

**ผลกระทบจากการเติม Al-5Ti-B Sr และ Mg ต่อโครงสร้างทางจุลภาค  
และสมบัติของวัสดุเชิงประกอบพื้นโลหะอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยผงซิลิคอนคาร์ไบด์**  
**Effects of Al-5Ti-B, Sr and Mg Additions**  
**on Microstructure and Properties of SiC<sub>p</sub>-Reinforced Aluminium Composite**

รุ่งอรุณ บุญถ่าน<sup>1</sup> ฐาปนีย์ อุดมผล<sup>2</sup>

<sup>1</sup>นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ (MEng)

<sup>2</sup>คณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา

E-mail: roongarun@gmail.com

**บทคัดย่อ**

การผลิตวัสดุเชิงประกอบพื้นโลหะอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยผงซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC<sub>p</sub>) ให้มีการกระจายตัวในโลหะพื้นและมีสมบัติเชิงกลที่ดีตลอดทั้งชิ้นงานนั้นเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก เนื่องจากความแตกต่างของความหนาแน่น และข้อจำกัดของความสามารถในการเปียก ทำให้ผงซิลิคอนคาร์ไบด์ถูกผสมในน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวได้ยากและส่งผลให้เกิดปัญหาการแยกตัวและการยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิว การวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบจากการเติมธาตุผสม ได้แก่ Al-5Ti-B Sr และ Mg ต่อโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติของชิ้นงานด้วยการลดขนาดเกรน ปรับปรุงรูปทรงพื้นฐานของซิลิคอนยูเทคติกและการเพิ่มความสามารถในการเปียกตามลำดับ โดยทำการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบพื้นโลหะอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยผงซิลิคอนคาร์ไบด์ในปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วยวิธีการกวนผสมด้วยอุปกรณ์อย่างง่ายราคาประหยัด เพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค สมบัติความหนาแน่นและความแข็ง จากผลการทดลองและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพพบว่า การเติม Al-5Ti-B และ/หรือ Sr เพียงอย่างเดียวจะไม่เพิ่มประสิทธิภาพในการทำให้ผงซิลิคอนคาร์ไบด์ผสมลงในน้ำโลหะอะลูมิเนียมได้ดีเท่าที่ควร การเติม Mg ร่วมกับ Al-5Ti-B และ Sr จะส่งผลให้ผงซิลิคอนคาร์ไบด์ผสมลงในน้ำโลหะอะลูมิเนียมและมีการกระจายตัวได้ดีมากขึ้นในโครงสร้างทางจุลภาค ซึ่งเป็นผลดีต่อสมบัติความแข็งแรงของชิ้นงานหล่อ

**คำสำคัญ:** วัสดุเชิงประกอบพื้นโลหะ อะลูมิเนียม ซิลิคอนคาร์ไบด์ การขึ้นรูปด้วยวิธีการกวนผสม แมกนีเซียม สตรอนเทียม สารลดขนาดเกรน

**ABSTRACT**

The fabrication of silicon carbide reinforced aluminium composite to achieve uniform silicon carbide distribution and good mechanical integrity is somehow difficult, due to difference in material density and low wettability among silicon carbide and aluminium melt. The difficulty in SiC<sub>p</sub> incorporation leads to segregation and interfacial problems. This research aimed to investigate effects of Al-5Ti-B, Sr and Mg additions on microstructure and properties of the composite by means of grain refining, modification and wettability improvements respectively. The cost effective stir-casting process was employed to produce 10 wt.% silicon carbide - reinforced aluminium composite castings for microstructure evaluation and

properties assessments in terms of density and Brinell hardness. Experimental results and phase analysis showed that additions of Al-5Ti-B or Sr alone did not offer good silicon carbide incorporation in the aluminium melt. Additions of Mg along with Al-5Ti-B and Sr improved silicon carbide incorporation, which resulted in good silicon carbide distribution and enhanced density and hardness properties of the composite.

**Keyword:** Metal Matrix Composite, Aluminium, Silicon Carbide, Stir Casting Process, Magnesium, Strontium, Grain refiner

## 1. บทนำ

โลหะผสมอะลูมิเนียมมีบทบาทสำคัญต่อการใช้งานทางวิศวกรรมมากขึ้นตามลำดับ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมยานยนต์ที่ต้องการชิ้นส่วนที่มีน้ำหนักเบา เพื่อให้การใช้เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้นในหลายปีที่ผ่านมาจึงมีการศึกษาวิจัยและพัฒนาสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมอย่างต่อเนื่อง เพื่อขยายขอบเขตการใช้งานของอะลูมิเนียม ซึ่งเป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบาและมีความเหนียวสูง แต่อย่างไรก็ดี สมบัติความแข็งและความแข็งแรง ก็ยังเป็นปัญหาและข้อจำกัดในการขยายขอบเขตการใช้งานของอะลูมิเนียม ในปัจจุบันมีการปรับปรุงสมบัติของอะลูมิเนียมในรูปแบบของ “วัสดุเชิงประกอบ (Composite Materials)” โดยการนำวัสดุตั้งแต่สองชนิดมาผสมกัน ซึ่งวัสดุเหล่านี้จะไม่เป็นเนื้อเดียวกันแต่จะแยกกันเป็นเฟสที่เห็นได้อย่างเด่นชัด เฟสแรกเรียกว่า เนื้อพื้น (Matrix) ซึ่งจะอยู่ด้วยกันอย่างต่อเนื่องและล้อมรอบอีกเฟสซึ่งเรียกว่า เฟสเสริมแรง (Reinforcement) สำหรับวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ จัดเป็นวัสดุชนิดใหม่ ในกลุ่มของ “วัสดุเชิงประกอบพื้นโลหะ” (Metal-Matrix Composite; MMCs) ซึ่งเป็นวิธีการเพิ่มความแข็งแรงให้กับอะลูมิเนียม ซึ่งเป็นโลหะที่มีความเหนียวสูงแต่มีความแข็งแรงไม่มากนัก ด้วยการเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

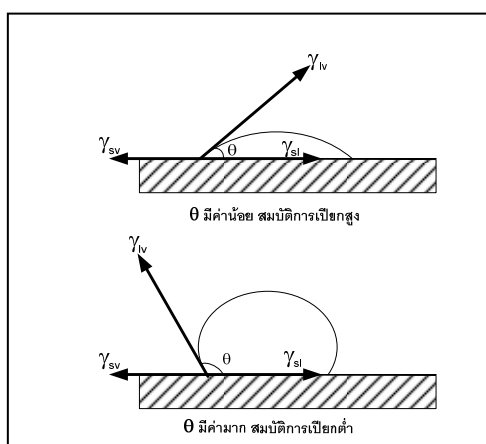
สมบัติของวัสดุเชิงประกอบนั้นขึ้นอยู่กับสมบัติและปริมาณของวัสดุที่นำมาผสมกัน รวมทั้งรูปทรงทางเรขาคณิตและลักษณะการกระจายตัวของเฟสที่เสริมแรง มีการรายงานการวิจัยวิจัยที่ผ่านมาที่แสดงถึงผลกระทบ

ของรูปร่าง การกระจายตัว และปริมาณสัมพัทธ์ของผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ( $SiC_p$ ) ต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยผงซิลิคอนคาร์ไบด์ นอกจากนั้นโครงสร้างทางจุลภาค เช่น ขนาดของเกรนและการเกิดสารประกอบเชิงโลหะล้วนมีผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ [1]

ปัญหาสำคัญต่อการพัฒนาสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพื้นโลหะอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยผงซิลิคอนคาร์ไบด์นั้น คือการทำให้ผงซิลิคอนคาร์ไบด์กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอบนโลหะพื้นอะลูมิเนียมนั้น เป็นสิ่งที่ทำได้ยาก เนื่องจากวัสดุทั้งสองชนิดมีความหนาแน่นที่แตกต่างกัน ( $Al = 2.7$  กรัม/ลบ.ซม  $SiC_p = 3.22$  กรัม/ลบ.ซม) และมีความสามารถในการเปียกผิวต่ำ (Low wettability) จึงทำให้ผงซิลิคอนคาร์ไบด์ผสมกับอะลูมิเนียมได้ยาก ในการผลิตวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยอนุภาคที่ขึ้นรูปด้วยการหล่อมักจะใช้ใบพัดในการกวนผสมในขณะที่น้ำโลหะหลอมเหลว ก่อนเทลงในแบบหล่อ จะทำให้อนุภาคกระจายตัวได้ดีในโลหะพื้น แต่อย่างไรก็ตามลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคก็ยังคงขึ้นอยู่กับลักษณะของใบพัด ความเร็วและเวลาที่ใช้ในการกวนผสม [2] นอกจากนั้นข้อจำกัดในการผลิตวัสดุเชิงประกอบที่ต้องพิจารณา คือความสามารถในการเปียก ซึ่งนิยามได้ว่า “ความสามารถของของเหลวที่สามารถแพร่กระจายไปบนพื้นผิวของแข็ง ซึ่งบ่งบอกได้ถึงขอบเขตของการสัมผัสของพื้นที่ผิวระหว่างของแข็งและของเหลว” [3] ดังรูปที่ 1 แสดงให้เห็นว่าสมบัติในการเปียกถูกกำหนดด้วยมุมระหว่างค่า

พลังงานพื้นผิวของอนุภาคและของเหลว (contact angles;  $\theta$ ) ดังนี้

- $\theta = 0$  ของเหลวจะสามารถเปียกกับของแข็งได้อย่างสมบูรณ์
- $\theta = 180$  ของเหลวไม่สามารถเปียกกับของแข็งได้
- $0 < \theta < 180$  ของเหลวสามารถเปียกกับของแข็งได้บางส่วน



รูปที่ 1 แสดงการระบุค่ามุมสัมผัส ( $\theta$ ) ของพลังงานพื้นผิวระหว่างของแข็งและของเหลว [3]

จากรูปที่ 1 พิจารณาแรงที่เกี่ยวข้องกับเทอมของค่า  $\theta$  ทั้ง 3 สามแรงได้แก่ พลังงานพื้นผิวระหว่างของแข็งและของเหลว ( $\gamma_{sl}$ ) พลังงานพื้นผิวระหว่างของแข็งและอากาศ ( $\gamma_{sv}$ ) และพลังงานพื้นผิวระหว่างของเหลวและอากาศ ( $\gamma_{lv}$ ) ซึ่งสามารถจัดให้อยู่รูปสมดุลสมการของแรงในสมการที่ (1) ส่วนผลเฉลยของค่า  $\theta$  ในสมการที่ 2 แสดงให้เห็นว่า สมบัติในการเปียกจะเพิ่มขึ้นเมื่อ  $\gamma_{sl}$  มีค่าน้อยกว่า  $\gamma_{sv}$  มากขึ้น ซึ่งจะทำให้เทอมของ  $\theta$  มีค่าเข้าใกล้ 0

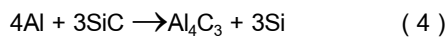
$$\gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos\theta = \gamma_{sv} \quad (1)$$

$$\theta = \cos^{-1} \left[ \frac{\gamma_{sv} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lv}} \right] \quad (2)$$

การลดแรงตึงผิวของของเหลว จึงเป็นวิธีที่ใช้เพิ่มสมบัติในการเปียกสำหรับการผลิตวัสดุเชิงประกอบพื้นโลหะอะลูมิเนียมด้วยการเติมธาตุผสม ซึ่งเป็นวิธีการลดแรงตึงผิวด้วยปฏิกิริยาเคมี ได้มีการทดลองยืนยันว่า การใช้แมกนีเซียม (Mg) เป็นธาตุผสม ให้ผลในการลดแรงตึงผิวของน้ำโลหะอะลูมิเนียมได้ดีกว่าการใช้ซีเรียม แลนเธนัม บิสมีส เซอร์โคเนียม ไทเทเนียม สังกะสี และทองแดง เป็นธาตุผสม เนื่องจากแมกนีเซียมเป็นธาตุที่มีค่าแรงตึงผิวน้อย ( $0.599 \text{ Nm}^{-1}$ ) เมื่อเปรียบเทียบกับอะลูมิเนียม ( $0.760 \text{ Nm}^{-1}$ ) หรือโลหะผสมอะลูมิเนียมซิลิคอน 11.8% ( $0.817 \text{ Nm}^{-1}$ ) เมื่อเติม Mg 3% โดยน้ำหนัก สามารถลดแรงตึงผิวของน้ำโลหะอะลูมิเนียมจาก  $0.760 \text{ Nm}^{-1}$  ลงมาที่  $0.620 \text{ Nm}^{-1}$  ที่อุณหภูมิ  $720^\circ \text{C}$  และยังพบว่า ถ้าเติม Mg 1% โดยน้ำหนัก ลงในน้ำโลหะอะลูมิเนียมจะลดพลังงานพื้นผิวจาก  $860 \text{ dynNm}^{-1}$  เหลือ  $650 \text{ dynNm}^{-1}$  แมกนีเซียมจึงเป็นธาตุผสมที่มีความจำเป็นอย่างมากในการผลิตวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยผงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการกวนผสมพบว่าปริมาณแมกนีเซียม 1% โดยน้ำหนัก มีความเหมาะสมในการเพิ่มคุณสมบัติการเปียกระหว่างอะลูมิเนียมกับอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ โดยปริมาณดังกล่าวจะส่งผลดีต่อลักษณะการกระจายตัวของผงซิลิคอนคาร์ไบด์บนเฟสพื้นอะลูมิเนียมและเป็นผลดีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ [4] นอกจากนั้นการเติม Mg ยังเป็นการเพิ่มเสถียรภาพของชั้นสารประกอบซิลิคอนออกไซด์เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น [5]

นอกจากการใช้ Mg เพื่อลดแรงตึงผิวแล้วการเพิ่มสมบัติการเปียกระหว่างอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์และน้ำโลหะอะลูมิเนียมยังทำได้ด้วยการให้ความร้อนแก่ผงซิลิคอนคาร์ไบด์ เพื่อให้เกิดชั้นสารประกอบซิลิคอนออกไซด์ ดังแสดงในสมการที่ 3[6] โดยชั้นสารประกอบซิลิคอนออกไซด์ที่เกิดขึ้น นอกจากจะเพิ่มสมบัติในการเปียกแล้วยังเคลือบอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์อย่างต่อเนื่องเป็นแนวป้องกันการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอะลูมิเนียมกับอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ [5-8] ป้องกันการเกิดสารประกอบอะลูมิเนียมคาร์ไบด์ ( $\text{Al}_4\text{C}_3$ ) แสดงในสมการที่ (4) [6] ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีความเปราะสูง

และไม่มีควมเสถียรที่มีความไวกับการเกิดปฏิกิริยากับสภาพแวดล้อม ทำให้เกิดการผุกร่อนได้ง่าย [5] ซึ่งส่งผลเสียต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ผลเสียต่อความเหนียว (Ductile) และความแกร่ง (Toughness) การให้ความร้อนแก่ผงซิลิคอนคาร์ไบด์นั้นยังเป็นการจำกัดสิ่งปนเปื้อนและก๊าซบริเวณผิวของผงซิลิคอนคาร์ไบด์ [4]



การที่โลหะมีขนาดเกรนที่เล็กละเอียดจะเป็นผลดีต่อสมบัติเชิงกล การหล่ออะลูมิเนียมด้วยแบบหล่อถาวร (Permanent Mould) จะมีการถ่ายเทความร้อนที่ดี ทำให้อะลูมิเนียมมีขนาดเกรนเล็กกว่าการหล่อด้วยแบบหล่อทราย (Sand Mould) การปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของโลหะอะลูมิเนียมผสมชนิดไฮโปยูเทคติก (Hypoeutectic Aluminum Alloy) ก่อนเทลงแบบหล่อที่นิยมใช้มีสองวิธีคือ การลดขนาดเกรน (Grain Refinement) โดยการเติม Al-5Ti-1B หรือ Al-3Ti-1B และการปรับปรุงรูปทรงพื้นฐานของยูเทคติกซิลิคอนให้มีลักษณะไค้งมน (Fibrous Structure) และมีขนาดเล็ก ด้วยการเติมสตรอนเทียม (Sr) ประมาณ 0.058% โดยน้ำหนัก หรือเรียกว่าการทำโมดิฟิเคชัน (Modification) การปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคดังที่กล่าวมาจะส่งผลดีต่อสมบัติเชิงกล โดยเฉพาะอย่างยิ่งเป็นผลดีต่อสมบัติความเหนียวของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียม [9]

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของการเติมธาตุผสม คือ 1) Al-5Ti-B เพื่อลดขนาดเกรน 2) Sr เพื่อทำโมดิฟิเคชัน และ 3) Mg เพื่อเพิ่มความสามารถในการเปื่อย ที่มีผลกระทบต่อลักษณะของการกระจายตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์บนโลหะพื้นอะลูมิเนียมและสมบัติเชิงกลทางด้านความแข็งของชิ้นงานหล่อ ภายใต้สมมุติฐานว่า การกระจายตัวที่ดีของซิลิคอนคาร์ไบด์จะส่งผลให้ค่าความแข็งตามตำแหน่งต่าง ๆ ของชิ้นงานจะมีความแตกต่างกันน้อย โดยคาดหวังว่าการวิจัยนี้จะเป็นพื้นฐานในการพัฒนาวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยผงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการกวนผสมให้ได้คุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น

## 2. วิธีการทดลอง

การศึกษาในครั้งนี้ ใช้วิธีการหล่อขึ้นรูปอะลูมิเนียมเกรด 356 มีส่วนผสมทางเคมีแสดงในตารางที่ 1 การหลอมอะลูมิเนียมใช้เตาไฟฟ้าที่ให้ความร้อนด้วยขดลวดความต้านทาน และใช้ใบพัดในการกวนผสมอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 2 สำหรับซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ใช้เสริมแรงมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 10.4  $\mu\text{m}$ . การเตรียมผงซิลิคอนคาร์ไบด์ก่อนนำไปผสมกับอะลูมิเนียม ด้วยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ และนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 650 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ทำการหลอมอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 700 °C เติม Al-5Ti-B 1% Sr 0.06 % และ Mg 1 % โดยน้ำหนักลงในน้ำโลหะอะลูมิเนียม (การเติมธาตุผสมมีความแตกต่างกันตามเงื่อนไขการทดลอง แสดงในตารางที่ 2) หลังจากนั้นลดอุณหภูมิของน้ำโลหะอะลูมิเนียมมาที่ 615 °C จากนั้นเติมผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 10% โดยน้ำหนักลงในน้ำโลหะอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 615 °C กวนผสมด้วยความเร็ว 500 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 5 นาที เพิ่มอุณหภูมิของน้ำโลหะอะลูมิเนียมที่ 650 °C พร้อมกับการกวนผสมอย่างต่อเนื่อง เป็นเวลา 10 นาที ก่อนเทลงแบบหล่อถาวร

การทดสอบสมบัติของชิ้นงานหล่อ กระทำโดยตัดชิ้นงานความยาว 16 ซม. แสดงในรูปที่ 3 แล้วแบ่งเป็นชิ้นขนาดเล็ก ณ ตำแหน่งต่างๆ กัน โดยส่วนที่ 1A 3A และ 5A จะนำมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope) และวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ ในส่วนที่ 1 2 3 4 และ 5 จะถูกนำมาตรวจสอบความหนาแน่นด้วยวิธีแทนที่น้ำ (Archimedes's method) ก่อนทำการทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell hardness) ชิ้นงานละ 3 ตำแหน่ง

ตารางที่ 1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมอะลูมิเนียม 356

Si	Cu	Fe	Zn	Ni	Mg	Cr	Mn	Pb
6.93	0.24	0.03	0.01	0.11	0.41	0.03	0.01	0.06

### 3.ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมเกรด 356 ที่ผ่านการลดขนาดเกรนให้เล็กลงโดยวิธีการเติม Al-5Ti-B 1% โดยน้ำหนักและการทำโมดิฟิเคชันด้วยการเติม Sr 0.06% โดยน้ำหนัก แสดงในรูปที่ 4 ในภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคแสดงให้เห็นลักษณะของเกรนที่ไม่เป็นโครงสร้างเดนไดรต์ (Non-Dendrite Structure) แต่มีลักษณะค่อนข้างกลม (Globular) รวมถึงโครงสร้างของยูเทคติกซิลิคอนที่มีลักษณะโค้งมนและมีขนาดเล็ก

ตารางที่ 2 แสดงสัญลักษณ์ของเงื่อนไขการทดลอง

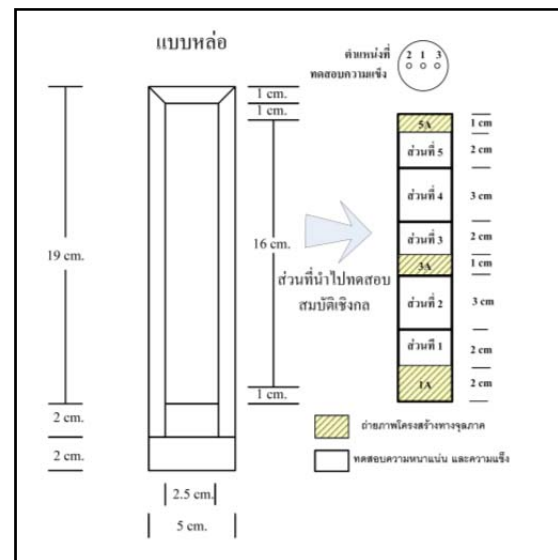
No	Additions				Mechanical Properties	
	Mg	Al-5Ti-B	Sr	% SiC <sub>p</sub>	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Hardness (BHN)
1	×	✓	✓	0	2.586	60.50
2	×	✓	×	10	2.518	61.65
3	×	×	✓	10	2.518	61.53
4	×	✓	✓	10	2.508	60.41
5	✓	✓	✓	10	2.559	68.66



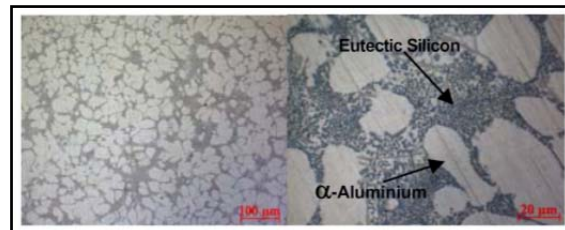
รูปที่ 2 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ประกอบด้วยสามองค์ประกอบหลัก ได้แก่ โลหะพื้นอะลูมิเนียม (Aluminium Matrix) ผงซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC<sub>p</sub>) และรูพรุน (Porosity) ดังใน

รูปที่ 5 แสดงให้เห็นถึงลักษณะการกระจายตัวของผงซิลิคอนคาร์ไบด์บนภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาค รวมถึงลักษณะกลุ่มของซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC<sub>p</sub>- Cluster) ซึ่งมีอยู่ร่วมกับรูพรุนล้อมรอบด้วยเฟสยูเทคติกที่เกิดขึ้นบริเวณขอบเกรน



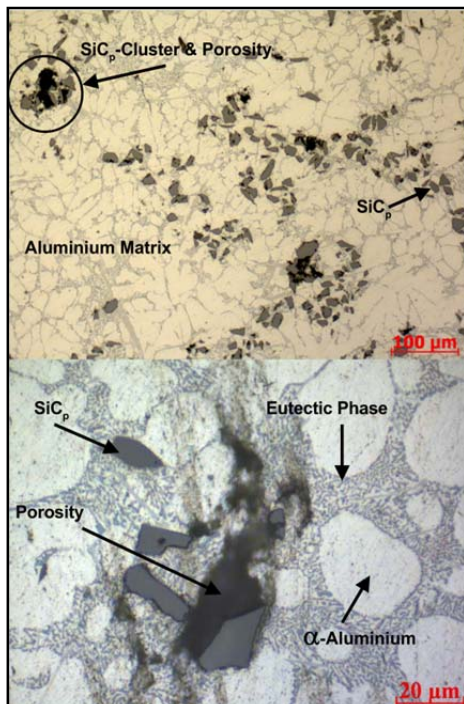
รูปที่ 3 แสดงส่วนของชิ้นงานหล่อที่นำไปทดสอบสมบัติเชิงกล



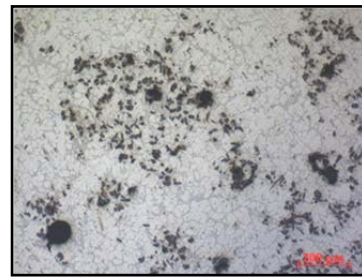
รูปที่ 4 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมเกรด 356 ที่เติม 1% Al-5Ti-B และ 0.06% Sr

สำหรับวัสดุเชิงประกอบที่ไม่เติม Mg แสดงโครงสร้างจุลภาคดังรูปที่ 6-8 ซึ่งพบลักษณะของผงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่อยู่รวมกันเป็นกลุ่ม (SiC<sub>p</sub> - Cluster) และมักอยู่ร่วมกับรูพรุนที่มีขนาดใหญ่เป็นจำนวนมากกระจายอยู่ในโครงสร้างทางจุลภาค ลักษณะดังกล่าวจะส่งผลเสียต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน ส่วนผลกระทบจากการเติม Mg ต่อลักษณะการกระจายตัวของผงซิลิคอนคาร์ไบด์ในโครงสร้างทางจุลภาคแสดงในรูปที่ 9 จะพบว่าผงซิลิคอนคาร์ไบด์กระจายตัวได้ดีขึ้นในโลหะ

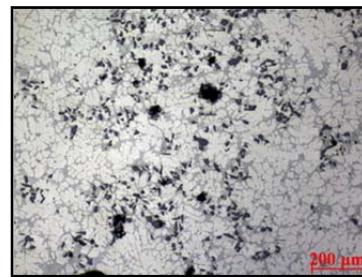
พื้นอะลูมิเนียม และพบ  $\text{SiC}_p$ -Cluster ที่มีขนาดเล็ก และจำนวนน้อยกระจายอยู่บ้างในโครงสร้างทางจุลภาค การวิเคราะห์ส่วนประกอบในวัสดุเชิงประกอบด้วยวิธีการวิเคราะห์ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ ภายใต้สมมติฐานว่า ร้อยละของสัดส่วนพื้นที่เท่ากับร้อยละโดยปริมาตร (% Area Fraction = Volume Percent) เพื่อหาร้อยละของพื้นที่เฟสพื้น เฟสเสริมแรง และรูพรุนที่ปรากฏอยู่บนโครงสร้างทางจุลภาค โดยผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายแสดงในรูป 10 พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เติม Mg 1% โดยน้ำหนัก จะพบปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ในภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคในปริมาณใกล้เคียงกับปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ที่เติมลงไปคือ 10% จากผลการวิเคราะห์ภาพแสดงให้เห็นว่าเมื่อพบปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ในโครงสร้างทางจุลภาคมากขึ้นก็มีแนวโน้มที่จะพบรูพรุนมากขึ้นด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตาม สำหรับวัสดุเชิงประกอบที่เติม Mg เพื่อเพิ่มสมบัติในการเป็ยกนั้น ลักษณะของรูพรุนที่ปรากฏบนโครงสร้างทางจุลภาคจะมีขนาดเล็กกว่า



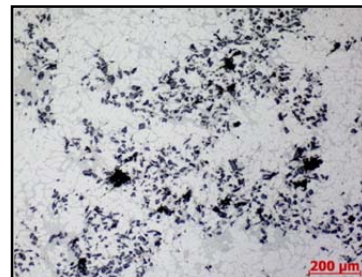
รูปที่ 5 แสดงส่วนประกอบบนโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยผงซิลิคอนคาร์ไบด์



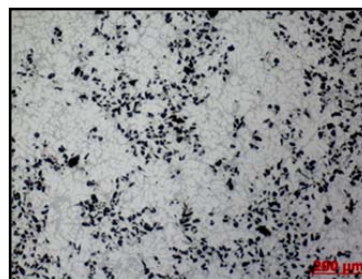
รูปที่ 6 วัสดุเชิงประกอบที่เติม Al-5Ti-B



รูปที่ 7 วัสดุเชิงประกอบที่เติม Sr



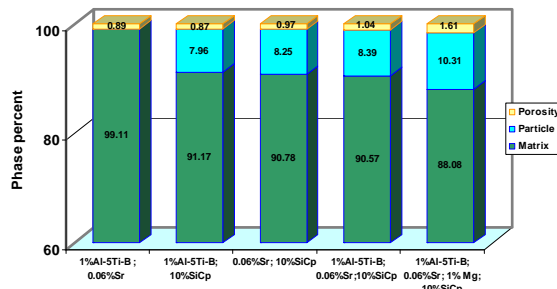
รูปที่ 8 วัสดุเชิงประกอบที่เติม Al-5Ti-B และ Sr



รูปที่ 9 วัสดุเชิงประกอบที่เติม Al-5Ti-B, Sr และ Mg

ผลการทดสอบความหนาแน่นด้วยวิธีการแทนที่น้ำ (Archimedes's Method) ในรูปที่ 11 แสดงให้เห็นว่าวัสดุเชิงประกอบที่เพิ่มสมบัติในการเป็ยกด้วยการเติม Mg มีค่าความหนาแน่นสูงที่สุด คือ ความหนาแน่นเฉลี่ย  $2.56 \text{ g/cm}^3$  แต่อย่างไรก็ดีเมื่อมีซิลิคอนคาร์ไบด์เป็นส่วนผสม ทำให้มีรูพรุนเป็น

ส่วนประกอบเพิ่มขึ้นในวัสดุเชิงประกอบ ส่งผลให้ความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยผงซิลิคอนคาร์ไบด์ 10% ทุกเงื่อนไขในการทดลองนี้ มีความหนาแน่นน้อยกว่าอะลูมิเนียมที่ไม่เสริมแรงด้วยผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ซึ่งมีความหนาแน่นเฉลี่ย 2.59 g/cm<sup>3</sup>

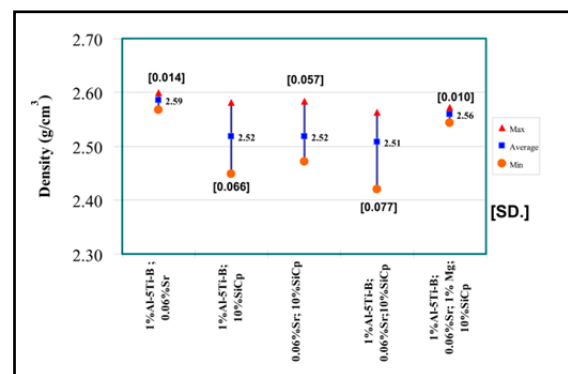


รูปที่ 10 ผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ

นอกจากนั้นยังพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่ไม่เติม Mg มีความหนาแน่นแตกต่างกันอย่างมากระหว่างแต่ละชิ้นงานทดสอบ ซึ่งทำให้ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) มีค่าสูง ส่วนตัวอย่างที่เติม Mg พบว่าความหนาแน่นของแต่ละชิ้นงานทดสอบมีค่าใกล้เคียงกันและมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยคือ 0.010 ผลการทดสอบความหนาแน่นที่ให้ค่า S.D. สูงนี้บ่งบอกได้ว่า การหล่อวัสดุเชิงประกอบในแต่ละครั้ง น่าจะมีการกระจายตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์และรูพรุนในโลหะพื้นอะลูมิเนียมที่ไม่สม่ำเสมอตลอดทั่วทั้งชิ้นงาน ซึ่งเป็นผลมาจากการไม่เติม Mg วัสดุเชิงประกอบมีความหนาแน่นใกล้เคียงกัน น่าจะสันนิษฐานได้ว่าการเติม Mg 1% โดยน้ำหนัก ลงในวัสดุเชิงประกอบเพื่อเพิ่มความสามารถในการเปียกระหว่างโลหะอะลูมิเนียมผงซิลิคอนคาร์ไบด์ด้วยการลดแรงตึงผิวของน้ำโลหะอะลูมิเนียม [4] ย่อมทำให้การควบคุมส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบทำได้ง่ายขึ้น

ผลการทดสอบความแข็งแบบบริเนล ณ ตำแหน่งต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 12 พบว่าแนวโน้มค่าความแข็งเฉลี่ยจะมีความสอดคล้องกับผลการทดสอบความหนาแน่นของชิ้นงานหล่อ โดยวัสดุเชิงประกอบที่เพิ่ม

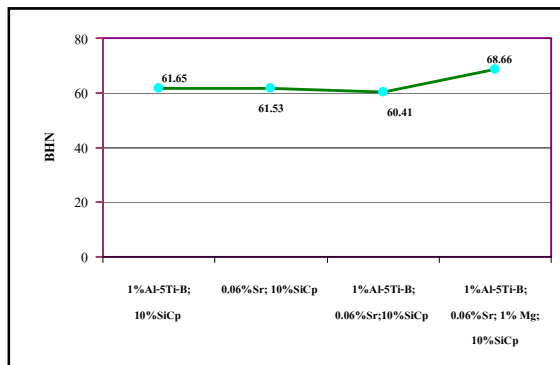
ความสามารถการเปียกด้วยการเติม Mg จะมีค่าความแข็งเฉลี่ยมากที่สุด คือ 68.66 BHN ซึ่งผลจากการเติม Mg ทำให้จะพบลักษณะการกระจายตัวที่ดีของผงซิลิคอนคาร์ไบด์ในโครงสร้างทางจุลภาค ลักษณะดังกล่าวส่งผลดีต่อความสม่ำเสมอของชิ้นงานหล่อ เป็นผลให้ผลค่าความแข็งของวัสดุเชิงประกอบที่เติม Mg เป็นธาตุผสมมีความแตกต่างตามตำแหน่งน้อย (S.D. ต่ำ) เมื่อเทียบกับวัสดุเชิงประกอบที่ไม่เติม Mg ทั้งสามเงื่อนไขการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 13



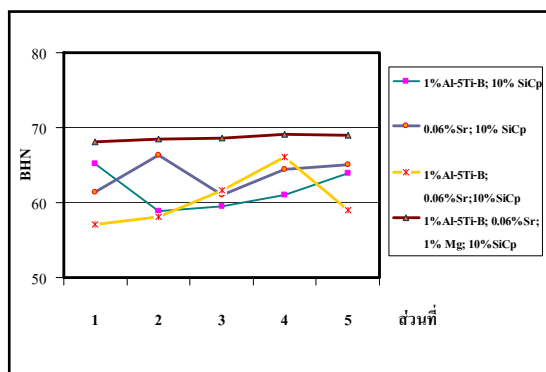
รูปที่ 11 แสดงผลการหาความแน่นด้วยวิธีการแทนที่น้ำ (Archimede's Method)

#### 4. สรุปผลการทดลอง

- การเติม Sr, Al-5Ti-1B โดยไม่เติม Mg ทำให้เกิด SiC<sub>p</sub> – Cluster ที่มีขนาดใหญ่และรูพรุนจำนวนมากกระจายอยู่บนโครงสร้างทางจุลภาค เป็นผลเสียต่อสมบัติความหนาแน่นและความแข็งของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบ
- การเติม Mg ช่วยเพิ่มสมบัติการเปียก (Wettability) ทำให้มีผงซิลิคอนคาร์ไบด์สามารถผสมลงในโลหะพื้นอะลูมิเนียมได้มากขึ้น และพบลักษณะการกระจายตัวที่ดีของผงซิลิคอนคาร์ไบด์ในโครงสร้างทางจุลภาคและลักษณะของ SiC<sub>p</sub>-Cluster ที่พบมีจำนวนน้อยและมีขนาดเล็ก
- การกระจายตัวที่ดีของผงซิลิคอนคาร์ไบด์ในโครงสร้างจุลภาค เนื่องจากเติม Mg ทำให้ค่าความหนาแน่นและความแข็งมี S.D. ต่ำ หรือมีโครงสร้างจุลภาคที่สม่ำเสมอมากกว่าไม่เติม Mg



รูปที่ 12 แสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของวัสดุเชิงประกอบ

รูปที่ 13 แสดงค่าความแข็ง ตามตำแหน่ง  
ของวัสดุเชิงประกอบ

### 3. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับสนับสนุนงบประมาณจากเงินอุดหนุนโครงการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี คณะผู้วิจัย ขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

### 4. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Abedi, M. Emamy. "The effect of Fe, Mn and Sr on the microstructure and tensile properties of A356-10% SiC composite", *Materials Science and Engineering A* 527, pp. 3733-3740, 2010.
- [2] S. Balasivanandha Prabu, L. Karunamoorthy, S. Kathiresan, B. Mohanb. "Influence of stirring speed and stirring time on distribution of particles in cast metal matrix composite", *Journal of Materials Processing Technology* 171, pp.268-273, 2006.

- [3] Chawla, K.K.. (2003). *Cermic matrix composites*. 2<sup>nd</sup> ed. Boston. Kluwer Academic Publishers.
- [4] J. Hashim, L. Looney, M.S.J. Hashmi. "The enhancement of wettability of SiC particles in cast aluminium matrix composites", *Journal of Materials Processing Technology* 119. pp.329-335, 2001.
- [5] Jae-Chul Lee, Jae-Pyoung Ahn, Jae-Hyeok Shim<sup>1</sup>, Zhongliang Shi<sup>1</sup>, Ho-In Lee, "Control of The Interface in SiC/Al Composite", *Scripta Materialia* 41, pp.895-900, 1999.
- [6] M. Villegas, T. Sierra, F. Lucas, J.F. Fern'andez, A.C. Caballero. "Oxidation treatments for SiC particles and its compatibility with glass", *Journal of the European Ceramic Society* 27, pp.861-865, 2007.
- [7] A. Urena, E.E. Martinez, P. Rodrigo, L. Gil, "Oxidation treatments for SiC particles used as reinforcement in aluminium matrix composites", *Composites Science and Technology* 64, pp.1843-1854, 2004.
- [8] J. Hashim, L. Looney, M.S.J. Hashmi. "Metal matrix composites: production by the stir casting method", *Journal of Materials Processing Technology* 92-93, pp.1-7, 1999.
- [9] ชาวลิต ลิ้มณีนวิจิตร. โลหะวิทยาของอะลูมิเนียม - ซิลิคอนในอุตสาหกรรมหล่อโลหะ. หน่วยเทคโนโลยีเฉพาะทางหล่อโลหะ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.