

การปรับปรุงแบบหล่อถาวรเพื่อทดสอบการแตกร้าวขณะร้อนของอะลูมิเนียมผสม

Improvement of Permanent Casting Mold for Evaluation of Hot Cracking Tendency of Aluminum Alloys

ก้องเกียรติ ปุภรัตน์พงษ์¹⁾, ศุภฤกษ์ บุญเทียร¹⁾, ชลดา ช่วยมี¹⁾, ปิยณัฐ น้อยโนนทอง¹⁾, เด่นนภา น้อยไผ่ล้อม¹⁾,
ชินดนัย ชาวไร่นาค²⁾ และ ชาวลิต ลิ้มมณีวิจิตร¹⁾

Kongkiat Pupartanapong¹⁾, Supparerk Boontein¹⁾, Chonlada Chuaimee¹⁾, Piyanat Noinontong¹⁾,
Dennapa Noipailom¹⁾, Chindanai Challinak²⁾ and Chaowalit Limmaneevichitr¹⁾

¹⁾ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร 10140

²⁾บริษัท เอ็มไฟฟ์เอ็นจิเนียริง (ประเทศไทย) จำกัด, 567/46 ปรัชญาภิษโสม ซ.อ่อนนุช 67 แขวง/เขตประเวศ กรุงเทพฯ 10250

บทคัดย่อ

ในอุตสาหกรรมงานหล่ออะลูมิเนียมผสมในแบบหล่อถาวร มักเกิดปัญหาการแตกร้าวขณะร้อน (Hot cracking) ในชิ้นงานทำให้เกิดของเสีย ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น โดยแบบทดสอบการแตกร้าวขณะร้อนที่ใช้ในปัจจุบันนั้นมีความแม่นยำน้อย ใช้งานยาก งานวิจัยนี้เป็นการปรับปรุงแบบหล่อถาวรเพื่อทดสอบการแตกร้าวขณะร้อน (Constrained-rod casting mold: CRC Mold) เพื่อใช้ในอะลูมิเนียมผสมให้มีประสิทธิภาพ มีความแม่นยำ และสามารถนำไปใช้ได้จริงในอุตสาหกรรม โดยงานวิจัยนี้เริ่มจากการใช้ซอฟต์แวร์จำลองการหล่อโลหะ MAGMASOFT[®] ในการจำลองสภาวะการไหล และการเย็นตัวในแบบหล่อ โดยสามารถยืนยันได้ว่าเมื่อทำการทดลองจริงโดยใช้แบบหล่อที่ได้ออกแบบในครั้งนี้จะสามารถทนน้ำหนักได้เต็มแบบ และสามารถทราบได้ว่าบริเวณใดเป็นจุดร้อนสุดท้าย ทำให้สามารถรู้ว่าบริเวณใดจะเกิดการแตกร้าวขณะร้อน จึงนำไปสู่การสร้างแบบหล่อถาวรเพื่อทดสอบการแตกร้าวขณะร้อนในอะลูมิเนียมผสม และในการทดสอบที่ชิ้นงานจริง โดยทดสอบการแตกร้าวขณะร้อนในอะลูมิเนียมผสมเกรดที่เกิดการแตกร้าวขณะร้อนได้ง่าย คือ อะลูมิเนียมผสมทองแดง (Al-4Cu) และในอะลูมิเนียมเกรดที่เกิดการแตกร้าวขณะร้อนได้ยาก คือ อะลูมิเนียมผสมซิลิกอน เกรด A356 ผลการทดลองที่ชิ้นงานหล่อพบว่าอะลูมิเนียมผสมทองแดง (Al-4Cu) มีค่าแนวโน้มการแตกร้าวขณะร้อนที่สูงมาก และสูงกว่าอะลูมิเนียมผสมซิลิกอน เกรด A356 มากอีกด้วย ซึ่งมีค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของแบบหล่อถาวรในการที่จะใช้ชี้วัดค่าแนวโน้มการแตกร้าวขณะร้อนในอะลูมิเนียมผสมได้เป็นอย่างดี มีประสิทธิภาพและแม่นยำ

คำสำคัญ : การแตกร้าวขณะร้อน อะลูมิเนียมผสมทองแดง อะลูมิเนียมผสมซิลิกอน ซอฟต์แวร์จำลองการหล่อโลหะ

Abstract

Hot cracking is a common and severe defect that often occurs in aluminum alloy casting resulting in higher scraps and higher cost. This research presented the development of modified hot cracking test mold (Constrained-Rod Casting Mold: CRC Mold) that was designed to make it reliable, quick, easy to use, and represent the real casting process. This CRC Mold was done by using MAGMASOFT[®] casting simulation software to determine the hot spot during the solidification that will cause a hot cracking defect in castings. The objective of this study was to investigate the effect of pouring temperature and mold temperature by comparing the hot cracking tendency values of Aluminum-Copper alloy (Al-4Cu) and Aluminum-Silicon alloy (A356). It was found that Al-4Cu exhibited higher hot cracking tendency than A356.

Keywords : Hot cracking, Aluminum-Copper alloy, Aluminum-Silicon alloy, Casting simulation software

1. บทนำ

อะลูมิเนียมเป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็กที่มีปริมาณการใช้มาก เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น ความหนาแน่นต่ำ จุดหลอมเหลวต่ำ และมีความแข็งแรงต่อน้ำหนักที่สูง อีกทั้งยังมีสีสวยงาม สามารถทำสี หรือ ปัดเงาได้ ทำให้เป็นที่นิยมใช้งานโดยทั่วไป รวมไปถึงในอุตสาหกรรมระดับสูง เช่น อุตสาหกรรมการบิน และอุตสาหกรรมการยานยนต์ เป็นต้น สมบัติที่โดดเด่นของอะลูมิเนียม คือ สามารถในการต้านทานการกัดกร่อนได้ดี (Corrosion resistance) กลึงไสตัดเจาะง่าย (Machinability) ความสามารถในการเชื่อมดี (weldability) และหล่อหลอมง่าย (1, 2) ทั้งนี้ความสามารถในการหล่อหลอม (Castability) เป็นหัวใจสำคัญของการหล่ออะลูมิเนียมที่ส่งผลกระทบต่อโดยตรงกับคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ โดยความสามารถในการหล่อหลอมมีหลายประการ เช่น ความสามารถในการไหล (Fluidity) การเกิดรูพรุนในงานหล่อ (Porosity Formation) และการแตกร้าขณะร้อน (Hot cracking) เป็นต้น (3)

การแตกร้าขณะร้อนนั้นเป็นข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นได้มากในงานหล่ออะลูมิเนียม โดยการแตกนั้นจะเกิดขึ้นในขณะที่อะลูมิเนียมกำลังจะแข็งตัว โดยสมบูรณ์ภายในแบบหล่อ ซึ่งสัมพันธ์กับการหดตัว การบิดเค้นนำโลหะ และการเกิดความเค้น (Stress) โดยในขณะที่อะลูมิเนียมกำลังเย็นตัวในช่วงสถานะกึ่งเหลวกึ่งแข็ง (Mushy stage) และอะลูมิเนียมหลอมเหลวโดยรอบไม่สามารถบิดเค้นได้ทัน ก็จะเกิดการแตกร้าได้ จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการเติมธาตุผสมบางอย่างสามารถลดการแตกร้าขณะร้อนได้ (4, 5) Easton และคณะ (6) ได้ศึกษาผลของการเติมไทเทเนียมลงในอะลูมิเนียมผสมพบว่าเมื่อเติมไทเทเนียมลงไปปริมาณที่เหมาะสมจะทำให้เกรนของอะลูมิเนียมมีขนาดเล็กและจะส่งผลให้การเกิดการแตกร้าขณะร้อนลดลงไปด้วย อย่างไรก็ตาม Rosenberg และคณะ (7) กลับพบว่าการลดขนาดเกรนไม่ได้ส่งผลโดยตรงต่อการลดการเกิดการแตกร้าขณะร้อน ซึ่งสอดคล้องกับ Warrington และคณะ (8) และยังมีงานวิจัยอีกมากที่แสดงให้เห็นว่าการเติมธาตุผสมบางธาตุเพียงเล็กน้อยทำให้สามารถลดขนาดเกรนและทำให้ยูเทคติกซิลิโคนมีขนาดเล็กได้ (9-14) แต่ก็ยังไม่มียานวิจัยที่ศึกษาการแตกร้าขณะร้อนได้อย่างแน่ชัด จึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาต่อไป

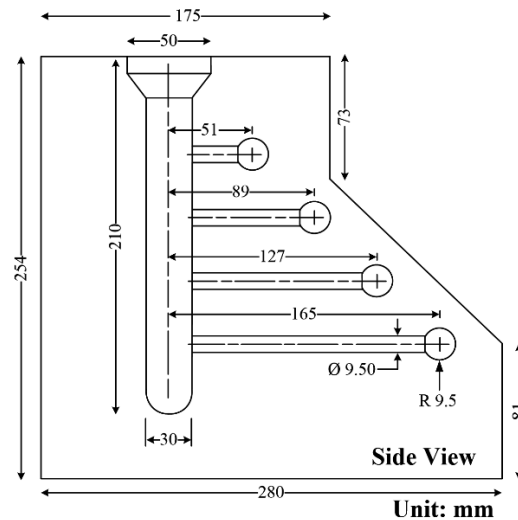
แบบทดสอบการแตกร้าขณะร้อนที่ใช้ในปัจจุบันนั้นมีความแม่นยำน้อย ใช้งานยาก งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงแบบหล่อถาวรเพื่อทดสอบการแตกร้าขณะร้อน (Constrained-rod casting mold: CRC Mold) เพื่อใช้ในการหล่ออะลูมิเนียมให้มีประสิทธิภาพ มีความแม่นยำ และสามารถนำไปใช้ได้จริงในอุตสาหกรรม เพื่อที่จะสามารถตรวจสอบนำโลหะก่อนทำการเทงานจริง ทำให้สามารถลด

ของเสียจากกระบวนการผลิตได้ และนำไปใช้ในการศึกษาวิจัยต่อยอดในขั้นสูงเพื่อที่จะสามารถเข้าใจถึงกลไกการเกิดการแตกร้าขณะร้อน เพื่อที่จะหาวิธีลดข้อบกพร่องดังกล่าวได้ในอนาคต โดยงานวิจัยนี้จะทำการออกแบบแบบหล่อถาวร และทำการจำลองสภาวะการไหล การเย็นตัวด้วยซอฟต์แวร์จำลองการหล่อโลหะ MAGMASOFT® จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลกับชิ้นงานจริงที่หล่อได้ เพื่อที่จะหา สภาวะการหล่อที่ให้ผลที่แม่นยำและมีประสิทธิภาพสูงสุด

2. วิธีการวิจัย

2.1 การจำลองสภาวะการไหลและการเย็นตัวด้วยซอฟต์แวร์จำลองการหล่อโลหะ (Casting simulation software)

แบบหล่อถาวรเพื่อทดสอบการแตกร้าขณะร้อน หรือ CRC Mold เป็นแบบหล่อที่ทำจากเหล็กเหนียวชิ้นงานหล่อที่ได้จะมีลักษณะเป็นแท่ง 4 แท่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.5 มม. มีความยาว 51, 89, 127 และ 165 มม. ตามลำดับ ที่ด้านปลายด้านหนึ่งเป็นลักษณะกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 มม. ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยงานวิจัยนี้ใช้ MAGMASOFT® simulation program ในการจำลองสภาวะการไหลและการเย็นตัวในแบบหล่อเพื่อใช้ในการทำนายและออกแบบปรับปรุงแบบหล่อ เพื่อให้ได้แบบหล่อที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ก่อนที่จะนำไปผลิตแบบหล่อจริง



รูปที่ 1 CRC Mold

2.2 กระบวนการหล่อหลอม

เพื่อที่จะพิสูจน์ว่า CRC Mold ที่ทำการออกแบบขึ้นใหม่นั้น มีประสิทธิภาพ มีความแม่นยำมากพอที่จะแยกแยะการแตกร้าขณะร้อนได้หรือไม่ จึงทำการทดสอบชิ้นงานจริงด้วยอะลูมิเนียมผสมที่เกิดการแตกร้าขณะร้อนได้ง่าย คือ อะลูมิเนียมผสมทองแดงประมาณ 4% โดยน้ำหนัก (เกรด Al-4Cu) และในอะลูมิเนียมที่เกิดการแตกร้าขณะร้อนได้ยาก คือ

อะลูมิเนียมผสมซิลิคอนประมาณ 6.5-7.5% โดยน้ำหนัก (เกรด A356) และเพื่อให้สามารถอธิบายผลของอุณหภูมิและอุณหภูมิอ่อนแบบหล่อที่มีต่อแนวโน้มการแตกร้าวขณะร้อนในอะลูมิเนียมผสมจึงทำการกำหนดอุณหภูมิอ่อนแบบหล่อไว้ที่ 150, 200 และ 250 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และกำหนดอุณหภูมิเทให้เป็นไปตามตารางที่ 1 โดยทำการเทที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวในแต่ละเกรดที่อัตราเพิ่มขึ้นทีละ 50 องศาเซลเซียสตามลำดับ

ตารางที่ 1 อุณหภูมิเทลงแบบหล่อ

| เกรด | อุณหภูมิเท (องศาเซลเซียส) | | |
|---------------|---------------------------|-----|-----|
| Al-4Cu | 700 | 750 | 800 |
| A356 | 670 | 720 | 770 |

ทำการหลอมด้วยเตาหลอมไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำขนาด 12 กิโลวัตต์ ด้วยเบ้าที่ทำจากซิลิคอนคาร์ไบด์ ก่อนทำการเทด้วยความสะอาดอะลูมิเนียมหลอมเหลวด้วย ฟลักซ์ปริมาณ 0.5% โดยน้ำหนักหลอม และทำการไล่แก๊สไฮโดรเจนด้วยการพ่นแก๊สอาร์กอนผ่านท่อสเตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม. ที่อัตราการไหล 4 ลิตรต่อนาที ด้วยความดัน 0.2 MPa ประมาณ 1 นาที

2.3 การวิเคราะห์แตกร้าวขณะร้อน

ชิ้นงานหล่อที่ได้จะนำมาตรวจสอบด้วยกล้องแบบมหภาค และทำการถ่ายภาพเพื่อนำมาวัดขนาดของรอยแตกและทำการคำนวณค่า Hot cracking susceptibility index (HCS) (15) ตามสมการที่ 1 โดยค่าดังกล่าวจะแสดงถึงความรุนแรงของการแตกร้าวขณะร้อนที่เกิดขึ้น

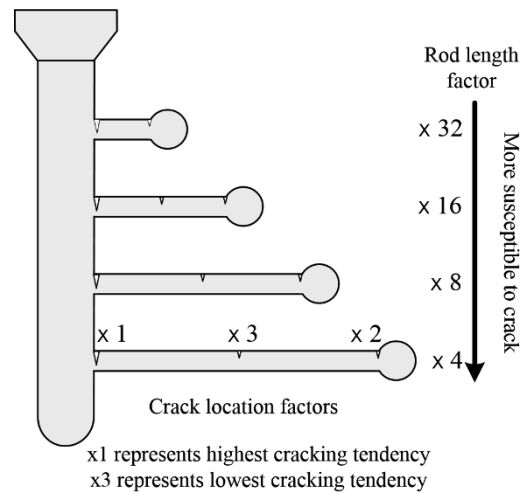
$$HCS = \sum w_{crack} \times f_{length} \times f_{location} \quad (1)$$

จากสมการ w_{crack} คือ ความกว้างของรอยแตกสูงสุดมีหน่วยเป็น มม., f_{length} คือ ค่าตัวคูณ Rod length factor โดยแบ่งที่สั้นที่สุดมีค่าตัวคูณเท่ากับ 32 แบ่งที่ยาวลำดับถัดมามีค่าตัวคูณเท่ากับ 16 และ 8 ส่วนแบ่งที่ยาวที่สุดมีค่าตัวคูณเท่ากับ 4, $f_{location}$ คือ ค่าตัวคูณ Crack location factor ขึ้นอยู่กับตำแหน่งรอยแตกที่พบในชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 2

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

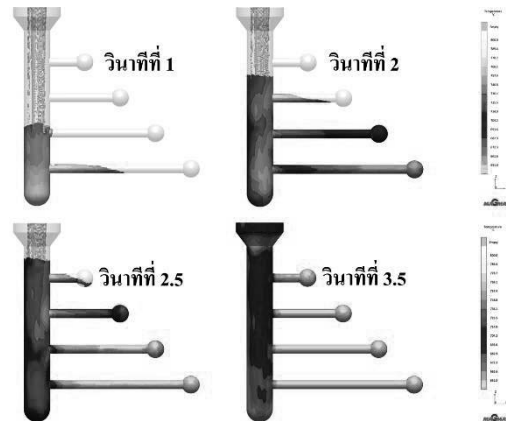
3.1 ผลการจำลองสภาวะการไหลและการเย็นตัวด้วยซอฟต์แวร์จำลองการหล่อโลหะ (Casting simulation software)

ผลจากการจำลองสภาวะการไหล (Filling mode) พบว่าอะลูมิเนียมสามารถไหลเข้าสู่แบบได้อย่างสมบูรณ์ ในทุก ๆ



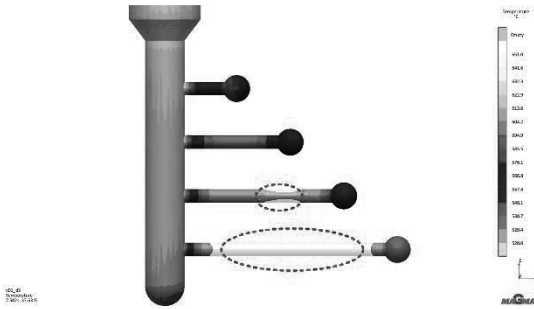
รูปที่ 2 ค่า Rod length factor and Crack location factor

สภาวะการทดลองโดยใช้เวลาประมาณ 3.5 วินาที ทำให้มั่นใจได้ว่าจะสามารถเทงานได้เต็มแบบอย่างแน่นอน และผลการจำลองสภาวะการไหลตัวแสดงในรูปที่ 3 พบว่าในวินาทีที่ 1 อะลูมิเนียมหลอมเหลวเริ่มไหลเข้าสู่แบบหล่อแท่งล่างสุด จากนั้นในวินาทีที่ 2 อะลูมิเนียมไหลเข้าสู่แบบถึงแท่งที่ 3 จนกระทั่งไหลเข้าเต็มแบบได้อย่างสมบูรณ์ในวินาทีที่ 3.5 ทำให้เชื่อมั่นในการนำไปสร้างแบบหล่อจริงเพื่อลดความเสี่ยงที่จะเกิดการสูญเสียภายหลังหากไม่สามารถเทงานได้เต็มแบบ



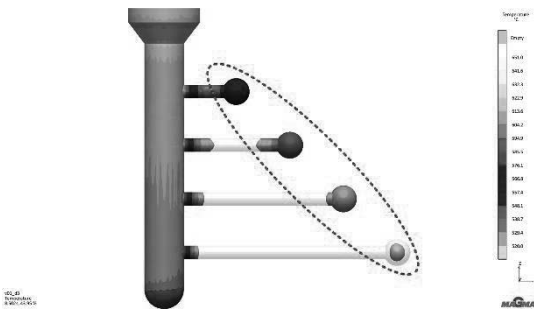
รูปที่ 3 การไหลในแบบหล่อวินาทีที่ 1-3.5

เมื่อพิจารณาการจำลองสภาวะการแข็งตัว (Solidification mode) เห็นได้ว่าการเย็นตัวเป็นไปตามที่คาดการณ์ไว้ คือ ชิ้นงานจะเริ่มเย็นตัวที่ตรงกลางแท่งชิ้นล่างก่อน (บริเวณวงกลมเส้นประ) ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งเป็นภาพแสดงการเย็นตัวในแบบหล่อที่วินาทีที่ 7.5 และจะเริ่มเย็นตัวไล่ขึ้นไปโดยที่ตุ่มกลมด้านขวาจะยังคงร้อนอยู่

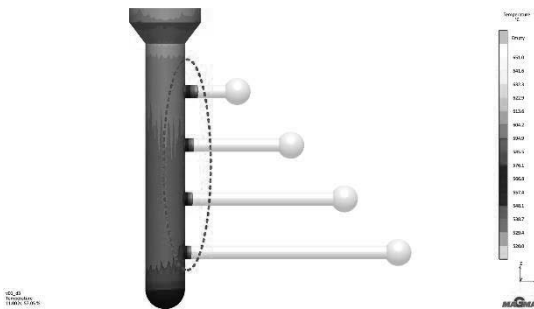


รูปที่ 4 การเขียนตัวของชิ้นงานในวินาทีที่ 7.5

เมื่อชิ้นงานเขียนตัวต่อมาในวินาทีที่ 8.5 ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่าตรงบริเวณแท่งตรงกลางเขียนตัวลงมากโดยที่ตุ้มกลมยังคงร้อนอยู่ (บริเวณวงกลมเส้นประ) ซึ่งจะเกิดการแตกต่างของอุณหภูมิของสองบริเวณทำให้รอยแตกจะเกิดตรงบริเวณนี้มาก



รูปที่ 5 การเขียนตัวของชิ้นงานในวินาทีที่ 8.5

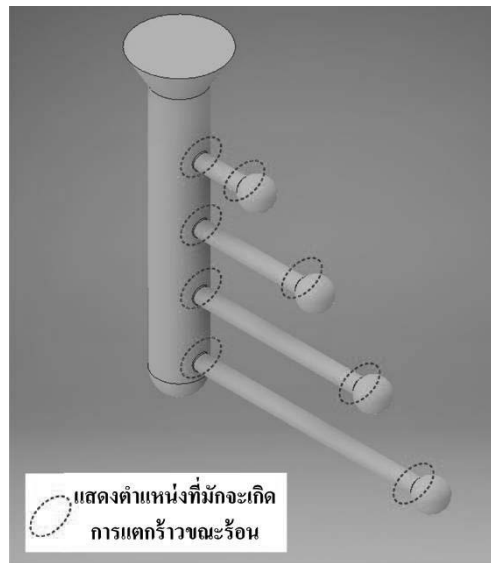


รูปที่ 6 การเขียนตัวของชิ้นงานในวินาทีที่ 11

เมื่อชิ้นงานเขียนตัวต่อมาในวินาทีที่ 11 ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่าตรงบริเวณแท่งตรงกลางและบริเวณตุ้มกลมได้เขียนตัวลงแล้ว และการเขียนตัวก็เป็นการเขียนตัวไปในทิศทางเข้าหาแนว ซึ่งจะเกิดการแตกต่างของอุณหภูมิของแท่งตรงกลางและบริเวณรูเททำให้รอยแตกจะเกิดตรงบริเวณรอยต่อนี้มากเช่นกัน (บริเวณวงกลมเส้นประ) ซึ่งรอยแตกจะถูกพิสูจน์ด้วยการเทชิ้นงานจริงในลำดับถัดไป

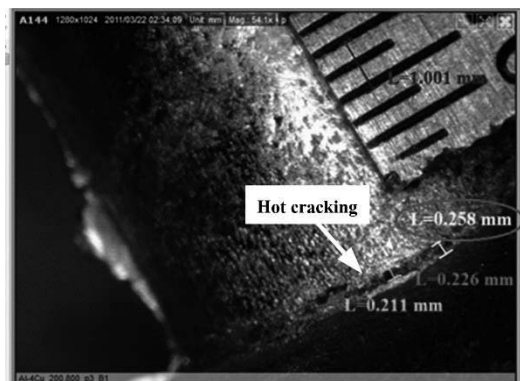
3.2 ผลการวิเคราะห์การแตกร้าวขณะร้อน

จากการทดลองเทชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมทองแดง (Al-4Cu) และอะลูมิเนียมผสมซิลิคอน (A356) ตามเงื่อนไขของอุณหภูมิเทและอุณหภูมิอุ่นแบบหล่อตามที่กำหนดนั้น เมื่อปล่อยให้ชิ้นงานแข็งตัวโดยสมบูรณ์ จะพบรอยแตกตามบริเวณส่วนที่ใกล้กับรูเทและบริเวณตรงปลายด้านที่ติดกับทรงกลม ดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกันกับที่ซอฟต์แวร์จำลองการหล่อโลหะ MAGMASOFT® simulation program ได้แสดงผลเอาไว้จึงเป็นการยืนยันได้ว่าโปรแกรมมีความแม่นยำสามารถเชื่อถือได้



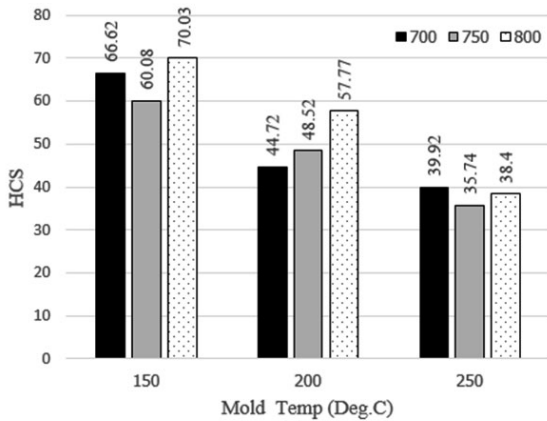
รูปที่ 7 ตำแหน่งที่เกิดการแตกร้าวขณะร้อน

จากนั้นเมื่อนำชิ้นงานที่หล่อได้ไปถ่ายภาพรอยแตกด้วยกล้องมหภาค เพื่อทำการคำนวณค่าดัชนี HCS ที่แสดงถึงความรุนแรงของการแตกร้าวขณะร้อน กล่าวคือถ้า HCS ยิ่งมากแสดงว่าการแตกร้าวยิ่งมากตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 8-10

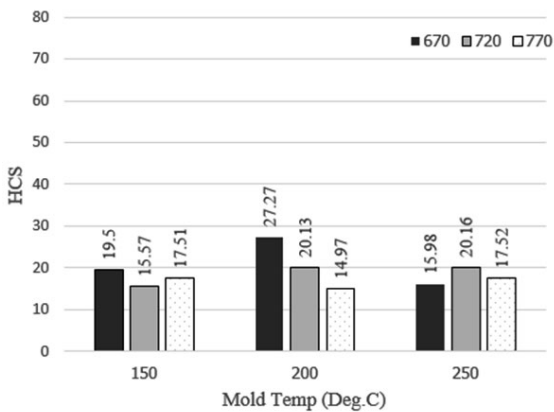


รูปที่ 8 รอยแตกร้าวขณะร้อนที่พบจากชิ้นงานหล่อ

รูปที่ 8 แสดงการวัดความกว้างของรอยแตกร้าวขณะร้อน ของชิ้นงานที่เย็นตัวโดยสมบูรณ์แล้ว โดยทำการถ่ายภาพแบบมหภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลแบบพกพา พร้อมทั้งทำการวัดขนาดความกว้างของรอยแตก โดยทำการวัดความกว้างของรอยแตกสูงสุดเพื่อนำไปคำนวณหาค่า HCS ต่อไป



รูปที่ 9 ค่า HCS ของอะลูมิเนียมเกรด AI-4Cu



รูปที่ 10 ค่า HCS ของอะลูมิเนียมเกรด A356

จากรูปที่ 9 แสดงผลการคำนวณค่าดัชนี HCS ของอะลูมิเนียมผสมทองแดง เกรด AI-4Cu พบว่าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการวิจัยนี้ จะมีค่า HCS สูงสุดในทุกๆ อุณหภูมิโมล ซึ่งสอดคล้องกับปรากฏการณ์ธรรมชาติที่อุณหภูมิยิ่งสูงยิ่งจะมีโอกาสเกิดการแตกร้าวขณะร้อนยิ่งมากขึ้น (4) และเมื่อพิจารณาผลการทดลองที่อุณหภูมิโมล 150 องศาเซลเซียส ทำการเทที่ 700, 750 และ 800 องศาเซลเซียส มีค่า HCS เฉลี่ยที่ 66.62, 60.08 และ 70.03 ตามลำดับ และเมื่ออุณหภูมิโมลเพิ่มขึ้นเป็น 200 และ 250 องศาเซลเซียส ค่า HCS ก็ลดลงตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิโมลที่สูงขึ้น ส่งผลให้การแตกร้าวขณะร้อนมีแนวโน้มลดลง จากผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าอุณหภูมิอุ่น

แบบมีผลอย่างยิ่งต่อการเกิดการแตกร้าวขณะร้อนของอะลูมิเนียมผสมทองแดงเกรด AI-4Cu

จากรูปที่ 10 แสดงผลการคำนวณค่าดัชนี HCS ของอะลูมิเนียมผสมซิลิกอน เกรด A356 พบว่าที่อุณหภูมิโมล 150, 200 และ 250 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิเท 670, 720 และ 770 องศาเซลเซียส ได้ค่า HCS ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าช่วงอุณหภูมิโมลและอุณหภูมิเทที่กำหนดในการทดลองนี้ ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อการแตกร้าวขณะร้อนของอะลูมิเนียมเกรด A356 ซึ่งอาจเป็นไปได้เพราะอะลูมิเนียมเกรดนี้มีความสามารถในการต้านทานการแตกร้าวขณะร้อนดีนั่นเอง ซึ่งเป็นอีกเหตุผลหนึ่งที่อะลูมิเนียมเกรด A356 เป็นที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมหล่อโลหะ

4. สรุปผลการวิจัย

4.1 ผลการจำลองสภาวะการไหลและการเย็นตัวด้วยซอฟต์แวร์จำลองการหล่อโลหะ MAGMASOFT® แสดงให้เห็นว่าโปรแกรมนี้มีความแม่นยำสามารถเป็นตัวช่วยในการออกแบบ และเพิ่มความมั่นใจในการปรับปรุงแบบหล่อถาวรเพื่อการทดสอบการแตกร้าวขณะร้อนในอะลูมิเนียมผสมได้เป็นอย่างดี ลดความเสี่ยงที่จะสูญเสียค่าใช้จ่ายในการทำแบบหล่อผิดพลาดได้

4.2 เมื่อพิจารณาจากค่าดัชนี HCS ของอะลูมิเนียมเกรด A356 ที่มีค่าเฉลี่ยไม่เกิน 20 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าดัชนี HCS ของอะลูมิเนียมผสมทองแดงเกรด AI-4Cu มาก แสดงให้เห็นว่าแบบหล่อถาวรเพื่อการทดสอบการแตกร้าวขณะร้อนที่ปรับปรุงขึ้นมาในงานวิจัยนี้ สามารถแยกแยะการแตกร้าวขณะร้อนของอะลูมิเนียมเกรดที่แตกได้ง่าย และอะลูมิเนียมเกรดที่มีความสามารถในการต้านทานการแตกร้าวขณะร้อนได้ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของแบบหล่อถาวรในการที่จะนำไปใช้วัดหาค่าแนวโน้มการแตกร้าวขณะร้อนในอะลูมิเนียมผสมได้เป็นอย่างดี มีประสิทธิภาพและแม่นยำ อีกทั้งแบบหล่อถาวรนี้จะถูกนำไปใช้งานวิจัยเชิงลึกเพื่อศึกษาวิจัยต่อยอดให้สามารถเข้าใจถึงกลไกการเกิดการแตกร้าวขณะร้อน เพื่อที่จะหาวิธีลดข้อบกพร่องดังกล่าวได้ในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจาก “โครงการกระตุ้นงานวิจัย มจร. ในโอกาสครบรอบ 55 ปีแห่งการสถาปนามหาวิทยาลัย” และ ขอขอบคุณ M5 Engineering (Thailand) Co., Ltd. สำหรับการอนุเคราะห์ในการใช้ซอฟต์แวร์จำลองการหล่อโลหะ MAGMASOFT เพื่อใช้ในการเรียนการสอนและการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Arnberg L, Mo A. Castability-fluidity and hot tearing. *Metals Handbook*, ASM. 2008;375.
- [2] Gruzleski JEC, B.M. The Treatment of Liquid Aluminum-Silicon Alloys: American's Foundry Society.; 1990.
- [3] Di Sabatino M, Arnberg L. Castability of aluminium alloys. *Transactions of The Indian Institute of Metals*. 2009;62(4-5):321-5.
- [4] Flemings MC. *Solidification processing*: Wiley Online Library; 1974.
- [5] T.N. Ware AKD, S. Charles, M.J. Couper. Effect of Sr, Na, Ca & P on the castability of foundry alloy A356.2. *ASM Materials Solutions 2002 Conference & Exposition, 2nd International Aluminum Casting Technology Symposium*; October Columbus, Ohio, USA, 2002: 159-68.
- [6] Easton M, Wang H, Grandfield J, St John D, Sweet E, editors. An analysis of the effect of grain refinement on the hot tearing of aluminium alloys. *Materials Forum*; 2004.
- [7] Rosenberg R, Flemings M, Taylor H. Nonferrous binary alloys hot tearing. *Transactions of the American Foundrymen's Society*. 1960;68:518-28.
- [8] Warrington D, McCartney D. Hot-Cracking in Aluminium Alloys 7050 and 7010—a Comparative Study. *Cast metals*. 1990; 3(4):202-8.
- [9] Patakham U, Kajornchaiyakul J, Limmaneevichitr C. Grain refinement mechanism in an Al–Si–Mg alloy with scandium. *Journal of Alloys and Compounds*. 2012;542:177-86.
- [10] Patakham U, Kajornchaiyakul J, Limmaneevichitr C. Modification Mechanism of Eutectic Silicon in Al–6Si–0.3Mg Alloy with Scandium. *Journal of Alloys and Compounds*. 2013;575(0):273-84.
- [11] Pandee P, Gourlay C, Belyakov S, Patakham U, Zeng G, Limmaneevichitr C. AlSi₂Sc₂ intermetallic formation in Al-7Si-0.3 Mg-xSc alloys and their effects on as-cast properties. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018;731:1159-70.
- [12] Pandee P, Gourlay CM, Belyakov SA, Ozaki R, Yasuda H, Limmaneevichitr C. Eutectic Morphology of Al-7Si-0.3Mg Alloys with Scandium Additions. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2014;45(10):4549-60.
- [13] Prukkanon W, Srisukhumbowornchai N, Limmaneevichitr C. Modification of Hypoeutectic Al–Si Alloys with Scandium. *Journal of Alloys and Compounds*. 2009;477:454-60.
- [14] Prukkanon W, Srisukhumbowornchai N, Limmaneevichitr C. Influence of Sc Modification on The Fluidity of An A356 Aluminum Alloy. *Journal of Alloys and Compounds* 2009;487:453-7.
- [15] Cao G, Kou S. Hot cracking of binary Mg–Al alloy castings. *Materials Science and Engineering: A*. 2006;417(1–2):230-8.