

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเตาเผาและการหลอม

2.1.1 เตาเผาหลอม การผลิตชิ้นงานหล่อเพื่อให้ได้คุณภาพดีนั้นขึ้นอยู่กับคุณภาพของน้ำโลหะและปัจจัยอื่นอีกหลายประการ ซึ่งน้ำโลหะที่เทลงไปในแบบต้องมีส่วนผสมทางเคมีที่ถูกต้องมีการกำจัดปริมาณสารมลทินและก๊าซใด ๆ การที่จะได้คุณภาพของน้ำโลหะที่ดีมีอยู่หลายวิธี ซึ่งในอุตสาหกรรมการหล่ออะลูมิเนียมผสมจะนิยมใช้เตาเผาเพราะว่าเตาเผามีข้อดีอยู่หลายประการดังนี้ [1]

1) สามารถใช้งานได้อย่างกว้างขวาง สามารถใช้เตาเผาหลอมโลหะต่างชนิดกันได้โดยเพียงแค่เปลี่ยนเบ้าหลอม จึงไม่เสี่ยงว่าจะมีธาตุที่ไม่ต้องการเข้าไปปะปนอยู่กับโลหะที่หลอม ถ้าทำการหลอมจำนวนน้อย ๆ ควรใช้เตาเผาที่สามารถยกเบ้าออกได้ง่าย แต่ถ้าทำการหลอมจำนวนมาก อาจใช้เตาเผาแบบเอียงเท

2) ค่าลงทุนต่ำเพราะว่าเตาเผามีราคาถูกและประหยัดเนื้อที่กว่าเตาชนิดอื่นที่มีความจุเท่ากัน

3) การติดตั้งง่าย สามารถยึดติดกับพื้นได้ง่ายและเร็ว

4) ค่าดูแลรักษาต่ำ การบำรุงรักษาทำได้ง่าย

2.1.2 เบ้าหลอม ซึ่งเบ้าหลอมที่ดีควรมีคุณสมบัติดังนี้

1) ถ่ายเทความร้อนได้ดีเพื่อประหยัดเชื้อเพลิงและเวลา

2) สามารถทนต่อความร้อนได้สูง

3) ทนทานต่อการเกิด Thermal Shock ซึ่งเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็ว

4) ต้านทานต่อบรรยากาศที่มีออกซิเจนอยู่มาก เพื่อไม่ให้สูญเสียกราฟไฟท์

2.1.3 ชนิดของเบ้าหลอมที่ใช้ในปัจจุบันมีดังนี้

1) Clay-Graphite จะประกอบด้วยกราฟไฟท์ 35 เปอร์เซ็นต์และใช้ดินทนไฟหรือดินเหนียวเป็นตัวประสาน จะมีคุณสมบัติในการถ่ายเทความร้อนดีและทนต่อความร้อนและต้านทานต่อการเกิด Thermal Shock ได้ดีแต่ทนทานต่อการเกิดออกไซด์และการกัดกร่อนของซีตกรันและฟลักซ์ได้ไม่ดีใช้สำหรับหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียมได้ดี

2) Super Clay-Graphite ประกอบด้วยกราไฟท์ 35 เปอร์เซ็นต์และซิลิคอนคาร์ไบด์(SiC) 12 เปอร์เซ็นต์ ยึดเหนี่ยวด้วยดินเหนียวไฟมีคุณสมบัติดีกว่าแบบ Clay-Graphite ทุกด้านใช้สำหรับหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียม ทองแดง และ เหล็กหล่อได้ดี

3) Silicon carbide ประกอบด้วยกราไฟท์ 30 เปอร์เซ็นต์และซิลิคอนคาร์ไบด์ 45 เปอร์เซ็นต์ จะใช้คาร์บอนเป็นตัวประสาน ซึ่งมีคุณสมบัติดีกว่าทั้งสองชนิด โดยเฉพาะสามารถต้านทานต่อการเกิด Thermal Shock, Oxidation และการกัดกร่อนได้ดีมาก ใช้หลอมโลหะผสมอะลูมิเนียมและทองแดงผสมได้ดีมาก

2.1.4 การใช้เบ้าหลอมสำหรับการหลอมอะลูมิเนียมในงานหล่อให้อายุการใช้งานยืนยาว [2] เบ้าหลอมนับเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญมาก และเป็นอุปกรณ์แรกที่มีผลต่อคุณภาพการหลอมอะลูมิเนียม การคัดเลือกวัสดุในการทำเบ้าหลอมที่มีความเข้ากันได้ทางเคมี ความสามารถในการทนต่อการขยายตัวจากอุณหภูมิและหดตัวที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน ความทนทานในการใช้งาน นับเป็นปัจจัยเบื้องต้นที่มีความสำคัญในการเลือกชนิดของเบ้าหลอม เบ้าหลอมที่ใช้สำหรับการหลอมอะลูมิเนียม มักทำจากกราไฟท์ผสมกับตัวประสาน (Clay-bonded graphite crucible) ซึ่งบางครั้งอาจมีการผสมซิลิคอนคาร์ไบด์บ้างเพื่อเพิ่มความต้านทานต่อการแตกร้าวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน ส่วนเบ้าหลอม อีกชนิดหนึ่งซึ่งได้รับความนิยมมากขึ้นคือเบ้าหลอมซิลิคอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide crucible) แม้ว่าเบ้าหลอมกราไฟท์มีราคาถูกกว่าเบ้าหลอมซิลิคอนคาร์ไบด์ อย่างไรก็ตามเบ้าหลอมซิลิคอนคาร์ไบด์นั้นมีความสามารถในการนำความร้อนที่สูงกว่า และทนทานกว่าโดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง และกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว แต่การกำจัดซีโละที่ติดกับตัวเบ้าหลอมซิลิคอนคาร์ไบด์นั้นทำได้ยากกว่ากรณีของเบ้าหลอมกราไฟท์ วิวัฒนาการที่เกี่ยวข้องในการผลิตเบ้าหลอมและเทคโนโลยีที่ทันสมัยทำให้เบ้าหลอมที่ใช้ในการหลอมอะลูมิเนียมในปัจจุบันมีความทนทานและมีความเสี่ยงต่อการแตกร้าวได้น้อยลง เทคโนโลยีใหม่ ๆ ที่มักได้รับการอ้างถึงในการผลิตเบ้าหลอม คือ การใช้เทคนิคการอัดขึ้นรูปแบบ High-pressure Isostatic ซึ่งเป็นการอัดขึ้นรูปเบ้าหลอมในทุกทิศทางด้วยแรงอัดปริมาณมากที่เท่ากันทุกทิศทาง เพื่อให้ได้เบ้าหลอมที่มีความหนาแน่นมากโดยมีความพรุนไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ และสม่ำเสมอในทุกส่วนของเบ้าหลอม จึงทำให้สามารถนำความร้อนได้รวดเร็วกว่า และมีความแข็งแรงสูง เนื่องจากลดโอกาสมีจุดเสียเกิดขึ้นภายในเบ้าหลอม

นอกจากการใช้เทคนิค High-pressure Isostatic แล้ว ปัจจุบันนี้แนวโน้มการหลอมอะลูมิเนียมโดยใช้เตาไฟฟ้าชนิดความต้านทานมากขึ้น ทำให้มีความจำเป็นของการพัฒนาผิวเคลือบเบ้าหลอมที่เริ่มทำงานได้ที่อุณหภูมิไม่สูงมากนัก เพื่อให้ทนต่อการเกิดการเกิดออกซิเดชันในส่วนที่ได้รับความร้อนต่ำ

(ทั้งนี้เพราะโดยทั่วไปผิวเคลือบนั้นต้องการความร้อนในการทำให้เริ่มความสามารถในการป้องกันการเกิดออกซิเดชัน) ผิวเคลือบนี้มีความจำเป็นโดยเฉพาะกรณีของเบ้าหลอมซิลิคอนคาร์ไบด์เพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชัน

แม้ว่าเทคโนโลยีในปัจจุบันนี้ทำให้ได้เบ้าหลอมที่มีความทนทานมากขึ้น และมีโอกาสเกิดการแตกร้าวเสียหายน้อยลง แต่อย่างไรก็ตามหากต้องการให้ได้เบ้าหลอมที่มีอายุการใช้งานที่ยืนยาว ผู้ทำงานจำเป็นต้องทราบถึงเทคนิคการใช้เบ้าหลอมให้ถูกต้อง ซึ่งผลสุดท้ายคือการได้อายุเบ้าหลอมที่ยืนยาว ต้นทุนการผลิตที่ต่ำลง และทำให้ได้คุณภาพของงานหล่ออะลูมิเนียมที่ดีขึ้นอีกด้วย

2.1.5 ประเด็นที่ทำให้เกิดความเสียหายของเบ้าหลอมอาจแบ่งได้เป็น 6 กลุ่มหลัก คือ

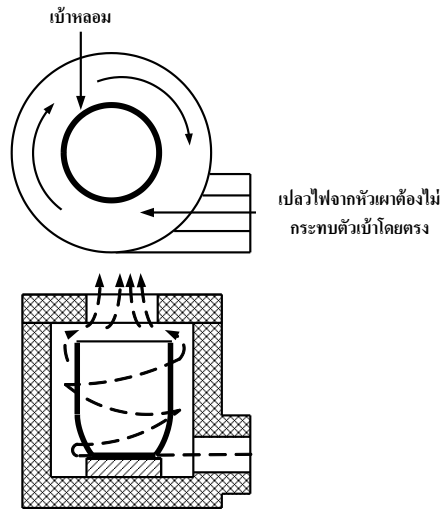
1) การติดตั้งเบ้าหลอม ในการติดตั้งเบ้าหลอมมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับรายละเอียดปลีกย่อยของแต่ละโรงงาน และแม้ว่าการติดตั้งเบ้าหลอมดูเหมือนว่าไม่ได้มีความซับซ้อนทางเทคนิคแต่อย่างไร แต่ก็ตามการติดตั้งเบ้าหลอมที่ไม่ถูกต้องหลักการอาจเป็นสาเหตุทำให้เบ้าหลอมเกิดความเสียหายหลังจากการใช้งานได้

เทคนิคที่เหมาะสม คือ บริเวณปากเบ้าหลอมมักได้รับความเสียหายจากการเกิดออกซิเดชัน ทั้งนี้เพราะเป็นส่วนที่ไม่ได้รับความร้อนมากพอในการทำให้ผิวเคลือบเริ่มทำหน้าที่ได้ บางครั้งโรงหล่อใช้เส้นใยเซรามิกที่ด้านบนของเบ้าหลอมเพื่อเป็นการเผื่อสำหรับการขยายตัว แต่หาก เส้นใยเซรามิกติดตั้งระหว่างผนังด้านในของตัวเตากับผนังด้านนอกของเบ้าหลอม ทำให้ส่วนบนของเบ้าหลอมไม่ได้รับความร้อนโดยตรงหรือได้รับความร้อนน้อย ซึ่งทำให้เกิดออกซิเดชันมากขึ้น ใช้ฐานรองเบ้าหลอมที่มีขนาดเหมาะสม โดยฐานรองเบ้าหลอมควรเป็นวัสดุที่มีอัตราการขยายตัวและหดตัวที่ใกล้เคียงกับเบ้าหลอมชนิดนั้นๆ และมีความสูงที่เหมาะสมเพื่อให้หัวเผาเป่าเปลวไปยังตำแหน่งที่เหมาะสมให้เปลวหมุนวนรอบ ๆ เบ้าหลอม ส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางของฐานรองควรมีขนาดใหญ่กว่าประมาณ 2 นิ้ว เพื่อเป็นการเผื่อความผิดพลาดขณะทำการติดตั้งเบ้าหลอม แม้ว่าฐานรองเบ้าหลอมอาจสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่อย่างไรก็ตามไม่ควรที่จะทำ ทั้งนี้เพราะว่าตัวฐานรองเบ้าหลอมเองก็เกิดการออกซิไดซ์และเปราะเมื่อใช้งาน ทั้งนี้เพราะราคาของฐานรองถูกมากเมื่อเปรียบเทียบกับราคาเบ้าหลอม และค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง ดังนั้นจึงควรเปลี่ยนฐานรองเบ้าหลอมใหม่ทุกครั้งที่เปลี่ยนเบ้าหลอม อย่าเชื่อมต่อเบ้าหลอมเข้ากับตัวเตา ทั้งนี้เพราะเบ้าหลอมมีการขยายตัวระหว่างการให้ความร้อน จึงต้องมีระยะเผื่อสำหรับการขยายตัว ดังนั้นจึงอาจมีความจำเป็นในการใช้เส้นใยฉนวนติดตั้งที่ปากเบ้าหลอมเพื่อเป็นตัวช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพของเตา และในขณะเดียวกันสามารถช่วยการขยายตัว

ของเบ้าหลอมโดยไม่เกิดการแตกร้าว หลีกเลี่ยงการกระแทกโดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำ และไม่ควรกลิ้งเบ้าหลอมเพื่อการเคลื่อนย้าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการกลิ้งบนขอบล่างของเบ้าหลอม ไม่ควรวางหรือเก็บเบ้าหลอมบนพื้นโรงงานโดยตรง ทั้งนี้เพราะเบ้าหลอมอาจดูดความชื้นจากพื้นขึ้นมาได้ และควรเก็บไว้ในที่แห้ง

2) การได้รับผลกระทบจากเปลวไฟโดยตรง ในกรณีที่เป็นเตาเบ้าหลอมชนิดใช้เชื้อเพลิงเบ้าหลอมมักเกิดความเสียหายจากสาเหตุของการซ่อมบำรุงหัวเผา และการที่เปลวไฟไปกระทบกับเบ้าหลอมโดยตรง เบ้าหลอมจะใช้งานได้ดีและมีอายุการใช้งานที่ยาวนานที่สุดหากให้ความร้อนที่มีการกระจายตัวสม่ำเสมอ เปลวควรมีการเคลื่อนผ่านระหว่างเตาด้านในกับด้านนอกของเบ้าหลอมได้โดยรอบ การมีเปลวไฟไปกระทบกับเบ้าหลอมโดยตรงทำให้เกิดปัญหาได้หลายอย่าง โดยอาจสามารถสังเกตได้ที่ตัวของเบ้าหลอมว่ามีสีของตัวเบ้าหลอมที่ต่างกัน ซึ่งลักษณะของสีผิวเคลือบที่ต่างกัน และอาจพบรอยร้าวตามแนวเส้นรอบวงของเบ้าหลอม

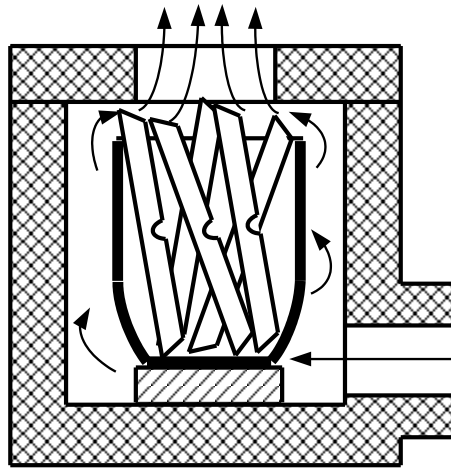
เทคนิคที่เหมาะสม คือ สมควรมีการออกแบบระยะห่างระหว่างห้องเผาไหม้กับเบ้าหลอมและระยะห่างระหว่างหัวเผากับเบ้าหลอมให้มีความเหมาะสม รวมถึงมุมของหัวเผา ให้เหมาะสมไม่ใกล้หรือไกลเกินไป ปรับหัวเผาให้มีการเป่าเปลวไปยังทิศทางที่เหมาะสม ซึ่งโดยทั่วไปควรปรับให้เปลวเป่าไปที่ห้องเผาไหม้ และเกิดการหมุนตัวไปโดยรอบเบ้าหลอมก่อนที่จะเคลื่อนขึ้นสู่ด้านบน โดยเปลวไม่ควรเป่าลงบนตัวเบ้าหลอมโดยตรงหรือไม่ควรเป่าไปที่ฐานรอง ดังแสดงไว้ในภาพรูปที่ 2.1 ส่วนกลางของตำแหน่งหัวเผาควรอยู่ที่ตำแหน่งของส่วนบนของฐานรองหรือต่ำลงมาเล็กน้อย ควบคุมให้ผนังหรือพื้นที่เป็นวัสดุด้านความร้อนภายในเตาไม่มีเศษวัสดุต่าง ๆ เพราะเศษวัสดุเหล่านั้นอาจทำให้เกิดการหักเหของทิศทางเปลว จนทำให้เปลวไปกระทบที่เบ้าหลอมโดยตรง ทำให้เกิดความร้อนเฉพาะส่วนบนผิวของเบ้าหลอม อีกทั้งเศษวัสดุเหล่านั้นอาจทำให้การหมุนวนของเปลวไม่เป็นไปอย่างที่คุณออกแบบเตาได้ ออกแบบมาปิดรู Drain เสมอ ทั้งนี้เพราะหลังจากการเลิกเตา อากาศเย็นสามารถถูกดึงเข้าไปแทนที่อากาศร้อนที่ลอยตัวขึ้นด้านบน ซึ่งทำให้เบ้าหลอมเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วและอาจส่งผลทำให้เกิดการแตกร้าวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันได้



รูปที่ 2.1 ภาพร่างของทิศทางของเปลวไฟที่ไม่ควรเป่าลงที่
ตัวเบ้าหลอมโดยตรง แต่หมุนวนโดยรอบภายในเตา [2]

3) การบรรจุเตา การบรรจุเตาโดยขาดความระมัดระวังมักไม่เกิดความเสียหายในทันที แต่อย่างไรก็ตามหากพนักงานหน้าเตาขาดความรู้เบื้องต้นนี้หรือหากประมาทก็อาจเป็นสาเหตุของความเสียหายของเบ้าหลอมได้

เทคนิคที่เหมาะสม คือ การบรรจุเตาควรทำหลังจากได้อุ่นเบ้าหลอมจนร้อนแดงแล้ว (ที่อุณหภูมิประมาณ 800 องศาเซลเซียส) การบรรจุวัสดุควรใส่ตามแนวยาวของวัสดุด้วยความระมัดระวัง และอย่าบรรจุเตาจนแน่นเกินไป ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เพื่อหลีกเลี่ยงการขยายตัวและเกิดการแตกร้าวได้ อย่าบรรจุวัสดุลงในเตาในตำแหน่งเอียง (สำหรับเตาเบ้าหลอมที่เอียงเทได้) แม้ว่าอาจเป็นการง่ายในการบรรจุเตา แต่ว่าการเอียงเตาในขณะที่ติดหัวเผาอยู่ อาจทำให้เกิดจุดร้อนบนเบ้าหลอมและเกิดความเสียหายได้ อย่าให้น้ำโลหะไว้ในเบ้าหลอม ทั้งนี้เพราะอาจเกิดการแตกร้าวเนื่องจากการขยายตัวของอะลูมิเนียมเมื่อให้ความร้อน เมื่อจำเป็นต้องวางเบ้าหลอมที่มีความร้อนภายนอกเตา ควรวางเบ้าหลอม ลงบนทรายแห้งหรือวัสดุอื่นที่เป็นฉนวนและแห้ง หากเป็นการหลอมอะลูมิเนียมที่มีส่วนผสมเดิมต่อเนื่องกัน โดยทั่วไปแนะนำให้หล่ออะลูมิเนียมไว้ในเบ้าหลอมอย่างน้อย 33 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นการประหยัดพลังงานในการเริ่มหลอมใหม่ และยังช่วยยืดอายุเบ้าหลอมได้อีกด้วย



รูปที่ 2.2 การบรรจุเตาไม่ควรใส่แท่งโลหะให้แน่นเกินไปและควร
บรรจุตามแนวยาวเพื่อเพื่อการขยายตัวของอะลูมิเนียม [2]

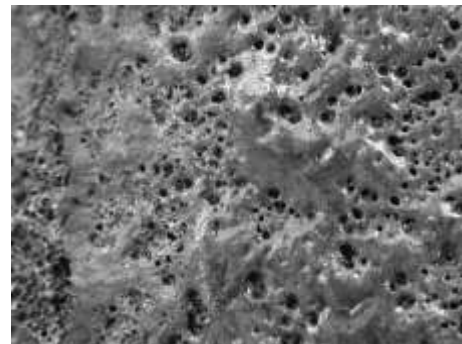
4) การเกิดออกซิเดชัน คือ การที่สาร ที่เป็นองค์ประกอบหลักในบ้ำหลอมเกิดปฏิกิริยากับ ออกซิเจนในอากาศที่อุณหภูมิสูง จนทำให้สมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสมบัติที่มีความสำคัญมากที่สุด คือ การนำความร้อนที่ลดต่ำลง จึงเป็นผลให้ต้องใช้เวลาในการหลอมมากขึ้น และสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมากขึ้น นอกจากนั้นความแข็งแรงของบ้ำหลอมก็ต่ำลงด้วย ออกซิเดชัน เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเองและไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ โดยเมื่อใช้งานบ้ำหลอมนั้นนานขึ้น ทำให้เกิดออกซิเดชันที่มากขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตามหากไม่ทราบเทคนิคที่เหมาะสมอาจยังทำให้บ้ำหลอมเกิดออกซิเดชันได้มากกว่าปกติ จนทำให้เกิดความเสียหายได้เร็วกว่าที่ควรจะเป็น การเกิดออกซิเดชันบริเวณปากบ้ำหลอมมักเป็นปัญหาหลัก ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการหลอมโดยใช้เตาไฟฟ้าชนิดความต้านทาน ซึ่งสังเกตการเกิดออกซิเดชันและจุดเริ่มของความเสียหายได้จากรอยแตกเล็ก ๆ ตามแนวตั้งรอบ ๆ บริเวณปากบ้ำหลอม และเกิดการบวมและพบรูพรุนบนผิวนอกของบ้ำหลอมดังแสดงในรูปที่ 2.4

เทคนิคที่เหมาะสม คือ ให้ควบคุมสัดส่วนของอากาศและเชื้อเพลิงให้มีความเหมาะสม โดยสภาวะที่เหมาะสมในการหลอมอะลูมิเนียม คือ ให้เป็นเปลวชนิดที่เป็นออกซิไดซิง เล็กน้อย (สังเกตจากปลายเปลวที่มีสีเขียวเล็ก ๆ อยู่) หากปริมาณของออกซิเจนในเปลวมากเกินไป (สังเกตจากปลายเปลวที่มีสีเขียวที่มากขึ้น) ทำให้สภาวะในการหลอมมีออกซิเจนมากเกินไป จึงทำให้เป็นสภาวะที่บ้ำหลอมเกิดออกซิเดชันที่สูง และมีโอกาสเกิดความเสียหายมาก ให้เลือกบ้ำหลอมที่มีการเคลือบผิวมากเป็นพิเศษ โดยเฉพาะที่ปากบ้ำหลอม เพื่อช่วยให้อายุการใช้งานของบ้ำหลอมสูงขึ้น โดยบ้ำหลอมที่มี

การเคลือบผิวมักมีราคาแพงกว่า แต่อาจคุ้มค่าการลงทุนในระยะยาวได้ เลือกขนาดเบ้าหลอมให้เหมาะสมกับขนาดการหลอม หากเผื่อขนาดเบ้าหลอมใหญ่กว่าปริมาณหลอมที่หลอมอยู่ประจำ เช่น หลอมเพียงครึ่งเบ้าหลอมเป็นประจำ สิ่งที่เกิดขึ้นคือเกิดความแตกต่างระหว่างเบ้าหลอมส่วนบนและเบ้าหลอมส่วนล่าง และทำให้เบ้าหลอม ส่วนล่างมีโอกาสเกิดการแตกร้าว และผนังเบ้าหลอมด้านในของส่วนบนมีโอกาสเกิดออกซิเดชัน ได้มากกว่าปกติ



รูปที่ 2.3 ความเสียหายที่ปากเบ้าหลอมซึ่ง
สาเหตุหลักมาจากการเกิดออกซิเดชัน [2]

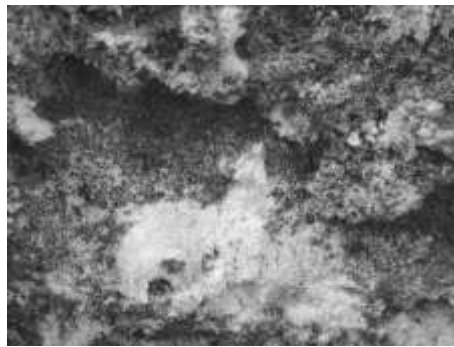


รูปที่ 2.4 ลักษณะผิวนอกของเบ้าหลอมที่
ผ่านการใช้งานจนเกิดออกซิเดชัน [2]

5) การเกิดปฏิกิริยากับฟลักซ์ ฟลักซ์ที่ใช้งานกับการหลอมอะลูมิเนียมมักมีองค์ประกอบของธาตุกลุ่มอัลคาไลน์ (Alkaline) โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลุ่มที่เป็นคลอไรด์ (Chloride) หรือฟลูออไรด์ (Fluoride) เกลือที่เป็นอันตรายมาก คือ โซเดียมฟลูออไรด์ (Sodium Fluoride) เบ้าหลอมมีความพรุนตัวที่อุณหภูมิใช้งาน ดังนั้นฟลักซ์จึงสามารถเดินทางผ่านผนังเบ้าหลอมและเคลื่อนไปจุดที่มีอุณหภูมิสูงที่สุด ซึ่งก็คือบริเวณห้องเผาไหม้ (กรณีใช้เชื้อเพลิงในการเผาไหม้) การเกิดปฏิกิริยากับฟลักซ์ของเบ้าหลอมสามารถสังเกตได้โดยง่าย โดยลักษณะที่พบคือ มีการบิดเบี้ยวภายนอกและมีการบวมเป็นรูที่ผิว และบางครั้งอาจพบว่ามีสีเขียวอยู่ในเบ้าหลอม

เทคนิคที่เหมาะสม คือ ใช้ปริมาณฟลักซ์ให้น้อยที่สุดที่พอเพียงในการได้มาซึ่งอะลูมิเนียมหลอมเหลวที่มีคุณภาพสูง การใช้ฟลักซ์มากเกินไปทำให้เป็นต้นเหตุของการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเบ้าหลอมกับฟลักซ์ ดังนั้นอาจทำการทดลองทำตามที่คุณผลิต/ผู้จำหน่ายฟลักซ์แนะนำ อย่าใส่ฟลักซ์ทิ้งไว้ที่เบ้าหลอมเปล่า ทั้งนี้ฟลักซ์ซึ่งเป็นเกลืออัลคาไลน์มีจุดหลอมเหลวที่ต่ำกว่าอะลูมิเนียม ซึ่งหากไม่มีอะลูมิเนียมอยู่ในเบ้าหลอมจึงส่งผลให้ฟลักซ์ทำปฏิกิริยากับเบ้าหลอมโดยตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 เป็นคราบหลงเหลือของฟลักซ์ที่ทำความสะอาดออกไม่หมดที่พบภายในเบ้าหลอมส่วนบน อย่าให้ความร้อนแก่

อะลูมิเนียมหลอมเหลวที่สูงเกินไป สาเหตุเพราะฟลักซ์สามารถทำงานได้ด้วยความร้อน และมักเคลื่อนไปบริเวณที่ร้อนที่สุด ดังนั้นการที่อุณหภูมิหลอมสูงเกินไปทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของฟลักซ์ผ่านไปฝั่งของเบ้าหลอมมาก อย่าให้ผนังเบ้าหลอมมีการเกาะตัวของสแลก ซึ่งสแลกนี้มีส่วนประกอบของฟลักซ์ ซึ่งเมื่อให้ความร้อนทำให้ฟลักซ์เกิดการซึมผ่านจากสแลก และเข้าไปทำปฏิกิริยากับเบ้าหลอม ได้อย่างรวดเร็ว



รูปที่ 2.5 ฟลักซ์(สีขาว) ที่เหลือค้างภายในเบ้าซึ่งทำให้
ส่งผลร้ายต่ออายุการใช้งานของเบ้า [2]

6) การเกิดอะลูมิเนียมออกไซด์ (Corundum: Al_2O_3) ติดในเบ้าหลอม การเกิดการสะสมตัวของอะลูมิเนียมออกไซด์ภายในผนังเบ้าหลอม ซึ่งทำให้ปริมาตรของเบ้าหลอมมีขนาดเล็กลง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.6 นอกจากนั้นแล้วอะลูมิเนียมออกไซด์นี้ยังเป็นอันตรายต่ออายุการใช้งานของเบ้าหลอม ทั้งนี้เพราะอะลูมิเนียมออกไซด์มีอัตราการขยายตัวที่สูงกว่าเบ้าหลอมมาก เช่น ที่อุณหภูมิประมาณ $700^{\circ}C$ อัตราการขยายตัวของอะลูมิเนียมออกไซด์เป็น 10 เท่าของเบ้าหลอม ดังนั้นหากอะลูมิเนียมออกไซด์สะสมจนมีความหนาประมาณ 9 มิลลิเมตร ถึง 12 มิลลิเมตร อาจทำให้เกิดการขยายตัวจนเบ้าหลอมแตกได้ นอกจากนั้นอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ติดอยู่ทำให้ความสามารถในการนำความร้อนลดลง ทำให้บางส่วนของเบ้าหลอมกลายเป็นจุดร้อน (Hot Spot) ได้

เทคนิคที่เหมาะสม คือ ให้ทำความสะอาดผนังเบ้าหลอม ทุกครั้งที่เลิกเตา เพราะอะลูมิเนียมออกไซด์จะนุ่มและสามารถกำจัดออกได้ง่ายขณะร้อน โดยใช้เครื่องมือที่มีขอบโค้งมนช่วยในการทำความสะอาด หลีกเลี่ยงการให้ความร้อนแก่เบ้าหลอมที่อุณหภูมิสูงเกินกว่าความจำเป็น โดยเฉพาะที่บรรยากาศในเตาเป็นแบบออกซิไดซ์ การใช้ฟลักซ์ชนิดพิเศษที่พัฒนาขึ้นเพื่อทำความสะอาดเบ้าหลอมโดยเฉพาะ สามารถทำให้การทำความสะอาดผนังเบ้าหลอมเป็นไปได้ง่ายขึ้น



รูปที่ 2.6 ภายในบ่่าที่เกิดความเสียหายจะพบว่า
มีการเกิดการสะสมของอะลูมิเนียมออกไซด์
อยู่ภายในจำนวนมาก [2]

2.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสม [3]

โดยทั่วไปโลหะผสมอะลูมิเนียมจะได้จากกระบวนการถลุงแร่ Bauxite โดยผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหรือทางเคมี แต่ในปัจจุบันนี้โลหะผสมอะลูมิเนียมที่ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมมีทั้งที่ได้จากการถลุงและการนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) ซึ่งในปัจจุบันนี้อัตราการใช้โลหะผสมอะลูมิเนียมมีปริมาณสูงมากและคาดว่าจะเพิ่มสูงขึ้นต่อไปในอนาคต เนื่องจากโลหะผสมอะลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบาต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดี มีความเหนียวและสามารถทำการขึ้นรูปได้ง่าย มีสมบัติด้านการหล่อหลอมดี สามารถผสมกับธาตุอื่นได้ง่ายและสามารถนำไปทำการอบชุบได้ด้วยความร้อน โดยทั่วไปโลหะผสมอะลูมิเนียมสามารถจำแนกออกได้ 2 ประเภทคือโลหะผสมอะลูมิเนียมขึ้นรูปเย็น (Wrought) และโลหะผสมอะลูมิเนียมประเภทหล่อขึ้นรูป (Cast)

2.2.1 การจำแนกเกรดโลหะผสมอะลูมิเนียมหล่อ (Casting Alloy Designation) จะจำแนกออกโดยใช้ตัวเลข 4 ตำแหน่ง ตัวเลขตัวแรกบอถึงธาตุผสมหลักสำหรับอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ตัวเลขตัวที่สองและสามจะบอถึงปริมาณธาตุผสมหลักที่ผสมน้อยที่สุดเป็นเปอร์เซ็นต์ ในกรณีที่เป็นโลหะผสมอะลูมิเนียม ตัวเลขที่สองและสามจะไม่มีมาตรฐานที่แน่นอน แต่จะบอกการจำแนกโลหะที่ผสมอยู่อย่างเดียวและตัวเลขหลังจุดทศนิยมจะบอกลักษณะของชิ้นงานว่าเป็นชิ้นงานหล่อ หรือ Ingot โดยใช้ตัวเลข 0 กับ 1 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 การแบ่งเกรดของอะลูมิเนียมผสม [3]

ชนิด	ธาตุผสมหลัก
1XX.X	อะลูมิเนียมบริสุทธิ์
2XX.X	ทองแดง
3XX.X	ซิลิคอน-แมกนีเซียมหรือทองแดง
4XX.X	ซิลิคอน
5XX.X	แมกนีเซียม
6XX.X	เหล็กใช้งาน
7XX.X	สังกะสี
8XX.X	ตะกั่ว
9XX.X	ธาตุผสมอื่น ๆ

ตารางที่ 2.2 ความสามารถในการละลายของธาตุผสมในอะลูมิเนียม [3]

ธาตุผสม	อุณหภูมิ (°C)	ความสามารถในการละลายได้ (wt.%)
แคดเมียม	649	0.4
โคบอลต์	657	<0.02
ทองแดง	548	5.65
โครเมียม	661	0.77
เจอร์มาเนียม	424	7.2
เหล็ก	655	0.05
ลิเทียม	600	4.2
แมกนีเซียม	450	17.4
แมงกานีส	658	1.82
นิกเกิล	640	0.04
ซิลิคอน	577	1.65
เงิน	566	55.6

ตารางที่ 2.2 ความสามารถในการละลายของธาตุผสมในอะลูมิเนียม(ต่อ) [3]

ธาตุผสม	อุณหภูมิ (°C)	ความสามารถในการละลายได้ (wt.%)
ดีบุก	228	0.06
ไทเทเนียม	665	1.3
วานาเดียม	661	0.4
สังกะสี	443	70
เซอร์โคเนียม	660.5	0.28

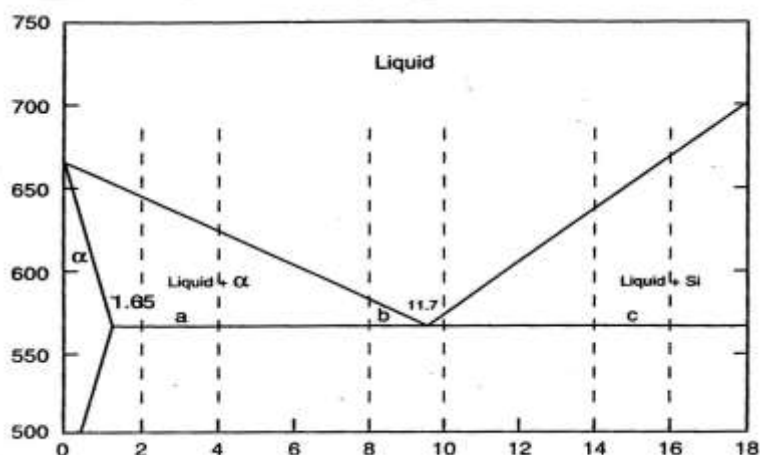
2.2.2 การจำแนกโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน จะแบ่งออกเป็นสองประเภทหลักเช่นเดียวกันคือ โลหะผสมประเภทขึ้นรูปเย็นและประเภทหล่อขึ้นรูป โดยทั่วไปโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน จะมีโครงสร้างผลึกแบบ Face-Centered-Cubic (FCC) มีความหนาแน่นประมาณ 2.685 หรือ 2.7 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (ที่อุณหภูมิห้อง) มีสมบัติเด่นอยู่หลายประการ เช่นสมบัติด้านการหล่อที่ดี (Castability) ต้านทานต่อการกัดกร่อน (Corrosion Resistance) มีน้ำหนักเบา มีความสามารถในการตกแต่งด้วยเครื่องจักรได้ง่าย (Machine ability) โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนสามารถจำแนกออกได้ 3 ประเภทคือ Hypo Eutectic, Eutectic และ Hyper Eutectic โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางทั้งในงานขึ้นส่วนของเรือเดินทะเล ขึ้นส่วนของรถยนต์ ขึ้นส่วนของเครื่องบินและอากาศยาน และขึ้นงานหล่อทั่วไปในอุตสาหกรรม

1) โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนไฮโปยูเทคติก (Hypo eutectic Aluminum-Silicon Alloys) จะมีซิลิคอนผสมอยู่ไม่เกิน 11.7 เปอร์เซ็นต์ โครงสร้างจุลภาคภายหลังการเย็นตัวจะประกอบด้วยโครงสร้างพื้นเป็นอะลูมิเนียม (α -Al) กับ Eutectic Silicon ที่เกิดภายหลังการเย็นตัวผ่านเส้น Eutectic โลหะผสมในกลุ่มนี้นิยมทำการปรับปรุงสมบัติทางกล (Mechanical properties) ด้วยกระบวนการปรับสภาพเกรนให้ละเอียด (Grain Refinement)

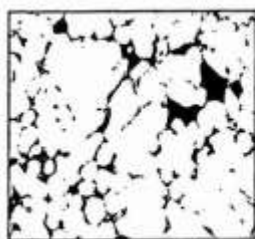
2) โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนยูเทคติก (Eutectic Aluminum-Silicon Alloys) จะมีซิลิคอนผสมอยู่ 11.7 เปอร์เซ็นต์ โครงสร้างจุลภาคหลังจากการเย็นตัวจะประกอบด้วยโครงสร้างพื้นเป็นอะลูมิเนียม (α -Al) กับเฟสของ Eutectic Silicon แบบสลับกัน

3) โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนไฮเปอร์ยูเทคติก (Hyper eutectic Aluminum -Silicon Alloys) จะมีซิลิคอนผสมอยู่มากกว่า 11.7 เปอร์เซ็นต์แต่ไม่เกิน 25 เปอร์เซ็นต์ โครงสร้างจุลภาค

ภายหลังการเย็นตัวประกอบด้วย Primary Eutectic Silicon เป็นแท่งขนาดใหญ่และ (α -Al) กับ Eutectic Silicon มีความแข็งแรงสูงและมีการขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำ สามารถทำการปรับปรุงสมบัติทางกลได้ด้วยกระบวนการปรับปรุงโครงสร้างด้วยสตรอนเตียม โซเดียม หรือ ฟอสฟอรัส



รูปที่ 2.7 แผนภูมิสมดุลของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนในระบบ 2 ธาตุ [3]



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2.8 โครงสร้างโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน

ก) Hypo Eutectic ข) Eutectic ค) Hyper Eutectic [3]

2.3. ปัจจัยในการหลอมที่มีผลต่อคุณภาพของงานหล่อ

ปัจจัยในการหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียมที่สำคัญมีดังนี้ [4]

2.3.1 อุณหภูมิเทน้ำโลหะ งานหล่อโลหะแต่ละชนิดจะมีอุณหภูมิการเทน้ำโลหะไม่เหมือนกันจะขึ้นอยู่กับแบบหล่อและโลหะที่ทำการหลอม ถ้าอุณหภูมิในการเทน้ำโลหะต่ำเกินไปจะทำให้ไม่เต็มแบบหล่อ (Misrun หรือ Cold shut) แต่ถ้าอุณหภูมิในการเทน้ำโลหะสูงมากเกินไปจะทำให้ส่วนผสมทางเคมีเปลี่ยนไปและทำให้ธาตุต่าง ๆ รวมตัวกับออกซิเจนได้มากทำให้เกิดออกไซด์ในน้ำโลหะ ซึ่งจะทำให้สมบัติของงานหล่อด้อยลง ดังนั้นจึงต้องควบคุมอุณหภูมิการเทน้ำโลหะให้เหมาะสมและควรใช้เวลาในการหลอมเหลวสั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้เพราะจะช่วยลดโอกาสการสัมผัสกับไฮโดรเจน

2.3.2 การกำจัดก๊าซ ถ้าเชื้อเพลิงถูกเผาไหม้ไม่สมบูรณ์หรือมีอากาศผสมไม่เพียงพอจากการสันดาปภายในเตาหลอมจะได้ Reducing gasses โดยเฉพาะไฮโดรเจนซึ่งจะสามารถละลายได้ในโลหะหลอมเหลวที่ไม่ใช่เหล็กได้ง่ายและรวดเร็ว ซึ่งแหล่งของไฮโดรเจนจะมาจากความชื้นในบรรยากาศ ความชื้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ความชื้นที่ติดมากับวัตถุดิบ เครื่องมือและผนังของเบ้าหลอม โดยทั่วไปไฮโดรเจนจะสามารถละลายได้ในโลหะที่อยู่ในสถานะของเหลวได้ดีกว่าโลหะที่อยู่ในสถานะของแข็งได้ถึงสิบเท่า เมื่อโลหะเริ่มแข็งตัวอะตอมของไฮโดรเจนจะรวมตัวกันกลายเป็นโมเลกุลและกลายเป็นฟองก๊าซ และจะพยายามดันออกมาสู่บรรยากาศภายนอกได้ยากและจะแทรกตัวอยู่ในเนื้อของโลหะทำให้งานหล่อที่ได้มีรูพรุน เพื่อให้ไฮโดรเจนในน้ำโลหะมีปริมาณน้อยที่สุดควรปฏิบัติดังนี้

- 1) เศษวัสดุ เครื่องมือ วัตถุดิบ ไฟ ฟลักซ์ต้องแห้งจริง ๆ ก่อนใช้งาน
- 2) การดูดซึมของก๊าซเป็นสัดส่วนกับอุณหภูมิและเวลา ดังนั้นจึงต้องเทน้ำโลหะที่อุณหภูมิที่เหมาะสม
- 3) โลหะผสมอะลูมิเนียมสามารถรวมตัวกับออกซิเจนได้ดี บริเวณผิวหน้าของโลหะผสมอะลูมิเนียมเหลวจะมีออกไซด์ปกคลุมเอาไว้เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดออกไซด์อีกต่อไป จึงทำให้การดูดก๊าซได้น้อยลงและสามารถกำจัดก๊าซที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำโลหะออกได้ง่าย โดยการผ่านก๊าซเฉื่อย (ไนโตรเจนหรืออาร์กอน) เข้าไปในน้ำโลหะ แต่ถ้าต้องทิ้งน้ำโลหะไว้ในบรรยากาศนาน ๆ ควรใช้ฟลักซ์คลุมผิวหน้าเอาไว้ ซึ่งการใช้ฟลักซ์จะใช้ป้องกันและทำความสะอาดในการลดไฮโดรเจนและออกซิเจนจะทำให้ได้ชิ้นงานหล่อที่มีสมบัติทางกลและคุณภาพดีขึ้น

2.3.3 บรรยากาศในการหลอม คือ บรรยากาศรอบ ๆ น้ำโลหะซึ่งมีอยู่ 3 ลักษณะดังนี้

- 1) บรรยากาศในการหลอมที่เป็นกลาง (Neutral Condition) เป็นบรรยากาศการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่สมบูรณ์ไม่มีออกซิเจนหลงเหลือ
- 2) บรรยากาศในการหลอมที่ลดปริมาณของออกซิเจนลง (Reducing Condition) เป็นบรรยากาศการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ จากการลดออกซิเจนลงจึงมีก๊าซหลงเหลือบางส่วนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในบรรยากาศจากแหล่งอื่นภายหลังเพื่อให้เกิดการเผาไหม้เชื้อเพลิงสมบูรณ์ขึ้น ซึ่งก๊าซที่หลงเหลือนี้เรียกว่า Reducing gas ได้แก่ CO , CO_2 , H_2 , ไฮโดรคาร์บอนและไอน้ำ ซึ่งก๊าซที่เป็นอันตรายต่อน้ำโลหะมากที่สุด คือ CO , H_2 และไฮโดรคาร์บอนต่างๆ ซึ่งบรรยากาศการหลอมแบบนี้ไม่เหมาะกับโลหะผสมนอกกลุ่มเหล็ก
- 3) บรรยากาศในการหลอมที่เพิ่มปริมาณออกซิเจน (Oxidizing Condition) จะเป็นบรรยากาศที่เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์จะมีออกซิเจนหลงเหลืออยู่ ซึ่งออกซิเจนส่วนที่เหลือนี้จะทำปฏิกิริยากับน้ำโลหะได้อย่างอิสระทำให้เกิดซีโลหะ (Dross) จำนวนมาก จึงต้องทำการลดออกซิเจนออกไปให้หมดก่อนเทน้ำโลหะลงในแบบหล่อ

หมายเหตุ : ก๊าซที่มักเกิดขึ้นในการสันดาปได้แก่ CO , CO_2 , H_2 , ไฮโดรคาร์บอน และไอน้ำ ซึ่งก๊าซที่เป็นอันตรายต่อน้ำโลหะมากที่สุด คือ CO , H_2 และไฮโดรคาร์บอนต่าง ๆ ซึ่งล้วนแล้วแต่เป็น Reducing gas และจะทำให้เกิดบรรยากาศแบบ Reducing ซึ่งไม่เหมาะกับโลหะผสมนอกกลุ่มเหล็ก ถ้าทำการหลอมด้วยเตาน้ำมันต้องปรับบรรยากาศให้เป็นแบบ Oxidizing เล็กน้อย แต่ถ้าใช้เตาไฟฟ้าควรปรับบรรยากาศให้เป็นแบบ Neutral

2.3.4 ก๊าซมลทินในน้ำโลหะขณะหลอมเหลว ได้แก่ ไอน้ำ ไฮโดรคาร์บอน ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งเป็นแหล่งของออกซิเจนและไฮโดรเจนได้เป็นอย่างดี การกำจัดไฮโดรเจนสามารถทำได้โดยการลดก๊าซ (Degassing) เช่นการใช้ Oxidizing Slag การผ่านอากาศแห้ง (Nitrogen) หรือก๊าซเฉื่อย (Argon gas) เข้าไปในน้ำโลหะ แต่ไม่นิยมลดก๊าซด้วยกรรมวิธีสุญญากาศ เพราะจะทำให้ Zn และ Pb ระเหยได้ง่าย การลดไฮโดรเจนโดยการผ่านอากาศแห้ง (Nitrogen) หรือก๊าซเฉื่อย (Argon gas) เข้าไปในน้ำโลหะจะสามารถทำได้ง่าย สะดวก และประหยัดกว่าการลดก๊าซโดยวิธีอื่น การผ่านอากาศแห้งเข้าไปสามารถทำได้โดยการเหย่ท่อกราไฟท์เข้าไปในน้ำโลหะแล้วผ่านอากาศแห้งหรือก๊าซเฉื่อยเข้าไป ซึ่ง N_2 จะรวมตัวกับ H_2 เป็นฟองและลอยตัวสู่เบื้องบน แต่ระวังอย่าให้น้ำโลหะเกิดการปั่นป่วนเพราะฟองก๊าซอาจไหลวนไปกับน้ำโลหะแทนที่จะลอยสู่ผิวด้านบน

2.4 หลักการหลอมอะลูมิเนียม

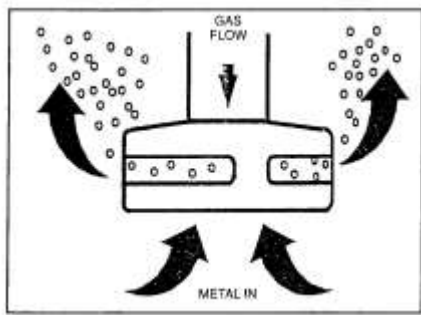
มีนักวิจัยจำนวนมากที่ได้พยายามพัฒนาระบวนการหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียม เพื่อให้สอดคล้องกับข้อกำหนดด้านสิ่งแวดล้อมที่เข้มงวดขึ้นทั่วโลก โดยการวิจัยและพัฒนาให้เตาหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียมมีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานความร้อนและเชื้อเพลิงที่สูงขึ้น และมีการควบคุมการเผาไหม้ที่สม่ำเสมอ นอกจากนี้จะช่วยลดผลกระทบด้านสภาวะแวดล้อมแล้ว ยังส่งผลต่อค่าใช้จ่ายโดยรวมของกระบวนการลดต่ำลง [5] ในการหลอมอะลูมิเนียมนั้นจำเป็นต้องใช้พลังงานความร้อนจำนวนมากเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะชนิดอื่น ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.3 โดยการหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียมจากการหลอมไปที่อุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส โดยเริ่มที่อุณหภูมิห้องจำเป็นต้องใช้ความร้อนถึง 1060 KJ/Kg และเป็นความร้อนที่สูงถึง 85 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณความร้อนที่ต้องการใช้หลอมเหล็กไปที่อุณหภูมิ 1240 องศาเซลเซียส ซึ่งใช้ความร้อน 1260 KJ/Kg ทั้งที่จุดหลอมเหลวของอะลูมิเนียมอยู่ต่ำกว่าเหล็กมาก ยังมีงานวิจัยอีกส่วนหนึ่งที่กล่าวถึงผลของการประยุกต์เทคนิคในการหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียมเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการหลอมที่สูงขึ้นอีกทั้งยังให้คุณภาพของน้ำโลหะที่ดีอีกด้วย [6]

ตารางที่ 2.3 ความร้อนที่ต้องการใช้ในการหลอมโลหะผสมชนิดต่างๆ [6]

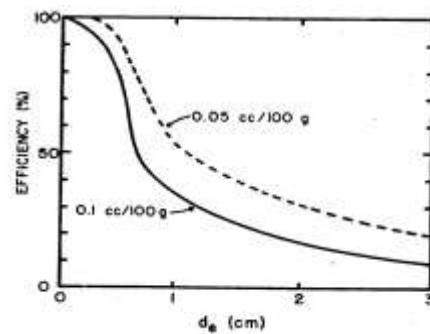
Metal	Heat Required KJ/Kg
Iron	1240
Aluminum	1060
Copper	675
Zinc	280
Tin	116

มีนักวิจัยส่วนหนึ่งได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียม เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูง ซึ่งได้พบว่าในกระบวนการหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียมนั้นการที่จะกำจัดออกซิเจนออกไปให้หมดเลยนั้นเป็นไปได้ยากมาก ทั้งนี้เพราะออกซิเจนที่อยู่ในบรรยากาศของการหลอมจะส่งผลทำให้เกิดซีโลหะ (Aluminum Oxide รวมกับเนื้ออะลูมิเนียม) จากกระบวนการหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียม มีงานวิจัยอยู่หลายงานได้นำเสนอวิธีการดึงเอาโลหะผสมอะลูมิเนียมเหลวออกจากซีโลหะ เช่น งานวิจัยของ Roberts [7] ซึ่งได้นำเสนอผลการวิจัยที่เกี่ยวกับการกำจัด และป้องกันไม่ให้ออกซิเจนเข้ามาพร้อมกับโลหะผสมอะลูมิเนียมเหลวในกระบวนการผลิต โดยใช้ระบบการทำงานเป็น

แบบสัญญาภาคมาใช้ และวิธีการทำงานเพื่อให้บรรยากาศในการทำงานสะอาดขึ้น เพื่อเป็นแนวทางในการป้องกันปัญหาจากต้นเหตุเป็นที่ทราบดีว่าผลลัพธ์ของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจะได้น้ำ (H_2O) ออกมาด้วย ซึ่งน้ำจะเพิ่มโอกาสการทำให้มีไฮโดรเจนปนเข้าไปผสมกับโลหะผสมอะลูมิเนียมเหลวทั้งนี้ Khorasani [8] ได้เสนองานวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดก๊าซ (Degassing) ที่เกิดขึ้นภายในเนื้อโลหะหลอมเหลว โดยกล่าวว่าไม่มีทางหลีกเลี่ยงปัญหาจากการละลายของไฮโดรเจนในโลหะผสมอะลูมิเนียมเหลวได้ จึงเน้นถึงการกำจัดก๊าซมีความสำคัญมากในกระบวนการหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียม ซึ่งการกำจัดก๊าซมีอยู่หลายวิธีการ เช่น การกำจัดก๊าซโดยการปล่อยก๊าซเฉื่อยเข้าไปในหลอมที่จมลงในโลหะผสมอะลูมิเนียมเหลว เพื่อดึงก๊าซและสิ่งสกปรกต่าง ๆ ออกมาดังแสดงในรูปที่ 2.9 ก๊าซเฉื่อยที่นิยมใช้ได้แก่ก๊าซอาร์กอน ซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซวิธีนี้จะสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับขนาดความโตของฟองอากาศที่เกิดในกระบวนการดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้ก๊าซอาร์กอนเป่าผ่านหลอม [8]



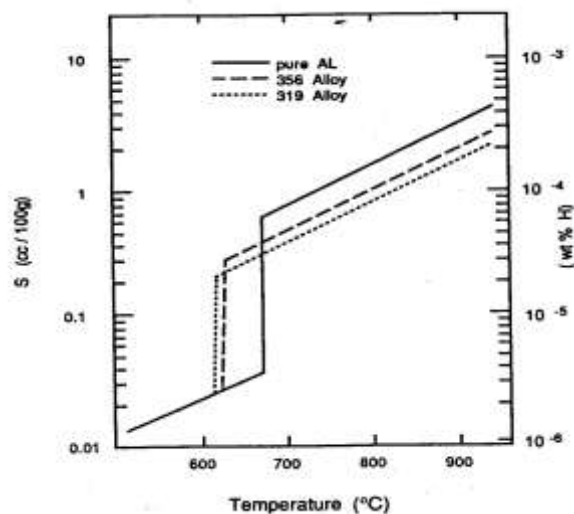
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพในการไล่ก๊าซกับขนาดความโตของฟองอากาศที่เกิด [8]

นอกจากนั้นยังพบว่าขณะที่โลหะผสมอะลูมิเนียมกำลังหลอมอยู่นั้น ไฮโดรเจนจะสามารถละลายได้ในโลหะผสมอะลูมิเนียมเหลวได้สูงมาก แต่อย่างไรก็ตามการละลายของไฮโดรเจนจะลดต่ำลงจนเหลือน้อยมากเมื่อโลหะผสมอะลูมิเนียมเริ่มแข็งตัว ก่อนทำการเทน้ำโลหะลงไปในแบบหล่อต้องทำการไล่ก๊าซออกให้หมดก่อนหรือให้เหลือปริมาณน้อยที่สุด ซึ่งไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นมาจากความชื้นในเนื้อของวัสดุเอง ซึ่งเกิดมาจากปฏิกิริยาของความชื้น มาจากสีและน้ำมันที่ติดมากับ Scrap และมาจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในการให้ความร้อน ดังนั้นการควบคุมการเผาไหม้และบรรยากาศภายในเตาจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง Gruzleski และ Closset [9] ได้อธิบายการเกิดก๊าซภายในเนื้อของโลหะผสมอะลูมิเนียมเหลว ซึ่งก๊าซที่มีบทบาทและน่าสนใจมากที่สุดที่สามารถละลายในอะลูมิเนียมหลอมเหลวได้ดีที่สุดและได้มากคือไฮโดรเจน ซึ่งไฮโดรเจนจะเป็นตัวหลักที่มีบทบาทในการทำให้ชิ้นงานหล่อเกิดรูพรุน ซึ่งถือเป็นจุดบกพร่องที่พบมากที่สุดชิ้นงานหล่อ จึงได้มีความพยายามอย่างยิ่งที่จะทำการ

ควบคุมการละลายของไฮโดรเจนในการหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียมผ่านทาง การปรับสภาวะบรรยากาศภายในเตา รวมถึงเทคนิคในการหลอมอื่นๆ และการกำจัดไฮโดรเจนจากเนื้อโลหะผสมอะลูมิเนียม ความสามารถในการละลายของไฮโดรเจนในโลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่ความดันบรรยากาศหนึ่งจะแสดงไว้ในรูปที่ 2.11 ความสามารถในการละลายของไฮโดรเจนในโลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์สามารถหาได้ดังสมการที่ 2.1

$$\text{Log}_{10} S = \frac{-2550}{T} + 2.62 \quad (2.1)$$

เมื่อ S = ค่าความสามารถในการละลายของไฮโดรเจนที่ละลาย
ต่ออะลูมิเนียม 100 กรัม ที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน (ml/100g)
 T = อุณหภูมิ (K)



รูปที่ 2.11 ความสามารถในการละลายของไฮโดรเจนในโลหะอะลูมิเนียมที่ความดันบรรยากาศหนึ่ง [9]

จากรูปที่ 2.11 สามารถแยกออกได้ 3 ลักษณะ คือ ไฮโดรเจนจะสามารถละลายในโลหะผสมอะลูมิเนียมเหลวได้เพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ไฮโดรเจนจะสามารถละลายในโลหะผสมอะลูมิเนียมเหลวมากเป็น 2 เท่าทุก ๆ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น 110°C ขึ้นไป ความสามารถในการละลายของไฮโดรเจนจะต่ำมากเมื่อโลหะผสมอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะของแข็ง เมื่อโลหะผสมอะลูมิเนียมเริ่มหลอมละลายจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของความสามารถในการละลายของไฮโดรเจนเป็นอย่างมาก

ถึงแม้ว่าการเติมธาตุผสมต่าง ๆ เข้าไปในโลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ซึ่งจะปรับเปลี่ยนความสามารถในการละลายของไฮโดรเจน เช่น เมื่อเติมธาตุ Si, Zn, Cu และ Mn ซึ่งจะทำให้ความสามารถในการละลายของไฮโดรเจนในโลหะผสมอะลูมิเนียมลดลง แต่ถ้าเติมธาตุผสมจำพวก Mg, Ti, Ni และ Li ในโลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์จะทำให้ไฮโดรเจนสามารถละลายได้มากขึ้น ธาตุผสมที่มีความสำคัญมากที่เติมในโลหะอะลูมิเนียม คือ Si และ Cu ซึ่งธาตุทั้งสองจะทำให้ความสามารถในการละลายของไฮโดรเจนลดลง ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ความสามารถในการละลายของไฮโดรเจนในของผสมสองอย่าง [9]

Alloy	ความสามารถในการละลาย (Solubility) *
Al-2%Cu	$\log_{10} S = (-2950/T) + 2.90$
Al-4%Cu	$\log_{10} S = (-3050/T) + 2.94$
Al-8%Cu	$\log_{10} S = (-3150/T) + 2.94$
Al-16%Cu	$\log_{10} S = (-3150/T) + 2.83$
Al-32%Cu	$\log_{10} S = (-2950/T) + 2.57$
Al-2%Si	$\log_{10} S = (-2800/T) + 2.79$
Al-4%Si	$\log_{10} S = (-2950/T) + 2.91$
Al-8%Si	$\log_{10} S = (-3050/T) + 2.95$
Al-16%Si	$\log_{10} S = (-3150/T) + 3.00$

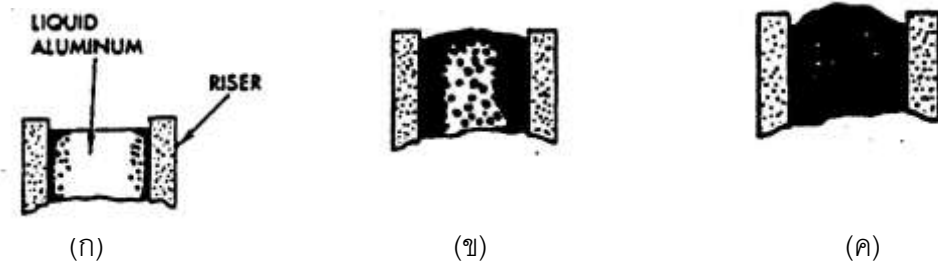
*in ml (STP) per 100 g Al Temperature, T (in °K)

ไฮโดรเจนที่พบในโลหะผสมอะลูมิเนียมเหล่านั้น ส่วนหนึ่งจะมาจากการทำปฏิกิริยาของไอน้ำกับโลหะผสมอะลูมิเนียมเหลวที่บริเวณผิวหน้า อย่างไรก็ตามปฏิกิริยานี้จะไม่ดำเนินต่อไปหากว่าโลหะผสมอะลูมิเนียมเหลวนั้นมีซีโลสหรือฟิล์มของออกไซด์ปกคลุมผิวหน้าอยู่ เพราะซีโลสจะทำหน้าที่เสมือนเกราะคอยคลุมผิวหน้าโลหะผสมอะลูมิเนียมเหลวเอาไว้หากไม่ถูกรบกวน เมื่ออุณหภูมิสูงเกิน 930 องศาเซลเซียส ซีโลสจะสูญเสียความสามารถในการปกคลุมผิวหน้าไม่ไห้ไฮโดรเจนเข้าไปละลาย ดังนั้นการทำงานจึงต้องควบคุมไม่ให้อุณหภูมิสูงมากเกินไป เพราะจะทำให้ไฮโดรเจนที่เกิดมาจากความชื้นของไอน้ำที่เกิดจากการเผาไหม้ เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และการกำจัดไฮโดรเจนออกภายหลังจะมีความยุ่งยาก การเกิดไฮโดรเจนในกระบวนการหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียม นั้น เกิดมาจากองค์ประกอบในบรรยากาศมากมาย เช่น ความชื้นในบรรยากาศขณะทำงาน ทั้งนี้ที่อุณหภูมิ 26 องศา

เซลเซียส และมีความชื้นประมาณ 65 เปอร์เซ็นต์ จะประกอบไปด้วยน้ำประมาณ 16 g/m^3 ซึ่งบรรยากาศเหล่านี้จะทำให้เกิดการละลายของไฮโดรเจนในโลหะผสมอะลูมิเนียมเหลวได้ง่ายนอกจากบรรยากาศในการทำงานที่ก่อให้เกิดการละลายของไฮโดรเจนแล้ว ยังมีปัจจัยอื่น ๆ เช่น ฟลักซ์ที่ใช้ในงานหล่อโลหะมักจะดูดความชื้นได้ดี (Hygroscopic) ดังนั้นหากเก็บไว้ไม่ดีจะเกิดความชื้นรวมในฟลักซ์ ในทางปฏิบัติเพื่อป้องกันไม่ให้ความชื้นเข้าไปในโลหะผสมอะลูมิเนียมเหลวโดยไม่ตั้งใจจึงควรนำฟลักซ์ไปอบไล่ความชื้นโดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส ก่อนการใช้งาน

เบ้าหลอม (Crucible) ที่นำมาใช้ในการหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียม หากเป็นเบ้าใหม่จะมีความชื้นมากกว่าเบ้าเก่าเพราะว่าเบ้าใหม่ยังมีช่องว่างที่ผนังอยู่มากจึงทำให้มีความชื้นฝังอยู่มาก ก่อนใช้งานควรเผาเบ้าเพื่อไล่ความชื้นออกไปนานกว่าเบ้าเก่า ผลจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อให้ความร้อนในการหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียมนั้นมีไอน้ำอยู่ประมาณ 10-20 เปอร์เซ็นต์ จึงมีข้อแนะนำว่าการปรับสภาวะการหลอมครั้งแรกให้ปรับเป็นแบบ Oxidizing เพื่อลดการละลายของไฮโดรเจน จึงเห็นได้ว่าการควบคุมบรรยากาศในการหลอมจึงมีความจำเป็นอย่างมาก การนำวัสดุหรือเศษของวัสดุกลับมาใช้อีกหรือนำมาเติมในเบ้าหลอมนั้นก็ป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการละลายของไฮโดรเจนได้ เพราะว่าอาจจะมีความชื้นจากไอน้ำอยู่บริเวณผิวหน้า หรืออาจจะสัมผัสกับน้ำมันหล่อลื่น น้ำมันตัดจากกระบวนการแปรรูปทางกลมา สนิมติดมาในรูปของอะลูมิเนียมออกไซด์ ซึ่งจะก่อให้เกิดไฮโดรเจนละลายในโลหะผสมอะลูมิเนียมเหลว ซึ่งปริมาณไฮโดรเจนเริ่มแรกขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เนื่องจากอุณหภูมิหนึ่ง ๆ ไฮโดรเจนจะมีความสามารถในการละลายได้ในปริมาณหนึ่งยิ่งอุณหภูมิสูงขึ้นไฮโดรเจนก็ยังสามารถละลายได้มากขึ้น

2.4.1 อิทธิพลของไฮโดรเจนในโลหะผสมอะลูมิเนียมเหลว [10] โลหะผสมอะลูมิเนียมเหลวจะสามารถดูดเอาก๊าซต่าง ๆ ได้มากภายใต้สภาวะหนึ่ง ๆ ซึ่งในระหว่างที่โลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมอยู่นั้นจะถูกล้อมรอบด้วยบรรยากาศของก๊าซต่าง ๆ รวมทั้งไฮโดรเจน ซึ่งก๊าซเหล่านี้เกิดมาจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ไม่สมบูรณ์ภายในเตาหลอม การเผาไหม้ของสารไฮโดรคาร์บอนอื่น ๆ และความชื้นในอากาศ ไฮโดรเจนจะสามารถละลายในโลหะผสมอะลูมิเนียมเหลวได้ง่ายและรวดเร็วเมื่อเทโลหะผสมอะลูมิเนียมเหลวลงในแบบหล่อและจะเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วจึงทำให้ปริมาณของไฮโดรเจนที่ละลายได้ในโลหะผสมอะลูมิเนียมเหลวจะลดลงตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 2.12

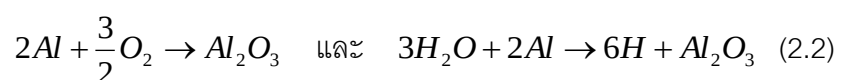


รูปที่ 2.12 ไฮโดรเจนละลายได้ในอะลูมิเนียมหลอมเหลวในระหว่างแข็งตัว

ก) เริ่มเทอะลูมิเนียมหลอมเหลว ข) อะลูมิเนียมเริ่มแข็งตัว ค) อะลูมิเนียมแข็งตัวหมด [10]

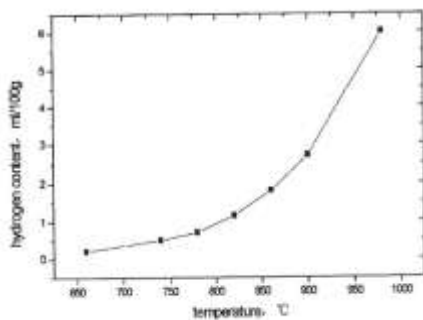
จากรูปที่ 2.12 ก) เมื่อโลหะผสมอะลูมิเนียมเหลวเริ่มแข็งตัวฟองไฮโดรเจนจะเกิดขึ้นที่ผนังของรูฉนวนหรือพื้นที่ผิวสัมผัสกับโลหะผสมอะลูมิเนียมเหลว ข) เมื่ออุณหภูมิโลหะผสมอะลูมิเนียมเหลวลดลงไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจะพยายามแยกตัวออกสู่ผิวด้านบนของ เมื่อการแข็งตัวเพิ่มมากขึ้น ค) เมื่อโลหะผสมอะลูมิเนียมแข็งตัวหมดบริเวณผิวด้านบนจะมีลักษณะคล้ายดอกกะหล่ำ เนื่องจากแรงดันที่เกิดขึ้นในขณะที่ไฮโดรเจนพยายามแยกตัวออก โลหะผสมอะลูมิเนียมเหลวจะมีความไวต่อการทำปฏิกิริยากับความชื้นมาก ทั้งนี้ความชื้นอาจมาจากแหล่งต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นจากแบบหล่อ เครื่องมือที่สัมผัสกับโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลว บรรยากาศในการหลอม บรรยากาศภายนอก ฟลักซ์ที่เปียกชื้น ซึ่งความชื้นนี้จะเป็นต้นตอของการละลายของไฮโดรเจนและการปนเปื้อนออกไซด์ของโลหะชนิดต่าง ๆ นอกจากนี้ไฮโดรเจนยังปนเปื้อนจากการที่มีสารมลทิน โดยเฉพาะการมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอยู่ในวัสดุบรรจุเตาหลอม การแยกทั้งไฮโดรเจนและออกไซด์ของโลหะต่าง ๆ เป็นสิ่งที่ทำได้ค่อนข้างลำบากและหากไม่มีเทคนิคที่เหมาะสมอาจทำให้เป็นต้นเหตุของจุดเสียในชิ้นงานหล่อได้ โดยทั่วไปการละลายของไฮโดรเจนที่มีอยู่ในบรรยากาศสู่โลหะผสมอะลูมิเนียมเหลวนั้น จะมีอยู่น้อยมาก แต่แหล่งที่มาของไฮโดรเจนนั้นจะมาจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงภายในเตาหลอมเป็นหลัก เพราะว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงจะทำให้เกิดความชื้นหรือไอน้ำประมาณ 18 เปอร์เซ็นต์ และในไอน้ำจะมีปริมาณของไฮโดรเจนสูงถึง 9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งไอน้ำจะสามารถแพร่ผ่านผนังของเบ้าที่ใช้หลอมโลหะผสมอะลูมิเนียมได้และจะมีเพียงอะตอมของไฮโดรเจนที่สามารถละลายได้ในโลหะผสมอะลูมิเนียมเหลว ส่วนออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับโลหะผสมอะลูมิเนียมเหลวกลายเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ปนเปื้อนอยู่ อนุภาคปนเปื้อนเหล่านี้เรียกว่าในทางการหล่อว่าซีโลส (Dross) การมีฟิล์มบาง ๆ ของอะลูมิเนียมออกไซด์อาจถือได้ว่าเป็นทั้งข้อดีและข้อเสีย เพราะว่าการที่มีฟิล์มบาง ๆ ของอะลูมิเนียมออกไซด์จะช่วยป้องกันไม่ให้เกิดออกซิเดชันเพิ่มขึ้นจากเดิม หากมีปริมาณมากเกินไปก็เป็นผลทำให้เพิ่มโอกาสการปนเปื้อนของอะลูมิเนียมออกไซด์เข้าไปในชิ้นงานหล่อได้ และจะทำให้สมบัติทางกลและคุณภาพของชิ้นงานหล่อด้อยลง ปริมาณที่อะตอมของไฮโดรเจนสามารถละลายได้

ในโลหะผสมอะลูมิเนียมเหลวขึ้นอยู่กับสถานะและอุณหภูมิ โลหะผสมอะลูมิเนียมที่อยู่ในสถานะของเหลวสามารถละลายอะตอมของไฮโดรเจนได้มากกว่าที่อยู่ในสถานะของแข็ง เมื่ออุณหภูมิของโลหะผสมอะลูมิเนียมเหลวเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ความสามารถในการละลายของไฮโดรเจนสูงตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.13 จะพบว่าความสามารถในการละลายของไฮโดรเจนจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก เมื่อเกิดการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นของเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 660°C ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมอะลูมิเนียมที่แตกต่างกัน จะมีผลต่อความสามารถในการละลายได้ของไฮโดรเจน เช่น การที่โลหะผสมอะลูมิเนียมมีส่วนผสมของซิลิคอน (Si) และทองแดง (Cu) ที่มากขึ้นทำให้ความสามารถในการละลายได้ของไฮโดรเจนลดลง ถ้าหากมีส่วนผสมของแมกนีเซียม (Mg) ในปริมาณที่มากขึ้นทำให้ความสามารถในการละลายของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น การที่อะตอมของไฮโดรเจนละลายอยู่ในโลหะผสมอะลูมิเนียมเหลวจะไม่สามารถทำการตรวจสอบหรือสังเกตเห็นได้ แต่เมื่ออุณหภูมิลดลงและโลหะผสมอะลูมิเนียมเหลวเริ่มแข็งตัวอะตอมของไฮโดรเจนจะรวมตัวกันเป็นโมเลกุลและเกิดฟองไฮโดรเจน (Bubbles) ซึ่งโดยธรรมชาติแล้วไฮโดรเจนจะหนีออกจากอะลูมิเนียมเหลวขณะที่กำลังแข็งตัว ถ้าหากเวลาไม่เพียงพอหรือผิวด้านบนของโลหะผสมอะลูมิเนียมเหลวเกิดการแข็งตัวก่อนจะทำให้ไฮโดรเจนหนีออกไม่ทันทำให้เกิดจุดเสียขึ้นภายในชิ้นงานหล่อได้ และการที่มีฟิล์มบาง ๆ ของอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ผิวหน้าของโลหะผสมอะลูมิเนียมเหลวในบ้าหลอมซึ่งเกิดการสัมผัสกับอากาศโดยตรงทำให้โอกาสที่ไฮโดรเจนที่อยู่ใต้ผิวดังกล่าวเกิดการปนเปื้อนเมื่อเทโลหะผสมอะลูมิเนียมเหลวลงในแบบหล่อ เมื่อความชื้นไม่ว่าจะมาจากแหล่งใดก็ตามสัมผัสกับอะลูมิเนียมหลอมเหลวจะทำให้เกิดปฏิกิริยาดังสมการ 2.2

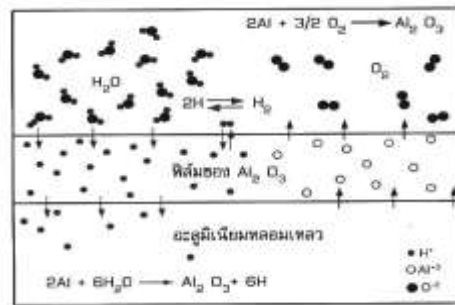


สิ่งที่มักจะเข้าใจกันผิดเสมอมา คือความเชื่อที่ว่าอะตอมของออกซิเจนในอากาศจะแพร่ผ่านฟิล์มบาง ๆ ของอะลูมิเนียมออกไซด์ที่คลุมผิวหน้าด้านบนของโลหะผสมอะลูมิเนียมเหลว แต่ในความเป็นจริงแล้วกลับเป็นอะตอมของอะลูมิเนียมที่อยู่ในรูปของ Al^{+3} แพร่ผ่านออกไปยังผิวด้านนอกและทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในบรรยากาศเพราะว่า Al^{+3} มีรัศมีของอะตอมเพียง 0.51 อังสตรอม (0.51×10^{-10} เมตร) ในขณะที่ออกซิเจนอยู่ในรูปของ O^{2-} จะมีรัศมีของอะตอม 1.32 อังสตรอม ดังนั้นอะตอมของ Al^{+3} มีขนาดเล็กกว่าย่อมเกิดการแพร่ที่รวดเร็วกว่า ซึ่งฟิล์มของอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะอยู่ในรูปของอสัณฐาน (Amorphous) ในช่วงแรก จะมีค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ผ่านของ Al^{+3} ต่ำ เมื่อเวลาผ่านไปและอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้อะลูมิเนียมออกไซด์ซึ่งเดิมอยู่ในรูปอสัณฐานจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูป

ของผลึก มีค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ผ่านของ Al^{+3} ที่สูงกว่า ดังนั้นอัตราการโตของชั้นอะลูมิเนียมออกไซด์ต่อเวลาจึงเพิ่มขึ้นถ้าผิวหน้าของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ขณะหลอมเหลวถูกรบกวนจะทำให้เกิดช่องว่างและทำให้ Al^{+3} เกิดการแพร่ได้อย่างรวดเร็ว ส่วนการแพร่ของ H^+ จะเป็นไปอย่างรวดเร็วมากเพราะว่าขนาดและน้ำหนักของ H^+ ที่เล็กมาก ดังนั้นอะตอมของ H^+ จึงสามารถแพร่เข้าและออกจากอะลูมิเนียมหลอมเหลวผ่านอะลูมิเนียมออกไซด์ได้ตลอดเวลา ดังแสดงในรูปที่ 2.13 และ รูปที่ 2.14

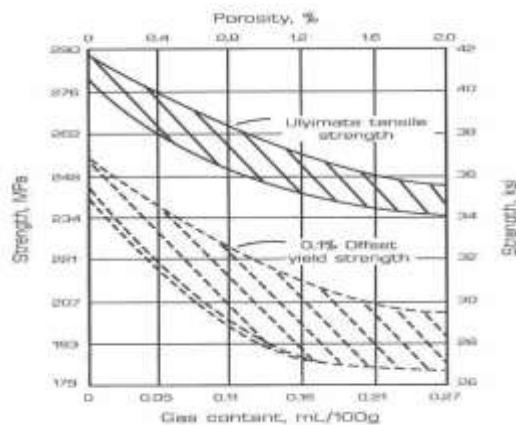


รูปที่ 2.13 ความสามารถในการละลายของไฮโดรเจนในอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ [10]



รูปที่ 2.14 กลไกการเกิด Dross และการแพร่ของอะตอมไฮโดรเจนและอะลูมิเนียมในอะลูมิเนียมหลอมเหลว [10]

2.4.2 ผลของการมีไฮโดรเจนเจือปนในงานหล่ออะลูมิเนียม ไฮโดรเจนถูกมองว่าเป็น สาเหตุของการเกิดจุดเสียประเภทรูพรุนในชิ้นงานหล่อเสมอ ทั้งที่ความเป็นจริงแล้วรูพรุนที่เกิดขึ้นนี้อาจมาจากไฮโดรเจนหรืออาจเกิดมาจากการหดตัวระหว่างที่โลหะผสมอะลูมิเนียมเหลวแข็งตัวก็ได้ ทั้งนี้จำเป็นต้องสามารถแยกแยะให้ได้ว่ารูพรุนในชิ้นงานหล่อนั้นมาจากสาเหตุใด ถ้าหากเป็นรูพรุนที่เกิดมาจากการมีไฮโดรเจนละลายมากเกินไปจะมีรูพรุนลักษณะที่ค่อนข้างกลมและมีความมันเงา ส่วนรูพรุนที่เกิดมาจากการหดตัวจะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอนและมีความมันเงาน้อย การที่ชิ้นงานมีการละลายของไฮโดรเจนในปริมาณที่สูง เมื่อนำชิ้นงานไปทำการตัดกลึงหรือปาดผิวหน้าออกจะสามารถตรวจพบรูพรุนกระจายกระจายทั่วไปในชิ้นงานหล่อ แต่อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าชิ้นงานหล่อเหล่านั้นไม่ได้นำไปทำการตัดกลึงจนพบรูพรุน ความแข็งแรงของชิ้นงานหล่อที่ได้ก็จะลดลงอย่างมากเมื่อมีปริมาณไฮโดรเจนที่มากขึ้นเนื่องมาจากรูพรุนเล็ก ๆ ที่แทรกตัวอยู่ ซึ่งเสมือนจุดบกพร่องของชิ้นงานหล่อนั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.15



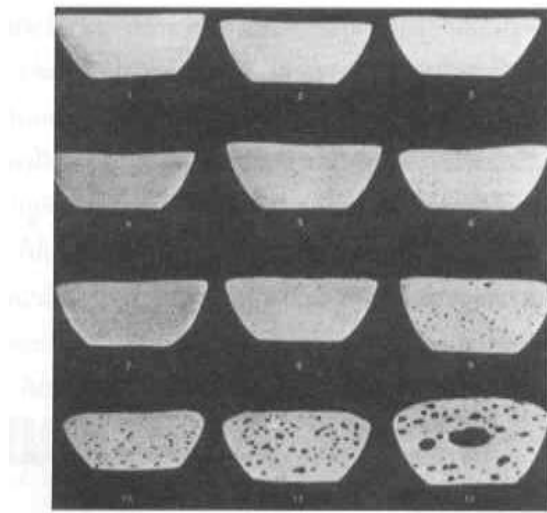
รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฮโดรเจน
ที่ละลายอยู่ในโลหะผสมอะลูมิเนียมต่อความแข็งแรง
ของงานหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียมผสม [10]

2.4.3 วิธีการตรวจวัดปริมาณการละลายของไฮโดรเจน การตรวจวัดปริมาณการละลายของไฮโดรเจนในโลหะผสมอะลูมิเนียมมีความสำคัญเพราะถือเป็นการตรวจสอบก่อนเกิดปัญหา โดยหากพบว่าปริมาณการละลายของไฮโดรเจนมีสูงเกินไปจึงสามารถทำการกำจัดไฮโดรเจนออกก่อนที่จะทำการเทโลหะผสมอะลูมิเนียมหล่อในแบบหล่อ โดยทั่วไปต้องการควบคุมไม่ให้ปริมาณไฮโดรเจนสูงเกินกว่า 0.01 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อ 100 กรัม จะไม่เกิดปัญหาของรูพรุนจากไฮโดรเจน ซึ่งวิธีการตรวจวัดปริมาณไฮโดรเจนในอะลูมิเนียมมีอยู่มากมายดังต่อไปนี้

1) การตรวจสอบด้วยสายตา (Visual Inspection) เนื่องจากอะตอมของไฮโดรเจนสามารถละลายอยู่ในโลหะผสมอะลูมิเนียมเหลวได้จำนวนมาก เมื่อโลหะผสมอะลูมิเนียมเกิดการแข็งตัวทำให้ความสามารถในการละลายของไฮโดรเจนลดลง และอะตอมของไฮโดรเจนเกิดการรวมตัวเป็นไฮโดรเจนผลุดออกจากผิวหน้าของโลหะผสมอะลูมิเนียม เมื่อตักตัวอย่างโลหะผสมอะลูมิเนียมหล่อในอิฐทนไฟหรือแอ่งทรายแห้งขนาดเล็กที่มีการเตรียมไว้ และให้สังเกตดูผิวหน้าในระหว่างแข็งตัวว่ามีฟองก๊าซขนาดเล็กผลุดขึ้นที่ผิวหน้าหรือไม่ ถ้าหากมีไฮโดรเจนในปริมาณมากจะพบว่าฟองก๊าซเกิดขึ้นมากตามไปด้วย จึงต้องทำการไล่ไฮโดรเจนเพิ่มเติมอีกก่อนนำไปเทลงในแบบหล่อ วิธีการนี้เป็นวิธีการที่ง่าย รวดเร็วและไม่เสียค่าใช้จ่าย แต่ความถูกต้องแม่นยำจะต่ำเพราะขึ้นอยู่กับทักษะของผู้ปฏิบัติงาน อีกทั้งไม่สามารถระบุปริมาณของไฮโดรเจนในเชิงปริมาณได้

2) การลดความดันบรรยากาศระหว่างการแข็งตัว (Reduced pressure retest: straubepfeiffer) วิธีการนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้งานกันมาก เนื่องจากสามารถตรวจดูผลได้ง่ายและแม่นยำกว่าวิธีการตรวจสอบด้วยสายตา วิธีการเป็นการเทโลหะผสมอะลูมิเนียมหล่อลงในภาชนะขนาดเล็กใน

ภาชนะปิดที่สามารถลดความดันลงได้ ก่อนทำการลดความดันลงทันทีเมื่อเทโลหะผสมอะลูมิเนียมลงจนเต็ม เพื่อให้แข็งตัวในบรรยากาศที่มีความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ ดังนั้นถ้าหากมีไฮโดรเจนปนเปื้อนอยู่สูง เมื่อผ่าชิ้นงานหล่อดูจะพบว่ารูพรุนจากไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่และเห็นผลชัดเจนกว่าการปล่อยให้แข็งตัวในบรรยากาศปกติมาก ทำให้ความไวต่อการตรวจวัดปริมาณการละลายของไฮโดรเจนสูงกว่า โรงหล่อทั่วไปสามารถสร้างเครื่องมือนี้ได้เองด้วยต้นทุนที่ไม่สูงมากนัก อย่างไรก็ตามการที่มีการปนเปื้อนของอนุภาคสูงจะทำให้จำนวนและขนาดของรูพรุนมีมากกว่าปกติ อีกทั้งระดับของความดันบรรยากาศที่ใช้ในการแข็งตัวในแต่ละครั้งต้องมีค่าเท่ากันเพื่อให้สามารถทำการทดลองเปรียบเทียบผลได้ วิธีการนี้ไม่สามารถบอกเป็นปริมาณของไฮโดรเจนได้โดยตรง แต่สามารถทำเป็นชิ้นงานตัวอย่างเพื่อเปรียบเทียบสำหรับใช้ในโรงงานได้ ดังเช่นตัวอย่างของงานหล่อมาตรฐานของบริษัทแห่งหนึ่งที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.16 ดังนั้นถ้าหากโรงงานใดที่ต้องการนำเอาวิธีการนี้ไปใช้จำเป็นต้องหล่อมาตรฐานในลักษณะเดียวกัน เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบขึ้นมาเอง เพื่อใช้ในการอ้างอิงระดับไฮโดรเจนเท่าใดที่เพียงพอในการหลีกเลี่ยงจุดเสียที่เป็นรูพรุนจากไฮโดรเจนเป็นสิ่งที่น่าสังเกตว่าแม้ไม่ได้ผ่าชิ้นงานทดสอบดู ก็สามารถตรวจสอบผิวด้านบนของชิ้นงานได้ว่าการยุบตัวหรือพองตัวอย่างไร ถ้าหากผิวด้านบนของชิ้นงานมีการยุบตัวแสดงว่ามีปริมาณไฮโดรเจนน้อย แต่ถ้าหากผิวด้านบนมีการพองตัวแสดงว่ามีปริมาณไฮโดรเจนอยู่มาก



รูปที่ 2.16 ตัวอย่างชิ้นงานมาตรฐาน
สำหรับใช้อ้างอิงแต่ละโรงงาน [10]

3) การลดความดันบรรยากาศระหว่างการแข็งตัวเชิงคุณภาพ (Quantitative reduced pressure test : severe science) วิธีการนี้จะอาศัยหลักการพื้นฐานเช่นเดียวกับการลดความดันบรรยากาศระหว่างการแข็งตัว แต่มีการตรวจวัดปริมาณไฮโดรเจนที่ปลดปล่อยออกมาระหว่างการแข็งตัวมีมากน้อยเพียงใดและระดับความดันที่ใช้จะอยู่ในระดับที่ต่ำกว่าการลดความดันบรรยากาศระหว่างการแข็งตัวมาก ผลจากการทดสอบที่ได้จะออกมาเป็นตัวเลขเชิงปริมาณที่มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตรต่อ 100 กรัม เพื่อความถูกต้องในการแสดงผลของการวัด วิธีการนี้จึงจำเป็นต้องมีการสอบเทียบ Pirani gage ที่ใช้วัดปริมาณไฮโดรเจน โดยอาศัยหลักการคือที่ความดันบรรยากาศต่ำการนำความร้อนของก๊าซชนิดต่าง ๆ จะแปรผันตามระดับความดันที่มีอยู่ในเวลานั้น ดังนั้นเมื่อโลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีน้ำหนักคงที่เกิดการแข็งตัวและปล่อยไฮโดรเจนออกมาจะทำให้ความดันเพิ่มขึ้นและการนำความร้อนก็จะเปลี่ยนแปลงไปจนสามารถตรวจวัดค่าออกมาเป็นปริมาณไฮโดรเจนได้ด้วยอย่างเครื่องมือที่ใช้ทดสอบโดยอาศัยหลักการนี้มีชื่อทางการค้าว่า HYSCAN II

4) การตรวจสอบความหนาแน่น (Density measurements) เป็นหลักการที่อยู่บนสมมติฐานที่ว่า รูพรุนที่เกิดขึ้นทั้งหมดในชิ้นงานหล่อเกิดจากไฮโดรเจน ทั้งนี้ชิ้นงานที่นำมาใช้ในการทดสอบความหนาแน่นควรได้จากการแข็งตัวภายใต้การลดความดันบรรยากาศ ถ้าหากชิ้นงานที่มีความหนาแน่นที่ต่ำกว่าให้ถือว่ารูพรุนซึ่งเกิดจากไฮโดรเจนที่มากกว่า อย่างไรก็ตามการทดสอบการปนเปื้อนในระดับที่แตกต่างกันหรือการใช้ตัวกรองกับโลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลว (Filtering) ที่แตกต่างกันจะทำให้ผลที่ได้เกิดความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบได้ วิธีการตรวจวัดนี้เป็นการตรวจวัดในลักษณะเชิงปริมาณ แต่อาจใช้เวลาในการทดสอบที่นานกว่า ส่วนความถูกต้องขึ้นอยู่กับเทคนิคในการทดลองส่วนบุคคลและระดับความปนเปื้อนของอนุภาคจำพวกออกไซด์และยังมีต้นทุนจากเครื่องชั่งน้ำหนักที่มีความละเอียดสูง ดังนั้นวิธีการนี้จึงไม่เป็นที่นิยมใช้งานกันมากนัก

5) การทดสอบฟองก๊าซแรก (First bubble test) วิธีการนี้เป็นการพิจารณาฟองก๊าซแรกที่ผลุดออกมาจากผิวหน้าของโลหะผสมอะลูมิเนียมเหลวขณะที่เกิดการแข็งตัวในขณะที่ลดความดันบรรยากาศลงอย่างช้า ๆ อย่างต่อเนื่อง เมื่อพบฟองก๊าซแรกจึงทำการบันทึกค่าความดันบรรยากาศและอุณหภูมิโดยใช้สมมติฐานที่ว่าความดันบรรยากาศในขณะนั้นมีค่าเท่ากับค่าความดันของไฮโดรเจน (Partial pressure) ในโลหะผสมอะลูมิเนียมเหลว จึงสามารถคำนวณค่าปริมาณไฮโดรเจนได้โดยอาศัยหลักการของ Sievert's Law ความถูกต้องของวิธีการนี้ขึ้นอยู่กับทักษะของผู้ทำการทดสอบและการกำหนดใช้ค่าคงที่ในการคำนวณตาม Sievert's Law ซึ่งมีความแตกต่างไปตามส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมอะลูมิเนียมแต่ละชนิด เพื่อให้ได้ผลที่ถูกต้องที่สุดและเพื่อให้สามารถนำผลของปริมาณไฮโดรเจนไปใช้เทียบระหว่างโลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีส่วนผสมทางเคมีที่ต่างกัน



รูปที่ 2.17 เครื่องมือตรวจสอบปริมาณ
การละลายของไฮโดรเจน ALU 90 [10]

6) การทดสอบโดยใช้ก๊าซหมุนเวียน วิธีการนี้เป็นการใช้ก๊าซไนโตรเจนไหลผ่านโลหะผสมอะลูมิเนียมเหลวเพื่อให้ไฮโดรเจนที่มีอยู่ออกมากับก๊าซไนโตรเจน จนกระทั่งไฮโดรเจนที่อยู่ในไนโตรเจนอยู่ที่สมดุลกับปริมาณของไนโตรเจนในโลหะผสมอะลูมิเนียมเหลว จากนั้นจึงทำการวัดค่าความดันของไฮโดรเจนต่อความดันของไนโตรเจน (ซึ่งมีค่าเท่ากับปริมาณของไฮโดรเจนในโลหะผสมอะลูมิเนียมเหลว) โดยการวัดค่าการนำความร้อนของก๊าซผสมของไฮโดรเจนและไนโตรเจน วิธีการนี้นับว่าเป็นวิธีการที่ใช้วัดปริมาณของไฮโดรเจนโดยตรงและมีค่าความเที่ยงตรงสูงมาก จนมีผู้วิจารณ์ว่าเหมาะสมกับการทำงานวิจัยมากกว่าการใช้งานในเชิงอุตสาหกรรม เครื่องมือที่ใช้หลักการนี้ เช่น Alscan โลหะผสมอะลูมิเนียมเหลวมีความไวต่อการเกิดการปนเปื้อนของทั้งออกไซด์ต่าง ๆ และการละลายของไฮโดรเจนที่สูงมาก ดังนั้นการตรวจสอบปริมาณไฮโดรเจนก่อนนำเอาโลหะผสมอะลูมิเนียมเหลวไปเทลงในแบบหล่อจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง แม้ว่าวิธีการตรวจวัดปริมาณการละลายของไฮโดรเจนจะมีอยู่หลายวิธีที่ให้ค่าทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ ด้านระดับความถูกต้องแม่นยำ ด้านต้นทุนค่าเครื่องมือ ค่าใช้จ่ายในการทดสอบตลอดจนความยากง่ายก็มีแตกต่างกันไป ดังนั้น ผู้ประกอบการจึงควรเลือกอุปกรณ์ที่มีความเหมาะสมตามความจำเป็นของแต่ละโรงงานเพื่อให้ได้เครื่องมือที่มีประสิทธิภาพและประสิทธิผลสูงที่สุดในการตรวจสอบ เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดจุดเสียจากไฮโดรเจนในงานหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียม

2.4.4 เทคนิคการกำจัดไฮโดรเจนออกจากอะลูมิเนียมหลอมเหลว [11] หนึ่งในปัญหาที่พบบ่อยที่สุดในงานหล่ออะลูมิเนียม คือการพบรูพรุนเมื่อนำชิ้นงานหล่อไปทำการกลึงปาดผิว หรือเมื่อไม่ผ่านการทดสอบการรั่วซึมอันเนื่องมาจากการมีรูพรุนในงานหล่อ ทั้งนี้การตรวจพบรูพรุนมักมีสาเหตุมาจากการมีไฮโดรเจนละลายอยู่ในอะลูมิเนียมหลอมเหลวมากเกินไป และไฮโดรเจนไม่สามารถออกมาจาก

อะลูมิเนียมได้ทันในขณะที่เกิดการแข็งตัว ไฮโดรเจนนับเป็นต้นเหตุหลักที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อคุณภาพของงานหล่ออะลูมิเนียม เพราะการมีไฮโดรเจนในปริมาณที่สูงเกินไปจะส่งผลทำให้เกิดรูพรุนจากก๊าซในชิ้นงานหล่อหลังจากการแข็งตัว ทั้งนี้ที่มาหลักของไฮโดรเจนที่เข้าไปปนเปื้อนในอะลูมิเนียมหลอมเหลวนั้นมาจากความชื้น โดยอาจมาจากการเผาไหม้ จากบรรยากาศ หรือจากการปนเปื้อนของวัสดุบรรจุเตา เมื่อความชื้นสัมผัสกับอะลูมิเนียมหลอมเหลวจะเกิดปฏิกิริยา ดังสมการ



ทั้งนี้ไฮโดรเจนที่มีอยู่ในอะลูมิเนียมหลอมเหลวนั้น อยู่ในรูปของอะตอมอิสระ (H) ไม่ใช่โมเลกุลหรือก๊าซ ดังนั้นจึงไม่สามารถสังเกตเห็นว่ามีไฮโดรเจนละลายอยู่ในอะลูมิเนียมหลอมเหลว ความสามารถในการละลายของอะตอมของไฮโดรเจนขึ้นอยู่กับสถานะของอะลูมิเนียม และชนิดของอะลูมิเนียมหลอมเหลว ตลอดจนอุณหภูมิของอะลูมิเนียมขณะหลอมเหลว เช่น การมีซิลิคอนและทองแดงที่มากขึ้น ทำให้ความสามารถในการละลายของไฮโดรเจนลดลง แต่หากมีแมกนีเซียมในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้ความสามารถในการละลายของไฮโดรเจนมากขึ้น และที่อุณหภูมิที่สูงขึ้นย่อมมีโอกาสดังกล่าวมากขึ้น เป็นต้น แม้ว่าการกำจัดไฮโดรเจนออกจากอะลูมิเนียมหลอมเหลวเป็นสิ่งที่สามารถกระทำได้ในทางวิศวกรรม อย่างไรก็ตามการกำจัดไฮโดรเจนออกจากอะลูมิเนียมเป็นการเพิ่มต้นทุนให้กับกระบวนการหล่ออะลูมิเนียม ดังนั้นจึงควรมีการป้องกันไม่ให้มีไฮโดรเจนเข้าไปปนเปื้อนกับอะลูมิเนียมในปริมาณที่สูงเกินไป อย่างไรก็ตามการป้องกันการละลายของไฮโดรเจนลงในอะลูมิเนียมหลอมเหลวโดยสมบูรณ์นั้นอาจเป็นสิ่งที่ยากในทางปฏิบัติ

ปัจจุบันมีผู้ผลิตเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการกำจัดไฮโดรเจนออกจากอะลูมิเนียมหลอมเหลวอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งสามารถแบ่งเทคนิคที่ใช้ในการกำจัดไฮโดรเจนออกได้เป็น 3 กลุ่ม คือ

- (1) การกำจัดไฮโดรเจนโดยวิธีธรรมชาติ
- (2) การกำจัดไฮโดรเจนโดยใช้สุญญากาศ
- (3) การกำจัดไฮโดรเจนโดยใช้ก๊าซชนิดอื่นพาออก

1) การกำจัดไฮโดรเจนโดยวิธีธรรมชาติ คือ การปล่อยให้อะตอมของไฮโดรเจนในอะลูมิเนียมหลอมเหลวเกิดการแพร่ขึ้นสู่ผิวหน้า จากนั้นจึงออกสู่บรรยากาศภายนอกเป็นก๊าซไฮโดรเจน เทคนิคนี้มีข้อจำกัดมากมาย เพราะการที่ไฮโดรเจนจะสามารถออกมาจากอะลูมิเนียมหลอมเหลวได้นั้น จำเป็นต้องให้อะลูมิเนียมหลอมเหลวเกิดการอึดตัวเสียก่อน กล่าวคือการมีไฮโดรเจนละลายอยู่ใน

อะลูมิเนียมเกินกว่าความสามารถในการละลายของไฮโดรเจนในขณะนั้น ซึ่งอาจทำได้โดยการลดอุณหภูมิของอะลูมิเนียมหลอมเหลวให้ต่ำลงจนเกือบถึงจุดหลอมเหลว ทั้งนี้เพราะความสามารถในการละลายของไฮโดรเจนจะลดลง เมื่ออุณหภูมิของอะลูมิเนียมหลอมเหลวลดลง และต้องควบคุมให้บรรยากาศเหนืออะลูมิเนียมหลอมเหลวมีปริมาณความชื้นที่ต่ำมากๆ เพื่อป้องกันไม่ให้ไฮโดรเจนเกิดการแพร่กับเข้ามาอีก การกำจัดไฮโดรเจนโดยวิธีธรรมชาตินี้ต้องใช้เวลามาก และอาจมีปัญหาในด้านความสม่ำเสมอในการควบคุมคุณภาพ จึงทำให้เทคนิคนี้เป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ

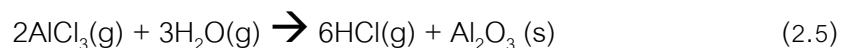
2) การกำจัดไฮโดรเจนโดยใช้สุญญากาศ การใช้สุญญากาศเพื่อประโยชน์ในการไล่ก๊าซไฮโดรเจนนั้น ถือว่าเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูง และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่ำ อย่างไรก็ตาม เทคนิคนี้มีค่าใช้จ่ายสูง ทั้งนี้เพราะต้องใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับระบบสุญญากาศซึ่งมีราคาแพง จึงพบมากแต่เพียงในโรงงานขนาดใหญ่ในทวีปยุโรป วิธีการนี้เป็นการลดความดันบรรยากาศเหนือเบ้าที่มีอะลูมิเนียมหลอมเหลวอยู่ เพื่อเร่งให้อะตอมของไฮโดรเจนผลุดขึ้นสู่ผิวหน้าของอะลูมิเนียมหลอมเหลวและอยู่ในรูปของก๊าซไฮโดรเจนได้ ทั้งนี้หากต้องการให้ประสิทธิภาพของการใช้สุญญากาศเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพอาจจำเป็นต้องใช้ก๊าซเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน หรือ อาร์กอน เป่าลงสู่ส่วนล่างของเบ้าที่มีอะลูมิเนียมหลอมเหลวอยู่ เพื่อช่วยให้หน้าเอาอะลูมิเนียมหลอมเหลวที่อยู่ส่วนล่างของเบ้าได้มีโอกาสไหลวนสู่ด้านบนเพื่อให้ประสิทธิภาพในการดึงไฮโดรเจนออกมีประสิทธิภาพและรวดเร็วขึ้น เทคนิคนี้สามารถลดปริมาณไฮโดรเจนที่ปนเปื้อนอยู่ให้ลดลงถึง 0.08 มิลลิลิตร ต่ออะลูมิเนียม 100 กรัม แม้เทคนิคนี้มีประสิทธิภาพในการไล่ไฮโดรเจนออกได้มาก อย่างไรก็ตามต้นทุนในการดำเนินการสูงกว่าเทคนิคอื่น จึงยังไม่เหมาะกับอุตสาหกรรมโดยทั่วไป

3) การกำจัดไฮโดรเจนโดยใช้ก๊าซชนิดอื่นพาออก เทคนิคนี้ได้รับความนิยมเป็นอย่างสูงเพราะประสิทธิภาพในการกำจัดไฮโดรเจนออกนั้นสูง ในขณะที่ต้นทุนในการดำเนินงานต่ำ ก๊าซที่ใช้ในการไล่ไฮโดรเจนอาจเป็นกลุ่มจำพวกก๊าซเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน และ อาร์กอน หรือการใช้ก๊าซคลอรีน ทั้งนี้แหล่งของก๊าซสำหรับกำจัดไฮโดรเจนออกมาอาจได้จากก๊าซบรรจุถัง หรือจากปฏิกิริยาจากฟลักซ์ชนิดต่างๆ ก็ได้ เทคนิคการกำจัดไฮโดรเจนโดยใช้ก๊าซชนิดอื่นพาออกนี้นับว่าเป็นเทคนิคที่ผู้ประกอบการโดยส่วนใหญ่ในโลกนิยมใช้ และคาดว่าความนิยมในการใช้เทคนิคนี้กำลังมีสัดส่วนที่เพิ่มมากขึ้นในประเทศไทย

การมีฟองก๊าซชนิดอื่นที่มีความเหมาะสมในการดึงเอาไฮโดรเจนออกมาจากส่วนล่างของเบ้า ทำให้อะตอมของไฮโดรเจนสามารถแพร่เข้าไปในฟองก๊าซดังกล่าวได้ และฟองก๊าซเหล่านั้นจะทำหน้าที่เป็นจุดเริ่มของการเกิดการรวมตัวกันของอะตอมไฮโดรเจนจนเปลี่ยนสถานะกลายเป็นก๊าซไฮโดรเจน และสามารถผลุดขึ้นสู่ผิวหน้าของอะลูมิเนียมหลอมเหลวได้ ดังสมการ

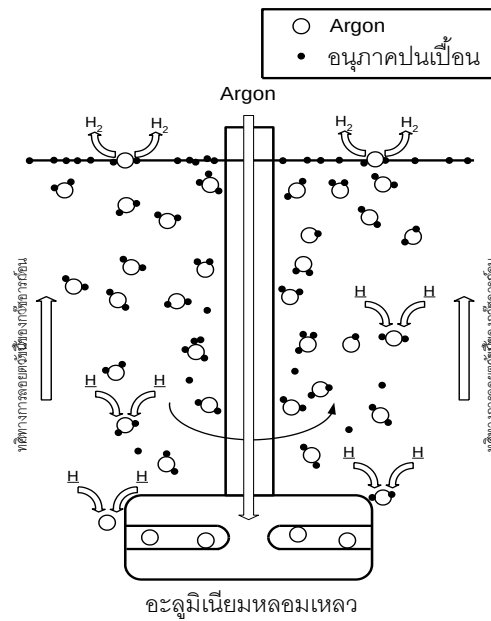


จึงทำให้ปริมาณของไฮโดรเจนที่ปนเปื้อนอยู่กับอะลูมิเนียมหลอมเหลวโดยรวมลดต่ำลง ทั้งนี้แหล่งของก๊าซที่ใช้ในการไล่ไฮโดรเจนไม่ว่าจะเป็นก๊าซที่บรรจุในถังความดัน หรือมาจากฟลักซ์ที่ใช้กดลงไป ในอะลูมิเนียมหลอมเหลวเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา ต้องแห้งสนิทในทุกกรณี มิฉะนั้นอาจเท่ากับเป็นการเพิ่มความชื้นเข้าไปในอะลูมิเนียมหลอมเหลวก็เป็นได้ ดังนั้นในกรณีที่ใช้ฟลักซ์ซึ่งโดยทั่วไปมักมีแนวโน้มที่จะดูดความชื้นสูง (Hygroscopic) จึงต้องเก็บรักษาไว้เป็นอย่างดีก่อนการใช้งาน เพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดการดูดความชื้น ฟลักซ์ที่ใช้สำหรับกำจัดไฮโดรเจนนั้นมักอยู่ในรูปของก้อน เพื่อให้สะดวกในการกดฟลักซ์ลงไปที่ด้านล่างของเบ้า ทั้งนี้ส่วนผสมทางเคมีในฟลักซ์ที่นิยมใช้มากที่สุดเพื่อให้เป็นแหล่งกำเนิดของคลอรีนคือ Hexachloroethane (C_2Cl_6) ซึ่งจะเกิดการสลายตัวเป็นก๊าซคลอรีนที่อุณหภูมิประมาณ 700 องศาเซลเซียส ทั้งนี้การเกิดปฏิกิริยามักเป็นไปอย่างรุนแรงและรวดเร็วจนอาจทำให้ประสิทธิภาพของการกำจัดไฮโดรเจนออกไม่ดีนัก และคลอรีนส่วนหนึ่งจะทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียมเป็นอะลูมิเนียมคลอไรด์ (Aluminum Chloride: AlCl_3) ซึ่งเป็นก๊าซที่อุณหภูมิสูงกว่า 183 องศาเซลเซียส ซึ่งก๊าซอะลูมิเนียมคลอไรด์นี้มีสมบัติเด่นคือจะเกิดการเกาะติดกับดross (Dross) หรืออนุภาคปนเปื้อนอื่นๆ (Inclusions) ได้ดี และทำให้อนุภาคเหล่านั้นลอยตัวขึ้นไปได้ง่ายต่อการกำจัดออกจากอะลูมิเนียมส่งผลให้เนื้อของอะลูมิเนียมหลอมเหลวสะอาดขึ้น ก๊าซอะลูมิเนียมคลอไรด์นี้เอง หากเกิดการรวมตัวกับความชื้นในบรรยากาศจะเกิดปฏิกิริยาเป็น



ดังนั้นการใช้คลอรีนเพื่อกำจัดไฮโดรเจนออกจากอะลูมิเนียมหลอมเหลว จึงมีโอกาสสูงที่จะได้ไอของกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ซึ่งเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานและสิ่งแวดล้อม นอกจากการใช้ฟลักซ์ที่มีส่วนผสมของ Hexachloroethane เพื่อให้ได้ก๊าซคลอรีนแล้ว การใช้ Freon-12 ซึ่งเป็นสารทำความเย็น ก็จะทำให้ผลที่คล้ายคลึงกันคือได้ก๊าซคลอรีนเช่นกัน แม้ว่าการใช้ก๊าซคลอรีนจะมีประสิทธิภาพในการไล่ไฮโดรเจนได้มากก็ตาม ผู้ปฏิบัติงานควรตระหนักถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และสุขภาพของผู้ร่วมงาน นอกจากนั้นการใช้ก๊าซคลอรีนยังอาจทำให้ส่วนผสมทางเคมีเกิดการเปลี่ยนแปลง และประสิทธิภาพในการปรับปรุงสภาพเกรนละเอียด (Grain Refinement) ลดต่ำลง ด้วยเหตุผลดังกล่าวทำให้การใช้คลอรีนซึ่งเคยได้รับความนิยมในอดีตจึงมีความสำคัญลดลงอย่างต่อเนื่อง

ปัจจุบันอาร์กอนเกรดอุตสาหกรรมมีราคาไม่สูงนัก อีกทั้งการใช้อาร์กอนเพื่อกำจัดไฮโดรเจนยังมีประสิทธิภาพที่ดี และไม่มีผลกระทบข้างเคียงมากเท่ากับการใช้คลอรีน ทั้งนี้เพราะอาร์กอนไม่ทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียมหรือธาตุผสมอื่นๆ อีกทั้งไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม เทคนิคในการกำจัดไฮโดรเจนออกจากอะลูมิเนียมหลอมเหลวโดยใช้อาร์กอนนั้นอาจทำได้โดยใช้ก๊าซอาร์กอนเป่าผ่านท่อกราฟไฟท์ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกประมาณ 2.5 ถึง 5 เซนติเมตร และมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายในประมาณ 0.3 เซนติเมตร หากต้องการใช้ท่อที่ทำจากเหล็กชนิดต่างๆ รวมถึงการใช้เหล็กกล้าไร้สนิมก็จำเป็นที่จะต้องใช้สีทาแบบซึ่งมีส่วนผสมของออกไซด์ของโลหะเคลือบหลายๆ ชั้น ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้เหล็กเกิดการละลายเข้าไปปนเปื้อนในอะลูมิเนียมซึ่งอาจส่งผลร้ายต่อสมบัติทางกลของงานหล่ออะลูมิเนียมได้ ในขณะที่ใช้ท่อตรงในการเป่าอาร์กอนลงสู่อะลูมิเนียมหลอมเหลวนั้นจำเป็นต้องเคลื่อนปลายท่อให้ทั่วเข้าหลอมอะลูมิเนียมหลอมเหลว เพื่อให้อาร์กอนกระจายตัวและทำหน้าที่ได้อย่างทั่วถึง การเป่าก๊าซลงในอะลูมิเนียมหลอมเหลวโดยผ่านท่อนั้นทำให้ได้ฟองก๊าซอาร์กอนที่มีขนาดใหญ่เกินไป (2-3 เซนติเมตร) ซึ่งก๊าซอาร์กอนที่มีขนาดใหญ่เหล่านั้นมีพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรที่ต่ำ และผลุดขึ้นสู่ผิวบนของอะลูมิเนียมหลอมเหลวอย่างรวดเร็ว จึงต้องเสียเวลาในการกวบปลายท่อให้ทั่วถึง ดังนั้นจึงมีการพัฒนาระบบต่างๆ เพื่อให้ได้ฟองก๊าซที่มีขนาดเล็ก และมีการกระจายสม่ำเสมอทั่วทั้งเข้าหลอมได้ ตัวอย่างของระบบที่ถือว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดไฮโดรเจนได้ดีคือการใช้ระบบใบกวนแบบหมุน (Rotary Impeller) ทั้งนี้เทคโนโลยีของระบบนี้ไม่มีความซับซ้อนแต่ประการใด ผู้ประกอบการสามารถสร้างและพัฒนาระบบสำหรับใช้งานในโรงงานได้เอง โดยสามารถศึกษาลักษณะของระบบที่ใช้ใบกวนแบบหมุนเพื่อผ่านอาร์กอนในการไล่ไฮโดรเจน การใช้ก๊าซอาร์กอนเพื่อเป็นตัวกลางในการดึงเอาไฮโดรเจนออกจากอะลูมิเนียมหลอมเหลวนั้น แม้ว่าจะมีประสิทธิภาพไม่มากเท่ากับการใช้คลอรีน แต่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่า อีกทั้งไม่ทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียมหลอมเหลว นอกจากนั้นแล้วการใช้อาร์กอนยังช่วยดึงเอาอนุภาคปนเปื้อนที่อยู่กับอะลูมิเนียมหลอมเหลวให้ลอยขึ้นสู่ด้านบนได้อีกด้วย ซึ่งส่งผลทำให้อะลูมิเนียมหลอมเหลวสะอาดขึ้นในลักษณะเดียวกับการใช้คลอรีน ทั้งนี้ได้แสดงหลักการทำงานของทั้งใบกวนแบบหมุนและการดึงเอาไฮโดรเจนและอนุภาคปนเปื้อนขึ้นสู่ด้านบนไว้ในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 หลักการทำงานของทั้งใบกววนแบบหมุนและ
การดึงเอาไฮโดรเจนและอนุภาคปนเปื้อนขึ้นสู่ด้านบน[11]

แม้ว่าประสิทธิภาพของไนโตรเจนในการกำจัดไฮโดรเจนออกจากอะลูมิเนียมหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูงจะสูงกว่าคลอรีน แต่ความสามารถในการละลายของไฮโดรเจนก็สูงขึ้นตามอุณหภูมิของอะลูมิเนียมหลอมเหลวเช่นกัน เมื่อใช้ไนโตรเจนสำหรับกำจัดไฮโดรเจนออกที่อุณหภูมิปกติทำให้ต้องใช้เวลาในการกำจัดไฮโดรเจนที่นานกว่าการใช้คลอรีน และหากกำจัดไฮโดรเจนโดยใช้ไนโตรเจนเป็นเวลานานเกินไปอาจทำให้ไนโตรเจนเกิดปฏิกิริยารวมตัวกับแมกนีเซียมและอะลูมิเนียมเป็นแมกนีเซียมไนไตรด์ (Magnesium Nitride) และอะลูมิเนียมไนไตรด์ (Aluminum Nitride) ตามลำดับ ซึ่งทั้งคู่จะปนเปื้อนเป็นอนุภาคอยู่ในอะลูมิเนียมหลอมเหลว นอกจากนี้ไนโตรเจนยังมีประสิทธิภาพในการดึงเอาอนุภาคปนเปื้อนออกมาต่ำกว่าการใช้คลอรีน อย่างไรก็ตามไนโตรเจนไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้การทำงานง่ายและปลอดภัยกว่าการใช้คลอรีน ประสิทธิภาพในการกำจัดไฮโดรเจนอาจสรุปได้ว่าเทคนิคการกำจัดไฮโดรเจนโดยใช้ก๊าซชนิดอื่นพวออกนั้นน่าจะเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพที่ดี และมีต้นทุนในการปฏิบัติงานที่คุ้มค่าที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดไฮโดรเจนและอนุภาคปนเปื้อน ความปลอดภัย การส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งการสูญเสียธาตุผสม ทำให้อาร์กอนเป็นตัวเลือกที่มีความเหมาะสมที่สุดในการใช้งานโดยทั่วไปในการกำจัดไฮโดรเจนออกจากอะลูมิเนียมหลอมเหลวในการออกแบบและพัฒนาเครื่องมือสำหรับการกำจัดไฮโดรเจนจึงจำเป็นต้องเข้าใจธรรมชาติที่เกี่ยวข้องกับไฮโดรเจนและอะลูมิเนียมหลอมเหลว โดยมีงานวิจัยในอดีตที่ได้ยืนยันแล้วว่าขนาดของ

อาร์กอนที่ออกสู่อะลูมิเนียมหลอมเหลวนั้นมีความสำคัญเป็นอย่างมาก โดยที่หากยังมีขนาดของอาร์กอนเล็กน้อยเกินไป ยิ่งทำให้ประสิทธิภาพในการไล่ไฮโดรเจนได้สูงขึ้น การที่ก๊าซอาร์กอนมีขนาดเล็กมาก ๆ และมีการกระจายตัวที่ดี ทำให้อะตอมของไฮโดรเจนไม่จำเป็นต้องแพร่ไปไกลๆ ก่อนเข้าสู่ฟองก๊าซอาร์กอน อีกทั้งทำให้พื้นที่ผิวต่อปริมาตรก๊าซมีค่ามากขึ้น และมีการผลุดขึ้นสู่ผิวหน้าของอะลูมิเนียมหลอมเหลวอย่างช้าๆ นอกจากนั้นแล้วการควบคุมอุณหภูมิของอะลูมิเนียมหลอมเหลวมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการไล่ไฮโดรเจน ทั้งนี้เพราะความสามารถในการละลายของไฮโดรเจนลดลงเมื่ออุณหภูมิของอะลูมิเนียมหลอมเหลวลดต่ำลง ดังนั้นการไล่ไฮโดรเจนออกจากอะลูมิเนียมหลอมเหลวควรดำเนินการที่อุณหภูมิต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ แม้ว่าการกำจัดไฮโดรเจนในอะลูมิเนียมหลอมเหลวเป็นสิ่งที่มีความสำคัญ และเมื่อตรวจพบรูพรุนในงานหล่อเมื่อใดก็มักด่วนสรุปว่าสามารถแก้ไขได้โดยการไล่ไฮโดรเจนออกจากอะลูมิเนียมหลอมเหลว อย่างไรก็ตามหากลดปริมาณของไฮโดรเจนลงต่ำเกินไปอาจเกิดปัญหาอย่างอื่นแทน เช่น การเกิดรูพรุนจากการหดตัวในลักษณะที่เป็น macroshrinkage เป็นต้น ดังนั้นจึงอาจจำเป็นต้องให้มีปริมาณของไฮโดรเจนที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดมีรูพรุนขนาดเล็กมาก ๆ (microshrinkage) กระจายตัวโดยทั่วไปในงานหล่อ ดังนั้นผู้ประกอบการควรเข้าใจ และสามารถแยกแยะความแตกต่างของปัญหาการเกิดรูพรุนให้ได้ว่า เป็นปัญหาที่มาจากสาเหตุใด ในทางปฏิบัติเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิด macroshrinkage จึงอาจต้องมีการเพิ่มไฮโดรเจนกลับเข้าไปหลังจากที่ลดปริมาณไฮโดรเจนลงแล้ว การควบคุมการปนเปื้อน และการไล่ไฮโดรเจนออกจากอะลูมิเนียมหลอมเหลวนับเป็นเทคโนโลยีพื้นฐานที่มีความสำคัญในการหล่ออะลูมิเนียมให้มีคุณภาพที่สามารถแข่งขันได้ อีกทั้งเป็นเทคโนโลยีที่ไม่จำเป็นต้องลงทุนเครื่องมืออุปกรณ์ด้วยเงินลงทุนจำนวนมากแต่อย่างใด นอกจากนั้นต้นทุนในการดำเนินงานก็ไม่ได้สูงขึ้นนัก และยังอาจทำให้ต้นทุนโดยรวม (Total Cost) ในการผลิตของโรงงานลดต่ำลงอีกอันเนื่องมาจากสัดส่วนของของเสียที่ลดลงนั่นเอง

2.4.5 การใช้ฟลักซ์ในงานหลอมโลหะผสมอะลูมิเนียม[12] ในการหล่ออะลูมิเนียมผสมนั้นจำเป็นต้องเตรียมอะลูมิเนียมหลอมเหลวเพื่อให้มีความสามารถในการหล่อหลอม (Castability) ที่ดีที่สุด เพื่อลดหรือป้องกันปัญหาที่อาจเกิดขึ้นในงานหล่อได้ เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าอะลูมิเนียมหลอมเหลวมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับความชื้น ออกซิเจน ไฮโดรเจน และสารมลทินต่างๆ ได้มาก ดังนั้นการควบคุมสมบัติของอะลูมิเนียมหลอมเหลวโดยใช้ฟลักซ์ (Flux) จึงเป็นอีกหนึ่งแนวทางที่ผู้ประกอบการหล่อโลหะควรให้ความสนใจและเลือกวิธีการที่ถูกต้องเหมาะสม เพื่อเป็นการป้องกันปัญหาจากสาเหตุรากเหง้า (Root Cause) ในงานหล่อที่อาจเกิดขึ้นได้ นอกจากนั้นแล้วการใช้ฟลักซ์อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพยังช่วยลดต้นทุนในการผลิตโดยรวม ในด้านการลดโอกาสเกิดจุดเสียในงานหล่อ การ

ยึดอายุเป้าหมายหลอม การลดมลภาวะทางอากาศ และการลดการสูญเสียอะลูมิเนียมไปกับดrossอีกด้วย ฟลักซ์เป็นสารเคมีที่ใช้เติมลงในอะลูมิเนียมระหว่างการหลอม เพื่อปรับปรุงสมบัติของอะลูมิเนียมหลอมเหลว โดยมีจุดประสงค์ต่างๆ กันตามลักษณะของการใช้งาน เช่น เพื่อใช้ในการปรับสภาพเกรนละเอียด (Grain Refiner) การกำจัดก๊าซไฮโดรเจน (Degasser) การปกคลุมผิวหน้าของอะลูมิเนียมหลอมเหลว (Covering) การลดปริมาณของอะลูมิเนียมที่ปนเปื้อนไปกับดross (Drossing Off) เป็นต้น แม้ว่า ฟลักซ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมมีอยู่มากมายและประกอบไปด้วยสารเคมีที่แตกต่าง แต่มักมีส่วนผสมทางเคมีโดยหลักของเกลือโซเดียมคลอไรด์ และโปตัสเซียมคลอไรด์ (NaCl-KCl) แทบทั้งสิ้น เนื่องจากมีราคาไม่แพงและสามารถใช้กับอะลูมิเนียมได้หลากหลายเกรด ทั้งนี้สัดส่วนของสารเคมีที่ใช้ปรับให้มีจุดหลอมเหลวที่เหมาะสมกับชนิดของอะลูมิเนียมหลอมเหลว ดังเช่นการใช้เกลือโซเดียมคลอไรด์ และโปตัสเซียมคลอไรด์ในสัดส่วนโดยน้ำหนักที่ใกล้เคียงกัน เพื่อให้ได้จุดหลอมเหลวที่ต่ำกว่าอะลูมิเนียมหลอมเหลว ทำให้ฟลักซ์สามารถคลุมผิวหน้าได้อย่างสมบูรณ์ ส่วนการมีส่วนผสมทางเคมีอื่นๆ ก็เพื่อช่วยให้ฟลักซ์ชนิดนั้นมีสมบัติที่ดีขึ้นเพื่อจุดประสงค์เฉพาะอย่าง เช่นอาจมีการเติม $AlCl_3$, NaF , KF , AlF_3 , และ K_3AlF_6 เป็นต้น โดยสารเคมีที่นิยมใช้เป็นส่วนผสมของฟลักซ์สามารถไว้ในตารางที่ 2.5 เนื่องจากฟลักซ์มักเป็นสารประกอบประเภทเกลือ ดังนั้นฟลักซ์จึงมีสมบัติในการดูดความชื้น (Hygroscopic) จึงควรเก็บรักษาก่อนให้ดีขึ้นก่อนการใช้งาน เพราะว่าอาจทำให้ความชื้นเข้าไปในฟลักซ์และต่อมาเข้าไปในอะลูมิเนียมหลอมเหลว จนเป็นต้นเหตุของการเกิดรูพรุนและปัญหาอย่างอื่นตามมาได้

ตารางที่ 2.5 สมบัติทางกายภาพสารเคมีที่นิยมใช้เป็นส่วนผสมของฟลักซ์ในงานหล่ออะลูมิเนียม[12]

สารเคมี	สูตรเคมี	ความหนาแน่น, g/cm ³		Melting Point ^o C
		Solid	Liquid	
Aluminum Chloride	$AlCl_3$	2.440	1.310	190
Aluminum Fluoride	AlF_3	3.070	-	1040
Borax	$Na_2B_4O_7$	2.367	-	741
Calcium Chloride	$CaCl_2$	2.512	2.060	772
Calcium Fluoride	CaF_2	3.180	-	1360
Carnalite	$MgCl_2KCl$	1.600	1.500	487
Zinc Chloride	$ZnCl_2$	2.910	-	262
Zinc Fluoride	ZnF_2	4.840	-	872
				1000

ตารางที่ 2.5 สมบัติทางกายภาพสารเคมีที่นิยมใช้เป็นส่วนผสมของฟลักซ์ในงานหล่ออะลูมิเนียม(ต่อ)
[12]

สารเคมี	สูตรเคมี	ความหนาแน่น, g/cm ³		Melting Point ⁰ C
		Solid	Liquid	
Cryolite	3NaFAIF ₃	2.970	-	1000
Lithium Chloride	LiCl	2.068	1.500	613
Lithium Fluoride	LiF	2.295	1.800	870
Magnesium Chloride	MgCl ₂	2.325	-	712
Magnesium Fluoride	MgF ₂	3.000	-	1396
Potassium Chloride	KCl	1.984	1.530	776
Potassium Fluoride	KF	2.480	-	880
Potassium Borate	K ₂ B ₂ O ₄	-	-	947
Potassium Sulfate	K ₂ SO ₄	2.662	-	1076
Potassium Carbonate	K ₂ CO ₃	2.290	-	891
Sodium Chloride	NaCl	2.165	1.550	801
Sodium Fluoride	NaF	2.790	1.910	980

1) ประเภทของฟลักซ์ที่ใช้ในงานหล่ออะลูมิเนียม

(1) ฟลักซ์ปกคลุมผิวหน้า (Cover Flux) อะลูมิเนียมหลอมเหลวมักมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับออกซิเจนในบรรยากาศอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนเป็นดross และหากทำปฏิกิริยากับความชื้นก็จะเกิดปฏิกิริยาเคมี ดังสมการ

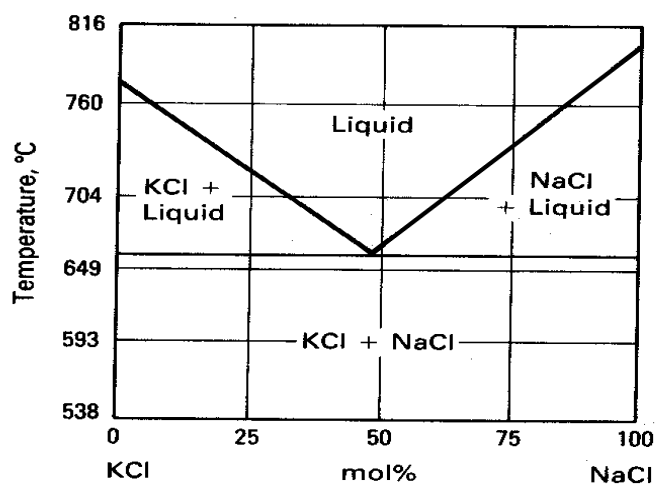


จุดมุ่งหมายของฟลักซ์ประเภทนี้คือการให้ฟลักซ์หลอมเหลวและปกคลุมผิวหน้าของอะลูมิเนียมหลอมเหลวส่วนที่อยู่บนผิวหน้าเพื่อไม่ให้เกิดการสัมผัสโดยตรงกับบรรยากาศ และกลายเป็นปัญหาต่อไปได้ ทั้งนี้ดังที่ได้อธิบายในบทความฉบับที่ผ่านมาแล้วว่าไฮโดรเจนเป็นต้นเหตุหลักของเกิดรูพรุนจากก๊าซในชิ้นงานหล่อหลังจากการแข็งตัว ดังนั้นการใช้ฟลักซ์ประเภทปกคลุมผิวหน้าที่มีประสิทธิภาพดีสามารถช่วยป้องกันปัญหาของการเกิดดross และลดการปนเปื้อนอะตอมของไฮโดรเจนในระดับหนึ่ง

ส่วนผสมทางเคมีที่เหมาะสมในการเป็นองค์ประกอบของฟลักซ์ที่ใช้ในการปกคลุมผิวหน้าของ อะลูมิเนียมหลอมเหลว คือต้องให้จุดหลอมเหลวต่ำ เพื่อให้ฟลักซ์นั้นเกิดการหลอมละลายเป็น ของเหลวปกคลุมผิวหน้าขณะที่ใช้งานกับอะลูมิเนียมหลอมเหลว และต้องราคาไม่แพง โดยสารเคมีที่ นิยมใช้ประกอบด้วยเกลือโซเดียมคลอไรด์ และเกลือโพตัสเซียมคลอไรด์ (NaCl-KCl) ในสัดส่วนที่ ใกล้เคียงกัน เพื่อให้ได้สารประกอบที่มีจุดหลอมเหลวที่ต่ำที่สุด ดังแสดงในเฟสไดอะแกรมในรูปที่ 2.19 ซึ่งฟลักซ์คลุมผิวหน้ากลุ่มนี้สามารถใช้งานได้กับอะลูมิเนียมผสมหลากหลายชนิด แต่ฟลักซ์ที่มี ส่วนผสมของโซเดียมนี้ไม่ควรใช้กับอะลูมิเนียมผสมที่มีแมกนีเซียมผสมมากกว่า 2% โดยน้ำหนัก ทั้งนี้ เพราะจะทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ไม่พึงประสงค์คือ



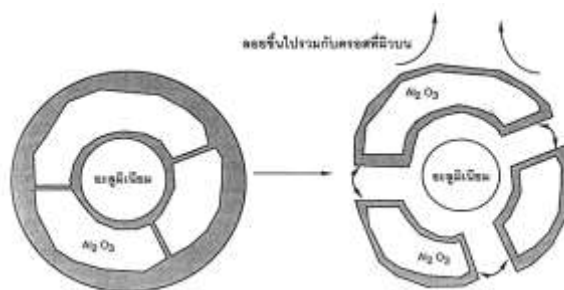
จึงส่งผลให้แมกนีเซียมในอะลูมิเนียมผสมนั้นมีปริมาณลดต่ำลง และโซเดียมที่เข้าไปในอะลูมิเนียมทำ ให้สูญเสียสมบัติทางกลที่ดีไป ดังนั้นจึงต้องมั่นใจว่าฟลักซ์สำหรับใช้กับอะลูมิเนียมผสมที่มีแมกนีเซียม อยู่มากกว่า 2 % โดยน้ำหนักต้องไม่มีโซเดียมเป็นธาตุประกอบ และควรใช้ฟลักซ์กลุ่มที่แมกนีเซียมเป็น ธาตุประกอบแทน เช่น แมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2) เป็นต้น ซึ่งก็คือ MgCl_2 -KCl อย่างไรก็ตามเมื่อ ใช้ฟลักซ์ที่มีแมกนีเซียมคลอไรด์เป็นส่วนผสม ต้องระวังเรื่องการดูดความชื้นของฟลักซ์ดังกล่าวมาก เป็นพิเศษ ทั้งนี้เพราะแมกนีเซียมคลอไรด์สามารถดูดความชื้นได้เป็นอย่างมาก



รูปที่ 2.19 เฟสไดอะแกรมของ NaCl และ KCl [12]

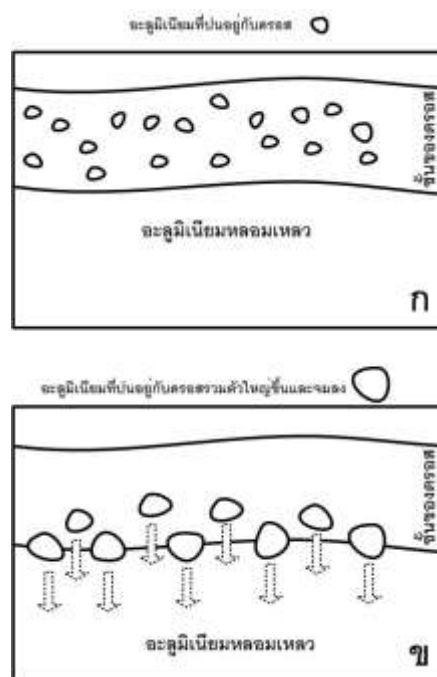
นอกจากการใช้ฟลักซ์ที่ไม่มีคลอไรด์สำหรับอะลูมิเนียมที่มีส่วนผสมของแมกนีเซียมสูงกว่า 2 % โดยน้ำหนักแล้ว หากต้องทำการปรับโครงสร้างยูเทคติกซิลิคอน (Eutectic Silicon) หรือที่รู้จักกันดีว่าเป็นกระบวนการ Modification โดยใช้ฟอสฟอรัส ก่อนการหล่ออะลูมิเนียมผสมกลุ่มไฮเปอร์ยูเทคติก (Hyper Eutectic) ซึ่งมีส่วนผสมของซิลิคอนมากกว่า 12 % โดยน้ำหนัก ต้องมีการใช้ฟลักซ์ที่ไม่มีส่วนผสมทางเคมีของโซเดียม ทั้งนี้เพราะโซเดียมจะส่งผลเสียต่อสมบัติทางกลของงานหล่อที่ได้ หากการใช้ฟลักซ์ที่ไม่มีคุณภาพ หรือเทคนิคที่ใช้ไม่ถูกต้อง หรือไม่เหมาะสม อาจทำให้มีอะลูมิเนียมปนเปื้อนออกมากับฟลักซ์ในปริมาณสูง ดังนั้นปัจจุบันผู้ผลิตฟลักซ์ส่วนมากมักปรับปรุงสมบัติของฟลักซ์โดยให้มีสารเคมีที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic Reaction) เพื่อลดการเกาะติดกับฟลักซ์เมื่อตักออกจากผิวหน้าของอะลูมิเนียมหลอมหลวก่อนทำการหล่อ ทั้งนี้รายละเอียดของฟลักซ์ดังกล่าวจะกล่าวถึงในลำดับต่อไป

(2) ฟลักซ์สำหรับทำความสะอาด (Cleaning Flux) ฟลักซ์กลุ่มนี้ผลิตขึ้นโดยมีจุดประสงค์เพื่อใช้ในการแยกเอาดรอสที่อาจปนเปื้อนอยู่กับอะลูมิเนียมหลอมหลว ให้อยู่ตัวขึ้นสู่ผิวด้านบนเพื่อให้่ายในการตักออกเพื่อทำความสะอาด ฟลักซ์สำหรับทำความสะอาดนี้มีส่วนผสมทางเคมีที่สำคัญเพิ่มเติมขึ้นมาคือ โซเดียมฟลูออโรซิลิเกต (Na_2SiF_6) โดยกลไกการทำความสะอาดนั้นมีความเกี่ยวข้องกับแรงตึงผิว ทั้งนี้โซเดียมฟลูออโรซิลิเกตจะเคลือบผิวระหว่างอะลูมิเนียมและดรอสทำให้เกิดการแยกตัวของอะลูมิเนียมออกจากดรอสได้โดยง่าย และอะลูมิเนียมจึงสามารถหลอมกลับลงสู่อะลูมิเนียมหลอมหลวได้ ดังรูปที่ 2.20 ส่วนดรอสที่ประกอบไปด้วย Al_2O_3 สามารถลอยขึ้นสู่ผิวด้านบนของอะลูมิเนียมหลอมหลวอย่างมีประสิทธิภาพ แม้ว่าเกลือประเภทฟลูออไรด์จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมก็ตาม ฟลักซ์ที่มีส่วนผสมของเกลือฟลูออไรด์นี้ยังมีความจำเป็นอยู่มาก เนื่องจากประสิทธิภาพในการทำความสะอาดอะลูมิเนียมหลอมหลวที่สูงกว่าสารเคมีชนิดอื่นนั่นเอง



รูปที่ 2.20 ลักษณะการทำงานของฟลักซ์สำหรับทำความสะอาด[12]

(3) ฟลักซ์สำหรับการแยกอะลูมิเนียมออกจากดross (Drossing-Off Flux) ฟลักซ์กลุ่มนี้มีความจำเป็นในการหลอมอะลูมิเนียม เพราะช่วยลดการสูญเสียอะลูมิเนียมหลอมเหลวออกไปกับดrossขณะที่ตักออกจากผิวหน้าอะลูมิเนียมหลอมเหลว กลไกที่ทำให้อะลูมิเนียมที่ปนอยู่กับดross สามารถแยกตัวออกได้ คือ การเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนโดยใช้สารเคมี เช่น สารเคมีกลุ่มกำพวดซัลเฟต (Sulphate) และไนเตรต (Nitrate) ผสมเป็นส่วนประกอบหนึ่งของฟลักซ์ เพราะสารเคมีเหล่านี้จะทำให้เกิดปฏิกิริยาคายความร้อนรุนแรงอย่างต่อเนื่อง และเมื่ออะลูมิเนียมที่ปนอยู่กับดross จำนวนมากได้รับความร้อนจากการเกิดปฏิกิริยาคายความร้อน จะเกิดการรวมตัวจนมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น และอะลูมิเนียมที่มีเจือปนอยู่ภายในดrossจะสามารถหลอมกลับคืนสู่อะลูมิเนียมหลอมเหลวดังอธิบายโดยใช้รูปที่ 2.21 เมื่ออะลูมิเนียมที่ปนอยู่กับดrossมีปริมาณลดลงทำให้ดrossซึ่งจากเดิมมีลักษณะเหนียวและเกาะกัน เปลี่ยนไปเป็นดrossที่ร่วน และพบอะลูมิเนียมปนอยู่ลดลงดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.21 ผลของการเติมฟลักซ์ในอะลูมิเนียมหลอมเหลว

ก) ก่อนเติมฟลักซ์สำหรับการแยกอะลูมิเนียมออกจากดross

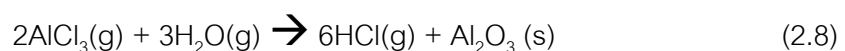
ข) หลังเติมฟลักซ์อะลูมิเนียมที่ปนเปื้อนเกิดการรวมตัวใหญ่ขึ้น และกลับลงสู่อะลูมิเนียมหลอมเหลว[12]



รูปที่ 2.22 ลักษณะของซีโลสที่เกิดขึ้น
 ดรอสที่มีอะลูมิเนียมติดออกมาน้อย (รูปซ้ายมือ)
 และมาก (รูปขวามือ) เนื่องจากใช้ฟลักซ์ต่างชนิดกัน[12]

ในการใช้ฟลักซ์กลุ่มนี้จำเป็นต้องกวนผิวหน้าของดรอสให้เข้ากับฟลักซ์เพื่อให้ฟลักซ์ได้มีโอกาสทำปฏิกิริยากับดรอสได้อย่างทั่วถึง อย่างไรก็ตามหากกวนผิวหน้าของดรอสรุนแรงเกินไปอาจทำให้อะลูมิเนียมหลอมเหลวด้านล่างของดรอสเกิดการปนกับดรอสในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจากเดิม

(4) ฟลักซ์สำหรับการกำจัดไฮโดรเจน (Degassing Flux) ฟลักซ์ที่ใช้สำหรับกำจัดไฮโดรเจนมักอยู่ในรูปของก้อน เพื่อความสะดวกในการกดก้อนฟลักซ์ลงไปที่ด้านล่างของเบ้า เมื่อสารเคมีที่อยู่ในฟลักซ์คือ Hexachloroethane (C_2Cl_6) ซึ่งเป็นสารเคมีที่ได้รับความนิยมสูงสุดในกลุ่มนี้ ทำปฏิกิริยากับความร้อนจากอะลูมิเนียมหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 700 องศาเซลเซียสขึ้นไป จะเกิดปฏิกิริยาเป็นก๊าซคลอรีน อย่างไรก็ตามปฏิกิริยามักเกิดขึ้นอย่างรุนแรงและรวดเร็วจนอาจทำให้ประสิทธิภาพของการกำจัดไฮโดรเจนออกไม่ดีนัก และคลอรีนส่วนหนึ่งจะทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียมเป็นอะลูมิเนียมคลอไรด์ (Aluminum Chloride: $AlCl_3$) ซึ่งเป็นก๊าซที่อุณหภูมิสูงกว่า 183 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ก๊าซอะลูมิเนียมคลอไรด์มีสมบัติเด่นคือจะเกิดการเกาะติดกับดรอสหรืออนุภาคปนเปื้อนอื่นๆ (Inclusions) ได้ดี จึงทำให้อนุภาคเหล่านั้นลอยตัวขึ้นไปได้ง่ายต่อการกำจัดออกจากอะลูมิเนียมส่งผลให้อะลูมิเนียมหลอมเหลวสะอาดขึ้นอีกด้วย อย่างไรก็ตามก๊าซอะลูมิเนียมคลอไรด์นี้เองหากเกิดการรวมตัวกับความชื้นในบรรยากาศจะเกิดปฏิกิริยาเป็นกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ดังสมการ



ดังนั้นการใช้ฟลักซ์ประเภทนี้ในการกำจัดไฮโดรเจนออกจากอะลูมิเนียมหลอมเหลวจึงเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานและสิ่งแวดล้อม และทำให้ความนิยมในการใช้งานลดลง

2) การใช้ฟลักซ์อย่างมีประสิทธิภาพด้วยเครื่องฉีดฟลักซ์ หลักการของการใช้ฟลักซ์ คือต้องคลุมผิวหน้า และ/หรือ กดฟลักซ์ลงใต้อะลูมิเนียมหลอมเหลว แต่หากเทคนิคในการใช้ฟลักซ์ไม่เหมาะสม อาจทำให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าที่ควรจะเป็น ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเครื่องฉีดฟลักซ์ลงสู่อะลูมิเนียมหลอมเหลวโดยใช้ตัวกลางที่เป็นก๊าซเฉื่อย เช่น อาร์กอน หรือไนโตรเจน การฉีดฟลักซ์ลงใต้อะลูมิเนียมหลอมเหลวจึงทำให้การกระจายตัว และการเกิดปฏิกิริยากับอะลูมิเนียมหลอมเหลวเป็นไปอย่างทั่วถึง มลพิษทางอากาศที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มที่ลดลง เพราะเป็นการทำปฏิกิริยาจากใต้ผิวของอะลูมิเนียมหลอมเหลวและใช้ฟลักซ์ในปริมาณที่น้อยกว่า และยังเป็นการจัดไฮโดรเจนออกจากอะลูมิเนียมในขณะเดียวกันได้ นอกจากนั้นยังมีรายงานการวิจัยยืนยันถึงประสิทธิภาพของการใช้เครื่องมือประเภทนี้ ต่อความสะอาดของอะลูมิเนียมที่ได้ ประสิทธิภาพของฟลักซ์ และประสิทธิภาพการจัดไฮโดรเจนอีกด้วย

3) ปัญหาที่เกิดขึ้นกับการใช้ฟลักซ์ การใช้ฟลักซ์ที่ถูกต้องเหมาะสมส่งผลช่วยเพิ่มสมบัติในการหล่อหลอมอะลูมิเนียม และช่วยให้ต้นทุนโดยรวมในการหล่ออะลูมิเนียมลดต่ำลง เนื่องจากลดการสูญเสียอะลูมิเนียมไปกับดrossและลดปริมาณของเสียที่อาจเกิดขึ้น อย่างไรก็ตามหากเทคนิคในการเติมฟลักซ์ลงไปใอะลูมิเนียมโดยไม่ถูกต้องเหมาะสมก็อาจทำให้เกิดปัญหาต่างๆ ได้ดังนี้

(1) การปนเปื้อนของฟลักซ์ในงานหล่อ หลังจากการใส่ฟลักซ์ลงในอะลูมิเนียมหลอมเหลวเพื่อทำหน้าที่ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ ฟลักซ์เหล่านี้ต้องแยกลอยขึ้นสู่ผิวบนของอะลูมิเนียมหลอมเหลว เพื่อให้สามารถตักออกจากอะลูมิเนียมก่อนการเทอะลูมิเนียมหลอมเหลวลงในแบบ อย่างไรก็ตามหากฟลักซ์มีเวลาไม่มากพอ หรืออุณหภูมิของอะลูมิเนียมหลอมเหลวต่ำเกินไปจนทำให้ความหนืดของอะลูมิเนียมสูง ทำให้ฟลักซ์ลอยแยกออกจากอะลูมิเนียมหลอมเหลวขึ้นสู่ผิวบนไม่สะดวกหรือช้ากว่าที่ควรจะเป็น อาจส่งผลให้ฟลักซ์เกิดการปนเปื้อนอยู่ในงานหล่อได้ อุณหภูมิจึงมีส่วนสำคัญเป็นอย่างมากต่อประสิทธิภาพของฟลักซ์ การปนเปื้อนของฟลักซ์ที่อยู่ในงานหล่อจะส่งผลให้ความแข็งแรงของอะลูมิเนียมหล่อที่ได้ต่ำและงานหล่อมีโอกาสเกิดรูพรุนได้มากขึ้นอีกด้วย นอกจากนั้นฟลักซ์ซึ่งมีส่วนผสมของสารประกอบประเภทเกลืออาจเป็นต้นเหตุของการเกิดการกัดกร่อนได้ ทั้งนี้ อาจสามารถทดสอบว่ามีการปนเปื้อนของฟลักซ์ในงานหล่อหรือไม่ โดยการแช่ชิ้นงานหล่อในน้ำประปาเป็นเวลา 1 วัน หากพบว่ามีความของการเกิดการกัดกร่อนขึ้นที่ผิวแสดงว่ามีการปนเปื้อนของฟลักซ์ในชิ้นงานหล่อนั้น

(2) การสูญเสียสตรอนเตียม (Strontium) ไปกับฟลักซ์ สตรอนเตียมมีบทบาทสำคัญในการปรับโครงสร้างและการกระจายตัวของเฟสยูเทคติกซิลิคอน (Modification) โดยเฉพาะในงานหล่อกลุ่มที่เป็นไฮโปยูเทคติก (มีซิลิคอนต่ำกว่า 12 %) สตรอนเตียมที่เติมลงไปเพื่อจุดประสงค์ดังกล่าว

มีความไวต่อการทำปฏิกิริยากับฟลักซ์กลายเป็นสารประกอบเช่น SrCl_2 และ SrF_2 ซึ่งความเสถียรสูงมาก ดังนั้นการเติมสตรอนเตียมเพื่อวัตถุประสงค์ดังกล่าวจึงควรเติมหลังจากที่ได้ตัดฟลักซ์ออกจากผิวหน้าเรียบร้อยแล้วเพื่อลดการสูญเสียของสตรอนเตียม

(3) การส่งผลกับฟอสฟอรัสในการปรับโครงสร้างเฟสยูเทคติกซิลิคอนหากเลือกฟลักซ์ที่มีส่วนผสมของโซเดียมและแคลเซียมกับการหล่ออะลูมิเนียมซิลิคอนกลุ่มที่เป็นไฮเปอร์ยูเทคติก (Si มากกว่า 13% โดยน้ำหนัก) อาจทำให้เกิดปัญหาเมื่อทำการปรับโครงสร้างและการกระจายตัวของเฟสยูเทคติกซิลิคอน (Modification of Eutectic Silicon) โดยใช้ฟอสฟอรัส ทั้งนี้เพราะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของฟอสฟอรัสลดลง เนื่องจากฟอสฟอรัสเกิดปฏิกิริยากับฟลักซ์ที่มีส่วนผสมของธาตุโซเดียมเป็นสารประกอบโซเดียมฟอสไฟด์ (Sodium Phosphide) ได้

(4) การนำความชื้นเข้าสู่อะลูมิเนียมหลอมเหลว ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วว่าสารเคมีที่ประกอบกันเป็นฟลักซ์โดยส่วนใหญ่เป็นสารเคมีกลุ่มเกลือ ซึ่งมีสมบัติในการดูดความชื้น (Hygroscopic) ดังนั้นจึงต้องเก็บฟลักซ์ไว้ในที่แห้งในภาชนะที่ปิดอย่างมิดชิด เพื่อป้องกันไม่ให้ความชื้นในบรรยากาศเข้าไปใน ฟลักซ์ นอกจากนั้นอาจจำเป็นต้องอุ่นฟลักซ์ที่ปากเตาก่อนการใช้งาน เพื่อให้มั่นใจว่าจะไม่มีความชื้นปนเปื้อนกับฟลักซ์เข้าไปในอะลูมิเนียมหลอมเหลว เพราะหากใช้ฟลักซ์ที่เปียกชื้นก็จะเท่ากับว่าเป็นการนำเอาความชื้นลงสู่อะลูมิเนียมหลอมเหลว และเกิดปัญหาด้านต่างๆ ตามมา

(5) การส่งผลต่อสมบัติทางกลเมื่อใช้ฟลักซ์ที่มีโซเดียม ในการหลอมอะลูมิเนียมผสมเกรดที่มีส่วนผสมของแมกนีเซียมในปริมาณสูง เช่น เกรด 535 518 หรือ 520 มักทำให้เกิดดรอสในปริมาณมากกว่าเกรดอื่นอย่างเห็นได้ชัด การเลือกใช้ฟลักซ์ที่ถูกต้องจึงมีความจำเป็นเป็นอย่างมาก เช่นไม่ควรใช้ฟลักซ์ที่มีส่วนผสมของโซเดียม ทั้งนี้เพราะโซเดียมจะทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมจนแมกนีเซียมในอะลูมิเนียมผสมนั้นมีปริมาณลดต่ำลง และโซเดียมที่เข้าไปในอะลูมิเนียมและทำให้สูญเสียสมบัติทางกลที่ดีไป

2.5 การเกิดจุดบกพร่องในงานหล่ออะลูมิเนียมผสม

การเกิดจุดบกพร่องในงานหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียมที่สำคัญและพบมาก คือ การเกิดรูพรุน (Porosity) และการหดตัวในงานหล่อ (Shrinkage) ความแตกต่างระหว่างรูพรุนที่เกิดจากก๊าซและจากการหดตัวในงานหล่ออะลูมิเนียมมีดังนี้ [13]

2.5.1 รูพรุนขนาดเล็ก (Microporosity) เป็นจุดเสียที่พบบ่อยเป็นลำดับต้นๆ ในงานหล่ออะลูมิเนียม โดยทั่วไปคนในวงการหล่อโลหะมักเรียกรูพรุนทุกประเภทที่พบในงานหล่อรวมว่าเป็น รูพรุน โพรงหดตัว หรือรูพรุนตามด ซึ่งโดยส่วนมากแล้วรูพรุนขนาดเล็กเหล่านี้มักพบมากระหว่างขั้นตอนของการกลึงตัด ซึ่งเมื่อเป็นเช่นนั้นแล้วทำให้การตรวจพบจุดเสียเป็นไปได้ช้า และทำให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้น แม้ว่า จะตรวจไม่พบรูพรุนหลังจากการกลึงตัด แต่หากชิ้นงานหล่อนั้นมีรูพรุนอยู่ภายใน เมื่อนำไปใช้งานก็จะเกิดปัญหาอย่างอื่นตามมา เช่นสมบัติทางกลที่ลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทนต่อการล้า (Fatigue resistance) ตลอดจนความสามารถในการทนต่อแรงดันสูง เป็นต้น ในบางกรณีอาจพบการเกิดรูพรุนที่ผิวหน้าของชิ้นงาน โดยมักเกิดกับอะลูมิเนียมที่มีส่วนผสมทางเคมีที่ทำให้ช่วงของการแข็งตัวยาว (Long freezing range) การเตรียมน้ำโลหะไม่ถูกต้อง ตลอดจนการออกแบบระบบทางเข้าและการป้อนเติมที่ไม่เหมาะสม

2.5.2 ประเภทของการเกิดรูพรุนขนาดเล็ก รูพรุนขนาดเล็กที่พบในงานหล่ออะลูมิเนียมสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทตามสาเหตุของการเกิด คือ รูพรุนขนาดเล็กจากการหดตัว (Shrinkage Microporosity) ซึ่งเกิดจากการขาดการป้อนเติมระดับจุลภาคบริเวณแขนของเดนไดรต์ (Dendrite) ในขณะที่อะลูมิเนียมเกิดการแข็งตัวในช่วงที่อยู่ในสภาวะกึ่งของแข็ง (Mushy Zone Solidification) ส่วนอีกสาเหตุคือการเกิดรูพรุนอันเนื่องจากการมีไฮโดรเจนละลายอยู่ในอะลูมิเนียมหลอมเหลวมากเกินไปจนไม่สามารถออกมาจากอะลูมิเนียมขณะแข็งตัวได้ จึงเรียกรูพรุนประเภทนี้ว่ารูพรุนขนาดเล็กจากก๊าซ (Gas Microporosity) ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่ารูพรุนทั้งสองชนิดเกิดจากสาเหตุที่ต่างกัน และเชื่อว่ามีวิศวกรจำนวนไม่น้อยอาจไม่ทราบถึงความแตกต่างของจุดเสียจากรูพรุนทั้งสองแบบ ทำให้การแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นเป็นไปอย่างไม่เต็มประสิทธิภาพ ทั้งนี้เพราะหากสามารถระบุได้ว่ารูพรุนที่พบในงานหล่อนั้นเกิดก๊าซก็จะได้นั้นการแก้ไขป้องกันโดยการกำจัดไฮโดรเจน หากเกิดจากการหดตัวก็จะได้แก้ไขโดยอาศัยการออกแบบระบบทางวิ่งน้ำโลหะและรูล้น และการปรับสภาพเกรนละเอียด (Grain refinement) เป็นต้น

1) รูพรุนขนาดเล็กจากก๊าซ ในการหลอมอะลูมิเนียมต้องใช้พลังงานความร้อนจำนวนมากโดยอาจได้มาจากแหล่งความร้อนประเภทต่างๆ เช่น จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง จากขดลวดความต้านทาน จากการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า เป็นต้น หากใช้การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเป็นแหล่งพลังงานความร้อนก็จะทำให้ได้ความชื้น ซึ่งเป็นผลลัพธ์จากการเผาไหม้ประการหนึ่ง ความชื้นนั้นสามารถทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียมหลอมเหลวได้โดยง่าย ส่วนการใช้พลังงานความร้อนในการหลอมอะลูมิเนียมจากแหล่งอื่นๆก็ยังมีโอกาสที่ความชื้นจากบรรยากาศ และวัสดุบรรจุเตาที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียมหลอมเหลวได้ เช่น การใช้เตาหลอมแบบเหนี่ยวนำทำให้เกิดการกวนของอะลูมิเนียมหลอมเหลวจึงทำ

ให้มีอะลูมิเนียมหลอมเหลวจำนวนมากขึ้นมีโอกาสสัมผัสกับบรรยากาศ นอกจากนั้นแล้วยังทำให้ออกไซด์และสารมลทินอื่น ๆ ปนเปื้อนอยู่ภายในอะลูมิเนียมหลอมเหลวแทนที่จะลอยขึ้นสู่ผิวบน นอกจากความขึ้นที่เป็นต้นเหตุของการมีไฮโดรเจนละลายอยู่ในอะลูมิเนียมหลอมเหลวแล้ว การมีสารมลทินจำพวกไฮโดรคาร์บอน เช่น น้ำมันหล่อลื่น หรือน้ำหล่อเย็น ยังเป็นต้นเหตุให้ไฮโดรเจนละลายอยู่ในอะลูมิเนียมมากขึ้นอีกด้วย อะลูมิเนียมหลอมเหลวสามารถทำปฏิกิริยากับความขึ้นเกิดเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ และไฮโดรเจนได้อย่างรวดเร็วดังสมการ



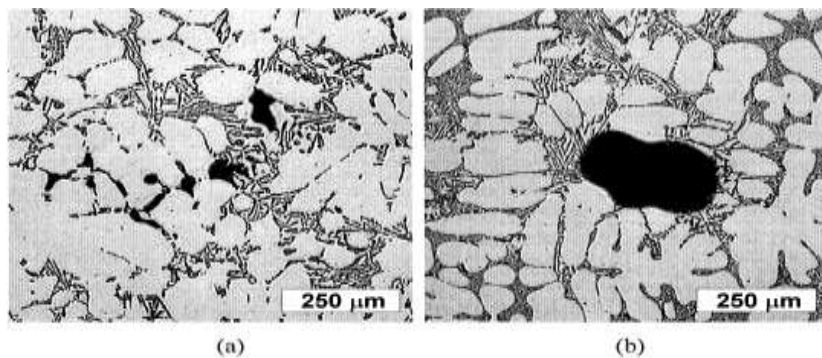
ทั้งนี้ก๊าซไฮโดรเจนบางส่วนสามารถออกสู่บรรยากาศได้โดยง่าย อย่างไรก็ตามบางส่วนจะเกิดการละลายแทรกตัวอยู่ในอะลูมิเนียมหลอมเหลวในรูปแบบของโมเลกุล ดังสมการ



ทั้งนี้อะลูมิเนียมหลอมเหลวสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยากับความขึ้นมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปมากขึ้น และมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิของอะลูมิเนียมหลอมเหลวเพิ่มสูงขึ้น วัสดุที่เกิดจากก๊าซไฮโดรเจนมีสาเหตุมาจากการที่ความสามารถในการละลายของไฮโดรเจนในอะลูมิเนียมหลอมเหลว และอะลูมิเนียมในสถานะของแข็งแตกต่างกันมาก (อยู่ที่ประมาณ 0.9 cc/100 g ในสถานะของเหลว เทียบกับประมาณ 0.03 cc/100 g ในสถานะของแข็ง) ดังนั้นเมื่ออะลูมิเนียมเกิดการแข็งตัวก็จะทำให้ไฮโดรเจนที่มากเกินไปกว่าระดับความสามารถในการละลายถูกผลักออกไปอยู่ในส่วนที่ยังเป็นของเหลวอยู่จนทำให้อะลูมิเนียมหลอมเหลวส่วนดังกล่าวมีปริมาณอะตอมของไฮโดรเจนสูงเกินกว่าความสามารถในการละลาย และอะตอมของไฮโดรเจนจะเกิดเป็นก๊าซซึ่งหากมีปริมาณมากและหนีออกไม่ทันก็จะเกิดเป็นรูพรุนในอะลูมิเนียมหล่อได้ ดังนั้นบริเวณที่มีรูพรุนขนาดเล็กที่เกิดจากก๊าซไฮโดรเจนจะไม่พบรูพรุนของก๊าซไฮโดรเจนในตำแหน่งที่ใกล้เคียง โดยที่รูพรุนที่เกิดจากก๊าซมักมีการกระจายตัวอยู่อย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งบริเวณที่มีลักษณะของการแข็งตัวใกล้เคียงกัน นอกจากนั้นแล้วรูพรุนที่เกิดจากไฮโดรเจนมักมีรูปร่างกลม ทั้งนี้เพราะตำแหน่งที่เป็นรูพรุนเหล่านั้นเป็นฟองก๊าซไฮโดรเจนมาก่อนขณะที่อะลูมิเนียมบริเวณนั้นยังอยู่ในสถานะของเหลว

2) รูพรุนขนาดเล็กจากการหดตัว ในขณะที่อะลูมิเนียมบริสุทธิ์เกิดการแข็งตัวจะทำให้ปริมาตรลดลงจากเดิมซึ่งอยู่ในสถานะของเหลวมากถึง 7% เนื่องจากความแตกต่างของความหนาแน่นของของเหลวและของแข็งในอะลูมิเนียมผสมที่ใช้กับงานหล่อโดยทั่วไปมักมีปริมาตรลดลงระหว่าง 5 ถึง

6% ทั้งนี้เมื่ออะลูมิเนียมเกิดการแข็งตัวและปริมาตรลดลงก็จะมีการดึงเอาน้ำโลหะจากบริเวณใกล้เคียงมาแทนที่ หรือที่เรียกว่าการป้อนเต็ม (Feeding) ในกรณีที่หล่ออะลูมิเนียมผสมที่มีช่วงของการแข็งตัวกว้าง การป้อนเต็มจะเกิดขึ้นผ่านบริเวณเล็กๆระหว่างแขนของเดนไดรต์ ซึ่งเมื่อสัดส่วนของการแข็งมากขึ้น ความสามารถในการป้อนเต็มก็ยิ่งลดลง และท้ายที่สุดเมื่อเกิดการแข็งตัวโดยสมบูรณ์ บริเวณที่เกิดการแข็งตัวสุดท้ายก็จะมีอะลูมิเนียมหลอมเหลวจากกลุ่มอื่นมาป้อนเต็มได้ และเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงจึงเกิดแรงดึงขึ้นบนผิวของของบริเวณที่เกิดการแข็งตัวหลังสุดจึงกลายเป็นรูพรุนเมื่ออะลูมิเนียมแข็งตัวโดยสมบูรณ์ ดังนั้นการเกิดรูพรุนประเภทนี้มักเกิดต่อเนื่องกันเป็นกลุ่มๆ ซึ่งยากที่จะอธิบายผ่านโครงสร้างที่อยู่ในลักษณะสองมิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.23 โครงสร้างจากจุลภาคที่แสดงถึงความแตกต่างของรูพรุนที่เกิดจากการหดตัวในระดับจุลภาค (รูป a) ซึ่งพบว่าลักษณะของรูพรุนที่เกิดขึ้นนั้นมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน มีขนาดเล็กและการกระจายตัวอยู่ใกล้กัน ส่วนรูพรุนที่เกิดจากก๊าซนั้น (รูปb) จะพบว่ามีความใหญ่ และไม่มีรูพรุนในลักษณะเดียวกันที่อยู่ใกล้เคียง

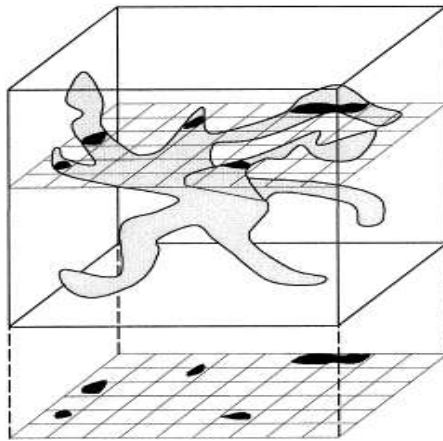


รูปที่ 2.23 ลักษณะรูพรุนที่เกิดขึ้นในงานหล่ออะลูมิเนียม

(a) รูพรุนขนาดเล็กที่เกิดจากการหดตัว และ

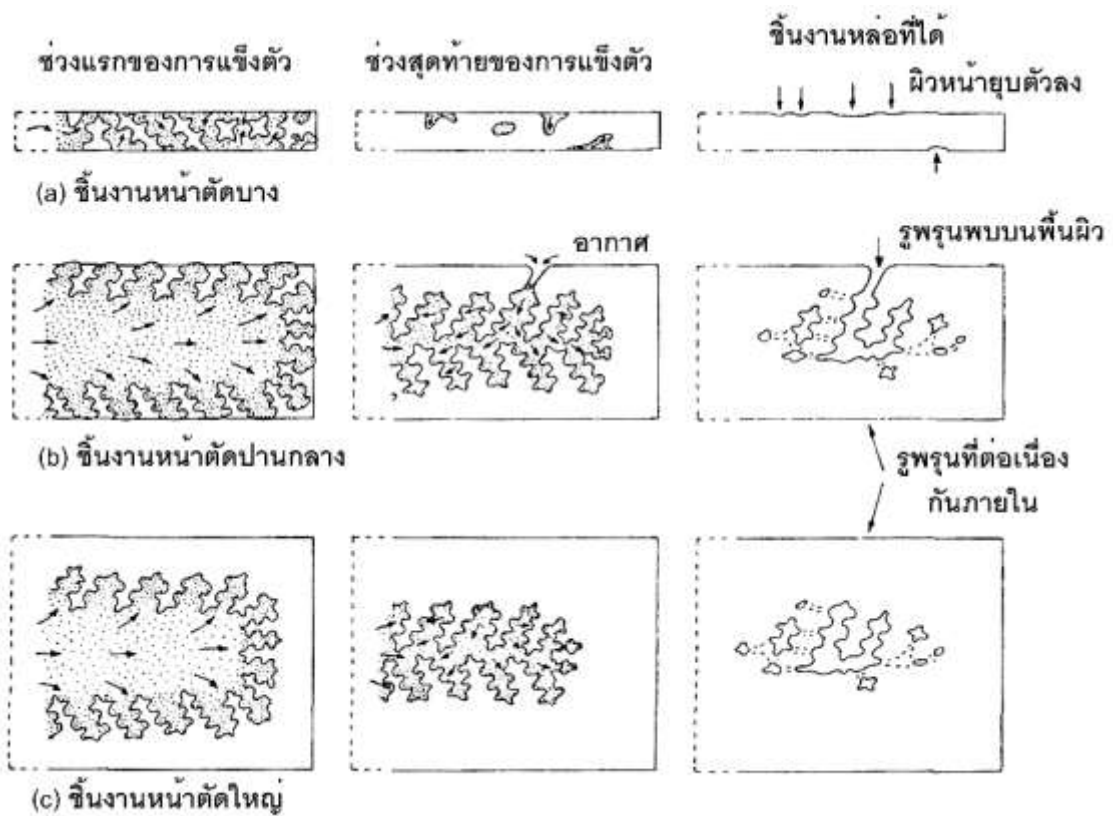
(b) รูพรุนขนาดเล็กที่เกิดจากก๊าซ [13]

เพื่ออธิบายว่าเหตุใดจึงพบรูพรุนเมื่อตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคที่ได้อาจมีขนาดเล็ก รูปร่างไม่สม่ำเสมอ และมักอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม ดังนั้นจึงใช้รูปที่ 2.24 ที่จำลองขึ้นเพื่ออธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าว



รูปที่ 2.24 รูปจำลองลักษณะของรูพรุนที่เกิดขึ้นจากการหดตัว
ในงานหล่ออะลูมิเนียมในลักษณะ 3 มิติ[13]

จากรูปที่ 2.24 จะเห็นได้ว่ารูพรุนจากการหดตัวที่พบว่ามีขนาดเล็กและกระจายตัวอยู่ใกล้กันนั้น เกิดขึ้นจากรูพรุนที่มีขนาดใหญ่เพียงรูเดียว โดยมีรูปร่างที่ซับซ้อนเหมือนกับแขนที่ยื่นไปตามทิศทางการหดตัวหลังสุดหลังจากการแข็งตัวอย่างสมบูรณ์ แต่เมื่อการทดสอบโครงสร้างทางจุลภาคสามารถตรวจสอบได้เพียงลักษณะของการตัดขวาง ซึ่งเป็น 2 มิติ จึงทำให้มักเห็นรูพรุนที่เกิดจากการหดตัวมักมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน และกระจายตัวเป็นกลุ่มในตำแหน่งที่ใกล้กัน ในการอธิบายผลของขนาดของพื้นที่หน้าตัดต่อลักษณะการเกิดรูพรุน รวมทั้งการเกิดรอยยุบตัวของผิวชิ้นงานซึ่งส่งผลให้ชิ้นงานไม่มั่นคง สามารถอธิบายโดยใช้รูปที่ 2.25 ซึ่งเป็นรูปจำลองการแข็งตัวของอะลูมิเนียมในงานหล่อโดยมีทางเข้าของน้ำโลหะอยู่ด้านซ้ายของชิ้นงาน จากรูปแสดงให้เห็นว่า เมื่อชิ้นงานบริเวณที่มีหน้าตัดบางเกิดการแข็งตัว มักพบว่าไม่มีความจำเป็นที่ต้องมีการป้อนเติมและพบว่าโอกาสที่จะเกิดรูพรุนในชิ้นงานอันเนื่องมาจากการหดตัวนั้นเป็นไปได้น้อยมาก ทั้งนี้เพราะการแข็งตัวเป็นไปได้อย่างรวดเร็วในทุกทิศทาง และแม้ว่ามีส่วนสุดท้ายของการแข็งตัวอยู่ระหว่างแขนของเดนไดรต์ อะลูมิเนียมหลอมเหลวก็แข็งตัวตามลำดับขึ้นมาได้นั่นเอง จึงอาจปรากฏแต่เพียงลักษณะของผิวหน้าชิ้นงานที่สัมผัสกับแบบหล่อไม่เรียบสวย ซึ่งหากพบว่าผิวของชิ้นงานไม่เรียบสวยก็เป็นการแสดงว่าอาจมีปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการป้อนเติมอะลูมิเนียมหลอมเหลวระหว่างการแข็งตัว ทั้งนี้เพราะอะลูมิเนียมเกิดการยุบตัวเนื่องจากการป้อนเติมที่ไม่ดี โดยพบมากเป็นพิเศษในอะลูมิเนียมผสมเกรดที่มีช่วงของการแข็งตัวกว้าง หากผิวหน้ามีความมั่นคงเป็นการแสดงว่าการป้อนเติมในระดับจุลภาคเป็นไปได้ด้วยดี ทั้งนี้มักพบในงานที่มีหน้าตัดบางๆ



รูปที่ 2.25 รูปจำลองอธิบายถึงผลของขนาดหน้าตัดของงานหล่อ

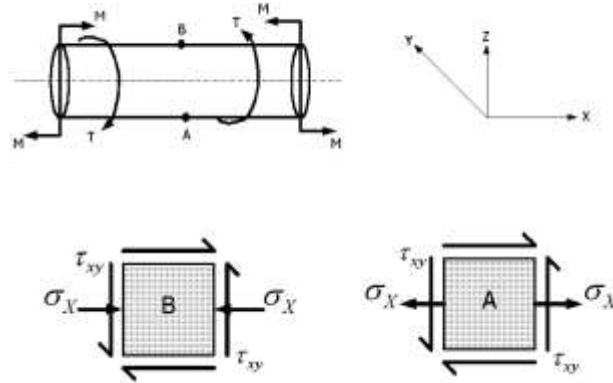
ต่อการเกิดรูพรุนอันเนื่องจากการหดตัวระหว่างการแข็งตัว[13]

ส่วนในกรณีที่ขึ้นงานมีหน้าตัดปานกลาง รูปที่ 2.25b) ทำให้มีโอกาสที่เกิดรูพรุนจากการยุบตัวจากบริเวณผิวหน้าของขึ้นงานและลึกลงไปในขึ้นงานหล่อ เมื่อเริ่มมีการแข็งตัวแต่บริเวณผิวหน้าของขึ้นงานยังมีส่วนที่เป็นของเหลวสัมผัสกับบรรยากาศภายนอก ซึ่งหากความดันภายในส่วนที่เป็นของเหลวมีค่าน้อยกว่าความดันที่อยู่ภายนอก จะทำให้เกิดการแทนที่ของอากาศ จึงเปรียบเสมือนว่าเป็นการป้อนเติมของอากาศแทนที่จะเป็นอะลูมิเนียมหลอมเหลว ทั้งนี้เพราะการดึงน้ำโลหะเพื่อการป้อนเติมโดยดึงจากผิวหน้าของงานหล่อที่ยังไม่แข็งตัวนั้นง่ายกว่าการป้อนเติมจากส่วนที่อยู่ไกลออกไป ดังนั้นจึงเกิดเป็นรูที่ผิวหน้าของขึ้นงานหล่อ และเมื่อนำไปกลึงตัดบริเวณผิวหน้าออกไปก็จะพบรูพรุนที่อยู่เป็นกลุ่มและมีรูปร่างที่ไม่แน่นอนอีกกระจายตัวอยู่ใกล้กัน ลักษณะเช่นนี้พบมากในกรณีที่หล่ออะลูมิเนียมผสมที่มีช่วงของการแข็งตัวกว้าง แต่หากในกรณีที่เป็อะลูมิเนียมที่มีช่วงของการแข็งตัวปานกลางก็มักพบรูพรุนประเภทนี้ในบริเวณที่เป็นจุดร้อน (Hot spot) เช่นบริเวณมุมภายในของงานหล่อ หรือบริเวณใกล้กับทางผ่านของน้ำโลหะ เป็นต้น

การหล่ออะลูมิเนียมที่มีช่วงของการแข็งตัวกว้างจึงมักเสี่ยงกับปัญหาของการเกิดรูพรุนที่เชื่อมโยงกัน อยู่อย่างซับซ้อนภายในงานหล่อและมีโอกาสที่รูพรุนทะลุถึงกันทั้งสองฝั่ง ดังนั้นการหล่ออะลูมิเนียม หรือโลหะผสมใดที่มีช่วงของการแข็งตัวกว้าง จึงมักเสี่ยงต่อการเกิดปัญหาการทนต่อการรั่วเมื่อนำงาน หล่อไปใช้กับภาวะที่มีแรงดันสูง (Pressure-tight applications) ดังนั้นเมื่อทำการหล่ออะลูมิเนียมเกรด ที่มีช่วงของการแข็งตัวกว้างต้องระวังการเกิดปัญหาเหล่านี้ และอาจต้องใช้เทคนิคการปรับสภาพเกรน ให้ละเอียด (Grain Refinement) เพื่อลดโอกาสของการเกิดปัญหาหลง ในกรณีที่เป็นการหล่อ อะลูมิเนียมที่มีช่วงของการแข็งตัวแคบ เช่น อะลูมิเนียม-ซิลิคอนที่ส่วนผสมยูเทคติก (มีซิลิคอน ประมาณ 12%) มักไม่พบการเกิดรูพรุนจากการหดตัวที่ผิวของงานหล่อ อย่างไรก็ตามยังมีโอกาสพบรู พรุนจากการหดตัวภายในงานหล่อ ซึ่งพบหลังจากนำเอาชิ้นงานหล่อนั้นไปกลึงตัดที่ผิวออก ดังนั้น โดยทั่วไปโอกาสที่งานหล่ออะลูมิเนียมผสมกลุ่มที่มีช่วงการแข็งตัวที่แคบ มักไม่มีปัญหาในเรื่องการรั่ว เมื่อนำไปใช้งานรับแรงดัน อย่างไรก็ตามหากมีการเกิดเป็นรูพรุนภายในก็จะส่งผลให้สมบัติทางกลของ อะลูมิเนียมหลอมเหลวนั้นลดลง โดยเฉพาะเมื่อนำไปปรับกระบวนการแบบสลัด ส่วนในกรณีงานหล่อที่มี หน้าตัดขนาดใหญ่ รูปที่ 2.25 c) มีแนวโน้มที่จะเกิดรูพรุนจากการหดตัวภายในมากกว่าที่จะเกิดที่ ผิวหน้าของชิ้นงานหล่อ ดังนั้นกรณีที่ชิ้นงานมีขนาดใหญ่หรืออะลูมิเนียมหล่อนั้นมีช่วงของการแข็งตัว แคบมักจะไม่มีปัญหาเรื่องการรั่วซึมเมื่อนำไปรับแรงดัน นอกจากมีการนำไปกลึงตัดผิวหน้าชิ้นงาน ได้ มีงานวิจัยแสดงให้เห็นว่ารูพรุนที่เกิดขึ้นภายในงานหล่อนั้น มักมีจุดเริ่มต้นโดยเป็นอนุภาคปนเปื้อนเช่น วัสดุทนไฟ และออกไซด์ต่างๆ ซึ่งอนุภาคปนเปื้อนเหล่านั้นมีอากาศอยู่ภายในเป็นจำนวนมากและ ความสามารถในการเปียกผิวของอะลูมิเนียมหลอมเหลวสูง (High Wettability) จึงพบว่าเมื่อ อะลูมิเนียมที่มีอนุภาคปนเปื้อนอยู่มากก็มักมีโอกาที่จะเกิดเป็นรูพรุนที่มากกว่า เนื่องจากอนุภาค เหล่านั้นทำหน้าที่เป็นจุดเริ่มของการเกิดรูพรุนนั่นเอง ดังนั้นเมื่อใช้เทคนิคการกรองน้ำโลหะ (Filtering) จึงสามารถลดแนวโน้มในการเกิดรูพรุนได้ดีทั้งในกรณีที่เป็นรูพรุนจากก๊าซและจากการหดตัว ส่วน อนุภาคปนเปื้อนกลุ่มที่เป็นโบไรด์ (Boride) คาร์ไบด์ (Carbide) ไนไตรด์ (Nitride) เป็นต้น ไม่มีผลต่อ การเกิดรูพรุนแต่อนุภาคดังกล่าวอาจส่งผลต่อสมบัติทางกล จึงเห็นได้ว่าความเข้าใจในต้นเหตุของ ปัญหาที่เกิดขึ้นในงานหล่อนั้นนับว่ามีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ทั้งนี้เพราะจะทำให้สามารถป้องกัน และแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็ว ในบทความต่อไปจะอธิบายถึงการปรับสภาพเกรน ให้ละเอียดว่าจะช่วยป้องกันและแก้ไขปัญหการเกิดรูพรุนขนาดเล็กเหล่านี้ได้อย่างไร

2.6 การออกแบบชิ้นส่วนที่สำคัญในการรับแรงและการเลือกใช้วัสดุทนไฟ

2.6.1 การออกแบบเพลารับแรง เพลาคือชิ้นส่วนที่หมุนอยู่กับที่ โดยปกติจะมีภาคตัดกลมและมีชิ้นส่วนอื่นยึดติดอยู่ เพลาอาจจะได้รับแรงดัด แรงดึง แรงอัด หรือแรงบิดกระทำเพียงอย่างเดียวหรือกระทำผสมกัน การออกแบบเพลาให้มีความปลอดภัยจากความเสียหายจากแรงสถิตและความเสียหายจากการล้าภายใต้การกระทำของแรงแต่ละชนิด หรือหลาย ๆ ชนิดรวมกัน โดยมีวัตถุประสงค์ของการศึกษาถึงการออกแบบเพลาภายใต้แรงดัดและแรงบิด โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณการออกแบบเพลา จะกล่าวถึงเฉพาะกรณีความต้านแรงวิฤติและความเร็ววิฤติของเพลานั้นกรณีที่เพลารับแรงดัดและแรงบิดผสมกันดังรูปที่ 2.26 บริเวณผิวด้านบนและผิวด้านล่างของเพลาก็เกิดความเค้นจากและความเค้นเฉือนผสมกัน [14]



รูปที่ 2.26 แสดงสภาวะของเพลาเมื่อรับแรงดัดและแรงบิด [14]

จากรูปที่ 2.26 สามารถแทนด้วยสมการดังนี้

$$\sigma_x = \frac{32M}{\pi d^3} \text{ และ } \tau_{xy} = \frac{16T}{\pi d^3} \quad (2.11)$$

เมื่อ	σ_x = ความเค้นดัด	(Mpa)
	τ_{xy} = ความเค้นบิด	(Mpa)
	d = เส้นผ่าศูนย์กลางเพลา	(mm)
	M = โมเมนต์ดัดที่จุดวิฤติ	(N.m)
	T = โมเมนต์บิดที่จุดวิฤติ	(N.m)

การใช้ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดจากสมการ

$$\tau_{\max} = \frac{S_{sy}}{f_s} = \frac{S_y}{2f_s} \quad (2.12)$$

จากวงกลมโมร์สามารถหาค่าความเค้นเฉือนสูงสุดได้ดังสมการ

$$\begin{aligned} \tau_{\max} &= \left[\left(\frac{\sigma_x}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2 \right]^{1/2} \\ &= \frac{16}{\pi d^3} (M^2 + T^2)^{1/2} \\ \therefore d &= \left[\frac{32f_s}{\pi S_y} (M^2 + T^2)^{1/2} \right]^{1/3} \end{aligned} \quad (2.13)$$

เมื่อ	$\tau_{\max}$ = ความเค้นเฉือนสูงสุด	(Mpa)
	S_{sy} = ความต้านแรงเฉือนเฉลี่ยของชิ้นงานที่จุดคราก	(Mpa)
	S_y = ความต้านแรงของชิ้นงานที่จุดคราก	(Mpa)
	f_s = ค่าความปลอดภัย	

ถ้าใช้ทฤษฎีพลังงานแปรรูปจะได้ดังสมการ

$$\begin{aligned} \sigma' &= \frac{S_y}{f_s} \text{ และ } \sigma' = (\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2)^{1/2} \\ \sigma' &= \frac{32}{\pi d^3} \left(M^2 + \frac{3}{4} T^2 \right)^{1/2} \\ \therefore d &= \left[\frac{32f_s}{\pi S_y} (M^2 + T^2)^{1/2} \right]^{1/3} \end{aligned} \quad (2.14)$$

การใช้ค่าตัวประกอบสำหรับแก้ไขความต้านแรงสถิต มีจุดประสงค์เพื่อหาค่าความต้านแรงของชิ้นงานที่จุดที่มีโอกาสเกิดความเสียหายมากที่สุดภายใต้ความเค้นสถิตจะได้ดังสมการ

$$S = K_{1f} \cdot K_{2f} \cdot K_{3f} \cdot K_{4f} \cdot K_{5f} \cdot K_{6f} \cdot S' \quad (2.15)$$

เมื่อ S = ความต้านแรงของชิ้นงาน

S' = ความต้านแรงของชิ้นทดสอบ

K_{1f} = ค่าตัวประกอบแก้ไขผิว

K_{2f} = ค่าตัวประกอบแก้ไขขนาด

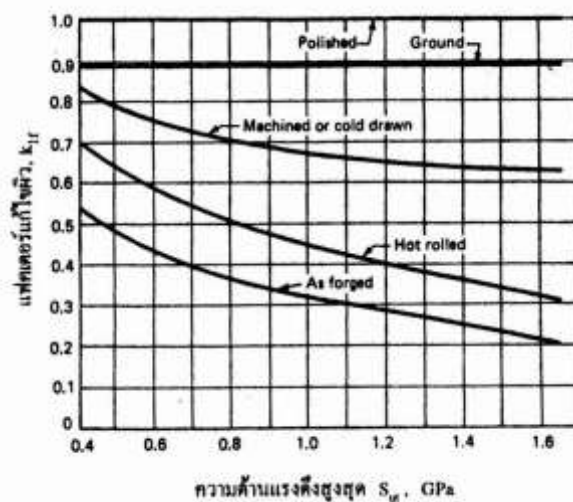
K_{3f} = ค่าตัวประกอบแก้ไขความเชื่อถือได้

K_{4f} = ค่าตัวประกอบแก้ไขอุณหภูมิ

K_{5f} = ค่าตัวประกอบแก้ไขการรวมจุดความเค้น

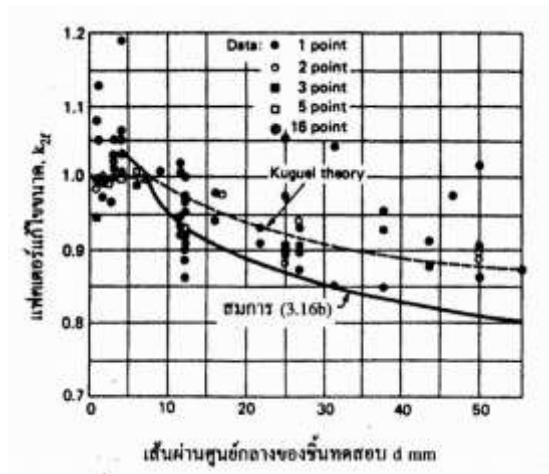
K_{6f} = ค่าตัวประกอบแก้ไขเบ็ดเตล็ด

1) ค่าตัวประกอบแก้ไขผิว(K_{1f})ตามปกติชิ้นงานที่ไม่มีผลต่อความต้านแรงสถิตจะใช้ $K_{1f}=1$



รูปที่ 2.27 ค่าตัวประกอบแก้ไขผิวสำหรับเหล็กกล้า [14]

2) ตัวประกอบแก้ไขขนาด (K_{2f}) ถ้าชั้นงานเท่ากับชั้นงานทดสอบจะใช้ค่า $K_{2f} = 1$



รูปที่ 2.28 ผลกระทบของขนาดต่อขีดจำกัดความทนทาน [14]

3) ค่าตัวประกอบแก้ไขความเชื่อถือได้ (K_{3f}) หาได้จาก

$$K_{3f} = \frac{1 - \sigma^0 Z_r}{1 - \sigma^0 Z_t} \quad (2.16)$$

เมื่อ σ^0 = เปอร์เซนต์ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน

Z_r = ความเบี่ยงเบนมาตรฐานสำหรับการออกแบบ

Z_t = ความเบี่ยงเบนมาตรฐานความต้านแรงที่ทดสอบ

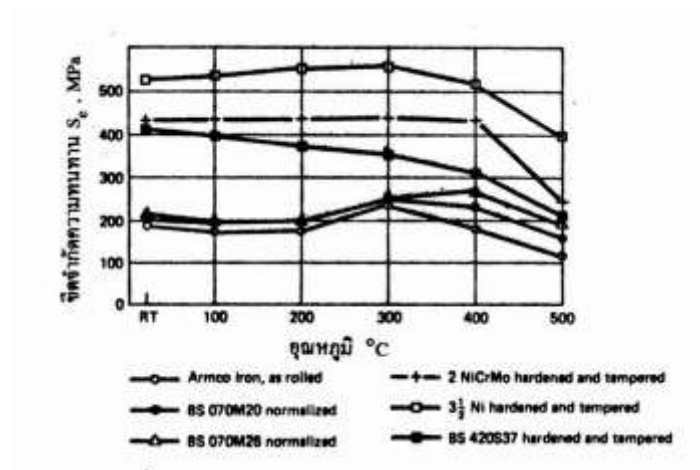
ตารางที่ 2.6 ความเบี่ยงเบนมาตรฐานของขีดจำกัดความทนทาน [14]

ความเชื่อถือได้ (%)	Z_r	Z_t
50	0.000	1.000
60	0.254	0.980
70	0.525	0.958
84	1.000	0.920
90	1.288	0.897
92	1.405	0.888
95	1.645	0.868

ตารางที่ 2.6 ความเปื่อยเบนมาตรฐานของขีดจำกัดความทนทาน (ต่อ)[14]

ความเชื่อถือได้ (%)	Z_r	Z_t
99	2.326	0.814
99.5	2.575	0.794
99.9	3.091	0.753

4) ค่าตัวประกอบแก้ไขอุณหภูมิ (K_{4f}) ถ้าวัสดุเป็นโลหะจำพวกเหล็กให้ใช้ $K_{4f}=1$ ถ้า $T \leq 350^\circ\text{C}$

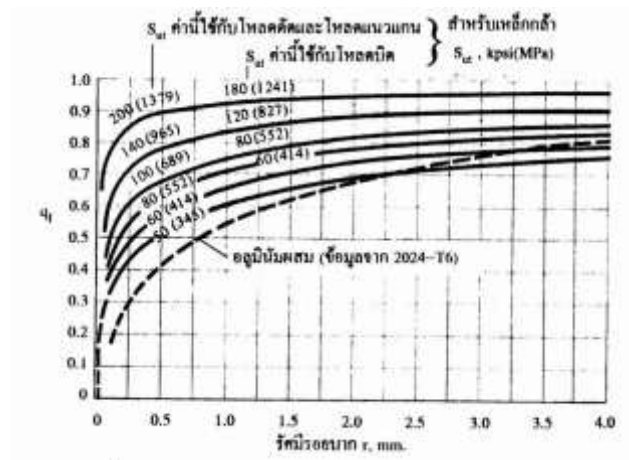


รูปที่ 2.29 ผลของอุณหภูมิต่อขีดจำกัดความทนทาน ($N=10^7$) ของเหล็กกล้า [14]

5) ค่าตัวประกอบแก้ไขการรวมจุดความเค้น (K_{5f}) หาได้จาก

$$K_{5f} = \frac{1}{K_f} = \frac{1}{1 + q_f (K_t - 1)} \quad (2.17)$$

เมื่อ q_f = ความไวของรอยบากต่อการล้า
 K_t = ตัวประกอบการรวมจุดความเค้นทางทฤษฎี
 K_f = ตัวประกอบการรวมจุดความล้า



รูปที่ 2.30 ค่าความไวของรอยบากต่อการล้า
ของเหล็กกล้าและอะลูมิเนียม [14]

6) ค่าตัวประกอบแก้ไขเบ็ดเตล็ด (K_{6f}) ตามปกติจะใช้ = 1

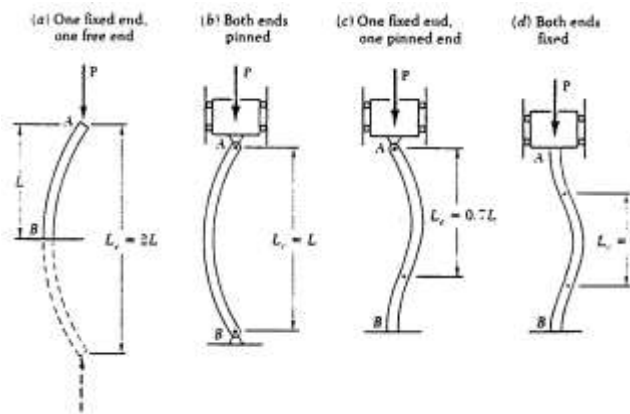
2.6.2 การออกแบบเสา มีองค์ประกอบดังนี้

1) แรงวิกฤติ การคำนวณค่าของแรงวิกฤติที่ทำให้เกิดการประลัย เป็นการคำนวณแรงวิกฤติที่เสาสสามารถรับได้ก่อนเกิดการประลัยจะหาได้จากสมการของออยเลอร์ดังนี้

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{eff}^2} \quad (2.18)$$

เมื่อ	P_{cr} = แรงวิกฤติตามทฤษฎีของออยเลอร์	(N)
	E = โมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ	(Gpa)
	I = โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่	(m ⁴)
	L_{eff} = ความยาวเทียบเท่าของเสา	(mm)

ความยาวเทียบเท่าของเสาขึ้นอยู่กับความยาวของเสาที่ไม่มีการรองรับและรูปแบบของการรองรับที่ปลายของเสาดังแสดงในรูปที่ 2.31

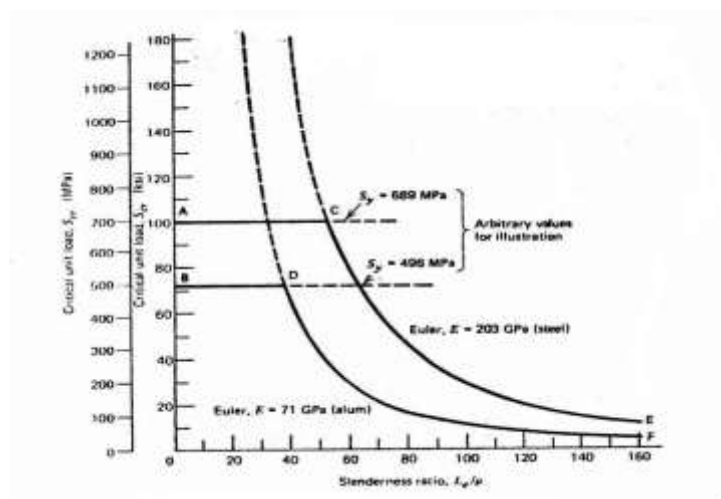


รูปที่ 2.31 ค่าความยาวเทียบเท่าของเสาที่ปลายยึดแบบต่าง ๆ [14]

สมการของออยเลอร์จะใช้ได้ดีมากกับเสาที่มีอัตราส่วนเรียวสูงกว่า 100 แต่ถ้าหากอัตราส่วนเรียวของเสาดำกว่านี้สมการของออยเลอร์จะให้ค่าสูงมากเกินไปกว่าความจำเป็น จากสมการนี้เราสามารถคำนวณค่าความเค้นวิกฤติได้จาก

$$\sigma_{cr} = \frac{P_{cr}}{A} \quad (2.19)$$

เมื่อ σ_{cr} = ความเค้นวิกฤติตามสมการออยเลอร์ (Mpa)
 A = พื้นที่รับแรง (m^2)



รูปที่ 2.32 เส้นโค้งของสมการออยเลอร์สำหรับเหล็กกล้าและอะลูมิเนียม [14]

2) ความเค้นอนุญาต สมการของออยเลอร์เป็นวิธีการที่นิยมโดยทั่วไปในการออกแบบเสา แต่ก็ยังมีข้อจำกัดคือไม่สามารถทำการออกแบบเสาที่มีอัตราส่วนความเรียวน้อย (เสาสั้น) จึงได้มีการผลิตงานวิจัยของสถาบันอีกหลายแห่งได้ทำการวิจัยเพื่อออกแบบเสา เช่นผลงานของ AISC (American Institute of Steel Construction) ดังสมการ

$$\sigma_a = \left[1 - \frac{\left(\frac{L_{eff}}{r} \right)^2}{2C_c^2} \right] \frac{\sigma_y}{K} \quad (2.20)$$

$$\sigma_a = \frac{12\pi^2 E}{23 \left(\frac{L_{eff}}{r} \right)^2}$$

$$C_c = \left(\frac{2\pi^2 E}{\sigma_y} \right)^{1/2}$$

$$K = \frac{3}{5} + \frac{3 \left(\frac{L_{eff}}{r} \right)}{8C_c} + \frac{\left(\frac{L_{eff}}{r} \right)^3}{8C_c^3}$$

เมื่อ	σ_a = ความเค้นอนุญาตของเสา	(Mpa)
	σ_y = ความเค้นในแนวแกน y	(Mpa)
	C_c = ระยะเยื้องศูนย์กลาง	(mm)
	R = รัศมี	(mm)

2.6.3 การออกแบบรอยเชื่อม การเชื่อมต่อ(Welding Joints)เป็นวิธีการต่อชิ้นงานเข้าด้วยกัน นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ สำหรับรอยเชื่อมต้องสามารถรับแรงที่มากระทำได้สูง ปัญหาที่ผู้ออกแบบรอยเชื่อมต้องพบอยู่เสมอคือ การที่ไม่สามารถทำการคำนวณหาความแข็งแรงของรอยเชื่อมได้อย่างใกล้เคียงเหมือนกับการคำนวณเกี่ยวกับความแข็งแรงของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลอื่น ๆ ในการคำนวณเกี่ยวกับรอยเชื่อมมักจะใช้ความต้านทานแรงดึงครากแทนที่จะเป็นความต้านทานแรงดึงสูงสุดที่โลหะของลวดเชื่อมจะสามารถรับได้ ผู้ออกแบบจะต้องทราบค่าความต้านทานแรงดึงครากของลวดเชื่อมชนิดต่าง ๆ สมการที่ใช้คำนวณและออกแบบรอยเชื่อมมีดังนี้ [15]

1) ความเค้นกด แรงกดที่กระทำตามแนวแกนของชิ้นงานที่มีพื้นที่หน้าตัดสม่ำเสมอจะทำให้เกิดความเค้นกด ดังสมการ

$$\sigma_c = \frac{F_c}{A} \quad (2.21)$$

เมื่อ σ_c = ความเค้นกด (Mpa)

F_c = แรงกด (N)

A = พื้นที่รับแรงกด (mm^2)

2) การคำนวณหาตำแหน่งแกนสะเทินของรอยเชื่อม

$$N_y = \frac{d^2}{2b + d} \quad (2.22)$$

เมื่อ N_y = ตำแหน่งแกนสะเทิน (mm)

b = ความกว้างของงาน (mm)

d = ความหนาของงาน (mm)

3) การคำนวณหา Polar Moment of Inertia

$$J_w = \frac{(2d + b)^3}{12} - \frac{d^2(d + b)^2}{(2d + b)} \quad (2.23)$$

เมื่อ J_w = Polar Moment of Inertia (mm^3)

4) การคำนวณแรงที่กระทำต่อแนวเชื่อมในแนวระดับ

$$f_{th} = \frac{T_{ch}}{J_w} \quad (2.24)$$

เมื่อ f_{th} = แรงดึงในแนวระดับที่กระทำกับรอยเชื่อม (N/mm)

T_{ch} = โมเมนต์บิดในแนวระดับ (N.mm)

5) การคำนวณแรงที่กระทำต่อแนวเชื่อมในแนวดิ่ง

$$f_{tv} = \frac{T_{cv}}{J_w} \quad (2.25)$$

เมื่อ f_{tv} = แรงดึงในแนวดิ่งที่กระทำกับแนวเชื่อม (N/mm)
 T_{cv} = โมเมนต์บิดในแนวดิ่ง (N.mm)

6) การคำนวณหาแรงเฉือนในแนวดิ่งที่กระทำกับแนวเชื่อม

$$f_{sv} = \frac{F}{A_w} \quad (2.26)$$

เมื่อ f_{sv} = แรงเฉือนในแนวดิ่งที่กระทำต่อแนวเชื่อม (N/mm)
 F = แรง (N)
 A_w = ความกว้างของแนวเชื่อม (mm)

7) การคำนวณหาแรงลัพธ์ที่เกิดขึ้นในแนวเชื่อม

$$f_r = \sqrt{f_{th}^2 + (f_{tv} + f_{sv})^2} \quad (2.27)$$

เมื่อ f_r = แรงลัพธ์ที่เกิดขึ้นในแนวเชื่อม (N/mm)
 f_{th} = แรงดึงในแนวระดับที่กระทำกับแนวเชื่อม (N/mm)
 f_{tv} = แรงดึงในแนวดิ่งที่กระทำกับแนวเชื่อม (N/mm)
 f_{sv} = แรงเฉือนในแนวดิ่งที่กระทำกับแนวเชื่อม (N/mm)

8) การคำนวณหาแรงดัดในแนวเชื่อม

$$f_b = \frac{M}{S_w} \quad (2.28)$$

เมื่อ f_b = แรงดัดในแนวเชื่อม (N/mm)

M = โมเมนต์ดัดที่จุดวิกฤติ (N.mm)

2.6.4 วัสดุทนไฟ หมายถึง วัสดุซึ่งสามารถจะใช้งาน ณ อุณหภูมิสูงได้โดยที่มันจะไม่หลอมละลาย ไม่ไหม้ไหม้ และไม่อ่อนตัว อุณหภูมิที่วัสดุทนไฟสามารถทนได้ประมาณ 1500 องศาเซลเซียส วัสดุทนไฟสามารถใช้ประโยชน์ได้ไม่ว่าจะอยู่ในสภาพวัตถุดิบหรือเผาให้สุกแล้ว ที่สำคัญที่สุดคือใช้ในสภาพของอิฐ ซึ่งใช้มากในอุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมโลหะโดยใช้สร้างเตาถลุง เตาอบ เตาหลอมและเบ้าหลอม ใช้ทำปล่องไฟ ทำท่อทางออกของก๊าซร้อน ตลอดจนใช้กรุภายในเตาเพื่อป้องกันไม่ให้โลหะและชีตะกรันกัดกร่อนอิฐที่ใช้ทำเตา ในการเลือกใช้วัสดุทนไฟชนิดใดทำเตาหรือพื้นเตาหลอมโลหะนั้น จำเป็นต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติของวัสดุทนไฟและชีตะกรันที่จะเกิดขึ้นจากการถลุงโลหะนั้นด้วย เช่น ถ้าชีตะกรันที่เกิดขึ้นเป็นด่าง อิฐทนไฟที่ใช้ทำผนังเตา พื้นเตาหรือส่วนที่สัมผัสกับชีตะกรันต้องเป็นชนิดต่าง มิฉะนั้นชีตะกรันจะกัดกร่อนวัสดุทนไฟทำให้อายุการใช้งานของเตาหลอมไม่ยืนนาน และโลหะที่ผลิตได้จะมีบางส่วนของวัสดุทนไฟติดเข้าไปด้วย ปัจจัยอีกอย่างหนึ่งที่ควรคำนึงถึงในการใช้วัสดุทนไฟคือความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว เมื่ออุณหภูมิลดลงหรือสูงขึ้น เช่น อิฐซิลิกา ในการที่จะเผาเตาให้ร้อนขึ้นหรือทำให้เย็นลงต้องค่อย ๆ เพิ่มอุณหภูมียาให้ร้อนเร็วหรือเย็นเร็ว เพราะว่าอิฐอาจจะแตกหักได้ง่าย ในการออกแบบและจัดสร้างเตาเบ้าแบบประสิทธิภาพสูงนี้ ได้เลือกใช้วัสดุทนไฟประเภทอิฐทนไฟ (Refractory Brick) เพราะสามารถใช้ได้กับอุณหภูมิสูงและราคาถูก สมบัติที่ดีโดยทั่วไปของวัสดุทนไฟมีดังนี้ [16]

- 1) สามารถต้านทานต่ออุณหภูมิสูงและไม่เปลี่ยนแปลงสภาพที่อุณหภูมิสูง
- 2) สามารถรักษาความแข็งแรงไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง
- 3) ต้านทานต่อการกัดกร่อนของชีตะกรันและก๊าซที่เกิดขึ้น
- 4) มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวต่ำ
- 5) เป็นตัวนำความร้อนที่เหมาะสม คือสามารถดูดความร้อนไว้ ส่งความร้อนกลับและถ่ายเทความร้อนได้ดี

6) มีความต้านทานต่อการสั่นสะเทือนไม่แตกหักง่ายเมื่อได้รับความกระทบกระเทือน

2.6.5 วัสดุฉนวนความร้อน ทำหน้าที่เป็นตัวกั้นความร้อนไม่ให้ไหลหรือออกไปสู่อีกที่หนึ่งได้ง่าย ฉนวนจะมีความต้านทาน เป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าที่เลว การลดการสูญเสียความร้อนด้วยฉนวนกันความร้อน ซึ่งอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการความร้อนมักมีฉนวนหุ้ม เพื่อลดการสูญเสียพลังงานความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม ในกรณีตรงกันข้าม หน้าที่โดยทั่วไปป้องกันการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม และควบคุมอุณหภูมิของของไหล ที่ทำงานในระบบทำให้สมรรถนะการทำงานของระบบสูงขึ้น นอกจากนี้ยังป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับผิวของอุปกรณ์ จากสิ่งแวดล้อมอุณหภูมิที่ผิวของฉนวนจะต่ำกว่าของอุปกรณ์ โดยทั่วไปอุณหภูมิที่ผิวฉนวนที่ผิวนอกฉนวนด้วยโลหะจะไม่เกิน 55°C และถ้าไม่ฉนวนจะสูงไม่เกิน 60°C การหุ้มฉนวนที่เหมาะสมคือการหุ้มฉนวนที่สามารถลดการสูญเสียความร้อน โดยความหนาของฉนวนที่หุ้มอุปกรณ์ต่าง ๆ จะต้องเหมาะสม วัสดุที่เป็นฉนวนจะต้องไม่เป็นอันตรายกับคนและอุณหภูมิที่ผิวของฉนวนจะต้องไม่สูงนอกจากนั้นจะต้องประหยัดในด้านเศรษฐศาสตร์เมื่อเปรียบเทียบปริมาณการสูญเสียความร้อนของระบบท่อที่หุ้มด้วยฉนวนที่มีความหนาที่เหมาะสมกับปริมาณ สมบัติของฉนวนความร้อน โดยทั่วไปจะต้องมีค่าสภาพการนำความร้อนค่อนข้างต่ำและเมื่อนำมาหุ้มผิวฉนวนแล้วไม่เกิดปฏิกิริยาเคมี ฉนวนควรจะมีสภาพความคงทนต่อสภาพสิ่งแวดล้อมที่อยู่รอบ ๆ ในการออกแบบและจัดสร้างเตาเผาประสิทธิภาพสูง จะเลือกใช้วัสดุฉนวน Ceramic Fiber ตรงบริเวณปากเตาเพื่อทำหน้าที่ป้องกันความร้อนและก๊าซจากการเผาไหม้ภายในเตาไปสัมผัสกับน้ำโลหะ

2.7 แนวคิดในการออกแบบเตาให้มีประสิทธิภาพสูง

ในการออกแบบและจัดสร้างเตาเผาหลอมเพื่อเป็นเครื่องมือ ในการทำวิจัยได้นำระบบการแลกเปลี่ยนความร้อนมาใช้งานร่วมกับเตาเผาหลอม เพื่อช่วยให้มีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานความร้อนและเชื้อเพลิงสูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่อเวลาในการหลอมและการสันดาปของอากาศกับเชื้อเพลิง

Alan Kaye และ Arthur Street [17] ได้กล่าวถึงเตาหลอมโลหะที่ใช้ในช่วงปี ค.ศ.1960 ว่ามีประสิทธิภาพที่ต่ำมากโดยคาดว่าเตาหลอมแบบดั้งเดิมจะมีประสิทธิภาพในการทำงานประมาณ 10 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น ซึ่งจะส่งผลเสียในงานอุตสาหกรรมในด้านต้นทุนการผลิต เพราะไม่สามารถที่จะนำความร้อนที่เกิดขึ้นมาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดได้ เตาหลอมแบบดั้งเดิมที่ถูกนำมาใช้ในกระบวนการผลิตงานหล่อนั้น ภายในเตาหลอมจะเกิดการรั่วซึมออกของก๊าซหรือความร้อนมากกว่า

60 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ จะเกิดการสูญเสียผ่านผนังของเตาหลอมและจะเหลือพลังงานภายในเตาที่สามารถใช้ในการหลอมได้เพียงประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น จึงได้มีความพยายามเป็นอย่างยิ่งที่จะสร้างเตาหลอมให้มีประสิทธิภาพในการใช้งานมากกว่าเดิม แนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานแก่เตาหลอมแนวทางที่หนึ่ง คือ การนำลมร้อนหรือก๊าซร้อนที่ถูกปล่อยทิ้งออกไปกลับมาใช้อีกในการเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งจะช่วยให้เกิดการประหยัดเชื้อเพลิง แม้ว่าจะมีการควบคุมและปรับอัตราส่วนผสมของอากาศและความดันภายในเตาอย่างเพียงพอแล้วก็ตาม แต่ประสิทธิภาพในการให้ความร้อนของเตาก็ยังต่ำอยู่มาก ดังเช่นกรณีที่อุณหภูมิของก๊าซร้อนที่ปล่อยทิ้งออกไปมีค่าสูงถึง 1000 องศาเซลเซียส แม้ว่าจะลดอัตราส่วนของอากาศให้เหลือ 1.2 ความร้อนภายในเตาประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ก็ยังสูญเสียไปกับก๊าซร้อนที่ปล่อยทิ้งออกไปด้วยเหตุผลนี้การนำก๊าซร้อนที่ปล่อยทิ้งออกไปกลับมาใช้ประโยชน์อย่างมีประสิทธิภาพจึงจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนแก่เตาหลอมให้สูงขึ้นในปัจจุบันนี้กระบวนการผลิตต่างๆ ในอุตสาหกรรมที่ใช้เตาเผา เช่น อุตสาหกรรมเหล็ก อุตสาหกรรมแก้ว อุตสาหกรรมเซรามิค และอุตสาหกรรมซีเมนต์ ต่างนิยมติดตั้งและ ใช้งานระบบการนำความร้อนที่ปล่อยทิ้งออกไปกลับมาใช้ให้เป็นประโยชน์กันอย่างแพร่หลาย ระบบการนำความร้อนที่ปล่อยทิ้งออกไปกลับมาใช้ประโยชน์จะมีผลดีคือลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงลง ซึ่ง อัตราส่วนของการประหยัดเชื้อเพลิงจะขึ้นอยู่กับปริมาณความร้อนของอากาศที่ใช้ในการสันดาปที่ได้รับหรืออุณหภูมิของอากาศที่สูงขึ้นดังสมการ

$$S_f = \left[1 - \frac{(Q_f - Q_w)}{(Q_f - Q_w + Q_a)} \right] \times 100 \% \quad (2.29)$$

เมื่อ S_f = ร้อยละการประหยัดเชื้อเพลิง %
 Q_w = ปริมาณความร้อนที่สูญเสียออกไปกับก๊าซร้อนที่ออกจากเตา (KJ)
 Q_f = ปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิง (KJ)
 Q_a = ปริมาณความร้อนที่อากาศได้รับ (KJ)

และปริมาณความร้อนที่สามารถประหยัดได้จะแสดงในสมการ

$$Q_I = Q_{cold} - Q_{hot} \quad (2.30)$$

โดยที่ $Q_{hot} = \left[1 - \left(\frac{S_f}{100} \right) \right]$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } Q_s &= \text{ปริมาณความร้อนที่สามารถประหยัดได้} & (\text{KJ}) \\ Q_{\text{cold}} &= \text{ปริมาณความร้อนจากเชื้อเพลิงเมื่อไม่มีการอุ่นอากาศ} & (\text{KJ}) \\ Q_{\text{hot}} &= \text{ปริมาณความร้อนจากเชื้อเพลิงเมื่อมีการอุ่นอากาศ} & (\text{KJ}) \end{aligned}$$

แนวทางในการแก้ไขเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานแกเตาหลอมแนวทางที่สองคือการลดการสูญเสียความร้อนที่ไหลผ่านผนังของเตา ซึ่งการลดการสูญเสียความร้อนที่ไหลผ่านผนังของเตา สามารถทำได้โดยใช้วัสดุฉนวน Ceramic Fiber เป็นฉนวนป้องกันดังแสดงในสมการ

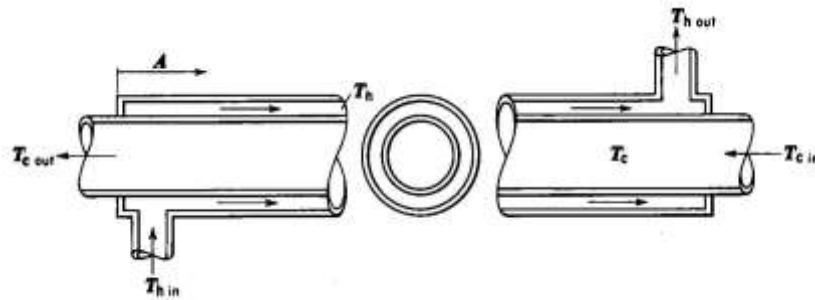
$$Q = \frac{T_{in} - T_{out}}{R_{total}} \quad (2.31)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } Q &= \text{ปริมาณความร้อนที่ไหลผ่านผนังเตาหลอม} & (\text{W}) \\ T_{in} &= \text{อุณหภูมิในเตาหลอมที่ต้องการ} & (\text{K}) \\ T_{out} &= \text{อุณหภูมินอกเตาหลอม} & (\text{K}) \\ R_{tot} &= \text{ค่าความต้านทานรวมของวัสดุผนังเตา} & (\text{K/W}) \end{aligned}$$

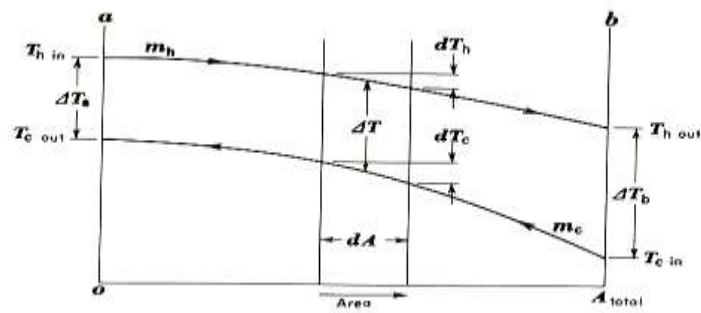
2.8 แนวคิดในการเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้

สำหรับหลักการในการนำความร้อนมาเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้นั้นได้มีนักวิจัยได้ศึกษาและบรรยายเอาไว้ดังนี้ G.Walker [18] ได้ทำการศึกษาถึงหลักการนำความร้อนหรือก๊าซร้อนที่ปล่อยทิ้งออกไปกลับมาใช้ประโยชน์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้และประสิทธิภาพเชิงความร้อนในการทำงานของเตาหลอมให้สูงขึ้น ไม่ว่าจะเป็นการอุ่นวัสดุป้อนล่วงหน้า การอุ่นอากาศที่ใช้ในการสันดาปและการอุ่นน้ำมันล่วงหน้า ซึ่งจะทำให้เกิดความประหยัดลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงและลดเวลาที่ใช้ในกระบวนการผลิต นอกจากนั้น สุนันท์ ศรัณยนิษฐ์ [19] ได้อธิบายถึงหลักการของการนำความร้อนหรือก๊าซร้อนที่ปล่อยทิ้งออกไปกลับมาใช้ให้เป็นประโยชน์โดยใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchangers) เป็นตัวกลาง ซึ่งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ถูกนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมนั้นมีอยู่หลายชนิด ในการออกแบบและจัดสร้างเตาเผาหลอมนี้จะใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบง่าย (Basic Types of Heat Exchangers) ซึ่งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้จะประกอบด้วย

ท่อสองขนาดซ้อนกันอยู่และสามารถใช้งานได้ทั้งในลักษณะที่ของไหลในท่อทั้งสองไหลไปในทิศทางเดียวกัน (Parallel Flow) และไหลสวนทางกัน (Counter Flow) ดังแสดงในรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน[19]



รูปที่ 2.34 ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เกิดขึ้น [19]

ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนดังนี้

$$\Delta T_a = T_{c \text{ in}} - T_{h \text{ in}}$$

$$\Delta T_b = T_{c \text{ out}} - T_{h \text{ out}} \quad (2.32)$$

เมื่อ $T_{c \text{ in}}$ = อุณหภูมิของของไหล A ตรงทางเข้า ($^{\circ}\text{C}$)

$T_{c \text{ out}}$ = อุณหภูมิของของไหล A ตรงทางออก ($^{\circ}\text{C}$)

$T_{h \text{ in}}$ = อุณหภูมิของของไหล B ตรงทางเข้า ($^{\circ}\text{C}$)

$T_{h \text{ out}}$ = อุณหภูมิของของไหล B ตรงทางออก ($^{\circ}\text{C}$)

ΔT_a = ความแตกต่างของอุณหภูมิของของไหลตรงทางเข้า ($^{\circ}\text{C}$)

ΔT_b = ความแตกต่างของอุณหภูมิของของไหลตรงทางออก ($^{\circ}\text{C}$)

จากรูปที่ 2.34 จะเห็นว่าเมื่อ T_c ลดลงในช่วงความยาว dA ในขณะเดียวกัน T_h จะเพิ่มขึ้นดังนั้น ปริมาณความร้อนที่ออกจากสารตัวกลางหรือของไหล A จะมีค่าเท่ากับปริมาณความร้อนที่ของไหล B ได้รับหรือเพิ่มขึ้นและการเคลื่อนที่ของความร้อนภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสามารถหาได้ดังสมการ

$$Q = UA\Delta T_m \quad (2.33)$$

เมื่อ ΔT_m = ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ $(^{\circ}\text{C})$

$$\Delta T_m = \left[\frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\ln(\Delta T_a / \Delta T_b)} \right]$$

A = พื้นที่เฉลี่ยของท่อ = πDL (m^2)

ลมร้อนหรือก๊าซร้อนที่ปล่อยทิ้งจากการเผาไหม้นอกจากจะถูกนำมาใช้ประโยชน์เป็นลมร้อนในห้องเผาไหม้แล้วนั้น ในการออกแบบและจัดสร้างเตาเผาใหม่นี้จะนำลมร้อนที่ปล่อยทิ้งออกไปอีกบางส่วนกลับมาทำการอุ่นน้ำมันเชื้อเพลิงก่อนเข้าสู่อุปกรณ์เผาไหม้ต่อไป ซึ่งเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้นี้จะเป็นน้ำมันเตาหรือน้ำมันเตาผสมกับน้ำมันดีเซล ถ้าใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงจะทำให้การเผาไหม้ที่สะอาดแต่ว่าค่าใช้จ่ายจะสูง จึงมีการนำเอาน้ำมันเตามาใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงแทนน้ำมันดีเซล เพราะฉะนั้นน้ำมันเตาจะมีราคาถูกกว่าจึงทำให้ค่าใช้จ่ายลดลง แต่น้ำมันเตาจะมีปัญหาในเรื่องของการเผาไหม้ไม่สะอาด และที่อุณหภูมิการทำงานนั้นน้ำมันเตาจะมีค่าความหนืดสูงกว่า ซึ่งค่าความหนืดจะเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของน้ำมันเตา นอกจากจะใช้เป็นตัวแบ่งเกรดและราคาของน้ำมันเตาแล้วความหนืดยังมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการใช้งานของน้ำมันเตาเพราะในการเผาไหม้น้ำมันเตานั้นจำเป็นต้องฉีดน้ำมันเตาให้เป็นละอองฝอยเพื่อจะได้เข้าไปผสมกับอากาศในเตาเผาไหม้โดยใช้หัวฉีด

การทำให้้ำมันเตาเป็นละอองฝอยสามารถทำได้ดังนี้ [20]

- (1) Air Atomization
- (2) Steam Atomization
- (3) Pressure Atomization

การฉีดน้ำมันเตาทั้งสามแบบนี้ ต้องการน้ำมันเตาที่มีความข้นใสในระดับต่าง ๆ กันแล้วแต่การออกแบบหัวเผา ความดัน และอุณหภูมิที่ใช้ อาจกล่าวได้ว่าถ้าจะให้ฝอยน้ำมันที่ดี ค่าความหนืดของ

น้ำมันที่หัวฉีดควรจะประมาณ 20 เซ็นติสโตก การที่จะได้ค่าความหนืดขนาดนี้อาจจะใช้วิธีการเลือกเกรดน้ำมันให้เหมาะสมหรือวิธีการอุ่นน้ำมันให้ร้อนจนได้ค่าความหนืดที่พอดี ดังนั้นปริมาณความร้อนที่น้ำมันเตาต้องการในการนำมาทำให้มีค่าความหนืดตามต้องการหาได้จากสมการ

$$Q = M_{fuel} C_p \cdot (t_0 - t_1) \quad (2.34)$$

เมื่อ	Q = ปริมาณความร้อนที่น้ำมันเตาต้องการ	(W)
	M_{fuel} = อัตราการใช้ น้ำมันเชื้อเพลิง	(Kg/Sec)
	C_p = ความร้อนจำเพาะของน้ำมันเชื้อเพลิง	(KJ/Kg ^o K)
	t_0 = อุณหภูมิของน้ำมันเตาหลังออกจากอุปกรณ์	(K)
	t_1 = อุณหภูมิน้ำมันเตาก่อนเข้าสู่อุปกรณ์	(K)

ความร้อนที่จะนำมาให้ความร้อนแก่น้ำมันเตาจะนำมาจากผนังท่อหรืออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ออกมาจากการแผ่รังสีความร้อนจากผนังท่อและมาจากการพาความร้อนแบบธรรมชาติ เพราะว่าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้สัมผัสท่อไอเสียที่สัมผัสเป็นเพียงจุดเล็ก ๆ เท่านั้น ซึ่งอัตราการแผ่รังสีของผนังท่อไอเสียมีค่าดังสมการ

$$Q_r = \sigma \cdot A \cdot (T_w^4 - T_a^4) \quad (2.35)$$

เมื่อ	Q_r = ปริมาณความร้อนที่ได้รับจากการแผ่รังสี	(W)
	σ = Stefan-Boltzmann Constant = 5.67×10^{-8}	(W/m ² K ⁴)
	A = พื้นที่ในการแผ่รังสีความร้อน	(m ²)
	T_w = อุณหภูมิผิวของท่อไอเสีย	(K)
	T_a = อุณหภูมิของชุดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	(K)

2.9 เชื้อเพลิงและหลักการเผาไหม้เชื้อเพลิง

เชื้อเพลิง คือ วัสดุใด ๆ ก็ตามเมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนจะเกิดการลุกไหม้แล้วให้พลังงานความร้อนออกมา แต่พลังงานความร้อนที่ได้จะมากน้อยแตกต่างกันตามชนิดของเชื้อเพลิง [21]

ตารางที่ 2.7 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด [21]

เชื้อเพลิง	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (kJ/kg)
ถ่านหิน	25,000 - 33,000
ถ่านหินลิกไนต์	8,400 - 21,000
น้ำมันเตา	42,000
ก๊าซจากเตาหุงต้ม	3,300 - 4,800
ก๊าซจากเตาถ่านโค้ก	14,600 - 18,500

ธาตุองค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิงได้แก่ คาร์บอน(C) ไฮโดรเจน(H) เมื่อเชื้อเพลิงเผาไหม้ หมายความว่า ธาตุองค์ประกอบของเชื้อเพลิงทั้งคาร์บอนและไฮโดรเจน จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศและเปลี่ยนไปเป็น CO_2 และ H_2O ตามลำดับ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอาจคำนวณได้ด้วยทฤษฎีฟิสกัลเคมีจากองค์ประกอบที่เป็นธาตุของเชื้อเพลิงนั้น ๆ กล่าวคือกำหนดให้

$$\text{มวลของเชื้อเพลิง 1 kg} = c + h + o + s + n + a + w \quad (2.36)$$

เมื่อ c = อนุส่วนมวลขององค์ประกอบคาร์บอน

h = อนุส่วนมวลของไฮโดรเจน

o = มวลของออกซิเจน

s = มวลของกำมะถัน

n = มวลของไนโตรเจน

a = มวลของเถ้า

w = มวลของความชื้น

ในการสันดาปเพื่อให้การเผาไหม้หมดและรวดเร็วต้องใช้อากาศเข้าไปทำการสันดาปในปริมาณมากกว่าความต้องการขั้นต่ำสุด (Excess Air) ซึ่งส่วนที่เกินนี้เรียกว่า อัตราส่วนอากาศเกิน (Excess Air Ratio) ดังแสดงในตาราง

ตารางที่ 2.8 อัตราส่วนอากาศเกินที่ใช้กับเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ [21]

ชนิดเชื้อเพลิง	อัตราส่วนอากาศเกิน
ถ่านหิน ถ่านโค้ก ที่ป้อนเข้าเตาด้วยมือ	1.50 - 2.00
ถ่านหินที่ป้อนด้วยกลไกเข้าเตาอน ลมพัดธรรมชาติ	1.40 - 1.70
ถ่านหินที่ใช้กับเตาเป่าลม	1.30 - 1.60
ถ่านหินลิกไนต์ป้อนลงบันไดเตา	1.30 - 1.50
ผงถ่านหิน	1.20 - 1.40
เตาก๊าซ	1.10 - 1.20
เตาน้ำมัน	1.05 - 1.15

อัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงนั้นมีบทบาทต่อความหมดจดในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเป็นอย่างมาก การเผาไหม้ที่ดีและถูกต้องจะต้องให้จำนวนของ CO_2 ในอัตราสูง ถ้าจำนวนของ CO_2 ในก๊าซเผาไหม้มีมากแสดงว่าการเผาไหม้ดี หากมีจำนวน CO มากแสดงว่าการเผาไหม้ไม่หมดจด

2.9.1 เชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ ในการศึกษาเชื้อเพลิงและการเผาไหม้ในเตาหลอมแบบเตาเบ้า จะศึกษาส่วนของเชื้อเพลิงเหลวที่นิยมใช้และมีความสำคัญในอุตสาหกรรม คือ น้ำมันเตา (Residual หรือ Heavy Fuel Oil) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นปิโตรเลียม เป็นน้ำมันหนักที่เหลือจากการกลั่น น้ำมันเชื้อเพลิงชนิดอื่น เช่นน้ำมันเบนซิน น้ำมันดีเซล น้ำมันเตาเป็นน้ำมันที่นิยมใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเตาหม้อน้ำและเตาหลอมในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากน้ำมันเตามีราคาถูกกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดอื่นและให้พลังงานความร้อนทางเชื้อเพลิงสูงอีกด้วยด้วยความหนืดของน้ำมันเตาเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดที่ต้องคำนึงถึง ความหนืดเป็นเครื่องแสดงถึงอัตราการไหลของน้ำมันในระบบน้ำมันเชื้อเพลิง และความยากง่ายต่อการที่น้ำมันจะถูกฉีดให้เป็นฝอยละเอียด เพราะว่าความหนืดของน้ำมันจะลดลงหรือสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เพราะฉะนั้นถ้าน้ำมันเตาได้รับการอุ่นให้ร้อนขึ้นพอเหมาะการฉีดน้ำมันให้เป็นฝอยละเอียดก็จะง่ายขึ้น แต่ถ้าน้ำมันเตามีความหนืดมากหัวฉีดจะทำให้การฉีดเป็นฝอยละเอียดได้ไม่ดี และทำให้การจุดติดได้ไม่ดี นอกจากนี้ความหนืดของน้ำมันเตายังมีผลทำให้ปริมาณน้ำมันที่ออกมาจากหัวฉีดและมุมฝอยน้ำมันที่ฉีดออกไป ซึ่งมีผลต่อการเผาไหม้สมบูรณ์และทั่วถึง ถ้าความหนืดของน้ำมันที่หัวฉีดไม่ถูกต้องน้ำมันที่ถูกฉีดออกไปก็ไม่ใช่ฝอยละเอียดเพียงพอ ซึ่งจะเป็นผลทำให้การเผาไหม้เลวลง เกิดควันและเขม่าในบริเวณเตา เกิดคราบคาร์บอนเกาะติดสะสมที่ปลายหัวฉีด น้ำมันเตาสามารถแบ่งโดยทั่วไปได้ 3 ชนิดคือ [22]

1) ชนิดเบาหรือไล (Light Fuel Oil) มีค่าความข้นใส (Viscosity) ต่ำ ส่วนมากใช้ในการเผาไหม้เพื่อให้ความร้อนกับหม้อน้ำขนาดเล็กทั่วไปและการใช้งานต่าง ๆ

2) ชนิดปานกลาง (Medium Fuel Oil) มีค่าความข้นใสปานกลาง ส่วนมากจะใช้เผาให้ความร้อนแก่หม้อน้ำ (Boiler) เตาเผาขนาดกลาง หรือขนาดเล็กที่มีอุปกรณ์อุ่นน้ำมัน

3) ชนิดหนักหรือซัน (Heavy Fuel Oil) มีค่าความข้นใสสูงหรือมีค่าความหนืดสูง ส่วนมากจะนำไปใช้กับเตาเผาขนาดใหญ่ในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น เตาเผาของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์

ตารางที่ 2.9 ข้อกำหนดคุณภาพของน้ำมันเตาตามประกาศกระทรวงพาณิชย์ ฉบับที่ พ.ศ.2524 [22]

ข้อกำหนด	ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2	ชนิดที่ 3	ชนิดที่ 4	ชนิดที่ 5	ชนิดที่ 6
1.ความถ่วงจำเพาะ ณ 15.6/15.6 °C	0.985	0.985	0.990	0.990	0.995	0.995
2.ความหนืด ณ 40 °C (เซนติสโตก)	7.80	7.80	145	180	230	280
3.จุดวาบไฟ °C	60	60	60	60	60	60
4.จุดไหลเท °C	24	24	24	24	30	30
5.ปริมาณกำมะถัน (% น้ำหนัก)	3.0	3.2	3.5	3.5	3.5	3.5
6.ค่าความร้อน (kcal/kg)	10000	10000	10000	9900	9900	9900
7.ปริมาณเถ้า (% น้ำหนัก)	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2
8.น้ำและตะกอน (% ปริมาตร)	1.0	1.0	1.2	1.5	1.5	1.5

2.9.2 ค่าความร้อนของน้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่งเชื้อเพลิงที่ใช้กับเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในจะต้องมีไฮโดรเจนเป็นส่วนประกอบอยู่เสมอและเมื่อเกิดการลุกไหม้จะได้ น้ำ (H_2O) เสมอ น้ำที่ได้จากการเผาไหม้อาจอยู่ในรูปของไอน้ำ เมื่อเย็นตัวลงจะกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ ค่าความร้อนที่ได้สามารถวัดได้โดย Calorimeter จากการทดลอง ถ้าไอน้ำกลั่นตัวเป็นน้ำทั้งหมดเรียกว่า High Heat Value (HHV) มีหน่วยเป็น Btu/lb ถ้าไอน้ำยังไม่กลั่นตัวเป็นน้ำเรียกว่า Low Heat Value (LHV) [23]

2.9.3 การคำนวณหาค่าความร้อน การคำนวณหา HHV ของเชื้อเพลิงเหลวโดยประมาณนั้นสามารถหาได้โดยอาศัย API gravity ดังแสดงในตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.10 การคำนวณหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิง [23]

เชื้อเพลิง	ค่าการคำนวณ	หน่วย
น้ำมันเบนซิน	$HHV = 18,320 + 40(API.gr.-10)$	Btu/lb
น้ำมันก๊าด	$HHV = 18,440 + 40(API.gr.-10)$	Btu/lb
น้ำมันดีเซล	$HHV = 18,640 + 40(API.gr.-10)$	Btu/lb
น้ำมันเตา	$HHV = 17,645 + 54 (API.gr.)$	Btu/lb

ตารางที่ 2.11 ค่าประกอบของ API [23]

API	Sp.gr	Fuels
10-20	0.9340-1.0000	Heavy Fuel oil
30-40	0.8251-0.8762	น้ำมันดีเซล
50	0.7796	น้ำมันก๊าด
60-70	0.7022-0.7389	น้ำมันเบนซิน

2.9.4 หลักการเผาไหม้เชื้อเพลิง [24] การเผาไหม้เชื้อเพลิงทุกชนิดเพื่อให้เป็นพลังงานจะก่อให้เกิดมลภาวะต่อโลกและสิ่งแวดล้อม ในกระบวนการผลิตไม่ว่าจะเป็นถ่านหินหรือน้ำมันเชื้อเพลิง เมื่อเผาเชื้อเพลิงเหล่านี้จะทำให้เกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) จะก่อให้เกิดปฏิกิริยาในบรรยากาศเปลี่ยนเป็นกรดกำมะถันและกรดไนตริกอย่างรวดเร็ว ก๊าซมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจำพวกน้ำมัน(Fuel Oil) จะขึ้นอยู่กับเกรดของน้ำมันเชื้อเพลิงและองค์ประกอบของน้ำมันเชื้อเพลิง รวมถึงลักษณะและวิธีการเผาไหม้ ก๊าซพิษเหล่านี้ได้แก่ ไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)

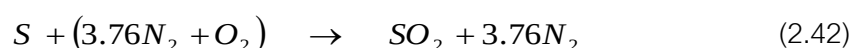
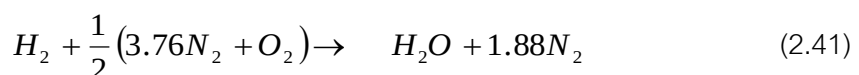
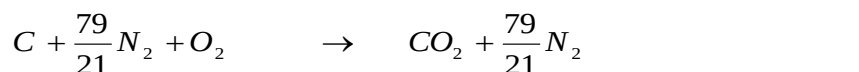
การเผาไหม้ (Combustion) เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนและการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ซึ่งเป็นการรวมตัวของออกซิเจนเข้ากับคาร์บอน ไฮโดรเจนและกำมะถัน เกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โดยปัจจัยในการเผาไหม้ขึ้นอยู่กับสภาวะที่เหมาะสมของเวลาที่ใช้ในการผสมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง เพื่อให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ อุณหภูมิซึ่งเป็นอุณหภูมิที่จุดติดไฟ (Ignition Temperature) ต้องสูงพอ ซึ่งเกิดขึ้นได้เมื่อมีแหล่งให้ความร้อนเพียงพอและทำให้เกิดการเผาอย่างต่อเนื่องได้ความปั่นป่วน(Turbulence) ทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์เนื่องจากการผสมกันอย่างทั่วถึงของอากาศและเชื้อเพลิง นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงออกซิเจนที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้ โดย

ปกติอากาศจะมีออกซิเจนเป็นส่วนประกอบ 21เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร แต่ในทางปฏิบัติในการเผาไหม้ ต้องการใช้ปริมาณอากาศที่มากเกินไป (Excess Air) เพื่อให้แน่ใจว่าเกิดการเผาไหม้ได้อย่าง สมบูรณ์และป้องกันปัญหาการผสมกันของเชื้อเพลิงและอากาศไม่ทั่วถึง การแปรผันของสมบัติ เชื้อเพลิงและอัตราการป้อนเชื้อเพลิง การใช้อากาศมากเกินไปที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับชนิดของ เชื้อเพลิง ลักษณะการเตรียมเชื้อเพลิง ชนิดของเตาเผาและหัวเผาที่ใช้ การเผาไหม้เชื้อเพลิงสามารถ อธิบายได้ดังนี้

หลักการเผาไหม้เชื้อเพลิง เชื้อเพลิงที่ใช้กันโดยทั่วไปมักเป็นสารประกอบของไฮโดรคาร์บอนหรือมี คาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก สมการของการเผาไหม้แสดงได้ดังนี้



ออกซิเจนที่ต้องการในปฏิกิริยาข้างต้นเพื่อสมดุลคาร์บอน ไฮโดรเจนและกำมะถันได้พอดี เรียกว่า ออกซิเจนที่ต้องการตามทฤษฎี (Theoretically Required Oxygen) การคำนวณปริมาณออกซิเจนที่ ต้องการตามทฤษฎี จำเป็นต้องทราบการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของเชื้อเพลิงเหลวหรือทราบ องค์ประกอบของเชื้อเพลิงเสียก่อน การเผาไหม้เพื่อให้ได้ความร้อนมากพอที่จะนำไปใช้ประโยชน์ ต่อไปได้มักไม่ใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์แต่นิยมใช้อากาศที่มีส่วนประกอบของออกซิเจน 21.0เปอร์เซ็นต์และ ไนโตรเจน 79.0เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร หรือคิดเป็นออกซิเจน 23.2 เปอร์เซ็นต์และไนโตรเจน 76.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



ถ้าการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นเป็นไปตามสมการดังกล่าว ถือว่าเป็นการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิง และ อากาศที่ต้องการตามทฤษฎี ผลผลิตจากการเผาไหม้ที่เป็นก๊าซเรียกว่าไอเสีย ถ้าการเผาไหม้สมบูรณ์ และใช้อากาศที่ต้องการตามทฤษฎีพอดีไอเสียจะประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำและ

ไนโตรเจนจากอากาศเท่านั้น แต่ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ได้ ถ้าต้องการอากาศเท่ากับที่ต้องการตามทฤษฎี เนื่องจากการผสมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงไม่สมบูรณ์ การแปรผันของอุณหภูมิของเชื้อเพลิงและการแปรผันของอัตราป้อนของเชื้อเพลิง จึงจำเป็นต้องใช้อากาศมากกว่าที่ต้องการตามทฤษฎี เพื่อให้แน่ใจว่าการเผาไหม้นั้นเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ แต่ถ้าใช้อากาศส่วนเกินมากเกินไปจะทำให้ความร้อนเกิดการสูญเสียไปกับไอเสียมาก แต่ถ้าใช้อากาศส่วนเกินน้อยเกินไปก็จะทำให้ได้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ เมื่อเทียบกับความร้อนที่พึงได้จะสูญเสียไปกับคาร์บอนมอนอกไซด์ นอกจากนี้ยังมีโอกาสเกิดเขม่าควันของคาร์บอน ไฮโดรเจนหรือก๊าซไฮโดรคาร์บอนอื่น ๆ ซึ่งเท่ากับเป็นการสูญเสียเชื้อเพลิงออกไปกับไอเสีย จึงควรใช้อากาศเกินพอที่พอเหมาะ เพื่อให้การเผาไหม้มีประสิทธิภาพสูงสุดจึงจำเป็นที่จะต้องควบคุมปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ รวมทั้งอุณหภูมิ เวลาและความดันป้อนอุณหภูมิติดไฟ เป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของสารแต่ละชนิด ซึ่งสารแต่ละชนิดจะติดไฟได้ต้องมีอุณหภูมิถึงหรือสูงกว่าอุณหภูมิติดไฟและต้องมีออกซิเจนอยู่ด้วยที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดติดไฟ อัตราความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาจะสูงกว่าอัตราความร้อนสูญเสียให้แก่บริเวณรอบ ๆ ทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยสูงขึ้นเรื่อย ๆ จึงเกิดการเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง เวลาในการเผาไหม้ก็เป็นองค์ประกอบพื้นฐานในการออกแบบเตาเผา ซึ่งจะมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของเตา โดยเวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในเตาควรจะนานกว่าเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งหลักการนี้จะเป็นตัวกำหนดขนาดและรูปร่างของเตาเผา ความดันป้อนเป็นการช่วยให้เชื้อเพลิงผสมกับออกซิเจนได้อย่างทั่วถึงจึงทำให้การเผาไหม้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ถ้าก๊าซติดไฟและอากาศไม่ได้รับการผสมกันอย่างทั่วถึงในเตาจะทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ด้วย ถึงแม้ว่าเตาเผาจะมีขนาดและออกแบบไว้ถูกต้อง พร้อมกันนี้จะต้องมีออกซิเจนที่เพียงพอด้วย การดันป้อนจะช่วยเร่งการระเหยของเชื้อเพลิงเหลวให้กลายเป็นไอเพื่อการเผาไหม้

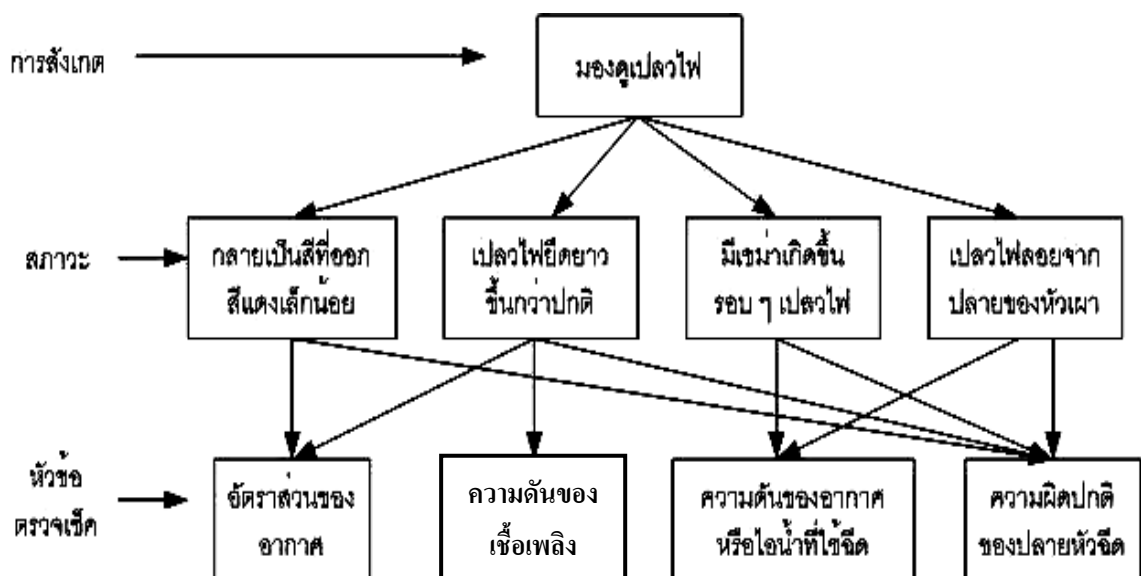
2.10 การควบคุมการเผาไหม้และหัวเผาไหม้ของเตาหลอม

2.10.1 การสังเกตสภาวะการสันดาปด้วยตาเปล่า [25] เครื่องมือในการวิเคราะห์ก๊าซเป็นสิ่งที่ขาดไม่ได้สำหรับการควบคุมดูแลการสันดาป แต่ในการปฏิบัติมีอยู่บ่อยครั้งที่หาเครื่องมือวิเคราะห์ไม่ได้ ในความเป็นจริงแล้วการตรวจสอบสภาวะการสันดาปที่ผิดปกติสามารถสังเกตได้ที่เปลวไฟ ในการสันดาปน้ำมันเตากล้ามองดูเปลวไฟจากช่องมองด้านหน้าแล้วจะเห็นใจกลางของเปลวไฟบริเวณใกล้กับหัวเผาค่อนข้างเป็นสีดำเล็กน้อยโดยที่เปลวไฟที่ส่องแสงจ้อยู่อรอบ ๆ มีรูปร่างค่อนข้างอยู่ตัวแล้วแสดงว่าการสันดาปกำลังเกิดขึ้นที่อัตราส่วนของอากาศที่ใกล้เคียงเหมาะสม ถ้าปริมาณอากาศมีน้อยกว่าค่าที่เหมาะสมแล้วเปลวไฟในบริเวณใกล้เคียงกับหัวเผาจะส่องแสงจ้อยิ่งขึ้น แต่บริเวณที่ใกล้กับปลาย

ของเปลวไฟจะออกสีดำนิด ๆ และมีเขม่าเกิดขึ้น ในกรณีนี้สามารถปรับค่าปริมาณอากาศที่เหมาะสมที่สุดได้โดยการเพิ่มปริมาณอากาศที่ละนิดจนกว่าเขม่าที่ปลายของเปลวไฟอยู่ในจังหวะที่เกิดขึ้น ถ้าปริมาณอากาศเข้ามากเกินพอเปลวไฟจะสั้นลงอย่างมาก และการสันดาปจะเกิดขึ้นในสภาพที่เปลวไฟมีลักษณะคล้ายกิ่งก้านแตกฉานกำลังเคลื่อนไหวอย่างรุนแรง ถ้าอากาศมากเกินไปอุณหภูมิภายในเตาหลอมจะลดลงและความร้อนที่สูญเสียไปกับก๊าซทิ้งจะเพิ่มขึ้น ผลก็คือปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้จะสูงขึ้น สีของเปลวไฟก็จะเปลี่ยนแปลงไปมากตามปริมาณอากาศที่ใช้ ถ้าปริมาณอากาศน้อยเกินไปก็จะเป็นสีแดงที่ปกคลุมไปด้วยสีค่อนข้างดำทั่วทั้งหมด ถ้าปริมาณอากาศมากเกินไปก็จะเป็นสีเหลืองใกล้เคียงกับสีขาว

ตารางที่ 2.12 สีของเปลวไฟจากการเผาไหม้กับปริมาณของอากาศ [25]

ปริมาณอากาศ	สภาวะภายในเตา(สีของเปลวไฟ)	สีของควัน
ปริมาณพอดี	เปลวไฟมีสีสดใสและรูปร่างอยู่ตัว มองเห็นส่วนลึกของเตาเผาได้ล่าง ๆ	สีเทาอ่อนหรือไม่มีสี
ปริมาณมากเกินไป	เปลวไฟสีขาวสว่างจ้าและภายในเตาเผาสว่าง	สีขาวหรือไม่มีสี
ปริมาณไม่พอ	ภายในเตาเผาทั้งหมดมีสีแดงคล้ำ	ควันดำ



รูปที่ 2.35 หัวข้อในการตรวจเช็คเปลวไฟ [40]

2.10.2 การควบคุมประสิทธิภาพในการเผาไหม้ในเตาหลอม

1) ปรับอัตราส่วนอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ให้เหมาะสม ในการเผาไหม้นั้นต้องพยายามปรับปรุงประสิทธิภาพทางความร้อนให้สูงสุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยการเผาไหม้นั้นไม่ควรมีการสูญเสียเชื้อเพลิงที่สามารถเผาไหม้ได้ และพยายามลดปริมาณอากาศที่ต้องการใช้ในการเผาไหม้ให้ใกล้เคียงกับค่าความต้องการอากาศทางทฤษฎี ถ้าปริมาณอากาศที่ป้อนเข้าเผาไหม้ต่ำกว่าค่าความต้องการทางทฤษฎีจะทำให้เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนเนื่องจากเชื้อเพลิงบางส่วนไม่เผาไหม้ ถ้าอากาศที่ป้อนเข้าเผาไหม้มากกว่าความต้องการใช้ในการเผาไหม้จะเกิดการสูญเสียความร้อนขึ้น เนื่องจากอากาศส่วนเกินของการเผาไหม้เข้าไปรับความร้อนแล้วถูกปล่อยทิ้งไป ซึ่งอัตราส่วนอากาศมีความสำคัญที่จะชี้ว่าการใช้พลังงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพหรือไม่

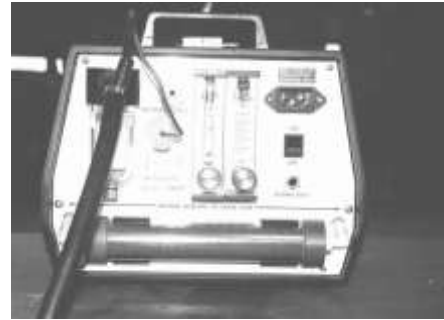
ตารางที่ 2.13 อัตราส่วนอากาศมาตรฐานของเตาอุตสาหกรรม [25]

ประเภทของเตา	อัตราส่วนอากาศมาตรฐาน
1.Melting furnace for metal casting	1.3
2.Steel slab continuous re-heating furnace	1.25
3.Metal re-heating furnace other than steel slab continuous re-heating furnace	1.3
4.Continuos heat treating furnace	1.3
5.Gas generator and gas re-heating furnace	1.4
6.Petroleum refinery furnace	1.4
7.Cement baking Furnace	1.3
8.Alumina backing furnace	1.4
9.Continuous glass melting furnace	1.3

2) การวิเคราะห์ไอเสีย ในกระบวนการเผาไหม้การนำเอาไอเสียมาวิเคราะห์ดูว่าประกอบด้วยสารอะไรบ้างเป็นสิ่งจำเป็น เพราะข้อมูลที่ได้สามารถแสดงให้เห็นว่า การเผาไหม้ได้เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์หรือไม่ ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้มีจำนวนเท่าใด และอุปกรณ์เผาไหม้ได้เสื่อมสภาพมากน้อยเพียงใด ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ไอเสียมีอยู่ 2 ชนิดคือ

(1) เครื่องวัดไอเสียแบบออร์เซท (Orsat Appartus) ใช้วัดส่วนประกอบโดยปริมาตรของไอเสียแห้ง เครื่องมือวัดชนิดนี้นิยมใช้กันมากเพราะง่ายที่จะใช้และราคาถูก การทำงานจะใช้

หลักการดูดกลืนทางเคมี (Selective chemical absorption) ถ้าจะใช้พิจารณาไอเสียแห้งที่ประกอบด้วย CO_2 , O_2 , CO และ N_2 อุปกรณ์ที่ใช้จะประกอบด้วยหลอดแก้วบรรจุสารเคมีซึ่งมีคุณสมบัติดูดกลืนก๊าซต่าง ๆ ดังกล่าวได้คือ สารละลายโปรแตสเซียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายของด่างโพแทสเซียม ดังรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.36 เครื่องวัดประสิทธิภาพการเผาไหม้เชื้อเพลิง [25]

(2) Gas Chromatograph เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดส่วนประกอบของสารต่าง ๆ ในไอเสียโดยใช้หลักการ คือ แยกสารแต่ละชนิดออกจากกันตามคุณสมบัติทางฟิสิกส์เมื่อสารเหล่านี้ไหลผ่าน Packed column และระบุสารเหล่านั้นที่ไหลออกมาด้วยความเร็วที่ต่างกันว่าแต่ละชนิดคือสารอะไรและมีจำนวนเท่าใด

2.10.3 การทำงานของหัวเผา หัวใจที่สำคัญของการเผาไหม้ คือ การทำให้น้ำมันระเหยกลายเป็นไอได้อย่างรวดเร็ว ในขั้นต้นต้องทำให้น้ำมันแตกออกเป็นฝอยหรือละอองเล็ก ๆ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวให้มากที่สุด และละอองเหล่านั้นต้องมีอุณหภูมิสูงพอที่จะทำให้ น้ำมันระเหยออกอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะทำให้ผสมกับอากาศได้อย่างทั่วถึงและเกิดการเผาไหม้ทันทีและต่อเนื่องอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดสภาวะดังกล่าวคือ หัวเผาน้ำมัน (Oil Burner) ซึ่งหน้าที่ของหัวเผาที่สำคัญอาจกล่าวได้ 2 ประการคือ

(1) พ่นกระจายน้ำมันให้เป็นฝอยละเอียด เข้าผสมกับอากาศในอัตราส่วนที่เหมาะสม เพื่อให้ได้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ สะอาดปราศจากควันและเขม่า การพ่นน้ำมันให้เป็นฝอยละเอียด อาจจะใช้ความดันน้ำมัน (Pressure Atomized) ใช้ไอน้ำหรืออากาศ (Steam or Air Atomized)

(2) ป้อนอากาศในปริมาณและอัตราส่วนที่เพียงพอต่อการเผาไหม้สมบูรณ์ ถ้าเป็นอากาศที่ผสมกับเชื้อเพลิงในหัวเผาเรียกว่า Primary Air ส่วนอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (Combustion Air) ที่ป้อนเข้าไปในเปลวไฟในลักษณะหมุนปั่นป่วนด้วยความเร็วสูงเรียกว่า Secondary Air

สรุป ในการควบคุมการเผาไหม้และประสิทธิภาพของการเผาไหม้ภายในเตาหลอมนั้นจะใช้เครื่องมือวัดปริมาณและวิเคราะห์ก๊าซ (Combustion Efficiency Analyzer) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเผาไหม้ภายในเตาหลอม และการทำงานของหัวเผาจะใช้การปรับอัตราส่วนระหว่างอากาศกับน้ำมันเชื้อเพลิงด้วยระบบมือควบคุมมือ (Manual System Control)

2.11 การสมดุลพลังงาน (Energy Balance) [26]

ตามกฎข้อที่ 1 ของ Thermodynamic คือ

$$\text{พลังงานเข้าสู่ระบบ} = \text{พลังงานออกจากระบบ}$$

2.11.1 พลังงานเข้าสู่ระบบประกอบด้วย

1) พลังงานเคมีของเชื้อเพลิง (Q_1)

$$Q_1 = M_{Tfc} \times HHV_{fuel} \quad (2.43)$$

เมื่อ M_{Tfc} = มวลของคาร์บอนในเชื้อเพลิง (kg)

HHV_{fuel} = High Heat Value (KJ/kg)

2) พลังงานที่ใช้อุ่นอากาศก่อนเข้าเตา (Q_2)

$$Q_2 = M_a \times C\rho_a \times (T_b - T_a) \quad (2.44)$$

เมื่อ M_a = มวลของอากาศแห้ง (kg)

$C\rho_a$ = ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศที่
ความดันคงที่ของอากาศจากจุด

T_a ถึง T_b หน่วย KJ/kg of dry air ($^{\circ}\text{C}$)

T_a = อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ($^{\circ}\text{C}$)

T_b = อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเตา ($^{\circ}\text{C}$)

2.11.2 พลังงานออกจากระบบประกอบด้วย

1) พลังงานที่ใช้ในการหลอมอะลูมิเนียม (Q_3)

$$Q_3 = M_{Al} \times C\rho_{Al} \times L_R \times (T_{in} - T_{out}) \quad (2.45)$$

- เมื่อ M_{Al} = มวลของอะลูมิเนียมที่ทำการหลอม (kg)
- $C\rho_{Al}$ = ค่าความร้อนจำเพาะของอะลูมิเนียม (KJ/kg $^{\circ}$ C)
- L_R = ค่าความร้อนแฝงของอะลูมิเนียม (KJ/kg)
- T_{in} = อุณหภูมิน้ำโลหะในบ้าหลอม ($^{\circ}$ C)
- T_{out} = อุณหภูมิในอกเตาหลอม ($^{\circ}$ C)

2) พลังงานที่สูญเสียไปกับ Dross ที่ออกจากระบบ (Q_4)

$$Q_4 = M_s \times C\rho_s \times (T_{in} - T_{out}) - M_{CaCO_3} \times H_{sR} \quad (2.46)$$

- เมื่อ M_s = มวลของ Dross ที่ออกจากระบบ (kg)
- $C\rho_s$ = ค่าความร้อนจำเพาะของ Dross (KJ/kg $^{\circ}$ C)
- H_{sR} = Heat of Dross Reactions (KJ/kg)

3) พลังงานสูญเสียไปกับความชื้นในอากาศ (Q_5)

$$Q_5 = M_a \times \omega \times C\rho_v \times (T_g - T_a) \quad (2.47)$$

- เมื่อ M_a = มวลของอากาศแห้ง (kg)
- ω = Humidity Ratio (kgwater/kg dryair)
- $C\rho_v$ = ค่าความร้อนจำเพาะของไอน้ำ (KJ/kg $^{\circ}$ C)
- T_g = อุณหภูมิของไอเสียที่ออกจากระบบ ($^{\circ}$ C)
- T_a = อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ($^{\circ}$ C)

4) พลังงานสูญเสียไปกับไอเสียแห้ง (Q_6)

$$Q_6 = M_g \times C\rho_g \times (T_g - T_a) \quad (2.48)$$

- เมื่อ M_g = มวลของไอเสียแห้ง (kg)
- $C\rho_g$ = ค่าความร้อนจำเพาะของไอเสียแห้ง (KJ/kg $^{\circ}$ C)

5) พลังงานสูญเสียเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังเตาหลอม (Q_8)

$$Q_8 = H_f \times A_o \times hr \quad (2.49)$$

เมื่อ H_f = Heat flux ที่ไหลผ่านผนังเตา (W/m^2)

A_o = พื้นที่ผิวภายนอกเตาหลอม (m^2)

hr = จำนวนชั่วโมงที่ทำงาน