



ประสิทธิภาพการปรับสภาพเกรนละเอียดและปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอนในโลหะผสม หล่ออลูมิเนียม-ซิลิคอน-แมกนีเซียม

จินกมล ลุยจันทร์

Refining Efficiency and Eutectic Silicon Modification in Al-Si-Mg Cast Alloy

Jinkamon Luijan

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการผลิต คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ จังหวัด
ประจวบคีรีขันธ์ 77110

Department of Production Engineering Technology, Faculty of Industry and technology, Rajamangala University of Technology
Rattanakosin, Prachuap Khiri Khan Province, 77110

Corresponding author. E-mail address: jinkamon.lui@rmutr.ac.th

Received: 19 December 2016; Accepted: 7 April 2017

บทคัดย่อ

การปรับสภาพเกรนละเอียดและปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอนมีความสำคัญในการเพิ่มคุณภาพของชิ้นงานหล่อในโลหะผสมอลูมิเนียม-ซิลิคอน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการปรับสภาพเกรนละเอียดและการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอนในโลหะผสมอลูมิเนียม-ซิลิคอน-แมกนีเซียม เกรด A356 โลหะแม่ที่ใช้ในการทดลอง Al-4%B-2%Sr ปริมาณการเติมแตกต่างกัน (ร้อยละ 1, 2, 3 และ 4 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ) เวลาในการค้ำน้ำโลหะ (10, 30, 60 และ 120 นาที ตามลำดับ) เทลงโมลด์สเตนเลสซึ่งมีอัตราการเย็นตัวต่ำ ผลการทดลองพบว่าโลหะผสมอลูมิเนียมที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพเกรนละเอียดและปรับสภาพเฟสซิลิคอนจะมีขนาดเกรนที่ใหญ่และเฟสยูเทคติกซิลิคอนมีรูปร่างไม่แน่นอน หลังจากการเติมโลหะแม่ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ทำให้ขนาดเกรนลดลงเล็กน้อย ในขณะที่เฟสซิลิคอนจะปรับสภาพเป็นกลมมนแค่บางส่วน ปริมาณการเติม ร้อยละ 2, 3 โดยน้ำหนัก ขนาดเกรนเฉลี่ยเล็กลงอย่างมาก และเฟสยูเทคติกซิลิคอนเปลี่ยนเป็นรูปทรงกลมมนทั้งหมด นอกจากนี้ยังพบว่าที่ปริมาณการเติม ร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก เวลาในการปรับสภาพ 10-120 นาที จะมีการฟอร์มตัวของสารประกอบ SrB_6 บริเวณด้านล่างของชิ้นงานหล่อ ซึ่งการฟอร์มตัวดังกล่าวส่งผลต่อประสิทธิภาพในการปรับสภาพเกรนละเอียดที่ลดลง

คำสำคัญ: การปรับสภาพเกรนละเอียด โลหะผสม Al-Si-Mg งานหล่อ

Abstract

Refining efficiency and eutectic silicon modification are important to increase quality of Al-Si cast alloy. The objective of this research was to study the grain refining efficiency and eutectic silicon modification of Al-Si-Mg cast alloy grade A356 by adding master alloy, Al-4%B-2%Sr, in different portions (1, 2, 3 and 4 wt.% respectively) and within different holding times (10, 30, 60 and 120 min respectively) when pouring into stainless mold with low cooling rate. The experiment found that Al-Si-Mg cast alloy without passing the grain refining and eutectic silicon modification, had large grain size and acicular morphology of eutectic silicon. After the addition of 1 wt.% of Al-4%B-2%Sr, the grain size decreased while eutectic silicon's morphology partially became fibrous. And after the addition of 2 and 3 wt.% of Al-4%B-2%Sr, the average grain sizes massively decreased and eutectic silicon fully modified into the fibrous morphology. However, the experiment found that the addition of 4 wt.% of Al-4%B-2%Sr, within hold times of 10-120 min caused SrB_6 intermetallic compound at the bottom of casting, leads to a decrease of refining efficiency.

Keywords: Grain refinement, Al-Si-Mg Alloys, Casting



บทนำ

อลูมิเนียมถูกเลือกใช้งานในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ โดยวัสดุที่ใช้ทำโครงสร้างรถยนต์ส่วนใหญ่ประกอบไปด้วย อลูมิเนียม (Al) และเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (HSS) เป็นหลัก อลูมิเนียมที่ใช้ทำส่วนประกอบรถยนต์แบ่งเป็น อลูมิเนียมแผ่น เกรด 6xxx อลูมิเนียมผ่านการขึ้นรูปทางกล เกรด 6xxx และอลูมิเนียมหล่อ เกรด 3xx เนื่องจากโลหะผสมอลูมิเนียมกลุ่มนี้มีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น ทนการกัดกร่อน น้ำหนักเบา ง่ายต่อการขึ้นรูป มีความสามารถในการหล่อที่ดี และมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี สำหรับงานหล่อโดยทั่วไปสมบัติเชิงกลขึ้นอยู่กับองค์ประกอบด้านโครงสร้างจุลภาค การปรับปรุงสภาพเกรนละเอียดมีความสำคัญในงานหล่อโลหะผสมอลูมิเนียมเนื่องจากสามารถลดการแตกร้าวร้าวในขณะแข็งตัว มีความสามารถในการเติมเติมน้ำโลหะได้ดี ส่งผลให้การหดตัวของชิ้นงานลดน้อยลง ทำให้รูปทรงมีขนาดเล็กและมีการกระจายตัวที่ดี การกระจายตัวของเฟสสารประกอบเชิงโลหะสม่ำเสมอ ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงและอัตราการยืดตัวของชิ้นงานหล่อสูงขึ้น (Gruzleski & Closset, 1990)

การปรับปรุงคุณภาพของงานหล่อที่นิยมมี 2 กระบวนการ คือ การปรับปรุงโดยการสันสะท้อนทางกล และ การปรับปรุงโดยการเติมธาตุ การปรับปรุงสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอนเป็นการปรับปรุงคุณภาพของงานหล่อโดยการเติมธาตุเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญในกระบวนการหล่อในโลหะผสมอลูมิเนียม-ซิลิคอน สำหรับผลิตชิ้นส่วนที่มีความซับซ้อน เนื่องจากปริมาณซิลิคอน 5-18 wt.% จะส่งผลดีด้านสมบัติการไหลของน้ำอลูมิเนียมหลอมเหลว (Campbell, 2003) เป็นที่ทราบกันดีว่าเฟสยูเทคติกซิลิคอนมีลักษณะเป็นแผ่น รูปทรงไม่แน่นอน เนื่องจากการฟอร์มตัวและเติบโต (Growth) ในระนาบ <112> และมีการ Twinning ในระนาบ (111) ในปัจจุบันนิยมเติมธาตุสตรอนเทียม ปริมาณ 0.02-0.04 wt.% ลงไปในน้ำโลหะหลอมเหลว เมื่อโลหะหลอมเหลวแข็งตัวธาตุสตรอนเทียมจะเข้าไปขัดขวางการเติบโตของเฟสซิลิคอนในระนาบ <112> และเกิดการเติบโตได้หลายทิศทาง ทำให้เฟสยูเทคติกซิลิคอนมีขนาดเล็กลงและมีรูปร่างกลมมนมากขึ้น จากลักษณะดังกล่าวจะส่งผลดีต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่สูงขึ้น (Shin, Kim, Yeom, & Lee, 2012; Yang, Lee,

Lee, & Lin, 2006) สามารถลดเวลาการอบให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Eidhed, 2008) การเติมธาตุสตรอนเทียมจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องควบคุมให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสม ในกรณี que ที่เติมมากเกินไปจะเกิดฟอร์มตัวเป็นสารประกอบเชิงโลหะ Al_4SrSi_2 มีลักษณะเป็นก้อน กระจายตัวในโครงสร้างจุลภาคและส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานหล่อลดต่ำลง (John & Bernard, 1990)

จากงานวิจัยที่ผ่านมา Apelian and Chen (1986) ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการปรับปรุงสภาพเกรนอลูมิเนียม โดยใช้โลหะแม่ 3 ชนิด ประกอบด้วยโลหะแม่ชนิด Al-5%Ti, Al-5%Ti-1%B และ Al-4%B ในโลหะผสมอลูมิเนียม A356 พบว่าโลหะแม่ชนิด Al-4%B มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงสภาพเกรนมากกว่าทุก ๆ ระดับการเติมโลหะแม่ Limmaneevichitr and Eidhed (2003) ได้ศึกษาการเชื่อมประสิทธิภาพของโลหะแม่ Al-3%Ti-0.5%B โดยการเติมในโลหะผสมอลูมิเนียม A356 พบว่าระยะเวลาที่เหมาะสมในการปรับปรุงสภาพอยู่ในช่วง 20 นาที แต่ไม่เกิน 60 นาที เนื่องจากเกิดการตกตะกอนของสารประกอบ $TiAl_3$ และ TiB_2 บริเวณแกนของเบ้าหล่อ มีการศึกษาการปรับปรุงสภาพเกรน α -Al โดยใช้โลหะแม่ Al-5%Ti, Al-5%Ti-1%B และ Al-4%B ในโลหะผสม A356 Feng et al. (2006) เติมโลหะแม่ Al-Ti-B ระดับการเติม 0.01-0.15 wt% พบว่าที่ปริมาณการเติม 0.1-0.15 wt% มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงสภาพเกรนละเอียดสูงสุด นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อปริมาณธาตุซิลิคอนเพิ่มมากขึ้นประสิทธิภาพในการปรับปรุงสภาพเกรนละเอียดจะลดต่ำลง มีงานวิจัยที่ศึกษาผลกระทบการปรับปรุงสภาพเกรนละเอียดและปรับปรุงสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอนในโลหะผสมอลูมิเนียม-ซิลิคอน โดยการผสมกันระหว่างโลหะแม่ Al-Ti-B, Al-B กับ Al-Sr พบว่ามีประสิทธิภาพในการปรับปรุงเกรนละเอียดและการปรับปรุงสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอน (Lee, Dahle, StJohn, & Hutt, 1999; Lu & Dahle, 2006; Mallapur, Udupa, & Kori, 2011; Liao & Sun, 2003) และทำให้สมบัติเชิงกลชิ้นงานหล่อสูงขึ้น (Lee et al., 1999; Lu & Dahle, 2006) นอกจากนี้ยังพบว่าเกิดการฟอร์มตัวของสารประกอบ SrB_6 ในโครงสร้างจุลภาค (Lu & Dahle, 2006; Liao & Sun, 2003) มีการพัฒนาโลหะแม่ขึ้นมาใหม่และทดลองในโลหะผสม A356 (Mahmoudi, Taghiabadi, & Emamy, 2005) โดยเติม Al-4%Sr+2%B ปริมาณ 0.5 wt.% เกลงโมลเหล็กที่อัตรา

การเย็นตัว 12°C/s พบว่ามีประสิทธิภาพที่ดีในการปรับเกรนละเอียด ในขณะที่เฟสยูเทคติกซิลิคอนมีการปรับสภาพแบบ Over modify เนื่องจากสัดส่วนของธาตุสตรอนเทียมสูงและอัตราการเย็นตัวที่เร็วเกินไป

จากที่กล่าวมาทั้งหมดจะพบว่าการปรับสภาพเกรนละเอียดและเฟสยูเทคติกซิลิคอนนั้น ส่งผลต่อคุณภาพและสมบัติเชิงกลของชิ้นงานหล่อ ซึ่งด้วยข้อจำกัดต่าง ๆ ที่ทำให้ประสิทธิภาพในการปรับสภาพเกรนละเอียดลดลง เช่น ปริมาณการเติมโลหะแม่ที่ไม่เหมาะสม ปริมาณธาตุซิลิคอนที่สูงของโลหะผสมอลูมิเนียม และการเสื่อมสภาพเมื่อเวลาคั่งน้ำโลหะเพิ่มขึ้น เป็นต้น ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาอันยังไม่พบว่ามีประสิทธิภาพการปรับสภาพเกรนละเอียดและการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอนในโลหะผสมอลูมิเนียม-ซิลิคอน-แมกนีเซียมเกรด A356 พัฒนาโลหะแม่ชนิด Al-4%B-2%Sr ปริมาณการเติมแตกต่างกัน 1-4 wt.% เวลาในการคั่งน้ำโลหะ 10, 30, 60 และ 120 นาที ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการปรับสภาพเกรนละเอียดและการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอนในโลหะผสมอลูมิเนียม-ซิลิคอน-แมกนีเซียม

วิธีการดำเนินการวิจัย

1. การพัฒนาโลหะแม่ชนิด Al-4%B-2%Sr

การพัฒนาโลหะแม่ เริ่มต้นจากการหลอมอลูมิเนียมบริสุทธิ์ ใช้อุณหภูมิในการหลอม 750 องศา

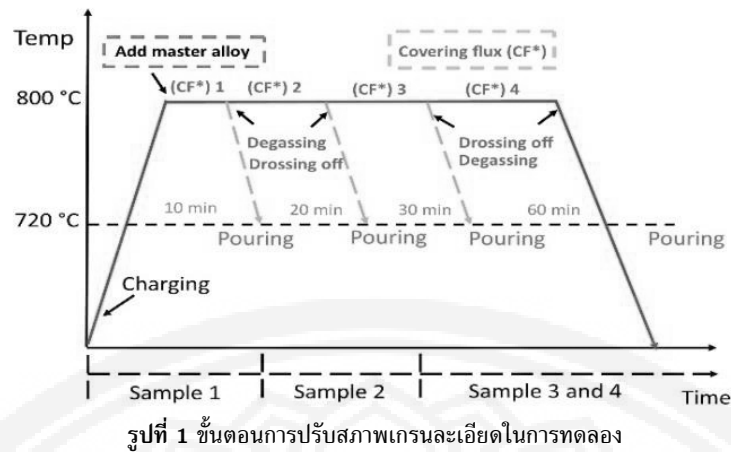
เซลเซียส เมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที เติมน้ำเกลือ KBF_4 ในสัดส่วนที่กำหนด เติมน้ำเกลือที่เตรียมไว้ หลังจากได้โลหะผสม Al-4%B แล้ว นำไปหลอมซ้ำอีกครั้ง แล้วเติมธาตุสตรอนเทียม ได้จากโลหะผสม Al-10%Sr ลงไปเพื่อให้ได้โลหะแม่ตามที่กำหนด

2. การทดสอบการปรับสภาพเกรนละเอียดและปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอน

โลหะผสมอลูมิเนียม (A356) ที่ใช้มีองค์ประกอบทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 1 หลอมโลหะผสมอลูมิเนียมซิลิคอนปริมาณการหลอมต่อครั้งเท่ากับ 1 กิโลกรัม ภายใต้งานวิจัยนี้มีการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้ง กลุ่มชิ้นงานทดสอบเท่ากับ 51 ชิ้น ในเตาไฟฟ้าชนิดลดดันทาน ใช้เบ้าหล่อซิลิคอนคาร์ไบด์ อุณหภูมิในการหลอมเท่ากับ 800 องศาเซลเซียส เมื่อโลหะเริ่มหลอมเหลว เติมน้ำเกลือแม่ลงไปในปริมาณ 1, 2, 3 และ 4 wt.% จากนั้นเติมฟลักซ์ปกคลุมผิวหน้า 0.5 wt.% ใช้เวลา 10, 30, 60 และ 120 นาที ตามลำดับ ตักตรวจสอบและใส่แก๊ส 5 นาที ก่อนที่จะเทโลหะหลอมเหลวลงในแบบหล่อสแตนเลสที่เตรียมไว้ ที่อุณหภูมิ 720 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 1 หลังจากนั้นชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างมหภาค บริเวณด้านล่างของแบบหล่อวัดจากขอบโมลด้านล่าง 5 มิลลิเมตร เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบจากผนังโมลสแตนเลส กัดผิวหน้าโดยใช้สารละลาย Poulton's reagent ที่มีส่วนผสมทางเคมี HNO_3 , HCl , HF และน้ำกลั่น จากนั้นวัดขนาดเกรนเฉลี่ยโดยวิธี Linear intercept E112 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีที่ใช้ในการทดลอง (wt.%)

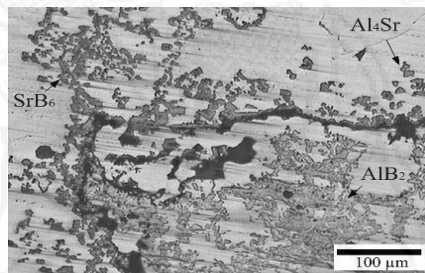
Alloys	Si	Fe	Mg	Cu	Zn
A356	6.95	0.14	0.34	0.04	0.01



ผลการทดลองและวิจารณ์

1. โครงสร้างจุลภาคโลหะแม่ Al-4%B-2%Sr

โครงสร้างจุลภาคพบว่าประกอบด้วยสารประกอบ AlB_2 มีลักษณะเป็นก้อนขนาดใหญ่ สารประกอบ SrB_6 มีลักษณะเป็นสีเหลี่ยมขนาดเล็กๆ และสารประกอบ Al_4Sr บนพื้นอลูมิเนียม ดังแสดงในรูปที่ 2

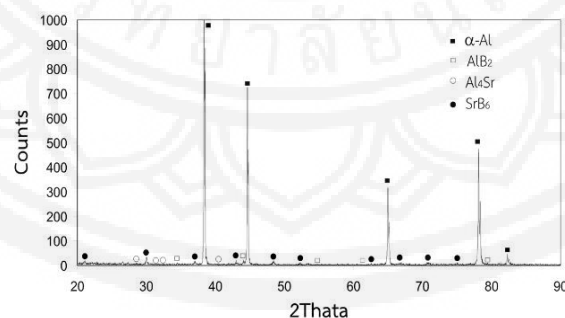


รูปที่ 2 โครงสร้างจุลภาคโลหะแม่ Al-4%B-2%Sr

2. การวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค XRD

การวิเคราะห์สารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในโลหะ

แม่ชนิด Al-4%B-2%Sr ประกอบด้วยธาตุอลูมิเนียม สารประกอบ AlB_2 , Al_4Sr และ SrB_6 ดังแสดงในรูปที่ 3

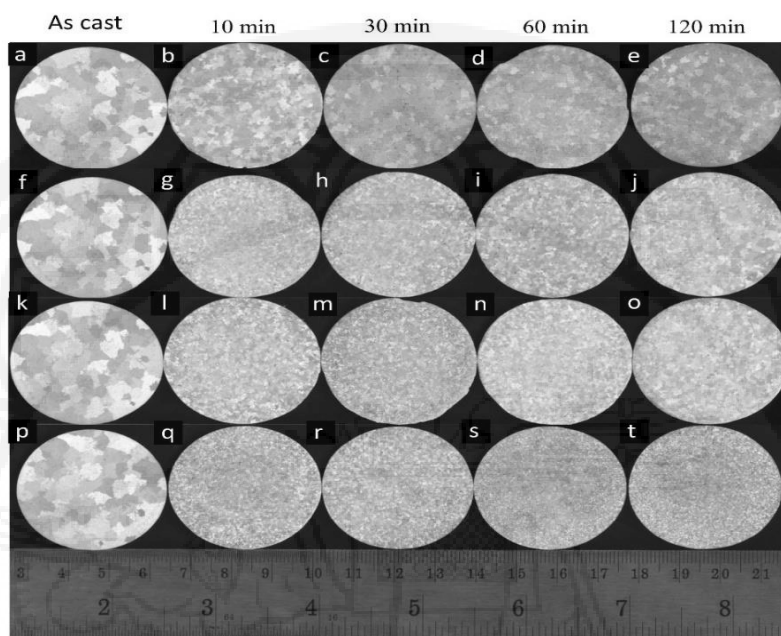


รูปที่ 3 ผลวิเคราะห์ XRD ของโลหะแม่ Al-4%B-2%Sr

3. การปรับสภาพเกรนละเอียด

รูปที่ 4 (a, f, k, และ p) แสดงโครงสร้างมหภาคโลหะผสมที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพเกรนละเอียด พบว่าเกรนมีลักษณะที่ใหญ่ เมื่อเติมโลหะแม่ชนิด Al-4%B-2%Sr ปริมาณ 1 wt.% ทำให้เกรนมีขนาดเล็กลงเล็กน้อย

ดังแสดงในรูปที่ 4 (b-e) เมื่อปริมาณการเติมโลหะแม่เพิ่มขึ้นที่ 2 wt.% ส่งผลให้เกรนละเอียดมากขึ้น แสดงในรูปที่ 4 (g-j) ปริมาณการเติม 3-4 wt.% เกรนมีขนาดเล็กลงอย่างมาก ดังแสดงในรูปที่ 4 (l-o) เติมโลหะแม่ 3 wt.% และ(q-t) เติมโลหะแม่ 4 wt.%

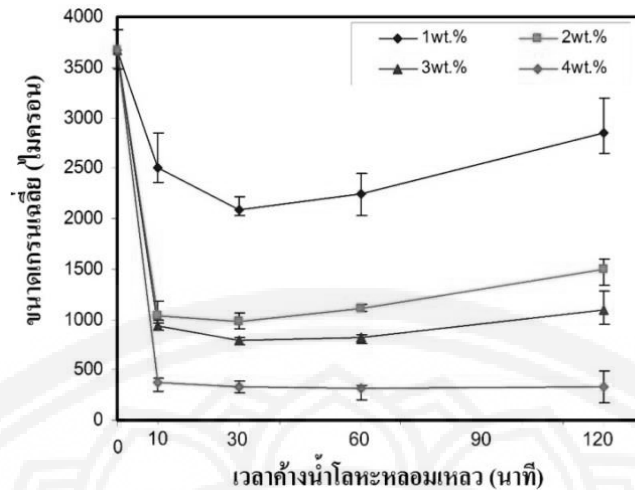


รูปที่ 4 โครงสร้างมหภาคก่อนและหลังปรับสภาพเกรนละเอียด (a, f, k และ p) ก่อนปรับสภาพเกรนละเอียด (b-e) เติมโลหะแม่ 1 wt.% (g-j) เติมโลหะแม่ 2 wt.% (l-o) เติมโลหะแม่ 3 wt.% (q-t) เติมโลหะแม่ 4 wt.%

4. ขนาดเกรนเฉลี่ย

จากการวัดขนาดเกรนเฉลี่ยของโลหะผสมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเกรนละเอียดพบว่าเกรนมีขนาดเกรนเท่ากับ 3665 ไมครอน ผลจากการเติมโลหะแม่ Al-4%B-2%Sr เวลาคั่งน้ำโลหะ 10, 30, 60 และ 120 นาที ในปริมาณ 1 wt.% ส่งผลให้ขนาดเกรนมีขนาดเล็กลงเล็กน้อยเท่ากับ 2510, 2092, 2240 และ 2854 ไมครอน ปริมาณการเติม 2 wt.% เกรนมีขนาดเท่ากับ 1035, 983, 1103 และ 1495 ไมครอน เมื่อปริมาณการเติมโลหะแม่เพิ่มขึ้น 3 wt.% เกรนมีขนาดเท่ากับ 942, 791, 817 และ 1090

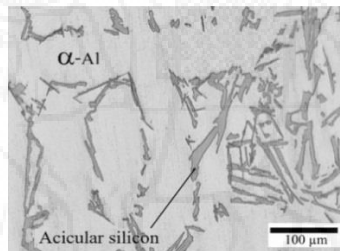
ไมครอน ปริมาณการเติม 4 wt.% ขนาดเกรนลดลงอย่างมีนัยสำคัญเท่ากับ 370, 324, 318, และ 324 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 5 ขนาดเกรนเฉลี่ยที่ระดับการเติมแตกต่างกัน จากขนาดเกรนที่เล็กลงนั้น โดยการเติมธาตุผสมโบรอนลงไปในน้ำโลหะหลอมเหลว จะส่งผลดีต่อคุณภาพชิ้นงานหล่อ เช่น ปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้น ค่าความแข็งและค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ลดการแตกร้าวร้อนในขณะแข็งตัว ปรับปรุงการเติมเต็มน้ำโลหะให้ดีขึ้น และมีการกระจายตัวของรูพรุนในชิ้นงานหล่อสม่ำเสมอ (Gruzleski & Closset, 1990) เป็นต้น



รูปที่ 5 ขนาดเกรนเฉลี่ยที่ระดับการเติมแตกต่างกัน

5. การปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอน
โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอน แสดงในรูปที่ 6 พบว่า

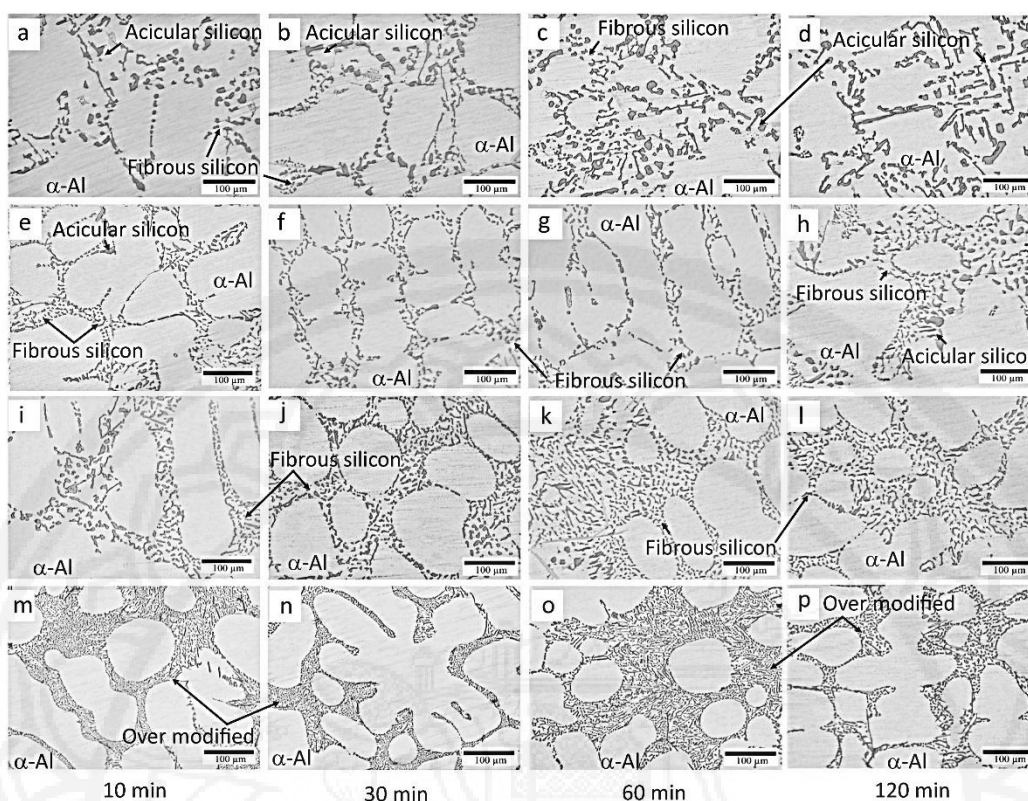
ประกอบด้วยเฟสซิลิคอนมีลักษณะเป็นแท่งขนาดใหญ่ มีรูปทรงไม่แน่นอน ความยาว 50-150 ไมครอน



รูปที่ 6 แสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอลูมิเนียมที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอน

รูปที่ 7 (a-d) แสดงโครงสร้างจุลภาคผ่านการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอนโดยการเติมโลหะแม่ AL-4%B-2%Sr ปริมาณ 1 wt.% พบว่าเฟสยูเทคติกซิลิคอนมีลักษณะกลมมนและรูปทรงไม่แน่นอน เมื่อปริมาณการเติมโลหะแม่เพิ่มขึ้น 2 wt.% พบว่าเฟสยูเทคติกซิลิคอนมีลักษณะกลมมนและรูปทรงไม่แน่นอน ดังแสดงในรูปที่ 7 (e) เมื่อเวลาในการปรับสภาพเพิ่มมากขึ้นเท่ากับ 30 และ 60 นาที เฟสยูเทคติกซิลิคอนมีลักษณะกลมมนทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 7 (f และ g) อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาในการปรับสภาพนานขึ้นเท่ากับ 120 นาที เฟสซิลิคอนจะมีรูปทรงไม่แน่นอนบ้างเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 7 (h) ปริมาณการเติม 3 wt.% ส่งผลต่อเฟสซิลิคอนมีรูปร่างกลมมนทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 7 (i-l) โครงสร้างจุลภาคในรูปที่ 7 (m-p) จะมีลักษณะเป็น Over modified จากปริมาณการ

เติมโลหะแม่ 4 wt.% ลักษณะรูปร่างของเฟสยูเทคติกซิลิคอนที่เปลี่ยนไป ส่งผลต่อสมบัติทางกลของชิ้นงานหล่อที่ดี (Soo, 2012) และส่งผลต่อการไหลของน้ำอลูมิเนียมหล่อเหลวที่ดี (Campbell, 2003) จากผลการทดลองที่เกิดขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนต่างๆ ที่มีอัตราการแข็งตัวช้าหรือแบบหล่อทรายขึ้น เพื่อเพิ่มคุณภาพของชิ้นงานหล่อให้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามผลการทดลองที่เกิดขึ้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดโลหะผสมในกลุ่ม Al-Si-Mg (A356) เท่านั้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเป็นที่น่าสนใจ เมื่อนำโลหะแม่ที่พัฒนาขึ้นมาไปทดลองปรับสภาพเกรนละเอียดและปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอนในโลหะผสม กลุ่มอื่น ๆ เช่น Al-Si-Cu (A319) เป็นต้น



รูปที่ 7 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอลูมิเนียมหลังปรับปรุงสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอน

วิเคราะห์การทดลอง

การควบคุมขนาดเกรน α -Al ให้มีขนาดเล็กระหว่างการแข็งตัวนั้น สามารถควบคุมได้ 2 ลักษณะ ประกอบด้วย อัตราการแข็งตัวที่เร็ว ในกรณีใช้โมลลิทลิกซ์ชนิดถาวร และ อัตราการแข็งตัวที่ช้ากรณีแข็งตัวในแบบหล่อทรายขึ้น จะนิยมปรับปรุงเกรนโดยเติมธาตุผสมชนิดต่างๆ เช่น ธาตุโบรอน ลงไปในน้ำโลหะหลอมเหลว ธาตุผสมจะทำให้หน้าที่เป็นตัวกำเนิดนิวเคลียสเทียม (heterogeneous nucleation) ในการควบคุมปริมาณนิวเคลียสเทียมที่เกิดขึ้น ให้มีขนาดที่เล็กลงและมีจำนวนมาก จำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิน้ำโลหะเย็นตัวต่ำกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสเป็นของแข็งในสภาวะสมดุล (undercooling) ในการเติมโบรอนสำหรับปรับปรุงเกรนในระดับการเติม 3-4 wt.% นั้นพบว่าขนาดเกรนมีขนาดเล็กและละเอียดมาก ซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิน้ำโลหะเย็นตัวต่ำกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสเป็นของแข็งในสภาวะสมดุลมีค่าน้อย ทำให้ปริมาณนิวเคลียสเทียมเพิ่มมากขึ้น เป็นไปตามทฤษฎีการแข็งตัว (Solidification) ของโลหะผสม

การค้ำน้ำโลหะที่เวลาแตกต่างกัน แสดงในรูปที่ 5 เมื่อเวลาในการปรับปรุงเพิ่มมากขึ้น 30-120 นาที ส่งผลต่อขนาดเกรนมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเสื่อมสภาพของโลหะแม่ที่เติมลงไป ในขณะที่เฟสยูเทคติกซิลิคอน เมื่อเวลาในการค้ำน้ำโลหะเพิ่มขึ้น จะเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากรูปทรงกลมมน กลายเป็นรูปทรงไม่แน่นอนบ้างเล็กน้อย ที่ปริมาณการเติม 1-2 wt.% อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณการเติมเพิ่มขึ้นเท่ากับ 3-4 wt.% นั้น ไม่ส่งผลต่อรูปร่างของเฟสยูเทคติกซิลิคอน

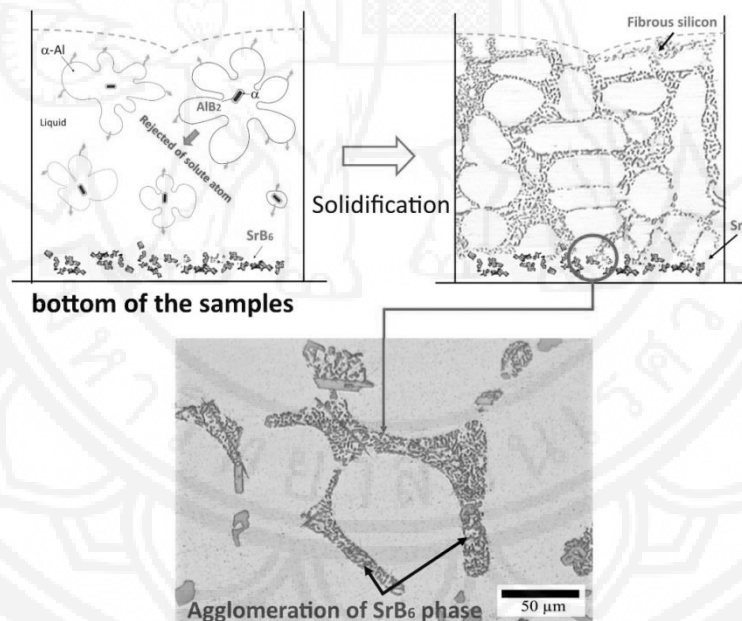
กลไกการปรับปรุงเกรนละเอียดและปรับปรุงสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอน แสดงในรูปที่ 8 เมื่อโลหะหลอมเหลวผ่านการเติมโลหะแม่ชนิด $\text{Al}-4\%\text{B}-2\%\text{Sr}$ จะเกิดการฟอร์มตัวของสารประกอบ AlB_2 และ SrB_6 ขึ้นที่อุณหภูมิสูง สารประกอบ AlB_2 จะทำหน้าที่กำเนิดนิวเคลียสเทียม เมื่อโลหะเกิดการแข็งตัวที่อุณหภูมิ 659.7 องศาเซลเซียส จะมีการฟอร์มตัวของชั้น α ขึ้นเป็นชั้นบางๆ และจะเกิดการฟอร์มตัวของเฟส α -Al เป็นต้นแดนไรท์อลูมิเนียม (Yuan, Chao, & Li, 2011) เมื่อเกิดการฟอร์มตัวของเดนไดรท์อลูมิเนียม ธาตุผสมต่างๆ เช่น ซิลิคอน,



แมกนีเซียม และสโตนเทียมจะถูกผลักเข้าสู่โลหะหลอมเหลว จากนั้นสโตนเทียมจะจับกับออกซิเจนที่มีอยู่ในน้ำโลหะ และทำหน้าที่ขัดขวางการฟอร์มตัวของเฟสซิลิคอน ส่งผลให้ซิลิคอนมีการเติบโตหลายทิศทาง ส่งผลให้มีรูปร่างที่กลมมน จากผลการทดลองในงานวิจัยนี้พบว่าการเติมโลหะแม่ในปริมาณ 1 wt.% นั้น ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการปรับสภาพเกรนที่ต่ำ เนื่องจากปริมาณเฟส AlB_2 ในโลหะแม่นั้นมีน้อยเกินไป เพราะการฟอร์มตัวของสารประกอบ SrB_6 ในโครงสร้างจุลภาค สารประกอบ SrB_6 จะมีอัตราส่วนระหว่าง Sr : B เท่ากับ 1 : 0.89 เมื่อพิจารณาโลหะแม่ Al-4%B-2%Sr พบว่าปริมาณธาตุโบรอนมีหลงเหลือเท่ากับ 1.11 (excess boron) พอที่ฟอร์มตัวเฟส AlB_2 ได้ จึงส่งผลให้โลหะแม่มีประสิทธิภาพในการปรับสภาพที่ดี ในกรณีที่เติมในปริมาณที่สูงขึ้นเท่ากับ 2, 3 และ 4 wt.% สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Mahmoudi et al. (2005) นอกจากนี้ยังพบว่าบริเวณด้านล่างของชิ้นงานหล่อ ที่ปริมาณการเติม 4 wt.% นั้น จะ

มีการตกตะกอนของสารประกอบ SrB_6 ในโครงสร้างจุลภาคสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา Li, Zhang, Wang, Yang, & Ma, (2002); Lu and Dahle (2006); Liao and Sun (2003); Muangnoy, Luijan, & Klaynil (2015); Muangnoy & Luijan (2016) ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการปรับสภาพเกรนละเอียดที่ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 8

การปรับสภาพเกรนละเอียดและปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอนไปพร้อม ๆ กัน เมื่อเติมโลหะแม่เพียงชนิดเดียวลงไป ทำให้ง่ายและสะดวกสำหรับการควบคุมปริมาณการเติมที่เหมาะสม แต่อย่างไรก็ตามที่ปริมาณการเติม 3-4 wt.% นั้น เป็นปริมาณการเติมค่อนข้างสูง การลดปริมาณการเติมโลหะแม่และยังส่งผลต่อการปรับสภาพเกรนละเอียดและปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอนที่ดีนั้นสามารถทำได้โดยการควบคุมการฟอร์มตัวของเฟส SrB_6 ให้น้อยลง และปริมาณเฟส AlB_2 ที่สูงขึ้น จะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของโลหะแม่นิดนี้ให้สูงขึ้น



รูปที่ 8 กลไกการปรับสภาพเกรนละเอียดและปรับสภาพเฟสซิลิคอน

สรุปผลการทดลอง

1. โลหะแม่ Al-4%B-2%Sr สามารถปรับสภาพเกรนละเอียดและปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอนได้
2. ปริมาณการเติม 1 wt.% ส่งผลต่อขนาดเกรนเฉลี่ยเล็กน้อยเท่านั้น ในขณะที่เฟสยูเทคติกซิลิคอน

สามารถปรับสภาพกลายเป็นรูปทรงกลมมนแค่บางส่วนเท่านั้น

3. ปริมาณการเติม 2, 3 และ 4 wt.% ส่งผลต่อขนาดเกรนเฉลี่ยลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และเฟสยูเทคติกซิลิคอนสามารถปรับสภาพได้สมบูรณ์จากรูปร่างไม่แน่นอน กลายเป็นรูปทรงกลมมน ที่ปริมาณการเติม 3 wt.%



ในขณะที่ปริมาณการเติม 4 wt.% นั้น เฟสยูเทคติกซิลิคอนมีลักษณะละเอียดมาก เรียกว่า Over modified

4. กลไกในการปรับสภาพเกรนละเอียดขึ้นอยู่กับปริมาณเฟส AlB_2 และบริเวณด้านล่างของชิ้นงานหล่อจะเกิดการฟอร์มตัวและตกตะกอนของสารประกอบ SrB_6

5. สามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนต่างๆ ที่มีอัตราการแข็งตัวช้าหรือแบบหล่อทรายขึ้น เพื่อเพิ่มคุณภาพของชิ้นงานหล่อ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้ผู้ทำการวิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่สนับสนุนงบประมาณสำหรับงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

Apelian, D. & Chen, J. (1986). Al-Si Processing variables: effect on grain refinement and eutectic modification. *Transactions of the American Fisheries Society*, 94, 797-808.

Campbell, J. (2003). *Castings*. Burlington, MA: Butterworth-Heinemann.

Eidhed, W. (2008). Effects of solution treatment time and Sr-modification on microstructure and mechanical property of Al-Si piston alloy. *Journal of Materials Science and Technology*, 24(1), 29-32.

Feng, P., Tang, J., Jin, X., Li, S., & Zeng, D. (2006). Influences of Preparation Condition and Melt Treatment Procedures on Melt Treatment Performance of Al-5Ti-B and Al-10Sr Master Alloys. *J. Master. Sci. Techno.*, 22(1), 50-54.

Gruzleski, E. J. & Closset, B. M. (1990). *The Treatment of Liquid Aluminum-Silicon Alloy*. USA: American Foundrymens Society.

John, E. & Bernard, G. (1990). *The Treatment of Liquid Aluminum-Silicon Alloys*. USA: Amer Foundrymens Society.

Lee, Y. C., Dahle, A. K., StJohn, D. H., & Hutt, J. E. C. (1999). The Effect of Grain Refinement and Silicon Content on Grain Formation in Hypoeutectic Al-Si Alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 259(1), 43-52.

Liao, H., & Sun, G. (2003). Mutual poisoning effect between Sr and B in Al-Si casting alloys. *Scripta Materialia*, 48(8), 1035-1039.

Limmaneevichitr, C., & Eidhed, W. (2003). Fading mechanism of grain refinement of aluminum-silicon alloy with Al-Ti-B grain refiners. *Materials Science and Engineering: A*, 349(1), 197-206.

Li, J. G., Zhang, B. Q., Wang, L., Yang, W. Y., & Ma, H. T. (2002). Combined effect and its mechanism of Al-3wt.% Ti-4wt.% B and Al-10wt.% Sr master alloy on microstructures of Al-Si-Cu alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 328(1), 169-176.

Lu, L., & Dahle, A. K. (2006). Effects of combined additions of Sr and AlTiB grain refiners in hypoeutectic Al-Si foundry alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 435, 288-296.

Mahmoudi, M., Taghiabadi, R., & Emamy, M. (2005). Simultaneous Grain Refining and Modification of 356 Aluminium Alloy Using Aluminium Base Master Alloys Containing Strontium, Titanium and Boron. *Light Metals 2005: Proceedings of the Technical Sessions at the TMS Aluminum Committee at the 134th TMS Annual Meeting, San Francisco, California, 13-17 February 2005* (pp.



- 1129–1133). The Minerals, Metals & Materials Societ. San Francisco: California.
- Mallapur, D. G., Udupa, K. R., & Kori, S. A. (2011). Studies on the influence of grain refining and modification on microstructure and mechanical properties of forged A356 alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 528(13), 4747–4752.
- Muangnoy, P. & Luijan, J. (2016). The Effect of Boron and Sequence on Refining Efficiency and Eutectic Silicon Modification in Al–Si–Mg Cast Alloy. *The Journal of MKUTNB*, 26(3), 415–425.
- Muangnoy, P., Luijan, J., & Klaynil, C. (2015). The Development of Al–4%B–2%Sr Master Alloy for Refining and Eutectic Silicon Modification in Al–Si–Mg Cast Alloys. *Ladkrabang Engineering Journal*, 32(4), 73–78.
- Soo, S. (2012). Modification Effect of Sr on The Microstructures and Mechanical Properties of Al–10.5Si–2.0Cu Recycled Alloy for Die Casting. *Materials Science and Engineering A*, 532, 151–157.
- Shin, S. S., Kim, E. S., Yeom, G. Y., Yeom, J. C., & Lee, J. C. (2012). Modification effect of Sr on the microstructures and mechanical properties of Al–10.5Si–2.0Cu recycled alloy for die casting. *Materials Science and Engineering A*, 532, 151–157.
- Shin, S. S., Kim, E. S., Yeom, G. Y., & Lee, J. C. (2012). Modification effect of Sr on the microstructures and mechanical properties of Al–10.5 Si–2.0 Cu recycled alloy for die casting. *Materials Science and Engineering: A*, 532, 151–157.
- Yang, C. Y., Lee, S. L., Lee, C. K., & Lin, J. C. (2006). Effects of Sr and Sb modifiers on the sliding wear behavior of A357 alloy under varying pressure and speed conditions. *Wear*, 261(11), 1348–1358.
- Yuan, L. I. U., Chao, D. I. N. G., & Li, Y. X. (2011). Grain refining mechanism of Al–3B master alloy on hypoeutectic Al–Si alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 21(7), 1435–1440.