



อิทธิพลของธาตุไทเทเนียมและสตรอนเทียมต่อประสิทธิภาพการ ปรับสภาพเกรนละเอียดและการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอน ในโลหะผสมหล่อ Al-Si-Mg

Influence of Titanium and Strontium Element on Modification and Refining in Al-Si-Mg Cast Alloy

พิสิทธ์ เมืองน้อย^{1*} และ จินกมล ลุยจันทร์¹

Phisith Muamgnoy^{1*} and Jinkamon Luijan

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการผลิต คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ถนนเพชรเกษม หัวหิน ประจวบคีรีขันธ์ 77110

Department of Production Engineering Technology, Faculty of Industry and Technology,
Rajamangala University of Technology Rattanakosin,
Phet Kasem Road, Huahin, Prachubkirikhan, 77110

E-mail: Phisith_kkw@hotmail.com, Telephone: 097-0103032, Fax.: 032-618570

บทคัดย่อ

การศึกษาผลกระทบของธาตุไทเทเนียมและสตรอนเทียมที่มีผลต่อการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอนและประสิทธิภาพการปรับสภาพเกรนละเอียดในโลหะผสมหล่อ Al-Si-Mg โลหะผสมที่ใช้สำหรับการปรับปรุงโลหะหลอมเหลวประกอบด้วย Al-5%Ti, Al-0.5%C และ Al-10%Sr โลหะหลอมเหลวถูกหลอมและเทลงในเบ้าสแตนเลสที่อัตราการเย็นตัว 0.2°C/s ผลการทดลองพบว่าการเติมธาตุไทเทเนียม 1 wt.% มีประสิทธิภาพในการปรับสภาพเกรนละเอียดดีกว่าที่ปริมาณการเติม 0.5 และ 1.5 wt.% ในขณะที่เฟสยูเทคติกซิลิคอนปรับสภาพกลายเป็นรูปร่างกลมมนบางส่วนเท่านั้น ที่ปริมาณการเติมธาตุไทเทเนียม 1.5 wt.% พบว่าเกิดการฟอร์มตัวของสารประกอบเชิงโลหะ $Al_4Si_4C_7$ และ AlCO การเติมโลหะแม่ Al-5%Ti-4%Sr-1%C ระดับ 1 wt.% มีประสิทธิภาพในการปรับสภาพที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเติมไทเทเนียม 1 wt.% ขนาดเกรนเฉลี่ยที่มีขนาดเล็กได้จากการบวนการ $Gr \rightarrow Mo$ และ $Mo \rightarrow Gr$ ขณะที่เฟสยูเทคติกซิลิคอนปรับสภาพโดยสมบูรณ์กลายเป็นรูปร่างกลมมน

ABSTRACT

The effect of titanium and strontium elements additions on modification and grain refinement efficiency in Al-Si-Mg cast alloy were investigated. The Al-5%Ti, Al-0.5%C and Al-10%Sr alloys were used for melt treatment. The melt was melted and cast into stainless mold at cooling rate 0.2°C/S. The experimental results show that the addition 1 wt.% of Al-5%Ti alloy had better refining efficiency than 0.5 and 1.5 wt.% addition in every condition of experiments, while eutectic silicon was partly modified the acicular silicon into fibrous morphology. A $Al_4Si_4C_7$ and AlCO intermetallic compound was found in the addition of 1.5 wt.% added alloy. The addition 1 wt.% of Al-5%Ti-4%Sr-1%C master alloy was less refining efficiency compared to the addition 1wt.% of Al-5%Ti alloy. A small

grain size was found in the Gr→Mo and Mo→Gr process, while the eutectic Si was fully modified into the fibrous morphology.

1. บทนำ

โลหะผสมอลูมิเนียม-ซิลิกอน นิยมนำไปใช้ในการผลิตชิ้นส่วนต่างๆ ในอุตสาหกรรมยานยนต์ เนื่องจากคุณสมบัติที่ดีหลายประการเช่น ความสามารถในการหล่อสูง (Casting ability) ทำให้สามารถหล่อชิ้นงานที่มีความซับซ้อนสูงได้ดี มีความต้านทานการกัดกร่อน ผิวสวยงาม และความหนาแน่นต่ำ เป็นต้น

การปรับปรุงคุณภาพชิ้นงานหล่อ เช่น การปรับปรุงความสามารถในการเติมเติมน้ำโลหะ, ลดปัญหาการแตกร้าวร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการแข็งตัว, การปรับปรุงการกระจายตัวของรูพรุนและทำให้สารประกอบเชิงโลหะให้มีขนาดเล็กลง ในปัจจุบันนิยมเติมโลหะแม่ Al-Ti-B, Al-Sc และ Al-B [1-6] ในปริมาณที่เหมาะสม ลงไปในน้ำโลหะหลอมเหลวเพื่อปรับสภาพเกรน α -Al เรียกว่ากระบวนการ Grain refinement โดยธาตุดังกล่าวจะทำให้หน้าที่เป็นจุดเริ่มต้นในการเกิดนิวเคลียสเทียม (Heterogeneous nucleation) ทำให้ขนาดเกรนของเฟส α -Al มีขนาดเล็กลง ส่งผลต่อชิ้นงานหล่อดีขึ้นสมบัติเชิงกลที่สูงขึ้น [7]

การปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิกอน (Modification) เป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญสำหรับอุตสาหกรรมงานหล่อและการผลิตชิ้นส่วนต่างๆ ชิ้นงานหล่อที่ผ่านการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิกอนส่งผลต่อสมบัติทางกล เช่น ค่าความต้านทานแรงดึงและอัตราการยืดตัวที่สูง [8-9] สามารถลดเวลาที่ใช้ในกระบวนการอบชุบให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Solution treatment) โดยธรรมชาติเฟสยูเทคติกซิลิกอนจะฟอร์มตัวและเติบโต (Grow) ในระนาบ $\langle 112 \rangle$ และมีการ Twinning ในระนาบ (111) ส่งผลให้เฟสยูเทคติกซิลิกอนมีลักษณะรูปทรงไม่แน่นอน (Acicular) จากลักษณะดังกล่าวส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานหล่อลดต่ำลง [7] การปรับปรุงรูปร่างและขนาดของเฟสยูเทคติกซิลิกอน นิยมเติมธาตุ

สตรอนเทียมลงไปในน้ำโลหะหลอมเหลว ปริมาณธาตุสตรอนเทียมประมาณ 0.02-0.04 wt.% เมื่อปล่อยให้แข็งตัวธาตุสตรอนเทียมจะขัดขวางการเติบโตของผลึกซิลิกอนในระนาบ $\langle 112 \rangle$ ทำให้เกิดการเติบโตได้ในหลายทิศทาง ส่งผลต่อเฟสยูเทคติกซิลิกอนมีขนาดเล็กลง และมีรูปร่างกลมมนมากขึ้น (Fibrous) ปริมาณการเติมนั้นจำเป็นต้องคำนึงที่ต้องควบคุมให้เหมาะสม ในกรณีเติมน้อยเกินไปเฟสยูเทคติกซิลิกอนจะมีขนาดเล็กลง มีลักษณะเป็นเส้นขนาดเล็ก (Lamellar) [8] ในขณะที่เติมในปริมาณที่สูงเกินไปจะเกิดการฟอร์มตัวของสารประกอบเชิงโลหะ Al_4SrSi_2 ที่มีลักษณะเป็นก้อนกลม บริเวณเฟสยูเทคติกซิลิกอน ส่งผลให้ชิ้นงานหล่อเปราะ [7]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีการศึกษาผลกระทบของธาตุคาร์บอนต่อโครงสร้างจุลภาคและประสิทธิภาพการปรับสภาพเกรนละเอียดของโลหะแม่ [10] โดยการเติมธาตุคาร์บอนประมาณ 0.2 wt.% โดยใช้โลหะแม่ชนิด Al-5%Ti-0.8%B จากการทดลองวิเคราะห์สารประกอบด้วยเทคนิค XRD พบว่าประกอบด้วยเฟส Al, TiB_2 , $TiAl_3$ และเฟส TiC เมื่อเติมในปริมาณ 0.2 wt.% ทำให้ขนาดของเกรนอลูมิเนียมมีขนาดเล็กลง Yucel [11] ได้ศึกษาประสิทธิภาพการปรับสภาพเกรนละเอียดโดยใช้โลหะแม่ชนิด Al-3%Ti และเพิ่มปริมาณธาตุคาร์บอนในระดับที่แตกต่างกันคือ 0.15, 0.30, 0.45 และ 0.75 wt.% ในอลูมิเนียมบริสุทธิ์ พบว่าโลหะแม่ชนิด Al-3%Ti-0.15%C มีประสิทธิภาพในการปรับสภาพเกรน α -Al สูงสุด มีการศึกษาการปรับสภาพเกรนละเอียดโดยทดลองใช้โลหะแม่ชนิด Al-Ti-B-C [12] ในโลหะผสมอลูมิเนียมเกรด A356 เติมในปริมาณ 0.2 wt.% พบว่าเมื่อเติมโลหะแม่ Al-3%Ti-1%B-0.2%C ทำให้ชิ้นงานหล่อมีขนาดเกรนเล็กลงและสมบัติเชิงกลสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเติมในปริมาณที่เท่ากันของโลหะแม่ Al-5%Ti-1%B มีการพัฒนาโลหะแม่ที่ใช้ในการปรับสภาพเกรนละเอียด Al-Ti-C และศึกษาประสิทธิภาพใน

การปรับสภาพเกรน [13] โดยการเติมโลหะแม่ในอลูมิเนียมบริสุทธิ์ พบว่าประสิทธิภาพของโลหะแมงกานีส Al-5%Ti-1.2%C ที่ ปริมาณ การเติม 1 wt.% มีประสิทธิภาพในการปรับสูงกว่าโลหะแมงกานีส Al-5%Ti-0.8%C และ Al-5%Ti-1%B นอกจากนี้มีงานวิจัยที่ศึกษาผลกระทบของการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิกอนและปรับสภาพเกรนละเอียด พบว่าเกิดการฟอร์มตัวของเฟส SrB_6 ในโครงสร้างจุลภาค [14-17]

จากที่กล่าวมาทั้งหมดจะเห็นได้ว่าการปรับสภาพเกรน $\alpha\text{-Al}$ และการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิกอน มีผลต่อสมบัติเชิงกลและคุณภาพของชิ้นงานหล่อ ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมา ยังไม่มีงานวิจัยที่ศึกษาพฤติกรรมการปรับสภาพเกรน $\alpha\text{-Al}$ และปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิกอนไปพร้อมๆ กัน รวมทั้งลำดับขั้นตอนในการปรับสภาพที่เหมาะสม โดยใช้โลหะผสม Al-5%Ti, Al-0.5%C, Al-10%Sr และ โลหะแมงกานีส Al-5%Ti-4%Sr-1%C ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของธาตุไทเทเนียมและสตรอนเทียมต่อประสิทธิภาพการปรับสภาพเกรน $\alpha\text{-Al}$ และการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิกอนในโลหะผสมหล่อ Al-7%Si-0.3%Mg

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุ

1. โลหะผสมอลูมิเนียมหล่อ Al-7%Si-0.3%Mg
2. โลหะผสม Al-5%Ti
3. โลหะผสม Al-0.5%C
4. โลหะแมงกานีส Al-5%Ti-4%Sr-1%C
5. โลหะผสม Al-10%Sr

โลหะผสม Al-7%Si-0.3%Mg ที่ใช้ในการทดลองภายใต้งานวิจัยนี้มีส่วนผสมทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีที่ใช้ในการทดลอง (wt.%)

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

โลหะผสม Al-5%Ti ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้จากการหลอมเกลือ KTiF_6 ผสมกับอลูมิเนียมบริสุทธิ์ ในสัดส่วนที่กำหนด หลอมที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที ตักตรวจสอบออก กวนผสมให้เข้ากัน 2 นาที จากนั้นเทลงรางเหล็กที่เตรียมไว้ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส

ผงคาร์บอนบริสุทธิ์ถูกใช้ในขั้นตอนผลิตโลหะผสม Al-0.5%C โดยการหลอมอลูมิเนียมบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส จากนั้นเติมผงคาร์บอนลงไปลงในน้ำโลหะหลอมเหลว กวนให้เข้ากัน ค้างน้ำโลหะหลอมเหลว 30 นาที เทที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ลงในรางเหล็กที่เตรียมไว้

ขั้นตอนการพัฒนาโลหะแมงกานีส Al-5%Ti-4%Sr-1%C จากโลหะผสม Al-5%Ti, Al-10%Sr และ Al-0.5%C โดยการเติมโลหะผสมดังกล่าวลงในอลูมิเนียมบริสุทธิ์ ตามสัดส่วนที่กำหนดไว้ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ค้างน้ำโลหะ 30 นาที กวนให้เข้ากันก่อนที่จะเทลงรางเหล็ก จากนั้นตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด นอกจากนี้ยังศึกษาสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นโดยใช้เทคนิค X-Ray Diffraction (XRD)

2.2 การศึกษาประสิทธิภาพการปรับสภาพเกรนละเอียดและปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิกอน

ในการออกแบบการทดลองในงานวิจัยนี้ กำหนดปริมาณธาตุไทเทเนียม จากการเติมโลหะผสม Al-5%Ti ในระดับ 0.5, 1 และ 1.5 wt.% โดยการกำหนดปริมาณธาตุสตรอนเทียม 0.04 wt.% จากโลหะผสม Al-10%Sr และธาตุคาร์บอน 0.01wt.% จากโลหะผสม Al-0.5%C เท่ากันทุกๆ สภาวะการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การออกแบบการทดลอง (wt.%)

Alloys	Al-Ti	Al-C	Al-Sr	Sequences
A356	0.5	0.01	0.04	Mix
A356	1	0.01	0.04	Mix
A356	1.5	0.01	0.04	Mix

2.3 การศึกษาลำดับขั้นการปรับสภาพเกรนละเอียดและปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอน

ในการศึกษาลำดับขั้นตอนที่เหมาะสมในการปรับสภาพเกรนนั้น ผู้วิจัยได้ออกแบบกรรมวิธีการทดลองแตกต่างกัน 3 ขั้นตอนประกอบด้วย ขั้นตอนที่ 1. เติมโลหะแมงกานีส Al-5%Ti-4%Sr-1%C ในปริมาณ 1 wt.% ขั้นตอนที่ 2. โลหะหลอมเหลวผ่านกระบวนการปรับสภาพเกรนละเอียด จากนั้นผ่านกระบวนการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอน (Grain refinement→Modification) ใช้รหัส Gr→Mo ขั้นตอนที่ 3. โลหะหลอมเหลวผ่านกระบวนการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอน โดยการเติมธาตุสตรอนเทียม 0.04 wt.% จากโลหะผสม Al-10%Sr จากนั้นผ่านกระบวนการปรับสภาพเกรนละเอียดโดยการเติมธาตุไทเทเนียมปริมาณ 1 wt.% และธาตุคาร์บอน 0.01 wt.% จากโลหะผสม Al-0.5%C ใช้รหัส Mo→Gr ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ลำดับขั้นการปรับสภาพเกรนที่แตกต่างกัน (wt.%)

Alloys	Al-5Ti	Al-1C	Al-Sr	Sequences
A356	1	0.01	0.04	Gr → Mo
A356	1	0.01	0.04	Mo → Gr
A356	Al-5Ti-4Sr-1C		-	Cast

ในกระบวนการหล่อใช้เตาไฟฟ้าแบบขดลวดด้านทาน หลอมในเบ้าหล่อซิลิคอนคาร์ไบด์ อุณหภูมิที่ใช้ในการหลอม 800 องศาเซลเซียส เมื่อโลหะหลอมเหลวเติม ฟลักซ์ปกคลุมผิวหน้า 0.5 wt.% จากนั้นเติมโลหะผสมในปริมาณที่กำหนด ใช้เวลาในการค้ำน้ำโลหะหลอมเหลว 30 นาที กำจัดแก๊สไฮโดรเจน โดยการพ่นแก๊สอาร์กอนเป็นเวลา 2 นาที เทโลหะหลอมเหลวในเบ้าสแตนเลสผนังบาง ที่มีอัตราการเย็นตัว 0.2°C/s ตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค วัดขนาดเกรนเฉลี่ยโดยใช้วิธี Linear intercept ตามมาตรฐาน ASTM E118-88 นอกจากนี้ยังตรวจสอบสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะผสม โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่มี

การติดตั้งอุปกรณ์ Energy dispersive Spectrometry (EDS)

3. ผลการทดลอง

3.1 โครงสร้างจุลภาคโลหะผสม Al-5%Ti

โครงสร้างจุลภาคโลหะผสม Al-5%Ti พบว่าประกอบด้วยเฟส TiAl_3 มีลักษณะเป็นก้อนกระจายตัวอยู่ทั่วไปบนพื้นของอลูมิเนียม ดังแสดงในรูปที่ 1

3.2 โครงสร้างจุลภาคโลหะผสม Al-0.5%C

รูปที่ 2 แสดงโครงสร้างจุลภาคพบว่าประกอบด้วยเฟส SiC มีลักษณะเป็นอนุภาคขนาดเล็กกระจายตัวอยู่ทั่วไปบนพื้นของอลูมิเนียม และเฟส Al_4C_3 มีลักษณะเป็นเส้นยาว ความยาวประมาณ 30-80 ไมครอน

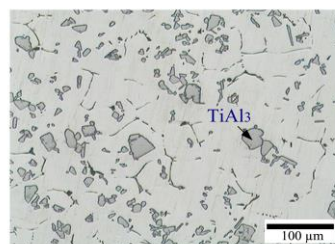
3.3 โครงสร้างจุลภาคโลหะผสม Al-10%Sr

รูปที่ 3 แสดงโครงสร้างจุลภาคพบว่าประกอบด้วยเฟสหลัก 2 เฟส ประกอบด้วยเฟส Primary Strontium มีลักษณะเป็นเส้นยาว และเฟส Al_4Sr มีลักษณะเป็นเส้นซึ่งมาจากปฏิกิริยายูเทคติก กระจายตัวอยู่ทั่วไปบนพื้นของอลูมิเนียม ($\alpha\text{-Al}$)

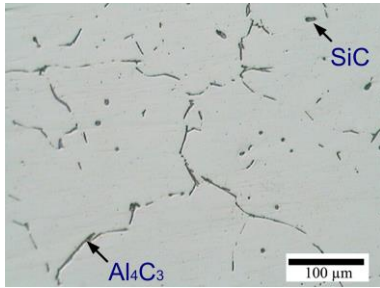
3.4 โครงสร้างจุลภาคโลหะแม่ Al-5%Ti-4%Sr-1%C

เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างของโลหะแม่ Al-5%Ti-4%Sr-1%C พบว่าประกอบด้วยเฟส $\text{Al}_4\text{Si}_4\text{C}_7$ ลักษณะเป็นก้อนขนาดเล็กบนพื้นอลูมิเนียม, เฟส Al_4Sr , เฟส TiAl_3 มีลักษณะเป็นก้อนขนาด 50-100 ไมครอน และเฟส SiC ดังแสดงในรูปที่ 4

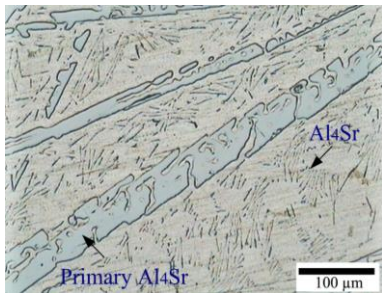
ผลการวิเคราะห์สารประกอบเชิงโลหะในโลหะแม่ Al-5%Ti-4%Sr-1%C ด้วยเทคนิค XRD แสดงในรูปที่ 5 พบว่าเกิดการฟอร์มตัวของเฟสอลูมิเนียม, $\text{Al}_4\text{Si}_4\text{C}_7$, Al_3Ti , SiC , Al_4Sr และ Unknown phase



รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างจุลภาคโลหะผสม Al-5%Ti

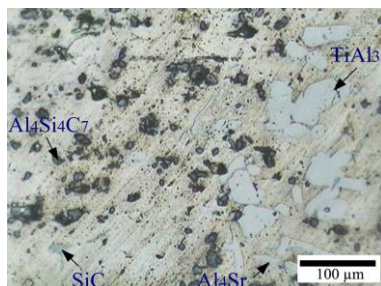


รูปที่ 2 แสดงโครงสร้างจุลภาคโลหะผสม Al-0.5%C

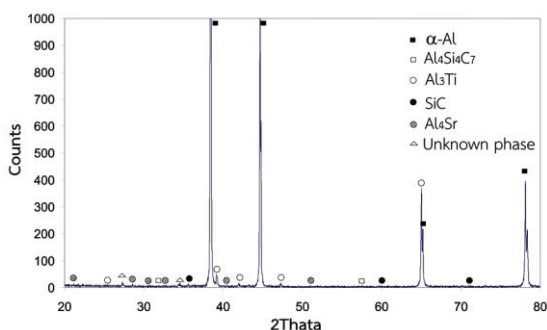


รูปที่ 3 โครงสร้างจุลภาคโลหะผสม Al-10%Sr

3.4 โครงสร้างจุลภาคโลหะแม่ Al-5%Ti-4%Sr-1%C



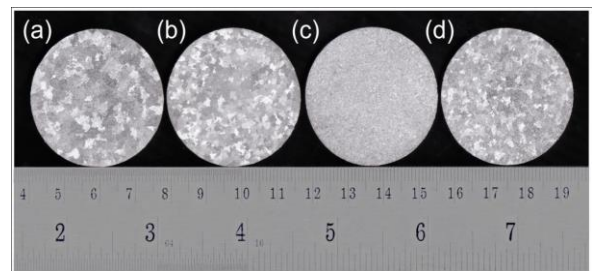
รูปที่ 4 โครงสร้างจุลภาคโลหะแม่ Al-5%Ti-4%Sr-1%C



รูปที่ 5 ผล XRD ของโลหะแม่ Al-5%Ti-4%Sr-1%C

3.5 ประสิทธิภาพการปรับสภาพเกรนละเอียดเดิมโลหะผสม Al-5%Ti + Al-0.5%C + Al-10%Sr

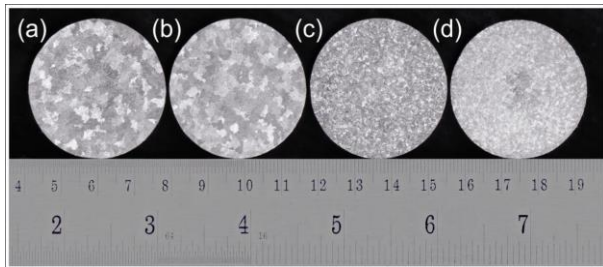
รูปที่ 6 (a) แสดงโครงสร้างมหภาคโลหะผสมอลูมิเนียมที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพเกรน พบว่ามีลักษณะเกรนที่ใหญ่ เมื่อเติมโลหะผสมชนิด Al-5%Ti ปริมาณการเติม 0.5 wt.% ทำให้เกรนมีขนาดลดลง คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ 46% เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะผสมอลูมิเนียมที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพเกรนละเอียด ดังแสดงในรูปที่ 6 (b) และเมื่อปริมาณการเติมโลหะผสมเพิ่มขึ้นที่ 1 wt.% ส่งผลให้เกรนลดลงอย่างมีนัยสำคัญ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ 84% แสดงในรูปที่ 6 (c) อย่างไรก็ตามที่ปริมาณการเติมที่สูงมากขึ้น 1.5 wt.% พบว่าเกรนมีขนาดเล็กกว่าโลหะผสมอลูมิเนียมที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพเกรน คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ 62% ดังแสดงในรูปที่ 6 (d)



รูปที่ 6 โครงสร้างมหภาคของโลหะผสมอลูมิเนียม (a) ไม่ผ่านการปรับสภาพเกรน (b) เติมไทเทเนียม 0.5 wt.% (c) เติมไทเทเนียม 1 wt.% (d) เติมไทเทเนียม 1.5 wt.%

รูปที่ 7 (a) แสดงโครงสร้างมหภาคโลหะผสมอลูมิเนียมที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพเกรน เมื่อเติมโลหะแม่ชนิด Al-5%Ti-4%Sr-1%C ปริมาณการเติม 1 wt.% ส่งผลให้ขนาดเกรนมีขนาดลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ 14% เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะผสมอลูมิเนียมที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพเกรนละเอียด ดังรูปที่ 7 (b) ในการศึกษาลำดับขั้นการปรับสภาพเกรนละเอียดและเฟสยูเทคติกซิลิคอน ในกระบวนการ Gr→Mo พบว่าเกรนมีขนาดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ 82% ดังแสดงในรูปที่

7 (c) ในขณะที่รูปที่ 7 (d) โลหะผสมจะผ่านกระบวนการ $\text{Mo} \rightarrow \text{Gr}$ พบว่าเกรนมีขนาดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ 83%



รูปที่ 7 โครงสร้างมหภาคของโลหะผสมอลูมิเนียม

(a) ไม่ผ่านการปรับสภาพเกรน (b) ปรับสภาพเกรน 1 wt.% ของโลหะแม่ Al-Ti-Sr-C (c) กระบวนการ $\text{Gr} \rightarrow \text{Mo}$ (d) กระบวนการ $\text{Gr} \rightarrow \text{Mo}$

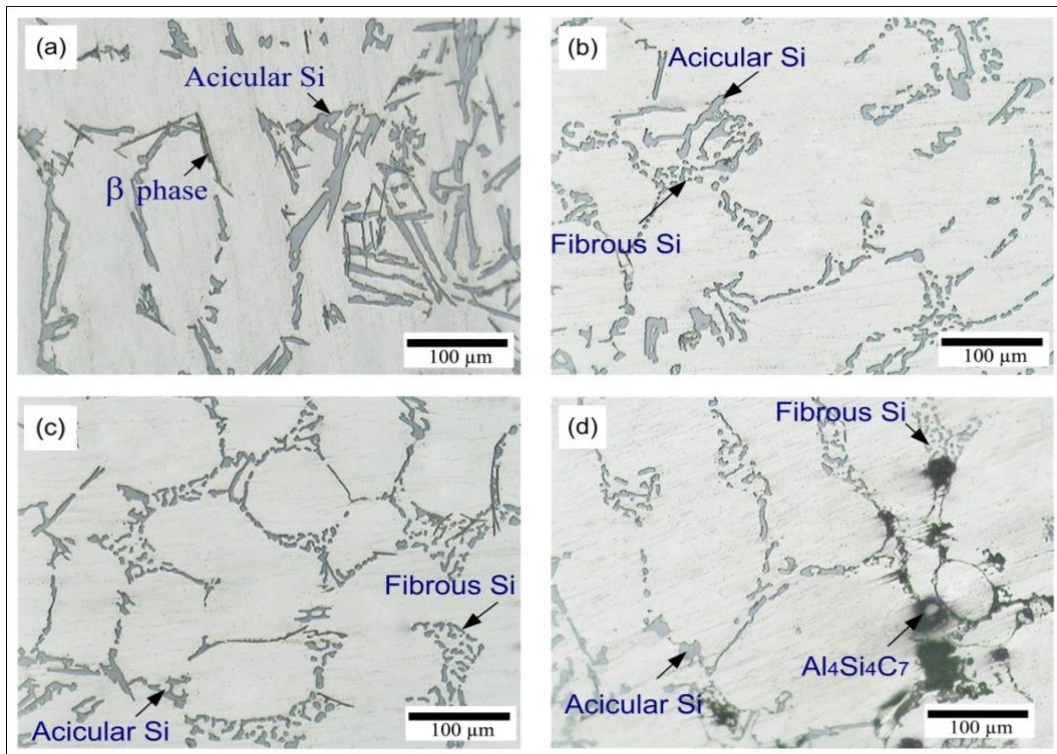
3.6 การปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิกอนเติมโลหะผสม Al-5%Ti + Al-0.5%C + Al-10% Sr

รูปที่ 8 (a) แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิกอน พบว่าเฟสซิลิกอนมีลักษณะเป็นแท่งขนาดใหญ่ มีรูปทรงไม่แน่นอน เมื่อเติมธาตุสตรอนเทียมในปริมาณ 0.04 wt.% นั้นส่งผลให้เฟสยูเทคติกซิลิกอนมีลักษณะกลมมน และมี

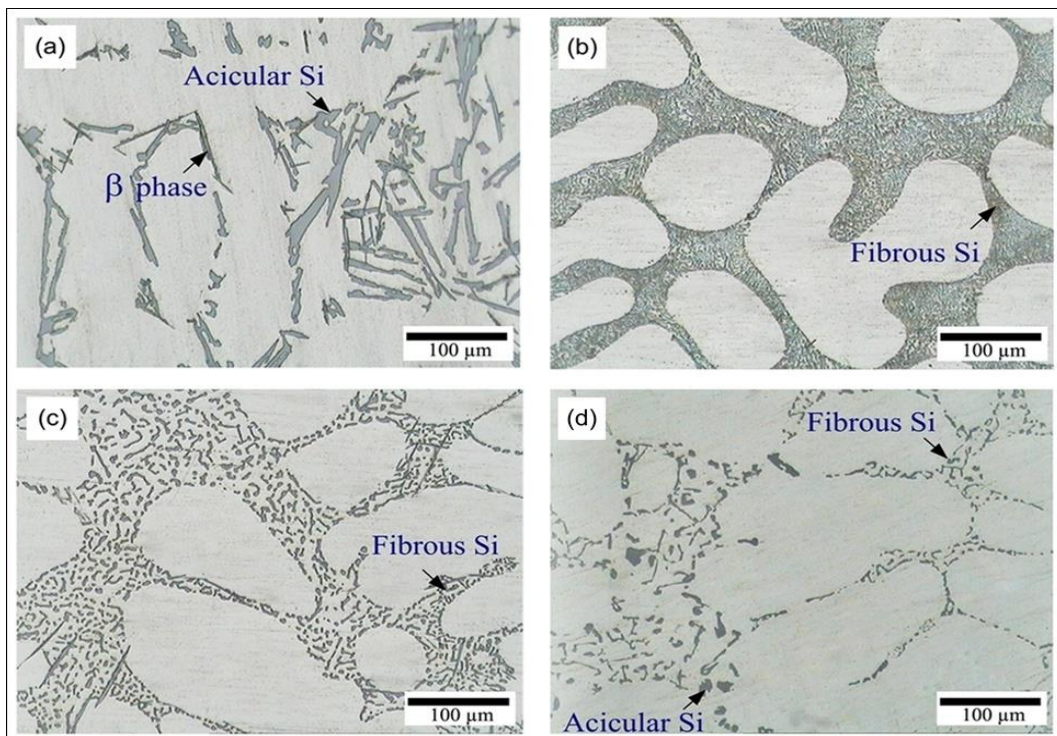
บางส่วนที่มีลักษณะรูปทรงไม่แน่นอนแค่บางส่วนเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 8 (b-d)

การเติมโลหะผสม Al-5%Ti ปริมาณการเติม 1.5 wt.% ผสมกับธาตุคาร์บอน 0.01 wt.% พบว่าจะเกิดการรวมตัวของธาตุอลูมิเนียม, ซิลิกอนและคาร์บอน ฟอร์มตัวเป็นเฟส $\text{Al}_4\text{Si}_4\text{C}_7$ ขนาด 5-10 ไมครอน กระจายตัวอยู่บนแขนของเดนไดรต์ ดังแสดงในรูปที่ 8 (d) ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการปรับสภาพเกรนละเอียดของโลหะผสมลดต่ำลง

รูปที่ 9 (a) แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิกอน รูปที่ 9 (b) แสดงโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานเมื่อผ่านการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิกอนโดยการเติมธาตุสตรอนเทียมในรูปแบบของโลหะแม่ Al-5%Ti-4%Sr-1%C ปริมาณ 1 wt.% พบว่าเฟสยูเทคติกซิลิกอนมีลักษณะกลมมน เมื่อเติมธาตุสตรอนเทียมในปริมาณ 0.04 wt.% โดยใช้เวลา 30 นาทีของกระบวนการ $\text{Gr} \rightarrow \text{Mo}$ ส่งผลให้เฟสยูเทคติกซิลิกอนมีลักษณะกลมมน ดังแสดงที่ 9 (c) ในขณะที่กระบวนการ $\text{Gr} \rightarrow \text{Mo}$ ใช้เวลา 60 นาทีมีเฟสยูเทคติกซิลิกอนแบบกลมมนและรูปทรงไม่แน่นอนเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 9 (d)



รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอลูมิเนียม (a) ไม่ผ่านการปรับสภาพเกรน (b) การปรับสภาพเกรน 0.5 wt.%Ti+0.01 wt.%C+ 0.04 wt.%Sr (c) การปรับสภาพเกรน 1 wt.%Ti+0.01 wt.%C+0.04 wt.%Sr (d) การปรับสภาพเกรน 1.5 wt.%Ti+0.01 wt.%C+0.04 wt.%Sr



รูปที่ 9 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอลูมิเนียม (a) ไม่ผ่านการปรับสภาพเกรน (b) ปรับสภาพเกรน 1 wt.% ของโลหะแม่ Al-Ti-Sr-C (c) กระบวนการ Gr→Mo (d) กระบวนการ Mo→Gr

3.6 ขนาดเกรนเฉลี่ย

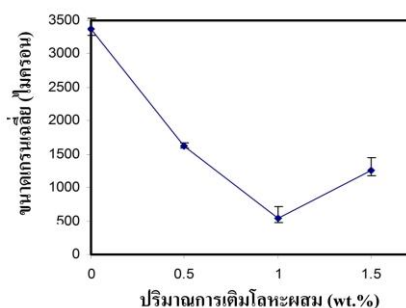
ขนาดเกรนเฉลี่ยของโลหะผสมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเกรนละเอียด พบว่ามีขนาดเกรนเท่ากับ 3377 ไมครอน ผลจากการเติมโลหะผสม Al-5%Ti ในปริมาณ 0.5 wt.% ส่งผลให้ขนาดเกรนมีขนาดเล็กลงเล็กน้อย เท่ากับ 1620 ไมครอน ปริมาณการเติม 1 wt.% ขนาดเกรนมีขนาดเล็กมากเท่ากับ 540 ไมครอน ในขณะที่ปริมาณการเติม 1.5 wt.% นั้น เกรนมีขนาดโตขึ้นเท่ากับ 1261 ไมครอน เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณการเติมที่ 1 wt.% ของโลหะผสม Al-5%Ti ดังแสดงในรูปที่ 10

ผลจากลำดับขั้นการปรับสภาพเกรนละเอียดโดยเติมโลหะแม่ Al-5%Ti-4%Sr-1%C ในปริมาณ 1 wt.% ส่งผลให้ขนาดเกรนมีขนาดเล็กลงเท่ากับ 2917 ไมครอน ในขณะที่กระบวนการ Gr→Mo มีขนาดเกรนเท่ากับ 592 ไมครอน และกระบวนการ Mo→Gr มีขนาดเกรนเฉลี่ยเท่ากับ 583 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 11

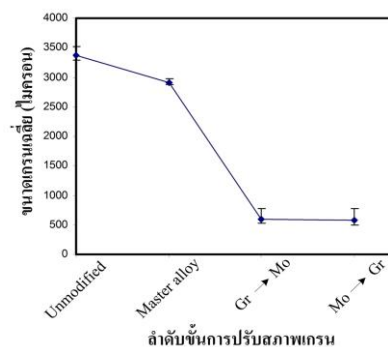
4. วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่าปริมาณการเติมธาตุไทเทเนียมที่ปริมาณ 0.5 wt.% นั้น สามารถลดขนาดเกรนให้มีขนาดเล็กลงได้ไม่มากนัก เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะผสมที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพเกรน เนื่องจากอนุภาคที่ทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสเทียมมีปริมาณน้อยเกินไป เมื่อเติมไทเทเนียมในปริมาณ 1 wt.% ส่งผลต่อขนาดเกรนที่มีขนาดเล็กลง โดยกลไกในการปรับสภาพเกรนจะมีประสิทธิภาพที่ด้นั้น ขึ้นอยู่กับปริมาณของเฟส TiC ที่ทำหน้าที่เป็นอนุภาคเริ่มต้นในการเกิดนิวเคลียสเทียม [18] นอกจากนี้ยังพบว่าโลหะผสมที่ผ่านการปรับสภาพเกรนละเอียดโดยการเติมธาตุไทเทเนียม 1.5 wt.% ผสมกับคาร์บอน 0.01 wt.% และสตรอนเทียม 0.04 wt.% พบว่าเกิดการฟอร์มตัวของเฟส $Al_4Si_4C_7$ ดังแสดงในรูปที่ 8 (d) และเฟส AlCO อยู่ในโครงสร้าง α -Al ดังแสดงในรูปที่ 12 จากการฟอร์มตัวของเฟสดังกล่าวทำให้ปริมาณคาร์บอนในน้ำโลหะหลอมเหลวลดต่ำลง ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการปรับสภาพเกรนละเอียดลดลง ในขณะที่

ที่การปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอนนั้น พบว่ามีขนาดรูปร่างกลมมนและรูปทรงไม่แน่นอนจำนวนเล็กน้อย ไม่แตกต่างกันมากนักที่ระดับการเติมของธาตุไทเทเนียมแตกต่างกัน



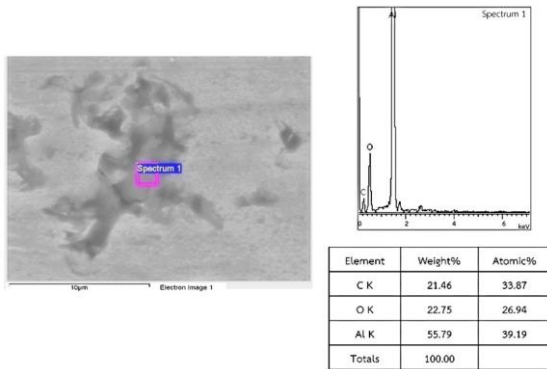
รูปที่ 10 ขนาดเกรนเฉลี่ยที่ระดับการเติมโลหะผสม Al-5%Ti แตกต่างกัน



รูปที่ 11 ขนาดเกรนเฉลี่ยของการปรับสภาพเฟส ที่มีลำดับขั้นแตกต่างกัน

ในการศึกษาลำดับขั้นตอนที่เหมาะสมในการปรับสภาพเกรนนั้น พบว่าการเติมโลหะแม่ Al-5%Ti-4%Sr-1%C ในปริมาณการเติม 1 wt.% ขนาดเกรนเล็กลงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพเกรน เนื่องจากการฟอร์มตัวของสารประกอบในโลหะแม่นั้น ประกอบด้วย $Al_4Si_4C_7$ และ SiC ซึ่งมีจุดหลอมเหลวสูง ทำให้ความสามารถในการละลายของธาตุคาร์บอนในน้ำโลหะหลอมเหลวต่ำ นอกจากนี้ยังพบว่าสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในโลหะแม่ Al-5%Ti-4%Sr-1%C ภายใต้งานวิจัยนี้ไม่ได้เกิดการฟอร์มตัวของสารประกอบ TiC เนื่องจากอุณหภูมิในการฟอร์มตัวของ TiC นั้นเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส [19-20]

จากเหตุผลดังกล่าวทำให้โลหะแม่ Al-5%Ti-4%Sr-1%C มีประสิทธิภาพในการปรับสภาพเกรนที่ต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณการเติมที่เท่ากันของธาตุไทเทเนียม 1 wt.% ผสมกับธาตุคาร์บอน 0.01 wt.% และธาตุสตรอนเทียม 0.04 wt.%



รูปที่ 12 โครงสร้างจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด และการใช้เทคนิค EDS เติม 1.5 wt.%Ti + 0.01 wt.%C

5. สรุปผลการทดลอง

ผลจากการศึกษาอิทธิพลของธาตุไทเทเนียมและธาตุสตรอนเทียมต่อประสิทธิภาพการปรับสภาพเกรนละเอียด และการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอน รวมทั้งขั้นตอนในการปรับสภาพของโลหะผสม Al-Ti, Al-C, Al-Sr และโลหะแม่ Al-5%Ti-4%Sr-1%C ในโลหะผสม Al-Si-Mg สามารถสรุปผลได้ว่าการเติมโลหะผสม Al-Ti + Al-C และ Al-Sr ส่งผลต่อประสิทธิภาพเกรนละเอียดที่

แตกต่างกัน ปริมาณการเติมที่เหมาะสมเท่ากับ 1 wt.% ของโลหะผสม Al-5%Ti ผสมกับคาร์บอน 0.01 wt.% และสตรอนเทียม 0.04 wt.% การเติมธาตุไทเทเนียมในปริมาณที่สูง 1.5 wt.% เกิดการฟอร์มตัวของเฟส $Al_4Si_4C_7$ และ เฟส $AlCO$ ในโครงสร้างจุลภาค ในขณะที่การปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอนมีขนาดและรูปร่างไม่แตกต่างกันมากนัก

ผลกระทบจากลำดับขั้นตอนในการปรับสภาพ พบว่าการเติมโลหะแม่ Al-5%Ti-4%Sr-1%C มีประสิทธิภาพในการปรับสภาพเกรนที่ต่ำกว่าการเติมธาตุไทเทเนียม 1 wt.% ผสมกับธาตุคาร์บอน 0.01 wt.% และสตรอนเทียม 0.04 wt.% ในขณะที่เฟสยูเทคติกซิลิคอนมีรูปร่างกลมมนทั้งหมด ผลกระทบของขนาดเกรนเฉลี่ยจากกระบวนการ $Gr \rightarrow Mo$ และกระบวนการ $Mo \rightarrow Gr$ มีความแตกต่างกันไม่มากนัก แต่การปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอนนั้น กระบวนการ $Gr \rightarrow Mo$ มีประสิทธิภาพในการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอนที่สูงกว่ากระบวนการ $Mo \rightarrow Gr$

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้ ผู้ทำการวิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่สนับสนุนงบประมาณสำหรับงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Limmaneevichitr, C., and Kunnam, P. Effect of Process Parameters on Morphology and Grain Refinement Efficiency of $TiAl_3$ and TiB_2 in Aluminum Casting. *Journal of Materials Science and Technology*, 2008; 24 (1).
- [2] Eidhed, K., Effects of Residual TiB_2 and $TiAl_3$ Nucleant on Grain-refinement of Recycled Al-Si Alloy Casting. The International Conference in Al alloy 9th, Brisbane, Australia, 2004
- [3] Limmaneevichitr, C., Patakham, U. and Kajornchaiyakul, J. Grain Refinement Mechanism in An Al-Si-Mg Alloy with Scandium. *Journal of Alloys and Compound*, 2012; 452: 117-186.
- [4] Liu, Y., Ding, C. and Li, Y-X. Grain Refining Mechanism of Al-3B Master Alloys on Hypoeutectic Al-Si Alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011; 21: 1435-1440.

- [5] Chen, Z., et al. Grain Refinement and Tensile Properties Improvement of Aluminum Foundry Alloys by Inoculation with Al-B Alloys. *Materials Science and Engineering*, 2012; A553: 32-36.
- [6] Birol, Y. AlB₃ Master Alloys to Grain Refine AlSi10Mg and AlSi12Cu Aluminum Foundry Alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2012; 13: 150-153.
- [7] John, E. G., Bernard, M. C. The Treatment of Liquid Aluminum-Silicon Alloys. American Foundrymen's Society, USA, 1990.
- [8] Shin, S.S., Kim, E.S., Yeom, G.Y., Lee, J.C. 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*, 2012; 532: 151-157.
- [9] Yang, C.Y., Lee, S.L., Lee, C.K., Lin, J.C. Effects of Sr and Sb Modifiers on the Sliding Wear Behavior of A356 Alloy under Varying Pressure and Speed Conditions. *Wear*, 2006; 261: 1348-1358.
- [10] Li, P.T., et al. Effects of trace C Addition on the Microstructure and Refining and Refining Efficiency of Al-Ti-B Master Alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011; 503: 286-290.
- [11] Birol, Y. Grain Refining Efficiency of Al-Ti-C Alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 2006; 422: 128-131.
- [12] Li, P., et al. Grain Refinement of A356 by Al-Ti-B-C Master Alloys and Its Effect on Mechanical Properties. *Materials and Design*, 2013; 47: 522-528.
- [13] G.S. Vinod kumar, G.S., et al., (2005). 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*, 2005, pp. 143-150.
- [14] Li, J.G., et al. 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*, 2002; A328: 169-176.
- [15] Lu, L. and Dahle, A.K. Effects of Sr and B Interactions in Hypoeutectic Al-Si Foundry Alloys. *Light Metal*, 2006; 807-812.
- [16] Liao, H. and Sun, G. Mutual Poisoning Effect Between Sr and B in Al-Si Casting Alloys. *Scripta Materialia*. 2003; 48: 1035-1039.
- [17] Lu, L. and Dahle, A.K. Effects of Combined Additions of Sr and AlTiB Grain Refiners in Hypoeutectic Al-Si Foundry Alloys. *Materials Science and Engineering A*, 2006; 435-436: 288-296.
- [18] Moldovan P. and Popescu, G. The Grain Refinement of 6063 Aluminium using Al-5Ti-1B and Al-3Ti-0.15C Grain Refiners. *Journal of The Minerals*, 2004; 11: 56-59.
- [19] Kerti I. Production of TiC Reinforced-Aluminium Composites with the Addition of Elemental Carbon. *Mater Letter*, 2005; 58: 795-800.
- [20] Flemings, C.M. Grain Refining of Al-4.5Cu Alloy by Adding an Al-TiC Master Alloy. *Metal Mater Trans A*, 1998; 707.