

ภาคผนวก ก.

เอกสารสำหรับการเผยแพร่

การพัฒนาเตาหลอมสำหรับการหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียม
เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานความร้อน

กานต์ วิรุณพันธ์

สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ชาวลิต ลิ้มมณีวิจิตร*

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

คำหลัก: ประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน / โลหะผสมอะลูมิเนียม / เตาหลอมโลหะ

บทคัดย่อ

อุตสาหกรรมหล่อโลหะภายในประเทศนิยมเลือกใช้เตาหลอมแบบเตาเบ้า (Crucible Furnace) สำหรับการหลอมอะลูมิเนียม เนื่องจากเชื่อว่าจะสามารถทำการออกแบบและสร้างได้ง่าย ใช้งบประมาณต่ำ เตาหลอมโลหะแบบเตาเบ้าในปัจจุบันมักใช้พลังงานจากการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงกับอากาศเพื่อให้ได้พลังงานความร้อนในการหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียม ซึ่งพลังงานความร้อนส่วนหนึ่งถูกนำไปใช้ในการหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียม อย่างไรก็ตามมีพลังงานความร้อนบางส่วนที่สูญเสียออกจากเตาหลอมสู่สภาวะแวดล้อมภายนอก จากงานวิจัยในอดีตพบว่า ประสิทธิภาพในการใช้พลังงานความร้อนของเตาเบ้าในอดีตจะต่ำมาก คืออยู่ที่ประมาณ 10-15 เปอร์เซ็นต์ ทำให้สิ้นเปลืองปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ในการหลอม ระยะเวลาในการหลอมยาวนานขึ้น และทำให้โอกาสของความชื้นและก๊าซต่าง ๆ จะเข้าไปสัมผัสกับน้ำโลหะได้โดยตรงและส่งผลกระทบต่อความสะอาดของน้ำโลหะตลอดจนโอกาสการเกิดรูพรุนในชิ้นงานหล่อที่มากขึ้น ดังนั้นผู้ดำเนินงานวิจัยจึงได้ทำการพัฒนาและจัดสร้างเตาเบ้าหลอมให้มีประสิทธิภาพในการหลอมอะลูมิเนียมที่สูงขึ้น ทั้งนี้หลักการที่ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านพลังงาน แบ่งได้เป็น 3 ส่วน คือ การเลือกใช้วัสดุที่เป็นฉนวนความร้อนที่ดีและมีขนาดที่เหมาะสม การนำอากาศร้อนที่ได้จากการเผาไหม้กลับมาใช้ประโยชน์ และการออกแบบทางออกของเปลวไฟเพื่อลดโอกาสการสัมผัสโดยตรงของก๊าซกับน้ำโลหะ ผลจากการวิจัยพบว่าเตาเบ้าที่พัฒนาและจัดสร้างใหม่มีประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน

ความร้อนได้ดีกว่า และใช้ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงในการหลอมต่ำกว่า ซึ่งปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่เตาแบบดั้งเดิมใช้ในการหลอม 19 ลิตร ส่วนปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่เตาที่พัฒนาและสร้างขึ้นจะใช้เวลาหลอม 11 ลิตร และคิดเป็น 42.10 เปอร์เซ็นต์ อีกทั้งยังลดเวลาในการหลอมอีกด้วย งานวิจัยนี้จึงเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมหล่ออะลูมิเนียมของประเทศ

*ผู้แทนสำหรับการติดต่อ E-Mail : Chaowalit.lim@kmutt.ac.th โทร. 02-4709188

1. บทนำ

โลหะผสมอะลูมิเนียมมีบทบาทเพิ่มมากขึ้นในงานด้านวิศวกรรม เนื่องจากโลหะผสมอะลูมิเนียมมีสมบัติเด่นหลายประการ เช่น มีความสามารถในการหล่อหลอมที่ดี มีความต้านทานต่อการการผุกร่อนในบรรยากาศ และมีความแข็งแรงทนทานต่อน้ำหนักสูง จากสมบัติเหล่านี้จึงทำให้โลหะผสมอะลูมิเนียมถูกนำมาใช้ทดแทนโลหะจำพวกเหล็กชนิดต่าง ๆ เพิ่มมากขึ้นในปัจจุบันและมีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้นต่อไปในอนาคต (Zalensas,1993) อุตสาหกรรมหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียมภายในประเทศนิยมเลือกใช้เตาหลอมแบบเตาเบ้า เนื่องจากเชื่อว่าเตาหลอมแบบนี้สามารถทำการออกแบบและสร้างได้ง่าย ใช้งบประมาณในการสร้างและติดตั้งต่ำ (พยุร เกตุกราย,2526) ซึ่งเตาหลอมโลหะแบบเตาเบ้าในปัจจุบันมักใช้พลังงานที่ได้จากการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงผสมกับอากาศเพื่อให้ได้พลังงานความร้อนในการหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียม ซึ่งพลังงานความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิงภายในเตาหลอม ส่วนหนึ่งจะถูกนำไปใช้ในการหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียม และมีพลังงานความร้อนบางส่วนที่สูญเสียออกสู่บรรยากาศภายนอกเตาหลอมทุกทิศทาง จากงานวิจัยในอดีตพบว่าประสิทธิภาพในการใช้พลังงานความร้อนของเตาเบ้าในอดีตจะต่ำมาก คือ อยู่ที่ประมาณ 10-15 เปอร์เซ็นต์ของพลังงานความร้อนเท่านั้น เนื่องจากเตาเบ้าหลอมแบบดั้งเดิมไม่มีกลไกการควบคุมการเผาไหม้ที่ดีและไม่ได้ใช้หลักการทางวิศวกรรมในการออกแบบ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้สิ้นเปลืองปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ในการหลอม ระยะเวลาในการทำงานยาวนานขึ้นจึงเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายในกระบวนการหลอมที่ไม่จำเป็น (Kearney,1988) การสูญเสียพลังงานความร้อนไปกับก๊าซทิ้งมากขึ้น ทำให้อุณหภูมิที่ใช้หลอมโลหะสูงขึ้น ระยะเวลาในการหลอมเหลวของโลหะผสมอะลูมิเนียมมากขึ้น นอกจากจะส่งผลเสียต่อการสิ้นเปลืองปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงและค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการหลอมแล้ว ยังเป็นการเพิ่มโอกาสให้ความชื้นและก๊าซต่าง ๆ ที่เกิดจากการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงในเตาหลอมเข้าไปสัมผัสกับน้ำโลหะได้โดยตรง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความสะอาดของน้ำโลหะและเพิ่ม

โอกาสการเกิดรุกรานในชิ้นงานหล่อที่ได้มากขึ้นอีกด้วย (Akiyama, 1988) ซึ่งความสะอาดของน้ำโลหะจะส่งผลถึงคุณภาพและสมบัติทางกลของชิ้นงานหล่อที่ได้ ถ้าน้ำโลหะที่ได้มีความสะอาดปราศจากสิ่งสกปรกและก๊าซต่าง ๆ ผลสมอยู่จะทำให้คุณภาพและสมบัติทางกลของชิ้นงานที่ได้ดีขึ้น แต่ถ้าน้ำโลหะที่ได้ไม่สะอาดมีสิ่งสกปรกและมีปริมาณก๊าซต่าง ๆ ผลสมอยู่ในปริมาณสูง จะทำให้คุณภาพและสมบัติทางกลของชิ้นงานหล่อที่ได้ด้อยลง สาเหตุนี้เนื่องมาจากความชื้นและก๊าซต่าง ๆ ที่เกิดจากการเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิงภายในเตาหลอม จะพบว่าปริมาณก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิงนี้มีส่วนประกอบของก๊าซไฮโดรเจนสูงถึง 60-90 เปอร์เซ็นต์ (Kreith, 1973) การแพร่อิสระของอะตอมไฮโดรเจนที่มีอยู่ในบรรยากาศของน้ำโลหะหลอมเหลวนั้นมีอยู่น้อยมาก แหล่งที่มาของไฮโดรเจนส่วนใหญ่จะมาจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเป็นหลัก เพราะจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจะทำให้เกิดไอน้ำประมาณ 18 เปอร์เซ็นต์ และในไอน้ำนั้นจะมีก๊าซไฮโดรเจนอยู่สูงถึง 9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งก๊าซไฮโดรเจนจะมีความสามารถในการละลายได้ในโลหะผสมอะลูมิเนียมที่อยู่ในสถานะของเหลวได้มากถึง 10 เท่า ของโลหะผสมอะลูมิเนียมที่อยู่ในสถานะของแข็ง และมากกว่าก๊าซชนิดอื่น ๆ การที่ชิ้นงานหลอมมีไฮโดรเจนในปริมาณที่สูงเมื่อนำชิ้นงานไปปาดผิวหน้าออกจะพบรุกรานเป็นจำนวนมากอยู่ภายในเนื้อของชิ้นงาน ทำให้คุณภาพและสมบัติทางกลของชิ้นงานหล่อที่ได้ต่ำ (Khorasani, 1995)

ดังนั้นผู้ดำเนินงานวิจัยจึงได้ทำการพัฒนาและจัดสร้างเตาเบ้าหลอมให้มีประสิทธิภาพในการหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียมที่สูงขึ้น เพื่อลดการสูญเสียพลังงานความร้อน การใช้ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงระยะเวลาในการหลอม ค่าใช้จ่ายในการหลอม และลดโอกาสในการเกิดรุกรานภายในชิ้นงานหล่อ ซึ่งเตาหลอมที่ได้พัฒนาและจัดสร้างนี้ยังคงใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้เพื่อให้เกิดพลังงานความร้อนในการหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียม

2. หลักการในการออกแบบ

หลักการที่ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านพลังงานแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนหลัก คือ (1) การเลือกใช้วัสดุที่เป็นฉนวนความร้อนที่ดีและมีขนาดที่เหมาะสม (2) การนำอากาศร้อนที่ได้จากการเผาไหม้กลับมาใช้ประโยชน์ และ (3) การออกแบบระบบทางออกของเปลวไฟเพื่อลดโอกาสการสัมผัสโดยตรงของก๊าซกับน้ำโลหะ

2.1 การเลือกใช้วัสดุที่เป็นฉนวนความร้อนที่ดีและมีขนาดที่เหมาะสม การพัฒนาเตาเบ้าหลอมเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานความร้อนให้สูงขึ้น ต้องคำนึงถึงการเลือกใช้วัสดุในการทำผนังเตา ทำ

พื้นเตาหลอมและฝาปิดด้านบนของเตาหลอม เพื่อป้องกันการสูญเสียพลังงานจากการถ่ายเทความร้อนออกสู่บรรยากาศภายนอกทุกทิศทาง ในการเลือกใช้วัสดุอุณหภูมิความร้อนได้แบ่งวัสดุออก 2 กลุ่ม คือ วัสดุทนไฟ และวัสดุอุณหภูมิความร้อน ซึ่งวัสดุทนไฟเป็นวัสดุที่สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้โดยไม่หลอมละลาย ไม่อ่อนตัว อุณหภูมิที่วัสดุทนไฟสามารถทนได้ประมาณ 1500 องศาเซลเซียส โดยทั่วไปวัสดุทนไฟส่วนใหญ่ที่นำมาใช้ทำผนังเตาหลอมจะอยู่ในสภาพของอิฐทนไฟ การเลือกใช้วัสดุทนไฟต้องพิจารณาถึงสมบัติของวัสดุทนไฟ และคุณสมบัติทางเคมีของซีโลหะ (Dross) ที่เกิดขึ้นจากการหลอมโลหะนั้นด้วย ปัจจัยอีกอย่างหนึ่งที่ควรคำนึงถึงในการใช้วัสดุทนไฟ คือ ความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว ในการพัฒนาและสร้างเตาเผาหลอมนี้จะเลือกใช้วัสดุทนไฟประเภทอิฐทนไฟ ซึ่งมีสมบัติเด่น คือ ทนต่ออุณหภูมิสูงไม่เปลี่ยนแปลงสภาพ สามารถรักษาความแข็งแรงไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง มีความต้านทานต่อการกัดกร่อน มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวต่ำ สามารถดูดความร้อนไว้และส่งความร้อนกลับได้ดี ด้านทนต่อการสัมผัสเพ็อนไม่แตกหักเมื่อได้รับการกระทบกระเทือน และมีราคาถูก ส่วนวัสดุอุณหภูมิความร้อนหมายถึงวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นตัวกั้นความร้อนไม่ให้ไหลผ่านหรือออกไปยังอีกที่หนึ่งได้ง่าย วัสดุอุณหภูมิความร้อนจะมีความต้านทานมาก เป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าที่เลว จะช่วยลดการสูญเสียความร้อนสู่บรรยากาศภายนอกและสิ่งแวดล้อม โดยทั่วไปวัสดุอุณหภูมิความร้อนจะมีค่าการนำความร้อนค่อนข้างต่ำ มีความคงทนต่อสภาพสิ่งแวดล้อมที่อยู่รอบ ๆ ในการพัฒนาและจัดสร้างเตาเผาหลอมจะเลือกใช้วัสดุอุณหภูมิความร้อนแบบอิฐอุณหภูมิความร้อนและมีค่าการนำความร้อนประมาณ $0.38-0.52 \text{ W/m}^0\text{K}$ มีความคงทนต่ออุณหภูมิสูง มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวต่ำ และมีราคาถูก การเลือกวัสดุอุณหภูมิความร้อนและระยะความหนาของผนังชั้นวัสดุอุณหภูมิความร้อนจะเป็นตัวกำหนดการสูญเสียความร้อนที่พยายามจะถ่ายเทออกสู่บรรยากาศภายนอกและสิ่งแวดล้อมได้ (Takamura,2543)

2.2 การนำอากาศร้อนที่ได้จากการเผาไหม้กลับมาใช้ประโยชน์ เมื่อเกิดการเผาไหม้ระหว่างน้ำมันเชื้อเพลิงผสมกับอากาศภายในเตาเผาหลอมจะเกิดความร้อนขึ้น ซึ่งความร้อนส่วนหนึ่งจะถูกนำไปใช้ในการอุ่นเตา อุ่นเตาหลอม และช่วยในการหลอมโลหะแล้ว ยังมีความร้อนอีกบางส่วนที่พยายามถ่ายเทออกทุกทิศทางจากเตาหลอมสู่บรรยากาศภายนอก จากการทำงานของเตาเผาหลอมแบบดั้งเดิมจะพบว่าประสิทธิภาพในการใช้พลังงานความร้อนอยู่ที่ 10-15 เปอร์เซ็นต์ของความร้อนทั้งหมด การนำอากาศร้อนหรือความร้อนทิ้งที่ได้จากการเผาไหม้กลับมาใช้ประโยชน์ในการช่วยเผาไหม้เชื้อเพลิงภายในเตาหลอม จึงทำให้เกิดการประหยัดปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิง ระยะเวลาในการหลอมโลหะเร็วขึ้น ลดค่าใช้จ่ายในการหลอมลงและใช้พลังงานของเตาหลอมมีประสิทธิภาพสูงขึ้น (สุนันท์ ศรีณนิตย์,2535)

เพื่อนำเอาหลักในการใช้อากาศร้อนที่ได้จากการเผาไหม้กลับมาใช้ประโยชน์ จึงได้พัฒนาและจัดสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchangers) สำหรับเตาหลอมนี้เพื่อใช้เป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งจะเลือกใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบง่าย (Basic Types of Heat Exchangers) เพราะติดตั้งสะดวก ประหยัดพื้นที่ การทำงานง่ายและราคาถูกเมื่อเทียบกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดอื่น อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้จะประกอบด้วยท่อสองขนาดวางซ้อนกันอยู่และสามารถใช้งานได้ทั้งในลักษณะที่ของไหลในท่อทั้งสองไหลไปในทิศทางเดียวกันหรือไหลสวนทางกัน การทำงานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้จะใช้ลมเย็นเป่าเข้าไปในท่ออีกด้านหนึ่ง เพื่อพาความร้อนที่ถ่ายเทผ่านชั้นผนังเตาหลอมออกมาอีกด้านหนึ่งของท่อเพื่อช่วยในการเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิงบริเวณห้องเผาไหม้ของเตาเบ้าหลอม (Walker, 1978) ลักษณะของการติดตั้งอุปกรณ์ในการแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งทำจากท่อเหล็กม้วนดังแสดงไว้ในรูปที่ 1

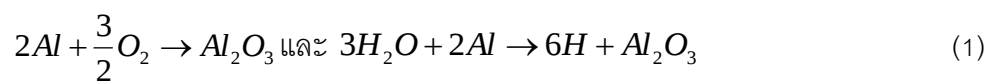


รูปที่ ก-1 การติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนภายในเตาหลอม
ก) ลักษณะอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ข) การติดตั้ง

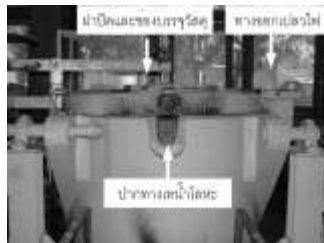
2.3 การออกแบบทางออกของเปลวไฟเพื่อลดโอกาสการสัมผัสโดยตรงของก๊าซกับน้ำโลหะ การเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิงกับอากาศภายในเตาหลอมเพื่อให้ได้พลังงานความร้อนในการหลอมเหลวโลหะผสมอะลูมิเนียม นั้น หากการเผาไหม้มีอัตราส่วนการผสมของอากาศกับน้ำมันเชื้อเพลิงที่ถูกต้องและเหมาะสมจะทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์และสะอาด ถ้าการเผาไหม้นั้นมีอัตราส่วนการผสมของอากาศกับน้ำมันเชื้อเพลิงไม่ถูกต้องจะทำให้การเผาไหม้นั้นไม่สะอาด บรรยากาศในการเผาไหม้แบบนี้อาจจะมีได้ 2 สถานะ คือ (1) สถานะ Oxidizing จะมีอัตราส่วนของอากาศมากเกินไปจะทำให้ปริมาณของก๊าซออกซิเจนหลงเหลืออยู่มาก จะเป็นต้นเหตุของการเกิดขี้โลหะ (Dross) ทำให้เกิดการเสียเนื้อโลหะค่อนข้างสูง (2) สถานะ Reducing จะมีอัตราส่วนผสมของอากาศน้อยเกินไปจะทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้จะเป็น Reducing gases จะประกอบด้วยก๊าซ CO , CO_2 , H_2 , ไฮโดรคาร์บอน และไอน้ำ ซึ่งก๊าซที่สามารถละลายได้ในโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลวมากได้และเป็นอันตรายต่อคุณภาพของชิ้นงานหล่อ คือ ก๊าซไฮโดรเจน จะสามารถละลายในสถานะของเหลวได้ถึง

10 เท่าของสถานะของแข็ง เมื่อน้ำโลหะเริ่มแข็งตัวก๊าซไฮโดรเจนจะพยายามดันตัวออกสู่บรรยากาศภายนอก แต่เมื่อน้ำโลหะแข็งตัวหมดไฮโดรเจนจะออกได้ยากและจะแทรกตัวอยู่ในเนื้อโลหะและทำให้เกิดโพรงก๊าซและรูพรุน (Gruzleski and Closset, 1990)

การหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียมด้วยเตาแบบดั้งเดิม เปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิงภายในเตาหลอมจะออกสู่บรรยากาศภายนอกโดยผ่านปากเตาหลอม หรือบริเวณช่องที่บรรจุวัตถุดิบ ทำให้เกิดการแพร่ของก๊าซ เข้าไปผสมกับน้ำโลหะได้ง่าย ดังปฏิกิริยา (Hess, 1973)

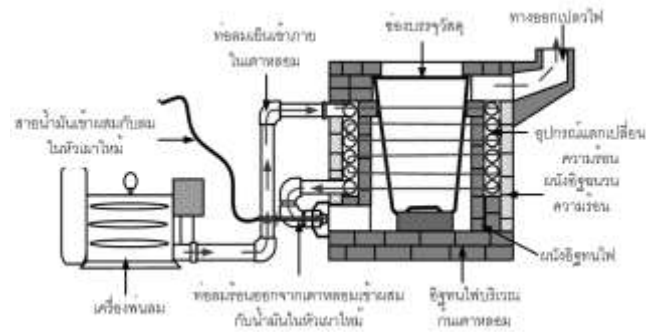


ดังนั้นในการพัฒนาและจัดสร้างเตาแบบหลอมนี้จึงได้ทำการออกแบบระบบทางออกของเปลวไฟโดยให้ออกทางด้านข้างของเตาหลอมดังรูปที่ 2 เพื่อลดโอกาสการสัมผัสของก๊าซกับน้ำโลหะโดยตรง จึงทำให้น้ำโลหะที่ได้มีความสะอาดขึ้น ส่งผลต่อคุณภาพและสมบัติทางกลของชิ้นงานหล่อที่ได้ อนึ่งเปลวไฟที่ออกทางปล่องทางออกด้านข้างของเตาแบบหลอมนี้ยังสามารถนำมาใช้ประโยชน์โดยใช้อุณหภูมิและกำจัดความชื้นที่ติดมากับวัตถุดิบก่อนบรรจุเข้าในเตาหลอม



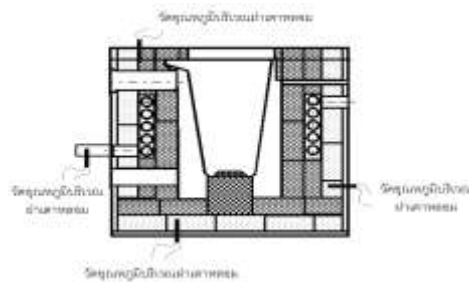
รูปที่ ก-2 ทิศทางออกเปลวไฟด้านข้าง

รูปที่ 3 แสดงถึงภาพร่างของเตาที่ได้พัฒนาและสร้างขึ้น โดยแสดงให้เห็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ทำจากท่อเหล็กม้วนไปมาอยู่ระหว่างชั้นของอิฐทนไฟกับอิฐฉนวนความร้อน ซึ่งอากาศที่เป่าเข้าไปสู่เตาหลอมโดยเครื่องเป่าลมจะต้องผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนี้และทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น ก่อนนำเอาลมร้อนนั้นไปใช้ในการเผาไหม้กับน้ำมันเชื้อเพลิงต่อไป



รูปที่ ก-3 การออกแบบภายในห้องเผาไหม้ของเตาหลอม

ในการทดสอบประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาหลอมโดยวัดปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงและค่าใช้จ่ายในการหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียม นั้น จะบันทึกค่าของอุณหภูมิที่ออกจากเตาหลอมในตำแหน่งต่างๆ โดยใช้เทอร์โมคัปเปิล ชนิด Type K ผังลึกลงไปที่กึ่งกลางของความหนาที่จุดต่าง ๆ ที่ใช้วัดของเตาหลอม เช่นบริเวณพื้นล่าง ผนังด้านนอก ฝาปิดปากเตาหลอม ดังแสดงในรูปที่ 4 และนำค่าอุณหภูมิที่วัดได้ไปคำนวณหาพลังงานที่สูญเสียผ่านเตาหลอมทุกทิศทางระหว่างเตาหลอมที่พัฒนาและจัดสร้างขึ้นกับเตาหลอมแบบดั้งเดิม นอกจากนั้นยังวัดปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงโดยอ่านค่าโดยตรงจากระดับของน้ำมันที่เหลืออยู่ในภาชนะที่เวลาต่างๆ และระยะเวลาในการอุ่นเข้าหลอมและการหลอมโลหะ เพื่อนำค่าต่าง ๆ เหล่านี้มาคำนวณหาประสิทธิภาพในการเชื้อเพลิง

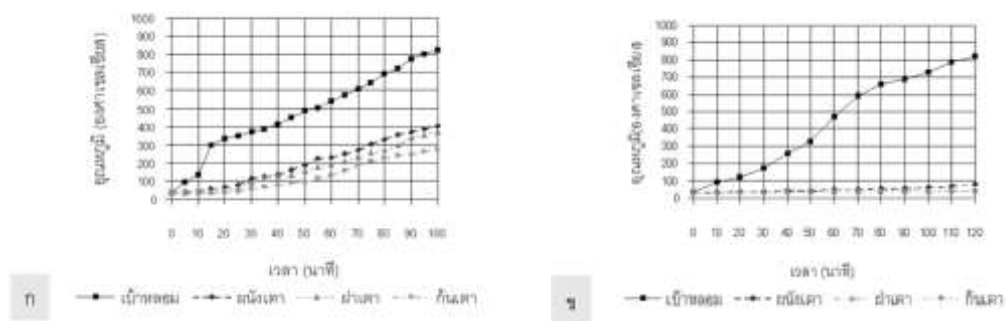


รูปที่ ก-4 การฝังเทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ของเตาหลอม

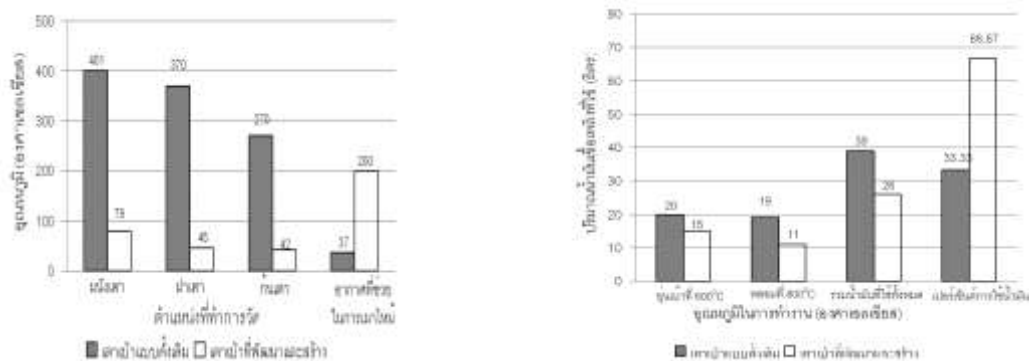
3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

ผลการทดลองที่ได้เป็นการเปรียบเทียบระหว่างเตาแบบดั้งเดิมกับเตาที่พัฒนาและจัดสร้าง ซึ่งผลการทดลองเมื่อทำการหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียมเตาแรก คือ จากการวัดค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อเวลาผ่านไป จะพบว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งที่วัดดังแสดงในรูปที่ 4 ของเตาหลอมแบบดั้งเดิมมีความร้อนที่สูงกว่าเตาหลอมที่พัฒนาและจัดสร้างมาก นอกจากนั้นแล้วแนวโน้มของอุณหภูมิในกรณี

เป็นเตาหลอมแบบดั้งเดิมยังมีโอกาสเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่ในกรณีที่เป็นเตาหลอมที่พัฒนาและจัดสร้าง อุณหภูมิหลังจากที่เวลาผ่านไป 80 นาที พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ผลที่ได้จากการทำงานของเตาที่พัฒนาและจัดสร้างอีกอย่าง คือ อากาศร้อนหรือลมร้อนที่จะนำไปช่วยในการเผาไหม้กับน้ำมันเชื้อเพลิง อุณหภูมิที่บริเวณทางออกวัดค่าได้ประมาณ 250 ถึง 400 องศาเซลเซียส เมื่อผสมกับน้ำมันเชื้อเพลิงจะทำให้การเผาไหม้ภายในเตาหลอมรวดเร็วขึ้น ลดเวลาในการทำงาน และลดปริมาณการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงในการหลอมลงด้วย



รูปที่ ก-5 อุณหภูมิที่ได้จากการวัด จากการดำเนินงานของเตาหลอมเป็นระยะเวลา 100 นาที
ก) อุณหภูมิที่วัดค่าได้จากเตาแบบดั้งเดิม ข) อุณหภูมิที่วัดค่าได้จากเตาที่พัฒนาและจัดสร้าง



รูปที่ ก-6 อุณหภูมิเตาหลอมต่อตำแหน่งที่วัด เมื่ออุณหภูมิภายในเตาหลอมถึง 800 °C

รูปที่ ก-7 ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงต่อกิจกรรมที่ทำงาน ในการหลอมเตาแระระยะเวลาการทำงาน 100 นาที

4. สรุปผลและวิจารณ์การวิจัย

งานวิจัยนี้จะเกี่ยวข้องกับการพัฒนาเตาหลอมสำหรับการหล่ออะลูมิเนียมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานความร้อน จากการวิจัยพบว่า

4.1 การเลือกใช้วัสดุที่เป็นฉนวนความร้อนที่ดีและมีขนาดเหมาะสม จะช่วยลดการสูญเสียพลังงานความร้อนที่ออกจากเตาหลอมทุกทิศทางลงทำให้เตาเผาหลอมมีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานความร้อนสูงขึ้น

4.2 การออกแบบเตาหลอมโดยใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนช่วยในการนำอากาศร้อนกลับมาใช้ประโยชน์ในการช่วยเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิง ทำให้ระยะเวลาในการทำงานสั้นลงและลดปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ในการหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียมลง จะพบว่าเตาแบบดั้งเดิมใช้ปริมาณน้ำมันในการหลอม 19 ลิตร และเตาที่พัฒนาและจัดสร้างจะใช้ปริมาณน้ำมันในการหลอม 11 ลิตร และประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิงเชื้อเพลิงได้มากกว่าเตาแบบดั้งเดิมถึง 42.10 เปอร์เซ็นต์ของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ในการหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียม

4.3 ผลที่ได้จากการดำเนินงานวิจัยนี้อาจให้ผลในการเปรียบเทียบที่ไม่แน่นอนนัก เนื่องจากเตาเผาหลอมแบบดั้งเดิมเป็นเตาที่มีอยู่และใช้งานจริงในอุตสาหกรรม จึงทำให้สภาวะในการทดลองเปรียบเทียบกับเตาเผาหลอมที่พัฒนาและจัดสร้างไม่สามารถควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ให้ตรงตามที่ควรจะเป็นในการดำเนินงานวิจัย ทำให้ผลการทดลองที่ได้ อาจมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง และข้อมูลในส่วนของการคำนวณไม่สามารถนำมาแสดงได้เนื่องจากพื้นที่ในการจัดพิมพ์พื้นที่จำกัด ผู้ดำเนินงานวิจัยจะนำมาเสนอในงานวิจัยและเอกสารอื่น ๆ ต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ดำเนินการภายใต้หน่วยเทคโนโลยีเฉพาะทางหล่อโลหะ ซึ่งได้รับการสนับสนุนจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ผู้ดำเนินงานวิจัยขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และบริษัทไท่เฮงการช่างและการหล่อ (1999) จำกัด ที่สนับสนุนทุนวิจัยและวัสดุในการทำงานวิจัย ภายใต้สัญญาเลขที่ RDG 4550037 ผู้ดำเนินงานวิจัยขอขอบพระคุณ ผศ.พญูร เกตุกราย อาจารย์เชาว์ เนียมสอน และอาจารย์สาธิต จันทนปุม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สำหรับคำแนะนำในการออกแบบและการจัดสร้างเตาไฟฟ้าหลอม

เอกสารอ้างอิง

Donna L. Zalensas, *Aluminum Casting Technology*, Second Edition, The American Foundrymen's Society, 1993.

พญูร เกตุกราย, *การหล่อโลหะ ภาคผลิต*, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น), 2526.

Avery Kearney, *Reverberatory Furnace and Crucible Furnace*, ASM Handbook. Volume 15 : Casting. 1988.pp. 376

T. Akiyama, *New Furnace and Combustion Technology*, Chugai Ro co,LTD,1988.

Frank Kreith, *Principles of Heat Transfer*, Third Edition,Intext Press,Inc,1973.

A.N. Khorasani, *Transaction of the American Foundrymen's Society*, Proceedings of the Ninety - Ninth Annual Melting. Volume 103, 1995.

Yoshihiko Takamura, *เทคนิคการประหยัดพลังงาน ภาคความร้อน*,สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2543.

สุนันท์ ศรีถนยนิทย์, *การถ่ายเทความร้อน*, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2535.

G. Walker, *Industrial Heat Exchangers*, McGraw-Hill Book,1978.

John E. Gruzleski and Bernard M. Closset, *The Treatment of Liquid Aluminum-Silicon Alloy*, The American Foundrymen's Society,Inc,1990.

P.D. Hess. *Measuring Hydrogen in Aluminum Alloy*. J.met. oct 1973.

ภาคผนวก ข.
เอกสารการใช้งาน

1. รายละเอียดพื้นฐาน

ตารางที่ ข-1 การใช้งานที่เหมาะสม : เตาลหอม, หลอมโลหะและอโลหะ, อุ่น

ชื่อ	ขนาด, รุ่น	จำนวน
เตาไฟฟ้าหลอม	MT-175, น้ำมันเตา	1 เตา

2. รายละเอียด



รูปที่ ข-1 แสดงลักษณะของเตาลหอมรุ่น MT-175

2.1 ข้อมูลเบื้องต้น

- | | |
|----------------------|--|
| 1) รุ่น | MT-175 น้ำมันเตา |
| 2) การใช้งาน | เตาลหอมอะลูมิเนียม |
| 3) กำลังผลิต | หลอม 175 kg /อะลูมิเนียม หลอมที่อุณหภูมิ 760 °C |
| 4) การควบคุมอุณหภูมิ | ใช้ Thermocouple วัดอุณหภูมิการหลอม เพื่อการปรับอัตราส่วน
ลมกับน้ำมันเชื้อเพลิง |
| 5) พลังงานที่ใช้หลอม | พลังงานความร้อนที่เกิดจากอัตราส่วนการผสมกัน
ระหว่างน้ำมันเชื้อเพลิงและอากาศ |

6) โครงสร้าง กว้าง 1500 mm. ยาว 1650 mm.

สูง 1700 mm. หนัก 2500 kg.

7) ตัวเตาหลอม เส้นผ่าศูนย์กลาง 1270 mm.

สูง 1170 mm. หนัก 1800 kg.

8) ส่วนประกอบอื่น ๆ

(1) แหล่งพลังงานน้ำมันเตาให้ความร้อน 42000 Kcal/m^3

(2) เครื่องพ่นลมด้วยแรงดัน $2800 \text{ mmH}_2\text{O}$

(3) วัสดุที่ใช้หลอม แท่งอินกอต หรือ อะลูมิเนียมก้อน หรือเศษอะลูมิเนียมผสม

(4) เวลาใช้งาน จำนวน 30 วัน/เดือน จำนวน 12 ชั่วโมง/วัน

9) อุปกรณ์ควบคุมความปลอดภัย

(1) เกจวัดแรงดันลม

(2) Thermocouple วัดอุณหภูมิน้ำโลหะ

(3) เครื่องวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเผาไหม้วัดปริมาณก๊าซต่าง ๆ ที่เกิดจากการสันดาปภายในเตาหลอม

2.2 โครงสร้างต่าง ๆ และอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุม

1) โครงเตา เปลือกเตาหลอมทำจากเหล็กแผ่นหนา 6 mm. เป็นโครงสร้างพื้นฐานและม้วนขึ้นรูป เสาค้ำมาจากเหล็กวงและเชื่อมยึดให้แข็งแรง

2) ฉนวนกันความร้อน โครงเตาภายในก่อจากอิฐฉนวน (อิฐเบา) ผงอิฐฉนวนผสมกับผงอิฐทนไฟ และอิฐทนไฟ (อิฐหนัก)

3) อุปกรณ์ให้ความร้อน

(1) หัวพ่นไฟ (Nozzle Mixer Bright Frame Oil)

(2) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อม้วนขดหรือแบบไส้ไก่ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ 50.8 mm. ยาว 3300 mm. สูง 3700 mm.

(3) เครื่องพ่นลมแบบ Ring Blower ขนาด 5HP 380V 3.7KW 13 A 3P

4) อุปกรณ์ความปลอดภัย

(1) เกจวัดแรงดันลม

(2) Release Valve

(3) Thermocouple

5) อุปกรณ์ประกอบท่อลม

- (1) วาล์วปรับแรงดันลม
- (2) วาล์วปิด-เปิดทางลม
- (3) เกจวัดแรงดันลม

6) เครื่องพ่นลม Ring Blower กำลังลม $8.3 \text{ m}^3/\text{min}$ แรงดัน $2800 \text{ mmH}_2\text{O}$
มอเตอร์ 5 HP หรือ 3.7 KW ความเร็วรอบ 3500 RPM

7) เป้าหลอมและฐานรองเป้า

- (1) เป้าหลอม เนื้อซิลิกอนคาร์ไบด์ สูง 665 mm. ปากกว้าง 530 mm. ก้นกว้าง 330 mm. ความจุอะลูมิเนียม 175 kg.
- (2) ฐานรองเป้า เนื้อซิลิกอนคาร์ไบด์ เส้นผ่าศูนย์กลาง 355 mm. หนา 152 mm.

8) ระบบควบคุมอุณหภูมิ

- (1) อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ วัดที่ส่วนน้ำโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิตั้งแต่ 0 ถึง 1200°C สายวัดแบบ Type K
- (2) Thermocouple สายต่อ หัวต่อ แท่งวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 22 mm. สาย CA แท่งกันฉนวน Silicon Carbide

9) ตู้ควบคุมและเดินสายไฟ

- (1) ตู้ควบคุมเครื่องพ่นลม โครงเหล็กตู้ควบคุมพ่นด้วยสีเทาภายนอก ด้านหน้ามีเบเกอร์สำหรับควบคุมเครื่องพ่นลม
- (2) ตู้แสดงอุณหภูมิ โครงเหล็กพ่นด้วยสีเทาภายนอก ด้านหน้ามีจอแสดงค่าแบบ Digital เพื่อควบคุมอุณหภูมิที่เกิดขึ้นขณะทำการหลอม
- (3) การเดินสายไฟ เดินสายไฟ 3 เฟส เข้าเบเกอร์แล้วต่อไปยังเครื่องพ่นลม

10) การเดินท่อ

- (1) ท่อลมใช้ท่อเหล็กแบบหนา เส้นผ่าศูนย์กลาง 50.8 mm.
- (2) ท่อน้ำมันใช้ท่อแบบหนา เส้นผ่าศูนย์กลาง 19 mm. ยาว 6 m ต่อจากถังบรรจุน้ำมันเตาเข้ากับหัวพ่น

11) ทาสี

- (1) โครงเตา ทาสีทนความร้อนจุดตัน
- (2) ท่อลม ทาสีขาว No.9.5

12) การตรวจวัดการเผาไหม้

- (1) โดยการสังเกตด้วยตาเปล่าที่เปลวไฟจากการสันดาป

- (2) โดยการใช้เครื่องวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ วัดปริมาณก๊าซต่าง ๆ ที่เกิดจากการเผาไหม้

3. คู่มือปฏิบัติและใช้งาน

3.1 รายละเอียดและส่วนประกอบทั่วไป

1) โครงเตา สำหรับโครงสร้างเตาด้านนอก จะประกอบด้วยเหล็กแผ่นหนา 6 mm. ม้วนขึ้นรูปและเชื่อมยึดเพื่อความแข็งแรง โดยมีฝาเตา ฝาปิดปากเตาและ Thermocouple อยู่ด้านบน มีเบอเนอร์และปล่องทางออกของไฟติดอยู่ด้านข้างของเตาหลอม มีท่อลมเย็นจากเครื่องพ่นลมเข้าด้านข้างบนและลมร้อนออกจากเตาด้านล่างเข้าสู่เบอเนอร์ โดยมีวาล์วปรับแรงดันลมตามที่ต้องการ การใช้งานและมีวาล์วปรับอัตราการไหลของน้ำมัน เพื่อให้ความร้อนในการหลอมละลายแท่งหรือก้อนอะลูมิเนียมที่บรรจุอยู่ในบ้ำหลอม การเติมอะลูมิเนียมจะใส่ลงที่ปากเตาด้านบนและมีฝาปิด-เปิดปากเตาหลอมเพื่อทำความสะอาดและกำจัดก๊าซในน้ำอะลูมิเนียมที่ใช้ในการหล่อ อะลูมิเนียมที่หลอมเหลวจะไหลออกด้านหน้าที่ปากทางเทน้ำโลหะโดยวิธีการยกเอียงเตา ดังแสดงในรูปที่ ข-2 รูปที่ ข-3 และรูปที่ ข-4



รูปที่ ข-2 แสดงลักษณะด้านหน้า
เตาหลอม รุ่น MT-175



รูปที่ ข-3 แสดงลักษณะด้านข้าง
ของเตาหลอม รุ่น MT-175

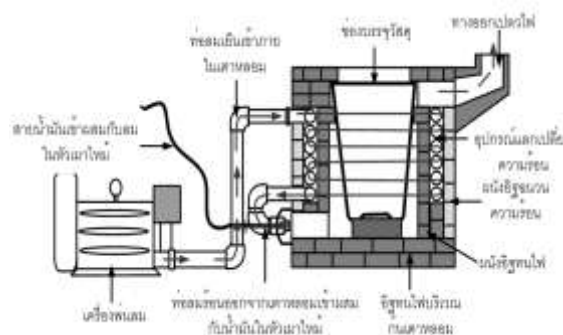


รูปที่ ข-4 แสดงลักษณะด้านข้างและ
ด้านบนของเตาหลอม รุ่น MT-175

2) ผนวณกันความร้อน ของเตาหลอมประกอบด้วยวัสดุดังตารางที่ ข-2
ตารางที่ ข-2 ผนวณกันความร้อนภายในเตาหลอม

ส่วนต่าง ๆ	อิฐ ฉนวน	ผงของอิฐฉนวน ผสมกับอิฐทนไฟ	อิฐทนไฟ	ปูนทนไฟ
โครงเตา	*	*		
ห้องหลอม			*	*
ฝาเตา				*
ก้นเตา			*	*

3) บริเวณห้องหลอมเหลวบริเวณนี้จะประกอบด้วยอิฐทนไฟและฉาบด้วยปูนทนไฟเพื่อให้ทนต่อเปลวไฟและความร้อน เป็นบริเวณที่ตั้งเบ้าหลอม ดังแสดงในรูปที่ ข-5



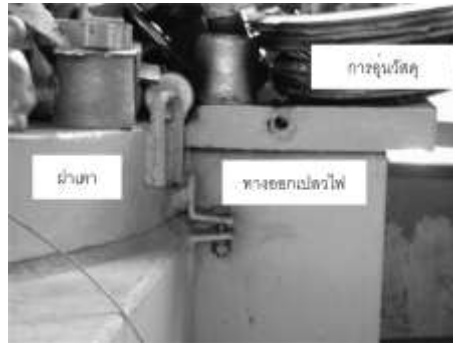
รูปที่ ข-5 แสดงลักษณะบริเวณผนังภายในห้องหลอม

4) ท่อปล่องเบอเนอร์ ทำมาจากคอนกรีตทนไฟหล่อเพื่อใช้บังคับเปลวไฟให้ไปในทิศทางที่ต้องการและมีแผ่นเหล็กเชื่อมเป็นกล่องรองรับดังรูปที่ ข-6



รูปที่ ข-6 แสดงกล่องเผาไหม้เชื้อเพลิง

5) ท่อปล่องทางออกเปลวไฟทำด้วยคอนกรีตทนไฟหล่อและรองรับด้วยแผ่นเหล็กเชื่อมทำเป็นกล่อง ด้านบนจะเป็นถาดสี่เหลี่ยมใช้สำหรับอุณหภูมิต่ำ เพื่อไล่ความชื้นออกก่อนบรรจุเข้าในเตาหลอม ดังรูปที่ ข-7



รูปที่ ข-7 แสดงปล่องทางออกเปลวไฟ

6) ระบบการอุ่นอากาศของเตาหลอม จะทำการอุ่นอากาศเพื่อนำมาผสมกับเชื้อเพลิงให้เกิดการสันดาปที่ดีขึ้นและลดเวลาในการทำงาน ช่วยให้เกิดการประหยัดเชื้อเพลิง การอุ่นอากาศจะใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขด หรือแบบไส้ไก่ ซึ่งทำมาจากเหล็กกล้าคาร์บอนทนความร้อน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50.8 mm. มีขนาดได้ภายในเตาหลอมดังรูปที่ ข-8



รูปที่ ข-8 แสดงลักษณะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขด

ก) ลักษณะท่อขด

ข) การติดตั้งท่อขดในเตา

3.2 ส่วนเผาไหม้เพื่อให้ความร้อน

การเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อให้เกิดความร้อนในการหลอมละลายอะลูมิเนียม นั้น จะมีเบอเนอร์สำหรับพ่นเปลวไฟไปยังเตาหลอมที่บรรจุแท่งหรือก้อนอะลูมิเนียมอยู่ ความร้อนภายในห้องหลอมจะเกิดการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังของเตาไปสู่อะลูมิเนียม ทำให้เกิดการหลอมละลาย การเพิ่มความร้อนนั้น

จะสามารถทำได้โดยการปรับที่วาล์วน้ำมันและวาล์วลมตามสภาวะที่ต้องการใช้ในการหลอม อะลูมิเนียม ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมมีดังนี้

- 1) Oil Burner
 - (1) Holding Oil & Air Mixing High Speed
 - (2) Melting
- 2) Pressure Gauge ใช้ควบคุมแรงดันของลม
- 3) Ring Blower เป็นแหล่งกำเนิดลมใช้ผสมกับเชื้อเพลิงเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์

3.3 ระบบควบคุมและเดินสายไฟ

1) ตู้ควบคุมการทำงานของเครื่องพ่นลม จะประกอบด้วยเบเกอร์สำหรับปิด-เปิด การทำงาน ซึ่งเบเกอร์นี้ใช้กับไฟ 380 V 100 Amp ไฟ 3 เฟส ดังรูปที่ ข-9



รูปที่ ข-9 แสดงลักษณะของตู้ควบคุมการทำงานของเครื่องพ่นลม และจอแสดงค่าของอุณหภูมิภายในเบ้าหลอม

2) ระบบการควบคุมการวัดอุณหภูมิ ในการวัดอุณหภูมินี้จะทำการวัดภายในเบ้าหลอมบริเวณที่น้ำโลหะหลอมละลาย ซึ่งจะทำให้ได้ค่าอุณหภูมิที่แท้จริง อุปกรณ์ในการวัดอุณหภูมิจะประกอบด้วย ชุด เทอร์โมคัปเปิ้ล แบบ K ขนาด 22 mm. หุ้มด้วยปลอกที่ทำมาจากซิลิคอนคาร์ไบด์ เพื่อป้องกันการกัดกร่อนจากอะลูมิเนียมเหลว ต่อด้วยสาย CA เข้ากับจอแสดงค่าอุณหภูมิ (Editor Monitor) ดังแสดงในรูปที่ ข-10



รูปที่ ข-10 แสดงลักษณะเทอร์โมคัปเปิ้ลที่ใช้วัดอุณหภูมิ

3) การเตรียมการเบื้องต้น

(1) การจุดเตา เนื่องจากเตารุ่น MT-175 ที่ทำการสร้างขึ้นมานี้ ระบบการทำงานทั้งหมดจะทำการควบคุมด้วยมือ (Manual System) ดังนั้นในการจุดเตาครั้งแรก ก่อนทำงานควรปฏิบัติดังนี้

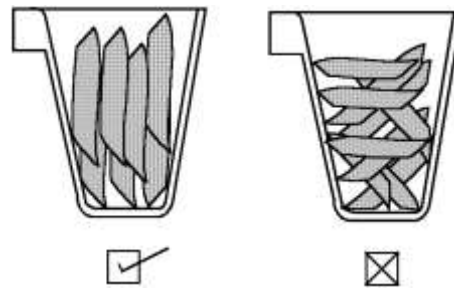
- (1.1) ใช้ก๊าซเผาให้ความร้อนนำก่อน เพื่อไล่ความชื้นต่าง ๆ ภายในเตา
- (1.2) เปิดวาล์วลมและเปิดเครื่องพ่นลม
- (1.3) เปิดวาล์วน้ำมัน ปรับปริมาณน้ำมันเข้าภายในเตา
- (1.4) ปรับอัตราการเผาเข้าภายในเตา
- (1.5) ค่อย ๆ ให้ความร้อนให้แก่เตาและเบ้าหลอม เพราะถ้าแรงความร้อนขึ้นเร็วเกินไปอาจทำให้เบ้าหลอมแตกได้ (Thermal Shock)
- (1.6) ให้ความร้อนอุ่นเบ้าหลอมจนอุณหภูมิประมาณ 600°C ค่อยเติมอะลูมิเนียมเข้าในเตาหลอม ดังรูปที่ ข-11

(2) การหยุดการทำงานของเตาให้ปฏิบัติดังนี้

- (2.1) ปิดวาล์วน้ำมันก่อน
- (2.2) ปิดวาล์วลมและปิดเบเกอร์เครื่องพ่นลม

(3) การเติมอะลูมิเนียมเข้าในเบ้าหลอม ควรปฏิบัติดังนี้

- (3.1) ต้องนำอะลูมิเนียมมาอุ่น (Pre-Heating) ที่ปล่องไฟก่อนเพื่อกำจัดความชื้นต่าง ๆ
- (3.2) ดูว่าเบ้ามีอุณหภูมิถึง 600°C หรือยัง
- (3.3) เติมแท่งหรือก้อนอะลูมิเนียมเข้าในเบ้าหลอม ให้อยู่ในแนวตั้ง เพราะวัสดุเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการขยาย ตัวออกตามความยาว ถ้าวางแท่งอะลูมิเนียมตามแนวขวางจะทำให้เบ้าหลอมแตกร้าวเกิดความเสียหายได้ ดังรูปที่ ข-11

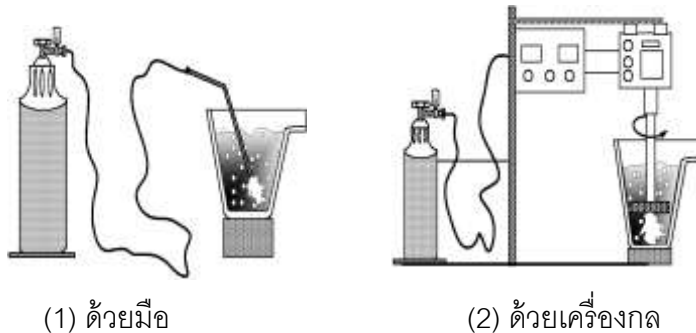


รูปที่ ข-11 แสดงการบรรจุวัสดุเข้าในเบ้าหลอม

4) ในการหลอมอะลูมิเนียมควรปรับความร้อนให้เป็นกลางมากที่สุด (Neutral) ถ้าอยู่ในสภาวะ Oxidizing คือมีปริมาณลมมากเกินไปจะทำให้ออกซิเจนเข้าไปรวมกับเข้าโลหะเกิดเป็นซีโลหะ (Dross) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงและสูญเสียเนื้อโลหะ แต่ถ้าอยู่ในสภาวะ Reducing คือมีปริมาณลมน้อยเกินไปจะทำให้มีไฮโดรเจนมากและเข้าไปผสมกับน้ำโลหะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพ และสมบัติทางกลไม่ดี เกิดจุดบกพร่องในชิ้นงานหล่อ เช่น รูพรุน การหดตัว

5) เมื่ออะลูมิเนียมหลอมเหลวหมดแล้วควรเติมฟลักซ์คัมผิวหน้า (Recovery Flux) เพื่อป้องกันความชื้นในอากาศเข้าไปสัมผัสกับน้ำโลหะ และช่วยกำจัดสิ่งสกปรกออกจากน้ำโลหะด้วย

6) การกำจัดก๊าซในน้ำโลหะ (Degassing) นั้นจะมีอยู่หลายวิธี แต่ที่นิยมใช้และได้ผลดีที่สุดในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนในน้ำโลหะ คือ การใช้ก๊าซไนโตรเจน หรือ ก๊าซอาร์กอนเป่าผ่านเข้าไปในน้ำโลหะ ดังแสดงในรูปที่ ข-12



(1) ด้วยมือ

(2) ด้วยเครื่องกล

รูปที่ ข-12 แสดงลักษณะการกำจัดก๊าซในน้ำโลหะ

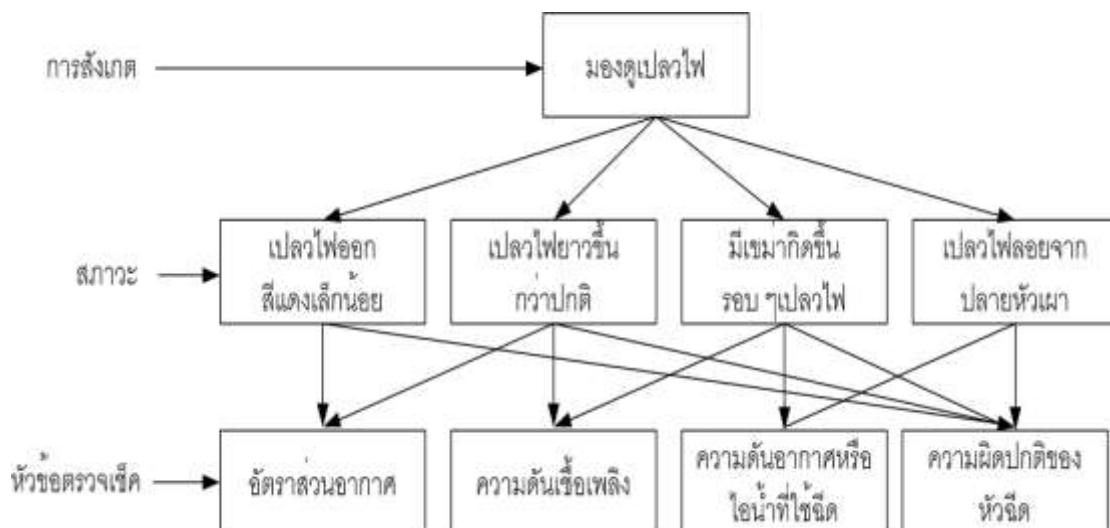
7) การเทน้ำโลหะหลอมเหลว เมื่อทำการกำจัดก๊าซแล้วและอุณหภูมิของน้ำโลหะถึงอุณหภูมิเทแล้ว ขั้นตอนการเทน้ำโลหะออกจากเบ้าหลอมสู่ถ้วยรองรับ เพื่อนำไปเทลงในแบบหล่ออีกทีนั้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้เกลียวหมุนเอียงเท การใช้ชุดไฮดรอลิคยกเอียงเท การใช้เครนยกเอียงเท เตารุ่น MT-175 ที่จัดสร้างขึ้นมาจะใช้เครนยกด้านหลังของเตาเพื่อเอียงเทน้ำโลหะออกจากเบ้าหลอม ดังรูปที่ ข-13



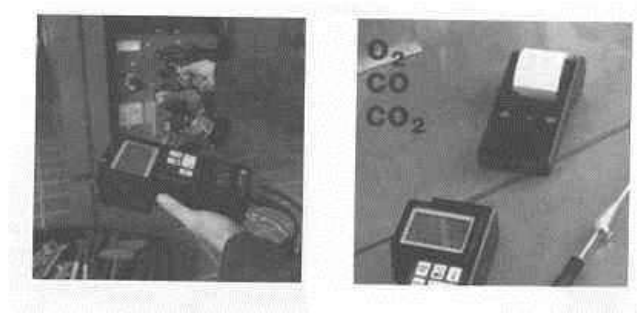
รูปที่ ข-13 แสดงการยกเตาเอียงเทน้ำโลหะ
โดยใช้เครนขนาด 2 ตันยกเกี่ยวด้านหลัง

8) การสังเกตสภาวะการสันดาปของเตาหลอมสามารถทำได้ 2 วิธีคือการสังเกตด้วยตาเปล่าและการใช้เครื่องวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการเผาไหม้
ตารางที่ ข-3 สีของเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้กับปริมาณอากาศ

ปริมาณของอากาศ	สภาวะภายในเตาหลอม	สีของควัน
ปริมาณอากาศพอดี	เปลวไฟสีแดง ปรูปร่างอยู่ตัว	สีเทาอ่อน
ปริมาณอากาศมาก	เปลวไฟสีขาว ภายในเตาสว่างจ้า	สีขาว
ปริมาณอากาศน้อย	เปลวไฟสีแดงคล้ำ	สีดำ



รูปที่ ข-14 แสดงการสังเกตเปลวไฟที่เกิดจากการสันดาป



รูปที่ ข-15 แสดงลักษณะการวิเคราะห์ก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้
ด้วยเครื่องวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการเผาไหม้



รูปที่ ข-16 แสดงลักษณะของเครื่องวัดประสิทธิภาพจากการเผาไหม้

3.4 การตรวจสอบประจำ

1) การตรวจสอบทุกวัน

- (1) อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ
- (2) ส่วนที่เคลื่อนไหวได้ เช่น แบริง เพลา
- (3) ของที่ไม่จำเป็นที่ตกลงไปในเข้าหลอม
- (4) ทำความสะอาดภายในเตาและอุปกรณ์
- (6) สายน้ำมันและหัวพ่นน้ำมัน

2) ตรวจสอบทุก ๆ สัปดาห์

- (1) สายและอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ
- (2) แผ่นกรองเครื่องพ่นลม
- (3) อุปกรณ์และหัวพ่นไฟ

3) ตรวจสอบทุก ๆ เดือน

- (1) เครื่องพ่นลม

4) ตรวจสอบทุก ๆ 3 เดือน

- (1) หยุดทำความสะอาดเตาหลอม

4. ปัญหาและวิธีการแก้ไข

ตารางที่ ข-4 ปัญหาและวิธีแก้ไข

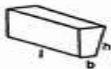
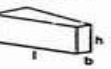
จุดปัญหา	ปัญหา	วิธีแก้ไข
เครื่องพ่นลมไม่ หมุน	1. สายไฟไม่แน่น 2. มอเตอร์ไม่หมุน 3. มอเตอร์เสียดัง 4. ฟิวส์ขาด	1. ให้ตรวจสอบสายไฟทั้ง 3 เส้น 2. เปลี่ยนมอเตอร์ใหม่ 3. เปลี่ยนเบรคใหม่ 4. เปลี่ยนฟิวส์ที่ขาดใหม่
การจุดไฟไม่ ติด	1. วาล์วลมและน้ำมัน ไม่ได้เปิด 2. แรงดันลมมากเกินไป 3. แรงดันลมน้อยเกินไป	1. ให้เปิดวาล์วลมก่อนแล้วค่อยเปิดวาล์วน้ำมันและ ปรับตามที่ต้องการ 2. ให้ปรับแรงดันลมและน้ำมันให้น้อยที่สุดก่อนแล้วจุด ไฟ จากนั้นค่อย ๆ ปรับความร้อนตามที่ต้องการ
หัวพ่นไฟ ทำงานผิดปกติ	1. เปลวไฟมีสีไม่ ถูกต้อง	1. ปรับอากาศให้พอดี 2. ดูปลายหัวพ่นว่าชำรุดอุดตันไหม
	2. เปลวไฟยาวและ แตกกว่าปกติ	1. ปรับอัตราส่วนของอากาศ 2. ปรับความดันของน้ำมัน 3. ดูปลายหัวพ่นว่าชำรุดอุดตันไหม
	3. มีเขม่าเกิดรอบเปลว ไฟ	1. ดูความดันของอากาศที่ใช้ฉีด 2. ดูความดันของน้ำมัน 3. ดูปลายหัวพ่นว่าชำรุดอุดตันไหม
	4. เปลวไฟลอยจาก ปลายหัวเผา	1. ดูความดันของอากาศ 2. ดูความดันของน้ำมัน 3. ดูปลายหัวพ่นว่าชำรุดอุดตันไหม
ตัวเตาและ เสาเตา	1. ตัวเตาสั่นไหว 2. เสาเตาสั่นไหว	1. ดูการหล่อลื่นที่เพลลาและเบรค 2. ดูการตั้งฉากของเครนที่ใช้ยกกับตำแหน่งเตาหลอม 3. ดูการยึดระหว่างเสา 4. ดูจุดยึดที่ฐานเตากับพื้น 1. ดูหลักประครองเสาเตา 2. ดูจุดยึดที่ฐานเตากับพื้น

ภาคผนวก ค.
เอกสารอ้างอิง

ตารางที่ ค-1 ขนาดต่าง ๆ ของ Ring Blower

RB TYPE	motor HP	ท่อลม inch	แรงดัน V	ความถี่ Hz	ความเร็วรอบ R.P.M.	KW	A	ทางออก		ทางเข้า		ทางออก		kg	mm	
								SP	Q	mmH ₂ O	Q	ทางออก				
												mmH ₂ O	m ³ /mm			mmH ₂ O
RB-750	1	1.5	220	50	2800	0.75	3.5	700	1.2	750	1.1	1200	1.8	62	25	330x350x350
			380	60	3500			900	1.5	950	1.4	1500	2.3	67		
RB-101	1	1.5	220	50	2800	0.75	3.5	800	1	850	0.96	1400	1.6	62	27	330x350x350
			380	60	3500			1000	1.3	1050	1.2	1800	2	67		
RB-202B	2	1.5	220	50	2800	1.5	5.5	1400	0.8	1500	0.7	1900	1.8	68	39	355x365x370
			380	60	3500			1800	1	1900	0.9	2400	2.3	73		
RB-202	2	2	220	50	2800	1.5	5.5	1000	1.6	1050	1.4	1700	3	70	42	390x430x420
			380	60	3500			1200	2	1300	1.8	2100	3.8	75		
RB-303	3	2	220	50	2800	2.2	8	1200	1.9	1300	1.8	1900	4.2	77	50	390x420x430
			380	60	3500			1500	2.4	1600	2.3	2300	5.2	82		
RB-505	5	2	220	50	2800	3.7	13	1600	3.3	1700	3.2	2300	6.5	78	68	480x450x460
			380	60	3500			2000	4.1	2100	4	2900	8.1	83		
RB-707	7.5	2.5	220	50	2800	5.5	19	1400	5.2	1500	5	2700	7.6	78	90	590x530x540
			380	60	3500			1700	6.5	1800	6.3	3200	9.5	83		
RB-1010	10	2.5	220	50	2800	7.5	25	1800	5.6	1900	5.4	3200	10.4	78	105	590x530x510
			380	60	3500			2200	7	2300	6.7	4000	13	83		
RB-1515	15	4	220	50	2800	11	36	700	11.2	800	9.6	2000	16.8	80	175	670x630x650
			380	60	3500			900	14	1200	10	2500	21	85		
RB-1520	20	4	220	50	2800	15	47	800	9.6	1000	8	2400	18.4	80	182	670x630x690
			380	60	3500			1000	12	1200	10	3000	23	85		

ตารางที่ ค-2 มาตรฐานของอิฐทนไฟ

DESCRIPTION SHAPE	BRICK NO.	DIMENSION IN MM.			
		A	B	H	L
STRAIGHT 	ST-76 ST-64		76	115	230
			64	115	230
SPLIT 	SP-50		50	115	230
	SP-38		38	115	230
	SP-32		32	115	230
	SP-25		25	115	230
SIDE ARCH 	SA-70	76	70	115	230
	SA-64	76	64	115	230
	SA-50	76	50	115	230
END ARCH 	EA-70	76	70	115	230
	EA-64	76	64	115	230
	EA-50	76	50	115	230
KEY 	KE-102	115	102	76	230
	KE-89	115	89	76	230
	KE-76	115	76	76	230

ตารางที่ ค-3 สมบัติเกี่ยวกับความร้อนของโลหะที่สำคัญ

ชนิดของโลหะ	อุณหภูมิ (°C)	c_p (J/kgK)	ρ (kg/m ³)	k W/mK	$\alpha \times 10^5$ (m ² /s)
คอนกรีต	20	879	1900-2300	0.814-1.40	0.0490-0.0697
	20	837	1600	0.692	0.0516
	20	837	2050	1.320	-
	200	837	3010	2.32	0.0929
แก้ว	20	837	2700	0.762	0.0330
พลาสติกเกอร์	20	837	1442	0.485	0.0413
หินอ่อน	20	808	2499-2707	2.751	0.0394
หินแกรนิต	20	816	2543	1.73-3.98	0.080-0.183
ไม้เนื้ออ่อน	30	2500	400-460	0.100	
ไม้เนื้อแข็ง	30		481-650	0.140-0.170	
แอลูมิเนียม	0	816	577	0.151	
	100	816	577	0.192	
น้ำ	20	1298	80.1	0.0589	0.194
ไม้คอก	30		160	0.0433	
ขงนกะ	30		330	0.0519	
โสนแก้ว	20	670	200	0.0398	0.0284
โชน	20	1382	57.7	0.0363	0.0439
ดิน	20	1842	2050	0.519	0.0139
น้ำแข็ง	0	1926	913	2.22	0.124

ตารางที่ ค-4 สมบัติต่าง ๆ ของวัสดุฉนวน

MATERIAL	PROPERTIES AT 293 K OR 20°C			
	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg·K)	k (W/m·K)	$\alpha \times 10^5$ (m ² /s)
Asbestos	353	816	0.113	0.036
Asphalt	2120		0.698	
Bakelite	1270		0.233	
Brick				
Common	1500	840	0.38-0.52	0.028-0.034
Carborundum (50% SiC)	2200		5.82	
Magnesite (50% MgO)	2000		2.68	
Masonry	1700	837	0.658	0.046
Silica (95% SiO ₂)	1900		1.07	
Zircon (62% ZrO ₂)	3600		2.44	
Cardboard			0.14-0.35	
Cement, hard			1.047	
Clay (43.7% moisture)	1545	880	1.26	0.101
Coal, anthracite	1370	1260	0.238	0.013-0.015
Concrete, dry	500	837	0.128	0.049
Cork, boards	150	1530	0.042	0.015-0.044
Cork, expanded	120		0.036	
Diatomaceous earth	455	579	0.126	0.031
Earth, clayey (28% moisture)	1550		1.51	
Earth, sandy (8% moisture)	1500		1.05	
Glass fiber	220		0.035	
Glass, window	2800	800	0.81	0.034
Glass, wool	50		0.037	
	100		0.036	
	200	670	0.040	0.028
Granite	2750		3.0	
Ice (0°C)	913	1830	2.22	0.124
Kapok	25		0.035	
Linoleum	535		0.081	
Mica	2900		0.523	
Pine bark	342		0.080	
Plaster	1800		0.814	
Plexiglas	1180		0.195	
Plywood	590		0.109	
Polystyrene	1050		0.157	
Rubber, Buna	1250		0.465	
Hard (ebonite)	1150	2009	0.163	0.0062
Spongy	224		0.055	
Sand, dry			0.582	
Sand, moist	1640		1.13	
Sawdust	215		0.071	
Wood				
Oak	609-801	2390	0.17-0.21	0.0111-0.0121
Pine, fir, spruce	416-421	2720	0.15	0.0124
Wood fiber sheets	200		0.047	
(celotex)	400		0.055	
Wool	200		0.038	

Source: E. R. G. Eckert and R. M. Drake, *Analysis of Heat and Mass Transfer*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1972; K. Raznjević, *Handbook of Thermodynamic Tables and Charts*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1976; F. Kreith, *Principles of Heat Transfer*, 3rd ed., Crowell, New York, 1973.

ตารางที่ ค-5 ชุดตลับลูกปืนวายแบบพลัมเมอร์บล็อคชนิดตัวเสื้อเป็นเหล็กหล่อ

ความถี่รอบต่อวินาที	50	60	70	8.1	90	92	95	99	99.5	99.9
Z_c	0.000	0.254	0.525	1.000	1.288	1.405	1.645	2.326	2.575	3.091
										3.719

Dimensions		Mass Designations										Housing		Y-bearing	
d	A	A ₁	H	H ₁	H ₂	J _{max}	J _{min}	L	N	N ₁	G	S ₁	Unit		
mm.															
50	54	34	114	57.2	22	149	165	203	26	18	16	32.7	SY 50 FM	SY 510 M	YET 210
												38.1	SY 50 WM	SY 510 M	YEL 210
												32.6	SY 50 TF	SY 510 M	YAR 210-2F
55	60	35	125	63.5	24	162	181	219	27.5	18	16	36.4	SY 55 FM	SY 511 M	YET 211
												43.6	SY 55 WM	SY 511 M	YEL 211
												33.4	SY 55 TF	SY 511 M	YAR 211-2F
60	60	42	137	69.9	26.5	179	202	240	29.5	18	16	46.8	SY 60 WM	SY 512 M	YEL 212
												39.7	SY 60 TF	SY 512 M	YAR 212-2F
65	65	44	150	76.2	29	190	216	257	35	22	20	42.9	SY 65 TF	SY 513 M	YAR 213-2F
70	65	46	155	79.4	29	202	218	260	30	22	20	44.4	SY 70 TG	SY 514	YAJ 214-2F
80	78	50	175	88.9	30	219	245	290	35	22	20	49.3	SY 80 TG	SY 516	YAJ 216-2F
90	88	54	200	101.6	34	253	271	327	35	26	24	56.3	SY 90 TG	SY 518	YAJ 218-2F
100	95	57	225	115	38	286	330	380	48	26	24	66	SY 100 TG	SY 520	YAJ 220-2F

ตารางที่ ค-6 ตัวเลขเทียบเท่าของลวดเชื่อมและแผ่นโลหะ

Name of gauge:	American or Brown & Sharpe	Birmingham or Scabs iron wire	United States Standard	Manufacturers Standard†	Steel wire or Washburn & Moen	Music wire	Scabs steel wire	Twist drill
Principal use:	Nonferrous sheet, wire, and rod	Tubing, ferrous strip, flat wire, and spring steel	Ferrous sheet and plate, 480 lb/ft ³	Ferrous sheet	Ferrous wire except music wire	Music wire	Steel drill rod	Twist drills and drill steel
20	0.500 0	0.500	0.500	0.500	0.490 0			
18	0.516 5	0.516	0.468 75	0.468 75	0.461 5	0.004		
16	0.440 0	0.454	0.406 25	0.406 25	0.393 8	0.006		
14	0.404 8	0.425	0.375	0.375	0.362 5	0.007		
12	0.364 8	0.380	0.343 75	0.343 75	0.331 0	0.008		
10	0.321 4	0.340	0.312 5	0.312 5	0.306 5	0.009		
8	0.289 3	0.300	0.281 25	0.281 25	0.283 0	0.010	0.227	0.228 0
6	0.257 6	0.284	0.265 625	0.265 625	0.262 5	0.011	0.219	0.221 0
4	0.229 4	0.259	0.25	0.25	0.243 7	0.012	0.212	0.213 0
3	0.204 3	0.238	0.234 375	0.234 375	0.225 3	0.013	0.207	0.209 0
2	0.181 9	0.220	0.218 75	0.218 75	0.209 2	0.014	0.204	0.205 5
1	0.162 0	0.203	0.203 125	0.203 125	0.194 3	0.016	0.201	0.204 0
7	0.144 3	0.180	0.187 5	0.187 5	0.177 0	0.018	0.199	0.201 0
6	0.128 5	0.165	0.171 875	0.171 875	0.164 4	0.020	0.197	0.199 0
5	0.114 4	0.148	0.156 25	0.156 25	0.149 5	0.022	0.194	0.196 0
4	0.101 9	0.134	0.140 625	0.140 625	0.135 0	0.024	0.191	0.193 5
3	0.090 74	0.120	0.125	0.125	0.119 6	0.026	0.188	0.191 0
2	0.080 81	0.109	0.109 357	0.109 357	0.104 6	0.029	0.185	0.189 0
1	0.071 96	0.095	0.093 75	0.093 75	0.089 7	0.031	0.182	0.185 0
14	0.064 08	0.083	0.078 125	0.078 125	0.074 7	0.033	0.180	0.182 0
13	0.057 07	0.072	0.070 312 5	0.070 312 5	0.067 3	0.035	0.178	0.180 0
12	0.050 82	0.063	0.062 5	0.062 5	0.059 8	0.037	0.175	0.177 0
11	0.045 26	0.058	0.056 25	0.056 25	0.053 8	0.039	0.172	0.173 0
10	0.040 30	0.049	0.05	0.05	0.047 8	0.041	0.168	0.169 5
9	0.035 89	0.042	0.043 75	0.043 75	0.041 8	0.043	0.164	0.166 0
8	0.031 96	0.035	0.037 5	0.037 5	0.035 9	0.045	0.161	0.161 0
7	0.028 46	0.032	0.034 375	0.034 375	0.032 9	0.047	0.157	0.159 0
6	0.025 35	0.028	0.031 25	0.031 25	0.029 9	0.049	0.155	0.157 0
5	0.022 57	0.025	0.028 125	0.028 125	0.026 9	0.051	0.153	0.154 0
4	0.020 10	0.022	0.025	0.025	0.023 9	0.053	0.151	0.152 0
3	0.017 90	0.020	0.021 875	0.021 875	0.020 9	0.059	0.148	0.149 5

ตารางที่ ค-7 ลักษณะการพาความร้อน

ประเภทการพาความร้อนและชนิดของของไหล	$\bar{h}(W / m^2 \cdot K)$
การพาความร้อนแบบอิสระ,อากาศ	5-25
การพาความร้อนแบบอิสระ,น้ำ	20-100
การพาความร้อนแบบบังคับ,อากาศ	10-200
การพาความร้อนแบบบังคับ,น้ำ	50-10000
น้ำกำลังเดือด	3000-100000
ไอของน้ำที่กำลังกลั่นตัว	5000-100000

ตารางที่ ค-8 ความหนาของผนัง

Nominal size, in	Outside diameter, in	Threads per inch	Wall thickness, in		
			Standard No. 40	Extra strong No. 80	Double extra strong
$\frac{1}{8}$	0.405	27	0.070	0.098	
$\frac{1}{4}$	0.540	18	0.090	0.122	
$\frac{3}{8}$	0.675	18	0.093	0.129	
$\frac{1}{2}$	0.840	14	0.111	0.151	0.307
$\frac{3}{4}$	1.050	14	0.115	0.157	0.318
1	1.315	11 $\frac{1}{2}$	0.136	0.183	0.369
1 $\frac{1}{2}$	1.660	11 $\frac{1}{2}$	0.143	0.195	0.393
1 $\frac{3}{4}$	1.900	11 $\frac{1}{2}$	0.148	0.204	0.411
2	2.375	11 $\frac{1}{2}$	0.158	0.223	0.447
2 $\frac{1}{2}$	2.875	8	0.208	0.282	0.565
3	3.500	8	0.221	0.306	0.615
3 $\frac{1}{2}$	4.000	8	0.231	0.325	
4	4.500	8	0.242	0.344	0.690
5	5.563	8	0.263	0.383	0.768
6	6.625	8	0.286	0.441	0.884
8	8.625	8	0.329	0.510	0.895

ตารางที่ ค-9 แสดงการขยายตัวของท่อเหล็ก

ท่อประเภทต่าง ๆ	ϵ , ฟุต	ϵ , มิลลิเมตร
ท่อที่ได้จากการรีดท่อทองเหลือง,ท่อดีบุก,ท่อซีเมนต์ ที่หล่อโดยการเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง,ท่อที่เคลือบด้วยบิทูมินัส	0.000005	0.0015
ท่อเหล็กเหนียวที่ขายในอุตสาหกรรมหรือwrought iron	0.00015	0.046
ท่อเหล็กแบบขึ้นรูปโดยการเชื่อม	0.00015	0.046
ท่อเหล็กหล่อเคลือบยางมะตอย	0.0004	0.12
ท่อชุบสังกะสี	0.0005	0.15
ท่อเหล็กหล่อ	0.00085	0.25
ท่อไม้	0.0006-0.003	0.18-0.9
ท่อคอนกรีต	0.001-0.01	0.3-3
ท่อเหล็กที่ย้ามนุค	0.003-0.03	0.9-9

ตารางที่ ค-10 ขนาดของเหล็กท่อกกลม

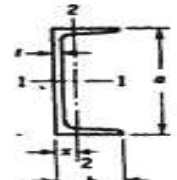
w_u = weight per foot of aluminum tubing, lb/ft
 w_s = weight per foot of steel tubing, lb/ft
 A = area, in²
 I = moment of inertia, in⁴
 k = radius of gyration, in
 Z = section modulus, in³



Size	w_u	w_s	A	I	k	Z
1 x 1/8	0.416	1.128	0.344	0.034	0.313	0.097
1 x 1/4	0.713	2.003	0.589	0.046	0.280	0.092
1 1/2 x 1/8	0.653	1.769	0.540	0.129	0.488	0.172
1 1/2 x 1/4	1.188	3.338	0.982	0.199	0.451	0.266
2 x 1/8	0.891	2.670	0.736	0.325	0.694	0.325
2 x 1/4	1.663	4.673	1.374	0.537	0.625	0.517
2 1/2 x 1/8	1.129	3.050	0.933	0.660	0.811	0.528
2 1/2 x 1/4	2.138	6.008	1.767	1.132	0.800	0.906
3 x 1/8	2.614	7.343	2.160	2.059	0.976	1.373
3 x 1/4	3.742	10.51	3.093	2.718	0.938	1.812
4 x 1/8	2.717	7.654	2.246	4.090	1.350	2.045
4 x 1/4	5.167	14.52	4.271	7.090	1.289	3.544

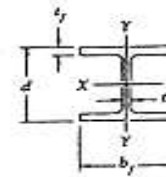
ตารางที่ ค-11 ขนาดของเหล็กตัว U-Shape

w_u = weight per foot of aluminum sections, lb
 w_s = weight per foot of steel sections, lb
 A = area, in²
 I = moment of inertia, in⁴
 k = radius of gyration, in
 x = centroidal distance, in
 Z = section modulus, in³



a	b	t	A	w_u	w_s	I_{1-1}	k_{1-1}	Z_{1-1}	I_{2-2}	k_{2-2}	Z_{2-2}	x
3	1.410	0.170	1.21	1.46	4.1	1.66	1.17	1.10	0.20	0.40	0.20	0.44
3	1.498	0.258	1.47	1.78	5.0	1.85	1.12	1.24	0.25	0.41	0.23	0.44
3	1.596	0.356	1.76	2.13	6.0	2.07	1.08	1.38	0.31	0.42	0.27	0.46
4	1.580	0.180	1.57	1.90	5.4	3.83	1.56	1.92	0.32	0.45	0.28	0.46
4	1.720	0.320	2.13	2.58	7.25	4.58	1.47	2.29	0.43	0.45	0.34	0.46
5	1.750	0.190	1.97	2.38	6.7	7.49	1.95	3.00	0.48	0.49	0.38	0.48
5	1.885	0.325	2.64	3.20	9.0	8.90	1.83	3.56	0.63	0.49	0.45	0.48
6	1.920	0.200	2.40	2.91	8.2	13.12	2.34	4.37	0.69	0.54	0.49	0.51
6	2.034	0.314	3.09	3.73	10.5	15.18	2.22	5.06	0.87	0.53	0.56	0.50
6	2.157	0.437	3.82	4.63	13.0	17.39	2.13	5.80	1.05	0.52	0.64	0.51
7	2.090	0.210	2.87	3.47	9.8	21.27	2.72	6.08	0.97	0.58	0.63	0.54
7	2.194	0.314	3.60	4.36	12.25	24.24	2.60	6.93	1.17	0.57	0.70	0.52
7	2.298	0.419	4.33	5.24	14.75	27.24	2.51	7.78	1.38	0.56	0.78	0.53
8	2.260	0.220	3.36	4.10	11.5	32.30	3.10	8.10	1.30	0.63	0.79	0.58
8	2.343	0.303	4.04	4.89	13.75	36.11	2.99	9.03	1.53	0.61	0.85	0.55
8	2.527	0.487	5.51	6.67	18.75	43.96	2.82	10.99	1.98	0.60	1.01	0.57
9	2.430	0.230	3.91	4.74	13.4	47.68	3.49	10.60	1.75	0.67	0.96	0.60
9	2.485	0.285	4.41	5.34	15.0	51.02	3.40	11.34	1.93	0.66	1.01	0.59
9	2.648	0.448	5.88	7.11	20.0	60.92	3.22	13.54	2.42	0.64	1.17	0.58
10	2.600	0.240	4.49	5.43	15.3	67.37	3.87	13.47	2.28	0.71	1.16	0.63
10	2.789	0.379	5.88	7.11	20.0	78.95	3.66	15.79	2.81	0.69	1.32	0.61
10	2.886	0.526	7.35	8.89	25.0	91.20	3.52	18.24	3.36	0.68	1.48	0.62
10	3.033	0.673	8.82	10.67	30.0	103.45	3.43	20.69	3.95	0.67	1.66	0.65
12	3.047	0.387	7.35	8.89	25.0	144.37	4.43	24.06	4.47	0.78	1.89	0.67
12	3.170	0.510	8.82	10.67	30.0	162.08	4.29	27.01	5.14	0.76	2.06	0.67

ตารางที่ ค-12 ขนาดของเหล็กตัว W-Shape



W Shapes
(Wide-Flange Shapes)

Designation†	Area A, mm ²	Depth d, mm	Flange		Web Thick- ness t _w , mm	Axis X-X			Axis Y-Y		
			Width b _f , mm	Thick- ness t _f , mm		I _x 10 ⁴ mm ⁴	S _x 10 ³ mm ³	r _x mm	I _y 10 ⁴ mm ⁴	S _y 10 ³ mm ³	r _y mm
W310 × 143	19300	323	309	22.9	14.0	347	2150	135.2	112.4	725	75.5
167	17600	311	306	17.0	10.9	245	1593	134.9	61.2	531	77.2
74	9450	310	203	16.3	9.4	164.0	1053	131.6	23.4	225	49.5
60	7610	303	203	13.1	7.5	129.0	851	130.3	16.36	150.9	49.0
52	6650	317	167	13.2	7.6	115.6	745	133.4	10.20	122.2	39.1
44.5	5670	313	166	11.2	6.6	99.1	633	132.3	8.45	101.5	35.6
35.7	4940	310	165	9.7	5.5	84.9	545	131.3	7.20	87.3	35.4
32.7	4150	313	102	10.9	6.6	64.9	415	124.7	1.940	35.0	21.5
23.6	3040	305	101	6.7	5.6	42.9	251	118.6	1.174	23.2	19.63
W250 × 167	21200	259	265	31.5	19.2	295.0	2060	118.4	95.2	741	65.1
101	12900	264	257	19.6	11.9	164.0	1242	112.8	53.5	434	65.5
50	10200	256	253	15.6	9.4	126.1	955	111.0	42.5	336	65.0
67	8580	257	204	15.7	8.9	103.2	607	110.0	22.2	218	51.1
55	7420	252	203	13.5	8.0	87.0	690	109.5	16.73	154.5	50.3
49.1	6160	247	202	11.0	7.4	70.5	573	106.4	15.23	150.5	49.3
44.5	5700	266	145	13.0	7.6	70.5	532	111.3	6.95	95.9	34.5
32.7	4190	258	146	9.1	6.1	49.1	351	108.5	4.75	65.1	33.8
29.4	3630	260	102	10.0	6.4	40.1	305	103.2	1.796	35.2	22.2
22.3	2550	254	102	6.9	5.5	25.7	226	100.3	1.203	23.6	20.6
W200 × 86	11000	222	209	20.6	13.0	94.9	855	91.7	31.3	300	53.3
71	9100	216	206	17.4	10.2	76.6	709	91.7	25.3	246	52.8
59	7550	210	203	14.2	9.1	60.5	579	89.7	20.4	199.0	51.8
52	6650	206	204	12.6	7.9	52.9	514	89.2	17.73	173.5	51.6
46.1	5590	203	203	11.0	7.2	43.5	451	88.1	15.44	152.1	51.3
41.7	5320	205	166	11.8	7.2	40.6	356	87.6	9.03	105.5	41.1
35.9	4570	201	165	10.2	6.2	34.5	343	86.9	7.62	92.4	40.9
31.3	3970	210	134	10.2	6.4	31.3	295	85.6	4.07	60.7	32.0
26.6	3390	207	133	8.4	5.8	25.5	249	87.1	3.32	49.9	31.2
22.5	2560	206	102	6.0	6.2	20.0	194.2	83.6	1.419	27.8	22.3
19.3	2450	203	102	6.5	5.6	16.45	162.4	81.5	1.136	22.3	21.4
W150 × 37.1	4740	162	154	11.6	8.1	22.2	274	68.6	7.12	92.5	38.6
29.8	3790	157	153	9.3	6.6	17.23	219	67.6	5.54	72.4	38.1
24.0	3060	160	102	10.3	6.6	13.36	167.0	66.0	1.844	36.2	24.6
18.0	2290	153	102	7.1	5.6	9.30	130.3	63.2	1.245	24.4	23.3
13.5	1730	150	100	5.5	4.3	6.83	91.1	62.7	0.916	18.32	23.0
W130 × 28.1	3590	131	128	10.9	6.9	10.91	168.6	55.1	3.80	59.4	32.5
23.5	3040	127	127	9.1	6.1	8.57	139.7	54.1	3.15	49.3	32.3
W100 × 19.3	2470	108	103	6.8	7.1	4.70	88.7	43.7	1.607	31.2	25.4

†A wide-flange shape is designated by the letter W followed by the nominal depth in millimeters and the mass in kilograms per meter.

ตารางที่ ค-13 สมบัติทางกลของเหล็กกล้า

Material condition *	Size Ø (mm.)	Avg. Strength		Endurance Limit ⁺ S'_e (MPa)	Elongation % (50.4 mm. gauge length)	Hardness BHN
		yield S'_{yl} (MPa)	ultimate S'_{ut} (MPa)			
Wrought iron as rolled	245 [⊖]	470 [⊖]		158 (long.) 131 (trans.)	35	105
1010 cast		179	406		13	126
cast & annealed		241	413		30	116
cold rolled		303	365	207		
1015 cast		241-289	393-489	217	25	120
hot rolled	25.4	310	420		39	126
cold drawn	25.4	427	510	276	24	143
annealed	25.4	284	386		37	111
normalized	12.7	331	434		38.6	126
	25.4	324	424		37	121
	50.8	307	413		37.5	116
	101.6	288	407		36.5	116
1117 hot rolled	25.4	303	482		33	137
cold drawn	25.4	455	537	276	20	156
annealed	25.4	279	427		32.8	121
1030 cast		289-338	489-586		20	140
as rolled	12.7	351	551		32	179
normalized	25.4	344	520		32	149
annealed	25.4	341	427		32.8	121
WQT 538 °C	25.4	469	606	296	28	179
649 °C	25.4	441	586		30	170
1035 as rolled		379	586	276	29	190
WQT 315 °C	25.4	599	813		11	240
538 °C	25.4	503	701		22	200
704 °C	25.4	393	586		29	170

⊖ Boxed values are minimum strengths to be expected

+ Reversed bending; number of cycles is indefinitely large

* Temperatures given are Tempering temperatures.

ตารางที่ ค-13 สมบัติทางกลของเหล็กกล้า(ต่อ)

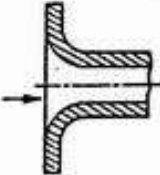
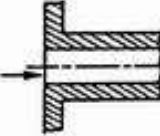
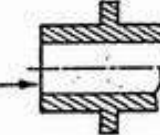
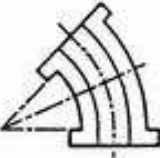
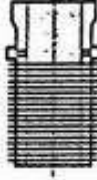
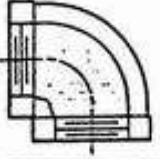
Material condition *	Size Ø (mm.)	Avg. Strength		Endurance Limit ⁺ S' _e (MPa)	Elongation % (50.4 mm. gage length)	Hardness BHN
		yield S' _{yt} (MPa)	ultimate S' _{ut} (MPa)			
1050 cast		434-531	682-779		15	190
as rolled	12.7	400	703		18	229
annealed	25.4	365	634		23.7	187
cold drawn	25.4	655	779		12	229
OQT 593 °C	12.7	558	841		22.8	248
	50.8	469	772		23	223
	101.6	403	696		25	207
WQT 593 °C	12.7	606	820		21.7	241
	50.8	541	806		23	235
	101.6	469	778		23.7	229
1095 normalized		551	971		8	285
annealed		379	758	358	20	200
OQT 427 °C		896	1295	689	10	380
704 °C		455	896	469	16	300
OQT 593 °C	101.6	448	896		17	262
1320 OQT 427 °C		689	896	345	18	262
704 °C		331	517	317	30	140
8630 cast		586	827		17	300
cast	12.7	861		448		286
cold drawn		689	792	427	22	222
(10%)				(drawn 20%)		
WQT 427 °C	12.7	1 199	1 275		14	375
593 °C	12.7	861	944		20	285
593 °C	101.6	496	661		25	197

⊖ Boxed values are minimum strengths to be expected

+ Reversed bending; number of cycles is indefinitely large

* Temperatures given are Tempering temperatures.

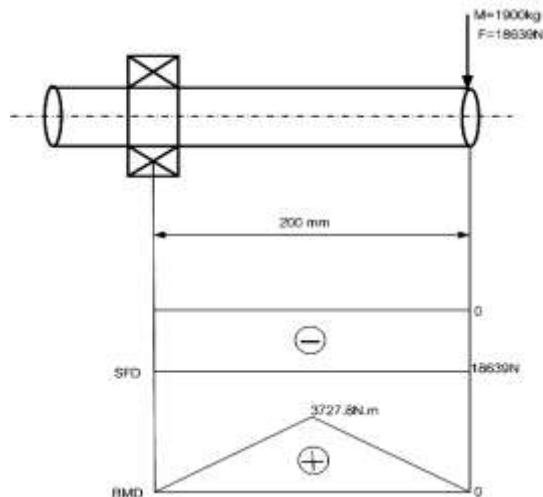
ตารางที่ ค-14 แสดงลักษณะการต่อท่อ

	Well-rounded entrance or bell-mouth inlet $K = 0.05$		Flanged 90° elbow $K = 0.31$ (regular) $K = 0.22$ (long radius)
	Square-edged inlet $K = 0.5$		Threaded 45° elbow $K = 0.35$ (regular)
	Reentrant inlet or inward-projecting pipe $K = 1.0$		Flanged 45° elbow $K = 0.17$ (long radius)
	Basket strainer $K = 1.3$		Threaded return bend $K = 1.5$ (regular)
	Foot valve $K = 0.8$		Flanged return bend $K = 0.30$ (regular) $K = 0.20$ (long radius)
	Threaded 90° elbow $K = 1.4$ (regular) $K = 0.75$ (long radius)		

Note: Many fittings have losses that vary with nominal diameter D_n ; K for threaded fittings is taken at $D_n = 1$ in.; K for flanged fittings is taken at $D_n = 4$ in.

ภาคผนวก ง.
การคำนวณค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการดำเนินงานวิจัย

ง-1. การคำนวณเพลานูนเอียงเท



รูปที่ ง-1 สภาวะของเพลานูนเมื่อได้รับแรงที่มากกระทำ

กำหนดค่าในการคำนวณ

- เลือกอัตราคูณเพื่อความปลอดภัยต่ำสุด (f_s) = 1.3
- ต้องการความเชื่อถือได้สูงเพื่อความปลอดภัย = 50%
- ค่าความต้านแรงได้จากตารางเพื่อความปลอดภัยอีก = 20%
- ชี้นงานเสียหายไม่ได้ เพื่อความปลอดภัยอีก = 40%
- ต้องการลดราคาต่ำลงจึงลด f_s = 10%

$$\therefore \text{ใช้ } f_s = 1.3 \times 1.5 \times 1.2 \times 1.4 \times 0.9 = 3$$

โมเมนต์ดัดสูงสุดเป็นจุดวิกฤติในการออกแบบ

$$\sigma = \frac{32M}{\pi(D^3 - d^3)}$$

เมื่อ M = โมเมนต์ดัด 3727.8 N.m

D = เส้นผ่าศูนย์กลางนอกของเพลานูน 70 mm

d = เส้นผ่าศูนย์กลางในของเพลานูน 45 mm

แทนค่า

$$\sigma = \frac{32 \times 3727.8 \times 10^3}{\pi(70^3 - 45^3)} = 150.75 \text{ MPa}$$

คำนวณความต้านแรงจากสมการ

$$S_y = K_{1f} \cdot K_{2f} \cdot K_{3f} \cdot K_{4f} \cdot K_{5f} \cdot K_{6f} \cdot S'$$

$$K_{1f} = K_{2f} = K_{4f} = K_{5f} = K_{6f} = 1$$

$$K_{3f} = \frac{1 - \sigma^0 Zr}{1 - \sigma^0 Zt}$$

เมื่อ $\sigma^0 = 4\%$

$$Zr = 1.000 \text{ (ที่ความเขี้ยวได้ 84\%)}$$

$$Zt = 0.000$$

$$K_{3f} = \frac{1 - (4\% \times 1.000)}{1 - (4\% \times 0.000)} = 0.96$$

$$S_y = 0.96 S'$$

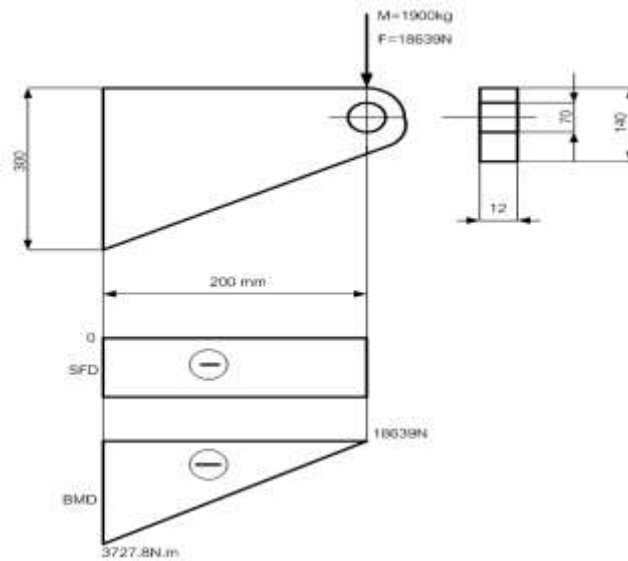
$$\sigma \leq \frac{S_y}{f_s}$$

$$150.75 \leq \frac{0.96 S'}{3}$$

$$\therefore S' \geq 484.10 \text{ MPa}$$

เลือกใช้เหล็กเกรด 1117 hot roll, $S'_y=303 \text{ MPa}$, Elongation 33, Hardness 137BHN

ง-2. การคำนวณหุเตาหลอม



รูปที่ ง-2 สภาวะของหุเตาหลอมเมื่อได้รับแรงที่มากระทำ

การกำหนดค่าในการคำนวณ

- เลือกอัตราคูณเพื่อความปลอดภัยต่ำสุด (f_s) = 1.3
- ต้องการความเชื่อถือได้สูงสุดเพิ่ม f_s = 50%
- ค่าความต้านแรงที่ได้จากรางเพิ่ม f_s = 15%
- เนื่องจากงานมีรูเจาะเพิ่ม f_s = 10%
- ชิ้นงานเสียหายไม่ได้ เพิ่ม f_s = 30%
- ต้องการราคาต่ำจึงลด f_s ลง = 10%

$$\therefore \text{ใช้ } f_s = 1.3 \times 1.5 \times 1.15 \times 1.1 \times 1.3 \times 0.9 = 3$$

คุณสมบัติของเหล็กกล้าที่นิยมใช้

$$S_y = 345 \text{ MPa}$$

$$\therefore \sigma_{allow} = \frac{S_y}{f_s} = \frac{345}{3} = 115 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{allow} = \frac{MC}{I}$$

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{b(0.14^3 - 0.07^3)}{12} = (2.000 \times 10^{-4}) b$$

$$C = \frac{0.14}{2} = 0.07$$

แทนค่า

$$\sigma_{allow} = \frac{MC}{I}$$

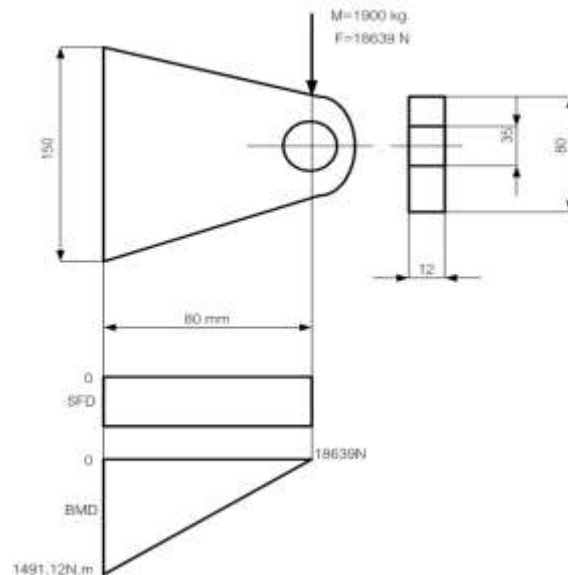
$$115 \times 10^6 = \frac{3727.8 \times 0.07}{(2.000 \times 10^{-4})b}$$

$$\therefore b = \frac{3727.8 \times 0.07}{(115 \times 10^6)(2.000 \times 10^{-4})} \times 1000$$

$$= 11.35 \text{ mm}$$

$\therefore$ ควรเลือกใช้เหล็กแผ่นที่มีความหนา $\geq 11.35 \text{ mm}$

ง-3. คำนวณหุ้เกี่ยวเตาหลอมสำหรับเอียงเท



รูปที่ ง-3 สภาวะของหุ้เกี่ยวเตาสำหรับเอียงเทเมื่อได้รับแรงที่มากกระทำ

กำหนดค่าในการคำนวณ

- เลือกอัตราคูณเพื่อความปลอดภัยต่ำสุด (f_s) = 1.3
- ต้องการความเชื่อถือได้สูง เพิ่ม f_s = 50%
- ค่าความต้านแรงที่ได้จากตารางเพิ่ม f_s = 15%
- เนื่องจากงานมีรูเจาะ เพิ่ม f_s = 30%
- ชิ้นงานเสียหายไม่ได้ เพิ่ม f_s อีก = 50%
- ต้องการราคาต่ำลงจึงลด f_s = 40%

$$\therefore \text{ใช้ } f_s = 1.3 \times 1.5 \times 1.15 \times 1.3 \times 1.5 \times 0.6 = 2.7$$

คุณสมบัติของเหล็กกล้าที่ใช้

$$S_y = 345 \text{ MPa}$$

$$\therefore \sigma_{allow} = \frac{S_y}{f_s} = \frac{345}{3} = 128 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{allow} = \frac{MC}{I}$$

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{b(0.08^3 - 0.035^3)}{12} = (3.9 \times 10^{-5})b$$

$$C = \frac{h}{2} = \frac{0.08}{2} = 0.04$$

แทนค่า

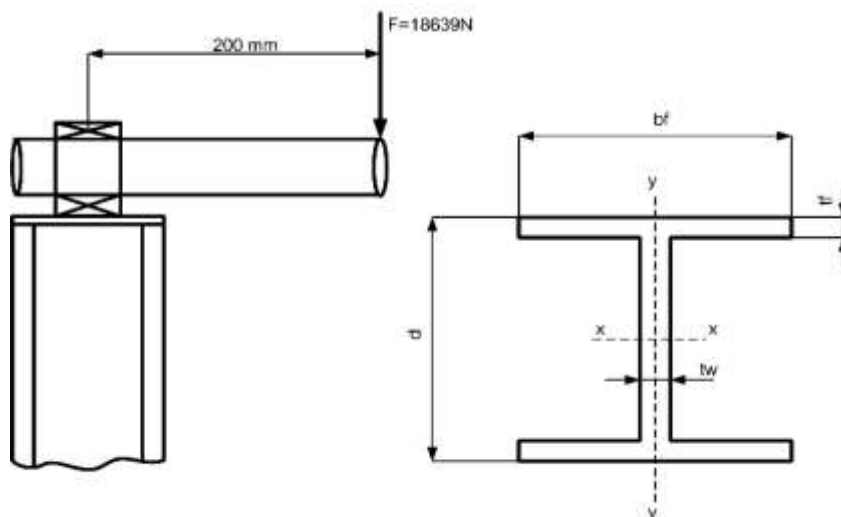
$$\sigma_{allow} = \frac{MC}{I}$$

$$128 \times 10^6 = \frac{1491.12 \times 0.04}{(3.9 \times 10^{-5})b}$$

$$\therefore b = \frac{1491.12 \times 0.04}{(128 \times 10^6)(3.9 \times 10^{-5})} \times 1000 = 11.9 \text{ mm}$$

$\therefore$ ควรเลือกใช้เหล็กแผ่นที่มีความหนา $\geq 11.9 \text{ mm}$

ง-4. การคำนวณหาขนาดเสาเดาหลอม



รูปที่ ง-4 สภาวะของเสาเดาหลอมเมื่อได้รับแรงที่มากระทำ

กำหนดค่าในการคำนวณ

- เลือกอัตราคูณเพื่อความปลอดภัยต่ำสุด (f_s) = 1.3
- ต้องการความเชื่อถือได้สูงเพื่อความปลอดภัย = 50%
- ค่าความต้านแรงที่ได้จากตารางเพื่อความปลอดภัยอีก = 20%
- ชีงงานเสียหายไม่ได้ เพิ่มความปลอดภัยอีก = 40%
- ต้องการลดราคาต่ำจึงลด f_s ลง = 10%

$$\therefore \text{ใช้ } f_s = 1.3 \times 1.5 \times 1.2 \times 1.4 \times 0.9 = 3$$

คุณสมบัติของเหล็กกล้าที่ใช้

$$S_y = 345 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{allow(bending)} = \frac{S_y}{f_s} = \frac{345}{3} = 115 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{all} &= \sigma_{centric} + \sigma_{bending} \\ &= \frac{P}{A} + \frac{MC}{I_x} = \frac{P}{A} + \frac{MC}{Ar_x^2} \end{aligned}$$

เลือก Wide Flange Shape of 150 mm (W-Shape) เมื่อ $C=77 \text{ mm}$, $r_x = 68.6 \text{ mm}$

แทนค่าในสมการ

$$\begin{aligned} \sigma_{all} &= \sigma_{centric} + \sigma_{bending} = \frac{P}{A} + \frac{MC}{I_x} = \frac{P}{A} + \frac{MC}{Ar_x^2} \\ 115 \times 10^6 &= \frac{18639 \text{ N}}{A} + \frac{(18639 \text{ N} \times 0.015)}{A(0.0686^2)} \end{aligned}$$

$$\therefore A = 678.6 \text{ mm}^2$$

$$\frac{L}{r_y} = \frac{1.035}{0.0386} = 26.8$$

$$E = 200 \text{ GPa}, \sigma_y = 345 \text{ MPa}$$

$$\therefore C_r = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{\sigma_y}} = \sqrt{\frac{2\pi^2 (200 \text{ GPa})}{345 \text{ MPa}}} = 107$$

$$\frac{L}{r_y} < C_r$$

$$\sigma_{all(centric)} = \frac{\sigma_y}{f_s} \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{L/r_y}{C_r} \right)^2 \right] = \frac{345}{3} \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{26.8}{107} \right)^2 \right] = 111.4 \text{ MPa}$$

W-Shape 150x37.1

$$\frac{P}{A} = \frac{18639}{4740} = 3.93 \text{ MPa}$$

$$\frac{MC}{I} = \frac{M}{S_x} = \frac{18639 \times 0.01035}{274} = 0.7 \text{ MPa}$$

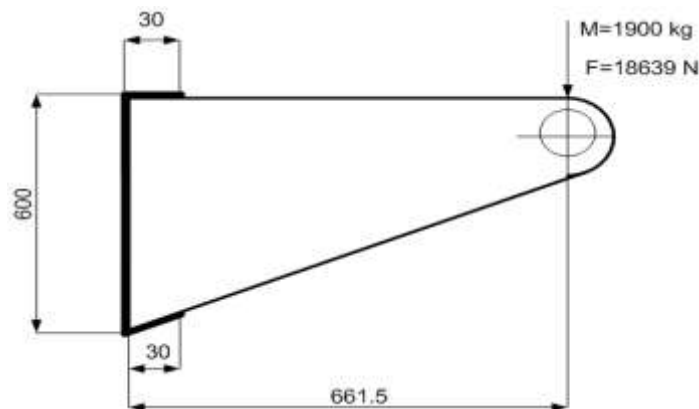
ดังนั้น

$$\frac{P/A}{\sigma_{all(centric)}} + \frac{MC/I}{\sigma_{all(bending)}} = \frac{3.93}{111.4} + \frac{0.7}{115} = 0.04$$

จะเห็นได้ว่า $0.04 < 1$ ใช้ได้

∴ ควรเลือกใช้ Wide Flange Shape W 150x37.1 หรือสูงกว่านี้ก็ได้

ง-5. การคำนวณหาขนาดของแนวเชื่อมที่หุเตาหลอม



รูปที่ ง-5 ขนาดของแนวเชื่อมที่หุเตาหลอม

ขั้นตอนที่ 1 : Find properties of weld, treating it as a line



$$N_y = \frac{b^2}{2b + d} = \frac{30^2}{(2 \times 30) + 600} = 1.4 \text{ mm}$$

$$J_w = \frac{(2b + d)^3}{12} - \frac{b^2(b + d)^2}{(2b + d)}$$

$$= \frac{((2 \times 30) + 600)^3}{12} - \frac{30^2(30 + 600)^2}{(2 \times 30) + 600}$$

$$= 234.1677273 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

$$A_w = 660 \text{ mm}$$

ขั้นตอนที่ 2 : Find the various force on weld, inserting property of weld found a bone.

Twisting (Horizontal Component)

$$f_{th} = \frac{T_c}{J_w} = \frac{18639 \times 30}{234.1677273 \times 10^6} = 2.38 \times 10^{-3} N / mm$$

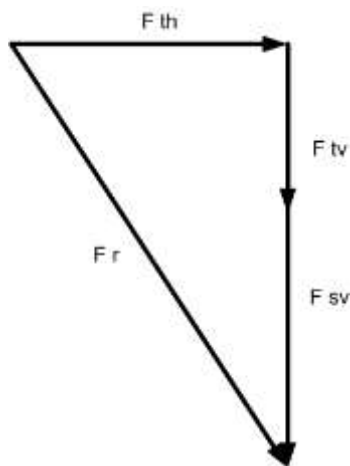
Twisting (Vertical Component)

$$f_{tv} = \frac{T_{cv}}{J_w} = \frac{18639 \times 30}{234.1677273 \times 10^6} = 2.38 \times 10^{-3} N / mm$$

Vertical Shear

$$f_{sv} = \frac{F}{A_w} = \frac{18639}{660} = 28.24 N / mm$$

ขั้นตอนที่ 3: Determine actual resultant force on weld

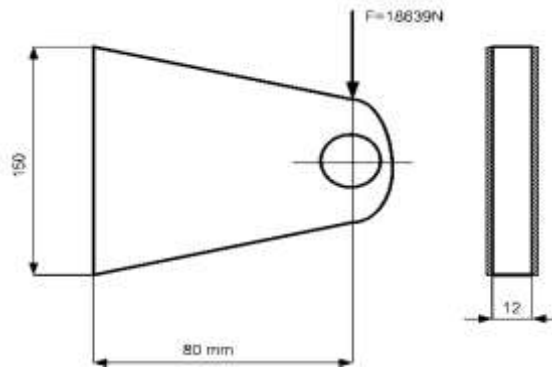


$$\begin{aligned} f_r &= \sqrt{f_{th}^2 + (f_{tv} + f_{sv})^2} \\ &= \sqrt{(0.00238)^2 + (0.00238 + 28.4)^2} \\ &= 28.4 N / mm \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 4 : Now find required leg size of fillet weld connecting the bracket

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{\text{actual force}}{\text{allowable force}} \\ &= \frac{28.4}{322} \geq 0.09 mm \end{aligned}$$

ง-6. การคำนวณหาขนาดแนวเชื่อมที่หูกึ่งวงโค้ง



รูปที่ ง-6 ขนาดของแนวเชื่อมที่หูกึ่งวงโค้ง

ขั้นตอนที่ 1 : Find properties of weld, treating it as a line

$$S_w = \frac{d^2}{3} = \frac{130^2}{3} = 5633.3 \text{ mm}$$

$$J_w = \frac{d(3b^2 + d^2)}{6}$$

$$= \frac{130((3 \times 150)^2 + 130^2)}{6} = 8.9 \times 10^{11} \text{ mm}^3$$

$$A_w = 260 \text{ mm}$$

ขั้นตอนที่ 2 : Find the various force on weld, inserting properties of weld found above.

Bending

$$f_b = \frac{M}{S_w} = \frac{1900 \times 150}{5633.3} = 50.6 \text{ N / mm}$$

Vertical Shear

$$f_{sv} = \frac{M}{A_w} = \frac{1900}{260} = 7.3 \text{ N / mm}$$

ขั้นตอนที่ 3: Determine actual resultant force on weld.

$$f_r = \sqrt{f_b^2 + f_{sv}^2}$$

$$= \sqrt{50.6^2 + 7.3}$$

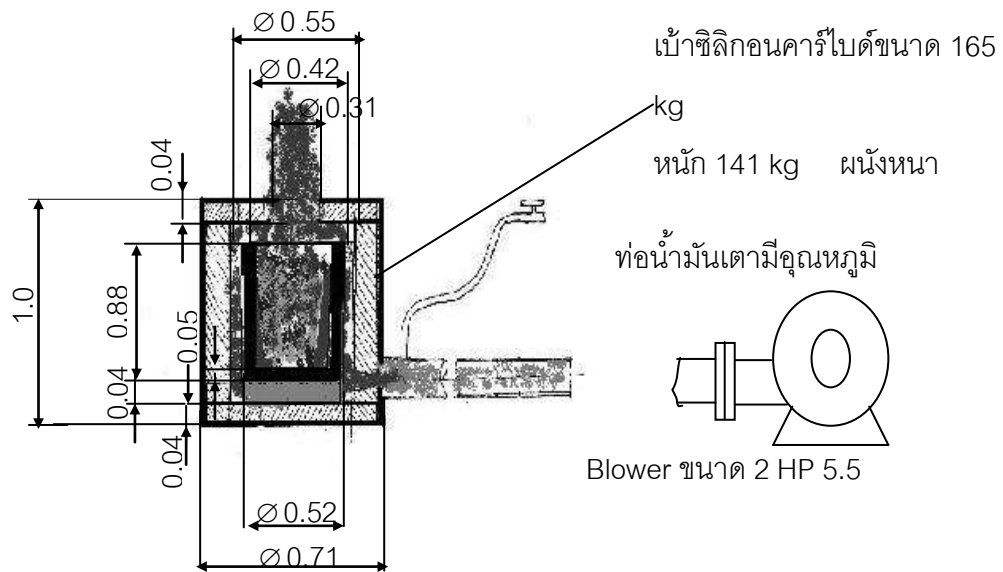
$$= 50.67 \text{ N / mm}$$

ขั้นตอนที่ 4: Now find required leg size of weld

$$\omega = \frac{\text{actual force}}{\text{allowable force}}$$

$$= \frac{50.67}{322} \geq 0.157 \text{ mm}$$

ง-7 การคำนวณค่าจากเตาหลอมแบบดั้งเดิม



รูปที่ ง-7 การทำงานของเตาหลอมแบบดั้งเดิม

ตารางที่ ง-1 แสดงลักษณะและคุณสมบัติของเตาหลอมแบบดั้งเดิม

รายการ	ขนาด	รายการ	ขนาด
ความสูงของเตาหลอม	1.00 m	ก้นเบ้าหนา	0.05 m
ความสูงของเบ้าหลอม	0.88 m	ความจุของเบ้า	165 kg
เส้นผ่าศูนย์กลางกลางเตาหลอม	0.71 m	ผนังเตาหนา	0.003 m
ปากเตากว้าง	0.31 m	ชั้นอิฐทนไฟหนา	0.08 m
ปากและก้นเบ้ากว้าง	0.52 m	อุณหภูมิน้ำมันเตาที่ใช้	37°C
เบ้าหนัก	141 kg	ต้นกำเนิดลมขนาด	2 HP5.5Amp
ผนังเบ้าหนา	0.05 m	ก้นเตาและฝาเตาหนา	0.04 m

ตารางที่ ง-2 ค่าที่ได้จากการวัดจากการทำงานของเตาหลอมแบบดั้งเดิมที่ดัดแปลงแล้ว

เวลาทำงาน (นาที)	อุณหภูมิเตา หลอม °C	อุณหภูมิเตาหลอม °C	อุณหภูมิผนังเตา °C	หมายเหตุ
0	37	37	37	เริ่มจุดเตาหลอม
5	96	130	40	
10	135	190	45	
15	297	256	55	
20	335	295	66	
25	351	360	77	
30	374	455	115	
35	390	560	128	
40	411	630	135	
45	450	710	160	
50	489	790	191	
55	501	850	223	
60	540	882	230	
65	576	902	250	อุ่นเป่า 14 ลิตร
70	607	933	270	เริ่มหลอม ละลาย
75	643	952	305	
80	690	978	330	
85	725	1001	355	
90	775	1039	371	
95	800	1053	385	
100	820	1080	401	หลอม 15 ลิตร รวม 39 ลิตร

ตารางที่ ง-3 ค่าที่ได้จากการวัดและการคำนวณ

รายการ	ค่าที่ได้	หมายเหตุ
ความร้อนที่ให้กับเข้าหลอม	15640.425 W	
ความร้อนที่ใช้ในการหลอมอะลูมิเนียม 50 kg	9515.580 W	
ความร้อนที่เตาต้องการกรณีอะลูมิเนียม 50 kg	52169.204 W	
การสูญเสียความร้อนในการหลอมอะลูมิเนียม 50 kg	27013.199	คิดเป็น 52%
อุณหภูมิที่อะลูมิเนียมหลอมหมด	820 °C	
อุณหภูมิในการไล่แก๊ส	760 °C	
อุณหภูมิในการเทน้ำโลหะ	720 °C	
อุณหภูมิของน้ำมันเตา	37 °C	
เวลาในการทำงาน	100 นาที	
เวลาในการไล่แก๊ส	5 นาที	

ตารางที่ ง-4 ข้อมูลของเตาแบบดั้งเดิมหลังการดัดแปลง

ตัวแปร	ค่า	ตัวแปร	ค่า
ค่าการนำความร้อนของเหล็ก	$K_s = 54 \text{ W/MK}$	อุณหภูมิในเตาหลอม	$T_{in} = 1090 \text{ }^{\circ}\text{C}$
ค่าการนำความร้อนของอิฐทนไฟ	$K_b = 1.07 \text{ W/MK}$	อุณหภูมิห้องในการทำงาน	$T_{out} = 37^{\circ}\text{C}$
ค่าการนำความร้อนของเป่า	$K_c = 27.7 \text{ W/MK}$	อุณหภูมิหลอมอะลูมิเนียม	$T_m = 820^{\circ}\text{C}$
ค่าการนำความร้อนของอากาศ	$K_a = .026 \text{ W/MK}$	อุณหภูมิเทน้ำโลหะ	$T_p = 720^{\circ}\text{C}$
สปต.การถ่ายเทความร้อนของอากาศ	$h1 = 30 \text{ W/m}^2\text{K}$	ค่าความร้อนจำเพาะของเป่า	$Cp_{cru} = 0.85 \text{ KJ/kg}^{\circ}\text{C}$
มวลของ Al ที่หลอม	$M_{Al1} = 50 \text{ kg}$	Stefan-Boltzmann constant	$5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}$
มวลของเป่าหลอม	$M_{cru} = 141 \text{ kg}$	ค่าการแผ่รังสี	0.3
อุณหภูมิผิวสัมผัส	1093 K	อุณหภูมิสูงสุดที่ผนังเตาหลอม	401 °C
ค่าความร้อนจำเพาะของ Al	$Cp_{Al} = 0.89 \text{ KJ/kg}^{\circ}\text{C}$	ค่าการพาความร้อนอิสระของอากาศ	30 W/m ² K
ค่าความแฝงของการหลอม	$y = 356 \text{ KJ/kg}^{\circ}\text{C}$		

1. การคำนวณอัตราการสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตา

จากสมการ $Q = [(T_{in} - T_{out}) / R_{total}]$

เมื่อ $Q =$ ความร้อนผ่านผนังเตา W

$T_{in} =$ อุณหภูมิในเตา 1363 K

$T_{out} =$ อุณหภูมิที่ผนังเตาหลอม 674 K

$R_{w total} =$ ความต้านทานรวมของผนังเตา K/W

1.1 คำนวณหาความต้านทานที่ผนังอิฐทนไฟของเตาหลอม (R_1)

$R_1 = X / KA_m$

เมื่อ $R_1 =$ ความต้านทานของผนังอิฐทนไฟ K/W

$X =$ ความหนาของชั้นผนังอิฐทนไฟ 0.08 m

$K =$ ค่าการนำความร้อนของอิฐทนไฟ 1.07 W/mK

$r_1 =$ จากจุดศูนย์กลางถึงผนังอิฐทนไฟ 0.275 m

$r_2 =$ ความต้านทานของผนังอิฐทนไฟ 0.355 m

$A_m =$ พื้นที่เฉลี่ยของผนังอิฐทนไฟ m^2

$A_m = [[2\pi(r_2 - r_1)] / [\ln(r_2/r_1)]]$

$= [[2\pi(0.355 - 0.275)] / [\ln(0.355 / 0.275)]] = 1.97 \text{ m}^2$

แทนค่า $R_1 = 0.08 / (1.07 \times 1.97) = 0.038 \text{ K/W}$

1.2 หาความต้านทานที่ผนังเหล็กเปลือกเตาหลอม(R_2)

$R_2 = X / KA$

เมื่อ $X = 0.003 \text{ m}$

$K = 54 \text{ W/mK}$

$r_3 = 0.358 \text{ m}$

$A_m = [[2\pi(r_3 - r_2)] / [\ln(r_3 / r_2)]] = 2.24 \text{ m}^2$

$R_2 = 0.003 / (54 \times 2.24) = 0.000025 \text{ K/W}$

1.3 หาความต้านทานของอากาศภายนอกเตาหลอม (R_3)

$R_3 = 1 / h_1 A$

เมื่อ $h_1 = 30 \text{ W/m}^2\text{K}$

$A = 2\pi(0.358)$

$$\begin{aligned}\text{แทนค่า} \quad R_3 &= 1 / [30 \cdot (2\pi \times 0.358)] \\ &= 0.015 \text{ K/W}\end{aligned}$$

1.4 ความต้านทานผนังเตารวมทั้งหมด (R_{total})

$$\begin{aligned}R_{\text{total}} &= R_1 + R_2 + R_3 \\ &= 0.038 + 0.000025 + 0.015 \\ &= 0.053 \text{ K/W}\end{aligned}$$

1.5 แทนค่าในสมการเพื่อหาอัตราการสูญเสียพลังงานความร้อนผ่านผนังเตา

$$Q = [(1363 - 674) / 0.053] = 13000 \text{ W}$$

2. หาอุณหภูมิที่เคลื่อนที่ผ่านชั้นผนังของเตา

2.1 หาอุณหภูมิที่เคลื่อนที่ผ่านผนังอิฐทนไฟ

$$\text{จากสมการ} \quad Q = [(T_{\text{in}} - t_1) / R_1]$$

$$\text{เมื่อ} \quad Q = 13000 \text{ W}$$

$$T_{\text{in}} = 1363 \text{ K}$$

$$R_1 = 0.038 \text{ K/W}$$

$$t_1 = 1363 - (13000 \times 0.038)$$

$\therefore$ ความร้อนเคลื่อนที่ผ่านผนังอิฐทนไฟเท่ากับ 869 K

2.2 หาอุณหภูมิที่เคลื่อนที่ผ่านผนังเหล็กเปลือกเตา

$$\text{จากสมการ} \quad Q = t_1 - t_2$$

$$t_2 = 869 - (13000 \times 0.000025)$$

$\therefore$ ความร้อนเคลื่อนที่ผ่านผนังเหล็กเปลือกเตาเท่ากับ 868.675 K

2.3 หาอุณหภูมิที่เคลื่อนที่ผ่านผนังเตาออกสู่บรรยากาศ

$$\text{จากสมการ} \quad Q = t_2 - t_3$$

$$t_3 = 868.675 - (13000 \times 0.015)$$

$\therefore$ ความร้อนเคลื่อนที่ผ่านผนังเตาออกสู่บรรยากาศเท่ากับ 673.675 K

2.4 สรุป

- 1) อุณหภูมิภายนอกเตาที่คำนวณได้ 673.675 K หรือ 400.675 °C
- 2) อุณหภูมิภายนอกเตาได้จากการวัด 674 K หรือ 401 °C
- 3) ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิคือ 401-400.675=0.325 °C หรือ 0.081%

3. การคำนวณหาปริมาณค่าความร้อนที่ใช้ในการหลอมอะลูมิเนียม

3.1 หลอมอะลูมิเนียม 50 kg

จากสมการ $Q = [M_{Al1} \cdot C_{p_{Al}} \cdot \Delta T_1] + [M_{Al1} \cdot y] + [M_{Al1} \cdot C_{p_{Al}} \cdot \Delta T_2]$

เมื่อ M_{Al1} = มวลของอะลูมิเนียมที่หลอม 50 Kg

$C_{p_{Al}}$ = ค่าความร้อนจำเพาะของอะลูมิเนียม 0.89 KJ/Kg °C

y = ค่าความร้อนแฝงของการหลอมเหลว 356 KJ/Kg °C

ΔT_1 = อุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิหลอมเหลว 820 – 37 = 783 °C

ΔT_2 = อุณหภูมิหลอมเหลวถึงอุณหภูมิเท 820 – 720 = 100 °C

แทนค่า $Q = [50 \times 0.89 \times 783] + [50 \times 356] + [50 \times 0.89 \times 100]$

$= 57093.5 \text{ KJ}$

ถ้าทำการหลอมอะลูมิเนียม 100 นาที่ จะใช้พลังงานความร้อนคือ

$$P = Q/t$$

$$= 57093.5 / (100 \times 60) = 9515.58 \text{ W}$$

∴ ความร้อนที่ใช้ในการหลอมอะลูมิเนียม 50 kg = 9515.58 W

4. การคำนวณหาปริมาณค่าความร้อนที่ใช้กับเบ้าหลอมจนถึงอุณหภูมิเท

จากสมการ $Q = M_{cru} \cdot C_{p_{cru}} \cdot \Delta T$

เมื่อ M_{cru} = มวลของเบ้าหลอม 141 Kg

ΔT = อุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิหลอมเหลว 820 – 37 = 783 °C

$C_{p_{cru}}$ = ค่าความร้อนจำเพาะของเบ้าหลอม 0.85 KJ/Kg °C

แทนค่า $Q = 141 \times 0.85 \times 783$

$= 93842.55 \text{ KJ}$

ถ้าทำการหลอมอะลูมิเนียม 100 นาที่ จะใช้พลังงานความร้อนคือ

$$P = Q/t$$

$$= 93842.55 / (100 \times 60) = 15640.425 \text{ W}$$

5. คำนวณหาปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทออกทุกทิศทางจากเตาหลอม

5.1 หาปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านผนังเตาหลอม

จากสมการ $Q_{\text{wall}} = [T_{\text{in}} - T_{\text{out}}] / R_{\text{total}}$

เมื่อ $T_{\text{in}} =$ อุณหภูมิที่ต้องการในเตาหลอม 1363 K

$T_{\text{out}} =$ อุณหภูมิภายนอกเตาหลอม 674 K

$R_{\text{total}} =$ ค่าความต้านทานรวมของผนังเตาหลอม K/W

$r_1 =$ ระยะจากศูนย์กลางถึงผนังอิฐทนไฟ 0.275 m

$r_2 =$ ระยะจากศูนย์กลางถึงผนังเหล็กเปลือกเตา 0.355 m

$r_3 =$ ระยะจากศูนย์กลางถึงภายนอกเตาหลอม 0.358 m

$X_1 =$ ความหนาของชั้นผนังอิฐทนไฟ 0.08 m

$X_2 =$ ความหนาเหล็กเปลือกเตาหลอม 0.003 m

$K_1 =$ ค่าการนำความร้อนอิฐทนไฟ 1.07 W/mK

$K_2 =$ ค่าการนำความร้อนเหล็กเปลือกเตา 54 W/mK

$A_1 = [2\pi(r_2 - r_1) / \ln(r_2 / r_1)]$

$A_2 = [2\pi(r_3 - r_2) / \ln(r_3 / r_1)]$

(1) หาความต้านทานที่ผนังชั้นอิฐทนไฟ (R_1)

$$R_1 = X_1 / K_1 A_1$$

$$= 0.08 / [1.07(2\pi(0.355 - 0.275)) / (\ln(0.355/0.275))]$$

$$= 0.038 \text{ K/W}$$

(2) หาความต้านทานที่เหล็กเปลือกเตาหลอม(R_2)

$$R_2 = X_2 / K_2 A_2$$

$$= 0.003 / [54(2\pi(0.358 - 0.355)) / (\ln(0.358/0.355))]$$

$$= 0.000025 \text{ K/W}$$

$\therefore$ ความต้านทานรวมของผนังเตา = 0.038 + 0.000025 = 0.038025 K/W

แทนค่า $Q_{\text{wal}} = [1363 - 674] / [0.038025] = 18119.658 \text{ W}$

5.2 หาปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านไปยังเข้าหลอม

จากสมการ $Q_{\text{cru}} = [T_{\text{in}} - T_{\text{cru}}] / R_{\text{total}}$

เมื่อ $T_{\text{in}} =$ อุณหภูมิที่ต้องการในเตาหลอม 1363 K

$$T_{\text{cru}} = \text{อุณหภูมิในเบ้าหลอม} \quad 1093 \text{ K}$$

$$r_d = \text{ระยะจากจุดศูนย์กลางถึงผิวในเบ้า} \quad 0.210 \text{ m}$$

$$r_D = \text{ระยะจากจุดศูนย์กลางถึงผิวนอกเบ้า} \quad 0.260 \text{ m}$$

$$r_2 = \text{ระยะจากจุดศูนย์กลางถึงผนังอิฐทนไฟ} \quad 0.275 \text{ m}$$

$$X_{\text{cru}} = \text{ความหนาผนังเบ้าหลอม} \quad 0.05 \text{ m}$$

$$X_{\text{air}} = \text{ระยะห่างระหว่างเบ้าหลอมกับผนัง} \quad 0.015 \text{ m}$$

$$K_{\text{cru}} = \text{ค่าการนำความร้อนของเบ้าหลอม} \quad 27.7 \text{ W/mK}$$

$$K_{\text{air}} = \text{ค่าการนำความร้อนของอากาศ} \quad 0.026 \text{ W/mK}$$

$$A_{\text{cru}} = [2\pi(r_D - r_d) / \ln(r_D / r_d)]$$

$$A_{\text{air}} = [2\pi(r_2 - r_D) / \ln(r_2 / r_D)]$$

(1) หาความต้านทานของเบ้าหลอม(R_{cru})

$$\begin{aligned} R_{\text{cru}} &= X_{\text{cru}} / K_{\text{cru}} A_{\text{cru}} \\ &= 0.05 / [27.7(2\pi(0.260 - 0.210) / \ln(0.260 / 0.210))] \\ &= 0.0012 \text{ K/W} \end{aligned}$$

(2) หาความต้านทานของอากาศ(R_{air})

$$\begin{aligned} R_{\text{air}} &= X_{\text{air}} / K_{\text{air}} A_{\text{air}} \\ &= 0.015 / [0.026(2\pi(0.275 - 0.260) / \ln(0.275 / 0.260))] \\ &= 0.343 \text{ K/W} \end{aligned}$$

$$\therefore \text{ความต้านทานรวมในห้องเผาไหม้} = 0.0012 + 0.343 = 0.3442 \text{ K/W}$$

$$\text{แทนค่า} \quad Q_{\text{cru}} = [1363 - 1093] / [0.3442] = 784.428 \text{ W}$$

5.3 หาปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านไปยังพื้นด้านล่างของเตาหลอม

$$\text{จากสมการ} \quad Q_b = [T_{\text{cru}} - T_{\text{out}}] / R_{\text{total}}$$

$$\text{เมื่อ} \quad T_{\text{cru}} = \text{อุณหภูมิภายในเบ้าหลอม} \quad 1093 \text{ K}$$

$$T_{\text{out}} = \text{อุณหภูมิภายนอกเตาหลอม} \quad 674 \text{ K}$$

$$K_{\text{cru}} = \text{ค่าการนำความร้อนของเบ้าหลอม} \quad 27.7 \text{ W/mK}$$

$$K_{\text{brick}} = \text{ค่าการนำความร้อนของอิฐรองเบ้าหลอม} \quad 1.07 \text{ W/mK}$$

$$K_{\text{wall}} = \text{ค่าการนำความร้อนของอิฐกันเตาหลอม} \quad 1.07 \text{ W/mK}$$

$$K_{\text{steel}} = \text{ค่าการนำความร้อนเหล็กกันเตาหลอม} \quad 54 \text{ W/mK}$$

$$X_{cru} = \text{ความหนาของกันเป้ำหลอม} \quad 0.050 \text{ m}$$

$$X_{brick} = \text{ความหนาของอิฐรองกันเป้ำหลอม} \quad 0.040 \text{ m}$$

$$X_{wall} = \text{ความหนาของอิฐทนไฟกันเตาหลอม} \quad 0.040 \text{ m}$$

$$X_{steel} = \text{ความหนาเหล็กกันเตาหลอม} \quad 0.003 \text{ m}$$

$$A_{cru} = [(\pi \cdot 0.520^2) / 4] = 0.212 \text{ m}^2$$

$$A_{brick} = [(\pi \cdot 0.520^2) / 4] = 0.212 \text{ m}^2$$

$$A_{wall} = [(\pi \cdot 0.715^2) / 4] = 0.40 \text{ m}^2$$

$$A_{steel} = [(\pi \cdot 0.715^2) / 4] = 0.40 \text{ m}^2$$

(1) หาความต้านทานที่กันเป้ำหลอม (R_{cru})

$$\begin{aligned} R_{cru} &= X_{cru} / K_{cru} \cdot A_{cru} \\ &= 0.05 / [27.7 \times 0.212] = 0.0085 \text{ K/W} \end{aligned}$$

(2) หาความต้านทานที่อิฐรองกันเป้ำ (R_{brick})

$$\begin{aligned} R_{brick} &= X_{brick} / K_{brick} \cdot A_{brick} \\ &= 0.04 / [1.07 \times 0.212] = 0.176 \text{ K/W} \end{aligned}$$

(3) หาความต้านทานที่อิฐทนไฟกันเตาหลอม (R_{wall})

$$\begin{aligned} R_{wall} &= X_{wall} / K_{wall} \cdot A_{wall} \\ &= 0.04 / [1.07 \times 0.4] = 0.093 \text{ K/W} \end{aligned}$$

(4) หาความต้านทานที่เหล็กกันเตาหลอม (R_{steel})

$$\begin{aligned} R_{steel} &= X_{steel} / K_{steel} \cdot A_{steel} \\ &= 0.003 / [54 \times 0.4] = .00014 \text{ K/W} \end{aligned}$$

∴ ความต้านทานรวมพื้นด้านล่างของเตา = 0.278 K/W

$$\text{แทนค่า} \quad Q_b = [1093 - 674] / 0.278 = 1507.194 \text{ W}$$

5.4 หาปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านไปยังฝาเตา

$$\text{จากสมการ} \quad Q_T = [T_{cru} - T_{out}] / R_T$$

$$\text{เมื่อ} \quad T_{cru} = \text{อุณหภูมิภายในเป้ำหลอม} \quad 1093 \text{ K}$$

$$\begin{aligned} T_{out} &= \text{อุณหภูมิภายนอกเตาหลอม} & 674 \text{ K} \\ K_T &= \text{ค่าการนำความร้อนอิฐทนไฟ} & 1.07 \text{ W/mK} \\ X_T &= \text{ความหนาเตาหลอม} & 0.040 \text{ m} \end{aligned}$$

หาความต้านทานที่เตาหลอม (R_T)

$$\begin{aligned} R_T &= X_T / K_T A_T \\ &= 0.04 / [1.07 \times (\pi(0.715^2 - 0.31^2) / 4)] \\ &= 0.114 \text{ K/W} \end{aligned}$$

แทนค่า $Q_T = [1093 - 674] / 0.114 = 3675.439 \text{ W}$

6 หาปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทออกระหว่างเปิดเตา

6.1 การแผ่รังสี (q_r)

จากสมการ $q_r = \sigma \cdot \epsilon \cdot A \cdot T^4$

เมื่อ σ = Stefan-Boltzmann Constant = $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

ϵ = ค่าการแผ่รังสี 0.3

A = พื้นที่การแผ่รังสีความร้อน = 0.08 m^2

T^4 = อุณหภูมิผิวสัมผัส 1093 K

แทนค่า $q_r = 5.67 \times 10^{-8} \times 0.3 \times 0.08 \times 1093^4$
 $= 1920.88 \text{ W}$

6.2 การพาความร้อน (q_c)

จากสมการ $q_c = h_c \cdot A \cdot (T_s - T_{\infty f})$

เมื่อ h_c = ค่าการพาความร้อนแบบอิสระของอากาศ = $30 \text{ W/m}^2\text{K}$

A = พื้นที่สัมผัสกับอากาศ 0.08 m^2

T_s = อุณหภูมิผิวสัมผัส 1093 K

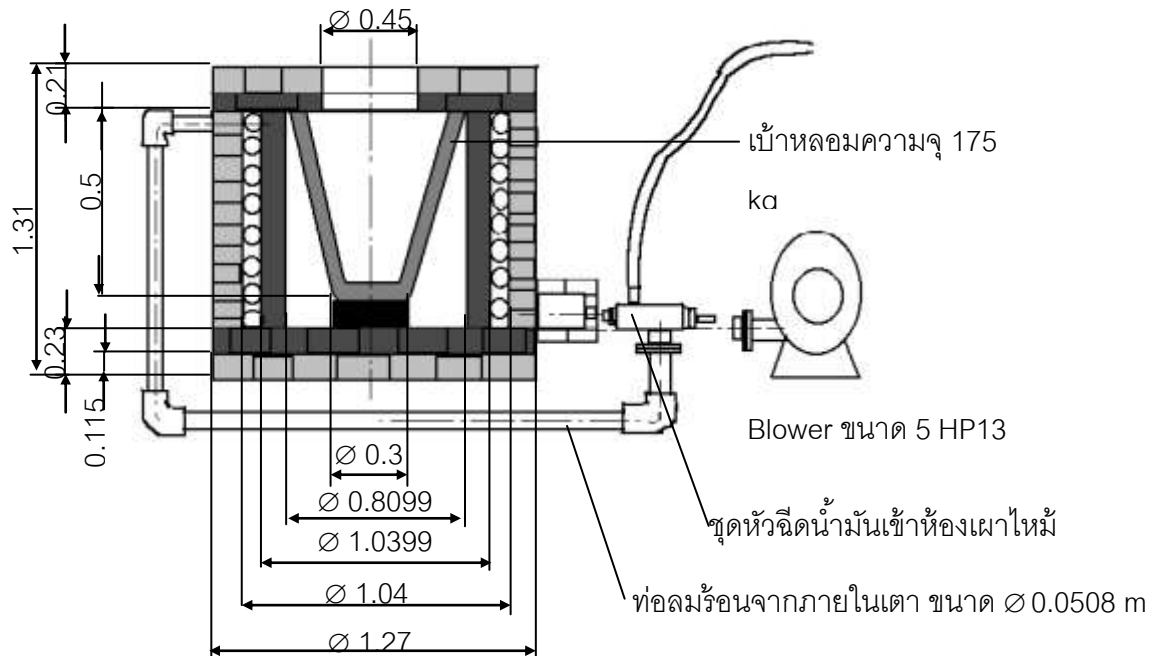
$T_{\infty f}$ = อุณหภูมิภายนอก 674 K

แทนค่า $q_c = 30 \times 0.08 \times (1093 - 674)$
 $= 1005.6 \text{ W}$

7. สรุป

7.1 ความร้อนที่ใช้ในการหลอมอะลูมิเนียม 50 kg	= 9515.58 W
7.2 ความร้อนที่ให้กับเบ้าหลอม	= 15640.425 W
7.3 ความร้อนที่เตาหลอมต้องการในการหลอม 50 kg	= 52169.204 W
7.4 ความร้อนที่สูญเสียจากเตาหลอมทุกทิศทาง	= 27013.199 W
7.5 เปอร์เซนต์การสูญเสียความร้อนในการหลอม 50 kg	= 52%
7.6 ความต้านทานทั้งหมดของเตาหลอม	= 1.44 K/W

ง-8 การคำนวณค่าที่ได้จากเตาที่ออกแบบและจัดสร้าง



รูปที่ ง-8 แสดงลักษณะและขนาดของเตาที่ออกแบบและจัดสร้าง

ตารางที่ ง-5 ส่วนประกอบและขนาดของเตาหลอมแบบประสิทธิภาพสูงที่ออกแบบและจัดสร้าง

รายการ	ขนาด	รายการ	ขนาด
1.ความสูงของเตาหลอม	1.31 m	13.ความหนาอิฐทนไฟก้นเตา	0.23 m
2.ความสูงปากหลอม	0.6 m	14.ความหนาเหล็กเปลือกเตา	0.006 m
3.เส้นผ่าศูนย์กลางของเตาหลอม	1.27 m	15.ความหนาช่องท่อลม	0.053 m
4.ความกว้างของปากเตาหลอม	0.45 m	16.ความหนาอิฐฉนวนผนังเตา	0.115 m
5.ความกว้างของปากเข้า	0.53 m	17.ความหนาอิฐทนไฟผนังเตา	0.23 m
6.ความกว้างของกันเข้า	0.33 m	18.เส้นผ่าศูนย์กลางท่อลม	0.0508 m
7.ความหนาผนังเข้า	0.04 m	19.น้ำหนักเข้าหลอม	125 kg
8.ความหนากันเข้า	0.05 m	20.ปริมาณการหลอมต่อครั้ง	175 kg
9.ความหนาปูนทนไฟฟ้าเตา	0.2 m	21.ความยาวของท่อลม	33 m
10.ความหนาอิฐรองกันเข้า	0.15 m	22.ต้นกำเนิดลมขนาด	5HP13Amp
11.เส้นผ่าศูนย์กลางอิฐรองกันเข้า	0.30 m	23.อุณหภูมิของน้ำมัน	37°C
12.ความสูงของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	0.4 m	24.พื้นที่ในห้องเผาไหม้	0.198 m ²

ตารางที่ ง-6 ค่าที่ได้จากการทดลองของเตาหลอมแบบประสิทธิภาพสูงที่ออกแบบและจัดสร้าง

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ ในเตา °C	อุณหภูมิ ในเข้า °C	อุณหภูมิ ผนังเตา °C	อุณหภูมิ ฝาเตา °C	อุณหภูมิ ก้นเตา °C	อุณหภูมิ ลมร้อน °C	หมายเหตุ
0	37	37	37	37	37	37	
10	115	90	37	37	37	40	
20	157	123	39	38	37	47	
30	273	170	42	38	37	55	
40	357	260	45	39	38	73	
50	520	330	47	39	38	95	อุ่นเข้า 15 ลิตร

ตารางที่ ง-6 ค่าที่ได้จากการทดลองของเตาหลอมแบบประสิทธิภาพสูงที่ออกแบบและจัดสร้าง(ต่อ)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ ในเตา °C	อุณหภูมิ ในบ้ำ °C	อุณหภูมิ ผนังเตา °C	อุณหภูมิ ฝาเตา °C	อุณหภูมิ ก้นเตา °C	อุณหภูมิ ลมร้อน °C	หมายเหตุ
60	660	470	49	40	38	127	หลอม
70	720	590	53	41	39	150	
80	770	660	56	41	39	175	
90	820	690	60	42	40	179	
100	860	730	63	43	40	185	
110	970	790	71	44	41	193	
120	1090	820	79	45	42	200	11 ลิตร
							รวม 26 ลิตร

ตารางที่ ง-7 ค่าที่ได้จากการทดลองหลอมและการคำนวณ

รายการ	ค่าที่ได้	หมายเหตุ
1.ความร้อนที่ใช้ในการหลอมอะลูมิเนียม 50 kg	7929.7 W	
2.ความร้อนที่ให้กับบ้ำหลอม	11554.7 W	
3.ความร้อนที่เตาหลอมต้องการทั้งหมด	31301.84 W	
4.ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาหลอม	3230 W	
5.ความร้อนสูญเสียผ่านฝาเตาหลอม	4378.5 W	
6.ความร้อนสูญเสียผ่านก้นเตาหลอม	3704.8 W	
7.ความร้อนที่ถ่ายเทออกขณะเปิดเตา	149 W	
8.ความร้อนสูญเสียผ่านบ้ำหลอม	355.3 W	
9.ความร้อนสูญเสียออกทุกทิศทางของเตาหลอม	11817.84 W	
10.เปอร์เซ็นต์ความร้อนที่ใช้ได้	62 %	
11.เปอร์เซ็นต์การสูญเสียความร้อน	38 %	
12.ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้อุ่นบ้ำหลอม	15 ลิตร	
13.เวลาในการทำงานทั้งหมดการหลอม	120 นาที	

ตารางที่ ง-7 ค่าที่ได้จากการทดลองหลอมและการคำนวณ(ต่อ)

รายการ	ค่าที่ได้	หมายเหตุ
14.ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้หลอม 50 kg	11 ลิตร	
15.อุณหภูมิในการไล่แก๊ส	760 °C	
16.เวลาในการไล่แก๊ส	5 นาที	
17.อุณหภูมิห้องที่ทำงาน	37 °C	
18.ความร้อนของอากาศที่ได้จากการอุ่น	200 °C	
19.อุณหภูมิในการเทน้ำโลหะ	720 °C	
20.อุณหภูมิของน้ำมันเชื้อเพลิง	37 °C	
21.อุณหภูมิจากการเผาไหม้ของเปลวไฟ	1090 °C	
22.เปอร์เซ็นต์ก๊าซ O ₂ จากการเผาไหม้	20.1 %	
23.เปอร์เซ็นต์ก๊าซ CO ₂ จากการเผาไหม้	0.7 %	
24. เปอร์เซ็นต์ก๊าซ CO จากการเผาไหม้	0 %	
25. เปอร์เซ็นต์ ความสามารถในการเผาไหม้	1.8 %	
26. เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของการเผาไหม้	77 %	

ตารางที่ ง-8 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

ตัวแปร	ค่า	ตัวแปร	ค่า
1.ค่าการนำความร้อนของเหล็ก K_{st}	54W/mK	13.อุณหภูมิที่ Al หลอม T_M	820°C
2.ค่าการนำความร้อนอิฐทนไฟ K_{brick}	1.07W/mK	14.อุณหภูมิเทน้ำโลหะ T_p	720°C
3.ค่าการนำความร้อนอิฐฉนวน K_{ins}	0.25 W/mK	15.ความร้อนจำเพาะของเบ้า Cp_{cru}	0.85KJ/kg C
4.ค่าการนำความร้อนอากาศ K_{air}	0.026W/mK	16.ค่าการแผ่รังสี ϵ	0.3
5.ค่าการนำความร้อนเบ้าหลอม K_{cru}	27.7W/mK	17.อุณหภูมิผิวสัมผัส T_s	820°C

ตารางที่ ง-8 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ(ต่อ)

ตัวแปร	ค่า	ตัวแปร	ค่า
6.อุณหภูมิห้องในการทำงาน T_R	37 °C	18.Stefan-Boltzmann Constant ... σ	5.67×10^{-8} W/m ² K
7.สปส.การถ่ายเทความร้อน ของอากาศ h_c	30 W/m ² K	19.ค่าการพาความร้อนอิสระ ของอากาศ	30W/m ² K
8.มวลของ Al ที่หลอม M_{Al}	50 kg	20.อุณหภูมิสูงสุดของเปลวไฟ	1090°C
9.อุณหภูมิในเตาหลอม T_F	820°C	21. อุณหภูมิสูงสุดของลมร้อน	200°C
10.ความร้อนแฝงการหลอม y	356KJ/kgC	22. อุณหภูมิสูงสุดของเบ้า	820°C
11.มวลของเบ้าหลอม M_{cru}	125 kg	23. อุณหภูมิสูงสุดของผนังเตา	79°C
12.ความร้อนจำเพาะของ Al Cp_{Al}	0.89KJ/kgC		

1. การคำนวณอัตราการสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตา

จากสมการ
$$Q = \frac{T_{in} - T_{out}}{R_{total}}$$

เมื่อ Q = ความร้อนทั้งหมดภายในเตาหลอม W

T_{in} = อุณหภูมิภายในเตาหลอม 1363 K

T_{out} = อุณหภูมิภายนอกเตาหลอม 352 K

R_{total} = ความต้านทานรวมของเตาหลอม K/W

1.1 หาความต้านทานที่ผนังอิฐทนไฟของเตาหลอม (R_{brick})

$$R_{brick} = \frac{X_{brick}}{K_{brick} \cdot A_{brick}}$$

เมื่อ X_{brick} = ความหนาชั้นอิฐทนไฟ 0.215 m

K_{brick} = ค่าการนำความร้อนอิฐทนไฟ 1.07 W/mK

A_{brick} = พื้นที่เฉลี่ยชั้นอิฐทนไฟ

$$= \frac{2\pi(r_2 - r_1)}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{2\pi(0.415 - 0.3)}{\ln \frac{0.415}{0.3}} = 2.23 m^2$$

∴ แทนค่าหา $R_{brick} = \frac{0.215}{1.07 \times 2.23} = 0.09 K / W$

1.2 หาความต้านทานของอิฐฉนวน (R_{ins})

$$R_{ins} = \frac{X_{ins}}{K_{ins} \cdot A_{ins}}$$

เมื่อ X_{ins} = ความหนาชั้นอิฐฉนวน 0.115 m

K_{ins} = ค่าการนำความร้อนของอิฐฉนวน 0.25 W/mK

A_{ins} = พื้นที่เฉลี่ยของอิฐฉนวน

$$= \frac{2\pi(r_3 - r_2)}{\ln \frac{r_3}{r_2}} = \frac{2\pi(0.629 - 0.415)}{\ln \frac{0.629}{0.415}} = 3.23 \text{ m}^2$$

∴ แทนค่าหา $R_{ins} = \frac{0.115}{0.25 \times 3.23} = 0.21 \text{ K / W}$

1.3 หาความต้านทานของเหล็กเปลือกเตาหลอม (R_{steel})

$$R_{steel} = \frac{X_{steel}}{K_{steel} \cdot A_{steel}}$$

เมื่อ X_{steel} = ความหนาชั้นเหล็กเปลือกเตา 0.006 m

K_{steel} = ค่าการนำความร้อนของเหล็กเปลือกเตา 54 W/mK

A_{steel} = พื้นที่เฉลี่ยของเหล็กเปลือกเตา

$$= \frac{2\pi(r_4 - r_3)}{\ln \frac{r_4}{r_3}} = \frac{2\pi(0.635 - 0.629)}{\ln \frac{0.635}{0.629}} = 4 \text{ m}^2$$

∴ แทนค่าหา $R_{steel} = \frac{0.006}{54 \times 4} = 0.00003 \text{ K / W}$

1.4 หาความต้านทานของอากาศนอกเตาหลอม (R_{air})

$$R_{air} = \frac{1}{h_{air} \cdot A_{air}}$$

เมื่อ h_{air} = ค่าการถ่ายเทความร้อนของอากาศ 30 W/m²K

A = พื้นที่ภายนอกของเตาหลอม

$$= 2\pi r^2 = 2\pi(0.635^2) = 2.53 \text{ m}^2$$

∴ แทนค่าหา $R_{air} = \frac{1}{30 \times 2.53} = 0.013 \text{ K / W}$

1.5 หาความต้านทานรวมของผนังเตาหลอมทั้งหมด (R_{total})

$$R_{total} = R_{brick} + R_{ins} + R_{steel} + R_{air}$$

$$= 0.09 + 0.21 + 0.00003 + 0.13 = 0.313 \text{ K/W}$$

แทนค่า

$$Q = \frac{T_{in} - T_{out}}{R_{total}}$$

$$= \frac{1363 - 352}{0.313} = 3230 \text{ W}$$

2. หาความร้อนที่เคลื่อนที่ผ่านชั้นผนังของเตาหลอม

2.1 หาความร้อนที่เคลื่อนที่ผ่านผนังอิฐทนไฟ

จากสมการ

$$Q = \frac{T_{in} - t_1}{R_{brick}}$$

$$t_1 = 1363 - (3230 \times 0.09) = 1072.3 \text{ K}$$

$$\therefore \text{ ความร้อนที่เคลื่อนที่ผ่านผนังอิฐทนไฟ} = 1072.3 \text{ K}$$

2.2 หาความร้อนที่เคลื่อนที่ผ่านผนังอิฐฉนวน

จากสมการ

$$Q = \frac{t_1 - t_2}{R_{ins}}$$

$$t_2 = 1072.3 - (3230 \times 0.21) = 394 \text{ K}$$

$$\therefore \text{ ความร้อนที่เคลื่อนที่ผ่านผนังอิฐฉนวน} = 394 \text{ K}$$

2.3 หาความร้อนที่เคลื่อนที่ผ่านเปลือกเหล็กผนังเตา

จากสมการ

$$Q = \frac{t_2 - t_3}{R_{steel}}$$

$$t_3 = 394 - (3230 \times 0.00003) = 393.9 \text{ K}$$

$$\therefore \text{ ความร้อนที่เคลื่อนที่ผ่านผนังเหล็กเปลือกเตา} = 393.9 \text{ K}$$

2.4 หาความร้อนที่เคลื่อนที่ผ่านผนังเตาออกสู่อากาศด้านนอก

จากสมการ

$$Q = \frac{t_3 - t_4}{R_{air}}$$

$$t_4 = 393.9 - (3230 \times 0.013) = 352 \text{ K}$$

$$\therefore \text{ ความร้อนที่เคลื่อนที่ผ่านผนังเตาออกสู่อากาศด้านนอก} = 352 \text{ K}$$

2.5 สรุป

$$1) \text{ ค่าที่คำนวณได้} = 352 \text{ K หรือ } 79 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$2) \text{ ค่าที่วัดได้} = 352 \text{ K หรือ } 79 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

3. การคำนวณปริมาณความร้อนที่ใช้ในการหลอมอะลูมิเนียม

3.1 หลอมอะลูมิเนียม 50 kg

$$\text{จากสมการ } Q = [m_{Al} \cdot C_{p_{Al}} \cdot \Delta T_1] + [m_{Al} \cdot y] + [m_{Al} \cdot C_{p_{Al}} \cdot \Delta T_2]$$

$$Q = \text{ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการหลอมอะลูมิเนียม } W$$

$$m_{Al} = \text{มวลของอะลูมิเนียมที่ทำการหลอม } 50 \text{ kg}$$

$$C_{p_{Al}} = \text{ค่าความร้อนจำเพาะของอะลูมิเนียม } 0.89 \text{ KJ/kgC}$$

$$\Delta T_1 = \text{อุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิหลอมเหลว } 820 - 37 = 783 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_2 = \text{อุณหภูมิหลอมเหลวถึงอุณหภูมิเท } 820 - 720 = 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$y = \text{ค่าความร้อนแฝงของการหลอมเหลว } 356 \text{ KJ/kgC}$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า } Q &= [50 \times 0.89 \times 783] + [50 \times 356] + [50 \times 0.89 \times 100] \\ &= 57093.5 \text{ KJ} \end{aligned}$$

ถ้าทำการหลอมอะลูมิเนียม 120 นาที จะใช้พลังงานความร้อนคือ

$$\begin{aligned} P &= \frac{Q}{t} \\ &= \frac{57093.5}{120 \times 60} = 7929.653 \text{ W} \end{aligned}$$

4. การคำนวณปริมาณความร้อนที่ให้กับเบ้าหลอม

$$\text{จากสมการ } Q = [m_{cru} \cdot C_{p_{cru}} \cdot \Delta T]$$

$$Q = \text{ปริมาณความร้อนที่ให้กับเบ้าหลอม } W$$

$$M_{cru} = \text{มวลของเบ้าหลอม } 125 \text{ kg}$$

$$C_{p_{cru}} = \text{ค่าความร้อนจำเพาะของเบ้าหลอม } 0.85 \text{ KJ/kgC}$$

$$\Delta T = \text{อุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิหลอมเหลว } 820 - 37 = 783 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า } Q &= [125 \times 0.85 \times 783] \\ &= 83193.75 \text{ KJ} \end{aligned}$$

ถ้าทำการหลอมอะลูมิเนียม 120 นาที จะใช้พลังงานความร้อนคือ

$$\begin{aligned} P &= \frac{Q}{t} \\ &= \frac{83193.75}{120 \times 60} = 11554.688 \text{ W} \end{aligned}$$

5. หาปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทออกทุกทิศทางจากเตาหลอม

5.1 หาปริมาณความร้อนที่ส่งถ่ายผ่านผนังเตาหลอม

จากสมการ
$$Q_{wall} = \frac{T_{in} - T_{out}}{R_{wall}}$$

เมื่อ T_{in} = อุณหภูมิในเตาหลอม 1363°C

T_{out} = อุณหภูมิภายนอกเตาหลอม 352°C

R_{total} = ความต้านทานรวมของผนังเตาหลอม 0.313 K/W

แทนค่า
$$Q_{wall} = \frac{1363 - 352}{0.313} = 3230 \text{ W}$$

5.2 หาปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านไปยังเบ้าหลอม

จากสมการ
$$Q_{cru} = \frac{T_{in} - T_{cru}}{R_{cru}}$$

เมื่อ T_{in} = อุณหภูมิภายในเตาหลอม 1363 K

T_{cru} = อุณหภูมิในเบ้าหลอม 1093 K

R_{cru} = ความต้านทานรวมทั้งหมดบริเวณเบ้าหลอม

(1) ความต้านทานของเบ้าหลอม

$$R_{cru} = \frac{X_{cru}}{K_{cru} \cdot A_{cru}}$$

$$A_{cru} = \frac{2\pi(0.265 - 0.225)}{\ln 0.265 / 0.225} = 1.54 \text{ m}^2$$

แทนค่าหา
$$R_{cru} = \frac{0.04}{27.7 \times 1.54} = 0.00094 \text{ K / W}$$

(2) ความต้านทานของอากาศ

$$R_{air} = \frac{X_{air}}{K_{air} \cdot A_{air}}$$

$$A_{air} = \frac{2\pi(0.3 - 0.265)}{\ln 0.3 / 0.265} = 1.77 \text{ m}^2$$

แทนค่าหา
$$R_{air} = \frac{0.035}{0.026 \times 1.77} = 0.759 \text{ K / W}$$

$\therefore$ ค่าความต้านทานรวมบริเวณที่เบ้าหลอม $= 0.00094 + 0.759 = 0.75994 \text{ K/W}$

(3) แทนค่า
$$Q_{cru} = \frac{T_{in} - T_{cru}}{R_{cru}}$$

$$\frac{1363 - 1093}{0.75994} = 355.3 \text{ W}$$

5.3 หาปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านไปยังพื้นด้านล่างของเตาหลอม

จากสมการ $Q_b = \frac{T_{cru} - T_{out}}{R_b}$

เมื่อ R_b = ความต้านทานรวมที่พื้นล่างของเตาหลอม K/W

$$X_{b\ cru} = \text{ความหนาแน่นแก้วหลอม} \quad 0.05\ m$$

$$X_{b\ brick1} = \text{ความหนาอิฐรองกันแก้วหลอม} \quad 0.15\ m$$

$$X_{b\ brick2} = \text{ความหนาอิฐทนไฟกันเตา} \quad 0.15\ m$$

$$X_{b\ st} = \text{ความหนาเหล็กกันเตาหลอม} \quad 0.006\ m$$

$$A_{b\ cru} = \text{พื้นที่กันแก้วหลอม} = \frac{\pi(0.33^2)}{4} = 0.0855\ m^2$$

$$A_{b\ brick1} = \text{พื้นที่อิฐรองกันแก้วหลอม} \\ = \frac{\pi(0.3^2)}{4} = 0.071\ m^2$$

$$A_{b\ brick2} = \text{พื้นที่อิฐทนไฟกันเตา} = \frac{\pi(1.258^2)}{4} = 1.243\ m^2$$

$$A_{b\ st} = \text{พื้นที่เหล็กกันเตา} = \frac{\pi(1.27^2)}{4} = 1.267\ m^2$$

(1) หาความต้านทานที่กันแก้วหลอม

$$R_{b\ cru} = \frac{X_{b\ cru}}{K_{cru} \cdot A_{b\ cru}} \\ = \frac{0.05}{27.7 \times 0.0855} = 0.0211\ K / W$$

(2) หาความต้านทานที่อิฐรองกันแก้วหลอม

$$R_{b\ brick1} = \frac{X_{b\ brick1}}{K_{brick} \cdot A_{b\ brick1}} \\ = \frac{0.15}{27.7 \times 0.071} = 0.0763\ K / W$$

(3) หาความต้านทานที่อิฐทนไฟที่กันเตาหลอม

$$R_{b\ brick2} = \frac{X_{b\ brick2}}{K_{brick} \cdot A_{b\ brick2}} \\ = \frac{0.15}{1.07 \times 1.243} = 0.113\ K / W$$

(4) หาความต้านทานที่เหล็กกันเตาหลอม

$$R_{b\ st} = \frac{X_{b\ st}}{K_{St} \cdot A_{b\ st}}$$

$$= \frac{0.006}{54 \times 1.267} = 0.00009\ K / W$$

(5) ความต้านทานรวมบริเวณพื้นล่างของเตาหลอมคือ

$$R_{b\ total} = 0.0211 + 0.0763 + 0.113 + 0.00009 = 0.21\ K/W$$

แทนค่า

$$Q_b = \frac{1093 - 315}{0.21} = 3704.8\ W$$

5.4 หาปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านไปยังฝาเตา

จากสมการ

$$Q_{top} = \frac{T_{cru} - T_{out}}{R_{total}}$$

เมื่อ R_{total} = ความต้านทานรวมบริเวณฝาเตาหลอม

$X_{t\ brick2}$ = ความหนาปูนทนไฟฝาเตาหลอม 0.21 m

$A_{t\ brick2}$ = พื้นที่ปูนทนไฟฝาเตา

$$= \frac{\pi(1.27^2 - 0.45^2)}{4} = 1.108\ m^2$$

(1) หาความต้านทานปูนทนไฟที่ฝาเตาหลอม

$$R_{t\ brick2} = \frac{X_{t\ brick2}}{K_{brick} \cdot A_{t\ brick}}$$

$$= \frac{0.21}{1.07 \times 1.108} = 0.177\ K / W$$

แทนค่า

$$Q_{top} = \frac{T_{cru} - T_{out}}{R_{total}}$$

$$= \frac{1093 - 318}{0.177} = 4378.5\ W$$

6. หาปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทออกขณะเปิดเตา

6.1 การแผ่รังสี

จากสมการ

$$q_r = \sigma \cdot \epsilon \cdot A T^4$$

เมื่อ q_r = การแผ่รังสี W

σ = Stefan-Boltzmann Constant $5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K$

ϵ = ค่าการแผ่รังสี 0.3

$$A = \text{พื้นที่การแผ่รังสี} = \frac{\pi(0.45^2)}{4} \times 20 = 0.0032 \text{ m}^2$$

$$T = \text{อุณหภูมิผิวสัมผัส} = 1093 \text{ K}$$

แทนค่า

$$q_r = 5.67 \times 10^{-8} \times 0.3 \times 0.0032 \times 1093^4$$

$$= 77.7 \text{ W}$$

6.2 การพาความร้อน

จากสมการ

$$q_c = h_c \cdot A \cdot (T_s - T_{\infty f})$$

เมื่อ

$$q_c = \text{ค่าการพาความร้อน} \quad \text{W}$$

$$h_c = \text{ค่าการพาความร้อนแบบอิสระของอากาศ} = 30 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$A = \text{พื้นที่สัมผัสกับอากาศ} = 0.0032 \text{ m}^2$$

$$T_s = \text{อุณหภูมิสัมผัส} = 1093 \text{ K}$$

$$T_{\infty f} = \text{อุณหภูมิภายนอก} = 352 \text{ K}$$

แทนค่า

$$q_c = 30 \times 0.0032 \times (1093 - 352)$$

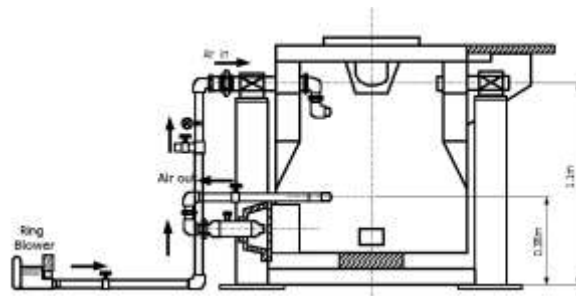
$$= 71.14 \text{ W}$$

7. สรุป

1) ความร้อนที่ใช้ในการหลอมอะลูมิเนียม 50 kg	=	7929.7	W
2) ความร้อนที่ให้กับเบ้าหลอม	=	11554.7	W
3) ความร้อนที่เตาหลอมต้องการทั้งหมด	=	31301.84	W
4) ความต้านทานของเตาหลอมทั้งหมด	=	1.5	K/W
5) ความร้อนที่สูญเสียผ่านผนังเตา	=	3230	W
6) ความร้อนที่สูญเสียผ่านฝาเตา	=	4378.5	W
7) ความร้อนที่สูญเสียผ่านก้นเตา	=	3704.8	W
8) ความร้อนที่สูญเสียผ่านเบ้าหลอม	=	355.3	W
9) ความร้อนถ่ายเทออกขณะเปิดเตา	=	149	W
10) ความร้อนสูญเสียจากเตาหลอมทุกทิศทาง	=	11817.44	W
11) เปอร์เซนต์ความร้อนที่สามารถใช้ได้	=	62	%
12) เปอร์เซนต์ความร้อนที่สูญเสีย	=	38	%

ง-9 การคำนวณ Head Loss, อัตราการไหลของอากาศ

9.1 อัตราการไหลของน้ำมันและการเลือกพัดลม



รูปที่ ง-9 แสดงขนาดและทิศทางเข้าของลม

1. ตัวแปรในการคำนวณ

$$SP_1 = \text{แรงดันสถิตยที่ทางเข้า} \quad 1200 \text{ mmH}_2\text{O}$$

$$SP_2 = \text{แรงดันสถิตยที่ทางออก} \quad 500 \text{ mmH}_2\text{O}$$

$$TP_1 = \text{แรงดันรวมที่ทางเข้า} \quad 1300 \text{ mmH}_2\text{O}$$

$$TP_2 = \text{แรงดันรวมที่ทางออก} \quad 530 \text{ mmH}_2\text{O}$$

$$V_1 = \text{ความเร็วลมทางเข้า} \quad 39.9 \text{ m/s}$$

$$V_2 = \text{ความเร็วลมทางออก} \quad 21.6 \text{ m/s}$$

$$VP_1 = \text{แรงดันไดนามิคทางเข้า} \quad 100 \text{ mmH}_2\text{O}$$

$$VP_2 = \text{แรงดันไดนามิคทางออก} \quad 30 \text{ mmH}_2\text{O}$$

$$Re = \text{ตัวเลขเรย์โนลด์}$$

$$f = \text{องค์ประกอบของความเสียดทาน}$$

$$Z_1 = \text{ความสูงของท่อลมทางเข้าจากพื้น} \quad 1.1 \text{ m}$$

$$Z_2 = \text{ความสูงของท่อลมทางออกจากพื้น} \quad 0.35 \text{ m}$$

$$D = \text{เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของท่อลม} \quad 0.0508 \text{ m}$$

$$\epsilon = \text{ความขรุขระของผิวท่อลมเชื่อม} \quad 0.00015$$

$$H_L = \text{Head Loss รวม}$$

$$P_{\text{air}} = \text{ความดันของอากาศ} \quad 1.3 \text{ kg/m}^3$$

$$L_1 = \text{ความยาวของท่อลมทางเข้า} \quad 32 \text{ m}$$

$$L_2 = \text{ความยาวของท่อลมทางออก} \quad 1 \text{ m}$$

$$\mu = \text{ความหนืดพลศาสตร์ของลม} \quad 1.7 \times 10^{-5} \text{ N.s/m}^2$$

$$\text{Nipple คือ จุดต่อต่าง ๆ ของท่อลม มีทั้งหมด } 4 \times 0.08 \text{ จุด} = 0.32$$

$$\text{ข้ออ 90 องศา ทางเข้ามี 4 ข้อทางออก 2 ข้อ รวม } 6 \times 1.4 = 8.4$$

9.2 การวัดความเร็วมวลที่ทางเข้า

จากสมการ

$$TP_1 = SP_1 + VP_1$$

$$VP_1 = TP_1 - SP_1$$

$$= 1300 - 1200$$

$$VP_1 = 100 \text{ mmH}_2\text{O}$$

เปิดค่าเปรียบในตารางจะได้ $V_1 = 39.9 \text{ m/s}$

9.3 การวัดความเร็วมวลที่ทางออก

จากสมการ

$$TP_2 = SP_2 + VP_2$$

$$VP_2 = TP_2 - SP_2$$

$$= 530 - 500$$

$$VP_2 = 30 \text{ mmH}_2\text{O}$$

เปิดค่าเปรียบในตารางจะได้ $V_2 = 21.6 \text{ m/s}$

9.4 การคำนวณหา Head Loss ทั้งหมด

จากสมการ

$$H_L = TP_1 - TP_2$$

$$= 1300 - 530$$

$$= 770 \text{ mmH}_2\text{O}$$

ดังนั้นอัตราการไหลของอากาศที่ทางออกจะได้จากสมการ

$$Q = VA$$

$$= \frac{21.6 \times \pi \times 0.0508^2}{4}$$

$$= 0.044 \text{ m}^3 / \text{s}$$

หมายความว่าที่อัตราการไหล $0.044 \text{ m}^3/\text{s}$ ทำให้อัตราการไหลของน้ำมันโดยเฉลี่ย 0.57 ลิตร/นาที

9.5

การคำนวณความเร็วของน้ำมัน

จากสมการ

$$Q_{oil} = V_{oil} \times A_{oil}$$

$$\therefore V_{oil} = \frac{Q_{oil}}{A_{oil}}$$

$$Q_{oil} = \frac{0.57 \times 0.001}{60} = 9.5 \times 10^{-6} m^3$$

$$A_{oil} = \frac{\pi \times 0.004^2}{4} = 12.5 \times 10^{-6} m^2$$

$$\therefore V_{oil} = 0.76 m / s$$

$$\therefore$$

9.6. การคำนวณหา Pressure Drop

จากสมการของเมอริวาลลี (Bernoulli's Equation)

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + \left[\left(\frac{f}{D} + \Sigma K_1 \right) \frac{V_1^2}{2g} \right] + \left[\left(\frac{f}{D} + \Sigma K_2 \right) \frac{V_2^2}{2g} \right]$$

หาองค์ประกอบของความเสียดทาน (Friction Factor)

$$\text{เมื่อ } Re_{in} = \frac{V\rho D}{\mu} = \frac{39.9 \times 1.3 \times 0.0508}{1.7 \times 10^{-5}} = 15.5 \times 10^4$$

$$Re_{out} = \frac{V\rho D}{\mu} = \frac{21.6 \times 1.3 \times 0.0508}{1.7 \times 10^{-5}} = 8.39 \times 10^4$$

โดยที่ Relative Roughness

$$\left[\frac{\varepsilon}{D} \right]_{in} = \frac{0.00015}{5.08} = 0.0003$$

$$\left[\frac{\varepsilon}{D} \right]_{out} = \frac{0.00015}{5.08} = 0.0003$$

นำค่า Relative Roughness ที่ได้ไปเปิดค่าในตาราง Moody diagram

$$f_{in} = 0.015$$

$$f_{out} = 0.015$$

หา Minor Loss ที่ทางเข้าและทางออก

$$\text{ทางเข้า} = [4 \times 1.4] + [4 \times 0.08] = 5.76$$

$$\text{ทางออก} = [2 \times 1.4] + [0] = 2.80$$

แทนค่า

$$\begin{aligned} \frac{P_1 - P_2}{\rho g} &= \frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} + (Z_2 - Z_1) + \left[\left(\frac{f l}{D} + \Sigma K_1 \right) \frac{V_1^2}{2g} \right] + \left[\left(\frac{f l}{D} + \Sigma K_2 \right) \frac{V_2^2}{2g} \right] \\ &= \frac{21.6^2}{2(9.81)} - \frac{39.9^2}{2(9.81)} + (1.1 - 0.35) + \left[\left(\frac{0.015 \times 32}{0.0508} + 5.76 \right) \frac{39.9^2}{2(9.81)} \right] \\ &\quad + \left[\left(\frac{0.015 \times 1}{0.0508} \right) + 2.8 \right] \frac{21.6^2}{2(9.81)} \end{aligned}$$

$$= 23.8 - 81.1 + 0.75 + 1234.1 + 73.6$$

$$= 1251.15$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} P_1 - P_2 &= 1251.15 \times 1.3 \times 9.81 \\ &= 15.956 \text{ KPa} \end{aligned}$$

9

7

การเลือกพัดลม

1) ทางเข้า

$$\begin{aligned} Q &= VA \\ &= \frac{39.9 \times \pi \times 0.0508^2}{4} \times 60 \\ &= 4.8 \text{ m}^3 / \text{min} \end{aligned}$$

2) ทางออก

$$\begin{aligned} Q &= VA \\ &= \frac{21.6 \times \pi \times 0.0508^2}{4} \times 60 \\ &= 2.6 \text{ m}^3 / \text{min} \end{aligned}$$

ตารางที่ ง-9 ค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการคำนวณเพื่อเลือกค่า Ring Blower

รายการ	ค่าต่าง ๆ
ชนิด	RB-303
กำลังของมอเตอร์	3 HP
เส้นผ่าศูนย์กลางท่อลมออก	2 inc

ตารางที่ ง-9 ค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการคำนวณเพื่อเลือกค่า Ring Blower (ต่อ)

รายการ	ค่าต่าง ๆ
แรงดันไฟฟ้า	380 Volt
ความถี่	60 Hz
ความเร็วรอบ	3500 RPM
กำลังงาน	2.2 KW
กระแสไฟ	8 Amp
แรงดันสถิตยทางออก	1500 mmH ₂ O
แรงดันสถิตยทางเข้า	1600 mmH ₂ O
อัตราการไหลของอากาศทางออก	2.4 m ³ /min
อัตราการไหลของอากาศทางเข้า	2.3 m ³ /min
แรงดันสถิตยทางออกมากที่สุด	2300 mmH ₂ O
อัตราการไหลของอากาศทางออกมากที่สุด	5.2 m ³ /min
ระดับความดังของเสียง	82 dB
น้ำหนักของ Blower	50 kg
ขนาดของ Blower	390 x 420 x 430 mm

หมายเหตุ : ในงานวิจัยนี้จะใช้ Ring Blower ขนาด 5 HP 380 volt 60 Hz ขนาดท่อ 2 นิ้ว

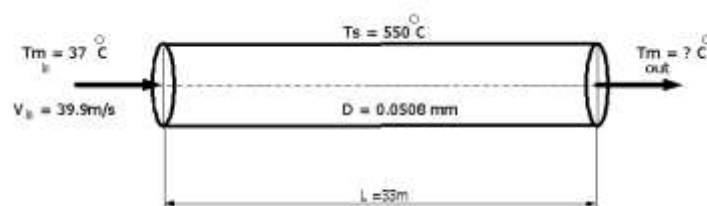
ตารางที่ ง-10 ค่าต่าง ๆ ของ Ring Blower ที่เลือกใช้ในการทำงานวิจัยงานวิจัย

รายการ	ค่าต่าง ๆ
ชนิด	RB-505
กำลังของมอเตอร์	5 HP
เส้นผ่าศูนย์กลางท่อลมออก	2 inc
แรงดันไฟฟ้า	380 Volt
ความถี่	60 Hz
ความเร็วรอบ	3500 RPM
กำลังงาน	3.7 KW
กระแสไฟ	13 Amp
แรงดันสถิตยทางออก	2000 mmH ₂ O
แรงดันสถิตยทางเข้า	2100 mmH ₂ O

ตารางที่ ง-10 ค่าต่าง ๆ ของ Ring Blower ที่เลือกใช้ในการทำงานวิจัยงานวิจัย(ต่อ)

รายการ	ค่าต่าง ๆ
อัตราการไหลของอากาศทางออก	4.1 m ³ /min
อัตราการไหลของอากาศทางเข้า	4 m ³ /min
แรงดันสถิตย์ทางออกมากที่สุด	2900 mmH ₂ O
อัตราการไหลของอากาศทางออกมากที่สุด	8.3 m ³ /min
ระดับความดังของเสียง	83/88dB
น้ำหนักของ Blower	65 kg
ขนาดของ Blower	480 x 571.5 x 537.5 mm

9.8 การคำนวณหาอุณหภูมิที่ทางออกของอากาศ (ภายใต้อุณหภูมิผิวคงที่)



รูปที่ ง-10 ลักษณะอากาศผ่านท่อลม

1) ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ

L	= ความยาวของท่อลม	33 m
D	= เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของท่อลม	0.0508 m
$T_{m_{in}}$	= อุณหภูมิเข้าท่อ	37°C
$T_{m_{out}}$	= อุณหภูมิออกจากท่อ	°C
T_s	= อุณหภูมิภายนอกท่อ	550°C
V_{in}	= ความเร็วของลม	39.9 m/s
ρ	= ความหนาแน่นของอากาศ	1.15 kg/m ³
Q	= อัตราการไหลของอากาศ	kg/s

2) การคำนวณอัตราการไหล

จากสมการ

$$Q = \rho VA$$

$$= \frac{1.15 \times 39.9 \times \pi 0.0508^2}{4}$$

$$= 0.1 \text{ kg / s}$$

3) การคำนวณอุณหภูมิทางออกของอากาศ

สมมติฐาน

- (1) พิจารณาภายใต้สภาวะคงตัว
- (2) สมบัติทางฟิสิกส์คงที่
- (3) ไม่คิดพลังงานสูญเสียสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกท่อ
- (4) ท่อฉนวนหุ้ม

สมมติให้อุณหภูมิของอากาศที่ทางออก $T_{m_{out}} = 153^\circ\text{C}$

$$\therefore T = \frac{1}{2}(37 + 153)$$

$$= 95^\circ\text{C} \text{ หรือ } 368\text{K}$$

ตารางที่ ง-11 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของอากาศ

T (K)	ρ (kg/m ³)	Cp (KJ/kg.K)	$\nu \times 10^{-6}$ (m ² /s)	$K \times 10^{-3}$ (W/m.K)	Pr
300	0.9950	1.009	208.2	30	0.7
400	0.8711	1.014	230.1	33.8	0.69

ตารางที่ ง-12 การประมาณค่าอากาศในช่วง 368 K จะได้

T (K)	ρ (kg/m ³)	Cp (KJ/kg.K)	$\nu \times 10^{-6}$ (m ² /s)	$K \times 10^{-3}$ (W/m.K)	Pr
368	0.963	1.0103	213.89	30.98	0.697

ดังนั้น

$$Re_D = \frac{4Q}{\pi D \rho \nu}$$

$$= \frac{4 \times 0.1}{\pi \times 0.0508 \times 0.963 \times 213.89 \times 10^{-6}} = 12168.3$$

$$\frac{L}{D} = \frac{33}{0.0508} 649.6$$

$$\frac{L}{D} > 60 \text{ ดังนั้นจึงสมมติให้อยู่ในบริเวณ HDR, TDR, T และ } n=0.4$$

$$N = 0.023 \text{ Re}^{0.8} \text{ Pr}^n$$

$$\frac{hD}{K} = 0.023 \text{ Re}^{0.8} \text{ Pr}^n$$

$$h = 0.023 \times 12168 \cdot 3^{.8} \times 0.697^4 \left[\frac{30.98 \times 10^{-3}}{0.0508} \right]$$

$$= 6.14 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}$$

4) จากสมการพลังงานตลอดความยาวของท่อลม

$$QCp(Tm_{out} - Tm_{in}) = \frac{h\pi DL(Tm_{out} - Tm_{in})}{\left[\frac{Ts - Tm_{out}}{Ts - Tm_{in}} \right]}$$

$$\ln \left[\frac{Ts - Tm_{out}}{Ts - Tm_{in}} \right] = - \frac{h\pi DL}{QCp}$$

$$\therefore Tm_{out} = Ts - (Ts - Tm_{in}) \exp \left[- \frac{h\pi DL}{QCp} \right]$$

$$= 550 - (550 - 37) \exp \left[- \frac{6.14 \times \pi \times 0.0508 \times 33}{0.1 \times 1010 \cdot 3} \right]$$

$$= 177.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$\therefore$ สมมติฐานที่ตั้งไว้ข้างต้นใช้ได้

9.9 สรุป

อุณหภูมิของอากาศที่ทางออกประมาณ $177.5 \text{ } ^\circ\text{C}$

$\therefore$ อัตราการถ่ายเทความร้อนออกสู่อากาศจะได้ดังนี้

$$Q_{air} = QCp(Tm_{out} - Tm_{in})$$

$$= 0.1 \times 1010 \cdot 3 \times (177.5 - 37)$$

$$= 8.132915 \text{ KW}$$

ภาคผนวก จ.
ภาพประกอบและภาพแยกชิ้น
ของเตาหลอมที่ออกแบบและจัดสร้าง