



ผลกระทบบของธาตุโบรอนและลำดับชั้นต่อประสิทธิภาพการปรับสภาพแกรนละเอียดและเฟสยูเทคติกซิลิคอนในโลหะผสมหล่ออะลูมิเนียม-ซิลิคอน-แมกนีเซียม

พิสิทธ์ เมืองน้อย* และ จินกมล ลุยจันทร์

อาจารย์ สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการผลิต คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 09-7010-3032 อีเมล: Phisith.mua@rmutr.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2015.12.001

รับเมื่อ 18 มิถุนายน 2558 ตอรับเมื่อ 8 ธันวาคม 2558 เผยแพร่ออนไลน์ 14 กันยายน 2559

© 2016 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของโบรอน (0.04, 0.08 และ 0.12 wt.%) และลำดับชั้นที่แตกต่างกันต่อประสิทธิภาพในการปรับสภาพแกรนละเอียดและเฟสยูเทคติกซิลิคอนในโลหะผสมหล่ออะลูมิเนียม-ซิลิคอน-แมกนีเซียม โลหะแม่ Al-4%B, Al-4%B-2%Sr และ Al-10%Sr ใช้สำหรับการสภาพแกรนละเอียดและเฟสยูเทคติกซิลิคอนในแต่ละสภาวะการหล่อ วิเคราะห์ขนาดเกรนเฉลี่ยโดยใช้วิธีลากเส้นตัดผ่าน ผลการทดลองพบว่าขนาดเกรนจะมีขนาดเล็กลง เมื่อปริมาณโบรอนสูงขึ้น ในขณะที่เฟสยูเทคติกซิลิคอนปรับสภาพจากรูปร่างไม่แน่นอนกลายเป็นรูปร่างกลมมนแต่บางส่วนโลหะผสมที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพแกรนละเอียดมีขนาดเกรน α -Al เฉลี่ยเท่ากับ 3377 ไมครอน และลดลงเท่ากับ 1159, 439 และ 428 ไมครอน เมื่อเติมโบรอน 0.04, 0.08 และ 0.12 wt.% ตามลำดับ การเติมโลหะแม่ชนิด Al-4%B-2%Sr ปริมาณ 2 wt.% มีประสิทธิภาพในการปรับสภาพแกรนที่น้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณการเติมโบรอน 0.08 wt.% ผสมกับธาตุสตรอนเทียม 0.02 wt.% ในขณะที่เฟสยูเทคติกซิลิคอนปรับสภาพเป็นรูปร่างกลมมน การศึกษาลำดับชั้นที่แตกต่างกันพบว่าเมื่ออิทธิพลต่อขนาดเกรน α -Al อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเติมแบบผสม

คำสำคัญ: โลหะผสม Al-Si-Mg การปรับสภาพ การปรับสภาพแกรนละเอียด งานหล่อ

การอ้างอิงบทความ: พิสิต์ เมืองน้อย และ จินกมล ลุยจันทร์, "ผลกระทบบของธาตุโบรอนและลำดับชั้นต่อประสิทธิภาพการปรับสภาพแกรนละเอียดและเฟสยูเทคติกซิลิคอนในโลหะผสมหล่ออะลูมิเนียม-ซิลิคอน-แมกนีเซียม," วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 26, ฉบับที่ 3, หน้า 415-425, ก.ย.-ธ.ค. 2559



The Effect of Boron and Sequence on Refining Efficiency and Eutectic Silicon Modification in Al-Si-Mg Cast Alloy

Phisith Muangnoy* and Jinkamon Luijan

Lecturer, Department of Production Engineering Technology, Faculty of Industry and Technology, Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Wangkraikangwon Campus, Prachuap Khiri Khan, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 09-7010-3032, E-mail: Phisith.mua@rmutr.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2015.12.001

Received 18 June 2015; Accepted 8 December 2015; Published online: 14 September 2016

© 2016 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

The objective of this research was to study the influence of boron content (0.04, 0.08 and 0.12 wt.%B) and different sequences on refining efficiency and eutectic modification in Al-Si-Mg Cast Alloy. The Al-4%B, Al-4%B-2%Sr and Al-10%Sr master alloys were used for grain refiner and modifier of each casting condition. Grain size analysis was measured using the linear intercept method. The experimental results showed that the Grain size decreased with increasing B content, while eutectic silicon partially modified the acicular silicon into fibrous morphology. The Grain size of α -Al in the as-cast alloy is 3377 and decreases to 1159, 439 and 428 micron in 0.04, 0.08 and 0.12 wt.% B added, respectively. The addition in terms of 2 wt.% of Al-4B-2Sr revealed less refining efficiency than 0.08 wt.%B + 0.04Sr added, while the eutectic Si was fully modified into the fibrous morphology. The different sequence of addition showed significant influence on the grain size of α -Al when compared to their combined addition.

Keywords: Al-Si-Mg Alloys, Modification, Grain Refinement, Casting

1. บทนำ

การปรับปรุงสภาพเกรนละเอียดมีความสำคัญในงานหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียม เนื่องจากสามารถลดการแตกร้าวร้อนในขณะที่แข็งตัว มีความสามารถในการเติมเติมน้ำโลหะได้ดี ส่งผลให้การหดตัวของชิ้นงานลดน้อยลง ทำให้รูพรุนมีขนาดเล็กและมีการกระจายตัวที่ดี การกระจายตัวของเฟสสารประกอบเชิงโลหะสม่ำเสมอ ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงและอัตราการยืดตัวของชิ้นงานหล่อสูงขึ้น [1] ในการปรับปรุงสภาพเกรนให้ละเอียด ปัจจุบันนิยมเติมโลหะผสมชนิด Al-Ti, Al-Ti-B, Al-B, Al-Sc และ Al-Ti-C [2]-[22] เมื่อเติมโลหะผสมลงในน้ำโลหะหลอมเหลวและเย็นตัว จะเกิดการฟอร์มตัวของอนุภาค $TiAl_3$, TiB_2 , AlB_2 , Al_3Sc และ TiC ที่อุณหภูมิสูง และทำหน้าที่เป็นจุดเริ่มต้นในการเกิดนิวเคลียสจากเนื้อที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ขนาดเกรนของเฟสอะลูมิเนียมมีขนาดเล็กลง

การปรับปรุงสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอนเป็นการปรับปรุงคุณภาพของงานหล่อที่มีความสำคัญมากสำหรับโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ประกอบด้วยปรับปรุงความสามารถในการตัดปาดผิว ลดเวลาในกระบวนการอบชุบให้เป็นเนื้อเดียวกัน และเพิ่มสมบัติทางกลของชิ้นงานหล่อให้สูงขึ้น [23]-[24] เป็นที่ทราบกันดีว่าเฟสยูเทคติกซิลิคอนจะฟอร์มตัวและเติบโต ในระนาบ <112> และมีการเปลี่ยนรูปในระนาบ (111) ส่งผลให้เฟสยูเทคติกซิลิคอนมีรูปร่างไม่แน่นอน และละลายแหลม กรรมวิธีที่นิยมใช้สำหรับการปรับปรุงสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอน ในปัจจุบันจะเติมอะตอมแปลกปลอมหลายชนิด เช่น สตรอนเทียม โซเดียม และพลวง [23]-[26] โดยเฉพาะการเติมสตรอนเทียม ในปริมาณ 0.02 wt.% เมื่อเติมโลหะผสมชนิดนี้ลงไป ในโลหะหลอมเหลวและปล่อยให้แข็งตัว ธาตุสตรอนเทียมจะขัดขวางการเติบโตของผลึกซิลิคอน และทำให้เกิดการเติบโตได้ในหลายทิศทาง ส่งผลต่อเฟสยูเทคติกซิลิคอนมีขนาดเล็กลงและมีรูปร่างกลมมนมากขึ้น ซึ่งปริมาณการเติมนั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องควบคุมให้เหมาะสม ในกรณีที่เติมในปริมาณที่สูงจะเกิดการฟอร์มตัวของสารประกอบเชิงโลหะ Al_4SrSi_2 ที่มีลักษณะเป็นก้อนกลม บริเวณ

เฟสยูเทคติกซิลิคอน ส่งผลให้ชิ้นงานหล่อเปราะ [1]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการการศึกษา [2] ประสิทธิภาพในการปรับปรุงสภาพเกรนอะลูมิเนียม โดยใช้โลหะแม่ 3 ชนิด ประกอบด้วยโลหะแม่ชนิด Al-5%Ti, Al-5%Ti-1%B และ Al-4%B ในโลหะผสมอะลูมิเนียม A356 พบว่าโลหะแม่ชนิด Al-4%B มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงสภาพเกรนมากกว่าทุกๆ ระดับการเติมโลหะแม่ LIU Yuan และคณะ [3] ได้ศึกษาการปรับปรุงสภาพเกรนละเอียดโดยใช้โลหะแม่ Al-3%B การปรับปรุงสภาพในโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน จากการทดลองดังกล่าว พบว่าโครงสร้างจุลภาคของโลหะแม่ประกอบด้วยเฟส AlB_2 มีลักษณะเป็นแท่งขนาดใหญ่และเฟส AlB_{12} มีลักษณะกลมๆขนาดเล็ก กระจายตัวเป็นกลุ่มๆ บนพื้นของเฟสอะลูมิเนียม เมื่อเติมลงไปปริมาณ 0.03-0.06 wt.% พบว่ามีประสิทธิภาพในการปรับปรุงสภาพที่ดี Zongning Chen และคณะ [4] ได้ศึกษาประสิทธิภาพการปรับปรุงสภาพเกรนละเอียดและการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของโลหะผสมอะลูมิเนียมหล่อ โดยการเติมโลหะผสมชนิด Al-3%B เติมในโลหะผสม Al-Si, Al-Cu, Al-Zn และ Al-Mg เมื่อวัดขนาดเกรนพบว่าโลหะแม่ชนิด Al-3%B มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงสภาพโลหะผสมชนิด Al-Si ดีที่สุด ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงขึ้น มีการทดลองเติมโลหะแม่ชนิด AlB_3 [5] เพื่อปรับปรุงสภาพเกรนละเอียดในโลหะผสม Al-Si-Mg และ Al-Si-Cu พบว่าการเติมโลหะแม่ชนิด Al-3%B ทำให้เกรนมีขนาดเล็กลงเมื่อเติมลงไปโลหะผสมทั้ง 2 ชนิด การศึกษาผลกระทบของการปรับปรุงสภาพเกรนละเอียดและเฟสยูเทคติกซิลิคอน พบว่าจะเกิดการฟอร์มตัวของสารประกอบ SrB_6 ในโครงสร้างจุลภาค [6]-[9] นอกจากนี้ยังมีการศึกษาผลกระทบของการเติมธาตุสตรอนเทียมต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของโลหะผสม Al-10.5Si-2.0Cu ที่ผ่านกระบวนการรีไซเคิล สำหรับกระบวนการหล่อโดยใช้แบบหล่อถาวร [23] จากการทดลองดังกล่าวพบว่าปริมาณการเติมธาตุสตรอนเทียมส่งผลต่อรูปร่างของเฟสยูเทคติกซิลิคอน

จากที่กล่าวมาทั้งหมดจะเห็นได้ว่าการปรับปรุงสภาพ

เกรนละเอียดและเฟสยูเทคติกซิลิคอนในงานหล่อนั้น มีผลต่อสมบัติทางกลและคุณภาพของชิ้นงานหล่อ ดังนั้น การศึกษาพฤติกรรมในการปรับสภาพเกรนละเอียดและเฟสยูเทคติกซิลิคอน เพื่อให้ง่ายในการควบคุมปริมาณการเติมของโลหะแม่ จึงมีความจำเป็นต่ออุตสาหกรรมงานหล่อ ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาแล้วยังไม่มีงานวิจัยที่ศึกษาลำดับขั้นในการปรับสภาพเกรนที่แตกต่างกัน โดยใช้โลหะผสม Al-4%B, Al-10%Sr และโลหะแม่ Al-4%B-2%Sr ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของโบรอนและลำดับขั้นต่อประสิทธิภาพการปรับสภาพเกรนละเอียดและเฟสยูเทคติกซิลิคอนในโลหะผสมหล่อ อะลูมิเนียม-ซิลิคอน-แมกนีเซียม

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุ

1. โลหะผสมอะลูมิเนียมหล่อ Al-Si-Mg (A356)
2. โลหะผสม Al-4%B
3. โลหะผสม Al-10%Sr
4. โลหะแม่ชนิด Al-4%B-2%Sr

2.2 อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองการปรับสภาพเกรนละเอียดและการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอนในโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน-แมกนีเซียม ส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีที่ใช้ในการทดลอง (wt.%)

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

โดยเปลี่ยนจากรูปร่างไม่แน่นอนไปเป็นเส้นขนาดเล็กที่ปริมาณการเติม 0.02 wt.% และมีรูปร่างกลมมนที่ปริมาณการเติม 0.03 wt.% การเติมธาตุสตรอนเทียมเพื่อปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอนทำให้ค่าสมบัติเชิงกลสูงขึ้น

ในการทดลองมีการออกแบบระดับการเติมโบรอนแบ่งออกเป็น 3 ระดับประกอบด้วย 0.04, 0.08 และ 0.12 wt.%

ตามลำดับ โดยกำหนดการเติมสตรอนเทียม ที่ระดับการเติมที่ 0.02 wt.% เท่ากันทุกๆ สภาวะการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 2 จากนั้นเลือกสภาวะการทดลองที่ดีที่สุดมาศึกษาลำดับขั้นตอนการปรับสภาพเกรนละเอียดและเฟสยูเทคติกซิลิคอนโดยการออกแบบลำดับขั้นที่แตกต่างกัน 3 ขั้นตอน ประกอบด้วย 1) พัฒนาโลหะแม่ชนิด Al-4%-2%Sr ขึ้นมา จากนั้นเติมลงไปในตัวโลหะหลอมเหลวที่ระดับการเติม 2 wt.% (ปริมาณโบรอนเท่ากับ 0.08 wt.% และสตรอนเทียม 0.02 wt.%) 2) โลหะผสมอะลูมิเนียมจะผ่านกระบวนการปรับสภาพเกรนละเอียด จากนั้นผ่านการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอน ใช้รหัสการทดลอง Gr→Mo 3) โลหะผสมอะลูมิเนียมจะผ่านกระบวนการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอน จากนั้นผ่านกระบวนการปรับสภาพเกรนละเอียด ใช้รหัสการทดลอง Mo→Gr ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 2 การออกแบบการทดลอง (wt.%)

| โลหะผสม | Al-4%B | Al-10%Sr | ลำดับขั้น |
|---------|--------|----------|-----------|
| A356 | 0.04 | 0.02 | ผสม |
| A356 | 0.08 | 0.02 | ผสม |
| A356 | 0.12 | 0.02 | ผสม |

ตารางที่ 3 การออกแบบลำดับขั้นแตกต่างกัน (wt.%)

| Alloys | Al-4%B | Al-10%Sr | ลำดับขั้น |
|--------|-------------|----------|---------------------------------------|
| A356 | 0.08 | 0.02 | ปรับสภาพเกรนละเอียด → ปรับสภาพซิลิคอน |
| A356 | 0.08 | 0.02 | ปรับสภาพซิลิคอน → ปรับสภาพเกรนละเอียด |
| A356 | Al-4%B-2%Sr | | หล่อ |

2.3 การผลิตโลหะผสม Al-4%B และการพัฒนาโลหะแม่ชนิด Al-4%B-2%Sr

โลหะผสม Al-4%B ที่ใช้ในการปรับสภาพเกรนละเอียดในการทดลองนี้ได้จากการหลอมเกลือ โพแทสเซียมฟลูออโรโบเรต (KBF_4) ผสมกับอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ตามสัดส่วนที่กำหนด โดยใช้อุณหภูมิหลอม 750 องศาเซลเซียส

เวลา 5–10 นาที เทลงวางเหล็กที่อุณหภูมิ 720 องศาเซลเซียส ศึกษาโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

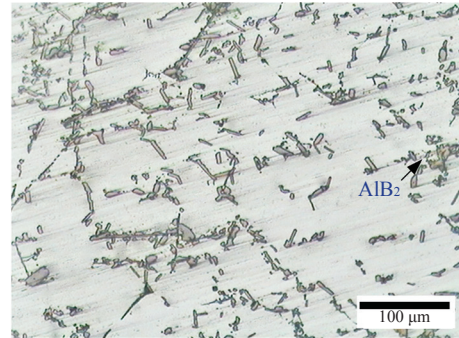
การพัฒนาโลหะแม่ชนิด Al-4%B-2%Sr ภายใต้ งานวิจัยนี้ โดยใช้อะลูมิเนียมบริสุทธิ์หลอมผสมกับโลหะผสม Al-4%B และ Al-10%Sr จากนั้นศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง นอกจากนี้ยังศึกษา สารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนโดยใช้รังสีเอกซ์ (XRD)

2.4 การทดลองประสิทธิภาพการปรับสภาพเกรนละเอียดและเฟสยูเทคติกซิลิคอน

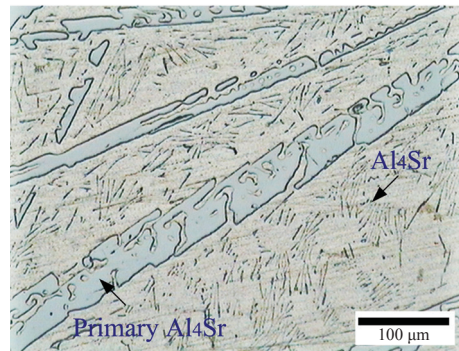
ในกระบวนการหล่อใช้เตาไฟฟ้าแบบขดลวดต้านทาน หลอมในเบ้าหล่อซิลิคอนคาร์ไบด์ โดยอุณหภูมิงานหล่อไปพร้อมๆ กับเบ้าหลอม อุณหภูมิที่ใช้ในการหลอม 800 องศาเซลเซียส เมื่อโลหะหลอมเหลวเติมฟลักซ์ปกคลุมผิวหน้า 0.5 wt.% (โซเดียมคลอไรด์ 45 เปอร์เซ็นต์ โพแทสเซียมคลอไรด์ 45 เปอร์เซ็นต์และโซเดียมฟลูออไรด์ 10 เปอร์เซ็นต์) เพื่อป้องกันไม่ให้แก๊สไฮโดรเจนแพร่เข้าไปในน้ำโลหะหลอมเหลว จากนั้นเติมโลหะผสมในปริมาณที่กำหนด ใช้เวลาในการค้ำน้ำโลหะหลอมเหลว 30 นาที กำจัดแก๊สไฮโดรเจน โดยการพ่นแก๊สอาร์กอนเป็นเวลา 2 นาที เเทโลหะหลอมเหลวในโมลสเดนเลสผืนบาง ที่มีอัตราการแข็งตัว 0.2 องศาเซลเซียสวินาที เพื่อจำลองแบบหล่อทรายขึ้น ตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและวัดขนาดเกรนเฉลี่ยโดยใช้วิธีลากเส้นตรงตัดผ่านตามมาตรฐาน ASTM E118-88 จากนั้นตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

2.5 การศึกษาลำดับขั้นในการปรับสภาพเกรนละเอียดและเฟสยูเทคติกซิลิคอน

ในการศึกษาลำดับขั้นในการปรับสภาพสำหรับกระบวนการปรับสภาพเกรนละเอียดก่อนการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอน จะเริ่มต้นโดยการเติมโบรอนปริมาณ 0.08 wt.% ค้ำน้ำโลหะไว้ในเตา 30 นาที จากนั้นเติมโลหะผสมชนิด Al-10%Sr ปริมาณ 0.02 wt.% ค้ำน้ำ



รูปที่ 1 โครงสร้างจุลภาคโลหะผสม Al-4%B



รูปที่ 2 โครงสร้างจุลภาคโลหะผสม Al-10%Sr

โลหะในเตา 30 นาที ในขณะที่กระบวนการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอน จะเติมสตรอนเทียมลงไปเพื่อทำหน้าที่ในการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอนก่อน จากนั้นเติมโบรอนเพื่อทำหน้าที่ในการปรับสภาพเกรนละเอียด

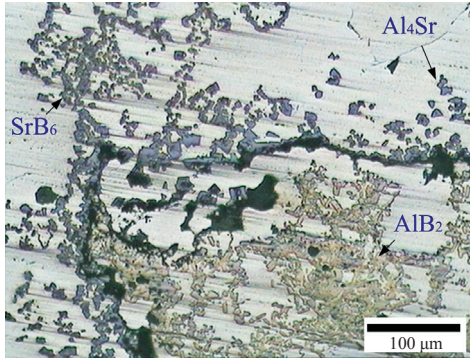
3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 โครงสร้างจุลภาคโลหะผสม Al-4%B

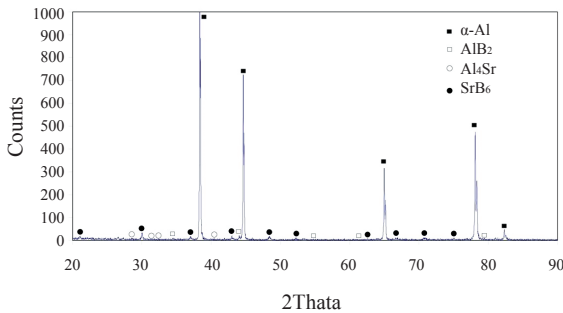
โครงสร้างจุลภาคโลหะผสม Al-4%B พบว่าประกอบด้วยเฟส AIB₂ มีลักษณะเป็นเส้นขนาดยาว 10–20 ไมครอนกระจายตัวอยู่ทั่วไปบนพื้นของอะลูมิเนียม (สีขาว) ดังแสดงในรูปที่ 1

3.2 โครงสร้างจุลภาคโลหะผสม Al-10%Sr

รูปที่ 2 แสดงโครงสร้างจุลภาคโลหะแม่ Al-10%Sr พบว่าประกอบด้วยเฟส Primary Al₄Sr มีลักษณะเป็น



รูปที่ 3 โครงสร้างจุลภาคโลหะแม่ Al-4%B-2%Sr



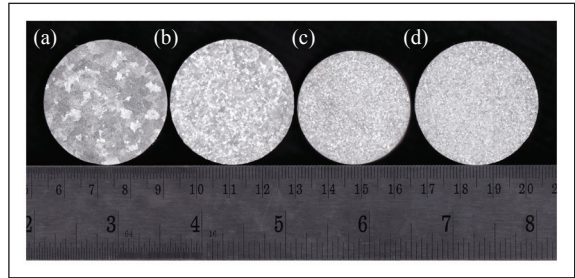
รูปที่ 4 ผลวิเคราะห์การเลี้ยวเบนโดยใช้รังสีเอกซ์ของโลหะแม่ Al-4%B-2%Sr

เส้นยาว (สีเทา) และเฟส Al_4Sr มีลักษณะเป็นเส้น ซึ่งมาจากปฏิกิริยาอุทกตก กระจายตัวอยู่ทั่วไปบนพื้นของอะลูมิเนียม

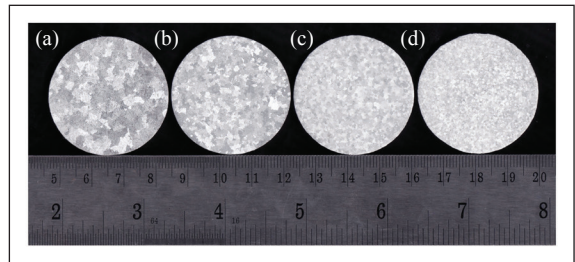
3.3 โครงสร้างจุลภาคโลหะแม่ Al-4%B-2%Sr

เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างพบว่าประกอบด้วยเฟส AlB_2 มีลักษณะเป็นก้อนขนาดใหญ่ เฟส SrB_6 ที่มีการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดเล็ก และเฟส Al_4Sr บนพื้นอะลูมิเนียม ดังแสดงในรูปที่ 3

ผลวิเคราะห์โลหะแม่ Al-4%B-2%Sr โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนโดยใช้รังสีเอกซ์ แสดงในรูปที่ 4 พบว่าเกิดการฟอร์มตัวของธาตุอะลูมิเนียม, สารประกอบ AlB_2 , Al_4Sr และ SrB_6



รูปที่ 5 โครงสร้างมหภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมก่อนและหลังผ่านการปรับสภาพเกรน



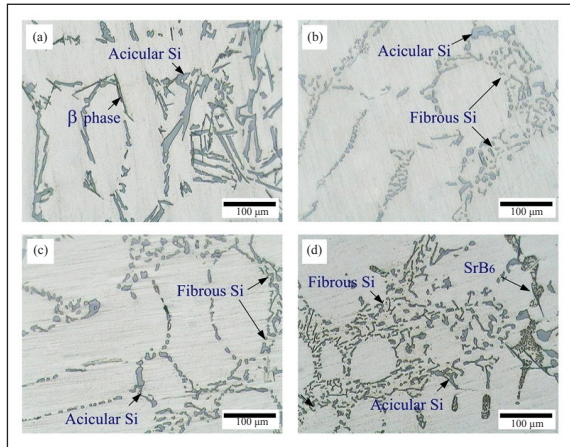
รูปที่ 6 โครงสร้างมหภาคของโลหะผสมก่อนและหลังการปรับสภาพเกรนที่มีลำดับชั้นแตกต่างกัน

3.4 ประสิทธิภาพการปรับสภาพเกรนละเอียดเติมโบรอนผสมกับสตรอนเทียม 0.02 wt. %

รูปที่ 5 (a) แสดงโครงสร้างมหภาคพบว่าโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพเกรน มีลักษณะเกรนที่ใหญ่ เมื่อเติมโบรอนปริมาณ 0.04 wt.% ทำให้เกรนมีขนาดเล็กลง ดังรูปที่ 5 (b) และเมื่อปริมาณการเติมโบรอนสูงมากขึ้นที่ 0.08 และ 0.12 wt.% ส่งผลให้เกรนละเอียดมากยิ่งขึ้น แสดงในรูปที่ 5 (c)-(d)

รูปที่ 6(a) แสดงโครงสร้างมหภาคโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพเกรน เมื่อเติมโลหะแม่ชนิด Al-4%B-2%Sr ปริมาณการเติม 2 wt.% ทำให้เกรนมีขนาดเล็กลงเล็กน้อยเท่านั้น ดังรูปที่ 6 (b)

ในการศึกษาลำดับชั้นการปรับสภาพเกรนในกระบวนการปรับสภาพเกรนละเอียดก่อนการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอน พบว่าเกรนมีขนาดเล็กลง เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะผสมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเฟสและ



รูปที่ 7 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมก่อนและหลังการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอน

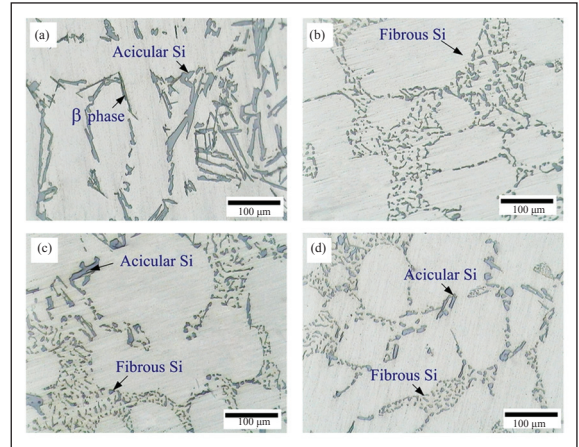
ผ่านการปรับสภาพเฟสโดยการเติมโลหะแม่ Al-4% B-2%Sr ดังแสดงในรูปที่ 6(c) ในขณะที่รูปที่ 6(d) โลหะผสมอะลูมิเนียมจะผ่านกระบวนการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอนก่อนและผ่านกระบวนการปรับสภาพเกรนที่หลังพบว่าเกรนมีขนาดเล็กมากที่สุด

3.5 การปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอน

รูปที่ 7 (a) แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอน พบว่าประกอบด้วยเฟสซิลิคอนมีลักษณะเป็นแท่งขนาดใหญ่ และมีปลายแหลมรูปทรงไม่แน่นอน เมื่อเติมสตรอนเทียมปริมาณ 0.02 wt.% ผสมกับโบรอน 0.04 และ 0.08 wt.% ส่งผลให้เฟสยูเทคติกซิลิคอนมีลักษณะกลมมน และมีบางส่วนที่มีลักษณะเป็นรูปทรงไม่แน่นอน ดังแสดงในรูปที่ 7 (b)-(c)

นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณการเติมโบรอนเท่ากับ 0.12 wt.% ผสมกับสตรอนเทียม 0.02 wt.% พบว่าจะเกิดการรวมตัวของสตรอนเทียมและโบรอนฟอร์มตัวเป็นสารประกอบ SrB_6 ดังแสดงในรูปที่ 7 (d)

รูปที่ 8 (a) แสดงโครงสร้างจุลภาคที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอน รูปที่ 8 (b) แสดงโครงสร้างจุลภาคผ่านการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอน



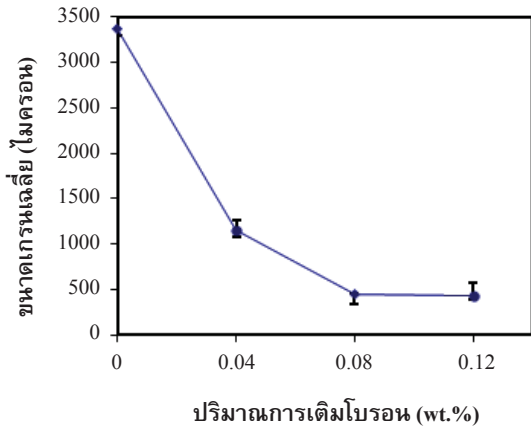
รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมก่อนและหลังการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอนที่มีลำดับชั้นแตกต่างกัน

โดยการเติมธาตุสตรอนเทียมในรูปแบบของโลหะแม่ Al-4%B-2%Sr ปริมาณ 2 wt.% นั้น พบว่าเฟสยูเทคติกซิลิคอนมีลักษณะกลมมนทั้งหมด

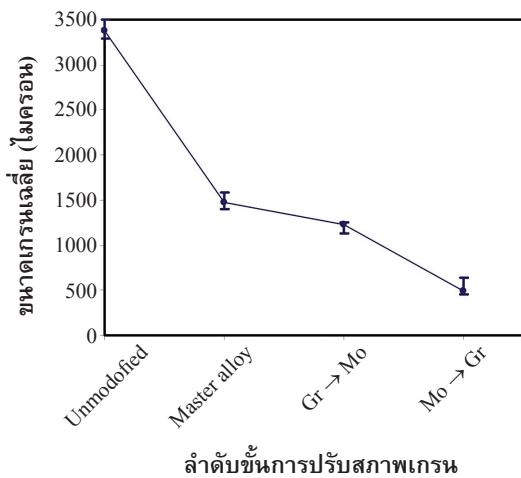
รูปที่ 8 (c) แสดงโครงสร้างจุลภาค เมื่อเติมโบรอน 0.08 wt.% ผสมกับสตรอนเทียม 0.02 wt.% ในกระบวนการปรับสภาพเกรนละเอียดก่อนการปรับสภาพเฟสยูเทคติกและกระบวนการปรับสภาพเฟสยูเทคติกก่อนการปรับสภาพเกรนละเอียด เติมธาตุสตรอนเทียมปริมาณ 0.02 wt.% ผสมกับโบรอน 0.08 wt.% รูปที่ 8 (d) ส่งผลให้เฟสยูเทคติกซิลิคอนมีลักษณะกลมมน และมีบางส่วนที่มีลักษณะรูปทรงไม่แน่นอน

3.6 ขนาดเกรนเฉลี่ย

ขนาดเกรนเฉลี่ยของโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเกรน พบว่าเกรนมีขนาด 3377 ไมครอน ผลจากการเติมโบรอน 0.04 wt.% ส่งผลให้ขนาดเกรนมีขนาดเล็กลงเล็กน้อยเท่ากับ 1159 ไมครอน ในขณะที่ปริมาณการเติม 0.08 และ 0.12 wt.% นั้น ขนาดเกรนมีขนาดเล็กมากเท่ากับ 439 และ 428 ไมครอน ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 9

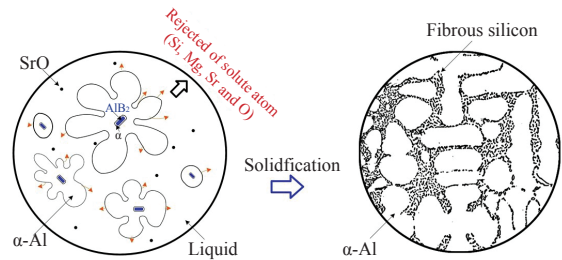


รูปที่ 9 ขนาดเกรนเฉลี่ยที่ระดับการเติมโบรอนแตกต่างกัน



รูปที่ 10 ขนาดเกรนเฉลี่ยที่มีลำดับชั้นแตกต่างกัน

ผลจากลำดับชั้นการปรับสภาพเกรนละเอียดโดยเติมโลหะแม่ Al-4%B-2%Sr ในปริมาณ 2 wt.% ส่งผลให้ขนาดเกรนมีขนาดเล็กลง 1479 ไมครอน ในขณะที่กระบวนการปรับสภาพเกรนละเอียดก่อนการปรับสภาพยูเทคติกซิลิคอน มีขนาดเกรน 1234 ไมครอน และกระบวนการปรับสภาพยูเทคติกซิลิคอนก่อนการปรับสภาพเกรนละเอียด มีขนาดเกรนเฉลี่ย 475 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 11 กลไกปรับสภาพเกรนละเอียดและเฟสยูเทคติกซิลิคอน

กลไกการปรับสภาพเกรนละเอียดและยูเทคติกซิลิคอน แสดงในรูปที่ 11 เมื่อเติมธาตุโบรอนเข้าไปในน้ำโลหะหลอมเหลวแล้วปล่อยให้แข็งตัวจะเกิดการฟอร์มตัวของโบรอนกับอะลูมิเนียมเป็นสารประกอบ AiB_2 ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกำเนิดนิวเคลียสจากเนื้อที่แตกต่างกัน จากนั้นจะเกิดการฟอร์มตัวของชั้นอะลูมิเนียมขึ้นเป็นชั้นบางๆ จากปฏิกิริยายูเทคติก ที่อุณหภูมิ 659.7 องศาเซลเซียส และเกิดการฟอร์มตัวของเฟสอะลูมิเนียม [3] เป็นที่ทราบกันดีว่าความสามารถในการละลายของธาตุผสมในเฟสอะลูมิเนียมมีน้อย [27] ดังนั้นเมื่อเกิดการฟอร์มตัวของเฟสอะลูมิเนียมขึ้น ซิลิคอนและสตรอนเทียมจะถูกผลักเข้าสู่โลหะหลอมเหลว จากนั้นสตรอนเทียมจะจับกับออกซิเจนที่มีอยู่ในน้ำโลหะและทำหน้าที่ขัดขวางการฟอร์มตัวของเฟสซิลิคอนในระนาบ $\langle 112 \rangle$ เมื่อซิลิคอนมีความเข้มข้นสูงเท่ากับ 12.6 wt.% จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสจากปฏิกิริยายูเทคติกทำให้เฟสซิลิคอนเติบโตได้ในหลายทิศทาง ส่งผลต่อลักษณะและรูปร่างที่กลมมน

จากผลการทดลองในงานวิจัยนี้พบว่าปริมาณการเติมโลหะแม่ชนิด Al-4%B ต้องมีปริมาณที่ถูกต้องและเหมาะสม ในกรณีนี้ที่เติมน้อยเกินไปจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการปรับสภาพเกรนละเอียดที่ลดต่ำลง ในกรณีนี้ที่เติมมากเกินไปจะเกิดการรวมตัวกันของธาตุผสมและฟอร์มตัวของสารประกอบ SrB_6 ในโครงสร้างจุลภาค [6]-[9]



ผลกระทบของลำดับขั้นการปรับสภาพเกรนโดยการเติมโบรอนและสตรอนเทียมในรูปแบบของโลหะแม่ Al-4%B-2%Sr ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการปรับสภาพเกรนที่ลดลงเนื่องจากการฟอร์มตัวของสารประกอบ SrB₆ ซึ่งสารประกอบดังกล่าวมีจุดหลอมเหลวสูง 2500 องศาเซลเซียส [28] ในขณะที่กระบวนการที่ปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอนก่อน และปรับสภาพเกรนละเอียดทีหลัง มีขนาดเกรนเฉลี่ยเล็กกว่ากระบวนการปรับสภาพเกรนละเอียดก่อน และปรับสภาพยูเทคติกซิลิคอนทีหลัง เนื่องจากปริมาณโบรอน 0.08 wt.% ในกระบวนการปรับสภาพเกรนละเอียดก่อนนั้น ใช้เวลาในการปรับสภาพนาน 60 นาที ขณะที่กระบวนการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอนก่อนการปรับสภาพเกรนละเอียด ในขั้นตอนการเติมธาตุโบรอน จากโลหะผสม Al-4%B ใช้เวลาดังนำโลหะ 30 นาทีเท่านั้น จึงส่งผลต่อประสิทธิภาพการปรับสภาพเกรนที่ดีกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าลำดับขั้นต้นในการปรับสภาพที่แตกต่างกันนั้นไม่ส่งผลต่อเฟสยูเทคติกซิลิคอน เนื่องจากธาตุสตรอนเทียมจะมีการเชื่อมสภาพที่เวลามากกว่า 120 นาที [29]-[31]

4. สรุป

4.1 การเติมโบรอนผสมกับสตรอนเทียมและโลหะแม่ชนิด Al-4%B-2%Sr สามารถปรับสภาพเกรนละเอียดให้มีขนาดเล็กลงและปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอนให้มีลักษณะกลมมนได้พร้อม ๆ กัน

4.2 ลำดับขั้นการปรับสภาพเกรนละเอียดและปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอน ส่งผลต่อขนาดเกรนของอะลูมิเนียมแต่ไม่ส่งผลต่อเฟสยูเทคติกซิลิคอน

4.3 ปริมาณการเติมโบรอนที่ไม่เหมาะสมนั้นส่งผลต่อการฟอร์มตัวของสารประกอบ SrB₆ ในโครงสร้างจุลภาค

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้ ผู้ทำการวิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่สนับสนุนงบประมาณสำหรับงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] E. J. Gruzleski and B. M. Closset, *The Treatment of Liquid Aluminum-Silicon Alloys*. USA: American Foundrymen Society, 1990.
- [2] D. Apelian and J. Chen, "Al-Si Processing variables: effect on Grain Refinement and eutectic modification," *Transactions of the American Fisheries Society*, vol. 94, pp. 797-808, 1986.
- [3] L. Yuan, D. Chao, and L. Yan-xiang, "Grain refining mechanism of Al-3B master alloys on hypoeutectic Al-Si alloys," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 21, pp. 1435-1440, 2011.
- [4] C. Zongning, W. Tongmin, G. Lei, F. Hongwang, and L. Tingui, "Grain refinement and tensile properties improvement of aluminum foundry alloy by inoculation with Al-B alloys," *Materials Science and Engineering*, vol. A553, pp. 32-36, 2012.
- [5] Y. Birol, "AlB3 master alloys to grain refine AlSi10Mg and AlSi12Cu aluminum foundry alloys," *Journal of Alloys and Compounds*, vol.13, pp. 150-153, 2012.
- [6] J. G. Li, B. Q. Zhang, L. Wang, W. Y. Yang, and H. T. Ma, "Combined effect and 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*, vol. A328, pp. 169-176, 2002.
- [7] L. Liming and A. Dahle, "Effects of Sr and B interactions in hypoeutectic Al-Si foundry alloys," *Materials Transactions*, pp. 807-812, 2006.
- [8] H. Liao and G. Sun, "Mutual poisoning effect between Sr and B in Al-Si casting alloys,"



- Scripta Materialia*, vol. 48, pp. 1035–1039, 2003.
- [9] L. Lu and A. K. Dahle, “Effects of combined additions of Sr and AlTiB grain refiners in hypo eutectic Al-Si foundry alloys,” *Materials Science and Engineering A*, vol. 435–436, pp. 288–296, 2006.
- [10] G.S. Vinod Kumar, B. S. Murty, and M. Chakraborty, “Development of Al-Ti-C grain refiners and study of their grain refining efficiency on Al and Al-7Si alloys,” *Journal of Alloys and Compounds*, pp. 143–150, 2005.
- [11] C. Limmaneevichitr, “Grain refinement mechanism in an Al-Si-Mg alloy with scandium,” *Journal of Alloys and Compound*, vol. 452, pp. 117–186, 2012.
- [12] G. S. Vinod kumar, B. S. Murty, and M. Chakraborty, “Grain refinement response of LM25 alloys towards Al-Ti-C and Al-Ti-B grain refiners,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 472, pp. 112–120, 2009.
- [13] S. A. Kori, B. S. Murty, and M. Chakraborty, “Development of an efficient grain refiner for Al-7Si alloys and Its modification with stontium,” *Materials Science and Engineering*, vol. 283, pp. 94–104, 2000.
- [14] Y. Birol, “Grain refining efficiency of Al-Ti-C alloys,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 422, pp. 128–131, 2006.
- [15] A. K. Prasada Rao, B. S. Murty, K. Das, and M. Chakraborty, “Modifier a novel master alloy for combined grain refinement & modification of Al-7Si alloy,” in *International Symposium of Research Students on Material Science and Engineering*, 2004.
- [16] P. Feng, J. Tang, X. Jin, S. Li, and D. Zang, “Influences of preparation condition and melt treatment procedures on melt treatment performance of Al-5Ti-B and Al-10Sr master alloys,” *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 22, no. 1, 2006.
- [17] M. Mahmoudi, R. Taghiabadi, and M. Emyam “Simultaneous grain refining and modification of 356 aluminium alloy using aluminium base master alloys Containing Strontium Titanium and Boron,” *Journal of Light Metal Welding*, 2005.
- [18] P. Li, L. Sida, Z. Lili, and L. Xiangfa, “Grain refinement of A356 alloy by Al-Ti-B-C master alloy and its effect on mechanical properties,” *Materials and Design*, vol. 47, pp. 522–528, 2013.
- [19] D.G. Mallapura, K. Rajendra Udupa, and S.A. Kori, “Studies on the influence of grain refining and modification of forged A356 alloys,” *Materials Science and Engineering A*, vol. 528, pp. 4747–4752, 2011.
- [20] J. Nie, X. Ma, P. Li, and X. Liu, “Effect of B/C Ratio on the microstructure and grain refining efficiency of Al-Ti-C-B master alloys,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 509, pp. 1119–1123, 2011.
- [21] Y.C. Lee, X. Ma, P. Li, and X. Liu, “The effect of gain refinement and silicon content on grain formation in hypoeutectic Al-Si alloys,” *Materials Science and Engineering A*, vol. 259, pp. 43–52, 1999.
- [22] T. Wang, H. Fu, Z. Chen, J. Xu, J. Zhu, F. Cho, and T. Li, “A novel fading-resistant Al-3Ti-3B grain refiner for Al-Si alloys,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 511, pp. 45–49, 2012.
- [23] S. S. Shin, E. S. Kim, G. Y. Yeom, and J. C. Lee,



- “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*, vol. 532, pp. 151–157, 2012.
- [24] C. Y. Yang, S. L. Lee, C. K. Lee, and J. C. Lin, “Effects of Sr and Sb modifiers on the sliding wear behavior of A356 alloy under varying pressure and speed conditions,” *Wear*, vol. 261, pp. 1348–1358, 2006.
- [25] L. Lu, K. Nogita, and A. K. Dahle, “Combining Sr and Na additions in hypoeutectic Al-Si foundry alloys,” *Materials Science and Engineering A*, vol. 399, pp. 244–253, 2005.
- [26] S. Farahany, A. Ourdjini, M. H. Idris, and L. T. Thai, “Effect of bismuth on microstructure of unmodified and Sr-modified Al-7Si-0.4Mg alloys,” *Nonferrous Met. Soc. China*, vol. 21, pp. 1455–1464, 2011.
- [27] C. Fleming, *Solidification Processing*. New York: McGraw-Hill, 1974.
- [28] C. R. Chakravorty, “Grain refinement of aluminum-lithium alloy with Al-Ti-B,” *Cast Metals*, vol. 4, no. 2, pp. 98-100, 1991.
- [29] P. Muangmoy, “The development of Al-Mn-Sr master alloys to modify β -phase and eutectic silicon in Cast Al-Si-Fe alloys,” M.E. thesis, Department of Materials and Production Technology Engineering, Faculty of Engineering King Mongkut’s University of Technology North Bangkok, 2010 (in Thai).
- [30] P. Muangnoy, “Development of Al-10%Mn-1%Sr master alloy to modify of β phase and eutectic silicon in cast Al-7%Si-1%Fe alloys,” in *Industrial Engineering (IE) Network Journal*, October 20–21, 2011, pp. 1255–1263.
- [31] R. Jaroennate, “Modification and mechanical properties of Al-7%Si-1%Fe alloy of by addition of Al-10%Mn-1%Sr master alloy,” in *Industrial Engineering (IE) Network Journal*, vol.12, pp.76, 2012.