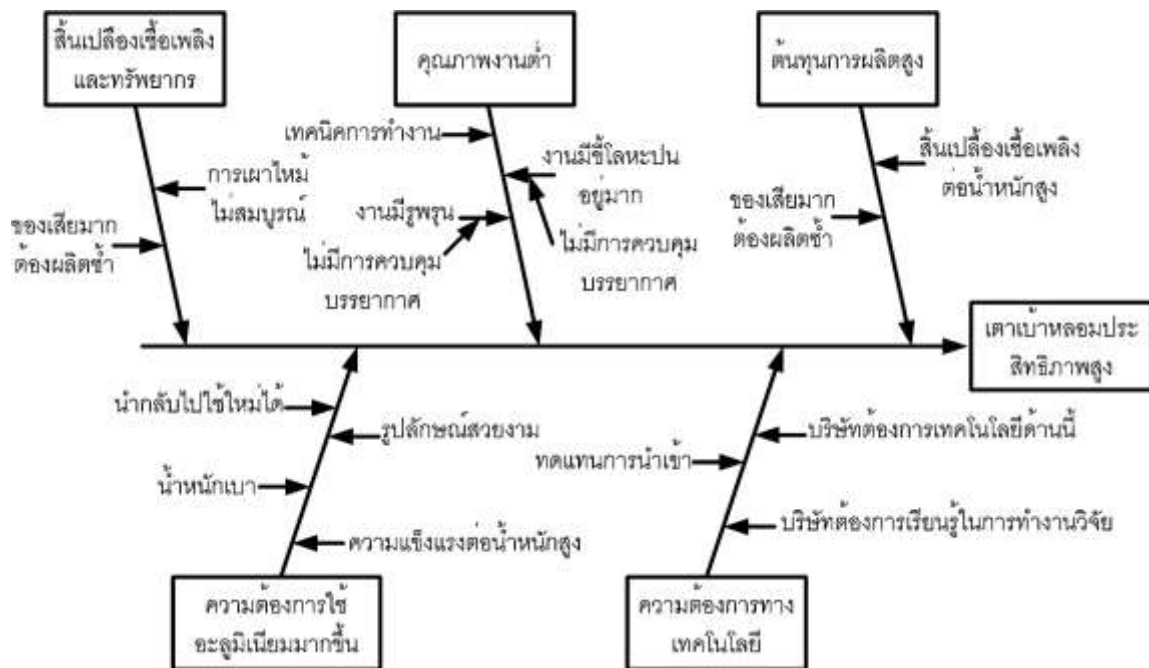
ด้วยบริษัทให้แสงสว่างและการหล่อ (1999) จำกัด บริษัทที่เข้าร่วมงานวิจัย ซึ่งเดิมมีความชำนาญในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่เป็นงานหล่อจากเหล็กหล่อเป็นหลัก มีความสนใจในการเพิ่มศักยภาพของกระบวนการผลิตโลหะผสมอะลูมิเนียมหล่อให้สูงกว่าที่เป็นอยู่ เพราะเชื่อมั่นว่ามีความต้องการในตลาดเพิ่มมากขึ้นต่อไปในอนาคต ก่อนทำการวิจัยนี้ บริษัท ฯ ใช้เตาเบ้า (Crucible furnace) ที่ได้มาจากการซื้อเตาที่ใช้แล้วของโรงงานแห่งอื่น ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 1 ซึ่งทราบปัญหาจากบริษัท ฯ ว่า เตาหลอมที่ใช้นั้นมีประสิทธิภาพในการให้พลังงานความร้อนต่ำ และไม่มีกลไกในการควบคุมการเผาไหม้ที่ดีทั้งนี้เพราะว่าเตาที่ใช้ในการหลอมนั้น เป็นเตาเบ้าแบบดั้งเดิมที่ไม่ได้ใช้หลักการทางวิศวกรรมในการออกแบบโดยใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิงในการให้พลังงานความร้อนเพื่อหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียม ซึ่งกระบวนการหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียมด้วยเตาเบ้าแบบนี้จะทำให้เกิดความสั่นเปลี่ยงด้านพลังงาน และก่อให้เกิดมลพิษที่ได้จากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ นอกจากนั้นแล้วผลิตภัณฑ์ที่ได้มักมีจุดเสียต่าง ๆ (Defects) เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตมาก เช่น รุพารุ่นเป็นต้น เทคนิคที่ใช้ในกระบวนการผลิตและเตาที่ใช้ในการหลอมจึงมีบทบาทที่สำคัญเป็นอย่างสูง อย่างไรก็ตามการที่บริษัท ฯ ยังไม่มีเตาหลอมที่มีประสิทธิภาพในการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง และยังไม่มีการออกแบบให้การเผาไหม้อย่างสมบูรณ์เพื่อลดมลพิษ ดังนั้นจึงเกิดความจำเป็นในการออกแบบและจัดสร้างเตาเบ้าหลอมโดยเตาเบ้าที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้น ยังคงใช้น้ำมันเตาหรือน้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิงในการให้พลังงานความร้อนเช่นเดิมด้วยเหตุผลทางเศรษฐศาสตร์แต่ได้มีการนำเอาความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้กลับมาใช้ เพื่อช่วยอุ่นอากาศก่อนป้อนเข้าห้องเผาไหม้ เพื่อช่วยในการสันดาปและการเผาไหม้ภายในเตาซึ่งจะทำให้เกิดการประหยัดพลังงานและเชื้อเพลิงขึ้นและลดเวลาที่ใช้

ในการหลอม จึงลดโอกาสที่ก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจนจะสามารถทำปฏิกิริยากับโลหะผสมอะลูมิเนียม หลอมเหลวและลดโอกาสการเกิดของเสียจากกระบวนการผลิต



รูปที่ 1 เตาเบ้าแบบดั้งเดิมของบริษัท ฯ

ดังนั้นการที่คณะผู้ดำเนินงานวิจัยได้มีโอกาสทำการวิจัย ออกแบบและจัดสร้างเตาเบ้าหลอมแบบประสิทธิภาพสูงนอกจากจะช่วยในการอนุรักษ์พลังงานและลดมลพิษแล้วยังช่วยในการถ่ายทอดเทคโนโลยี การหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียมให้กับบริษัท ฯ และที่สำคัญยังช่วยลดต้นทุนและค่าใช้จ่ายในเชิง เศรษฐศาสตร์ลง และเป็นการสร้างทักษะในการทำการวิจัยให้แก่บริษัท ฯ อีกด้วย ทั้งนี้สามารถสรุปการ วิเคราะห์เหตุและผลในการเริ่มดำเนินการจัดทำงานวิจัยดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การวิเคราะห์เหตุและผลในการจัดทำงานวิจัย

วัตถุประสงค์งานวิจัย

- 1) เพื่อออกแบบและจัดสร้างเตาหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีประสิทธิภาพสูง
- 2) เพื่อศึกษาถึงปัจจัยของสภาวะการหลอม ที่มีผลต่อการควบคุมคุณภาพของชิ้นงานหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียม
- 3) เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีและกรรมวิธีการหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียมให้มีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานที่สูงขึ้น

ตารางที่ 1 สรุปวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ผลที่ได้รับ	บรรลุมติประสงค์ข้อที่	โดยทำให้
ได้เตาหลอมที่มีประสิทธิภาพใน การใช้พลังงานสูงขึ้น	ข้อที่ 1 และ 3	ลดการสูญเสียพลังงาน ลดปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ ลดระยะเวลาการทำงานให้สั้นลง
ทราบถึงสาเหตุที่ทำให้คุณภาพ และสมบัติทางกลของชิ้นงาน ห่อลดลง	ข้อที่ 2	สามารถหาวิธีแก้ไขและลดปัญหา ที่ทำให้ทำให้คุณภาพและสมบัติ ทางกลของชิ้นงานห่อลดลง

การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

ผลจากการออกแบบและจัดสร้างเตาหลอมทำให้ได้เตาหลอมที่มีประสิทธิภาพสูง จึงได้นำไปใช้ประโยชน์เพื่อหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียมในอุตสาหกรรมการหล่อจริงที่ทางบริษัทที่บริษัทที่เข้าร่วมงานวิจัย คือ บริษัทไท่เฮงการช่างและการหล่อ (1999) จำกัด นอกจากนั้นได้นำเอารายงานผลการวิจัยบางส่วนไปเผยแพร่ในงานประชุมวิชาการข่ายวิศวกรรมอุตสาหกรรมประจำปี 2546 “การพัฒนาประเทศไทยสู่การเป็นห้องครัวของโลก” วันที่ 21 – 22 ตุลาคม 2546 จัดโดยภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ร่วมกับ มหาวิทยาลัยนเรศวร

การประชาสัมพันธ์

- 1) ส่งบทความงานวิจัยเข้าร่วมการประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรมประจำปี 2546 ในวันที่ 21-22 ตุลาคม 2546 ที่จังหวัด พิษณุโลก จัดโดยคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ร่วมกับ มหาวิทยาลัยนเรศวร
- 2) ส่งบทความ เพื่อเผยแพร่ในวารสารส่งเสริมเทคโนโลยีประจำเดือน ตุลาคม 2546
- 3) ส่งบทความ เพื่อเผยแพร่ในวารสาร Mechanical และตีพิมพ์ฉบับประจำเดือน ตุลาคม 2546

เปรียบเทียบกิจกรรมที่ดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้และกิจกรรมที่ดำเนินการมาและผลที่ได้รับ

ตลอดงานวิจัย

กิจกรรม (ตามแผน)	ผลที่คาดว่าจะได้รับ (ตามแผน)	ผลการดำเนินงาน	หมายเหตุ
1) ค้นคว้า/ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นที่เกี่ยวข้อง เช่น หลักการเผาไหม้ หลักการนำความร้อนที่ปล่อยทิ้งกลับมาใช้หลักการหลอม อะลูมิเนียมผสม แนวคิดในการเพิ่มประสิทธิภาพแก๊สเตา	ได้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องในการจัดทำงานวิจัย เช่น หลักการเผาไหม้ เชื้อเพลิง หลักการนำความร้อนที่ปล่อยทิ้งกลับมาใช้หลักการหลอม อะลูมิเนียมผสม แนวคิดในการเพิ่มประสิทธิภาพแก๊สเตาหลอม	การศึกษา/ ค้นคว้าข้อมูลเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย เป็นไปตามที่ระบุไว้ในแผน	แล้วเสร็จตามแผน ช่วงที่1 ระยะเวลา 6 เดือน
2) ออกแบบ - เขียนแบบภาพประกอบและภาพแยกชิ้นของชิ้นส่วนประกอบและหลักการทำงานและ ระบบการทำงานของเตาหลอมที่จัดสร้างขึ้น	ได้ภาพประกอบและภาพแยกชิ้นเตาหลอมตามที่ได้ออกแบบและที่จัดสร้าง และได้ระบบการทำงานเบื้องต้นของเตาหลอม	การออกแบบและเขียนแบบ ภาพประกอบและภาพแยกชิ้นส่วนของเตาหลอมเป็นไปตามแผนที่ระบุไว้	แล้วเสร็จตามแผน ช่วงที่2 ระยะเวลา 12 เดือน
3) กำหนดรายการและวัสดุ ขนาดชิ้นส่วน ราคา และชนิดของวัสดุอุปกรณ์ และครุภัณฑ์ที่ใช้	ได้รายการวัสดุ ขนาดชิ้นส่วน ราคา และชนิดของ อุปกรณ์ และครุภัณฑ์ที่ใช้ในการจัดทำวิจัย	ได้วัสดุในการจัดสร้างเตาเผาหลอม อุปกรณ์ และครุภัณฑ์ในงานวิจัย	แล้วเสร็จตามแผน ช่วงที่ 2 ระยะเวลา 12 เดือน
4) จัดซื้อวัสดุ เช่น เหล็กแผ่น เหล็กเส้น ท่อเหล็ก เหล็กตัวไอ เบ้าหลอมซิลิกอนคาร์ไบด์ ปูนทนไฟ อิฐทนไฟ และอิฐฉนวนในการทำโครงสร้างเตาหลอม	ได้วัสดุเช่นเหล็กแผ่น เหล็กเส้น ท่อเหล็ก เหล็กตัวไอ เบ้าหลอม ปูนทนไฟ อิฐทนไฟ และ อิฐฉนวน ในการทำโครงสร้างและเปลือกของเตาหลอม	ทำการจัดสร้างเตาหลอมได้โครงสร้างและส่วนประกอบภายนอกของเตาหลอม	แล้วเสร็จตามแผน ช่วงที่ 2 ระยะเวลา 12 เดือน

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้และกิจกรรมที่ดำเนินการมาและผลที่ได้รับ
ตลอดงานวิจัย (ต่อ)

กิจกรรม (ตามแผน)	ผลที่คาดว่าจะได้รับ (ตามแผน)	ผลการดำเนินงาน	หมายเหตุ
5) ทดลองหลอมอะลูมิเนียมด้วยเตาหลอมแบบเดิมที่ มจร. เพื่อบันทึกเวลาการทำงาน ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ ค่าใช้จ่าย ในการหลอม ความร้อนที่ใช้และความร้อนที่สูญเสียในการหลอม อะลูมิเนียมแบบเดี่ยวและแบบต่อเนื่อง 2 แบบหลอม	ได้ข้อมูลในการหลอม อะลูมิเนียมด้วยเตาหลอมแบบเดิมที่ มจร. เพื่อบันทึกเวลาการทำงาน ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ ค่าใช้จ่าย ในการหลอม ความร้อนที่ใช้และความร้อนที่ สูญเสียในการหลอมอะลูมิเนียมแบบเดี่ยวและแบบต่อเนื่อง 2 แบบ	ทำการคำนวณหา ค่าใช้จ่าย ทางด้าน เศรษฐศาสตร์ เปรียบเทียบการ หลอมแบบเดี่ยว และแบบต่อเนื่อง เปรียบเทียบกับเตาของบริษัทฯ	แล้วเสร็จตาม แผนช่วงที่ 2 ระยะเวลา 12 เดือน
6) ทำการบันทึกค่าที่เกี่ยวข้อง ในการหลอมอะลูมิเนียมผสมด้วยเตาแบบดั้งเดิมที่ บริษัทให้เฮงฯ เช่นเวลาในการอุ่นเบ้า เวลาในการหลอมและการทำงาน ปริมาณน้ำมันเตาที่ใช้ ความร้อนที่ใช้หลอม และ ความร้อนที่สูญเสีย อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในเตาหลอม ลักษณะการทำงานการกำจัดแก๊สและ ลักษณะชิ้นงานที่ได้ จากการหลอม	ได้ทราบค่าที่เกี่ยวข้องในการ หลอมอะลูมิเนียมผสมด้วยเตาแบบดั้งเดิมที่บริษัท - ให้เฮงฯ เช่นเวลาในการอุ่นเบ้า เวลาในการหลอมและการทำงาน ปริมาณน้ำมันที่ใช้ ความร้อนที่ใช้หลอม และ ความร้อนที่สูญเสีย และอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในเตาหลอม ลักษณะการทำงาน การกำจัดแก๊ส และลักษณะ ชิ้นงานที่ได้จากการหลอม	ทำการคำนวณหา ค่าใช้จ่ายทางด้าน เศรษฐศาสตร์ เปรียบเทียบการ หลอมแบบเดี่ยว และแบบต่อเนื่อง เปรียบเทียบกับเตาที่ มจร.และนำชิ้นงาน ไปขัดผิวหน้าเพื่อดู ปริมาณและการ กระจายของรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อ	แล้วเสร็จตาม แผนช่วงที่ 2 ระยะเวลา 12 เดือน

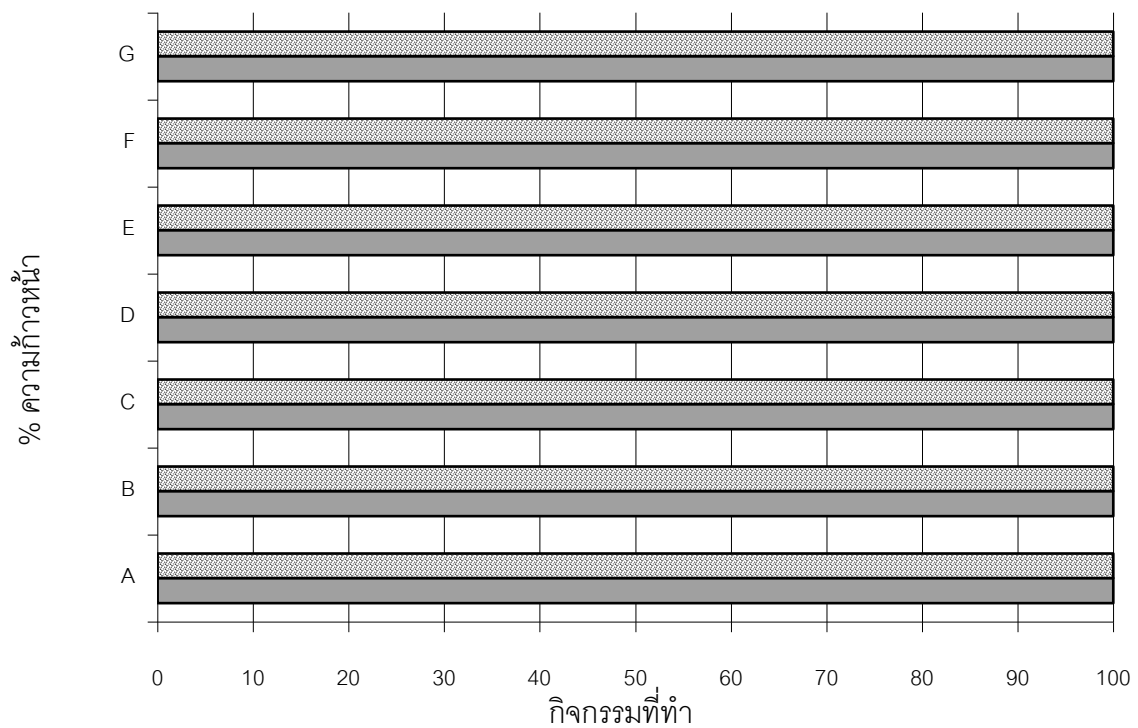
ตารางที่ 2 เปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้และกิจกรรมที่ดำเนินการมาและผลที่ได้รับ
ตลอดงานวิจัย (ต่อ)

กิจกรรม (ตามแผน)	ผลที่คาดว่าจะได้รับ (ตามแผน)	ผลการดำเนินงาน	หมายเหตุ
7) ทำการจัดสร้างประกอบและติดตั้งเตาหลอมเพื่อทำการทดสอบการทำงานของเตาและทดลองหลอมอะลูมิเนียมเพื่อหาสภาวะและปัจจัยต่าง	ได้เตาหลอมที่เสร็จสมบูรณ์และติดตั้งไว้สำหรับการทดสอบและทดลองหลอมทำการปรับสภาวะหรือบรรยากาศ ที่ใช้ในการหลอมพร้อมทั้งได้ปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง	ทราบเวลาที่ใช้ในการหลอม อุณหภูมิในการหลอม ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ต่อเบ้าและแบบต่อเนื่อง ค่าใช้จ่าย	แล้วเสร็จตามแผนช่วงที่ 2 ระยะเวลา 12 เดือน
8) นำตัวอย่างชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อที่ได้จากการหลอมด้วยเตาหลอมแบบดั้งเดิมของบริษัทฯกับเตาที่ออกแบบและจัดสร้างไปตัดผ่ากลางชิ้นงานตามแนวยาวและตัดผิวหน้าให้เรียบ ทำการวัดและตรวจสอบปริมาณและขนาด ของรูพรุนที่เกิดขึ้น	ได้ทำการตัดผ่าชิ้นงานและขัดผิวหน้าชิ้นงานให้เรียบ ทำการสังเกตและตรวจสอบลักษณะจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อ	ทราบถึงสาเหตุเบื้องต้นที่มีผลต่อสมบัติทางกลและคุณภาพของชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อ เป็นไปตามแผนที่วางไว้	แล้วเสร็จตามแผนช่วงที่ 3 ระยะเวลา 18 เดือน
9) นำตัวอย่างชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อที่ได้จากการหลอมด้วยเตาหลอมแบบดั้งเดิมของบริษัทฯกับเตาที่ออกแบบและจัดสร้างไปทดสอบสมบัติทางกล โดยทดสอบความแข็งแรงและความเค้นแรงดึง	ได้ทำการทดสอบความแข็งแรงและความเค้นแรงดึงกับชิ้นงานหล่อที่ได้จากเตาทั้งสองแบบ เพื่อเปรียบเทียบลักษณะการทำงานและปริมาณก๊าซต่าง ๆ ที่เกิดจากการหลอม เข้าไปรวมตัวกับน้ำโลหะ	ทราบถึงสมบัติทางกล ของชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อ ที่ได้จากการทดสอบความแข็งแรงและความเค้นแรงดึงเป็นไปตามแผนที่วางไว้	แล้วเสร็จตามแผนช่วงที่ 3 ระยะเวลา 18 เดือน

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้และกิจกรรมที่ดำเนินการมาและผลที่ได้รับ
ตลอดงานวิจัย (ต่อ)

กิจกรรม (ตามแผน)	ผลที่คาดว่าจะได้รับ (ตามแผน)	ผลการดำเนินงาน	หมายเหตุ
10) นำค่าที่ทำการบันทึกได้ จากการทำงานของเตาหลอม มาคำนวณหาความร้อนที่ เกิดขึ้น การสูญเสียพลังงาน ความร้อน ค่าใช้จ่ายในการ ทำงาน	ทราบถึงประสิทธิภาพในการ ใช้พลังงานความร้อนในการ หลอมและความต้องการ ความร้อนของเตาหลอม ทราบถึงเปอร์เซ็นต์ของการ สูญเสียความร้อนของเตา หลอมทั้งสองแบบ และค่าใช้จ่าย ที่เกิดขึ้นในการหลอม อะลูมิเนียม	ทราบถึงประสิทธิภาพในการ ทำงาน และการใช้พลังงาน การใช้ปริมาณน้ำมัน ของเตาหลอมทั้ง สองแบบ และ ค่าใช้จ่ายในการ หลอมเป็นไปตาม แผน	แล้วเสร็จตาม แผนช่วงที่ 3 ระยะเวลา 18 เดือน
11) จัดทำรายงานความ ก้าวหน้าครั้งที่ 3 จำนวน 5 เล่มและรายงานงานวิจัยฉบับ สมบูรณ์ จำนวน 11 เล่ม พร้อม CD ROM จำนวน 1 แผ่น	ได้รายงานความก้าวหน้า งานวิจัยครั้งที่ 3 รายงาน งานวิจัยฉบับสมบูรณ์ และ CD ROM ตามแผนที่วางไว้	ตามข้อกำหนดและ แผนที่ระบุไว้	แล้วเสร็จตาม แผนช่วงที่ 3 ระยะเวลา 18 เดือน

1) สรุป Gantt Chart เป็นการเปรียบเทียบกิจกรรมที่เสนอในข้อเสนองานวิจัยต่อกิจกรรมที่ได้ดำเนินการจริงตลอดงานวิจัย (18 เดือน) ดังรูปที่ 3



■ กิจกรรมที่เสนอโครงการ

■ กิจกรรมที่ดำเนินการจริง

A = ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

B = กำหนดรายการ/รายละเอียดวัสดุและครุภัณฑ์

C = เขียนแบบภาพประกอบและแยกชิ้น

D = ผลิตชิ้นส่วนและประกอบ

E = ทดสอบการทำงานและการหลอม

F = คำนวณค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการหลอม

G = ทดสอบสมบัติทางกลชิ้นงานที่ได้

รูปที่ 3 Gantt Chart การเปรียบเทียบกิจกรรมที่เสนอ

2) สรุป Output เป็นการรายงานความก้าวหน้าของผลงานที่ได้รับจากการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 3 Output ผลงานจากการดำเนินงานวิจัย

Output		สาเหตุของความล่าช้า
กิจกรรมในข้อเสนองานวิจัย	ผลที่สำเร็จ(%)	(ผลงานสำเร็จไม่ถึง 100 %)
1.การออกแบบเขียนแบบส่วนประกอบและภาพแยกชิ้นของเตาหลอม	100%	-
2.พิมพ์เขียวเตาหลอม	100%	-
3.ผลิตชิ้นส่วนตามแบบ	100%	-
4.ประกอบชิ้นส่วนเตาหลอมเข้าด้วยกันตามแบบ	100%	-
5.ทดสอบการทำงานของเตาหลอมและแก้ไขข้อบกพร่องของเตา	100%	-
6.ทดลองหลอมอะลูมิเนียมและเก็บข้อมูลการทดลอง	100%	-
7.ศึกษาคู่มือและทดลองใช้เครื่องวัดประสิทธิภาพในการเผาไหม้เพื่อให้เกิดความชำนาญ	100%	-
8.จัดทำคู่มือการใช้งานของเตาหลอม	100%	-
9.ศึกษาความเป็นไปได้ในด้านค่าใช้จ่ายในการหลอมระหว่างเตาแบบดั้งเดิมและเตาที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้น	100%	-
10.ทำการคำนวณการสูญเสียความร้อนและการสมดุลพลังงานในเบื้องต้น ของเตาแบบดั้งเดิมและเตาที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้น	100%	-

ตารางที่ 3 Output ผลงานจากการดำเนินงานวิจัย(ต่อ)

Output		สาเหตุของความล่าช้า (ผลงานสำเร็จไม่ถึง 100 %)
กิจกรรมในข้อเสนองานวิจัย	ผลที่สำเร็จ(%)	
11.ทำการตรวจสอบจุดบกพร่องในเนื้อ ชิ้นงานที่ได้จากเตาทั้งสองแบบในเบื้องต้น ด้วยสายตาและกล้องจุลทรรศน์	100%	-
12.ทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานที่ได้ ด้วยการทดสอบความเค้นแรงดึงและความ แข็ง	100%	-
13.จัดทำรายงานงานวิจัยฉบับสมบูรณ์	100%	-

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ดำเนินการภายใต้หน่วยเทคโนโลยีเฉพาะทางหล่อโลหะ ซึ่งได้รับการสนับสนุนจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ผู้ดำเนินงานวิจัยขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และบริษัทให้เฮงการช่างและการหล่อ (1999) จำกัด ที่สนับสนุนทุนวิจัยและวัสดุในการทำงานวิจัย ภายใต้สัญญาเลขที่ RDG 4550037

ผู้ดำเนินงานวิจัยขอขอบคุณอาจารย์ชาวลิต ลิ้มมณีวิจิตร ผศ.พญู เกตุกราย อาจารย์ชาว์ เนียมสอน และอาจารย์สาธิต จันทนปุม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สำหรับคำแนะนำในการออกแบบและการจัดสร้างเตาไฟฟ้าหลอม

ประโยชน์อันใดที่เกิดจากการดำเนินงานวิจัยนี้ ย่อมเป็นผลมาจากความกรุณาของทุก ๆ ท่าน ข้าพเจ้าจึงถือเอาสิ่งที่ข้าพเจ้าได้รับเป็นแนวทางในการปฏิบัติเพื่อตอบแทนต่อท่านและสังคมด้วยความสำนึกและใคร่ขอขอบพระคุณทุก ๆ ท่านไว้ ณ โอกาสนี้

.....

(นาย กานต์ วิรุณพันธ์)

ผู้ดำเนินงานวิจัย

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
สรุปงานวิจัยวิจัยฝ่ายอุตสาหกรรม	ค
ความสำคัญ/ความเป็นมา	ค
วัตถุประสงค์	จ
การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์	ฉ
การประชาสัมพันธ์	ฉ
เปรียบเทียบกิจกรรมที่ดำเนินงานวิจัย	ช
กิตติกรรมประกาศ	๗
สารบัญ	ฅ
สารบัญตาราง	ด
สารบัญรูปประกอบ	ท
รายการสัญลักษณ์และอักษรย่อ	ผ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	4
1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย	5
1.6 วิธีการดำเนินงานวิจัย	6

บทที่ 2 เอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเตาเผาและการหลอม	8
---	---

สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสม	16
2.3 ปัจจัยในการหลอมที่มีผลต่อคุณภาพของงานหล่อ	20
2.4 หลักการหลอมอะลูมิเนียม	22
2.5 การเกิดจุดบกพร่องในงานหล่ออะลูมิเนียมผสม	47
2.6 การออกแบบชิ้นส่วนที่สำคัญในการรับแรงและการเลือกใช้วัสดุทนไฟ	54
2.7 แนวคิดในการออกแบบเตาให้มีประสิทธิภาพสูง	65
2.8 แนวคิดในการเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้	67
2.9 เชื้อเพลิงและหลักการเผาไหม้เชื้อเพลิง	70
2.10 การควบคุมการเผาไหม้และหัวเผาไหม้ของเตาหลอม	76
2.11 การสมดุลพลังงาน	80
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	
3.1 ขั้นตอนการทดลอง	83
3.2 วัสดุ เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	90
3.3 การทดลอง	94
3.4 การเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบจุดบกพร่องและสมบัติทางกล	97
บทที่ 4 ผลการทดลองและอธิบายผลการทดลอง	
4.1 ผลการทดลองการทำงานของเตาเผาหลอม	100
4.2 อธิบายผลการทดลองการทำงานของเตาเผาหลอม	107
4.3 ผลการทดลองด้านคุณภาพและสมบัติทางกลของชิ้นงานหล่อ	108
4.4 อธิบายผลการทดลองด้านคุณภาพและสมบัติทางกลของชิ้นงานหล่อ	113

สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลองการทำงานของเตาหลอม	116
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	117
บรรณานุกรม	119
ภาคผนวก	
ผ-ก เอกสารสำหรับการเผยแพร่	121
ผ-ข เอกสารการใช้งาน	131
ผ-ค เอกสารอ้างอิง	143
ผ-ง การคำนวณค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลอง	154
ภาพประกอบและภาพแยกชิ้นของเตาหลอมที่ออกแบบและจัดสร้าง	193

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 สรุปวัตถุประสงค์ของงานวิจัย	ฉ
2. เปรียบเทียบวัตถุประสงค์กิจกรรมที่วางแผนไว้และกิจกรรมที่ดำเนินการมาและ ผลที่ได้รับตลอดงานวิจัย	ช
3. Output ผลงานจากการดำเนินงานวิจัย	ฎ
1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย	5
2.1 การแบ่งเกรดของอะลูมิเนียมผสม	17
2.2 ความสามารถในการละลายของธาตุผสมในอะลูมิเนียม	17
2.3 ความร้อนที่ต้องการใช้ในการหลอมโลหะผสมชนิดต่าง ๆ	22
2.4 ความสามารถในการละลายได้ของไฮโดรเจนในของผสมสองอย่าง	25
2.5 สมบัติทางกายภาพของสารเคมีที่นิยมใช้เป็นส่วนผสมของฟลักซ์ใน งานหล่ออะลูมิเนียม	40
2.6 ความเป็ยเบนมาตรฐานของขีดจำกัดความทนทาน	57
2.7 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด	71
2.8 อัตราส่วนอากาศเกินที่ใช้กับเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ	72
2.9 ข้อกำหนดคุณภาพของน้ำมันเตาตามประกาศ กระทรวงพาณิชย์ฉบับที่ พ.ศ.2524	73
2.10 การคำนวณหาความร้อนของเชื้อเพลิง	74
2.11 ค่าประกอบของ API	74
2.12 สีของเปลวไฟจากการเผาไหม้กับปริมาณอากาศ	77
2.13 อัตราส่วนอากาศมาตรฐานของเตาอุตสาหกรรม	78
3.1 ส่วนผสมมาตรฐาน	91
3.2 สมบัติทางฟิสิกส์	91
3.3 สมบัติทางกล	92

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
3.4 คุณลักษณะพิเศษโดยทั่วไปของอะลูมิเนียมผสมกลุ่มนี้	92
4.1 คุณหภูมิ เวลาและปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการหลอมด้วยเตาแบบดั้งเดิม	100
4.2 คุณหภูมิ เวลาและปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการหลอมด้วยเตาที่ออกและสร้าง	102
4.3 พลังงานความร้อนที่ได้รับจากเตาเผาหลอม	103
4.4 ข้อมูลในการคำนวณและค่าใช้จ่ายในการหลอม	105
4.5 สมบัติทางกลของงานหล่อจากเตาหลอมแบบดั้งเดิม	112
4.6 สมบัติทางกลของงานหล่อจากเตาหลอมที่ออกแบบและสร้าง	112

สารบัญรูปรประกอบ

รูปที่	หน้า
1 เตาเผาหลอมแบบดั้งเดิมของบริษัท ฯ	ง
2 การวิเคราะห์เหตุและผลในการจัดทำงานวิจัย	จ
3. Gantt Chart การเปรียบเทียบกิจกรรมที่เสนอ	ฎ
1.1 เตาเผาหลอมแบบดั้งเดิมของบริษัท ฯ	2
1.2 การวิเคราะห์เหตุและผลในการจัดทำงานวิจัย	2
1.3 ภาพประกอบเตาเผาที่ออกแบบและจัดสร้าง	6
1.4 ภาพด้านหน้าของเตาเผาที่ออกแบบและจัดสร้าง	6
1.5 ภาพด้านข้างของเตาเผาที่ออกแบบและจัดสร้าง	7
1.6 ภาพด้านบนของเตาเผาที่ออกแบบและจัดสร้าง	7
2.1 ภาพร่างของทิศทางของเปลวไฟที่ไม่ควรเป่าลงที่ตัวเตาหลอมโดยตรง แต่หมุนวนโดยรอบภายในเตา	12
2.2 การบรรจุเตาไม่ควรใส่แท่งโลหะให้แน่นเกินไปและควรบรรจุตามแนวยาว เพื่อเพื่อการขยายตัวของอะลูมิเนียม	13
2.3 ความเสียหายที่ปากเตาหลอมซึ่งสาเหตุหลักมาจากการเกิดออกซิเดชัน	14
2.4 ลักษณะผิวนอกของเตาหลอมที่ผ่านการใช้งานจนเกิดออกซิเดชัน	14
2.5 ฟลักซ์(สีขาว)ที่เหลือค้างภายในเตาซึ่งทำให้ส่งผลร้ายต่ออายุการใช้งานของเตา	15
2.6 ภายในเตาที่เกิดความเสียหายจะพบว่ามีเกิดการสะสมของ อะลูมิเนียมออกไซด์อยู่ภายในจำนวนมาก	16
2.7 แผนภูมิสมดุลของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนในระบบ 2 ธาตุ	19
2.8 โครงสร้างโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน	19
2.9 การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้ก๊าซอาร์กอนเป่าผ่านล้อหมุน	23
2.10 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพในการไล่ก๊าซกับขนาดความโตของ ฟองอากาศที่เกิด	23

สารบัญรูปประกอบ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.11 ความสามารถในการละลายของไฮโดรเจน ในโลหะอะลูมิเนียม ที่ความดันบรรยากาศหนึ่ง	24
2.12 ไฮโดรเจนละลายได้ในอะลูมิเนียมหลอมเหลวในระหว่างแข็งตัว	27
2.13 ความสามารถในการละลายของไฮโดรเจนในอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิต่างๆ	29
2.14 กลไกการเกิด Dross และการแพร่ของอะตอมไฮโดรเจนและอะลูมิเนียม ในอะลูมิเนียมหลอมเหลว	29
2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฮโดรเจนที่ละลายอยู่ในโลหะผสมอะลูมิเนียม ต่อความแข็งแรงของงานหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียม	30
2.16 ตัวอย่างชิ้นงานมาตรฐานสำหรับใช้อ้างอิงแต่ละโรงงาน	31
2.17 เครื่องมือตรวจสอบปริมาณการละลายของไฮโดรเจน ALU 90	33
2.18 หลักการทำงานของทั้งใบกวนแบบหมุนและการดึงเอาไฮโดรเจนและ อนุภาคปนเปื้อนขึ้นสู่ด้านบน	38
2.19 เฟสไดอะแกรมของ NaCl และ KCl	42
2.20 ลักษณะการทำงานของฟลักซ์สำหรับทำความสะอาด	43
2.21 ผลของการเติมฟลักซ์ในอะลูมิเนียมหลอมเหลว	44
2.22 ลักษณะซีโลหะ (Dross) ที่เกิดขึ้น	45
2.23 ลักษณะรูพรุนที่เกิดในงานหล่ออะลูมิเนียม	50
2.24 รูปแบบจำลองลักษณะของรูพรุนที่เกิดขึ้นจากการหดตัวใน งานหล่ออะลูมิเนียมในลักษณะ 3 มิติ	51
2.25 รูปจำลองอธิบายถึงผลของขนาดหน้าตัดของงานหล่อต่อการเกิดรูพรุน อันเนื่องจากการหดตัวระหว่างการแข็งตัว	52
2.26 แสดงสภาวะของเพลลาเมื่อรับแรงดัดและแรงบิด	54
2.27 ค่าตัวประกอบแก้ไขผิวสำหรับเหล็กกล้า	56
2.28 ผลกระทบของขนาดต่อขีดจำกัดความทนทาน	57

สารบัญรูปประกอบ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.29 ผลของอุณหภูมิต่อขีดจำกัดความทนทาน($N=10^7$) ของเหล็กกล้า	58
2.30 ค่าความไวของรอยบากต่อเหล็กกล้าและอะลูมิเนียม	59
2.31 ค่าความยาวเทียบเท่าของเสาที่ปลายยึดแบบต่าง ๆ	60
2.32 เส้นโค้งของสมการรอยเลื่อยสำหรับเหล็กกล้าและอะลูมิเนียม	60
2.33 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	68
2.34 ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เกิดขึ้น	68
2.35 หัวข้อในการตรวจเช็คเปลวไฟ	77
2.36 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	79
3.1 ขั้นตอนการทดลอง	83
3.2 แบบร่างของเตาเผาหลอมที่ออกแบบและจัดสร้าง	84
3.3 เหล็กทำเปลือกเตาหลอมด้านนอก	85
3.4 เหล็กทำโครงฝาเตาหลอม	85
3.5 เหล็กทำเสาเตาหลอม	85
3.6 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบง่าย	85
3.7 การประกอบชุดหมุนเตาเอียงหน้าโลหะ	86
3.8 การประกอบตัวเตาหลอมกับเสาเตา	86
3.9 การปรับระดับความเที่ยงตรงของเตาหลอม	86
3.10 การวางระบบการป้องกันความร้อนภายในเตา	86
3.11 การก่อกองอิฐทนไฟ	87
3.12 กล้องเผาไหม้เชื้อเพลิง	87
3.13 การวางระบบทางออกเปลวไฟจากการเผาไหม้ในเตา	87
3.14 การติดตั้งเตาหลอมในเตา	87
3.15 ชุดเตาหลอม	88
3.16 การประกอบเตาและทำสีเตา	88

สารบัญรูปประกอบ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.17 ชุดหุ้ยเยียงเทน้ำโลหะ	88
3.18 ท่อลมเย็นเข้าในเตาหลอม	89
3.19 ท่อลมร้อนออกจากเตาหลอม	89
3.20 ชุดเทอร์โมคัปเปิล	89
3.21 ชุดควบคุมการทำงาน	89
3.22 ชุดฝาปิดปากเตาหลอม	90
3.23 ชุดหัวเผาไหม้เชื้อเพลิง	90
3.24 ภาพประกอบเตาด้านหน้า	90
3.25 ภาพประกอบด้านข้างเตาหลอม	90
3.26 แบบหล่อถาวร (Permanent Mold) ตามมาตรฐาน ASTM B-108	93
3.27 เครื่องวัดประสิทธิภาพการเผาไหม้	93
3.28 กล้องจุลทัศน์	94
3.29 เครื่องทดสอบความเค้นแรงดึง	94
3.30 เครื่องทดสอบความแข็ง	94
3.31 การจุดเตาหลอม	95
3.32 การเตรียมทดลองหลอมอะลูมิเนียม	95
3.33 การเติมชาร์จเข้าในบ่้าหลอม	96
3.34 การเติมฟลักซ์และไถ่ก๊าซในน้ำโลหะ	96
3.35 การยกเตาเยียงเทน้ำโลหะ	97
3.36 การเทน้ำโลหะเข้าแบบหล่อและ Ingot	97
3.37 ลักษณะ Ingot ที่ใช้หลอม	97
3.38 ลักษณะชิ้นงานทดสอบที่ได้จากการหล่อ	97
3.39 การเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบรูปพรุน	98
3.40 การเตรียมชิ้นงานเพื่อดูขนาดเกรน	98

สารบัญรูปประกอบ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.41 การเตรียมชิ้นงานทดสอบสมบัติทางกล	99
3.42 ขนาดชิ้นงานทดสอบความเค้นแรงดึง	99
3.43 การทดสอบความเค้นแรงดึง	99
3.44 การทดสอบความแข็ง	99
3.45 การทดสอบความเค้นเฉือน	99
3.46 แสดงการทดสอบและบันทึกผลการทดสอบความเค้นเฉือน	99
4.1 กราฟแสดงอุณหภูมิจากเตาหลอมแบบดั้งเดิม	101
4.2 กราฟแสดงอุณหภูมิจากเตาหลอมที่ออกแบบและจัดสร้าง	103
4.3 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจากเตาหลอมแบบดั้งเดิม และเตาหลอมที่ออกแบบและจัดสร้าง	104
4.4 กราฟเปรียบเทียบปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ระหว่าง เตาหลอมแบบดั้งเดิมและเตาหลอมที่ออกแบบและจัดสร้าง	106
4.5 กราฟเปรียบเทียบค่าใช้ในการหลอมระหว่างเตาหลอมแบบดั้งเดิม และเตาหลอมที่ออกแบบและจัดสร้าง	107
4.6 จุดบกพร่องที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อที่ได้จากเตาหลอมแบบดั้งเดิม	109
4.7 จุดบกพร่องที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อที่ได้จากเตาหลอมที่ออกแบบและสร้าง	110
4.8 เปรียบเทียบจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อที่ได้จากเตาหลอมแบบดั้งเดิม และเตาหลอมที่ออกแบบและจัดสร้าง ที่กำลังขยาย 5X	110
4.9 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงานหล่อจากการค้ำน้ำโลหะที่อุณหภูมิ 720°C	111
4.10 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงานหล่อจากอุณหภูมิเทน้ำโลหะ	111
4.11 เปรียบเทียบชิ้นงานทดสอบก่อนดึงและหลังดึง	115
4.12 ลักษณะการขาดของชิ้นงานทดสอบความเค้นแรงดึง	115

รายการสัญลักษณ์และอักษรย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A	พื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน	m^2
A_o	ปริมาณอากาศที่ใช้ในการสันดาปตามทฤษฎี	kg_{Air}/kg_{Fuel}
A_w	ความกว้างของแนวเชื่อม	m
b	ความหนาของชิ้นงาน	m
c	ระยะเยื้องศูนย์กลาง	m
C_p	ค่าความร้อนจำเพาะ	$KJ/kg.K$
D	เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก	m
d	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน	m
E	โมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ	GPa
F	แรงที่กระทำต่อวัสดุ	N
F'	ค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิง	$Kcal/kg_{Fuel}$
f	องค์ประกอบของความเสียดทาน	
f_s	องค์ประกอบของความปลอดภัย	
F_c	แรงกด	N
F_r	แรงลัพท์	N/m
F_{sv}	แรงเฉือนในแนวตั้งที่กระทำกับแนวเชื่อม	N/m
F_{th}	แรงดึงในแนวระดับที่กระทำกับแนวเชื่อม	N/m
F_{tv}	แรงบิดในแนวตั้งที่กระทำกับแนวเชื่อม	N/m
H	ความร้อนทิ้งที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์	$Kcal/kg_{Fuel}$
H_L	ความสูญเสียรวมในท่อ	
h_c	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน	$W/m^2.K$
h_L	ความสูญเสียในท่อกลม	

รายการสัญลักษณ์และอักษรย่อ(ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
$\bar{h}$	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย	$W/m^2.K$
I	โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่	m^4
I_{min}	โมเมนต์ความเฉื่อยต่ำสุด	m^4
J_w	Polar Moment of Inertia	m^3
K	ค่าการนำความร้อนของวัสดุ	$W/m.K$
L	ความยาวของท่อหรือความหนาของผนัง	m
L_R	ค่าความร้อนแฝงของวัสดุ	KJ/kg
M	โมเมนต์ดัดที่จุดวิกฤติ	$N.m$
M'	อัตราส่วนอากาศ	
m	มวล	kg
m_f	อัตราการใช้เชื้อเพลิง	kg/hr
m_s	มวลของ Dross ที่ออกจากระบบ	kg
p	ค่าความร้อนรวมที่นำกลับมาใช้ประโยชน์จากการอุ่นอากาศ	$Kcal/kg_{Fuel}$
p_A	ความร้อนที่ได้จากก๊าซไอเสียเมื่อนำมาอุ่นอากาศ	$Kcal/kg_{Fuel}$
p_F	ความร้อนที่ได้จากก๊าซไอเสียเมื่อนำมาอุ่นน้ำมัน	$Kcal/kg_{Fuel}$
Q	อัตราการถ่ายเทความร้อน	W
Q'	ค่าความร้อนสัมผัสที่สูญเสียไปกับก๊าซไอเสียทิ้ง	$Kcal/kg_{Fuel}$
Q_A	ปริมาณความร้อนที่อากาศได้รับ	KJ
Q_F	ปริมาณความร้อนที่ได้รับจากเชื้อเพลิง	KJ
Q_{cold}	ปริมาณความร้อนจากเชื้อเพลิงเมื่อไม่มีการอุ่นอากาศ	KJ
Q_{hot}	ปริมาณความร้อนจากเชื้อเพลิงเมื่อมีการอุ่นอากาศ	KJ
Q_S	ปริมาณความร้อนที่สามารถประหยัดได้	KJ
Q_w	ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปกับไอเสียที่ออกจากเตา	KJ

รายการสัญลักษณ์และอักษรย่อ(ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
q_c	อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพา	W
q_k	อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ	W
q_r	อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี	W
R	ความต้านทาน	K/W
R_e	Renolds Number	
r	รัศมี	m
S	ค่าความสามารถในการละลายของไฮโดรเจนในอะลูมิเนียม ml/100g	
S_F	อัตราส่วนการประหยัดเชื้อเพลิง	
S_p	แรงดันสถิตย	mmH ₂ O
$T_{f,\infty}$	อุณหภูมิของของไหลอิสระที่อยู่ห่างออกไปจากผิว	K
T_g	อุณหภูมิของก๊าซร้อน	K
ΔT	ค่าความต่างของอุณหภูมิ	K
T_{in}	อุณหภูมิภายในเตา	K
T_{out}	อุณหภูมิภายนอกหรืออุณหภูมิห้อง	K
Tm_{in}	อุณหภูมิของอากาศที่เข้าท่อลม	K
Tm_{out}	อุณหภูมิของอากาศที่ออกจากท่อลม	K
T_p	แรงดันรวม	mmH ₂ O
T_s	อุณหภูมิของผิววัตถุ	K
T_{sc}	อุณหภูมิผนังด้านสัมผัสกับสารหล่อเย็น	K
T_{sg}	อุณหภูมิผนังด้านสัมผัสกับก๊าซร้อน	K
V	ปริมาตร	m ³
v	ความเร็วลม	m/s
V_p	แรงดันไดนามิค	mmH ₂ O

รายการสัญลักษณ์และอักษรย่อ(ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
X	ระยะทางการเคลื่อนที่ของความร้อน	m
Z	ตำแหน่งความสูงของท่อลมเมื่อเทียบกับพื้น	m
σ'	Stefan-Boltzmann Constant	$W/m^2.K^4$
σ	ความเค้น	MPa
σ_a	ความเค้นอนุญาตของเสา	MPa
σ_c	ความเค้นกด	MPa
σ_x	ความเค้นในแนวแกน x	MPa
σ_y	ความเค้นในแนวแกน y	MPa
σ^o	เปอร์เซ็นต์ความเปื่อยเบนมาตรฐาน	
τ	ความเค้นเฉือน	MPa
τ_{xy}	ความเค้นเฉือนในระนาบ xy	MPa
τ_{max}	ความเค้นเฉือนสูงสุด	MPa
ε	ความขรุขระของผิวท่อ	m
ρ	ความหนาแน่นของอากาศ	kg/m^3
ω	ขนาดของแนวเชื่อม	m
μ	ความหนืดพลศาสตร์ของลม	$N.S/m^2$
η	ประสิทธิภาพของการเผาไหม้	