

ประสิทธิภาพและกลไกการเสื่อมสภาพของการใช้โลหะแม ชนิด Al-Ti-B ในอะลูมิเนียม-ซิลิคอนผสมหล่อเกรด 356 ในการปรับสภาพเกรนละเอียด

ชาวลิต ลิ้มมณีวิจิตร¹ และ วิทยา เอียดเหตุ²

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

การปรับสภาพเกรนละเอียดเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญมากในกระบวนการหล่ออะลูมิเนียมบริสุทธิ์และอะลูมิเนียมผสม เพราะทำให้งานหล่อดีขึ้นและลดการเกิดข้อบกพร่อง (casting defects) ต่าง ๆ ในงานหล่อ ทั้งนี้การปรับสภาพเกรนละเอียดโดยใช้โลหะแม่ (master alloy) ที่มีส่วนผสมหลักของอะลูมิเนียม-ไทเทเนียม-โบรอน เป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุด จุดมุ่งหมายงานวิจัยนี้คือการประเมินประสิทธิภาพของโลหะแม่ในการปรับสภาพเกรนละเอียดสำหรับอะลูมิเนียม-ซิลิคอนผสมหล่อเกรด ASTM 356 โดยพิจารณาถึงปริมาณการเติมโลหะแม่ และการค้ำน้ำโลหะหลังจากเติมโลหะแม่ ทั้งนี้พบว่าปริมาณการเติมโลหะแม่ที่มากขึ้นช่วยในการปรับสภาพเกรนให้ละเอียดขึ้นได้ ส่วนระยะเวลาหลังจากการเติมโลหะแม่มีความเหมาะสมในการปรับสภาพเกรนละเอียดหลังจากการเติมโลหะแม่อยู่ในช่วงตั้งแต่ 20 นาที แต่ไม่เกิน 60 นาที เพราะพบว่าหากเวลาน้อยเกินไปทำให้ประสิทธิภาพในการลดขนาดเกรนยังไม่ถึงจุดสูงสุด แต่หากเวลาในการค้ำน้ำโลหะนานกว่านี้จะทำให้ประสิทธิภาพของโลหะแม่ต่อการปรับสภาพเกรนละเอียดลดลง ซึ่งมีผลทำให้เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น ทั้งนี้สามารถอธิบายกลไกการเสื่อมประสิทธิภาพของโลหะแม่โดยทดลองค้ำน้ำโลหะไว้ในเบ้าเหล็กเป็นเวลานานต่างกัน แล้วปล่อยให้แข็งตัวที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งพบว่าการตกตะกอนของอนุภาค $TiAl_3$ และ TiB_2 เป็นสาเหตุหลักของการเสื่อมประสิทธิภาพของโลหะแม่ อย่างไรก็ตาม การกวนเพื่อให้อนุภาคที่เกิดการตกตะกอนกลับมาระจายตัวอยู่ในชิ้นงานช่วยให้การปรับสภาพเกรนละเอียดกลับดีขึ้นในระดับหนึ่งเท่านั้น

คำสำคัญ : การปรับสภาพเกรนละเอียด / อะลูมิเนียม - ซิลิคอนผสมหล่อ / โลหะแม่ / การเสื่อมประสิทธิภาพของโลหะแม่

¹ อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

² นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานและวัสดุ

The Efficiency and Fading Mechanism in Using Master Alloy of Al-Ti-B in Aluminum-Silicon Alloy Casting Grade 356 for Grain Refinement

Chaowalit Limmaneevichitr ¹ and Witthaya Eidhed ²

King Mongkut's University of Technology, Bangmod, Toongkru, Bangkok 10140

Abstract

Grain refinement plays an important role in both aluminum and aluminum alloy casting in improving mechanical properties and decreasing some casting defects. Master alloy containing Aluminum-Titanium-Boron (Al-Ti-B) is the preferred choice for grain refiners. This research is to evaluate the efficiency of Al-Ti-B grain refiner in Aluminum-Silicon casting Grade 356 in terms of the amount needed and holding time. It was found that using greater amount of Al-Ti-B grain refiner could decrease the grain size to overcome the poisonous of silicon. The appropriate holding time to gain the highest efficiency, e.g. the critical time, in this study falls between 20 to 60 minutes. If holding time is too short, the efficiency of grain refiner may not reach the optimum point. In contrast, if the holding time is too long, the grain size becomes larger again. One of major fading mechanisms, particles settling, was demonstrated by holding the melt after adding master alloy for a long period of time before solidifying and cooling down to room temperature. It was found that the settlement of both $TiAl_3$ and TiB_2 particles should be the major reason for this fading mechanism. However, melt agitation can bring the particles to the melt and later acts as heterogeneous nucleation sites to some limited extents.

Keywords : Grain Refinement / Aluminum-Silicon Alloy Casting / Master Alloy / Fading

¹ Lecturer, Department of Production Engineering.

² Graduate Student, Materials Technology Program, School of Energy and Materials.

1. บทนำ

กลไกของการปรับสภาพเกรนละเอียด (Grain Refinement)

ขนาดของเกรนมีความสำคัญมากต่อสมบัติด้านต่างๆ ของงานหล่อ เช่น ทำให้ความแข็งแรงสูงขึ้น มีส่วนผสมทางเคมีที่สม่ำเสมอ และยังช่วยลดโอกาสเกิดจุดเสียดต่างๆ ในงานหล่อ เช่น ลดการแตกร้าวในขณะร้อน (hot tearing) [1] ลดการเกิดรูพรุน และเพิ่มความสามารถในการป้อนเติม [2] เป็นต้น การปรับสภาพเกรนละเอียดในงานอะลูมิเนียม-ซิลิคอนผสมหล่อโดยการใช้โลหะแม่ (master alloy) ที่มีส่วนผสมของอะลูมิเนียม-ไทเทเนียม-โบรอน (Al-Ti-B) เป็นหนึ่งในวิธีการที่มีการใช้งานในอุตสาหกรรมอะลูมิเนียมหล่อที่ได้รับความนิยมทั่วโลก อย่างไรก็ตาม กลไกการปรับสภาพเกรนและเทคนิคเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของการปรับสภาพเกรนละเอียดยังอยู่ในความสนใจของแวดวงทางวิชาการอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากยังมีปัญหาที่เกิดขึ้นในการใช้งานจริงอยู่ เช่น หากเติมโลหะแม่ในปริมาณน้อยเกินไปอาจไม่เพียงพอต่อการชดเชยการเกิดการเสื่อมสภาพ และหากเติมโลหะแม่มากเกินไปเพื่อป้องกันการเกิดการเสื่อมสภาพอาจทำให้อนุภาคที่ทำหน้าที่เป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดผลึกซึ่งมีความแข็งแรงสูงและเปราะเกิดเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดการแตกร้าวในงานได้ เป็นต้น โดยปัญหาเหล่านั้นมีโอกาสเกิดรุนแรงขึ้นหากเติมโลหะแม่ในงานหล่อในปริมาณสูงเกินไป

โครงสร้างจุลภาคของโลหะแม่ชนิด Al-Ti-B ประกอบด้วยเฟสของสารประกอบเชิงโลหะ (intermetallic phase) 2 ชนิดคือ อนุภาคของ $TiAl_3$ และ TiB_2 บนพื้นของโครงสร้างที่เป็นอะลูมิเนียม [3] ซึ่งอนุภาคทั้งสองเกิดจากการรวมตัวของไทเทเนียมกับอะลูมิเนียม และไทเทเนียมกับโบรอนตามลำดับ โดยอนุภาคทั้งสองมีบทบาทในการเกิดเป็นนิวเคลียสแบบ heterogeneous nucleation ในขณะแข็งตัว นอกจากนี้อนุภาค $TiAl_3$ และ TiB_2 มีขนาดและลักษณะการกระจายตัวที่แตกต่างกันออกไปตามกระบวนการผลิตและประเภทของโลหะแม่ [3]-[5] ทฤษฎีที่ใช้ในการอธิบายกลไกในการปรับสภาพเกรนละเอียดในปัจจุบันมี 4 ทฤษฎีหลักๆ ทฤษฎีแรกคือ Peritectic Hulk Theory [6] ซึ่งมีความเชื่อว่า $TiAl_3$ เป็นจุดเริ่มของการเกิดผลึกที่ดีกว่า TiB_2 ส่วนโบรอนนั้นมีความสำคัญเพราะทำให้ได้ TiB_2 ซึ่งช่วยให้อนุภาคของ $TiAl_3$ สลายตัวช้าลง และเมื่อ $TiAl_3$ เกิดการสลายตัวทำให้ได้ปฏิกิริยา Peritectic ในเปลือกบางของ TiB_2 ซึ่งก็คือได้ผลเป็น α -Al และเป็นจุดเริ่มต้นของผลึก ทฤษฎีที่สองคือ Boride/Carbide Theory [7], [8] โดยอธิบายว่ากระบวนการปรับสภาพเกรนละเอียดเริ่มจากอนุภาคของ TiB_2 หรือ TiC ขึ้นอยู่กับประเภทของโลหะแม่ที่เลือกใช้ ในกรณีที่นิวเคลียสเริ่มเกิดจากอนุภาคของ TiB_2 พบว่ามีชั้นของ $TiAl_3$ เคลือบอยู่ซึ่งจะทำให้ α -Al เติบโตได้ง่าย ทฤษฎีที่สามคือ hypernucleation Theory [9] โดยจุดเริ่มของการเกิดผลึกเกิดจาก TiB_2 ต่อมาไทเทเนียมเกิดการแยกตัวของส่วนผสมทางเคมีจนได้สัดส่วนของส่วนผสมทางเคมีที่เหมาะสมที่สุดในการเกิดจุดเริ่มผลึกของ α -Al แต่ทฤษฎีนี้ยังไม่มีการทดลองที่เป็นหลักฐานเพื่อยืนยันผล และทฤษฎีที่สี่คือ Duplex Nucleation Theory [10], [11] ซึ่งมีอนุภาคของ $TiAl_3$ ที่เกิดขึ้นบนอนุภาคของอนุภาค TiB_2 โดยไทเทเนียมเกิดการแยกตัวของส่วนผสมทางเคมีในอนุภาคของ TiB_2 เพื่อเกิดเป็น $TiAl_3$ บนพื้นผิวซึ่งต่อมาเป็นจุดเริ่มของการเกิดผลึกของอะลูมิเนียม

มีงานวิจัยเพื่อหาส่วนผสมและเวลาค้ำน้ำโลหะที่เหมาะสมในการปรับสภาพเกรนละเอียดของอะลูมิเนียม-ซิลิคอนผสมหล่อ [12] โดยพบว่าโลหะแม่ชนิด Al-5Ti มีประสิทธิภาพในการปรับสภาพเกรนละเอียดน้อยกว่าโลหะแม่ชนิด Al-5Ti-1B เมื่อเติมลงในอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ 99.7% ที่อุณหภูมิ 750 °C และ 840 °C พบว่าขนาดเกรนที่ได้จากการเติมโลหะแม่ชนิด Al-5Ti มีขนาดเกรนละเอียดในช่วงแรก แต่ต่อมาขนาดเกรนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาค้ำน้ำโลหะ (holding time) เพิ่มขึ้นเป็นเวลา 120 นาที ในขณะที่โลหะแม่ชนิด Al-5Ti-1B ขนาดเกรนจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เมื่อค้ำน้ำโลหะไว้ 120 นาทีเท่ากัน และพบว่าอุณหภูมิค้ำน้ำโลหะที่ประมาณ 840 °C จะเกิดการเชื่อมสภาพได้ง่ายกว่าที่อุณหภูมิ 750 °C แสดงให้เห็นว่าโบรอนที่ผสมอยู่ในโลหะแม่มีผลต่อการต้านการเชื่อมประสิทธิภาพของการปรับสภาพเกรนละเอียด

Kori และคณะ [13] ทดลองเติมโลหะแม่ชนิด Al-5Ti-1B ในปริมาณ 0.2% โดยน้ำหนักลงในอะลูมิเนียม-ซิลิคอนผสมหล่อ ที่มีปริมาณของซิลิคอนต่างกันคือ 0.2, 2, 7, 10, 12 และ 30 เปอร์เซ็นต์ซิลิคอน พบว่าที่ปริมาณซิลิคอน 0.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีขนาดของเกรนละเอียดที่สุดในทุกเวลาค้ำน้ำโลหะ ในกรณีที่มีปริมาณซิลิคอนสูงขึ้นส่งผลให้เกรนมีขนาดใหญ่มากขึ้น โดยเมื่อมีซิลิคอนผสมเกิน 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักทำให้อิทธิพลของการเชื่อมสภาพมีผลมากขึ้นอย่างรวดเร็ว กล่าวคือขนาดเกรนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อค้ำน้ำโลหะไว้ในเบ้า จึงสรุปได้ว่าซิลิคอนเป็นธาตุที่มีผลเสียต่อการปรับสภาพเกรนละเอียด นอกจากนี้การเติมโลหะแม่ชนิด Al-5Ti-1B ในระดับที่ต่างกันคือ 0.2, 0.4 และ 0.6 เปอร์เซ็นต์ ลงในอะลูมิเนียมผสม 7 เปอร์เซ็นต์ซิลิคอน (Al-7Si) พบว่าการเติมโลหะแม่ 0.6 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักทำให้ขนาดของผลึกละเอียดที่สุดประมาณ 150 ไมครอนในทุกเวลาค้ำน้ำโลหะ อาจกล่าวได้ว่าผลเสียที่เกิดจากซิลิคอนจะถูกกำจัดได้โดยการเติมโลหะแม่ในปริมาณมากๆ เพื่อทำให้เกิดนิวเคลียสที่มากพอ จากผลการวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง [4], [13]-[15] พบว่า เมื่อค้ำน้ำโลหะนานๆ ทำให้เกิดการเชื่อมประสิทธิภาพ ซึ่งอาจมีสาเหตุจากอิทธิพลของธาตุผสมที่มีผลเสียจากการตกตะกอน (settling down) และการรวมกลุ่ม (agglomerating) ของอนุภาคที่ทำหน้าที่เป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดผลึก [4] จึงเห็นได้ว่าการปรับสภาพเกรนละเอียดในงานหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนจำเป็นต้องอาศัยความรู้และความเข้าใจในกลไกการเกิดผลึกและอิทธิพลของผลกระทบบ้าง อื่นๆ อีกทั้งต้องเข้าใจกลไกของการเชื่อมสภาพของโลหะแม่ให้ดียิ่งขึ้น คณะผู้วิจัยจึงทำการทดลองเพื่อศึกษากลไกของการเชื่อมสภาพของโลหะแม่ไว้ในงานวิจัยนี้ด้วย ซึ่งเป็นที่น่าสังเกตว่ายังไม่มีการอธิบายหรือมีหลักฐานจากการทดลองใดยืนยันว่าหนึ่งในกลไกหลักของการเชื่อมประสิทธิภาพของโลหะแม่เกิดจากการตกตะกอนของอนุภาค

2. วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วนคือ การศึกษาการปรับสภาพเกรนละเอียด และการทดลองการเชื่อมสภาพของโลหะแม่ของอะลูมิเนียม-ซิลิคอนผสมหล่อเกรด 356 ทั้งนี้การเลือกใช้อะลูมิเนียมผสมเกรดนี้เพราะเป็นเกรดที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากมีสมบัติทางกลที่ดี

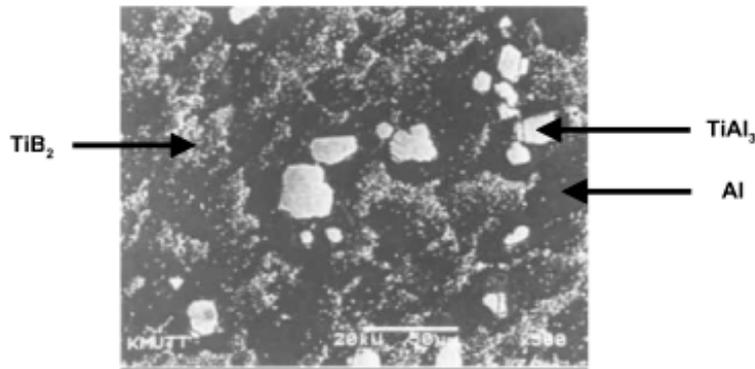
และยังมีความเหมาะสมกับกรรมวิธีการหล่อหลายประเภท ทั้งนี้อะลูมิเนียมที่ใช้ในการวิจัยทั้งหมดมีส่วนผสมทางเคมีเดียวกันดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์โดย Emission Spectrometer ส่วนโลหะแม่ที่ใช้เพื่อการปรับสภาพเกรนละเอียดนี้นำเข้าจากประเทศอังกฤษ ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีโดยใช้ Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer แสดงไว้ในตารางที่ 2 ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค และส่วนผสมทางเคมีของอนุภาคในโลหะแม่ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดที่มี Energy Dispersive Spectrometer แสดงไว้ในรูปที่ 1 โดยพบว่าที่บริเวณกึ่งกลางของอนุภาคที่มีลักษณะเป็นแผ่นคืออนุภาคของ $TiAl_3$ และผลการตรวจสอบที่บริเวณอนุภาคสีดำขนาดเล็กที่อยู่โดยรอบอนุภาค $TiAl_3$ คืออนุภาคของ TiB_2 ส่วนบริเวณโครงสร้างพื้นพบว่าเป็นอะลูมิเนียมอยู่เป็นหลัก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไทเทเนียมกับโบรอนที่มีอยู่ในโลหะแม่อยู่ในรูปของอนุภาค $TiAl_3$ และอนุภาค TiB_2 และเมื่อนำโลหะแม่มากัดกรดแบบลึก (deep etching) โดยใช้ HCl 25% ในน้ำกลั่น พบว่าอนุภาค TiB_2 ที่มีขนาดประมาณ 2-5 ไมครอนมีการกระจายต่อเนื่องกันแบบโครงสร้างตาข่ายโดยรอบอนุภาค $TiAl_3$ ซึ่งมีขนาดประมาณ 30-50 ไมครอน ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2 ทั้งนี้มีผู้วิจัยจำนวนมากได้ศึกษาลักษณะที่แตกต่างกันของการกระจายตัวของอนุภาคหลักทั้งสองต่อประสิทธิภาพของโลหะแม่ในการปรับสภาพเกรนละเอียด [3], [4], [7], [14]

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมที่ใช้ในการทดลอง

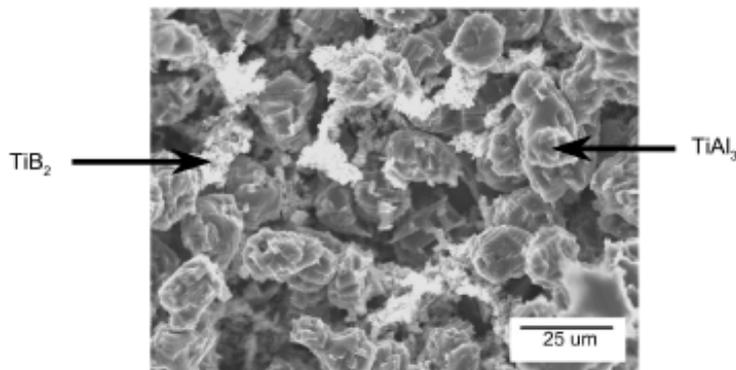
ชนิดโลหะผสม	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni
โลหะผสมที่ใช้ในการทดลอง	7.174	0.539	0.062	0.070	0.279	0.005
มาตรฐานเกรด 356	6.5-7.5	0.6 max	0.25 max	0.35 max	0.20-0.45	-
	Zn	Sn	Pb	Ti	Cr	Al
โลหะผสมที่ใช้ในการทดลอง	0.056	0.007	0.027	0.051	0.011	Bal.
มาตรฐานเกรด 356	0.35 max	-	-	0.25 max	-	Bal.

ตารางที่ 2 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะแม่

Ti	B	Fe	Zn	Mg	Ga	Cr	Zr	V	Al
3.221	0.578	0.115	0.041	0.003	0.006	0.002	0.045	0.101	Bal.



รูปที่ 1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะแม่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด



รูปที่ 2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะแม่ที่ได้จากการ deep etching ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

2.1 การศึกษาประสิทธิภาพในการปรับสภาพเกรนละเอียดของอะลูมิเนียม-ซิลิคอนผสมหล่อเกรด 356

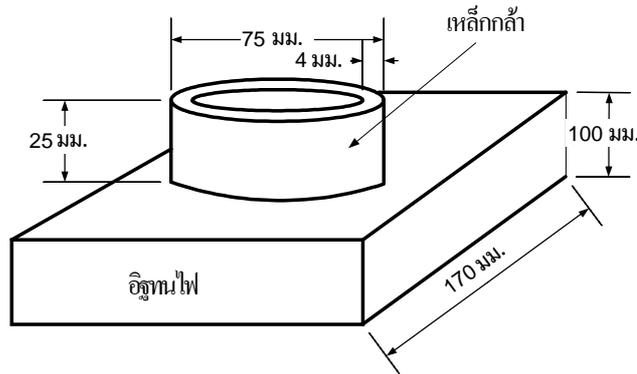
ทั้งนี้สภาวะที่ใช้ในการทดลองคือ การหลอมอะลูมิเนียมโดยใช้เตาไฟฟ้าชนิดขดลวด ความต้านทานโดยไม่ได้ใช้ก๊าซเฉื่อยปกคลุม โดยหลอมอะลูมิเนียมเกรด 356 ขนาด 25 กิโลกรัม ในแต่ละระดับของปริมาณโลหะแม่ที่เติมลงไป ซึ่งในการวิจัยนี้คือการเติมโลหะแม่ลงไป 2 และ 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยอุณหภูมิของน้ำโลหะอยู่ที่ประมาณ 760 °C เวลาในการค้ำน้ำโลหะ หลังจากเติมโลหะแม่ในแต่ละส่วนผสมคือ 5, 20, 40, 60 และ 120 นาที แบบหล่อที่ใช้ในการศึกษาเป็นการหล่อในวงเหล็ก (ring test) ซึ่งดัดแปลงมาจากบริษัท KB alloys [13] ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3 ทั้งนี้ก่อนการเทน้ำโลหะจะต้องเผาวงเหล็กให้มีอุณหภูมิถึง 250 °C ด้วยโดยใช้เปลวไฟจากก๊าซหุงต้ม ก่อนทำการเทน้ำโลหะครั้งแรกมีการกำจัดไฮโดรเจนออกจากน้ำโลหะโดยใช้ก๊าซอาร์กอนเป่าลงในบ้า ขณะหลอมเหลวเป็นเวลา 3 นาที ก่อนการเทน้ำโลหะเพื่อให้การไล่ไฮโดรเจนที่มีอยู่ออก และยังเป็น การกวนอนุภาค $TiAl_3$ และ TiB_2 ให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันซึ่งเหตุผลดังกล่าวได้อธิบายไว้ใน อยู่ในหัวข้อ 2.2 อุณหภูมิเทน้ำโลหะควบคุมไว้คงที่ ที่ 680 °C

เมื่อชิ้นงานที่ได้จากการหล่อในวงเหล็กเย็นตัวลงมาถึงอุณหภูมิห้องจึงนำมาแยกเอาวงเหล็กออก เพื่อนำเอาชิ้นงานอะลูมิเนียมที่ได้มาตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (macrostructure) โดยนำชิ้นงานด้านที่สัมผัสกับอิฐทนไฟมาขัดด้วยกระดาษทรายจนถึงความละเอียด 800 grit แล้วกัดผิวหน้าด้วยสารละลายที่มีส่วนผสมทางเคมีของ HCl 45 มล., HNO₃ 15 มล., HF 15 มล. และน้ำกลั่น 25 มล. เพื่อเปรียบเทียบลักษณะเกรน และวัดขนาดเกรนด้วยวิธี Linear Intercept

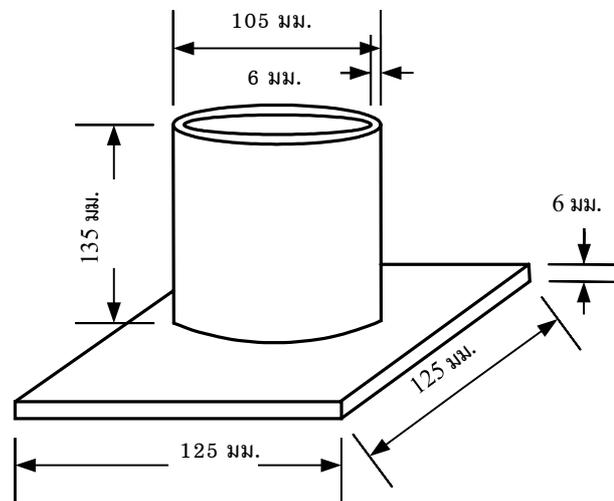
2.2 การทดลองการเชื่อมประสิทธิภาพของโลหะแมกนีเซียม Al-Ti-B

โดยใช้แบบหล่อเหล็กทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.5 ซม. และสูง 13.5 ซม. ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4 ทั้งนี้ผนังด้านในของแบบหล่อเหล็กมีการเคลือบด้วยผงแกรไฟต์ผสมกับแอลกอฮอล์ก่อนนำมาใช้เป็นภาชนะในการหลอมอะลูมิเนียมเกรด 356 น้ำหนักประมาณ 2.93 กิโลกรัมที่มีส่วนผสมเดียวกับการทดลองที่ผ่านมาในหัวข้อ 2.1 โดยหลอมในเตาอบไฟฟ้าชนิดความต้านทาน โดยไม่ได้ใช้ก๊าซเฉื่อยปกคลุมที่อุณหภูมิเตา 680 °C เมื่อมีการหลอมโดยสมบูรณ์จึงเติมฟลักซ์เพื่อใช้ในการกวาดขี้โลหะออก จากนั้นจึงเติมโลหะแมกนีเซียมในปริมาณ 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แล้วจึงไล่ไฮโดรเจนที่ละลายอยู่ในอะลูมิเนียมเหลวโดยใช้ก๊าซอาร์กอนเป่าลงในอะลูมิเนียมหลอมเหลวที่อยู่ในแบบหล่อโลหะเป็นเวลา 3 นาที ทั้งนี้มีการทำซ้ำการทดลองโดยค้ำน้ำโลหะไว้ในเตาเป็นเวลา 0, 20, 40, 60, 80, 100 และ 120 นาที โดยเมื่อครบกำหนดเวลาแล้วจึงนำออกมาแล้วปล่อยให้แข็งตัวในอากาศ โดยไม่มีการกวนของน้ำโลหะจนอุณหภูมิลดลงถึงอุณหภูมิห้อง ส่วนอีกหนึ่งชุดการทดลองเป็นการค้ำน้ำโลหะไว้ในเตาเป็นเวลา 120 นาที ที่อุณหภูมิประมาณ 680 °C จากนั้นให้มีการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 700 °C เพื่อเพื่อการลดลงของอุณหภูมิ จากนั้นให้มีการกวนน้ำโลหะด้วยก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 3 นาที ก่อนนำแบบหล่อเหล็กทรงกระบอกออกมาให้แข็งตัวโดยเริ่มที่อุณหภูมิประมาณ 680 °C จากนั้นนำเอาแบบหล่อเหล็กมาผ่าครึ่งและแยกเอาชิ้นงานอะลูมิเนียมออกมาเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีและโครงสร้างมหภาค

นำชิ้นงานอะลูมิเนียมที่ได้มาตรวจสอบโครงสร้างมหภาค โดยขัดบริเวณส่วนกลางหน้าผาของชิ้นงานด้วยกระดาษทรายจนถึงความละเอียด 800 grit แล้วกัดผิวหน้าด้วยสารละลายที่มีส่วนผสมทางเคมีของ HCl 45 มล., HNO₃ 15 มล., HF 15 มล. และน้ำ 25 มล. เพื่อเปรียบเทียบลักษณะเกรน และวัดขนาดเกรนด้วยวิธี Linear Intercept เช่นเดียวกับกรณีที่ 2.1 ส่วนชิ้นงานอีกครั้งหนึ่งใช้เพื่อการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี โดยพิจารณาปริมาณของธาตุไทเทเนียมที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากระยะความสูงจากด้านล่างของแบบหล่อรูปทรงกระบอกที่ระยะ 2, 4, 6, 8 และ 10 ซม. ทั้งนี้การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีใช้ Emission Spectrometer



รูปที่ 3 แบบหล่อในวงเหล็กตัดแปลงจากของบริษัท KB alloys [13]



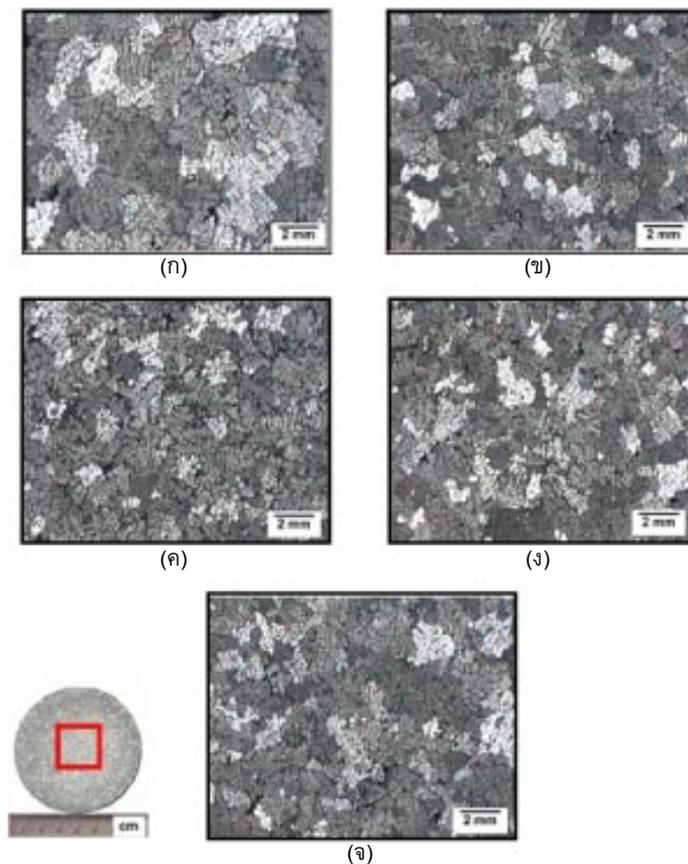
รูปที่ 4 แบบหล่อเหล็กรูปทรงกระบอก

3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

3.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของการปรับสภาพเกรนละเอียดของอะลูมิเนียม-ซิลิคอนผสมหล่อ

ผลของโครงสร้างมหภาคของชิ้นงานที่ได้จากการปรับสภาพเกรนละเอียดโดยใช้โลหะแม่ 2 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักแสดงไว้ในรูปที่ 5 พบว่าการเติมโลหะแม่ส่งผลทำให้ขนาดเกรนของอะลูมิเนียม-ซิลิคอนผสมหล่อเกรด 356 ละเอียดกว่าชิ้นงานที่ไม่ปรับสภาพเกรนละเอียดซึ่งมีขนาดเกรนเฉลี่ยประมาณ 2100 ไมครอน อย่างไรก็ตาม เมื่อค้ำน้ำโลหะไว้เป็นเวลานานหลังจากเติมโลหะแม่ทำให้ขนาดเกรนเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็น 790, 658, 730 และ 840 ไมครอน ที่เวลาค้ำน้ำโลหะ 20, 40, 60 และ 120 นาที ตามลำดับ และผลจากการเติมโลหะแม่ในปริมาณ 4 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักทำให้มีขนาดเกรนเฉลี่ยประมาณ 680, 460, 590 และ 720 ไมครอน ที่เวลาค้ำน้ำโลหะ 20, 40, 60

และ 120 นาที ตามลำดับ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6 จากผลการทดลองพบว่า การเติมโลหะแม่สามารถช่วยในการปรับปรุงสภาพเกรนของอะลูมิเนียม-ซิลิคอนผสมหล่อให้ละเอียดขึ้นได้อย่างมาก และการเติมโลหะแม่ในปริมาณมากขึ้นทำให้ได้ขนาดเกรนที่ละเอียดมากขึ้น เนื่องจากผลเสียที่เกิดจากซิลิคอนถูกกำจัดหรือทำให้ผลเสียนั้นลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่อธิบายว่า หากเติมโลหะแม่ปริมาณไม่มากพอจะทำให้ซิลิคอนรวมตัวกับไทเทเนียมกลายเป็น Titanium Silicide เคลือบบนผิวของ $TiAl_3$ และมีผลทำให้ประสิทธิภาพในการเกิดผลึกของ $TiAl_3$ ลดลง จึงส่งผลให้ขนาดเกรนที่ได้ละเอียดไม่เพียงพอ [13] นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณไทเทเนียมที่มากับอะลูมิเนียมเกรด 356 ที่ใช้หลอมนี้ที่มีสูงถึง 0.051 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไม่มีอิทธิพลในการช่วยปรับปรุงสภาพเกรนละเอียด

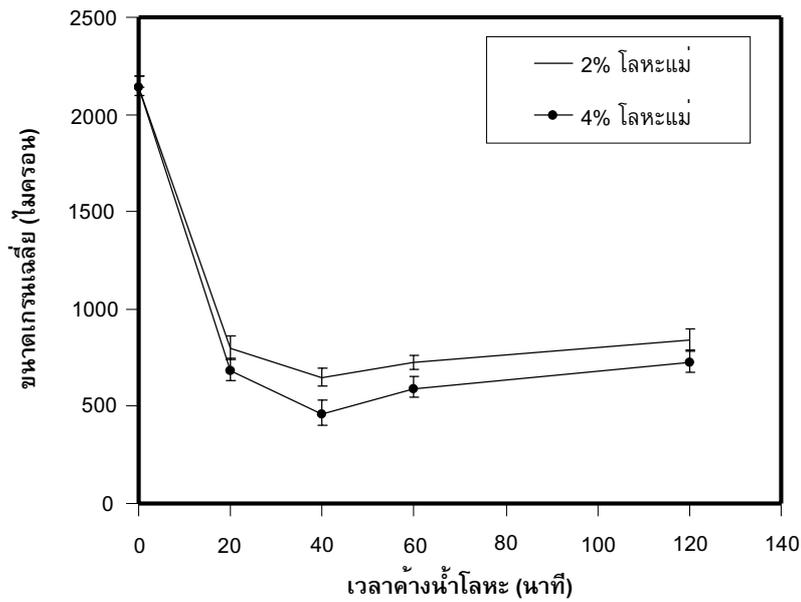


รูปที่ 5 โครงสร้างมหภาคของอะลูมิเนียม-ซิลิคอนผสมหล่อเกรด 356 (ก) ไม่เติมโลหะแม่ และเติมโลหะแม่ 2% โดยน้ำหนักโดยมีเวลาดำน้ำโลหะที่ (ข) 20 นาที (ค) 40 นาที (ง) 60 นาที (จ) 120 นาที

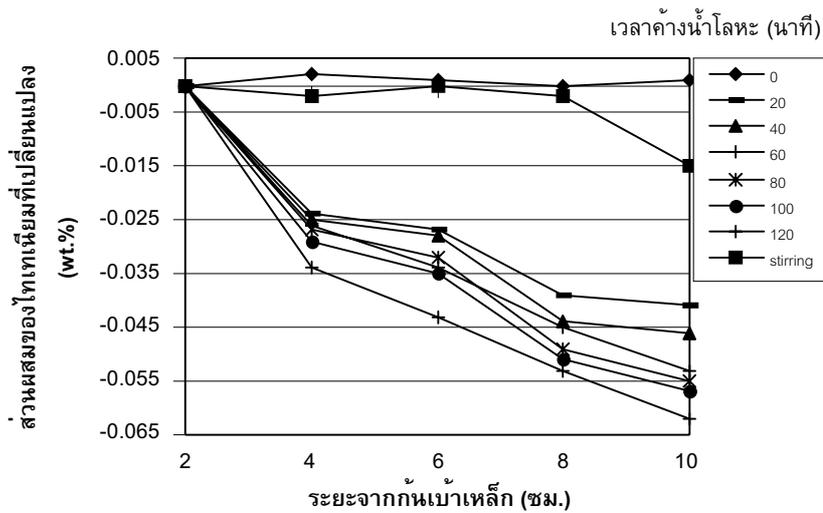
3.2 ผลจากการทดลองเพื่อหากลไกของการเสื่อมประสิทธิภาพของโลหะแม่

การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีโดยน้ำหนักของชิ้นทดสอบที่ได้จากการหลอมและแข็งตัวในเบ้าเหล็กที่ตำแหน่งทั้ง 4 คือ 2, 4, 6, 8 และ 10 ซม. จากส่วนล่างของชิ้นงานตัวอย่าง และทำการทดลองซ้ำโดยใช้เวลาการค้ำน้ำโลหะหลังการเติมโลหะแม่ที่ต่างกันคือ 20, 40, 60, 80, 100 และ 120 นาที พบว่าปริมาณไทเทเนียมบริเวณส่วนบนของชิ้นงานตัวอย่างลดลงอย่างมาก ดังแสดงไว้ในรูปที่ 7 ซึ่งปริมาณไทเทเนียมที่แตกต่างกันมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขนาดเกรนดังจะอธิบายต่อไป

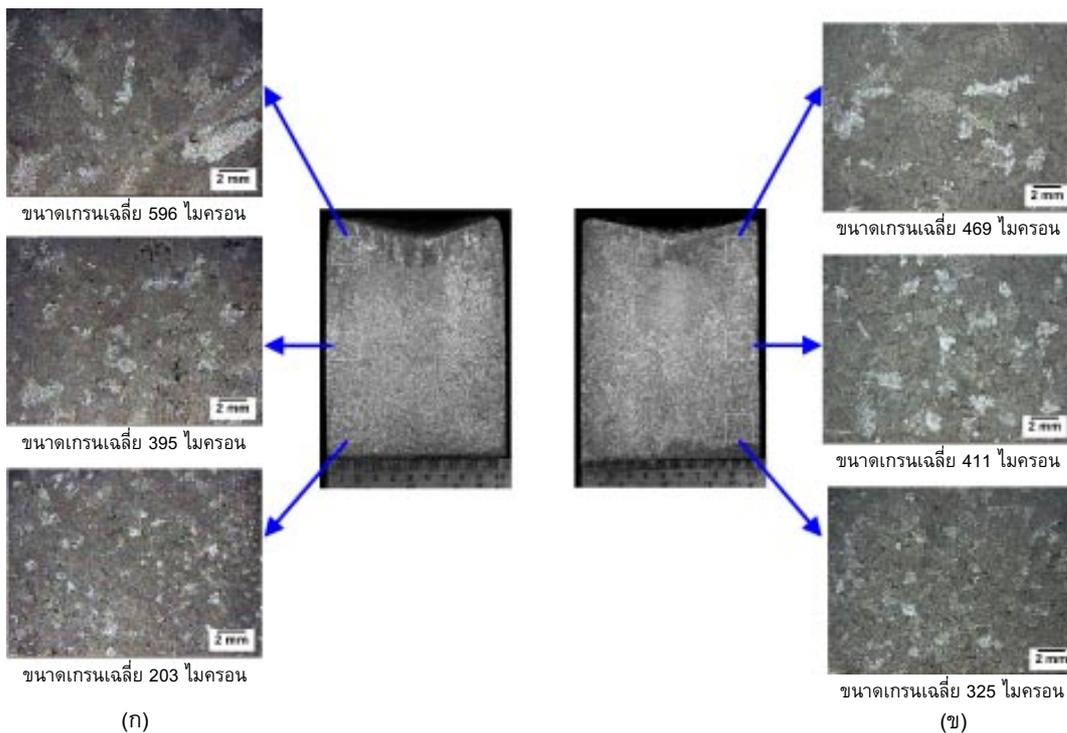
ตัวอย่างของการทดลองเติมโลหะแม่ที่ระดับ 4 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก เมื่อค้ำน้ำโลหะไว้ในบ้านานถึง 120 นาที ที่อุณหภูมิประมาณ 680 °C ก่อนปล่อยให้เกิดการแข็งตัวในแบบหล่อรูปทรงกระบอก พบว่าส่วนผสมทางเคมีของไทเทเนียมมีค่าดังนี้คือ 0.181, 0.147, 0.138, 0.128 และ 0.119 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ที่ตำแหน่ง 2, 4, 6, 8 และ 10 ซม. จากส่วนล่างของแบบหล่อเหล็ก รูปทรงกระบอกตามลำดับ และพบว่าปริมาณของไทเทเนียมที่มากกว่าสอดคล้องกับขนาดเกรนที่ละเอียดขึ้นโดยส่วนล่างของชิ้นงานตัวอย่างมีขนาดเกรนที่ละเอียดกว่า (ค่าเฉลี่ยคือ 203 ไมครอน) ส่วนบนสุดที่ศึกษา (ค่าเฉลี่ยคือ 596 ไมครอน) ดังโครงสร้างมหภาคที่แสดงในรูปที่ 8 (ก) ซึ่งแสดงว่าอนุภาคต่างๆ ภายในโลหะแม่จะทำให้เกิดการจมลงจนทำให้ส่วนล่างมีอนุภาคของ $TiAl_3$ และ TiB_2 อยู่จำนวนมากจนส่งผลให้ได้เกรนปริมาณมาก ในขณะที่ส่วนบนของชิ้นงานมีการสูญเสียอนุภาคที่ช่วยในการปรับสภาพเกรนไปเนื่องจากเกิดการจมลง ทั้งนี้เพราะความแตกต่างของความหนาแน่นที่แตกต่างกัน กล่าวคืออะลูมิเนียมมีความหนาแน่น 2.7 g/cc $TiAl_3$ มีความหนาแน่น 4.51 g/cc และ TiB_2 มีความหนาแน่น 4.52 g/cc [4] และจากการทดลองพบว่าหากกวนน้ำโลหะด้วยการพ่นก๊าซอาร์กอนหรือการกวนแบบปกติ จะทำให้อนุภาคภายในเกิดการกระจายตัวและจะทำให้ประสิทธิภาพของการปรับสภาพเกรนละเอียดกลับมาอีกครั้ง [4] ดังแสดงในรูปที่ 8 (ข) ซึ่งเป็นการทดลองซ้ำโดยเป็นการเติมโลหะแม่ที่ระดับ 4 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก และค้ำน้ำโลหะไว้ในบ้านานถึง 120 นาที ที่อุณหภูมิประมาณ 680 °C จากนั้นให้มีการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 700 °C เพื่อเพื่อการลดลงของอุณหภูมิจากนั้นให้มีการกวนน้ำโลหะด้วยก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 3 นาทีก่อนปล่อยให้แข็งตัวก่อนนำเบาเหล็กออกมาให้แข็งตัวโดยเริ่มที่อุณหภูมิประมาณ 680 °C พบว่าขนาดเกรนมีการกระจายตัวที่ดีขึ้น กล่าวคือความแตกต่างระหว่างขนาดเกรนที่ส่วนบนสุด (ค่าเฉลี่ยคือ 469 ไมครอน) เปรียบเทียบกับขนาดเกรนที่ตำแหน่งล่างสุด (ค่าเฉลี่ยคือ 325 ไมครอน) ไม่แตกต่างกันมาก อย่างไรก็ตาม แม้ว่าการกวนจะช่วยให้การกระจายตัวของขนาดเกรนดีขึ้นและยังทำให้โครงสร้างเกรนส่วนบนเปลี่ยนสภาพจากการเป็นโครงสร้างแบบ columnar ในกรณีของการไม่มีการกวน ไปเป็นโครงสร้าง equiaxed ในกรณีของการกวน จึงสามารถสรุปได้ว่าการกวนสามารถช่วยในการปรับสภาพเกรนได้บ้าง แต่ยังมีเหตุผลอย่างอื่นที่ทำให้ประสิทธิภาพของการปรับสภาพเกรนละเอียดลดต่ำลง ทั้งนี้จึงเป็นประเด็นที่ผู้วิจัยต้องการศึกษาเทคนิคใหม่ในการทำให้เวลาวิกฤตของการทำให้อนุภาคของ $TiAl_3$ และ TiB_2 มีประสิทธิภาพในการเป็นจุดเริ่มของการเกิดเกรนได้อย่างรวดเร็วที่สุด เพื่อเลี่ยงการเกิดการเสื่อมประสิทธิภาพของอนุภาคเหล่านั้น



รูปที่ 6 ขนาดเกรนเฉลี่ยของการปรับสภาพเกรนละเอียด ที่ระดับการเติมโหละแม่ 2 และ 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 7 ส่วนผสมทางเคมีของไทเทเนียม (wt. %) ที่ตำแหน่งต่างๆ เมื่อเทียบกับส่วนล่างของชั้นงาน (มีปริมาณไทเทเนียมมากที่สุด) ในแบบหล่อรูปทรงกระบอกไปจนถึงส่วนบนในการหล่อ อะลูมิเนียม-ซิลิคอนผสมเกรด 356 ที่เติมโหละแม่ 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 8 โครงสร้างมหภาคของอะลูมิเนียม-ซิลิคอนผสมหล่อเกรด 356 ที่เติมโลหะแม่ 4 % โดยน้ำหนัก ได้จากการปล่อยให้แข็งตัวในเบ้าเหล็กโดยค้ำน้ำโลหะ 120 นาที (ก) ไม่กวน (ข) กวนก่อนเทน้ำโลหะ

4. สรุปผลการทดลอง

ผลการวิจัยนี้แสดงถึงประสิทธิภาพของการปรับปรุงสภาพเกรนละเอียดโดยใช้โลหะแม่ชนิด Al-Ti-B ในอะลูมิเนียม-ซิลิคอนผสมหล่อเกรด 356 และกลไกของการเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นเมื่อมีการค้ำน้ำโลหะหลังจากเติมโลหะแม่ไว้เป็นเวลานาน โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

4.1 การเติมโลหะแม่ช่วยทำให้ขนาดของเกรนของอะลูมิเนียม-ซิลิคอนผสมหล่อละเอียดขึ้นทั้งในระดับ 2 และ 4 เปอร์เซนต์ ทั้งนี้แม้ว่าซิลิคอนเป็นธาตุที่ส่งผลเสียต่อการปรับปรุงสภาพเกรนละเอียด การเพิ่มการใช้โลหะแม่ในปริมาณที่มากขึ้นสามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการปรับปรุงสภาพเกรนละเอียดได้

4.2 ประสิทธิภาพของการปรับปรุงสภาพเกรนละเอียดลดลงเมื่อค้ำน้ำโลหะหลังเติมโลหะแม่ไว้นานเกิน 40 นาที และลดลงเป็นอย่างมากเมื่อค้ำน้ำโลหะนานกว่า 60 นาที ทั้งนี้ช่วงเวลาดังกล่าวถือเป็นช่วงเวลาที่มีความวิกฤตหลังจากการเติมโลหะแม่เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด อย่างไรก็ตาม เวลาวิกฤตในการปรับปรุงสภาพเกรนละเอียดไม่สามารถหาได้ง่ายนัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทางปฏิบัติจึงเป็นประเด็นที่มีความสำคัญและต้องศึกษาเพิ่มเติม

4.3 การตกตะกอนของอนุภาคที่ได้จากโลหะแม่ เป็นกลไกหนึ่งของการเสื่อมสภาพ ซึ่งการกวนน้ำโลหะจะแก้ปัญหาได้ระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตามยังมีกลไกอย่างอื่นอีกที่มีความสำคัญเช่นกัน ทั้งนี้เพราะความสามารถในการปรับปรุงสภาพเกรนละเอียดไม่ได้กลับคืนมาอย่างสมบูรณ์แม้ว่ามีการกวนอย่างแรงแล้วก็ตาม

4.6 การใช้เบ้าเหล็กและค้ำน้ำโลหะไว้นานๆ จะทำให้เหล็กแพร่เข้ามาในอะลูมิเนียมหลอมเหลว ถึงแม้จะมีการเคลือบด้วยแกรไฟต์แล้วก็ตาม เหล็กที่แพร่เข้ามาทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียมและซิลิคอนกลายเป็นเฟสที่สองอยู่ในโครงสร้างของงานหล่อ ซึ่งจะมีการแก้ไขในการศึกษาขั้นต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ผลการวิจัย พัฒนาและวิศวกรรมภายใต้โครงการนี้ได้รับการสนับสนุนจากเงินทุนอุดหนุนโครงการวิจัย พัฒนาและวิศวกรรม ของศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ภายใต้รหัสโครงการ MT-S-44-MET-20-096-G ผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัท Dominion Chemmet ที่ให้การสนับสนุนโลหะแม่ในงานวิจัยและทุนโครงการผลิตและพัฒนาอาจารย์จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือที่มอบให้แก่หนึ่งในผู้วิจัย (นายวิทยา เอียดเหตุ)

6. เอกสารอ้างอิง

1. Kubota, M. and S. Kitaoka, 1986, "Solidification Behavior and Hot Tearing Tendency of Aluminum Casting Alloys," *Metall. Trans. A.*, Vol. 22A, pp. 349-351.
2. Gruzleski, J. E. and C. M. Bernard, 1990, *The Treatment of Liquid Aluminum-Silicon Alloys*, American Foundrymen's Society, Des Plaines, IL, USA, p. 256.
3. Boone, G. W. and R. F. Carver, 1998, "Optimizing Grain Refiners and Modifiers in Al-Si Alloys". *AFS Transaction*, Vol. 106, p. 88.
4. Kearns, M. A., S. R. Thistlethwaite, and P. S. Cooper, 1996, "Recent Advances in Understanding the Mechanism of Aluminium Grain Refinement by TiBAl Master Alloys," *Light Metals 1996*, Anaheim, California, USA, Minerals, Metals and Materials Society/AIME, pp. 713-720.
5. Fisher, P., P. S. Cooper, and S. R. Thistlethwaite, 1994, "Dissolution Mechanisms in Aluminium Alloy Additives" *Light Metals 1994*, San Francisco, California, USA, Minerals, Metals and Materials Society/AIME, pp. 1027-1032.
6. Backerud, L. and S. Yidong, 1991, "Grain Refining Mechanisms in Aluminium as a Result of Additions of Titanium and Boron," *Aluminium*, Vol. 67, pp. 780-785.
7. Easton, M. and D. S. John, 1999, "Grain Refinement of Aluminum Alloys: Part I. The Nucleant and Solute Paradigms—a Review of the Literature" *Metallurgical and Materials Transactions*, Vol. 30A, No. 6, pp. 1613-1627.

8. Kasshyap, K. T. and T. Chandrashekar, 2001, "Effect and Mechanism of Grain Refinement in Aluminium Alloys," *Materials Science*, Vol. 24, No. 4, pp. 345-353.
9. Jones, G. P., 1985, "The Mechanism of Nucleation of Liquid Aluminum by Al-Ti-B Master Alloys," *Refining and Alloying of Liquid Aluminium and Ferro-Alloys*, The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway, Aluminium-Verlag, pp. 211-218.
10. Schumacher, P., et al., 1998, "New Studies of Nucleation Mechanisms in Aluminium Alloys: Implications for Grain Refinement Practice," *Materials Science and Technology*, Vol. 14, No. 5, pp. 394-404.
11. Mohanty, P. S. and J. E. Gruzieski, 1995, "Mechanism of Grain Refinement in Aluminum," *Acta Metall. Mater.*, Vol. 43, No. 5, pp. 2001-2012.
12. Jin, H., et al., 1996, "The Study of Some Al-5% Ti and Al-5% Ti-1% B Master Alloys," *Materials Science Forum*, Vol. 217-222, No. 1, pp. 241-246.
13. Kori, S. A., S. Murty, and M. Chakraborty, 1999, "Influence of Silicon and Magnesium on Grain Refinement in Aluminium Alloys," *Materials Science and Technology*, Vol. 15, No. 9, pp. 986-992.
14. Sigworth, G. K. and M. M. Guzowski, 1985, "Grain Refining of Hypoeutectic Al-Si Alloys," *AFS Transactions*, Vol. 93, pp. 907-912.
15. StJohn, D. H., et al., 1999, "Solidification of Hypoeutectic Aluminium-Silicon Alloys," *Materials Science Forum*, Vol. 23, pp. 137-152.