

ผลกระทบของตัวแปรในกระบวนการฉีดผสมหล่อขึ้นรูปต่อปริมาณรูพรุนของ  
วัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมผสมเสริมแรงด้วยผงซิลิคอนคาร์ไบด์  
**Effects of powder-injection casting process parameters on percentage  
porosity of SiC<sub>p</sub>-reinforced aluminum composites**

มัตติกา บุญมา และ ฐาปนีย์ พัชรวิชัย

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ตำบลสุรนารี

อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา

E-mail: mattika\_bunma@yahoo.com

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมผสมเสริมแรงด้วยผงซิลิคอนคาร์ไบด์ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 10.5 ไมครอน ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดผสมหล่อขึ้นรูป โดยปรับใช้เครื่องกำจัดแก๊สไฮโดรเจนเคลื่อนที่พร้อมอุปกรณ์ฉีดผงซิลิคอนคาร์ไบด์ด้วยแก๊สอาร์กอนผ่านท่อแกรไฟต์ลงในโลหะอะลูมิเนียมกึ่งแข็งที่อุณหภูมิการกวนผสม 590 องศาเซลเซียส โดยใช้ความเร็วรอบในการปั่นผสม 1000 รอบต่อนาที และเวลาที่ใช้ในการฉีดปั่นผสม 20 นาที งานวิจัยควบคุมตัวแปรการฉีดผสมที่สำคัญ คือ 1) ปริมาณผงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ 0% 10% และ 15% โดยน้ำหนัก 2) อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่ 5 และ 10 ลิตรต่อนาที และ 3) อุณหภูมิการเทหล่อขึ้นรูปที่ 620 และ 680 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรในการฉีดผสมหล่อขึ้นรูปต่อโครงสร้างจุลภาคและปริมาณรูพรุนของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยผงซิลิคอนคาร์ไบด์โดยเปรียบเทียบกับชิ้นงานหล่อที่ไม่ได้เสริมแรงด้วยอนุภาค ชิ้นงานหล่อที่ได้จะถูกนำมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง นอกจากนี้ ทำการตรวจสอบหาค่าความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งผลการวิจัยนี้พบว่า การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมผสมเสริมแรงด้วยผงซิลิคอนคาร์ไบด์ด้วยการฉีดผสมหล่อขึ้นรูป โดยใช้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่ 5 ลิตรต่อนาที และอุณหภูมิการเทขึ้นรูปที่ 680 องศาเซลเซียส เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด ที่ส่งผลให้ปริมาณรูพรุนในชิ้นงานลดลง และความหนาแน่นของชิ้นงานเพิ่มขึ้น

**คำสำคัญ:** วัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียม ซิลิคอนคาร์ไบด์ กระบวนการฉีดผสมหล่อขึ้นรูป

**ABSTRACT**

This research studied aluminum composites reinforced with SiC<sub>p</sub> of 10.5 μm average size produced by powder injection casting using the modified hydrogen degassing coupled with powder injection. The SiC<sub>p</sub> injection was carried out via argon gas through a graphite shaft into to the aluminum semi solid melt at 590°C using a rotational speed of 1000 rpm for 20 minutes. The controlled process parameters are i) SiC<sub>p</sub> additions (0, 10 and 15 wt %), ii) argon gas flow rate (5 and 10 l/min), and iii) casting temperatures (620 and 680°C). Effects of powder injection casting process parameters on microstructure and porosity of SiC<sub>p</sub> reinforced aluminum composites were investigated. Comparison was made between the reinforced and unreinforced alloys. Microstructure examination was carried out using

optical microscopy. Moreover, density and percentage porosity of the composites were determined. Experimental result showed that hydrogen degassing at 5 l/min of argon gas flow rate and 680°C of casting temperature are optimum parameters to produce SiC<sub>p</sub>-Al composites via powder injection casting, which yielded higher density and lower porosity.

**Keyword:** Aluminum composites, SiC<sub>p</sub>-reinforced, Powder-injection casting

## 1. บทนำ

ปัจจุบันวัสดุเชิงประกอบมีบทบาทสูงมากขึ้นตามลำดับในการใช้งานทางวิศวกรรม โดยวัสดุเชิงประกอบจะประกอบด้วยวัสดุเสริมแรง (Reinforcing material) และวัสดุพื้น (Matrix) เพื่อให้ได้วัสดุใหม่ที่มีสมบัติที่ดีกว่าวัสดุเดิม เช่น สมบัติทางกล (Mechanical properties) ที่ดีขึ้น มีความแกร่งและความแข็งแรงสูง น้ำหนักเบา เป็นต้น

วัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคหรือผงซิลิคอนคาร์ไบด์ เป็นหนึ่งในวัสดุที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในอุตสาหกรรมอากาศยานและอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ จึงมีการพัฒนากันอย่างกว้างขวางซึ่งกระบวนการผลิตมีหลายเทคนิคที่ใช้ขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบพื้นโลหะได้แก่ การขึ้นรูปด้วยวิธีการกวนผสมซึ่งข้อดีของวิธีนี้ คือ ต้นทุนในการผลิตต่ำ การขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดขึ้นรูป (Extrusion) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ได้ดีกับโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Nonferrous) แต่ลักษณะชิ้นงานในการขึ้นรูปค่อนข้างถูกจำกัด และการขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดขึ้นรูปโลหะหลอมเหลวแบบความดันสูง (Squeeze infiltration) ซึ่งข้อดีของการขึ้นรูปด้วยกระบวนการนี้ คือ โครงสร้างชิ้นงานมีความละเอียดและเกิดรูพรุนน้อย แต่ต้นทุนในการผลิตค่อนข้างสูง เป็นต้น [1]

แต่เนื่องด้วยในกระบวนการผลิตวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเพื่อให้ได้สมบัติที่ดีนั้นยังมีข้อจำกัดในหลายๆเรื่อง ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมผสม

ปัจจัยแรก คือ แก๊สไฮโดรเจนในกระบวนการหล่อหลอมโลหะ ซึ่งเป็นหนึ่งในสาเหตุหลักที่ทำให้คุณภาพและสมบัติทางกลของชิ้นงานลดลง เนื่องจากการมี

แก๊สไฮโดรเจนและสารมลทินปนเปื้อนอยู่ในน้ำโลหะเป็นสาเหตุให้เกิดจุดบกพร่องภายในชิ้นงานหล่อ ดังนั้นกระบวนการหลอมน้ำโลหะบางครั้งจึงจำเป็นต้องมีการกำจัดแก๊สไฮโดรเจน (Hydrogen degassing) เพื่อลดโอกาสการเกิดรูพรุนในชิ้นงาน [2-4]

ปัจจัยที่สอง คือ ลักษณะโครงสร้างโลหะพื้นและการปรับปรุงโครงสร้างก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อวัสดุเชิงประกอบ เช่น การทำเกรนให้ละเอียด (Grain Refinement) โดยใช้ Al-5Ti-1B หรือ Al-3Ti-1B เป็นสารลดขนาดเกรนให้เล็กละเอียด และการทำโมดิฟิเคชัน (Modification) โดยเติมโซเดียม (Na) หรือสตรอนเทียม (Sr) เพื่อเป็นการปรับปรุงทรงสัณฐานโครงสร้างยูเทคติกซิลิคอนให้มีความโค้งมนและมีขนาดที่เล็กละเอียด (Fibrous structure) และกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งทั้งสองกระบวนการเป็นวิธีการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ซึ่งทำให้ได้สมบัติเชิงกลดีขึ้น [5,6]

ปัจจัยที่สาม คือ ปริมาณผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ซึ่งพบว่าการเติมซิลิคอนคาร์ไบด์เพิ่มมากขึ้นจะทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้นทั้งค่าความต้านทานแรงดึงและค่าความแข็งของวัสดุ จากรายงานการวิจัยในปี 2009 [7] พบว่าการเพิ่มปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ทำให้ค่าความแข็งของวัสดุเพิ่มสูงขึ้น โดยการเพิ่มปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ทำให้สมบัติเชิงกล เช่น ความแข็งของวัสดุเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการที่จะได้สมบัติเชิงกลที่ดีจะขึ้นอยู่กับลักษณะการกระจายตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์ในวัสดุพื้นโลหะอะลูมิเนียมด้วย

อย่างไรก็ตามปัจจัยลักษณะการกระจายตัวและปริมาณของซิลิคอนคาร์ไบด์ในโลหะพื้นอะลูมิเนียมนั้นขึ้นอยู่กับความสามารถในการเปียกผิวระหว่างซิลิคอน

คาร์ไบด์และน้ำโลหะอะลูมิเนียม ซึ่งในกระบวนการหล่อมีหลายปัจจัยที่ทำให้ความสามารถในการเป็ยกรหว่างอนุภาคเสริมแรงและวัสดุพื้นลดลง เช่น ฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลว และชั้นของฟิล์มแก๊สที่ปกคลุมอยู่บริเวณผิวของผงซิลิคอนคาร์ไบด์ สำหรับการเพิ่มความสามารถในการเป็ยกรหว่างวัสดุเสริมแรงและวัสดุพื้น สามารถทำได้หลายวิธี แต่เทคนิคที่นิยมใช้ มีขั้นตอนในการทำไม่ซับซ้อนมากและต้นทุนในการทำค่อนข้างต่ำ ได้แก่ การเติมธาตุผสม (เช่น Mg, Ca, Ti หรือ Zr เป็นต้น) และการอบในความร้อนแก่อนุภาคเสริมแรง [7,8]

ปัจจัยต่อมา คือ ความเร็วและเวลาที่ใช้ในการกวนผสมวัสดุเสริมแรงในน้ำโลหะหลอมเหลว ซึ่งการได้รับอิทธิพลของการใช้เวลาและความเร็วที่แตกต่างกันพบว่าให้ผลที่แตกต่างกันด้วย ดังนั้นการเลือกใช้ระยะเวลาในการกวนผสม และความเร็วในการกวนผสมที่เหมาะสมจะทำให้ได้วัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมผสมที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี [9]

ปัจจัยสุดท้าย คือ อุณหภูมิการกวนผสม ทั้งนี้ อุณหภูมิการกวนผสมเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถในการเป็ยกรหว่างวัสดุพื้นและวัสดุเสริมแรง ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมแก่การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบคือ อุณหภูมิที่ทำให้น้ำโลหะอยู่ในสถานะกึ่งแข็ง (Semi solid) [10,11]

อย่างไรก็ตามการควบคุมปัจจัยต่างๆที่กล่าวมาข้างต้นต้องมีความเหมาะสมกับกระบวนการขึ้นรูปหรือเทคนิคที่ใช้ในกระบวนการผลิตวัสดุเชิงประกอบด้วย เนื่องจากการเลือกเทคนิคกระบวนการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบก็เป็นสิ่งหนึ่งที่สำคัญและมีผลต่อคุณภาพงานหล่อ ซึ่งกระบวนการหนึ่งที่ได้รับการสนใจก็คือกระบวนการขึ้นรูปแบบฉีดผสมอนุภาคเสริมแรงเข้าสู่ น้ำโลหะหลอมเหลวโดยใช้แก๊สฉีดผสม ข้อดีของเทคนิคนี้ เช่น อนุภาคของวัสดุเสริมแรงมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอขึ้น การเข้ากันระหว่างโลหะพื้นและวัสดุเสริมแรงค่อนข้างดีและมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น [2,3] ซึ่งเทคนิคดังที่กล่าวนี้สามารถนำมาใช้ร่วมกับเทคนิคการ

ขึ้นรูปด้วยวิธีการกวนผสมได้ แต่สิ่งที่สำคัญในกระบวนการขึ้นรูปก็คือ ต้องทำการควบคุมตัวแปรในการขึ้นรูปให้ความเหมาะสม เช่น อุณหภูมิเทน้ำโลหะความเร็วในการฉีด/ปั่นผสม เวลาที่ใช้ในการฉีด/ปั่นผสม และปริมาณผงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่เติมลงไป ซึ่งตัวแปรเหล่านี้มีผลต่อความสม่ำเสมอของโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ

ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการขึ้นรูปดังกล่าวที่ส่งผลต่อปริมาณรูพรุนในวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมผสมเสริมแรงด้วยผงซิลิคอนคาร์ไบด์ด้วยวิธีการฉีดผสมหล่อขึ้นรูป โดยใช้เครื่องกำจัดแก๊สไฮโดรเจนเคลื่อนที่พร้อมอุปกรณ์ฉีดผง (Powder Injection Mobile Degassing Unit, PIMDU) ดังรูปที่ 1 มาใช้ในกระบวนการฉีดผสมอนุภาคลงสู่น้ำโลหะอะลูมิเนียม



รูปที่ 1 เครื่องกำจัดแก๊สไฮโดรเจนเคลื่อนที่พร้อมอุปกรณ์ฉีดผง

## 2. วิธีการทดลอง

การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยผงซิลิคอนคาร์ไบด์ด้วยวิธีการฉีดผสมหล่อขึ้นรูปโดยวัสดุพื้น คือ อะลูมิเนียมผสม เกรด 356 และวัสดุเสริมแรง คือ ผงซิลิคอนคาร์ไบด์ มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 10.5 ไมครอน ซึ่งผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ( $SiC_p$ ) ที่ใช้ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว (Surface treatment) ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง

ทำการหลอมอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส จนกระทั่งอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะของเหลว

ทั้งหมดและทำการเติม Al-5Ti-B (0.05%Ti), Sr (0.02%) และ Mg (1%) จากนั้นทำการลดอุณหภูมิให้ใกล้กับอุณหภูมิหลอมเหลว (Liquidus temperature) ที่อุณหภูมิ 590 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการฉีดผสมอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ด้วยเครื่องกำจัดแก๊สไฮโดรเจนเคลื่อนที่พร้อมอุปกรณ์ฉีดผง โดยจะใช้แรงดันของแก๊สอาร์กอนช่วยในการฉีดผงซิลิคอนคาร์ไบด์ผสมลงไป ในน้ำโลหะอะลูมิเนียมหล่อเหลว ขั้นตอนการเติมผงซิลิคอนคาร์ไบด์ จะทดลองเติมในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ 0%, 10% และ 15% โดยน้ำหนัก โดยทำการฉีดผสมด้วยความเร็วในการปั่นแท่งแกรไฟต์ที่ 1000 รอบต่อนาที ใช้อุณหภูมิในการปั่นและฉีดผสม ที่ 590 องศาเซลเซียส ก่อนที่ทำการเทน้ำโลหะลงในแม่พิมพ์โลหะที่อุณหภูมิเทหล่อเท่ากับ 620 และ 680 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการเตรียมชิ้นงานเพื่อทำการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคโดยปฏิบัติตามขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทางโลหวิทยา และทดสอบความหนาแน่นของชิ้นงานตัวอย่าง โดยใช้หลักการของอาร์คิมิดีส (Archimedes's Method) จากนั้นทำการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ปริมาตรรูพรุนหรือช่องว่างที่เกิดขึ้นภายใน (%Internal void) [5] ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1

$$\% \text{Internal void} = \frac{\rho_{th} - \rho_{Arch}}{\rho_{th}} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่  $\rho_{th}$  คือ ความหนาแน่นทางทฤษฎีโดยการคำนวณด้วยกฎของการผสม (Rule of mixture) และ  $\rho_{Arch}$  คือ ความหนาแน่นจากการทดลองโดยใช้หลักการของอาร์คิมิดีส

### 3. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

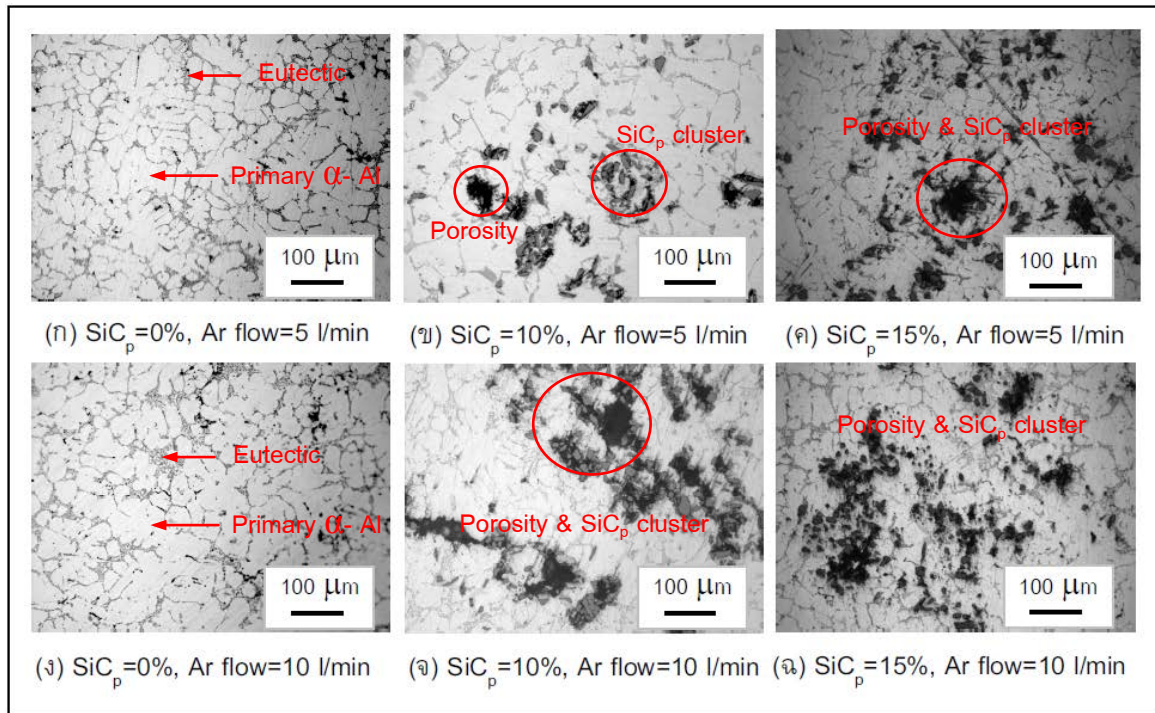
ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมี

ส่วนผสม	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์)									
	Si	Cu	Fe	Zn	Ni	Mg	Cr	Mn	Pb	Sn
Al 356 + 1%Al-5Ti-B +0.02%Sr+1%Mg	7.28	0.066	0.262	0.137	<0.002	>0.552	<0.001	0.025	0.034	<0.001

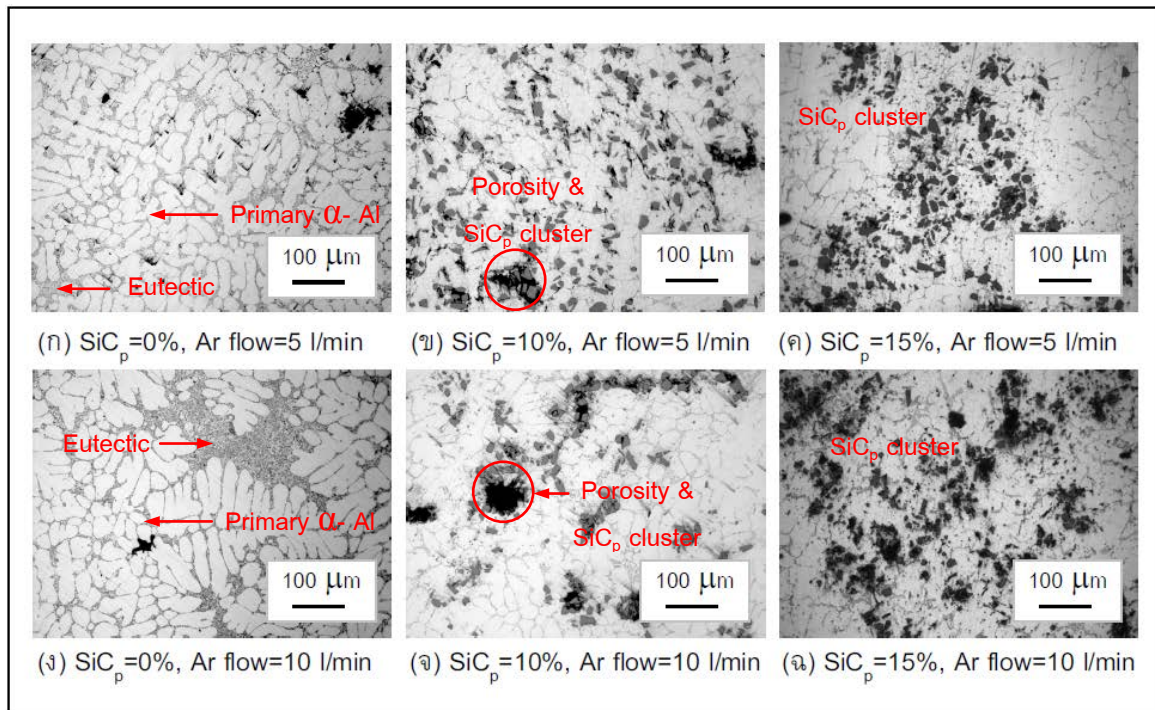
3.1 องค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างจุลภาค  
ตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของโลหะพื้นอะลูมิเนียมเกรด 356 ซึ่งพบว่ามีปริมาณธาตุแมกนีเซียมสูงกว่าปกติเล็กน้อย เนื่องจากผลของการเติมธาตุแมกนีเซียมเพื่อช่วยลดแรงดึงผิวของน้ำโลหะ และเพิ่มความสามารถในการเปียกกระหว่างน้ำโลหะอะลูมิเนียมและผงของซิลิคอนคาร์ไบด์

ผลจากการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิการเทขึ้นรูป 620 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่าในกรณีของตัวอย่างที่ไม่เติมอนุภาคผงซิลิคอนคาร์ไบด์มีลักษณะโครงสร้างประกอบด้วย เฟสอะลูมิเนียมปฐมภูมิหรือแอลฟาอะลูมิเนียมที่มีรูปร่างค่อนข้างกลม (Near-globular primary  $\alpha$  phase) และถูกล้อมรอบด้วยเฟสยูเทคติกซิลิคอน ดังรูปที่ 2 (ก) และ (ง)

สำหรับในรูปที่ 2 (ข) และ (ค) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10% และ 15% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยฉีดผสมอนุภาคเสริมแรงด้วยอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่ 5 ลิตร/นาที่ ซึ่งในโครงสร้างพบกลุ่มของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ( $\text{SiC}_p$  Cluster) รวมตัวกันในบางบริเวณ และพบรูพรุนเกิดขึ้นด้วย แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนขณะทำการฉีดผสมเป็น 10 ลิตร/นาที่ พบว่ามีการรวมกลุ่มของซิลิคอนคาร์ไบด์ เพิ่มมากขึ้นและรูพรุนที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่ ดังรูปที่ 2 (จ) และ (ฉ) ซึ่งการฉีดผสมด้วยอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่ 10 ลิตร/นาที่ ส่งผลให้ของผสมหล่อเหลวของน้ำโลหะและอนุภาคเสริมแรงเกิดการปั่นป่วน (Turbulence) มากเกินไป โดยสามารถสังเกตเห็นได้ในระหว่างการฉีดผงซิลิคอนคาร์ไบด์ลงในน้ำโลหะกึ่งแข็ง



รูปที่ 2 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่อุณหภูมิเทขึ้นรูป 620 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่อุณหภูมิเทขึ้นรูป 680 องศาเซลเซียส

จากนั้นเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิการเทขึ้นรูปเท่ากับ 680 องศาเซลเซียส พบว่าลักษณะโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างที่ไม่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

ดังรูปที่ 3 (ก) และ (ง) ประกอบด้วยเดนไดรต์ของเฟสแอลฟาอะลูมิเนียม (Dendritic primary  $\alpha$ -Al) และถูกล้อมรอบด้วยยูเทคติกซิลิคอน สำหรับในตัวอย่างที่มี

การเติมอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ปริมาณ 10% และ 15% โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 3 (ข), (จ) และ 3 (ค), (ฉ) ตามลำดับ ลักษณะโครงสร้างจุลภาคพบการกระจายตัวของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในบางตำแหน่งเป็นแบบการรวมกลุ่มของอนุภาคและมีรูพรุนเกิดรวมอยู่ด้วยภายในชิ้นงานตัวอย่าง และเช่นเดียวกันการฉีดผสมซิลิคอนคาร์ไบด์ด้วยอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่เพิ่มขึ้น (10 ลิตร/นาที) จะพบการจับกลุ่มของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์กระจายอยู่ทั่วไปร่วมกับรูพรุนขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นในชิ้นงานตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 3 (จ) และ (ฉ)

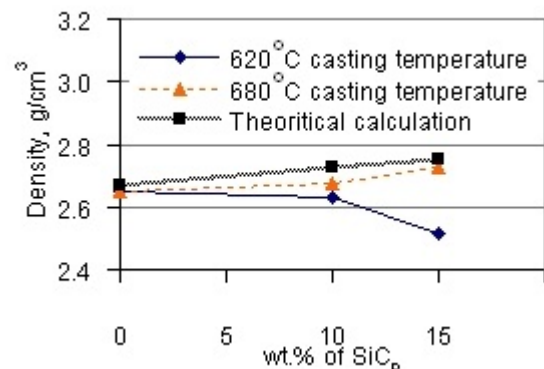
### 3.2 ความหนาแน่น (Density)

การตรวจสอบหาค่าความหนาแน่นของชิ้นงานตัวอย่างโดยใช้หลักการของอาร์คิมิดีส (Archimedes's Method) แสดงดังรูปที่ 4 (ก) และ (ข) ซึ่งค่าที่ได้จากการทดลองถูกเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีซึ่งคำนวณค่าโดยใช้กฎการผสม (Rule of mixture) พบว่าค่าความหนาแน่นที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีมีค่าสูงกว่า เนื่องจากค่าทางทฤษฎีไม่มีการคำนวณในส่วนของรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน จากกราฟแสดงผลการทดลองพบว่าการใช้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 5 ลิตร/นาที ขณะทำการฉีดผสม และทำการเทขึ้นรูปที่อุณหภูมิแตกต่างกันพบว่าการเทขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส (ของผสมอยู่ในสภาวะกึ่งแข็ง) ค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของซิลิคอนคาร์ไบด์เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่าความหนาแน่นจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเทขึ้นรูปเท่ากับ 680 องศาเซลเซียส ซึ่งของผสมอยู่สถานะที่เป็นของเหลว (Liquid state) ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

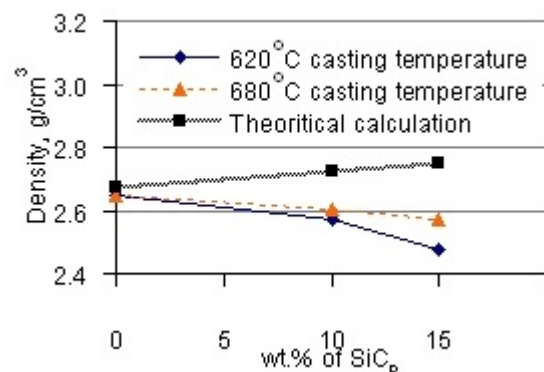
แต่เมื่อทำการเปลี่ยนอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนขณะทำการฉีดผสมซิลิคอนคาร์ไบด์เพิ่มสูงขึ้น โดยใช้อัตราการไหลของอาร์กอนแก๊สที่ 10 ลิตร/นาที และทำการเทขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 620 และ 680 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความหนาแน่นของชิ้นงานทั้ง 2 กรณีมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานตัวอย่างและการกระจายตัวของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

### 3.3 ผลของตัวแปรการขึ้นรูปที่ส่งผลต่อการเกิดรูพรุนในวัสดุเชิงประกอบพีนอะลูมิเนียม

จากผลการทดลองพบว่าในตัวอย่างที่ไม่เติมซิลิคอนคาร์ไบด์ การปรับใช้เครื่องกำจัดแก๊สไฮโดรเจนในขั้นตอนการฉีดผสมอนุภาคเสริมแรงโดยใช้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่เพิ่มขึ้น (10 ลิตร/นาที) ซึ่งกระบวนการนี้ช่วยกำจัดและลดปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน ดังรูป 2 (ก), (ง) และ 3 (ก), (ง) เป็นต้น แต่ในกรณีตัวอย่างที่มีการเติมซิลิคอนคาร์ไบด์ พบว่าปริมาณรูพรุนภายในชิ้นงานตัวอย่างเพิ่มขึ้น ในรูปที่ 5 (ก) และ (ข) แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณรูพรุนในชิ้นงาน (%Internal Void) ที่คำนวณได้จากสมการที่ 1

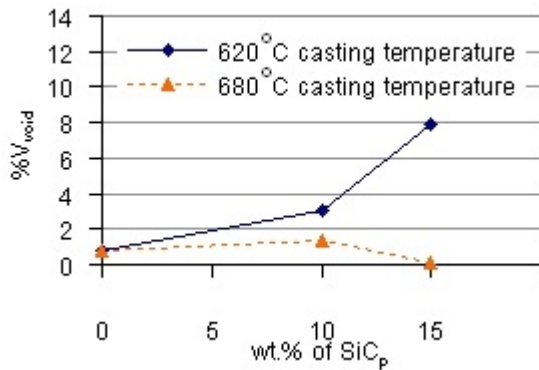


(ก) อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่ 5 ลิตร/นาที

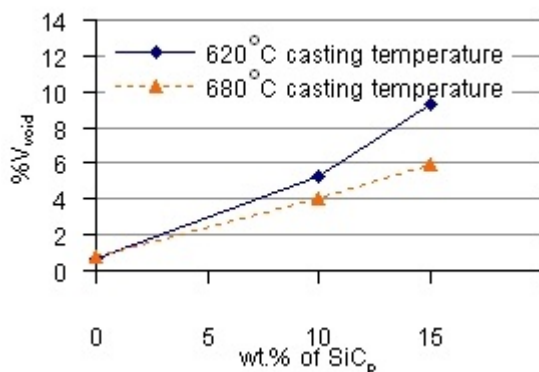


(ข) อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่ 10 ลิตร/นาที

รูปที่ 4 แผนภาพแสดงค่าความหนาแน่นของวัสดุประกอบพีนอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์



(ก) อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่ 5 ลิตร/นาที



(ข) อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่ 10 ลิตร/นาที

รูปที่ 5 แผนภาพแสดงปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในวัสดุประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์

ผลจากการวิเคราะห์ปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์โดยพิจารณาในกรณีแรกที่ใช้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 5 ลิตร/นาที พบว่าชิ้นงานที่เทขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส มีปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่เทขึ้นรูปโดยใช้อุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส ซึ่งอาจเนื่องมาจากอุณหภูมิเทหล่อที่สูงขึ้น โดยน้ำโลหะอยู่ในสถานะของเหลว และมีความหนืดน้อยกว่า จึงทำให้กระบวนการกำจัดแก๊สสามารถกระทำได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าในกรณีที่น้ำโลหะมีความหนืดสูงเมื่อเทหล่อที่อุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส ดังนั้นหากเทหล่อขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส จะทำให้ไฮโดรเจนอะตอมที่ละลายอยู่ในน้ำโลหะอะลูมิเนียม

สามารถแพร่เข้าสู่ฟองแก๊สอาร์กอน แล้วฟองแก๊สอาร์กอนเหล่านี้สามารถลอยขึ้นสู่ม้วนหน้าของน้ำโลหะ และถูกกำจัดได้ง่ายกว่า

นอกจากนี้ในการทดลองเบื้องต้นได้ทดลองฉีดผงซิลิคอนคาร์ไบด์ผ่านท่อแกรไฟต์ลงในภาชนะเปลา โดยไม่ได้ฉีดผสมลงในน้ำโลหะอะลูมิเนียม พบว่าการใช้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่ 5 และ 10 ลิตร/นาที พบว่าอัตราการไหลของผงซิลิคอนคาร์ไบด์ผ่านท่อแกรไฟต์ได้ 6.58 กรัม/วินาที และ 2.56 กรัม/วินาที ตามลำดับ โดยเมื่อใช้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่ 5 ลิตร/นาที จะเกิดการไหลของอนุภาคที่สม่ำเสมอและต่อเนื่องมากกว่า แต่เมื่อทำการฉีดผสมลงในน้ำโลหะอะลูมิเนียมในสภาวะกึ่งแข็งพบว่า การฉีดผสมโดยใช้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่ 10 ลิตร/นาที ส่งผลให้เกิดความปั่นป่วนขึ้น โดยสังเกตได้จากระหว่างการฉีดผสมนั้นจะเกิดการเคลื่อนตัวที่ผิวหน้าโลหะในสภาวะกึ่งแข็งค่อนข้างมาก และมีลักษณะของฟองแก๊สหลุดขึ้นมา แสดงถึงการไหลแบบไม่ต่อเนื่องของผงซิลิคอนคาร์ไบด์และเกิดการพุ่งลงไปในน้ำโลหะ (SiC<sub>p</sub> jetting) ความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นในน้ำโลหะระหว่างการฉีดผสมที่อัตราการไหล 10 ลิตร/นาที นี้อาจเนื่องมาจากแรงดันของน้ำโลหะที่ปลายท่อแกรไฟต์และหัวฉีด (Nozzle) ซึ่งส่งผลให้เกิดกลุ่มก้อนของซิลิคอนคาร์ไบด์ขนาดใหญ่เกิดร่วมกับฟองแก๊สภายในโครงสร้างวัสดุเชิงประกอบ ดังแสดงในรูปโครงสร้างจุลภาค รูปที่ 2 (จ), (ฉ) และ 3 (จ), (ฉ) แต่เมื่อทำการลดอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 5 ลิตร/นาที ขณะทำการฉีดผสมซิลิคอนคาร์ไบด์ พบว่าลักษณะการไหลของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ผ่านท่อแกรไฟต์ลงสู่น้ำโลหะ มีความรุนแรงน้อยกว่าและการไหลของผงต่อเนื่องมากกว่า โดยสังเกตจากผิวหน้าของน้ำโลหะระหว่างการฉีดผสม นอกจากนี้ผลที่ได้ยังพบว่าการกระจายตัวของผงซิลิคอนคาร์ไบด์ในโครงสร้างมีความสม่ำเสมอมากกว่า และรูพรุนที่พบในชิ้นงานมีปริมาณน้อยกว่า ซึ่งจากรายงานการวิจัย [9] ก่อนหน้านี้ พบว่าการปรับใช้กระบวนการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนในวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมผสมต้องมีการควบคุมให้เหมาะสม เช่น อัตราการไหลของแก๊สเฉื่อยและระยะเวลาที่ใช้ใน

กระบวนการกำจัดแก๊สไฮโดรเจน เป็นต้น เนื่องจากกระบวนการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนในวัสดุเชิงประกอบจะทำยากกว่าในโลหะผสมทั่วไป ดังนั้นหากมีการควบคุมตัวแปรในกระบวนการกำจัดแก๊สให้เหมาะสมก็จะส่งผลให้ออกาสการเกิดรูพรุนในชิ้นงานลดลง

งานวิจัยของ F. Akhlaghi และคณะ [12] พบว่ารูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมผสมโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ รูพรุนที่เกิดเนื่องจากการหดตัวของน้ำโลหะระหว่างกระบวนการแข็งตัว และรูพรุนเนื่องจากแก๊ส แต่ในกรณีของวัสดุเชิงประกอบที่มีการเติมอนุภาคเสริมแรง (ผงซิลิคอนคาร์ไบด์) อนุภาคเสริมแรงที่เติมลงสู่น้ำโลหะจะเป็นสิ่งที่ทำให้เกิดรูพรุนทั้งสองประเภทที่กล่าวมา ซึ่งโดยทั่วไปพบว่าปริมาณรูพรุนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมปริมาณผงซิลิคอนคาร์ไบด์มากขึ้น [12] เช่นเดียวกับผลการวิจัยในครั้งนี้พบว่าในชิ้นงานที่ไม่มีการเติมอนุภาคเสริมแรงจะพบปริมาณรูพรุนน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่มีการเติมผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ซึ่งปริมาณรูพรุนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมผงซิลิคอนคาร์ไบด์ และลักษณะของรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานดังรูปที่ 2 และ 3 พบว่าโดยส่วนใหญ่จะเป็นรูพรุนที่เกิดขึ้นเนื่องจากแก๊ส (ขณะทำการฉีดผสมผงซิลิคอนคาร์ไบด์ด้วยแก๊สอาร์กอนผ่านท่อแอร์ไฟต์ลงสู่น้ำโลหะอะลูมิเนียมผสม) ซึ่งถูกกำจัดออกจากชิ้นงานไม่สมบูรณ์เมื่อเข้าสู่กลไกการแข็งตัว ซึ่งการเกิดและการโตของรูพรุนระหว่างกลไกการแข็งตัวของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยผงซิลิคอนคาร์ไบด์สามารถอธิบายได้ว่า [13] ขณะที่น้ำโลหะผสมเข้าสู่กลไกการแข็งตัวภายในโครงสร้างเริ่มเกิดเดรนไดรต์ของแอลฟาอะลูมิเนียมและผงซิลิคอนคาร์ไบด์จะถูกผลักออกมาอยู่บริเวณข้างหน้าเดรนไดรต์ของแอลฟาอะลูมิเนียม ซึ่งในขั้นตอนนี้จะเกิดการสะสมแก๊สไฮโดรเจนที่บริเวณระหว่างแขนของเดรนไดรต์ และเมื่อการแข็งตัวของน้ำโลหะเริ่มเข้าสู่อุณหภูมิต่ำ (Eutectic temperature) ซึ่งน้ำโลหะจะเริ่มมีสถานะกึ่งแข็ง (semi-solid state) จึงทำให้การเติบโตของช่องว่างหรือรูพรุนถูกจำกัดมากขึ้นเนื่องจากความสามารถในการโตและขยายตัวลดลง ประกอบกับภายในน้ำโลหะมี

อนุภาคเสริมแรงอยู่ด้วย จึงเป็นอุปสรรคทำให้ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นในน้ำโลหะอะลูมิเนียมเคลื่อนที่ลอยขึ้นสู่มิวน้ำโลหะและถูกกำจัดออกได้ค่อนข้างยากกว่าน้ำโลหะอะลูมิเนียมผสมที่ไม่มีการเติมอนุภาคเสริมแรง [13]

นอกจากนี้อนุภาคเสริมแรง (ซิลิคอนคาร์ไบด์) มีผลต่อรูปร่างและขนาดของรูพรุนที่เกิดขึ้นกับวัสดุเชิงประกอบ เนื่องจากอนุภาคเสริมแรงจะเป็นอุปสรรคต่อการไหลตัว (Fluidity) ของน้ำโลหะอะลูมิเนียมระหว่างกระบวนการแข็งตัว [13,14] เนื่องจากส่วนผสมมีความหนืดเพิ่มขึ้น ทำให้การเติมน้ำโลหะ (Melt feeding) เป็นไปได้ยากเป็นผลให้เกิดปัญหาการหดตัว ดังนั้นสมบัติของน้ำโลหะอะลูมิเนียม (เช่น ส่วนผสมทางเคมี ความหนืด และแรงตึงผิว เป็นต้น) ลักษณะของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ (เช่น รูปร่างและขนาด) และกลไกการแข็งตัวของน้ำโลหะ เป็นปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อความสามารถในการไหลตัวของน้ำโลหะและการเกิดขึ้นของรูพรุนในวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์

ดังนั้นการเติมอนุภาคเสริมแรงเป็นการเพิ่มความหนืดให้กับส่วนผสมก่อนการเทขึ้นรูป เนื่องจากเป็นการเพิ่มสัดส่วนของเฟสของแข็งในส่วนผสมดังกล่าวให้มีปริมาณที่มากขึ้น แต่หากมีการเพิ่มอุณหภูมิการเทขึ้นรูปเป็น 680 องศาเซลเซียส ทำให้ส่วนผสมมีความหนืดที่ลดลง และส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สเพิ่มมากขึ้น ดังเห็นได้จากแนวโน้มปริมาณรูพรุนในชิ้นงานที่ลดลงเมื่อทำการฉีดผงที่อัตราการไหลของแก๊ส 5 ลิตรต่อนาที

#### 4. สรุปผลการทดลอง

การศึกษาหาตัวแปรในกระบวนการฉีดผสมหล่อขึ้นรูปที่มีต่อรูพรุนที่เกิดขึ้นในวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยผงซิลิคอนคาร์ไบด์ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

- ชิ้นงานที่ไม่เติมผงซิลิคอนคาร์ไบด์มีปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานค่อนข้างน้อย ส่วนชิ้นงานที่มีการเติมผงซิลิคอนคาร์ไบด์พบปริมาณรูพรุนภายในชิ้นงานมากกว่า



- การฉีดผสมผงซิลิคอนคาร์ไบด์ด้วยอัตราการใช้ของแก๊สอาร์กอนที่ 10 ลิตร/นาที ทำให้เกิดการปั่นป่วนในของผสมน้ำโลหะและอนุภาคเสริมแรงมากเกินไป ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการรวมกลุ่มของซิลิคอนคาร์ไบด์และรูพรุนขนาดใหญ่ในวัสดุเชิงประกอบ
- การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยผงซิลิคอนคาร์ไบด์ โดยใช้อัตราการใช้ของแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 5 ลิตร/นาที และอุณหภูมิเทขึ้นรูปที่ 680 องศาเซลเซียส เป็นเงื่อนไขที่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานหล่อที่มีสมบัติที่ดี

## 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก สาขาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช)

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Hull, D., and Clyne, T.W., "An Introduction to Composite Materials," *Cambridge University Press*, 1996.
- [2] Zalensas, D. L., "Aluminum Casting Technology," *American Foundry Society Des Plaines, Illinois*, 2001.
- [3] Kant Wirunphan. *A Study to Melting Parameters in Quality Control of Aluminum Alloy Casting*. M.S. thesis. Chiang Mai University, (2004).
- [4] S. Jumroonrut and S. Pitakthapanaphong, "Effects of Molten metal Temperature in Aluminium Casting". *ME NETT 20<sup>th</sup>*. 18-20 October 2006.
- [5] M. Emamy, A. Razaghian, H. R. Lashgari, and R. Abbasi, "The effect of Al-5Ti-1B on the microstructure, hardness and tensile properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SiC-containing metal-matrix composite," *Materials Science and Engineering.*, A 485, pp. 210-217, 2008.
- [6] A. Razaghian, M. Emamy, A. A. Najimi, and S. H. Seyed Ebrahimi, "Sr effect on the microstructure and tensile properties of A357 aluminum alloy and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / SiC-A357 cast composites," *Materials Characterization.*, vol. 60, pp. 1361-1369, 2009.
- [7] M. Singla, D. D. Dwivedi, L. Singh, and V. Chawla, "Development of Aluminium Based Silicon Carbide Particulate Metal Matrix Composite," *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering.*, pp. 455-467, 2009.
- [8] J. Hashim, L. Looney, and M. S. J. Hashmi, "The wettability of SiC particles by molten aluminum alloy," *Journal of Materials Processing Technology.*, (119) : pp. 324-328, 2001.
- [9] S. B. Prabu, L. Karunamoorthy, S. Kathiresan, and B. Mohan, "Influence of stirring time on distribution of particles in cast metal matrix composite," *Journal of Materials Processing Technology.*, (171) : pp. 268-273, 2006.
- [10] J. Hashim, L. Looney, and M. S. J. Hashmi, "The enhancement of wettability of SiC particles in cast aluminum matrix composites," *Journal of Materials Processing Technology.*, (119) : pp. 329-335, 2001.
- [11] G. J. Kipouros. *Alloys Introduction*. [Online] Available: <http://myweb.dal.ca/kipourgj/ferrous.htm#>
- [12] F. Akhlaghi, A. Lajevardi, and H. M. Maghanaki, "Effects of casting temperature on the microstructure and wear resistance of compocast A356/SiC<sub>p</sub> composites : comparison between SS and SL route,"

- Journal of Materials processing Technology.*, pp. 1874-1880, 2004.
- [13] K. R. Ravi, R. M. Pillai, K. R. Amaranathan, B. C. Pai, and M. Chakraborty, "Fluidity of aluminum alloys and composites," *A review, Journal of Alloys and Compounds.*, (456) : pp. 201-210, 2008.
- [14] A. M. Samuel, A. Gotmare, and F. H. Samuel, "Effects of solidification rate and metal feedability on porosity and SiC/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle distribution in an Al-Si-Mg (359) alloy," *Composites Science and Technology*, vol. 53, pp. 301-315, 1995.