

อิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการฉีดผสมหล่อขึ้นรูปต่อสมบัติความแข็งของวัสดุ เชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมผสมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

Influence of process parameters on hardness property of Al-SiC_p composite fabricated by particulate-injection casting

มัตติกา บุญมา^{1*} ฐาปณีย์ พชรวิชัย²

^{1*} สาขาวิชามาตรวิทยาและระบบคุณภาพ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

119 หมู่ 9 ตำบลชมพู อำเภอเมืองจังหวัดลำปาง 52100 โทร 08-1966-3056 E-mail : mattika@lpru.ac.th

² สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง
จังหวัดนครราชสีมา 30000

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการฉีดผสมหล่อขึ้นรูปที่ส่งผลต่อสมบัติความแข็งของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเกรด A356 ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบความแข็งขึ้นงานหล่อที่เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักกับความแข็งขึ้นงานหล่อที่ไม่ได้เสริมแรงด้วยอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์ และได้ทำการปรับใช้เครื่องกำจัดแก๊สไฮโดรเจนเคลื่อนที่พร้อมอุปกรณ์ฉีดอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ผ่านท่อแกรไฟต์ด้วยแก๊สอาร์กอนลงสู่โลหะอะลูมิเนียมผสมกึ่งแข็งที่อุณหภูมิผสม 590 องศาเซลเซียส โดยใช้ความเร็วการปั่นผสม คือ 1,000 รอบต่อนาที และใช้เวลาฉีดปั่นผสม 20 นาที สำหรับตัวแปรควบคุมในงานวิจัยนี้ ได้แก่ 1) อุณหภูมิเทขึ้นรูป คือ 620 และ 680 องศาเซลเซียส 2) อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่ 5 และ 10 ลิตรต่อนาที ขึ้นงานหล่อที่ได้จะถูกนำมาตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง และทำการทดสอบสมบัติความแข็งแบบบรินเนล ซึ่งผลการวิจัยพบว่าการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ โดยใช้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนในการฉีดปั่นผสมที่ 5 ลิตรต่อนาที และเทขึ้นรูปขึ้นงานหล่อที่อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการศึกษาครั้งนี้ที่ส่งผลทำให้ค่าความแข็งของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมผสมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ มีค่าเท่ากับ 77.77 BHN

คำสำคัญ: วัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียม, อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์, การฉีดผสมหล่อขึ้นรูป

Abstract

This research studied the influence of process parameters on the hardness of particulate-injection casting of SiC_p-reinforced 356 aluminum composites. A comparison was made between the unreinforced and reinforced alloy (10% SiC_p wt). The SiC_p injection was carried out via argon gas through a graphite shaft into the semi-solid aluminum at 590°C and with a stirring speed of 1000 rpm (for 20 minutes). This was by using a modified hydrogen degassing machine prior to pouring into cylindrical permanent moulds. The process parameters studied were i) casting temperatures (620 and 680°C) and ii) argon gas flow rate (5 and 10 l/min). Microstructure examination was carried out

using a digitized optical microscope. Brinell hardness was investigated to reveal the effects of powder-injection casting on the hardness of the aluminum composites. This experiment found that an argon gas flow of l/min and a casting temperature of $680^{\circ}C$ were the optimal conditions (giving a maximum hardness of 77.77 BHN).

Keywords: aluminum composites, SiC_p , particulate-injection casting

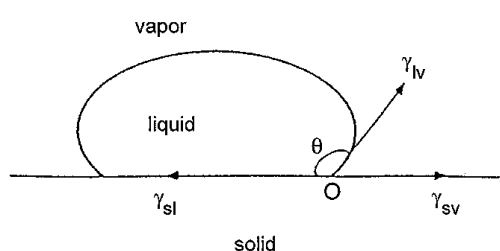
1. บทนำ

วัสดุเชิงประกอบเป็นวัสดุที่ประกอบด้วยวัสดุเสริมแรง (Reinforcing material) และวัสดุพื้น (Matrix) เช่น วัสดุเชิงประกอบพื้นโลหะ (Metal matrix composite) วัสดุเชิงประกอบพื้นเซรามิก (Ceramic matrix composite) และวัสดุเชิงประกอบพื้นพอลิเมอร์ (Polymer matrix composite) จุดประสงค์เพื่อให้ได้วัสดุใหม่ที่มีสมบัติที่ดีกว่าวัสดุเดิม เช่น วัสดุมีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรง และความแข็งแรงสูง รวมทั้งมีสมบัติทางกล (Mechanical properties) ที่ดีขึ้น ปัจจุบันนี้วัสดุเชิงประกอบถูกนำไปใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมยานยนต์ อากาศยาน และงานทางด้านวิศวกรรมอื่น ๆ ซึ่งวัสดุเชิงประกอบแต่ละประเภทจะผ่านกระบวนการผลิตและเทคนิคการขึ้นรูปที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขและปัจจัยหลายอย่าง เช่น การขึ้นรูปด้วยวิธีการกวนผสม (Stir mixing) ข้อดีคือ ต้นทุนในการผลิตต่ำ การขึ้นรูปด้วยวิธีการอัด (Extrusion) ซึ่งใช้ได้กับโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Nonferrous) แต่ลักษณะชิ้นงานในการขึ้นรูปค่อนข้างถูกจำกัด และการขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดขึ้นรูปโลหะหลอมเหลวแบบความดันสูง (Squeeze infiltration) มีข้อดี คือ ชิ้นงานละเอียดและเกิดข้อบกพร่องในชิ้นงานน้อย แต่ต้นทุนการผลิตสูง เป็นต้น (Hull, 1996)

วัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ เป็นหนึ่งในวัสดุเชิงประกอบพื้นโลหะที่ได้รับความสนใจและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง แต่ด้วยเงื่อนไขของตัวแปรในกระบวนการผลิตยังพบว่าเป็นปัญหาและมีข้อจำกัดที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพและสมบัติเชิงกลของวัสดุ เชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียม ซึ่งปัจจัยและตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียม คือ

1) แก๊สไฮโดรเจนและมลทินที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำโลหะ ซึ่งเป็นสาเหตุให้คุณภาพชิ้นงานลดลง ดังนั้นในกระบวนการหล่อโลหะบางครั้งจึงจำเป็นต้องมีการกำจัดแก๊สไฮโดรเจน

2) ความสามารถในการเปียกระหว่างโลหะพื้นและอนุภาคเสริมแรง (Wettability) ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยมุมสัมผัส (Contact angle, θ) (Hashim et al., 2001) ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 Sessile drop test for contact angle measurement

(Hashim, Looney, and Hashmi, 2001)

ที่สมดุลค่า θ หาได้จาก : $\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos \theta$ (1)

โดยที่ γ คือ แรงตึงผิวระหว่างผิวสัมผัส

ซึ่งค่า θ จะแปรผกผันกับความสามารถในการเปียก คือ θ น้อยกว่า 90 องศา ความสามารถในการเปียกของพื้นผิวอยู่ในระดับดีมาก และ θ ที่มากกว่า 90 องศา ความสามารถในการเปียกของพื้นผิวอยู่ในระดับไม่ดี ซึ่งเทคนิคการเพิ่มความสามารถในการเปียกสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่

1) การเติมธาตุผสมบางตัว เช่น แมกนีเซียม (Mg) แคลเซียม (Ca) และไทเทเนียม (Ti) เป็นต้น เพื่อทำหน้าที่ช่วยลดแรงตึงผิวของน้ำโลหะหลอมเหลวและลดพลังงานระหว่างผิวสัมผัสระหว่างของแข็งและของเหลว

2) การอบให้ความร้อนแก่อนุภาคเสริมแรง เนื่องจากในกระบวนการผลิตวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ พบว่ามีอะลูมิเนียมคาร์ไบด์ (Al_4C_3) เกิดขึ้น ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับไอน้ำในบรรยากาศ และส่งผลให้เกิดอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) ซึ่งเป็นผลเสียต่อวัสดุเชิงประกอบ ดังนั้นจึงมีการใช้เทคนิคการเผาหรืออบอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นบริเวณผิวอนุภาค ทำให้เกิดชั้นฟิล์มของออกไซด์หรือซิลิคอนออกไซด์ (SiO_2) ขึ้น ทำหน้าที่ป้องกันการเกิด Al_4C_3 และช่วยเพิ่มความสามารถในการเปียกของอนุภาคเสริมแรงให้ดีขึ้น (Hashim et al., 2001)

3) ความเร็วและเวลาที่ใช้ในการกวนผสม เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบเช่นกัน เนื่องจากมีผลต่อการกระจายตัวของอนุภาคเสริมแรงในโลหะพื้น ดังนั้นการใช้เงื่อนไขที่เหมาะสมจะส่งผลให้อนุภาคเสริมแรงมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในโลหะพื้นและทำให้วัสดุ มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นด้วย

4) อุณหภูมิการกวนผสมและการเทขึ้นรูป ในการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมผสมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ด้วยกระบวนการ Compocast พบว่าการกวนผสมอนุภาคเสริมแรงขณะที่โลหะพื้นอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะกึ่งแข็ง (Semisolid) และเทขึ้นรูปขณะที่อุณหภูมิอยู่ในช่วงของเหลว (Liquid state) ส่งผลให้ชิ้นงานหล่อที่ได้มีสมบัติเชิงกลและคุณภาพชิ้นงาน ดีกว่า ชิ้นงานที่ผ่านการเทขึ้นรูปขณะที่อุณหภูมิการเทอยู่ในช่วงของสถานะกึ่งแข็ง (Semisolid state) (Akhlaghi, Lajevardi, and Maghanaki, 2004)

อย่างไรก็ตามในกระบวนการผลิตและการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ จำเป็นต้องทำการควบคุมตัวแปรให้เหมาะสม เพื่อลดปัญหาจุดบกพร่องที่อาจเกิดขึ้นในชิ้นงาน และทำให้สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบดีขึ้น ดังนั้นงานวิจัยในครั้งนี้จึงมุ่งเน้นเพื่อศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบพื้นโลหะอะลูมิเนียมผสม เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ด้วยวิธีการฉีดผสมหล่อขึ้นรูป (Injection casting) โดยทำการปรับใช้เครื่องกำจัดแก๊สไฮโดรเจนเคลื่อนที่พร้อมอุปกรณ์ฉีดอนุภาค (Particle Injection Mobile Degassing Unit, PIMDU) ในกระบวนการฉีดผสมซิลิคอนคาร์ไบด์ลงสู่โลหะพื้นอะลูมิเนียมผสม

2. วิธีการทดลอง

วัสดุพื้น คือ อะลูมิเนียมผสม เกรด A356 และวัสดุเสริมแรง คือ ผงซิลิคอนคาร์ไบด์ (ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 10.50 ไมครอน) ซึ่งผ่านการปรับสภาพพื้นผิว (Surface treatment) ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง และทิ้งไว้ให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง

หลอมอะลูมิเนียม ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส จนกระทั่งอะลูมิเนียมอยู่ในสถานะของเหลวทั้งหมด พร้อมทำการเติม Al-5Ti-B (ร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก) เพื่อปรับสภาพเกรนให้เล็กลงและ Sr (ร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก) เพื่อปรับปรุงทรงสัณฐานของโครงสร้างยูเทคติกซิลิคอนให้เล็กลงและมีความโค้งมน (Fibrous structure) และ Mg (ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก) รองส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นลดอุณหภูมิให้ใกล้กับอุณหภูมิหลอมเหลว (Liquidus temperature) ที่อุณหภูมิ 590 องศาเซลเซียส จากนั้นใช้เครื่องกำจัดแก๊สไฮโดรเจนคลื่อนที่พร้อมอุปกรณ์ฉีดอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ด้วยแรงดันของแก๊สอาร์กอนช่วยในการฉีดอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ผ่านท่อแกรไฟต์ลงสู่แม่พิมพ์อะลูมิเนียมหล่อเหลว ที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน คือ 5 และ 10 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ จากนั้นในขั้นตอนการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ จะทดลองเติมที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักเพื่อใช้เปรียบเทียบกับตัวอย่างชิ้นงานที่ไม่มีการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ โดยจะทำการฉีดและปั่นผสมด้วยความเร็วในการปั่นแท่งแกรไฟต์ที่ 1,000 รอบต่อนาที ใช้เวลาในการปั่น และฉีดผสม 20 นาที จากนั้นทำการเทน้ำโลหะลงในแม่พิมพ์โลหะ (Permanent Mold) ที่อุณหภูมิเทขึ้นรูป คือ 620 และ 680 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างตามขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานของทางโลหะวิทยา เพื่อนำมาทำการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและทดสอบสมบัติความแข็งแบบบริเนล (Brinell hardness testing) โดยใช้ลูกบอลเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ที่ผ่านการชุบแข็งมาอย่างดี กดลงบนผิววัสดุที่จะวัด ด้วยแรงกด 4.90 กิโลนิวตัน ซึ่งแต่ละเงื่อนไขการทดลองจะเตรียมชิ้นงานทดสอบอย่างน้อย 2 ชิ้น แต่ละชิ้นจะทำการทดสอบค่าความแข็งทั้งหมด 3 ตำแหน่ง และจะนำค่าที่ได้มาทำการหาค่าเฉลี่ยความแข็งของวัสดุ จากนั้นทำการเทียบค่าความแข็งกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรอยกด จากมาตรฐานการทดสอบความแข็งแบบบริเนล (ASTM E10 - 01) หรือหาค่าความแข็งแบบบริเนล โดยใช้สมการคำนวณ ดังนี้

$$BHN = \text{แรงที่ใช้กด/พื้นที่รอยกด} = \frac{P}{(\pi D/2) \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)} \quad (2)$$

โดยที่ BHN คือ Brinell hardness number ซึ่งมีหน่วยเป็นแรงต่อหน่วยพื้นที่
P คือ แรงที่ใช้กด
D,d คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของหัวกดแบบลูกบอล และรอยกด ตามลำดับ

3. ผลการทดลอง

3.1 ลักษณะโครงสร้างจุลภาค (Microstructure)

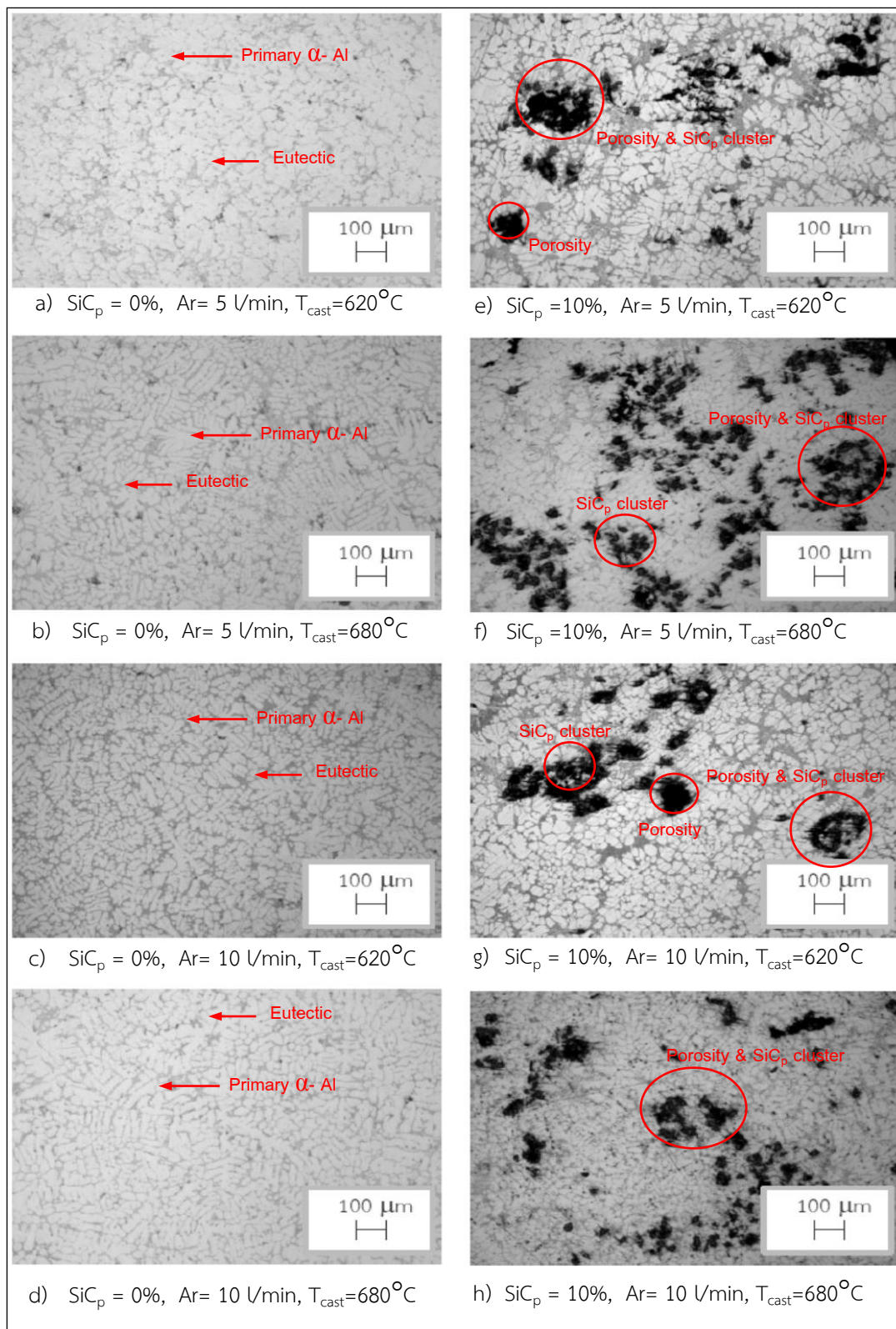
จากผลการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค ดังภาพที่ 2 ในกรณีตัวอย่างที่ไม่มีการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ พบว่าที่อุณหภูมิการเทขึ้นรูป 620 องศาเซลเซียส ลักษณะโครงสร้างทั่วไปจะประกอบด้วยเฟสอะลูมิเนียมปฐมภูมิที่มีลักษณะค่อนข้างกลม (Near-globular primary α phase) และล้อมรอบด้วยเฟสยูเทคติกซิลิคอน ดังภาพที่ 2 (a) และ (c) จากนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเทขึ้นรูปเป็น 680 องศาเซลเซียส พบว่าลักษณะโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเดนไดรต์ของเฟสแอลฟาอะลูมิเนียม (Dendritic primary α - aluminum) และถูกล้อมรอบด้วยยูเทคติกซิลิคอน ดังภาพที่ 2 (b) และ (d)

สำหรับกรณีตัวอย่างที่มีการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และทำการเทขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส และทำการพิจารณาที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน คือ 5 ลิตรต่อนาที พบว่าลักษณะโครงสร้างจะปรากฏกลุ่มของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC_p cluster) และพบรูพรุนเกิดขึ้นด้วย จากนั้นเมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนขณะทำการฉีดอนุภาคผสมเป็น 10 ลิตรต่อนาที พบว่าปรากฏกลุ่มของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์เพิ่มมากขึ้น และขนาดรูพรุนค่อนข้างใหญ่ ดังภาพที่ 2 (e) และ (g) ตามลำดับ

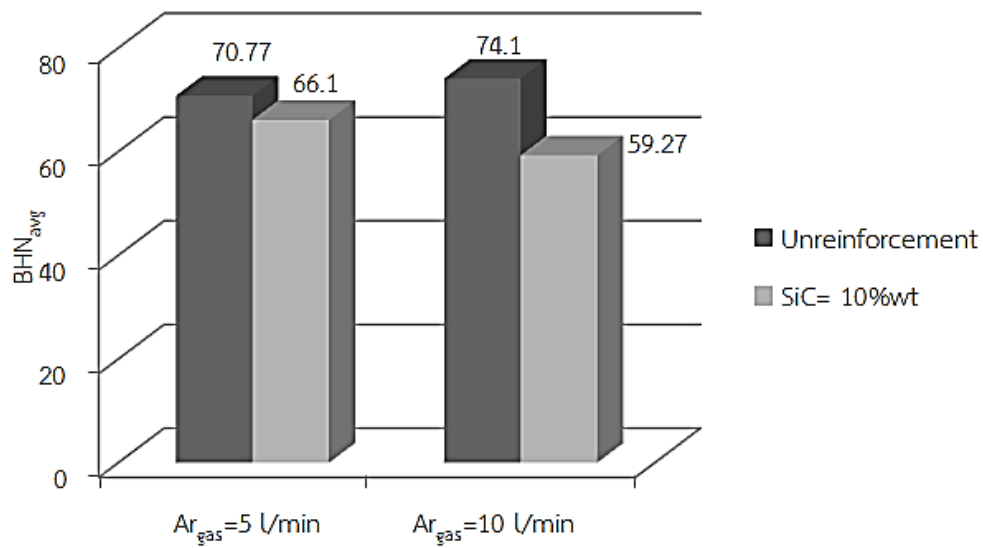
จากนั้นเมื่อปรับอุณหภูมิการเทขึ้นรูปเป็น 680 องศาเซลเซียส และทำการพิจารณาที่อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน คือ 5 และ 10 ลิตรต่อนาที ดังรูปที่ 2 (f) และ (h) ตามลำดับ พบว่าลักษณะโครงสร้างทั่วไปจะประกอบด้วย กลุ่มของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์และรูพรุนปรากฏอยู่บางตำแหน่ง และลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ค่อนข้างกระจายตัวดีกว่ากรณีตัวอย่างที่เทขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส

3.2 สมบัติความแข็ง (Hardness)

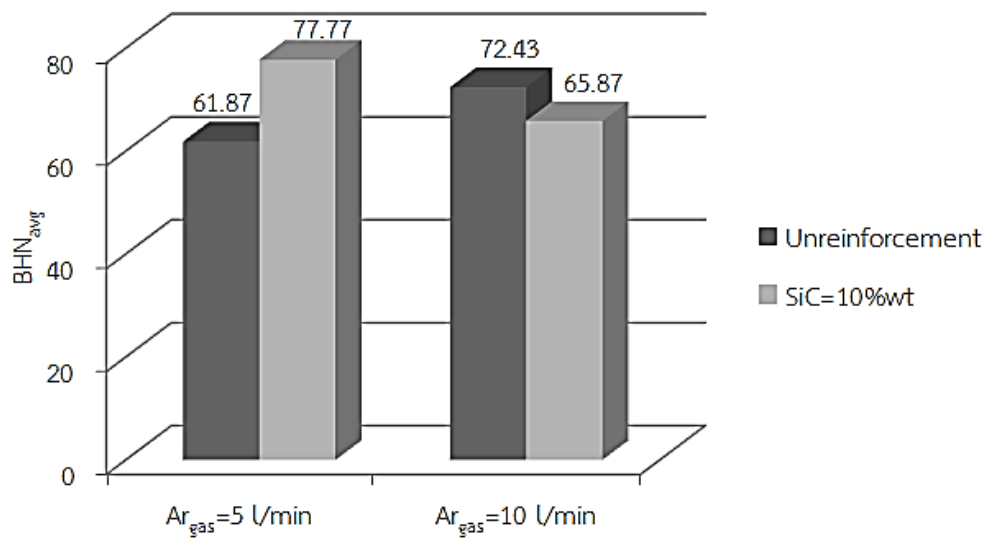
จากผลการตรวจสอบสมบัติความแข็งของชิ้นงานตัวอย่าง พบว่าหากทำการเทขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส และทำการเปรียบเทียบการใช้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่แตกต่างกัน คือ 5 และ 10 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ แนวโน้มของค่าความแข็งที่ได้จะลดลง เมื่อชิ้นงานหล่อมีการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ แต่เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิเทขึ้นรูปเป็น 680 องศาเซลเซียส พบว่า การใช้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่ 10 ลิตรต่อนาที ค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลงเมื่อชิ้นงานหล่อมีการเติมอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์ แต่เมื่อทำการลดอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนเป็น 5 ลิตรต่อนาที จะพบว่าค่าความแข็งที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อชิ้นงานมีการเติมอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์ ดังภาพที่ 3 ซึ่งค่าความแข็งที่ได้ คือ 77.77 BHN



ภาพที่ 2 แผนภาพลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค (Microstructures)



n) Casting temperature at 620°C



ข) Casting temperature at 680°C

ภาพที่ 3 แผนภาพแสดงค่าเฉลี่ยความแข็ง

3. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีต่อสมบัติความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมผสมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดผสมหล่อขึ้นรูป สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

3.1 การเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ทำให้วัสดุมีค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานมักจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมวัสดุเสริมแรง ซึ่งปัญหาของรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานจะทำให้สมบัติเชิงกลที่ดีของวัสดุลดลง

3.2 ในเงื่อนไขที่ไม่มีการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ การเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนจะช่วยลดปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน แต่เงื่อนไขที่มีการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ พบว่าการเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน จะทำให้วัสดุเสริมแรงถูกแก๊สฉีดผสมลงในวัสดุพื้นอย่างรวดเร็วและรุนแรง ซึ่งทำให้ระบบการหล่อถูกรบกวน ส่งผลให้ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ไม่สม่ำเสมอและมีการจับตัวเป็นกลุ่มของอนุภาค (Particle clustering) ซึ่งส่งผลต่อสมบัติความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบ

3.3 การเพิ่มอุณหภูมิในการเทขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส ในเงื่อนไขที่มีการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์พบว่าสมบัติเชิงกลในด้านความแข็งแรงของวัสดุเพิ่มขึ้น เนื่องจากการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส พบว่าการกระจายตัวของรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานมีลักษณะการจับกลุ่มอยู่บริเวณเดียวกัน ซึ่งเป็นบริเวณเดียวกับที่พบการกระจายตัวของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในลักษณะการรวมตัวของอนุภาคเป็นกลุ่มก้อน (Particle clustering) ซึ่งทั้งปัญหาก็เกี่ยวกับรูพรุนและการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่กล่าวข้างต้นนี้ เป็นปัจจัยที่ส่งผลให้คุณภาพของชิ้นงานหล่อลดลง

4. อภิปรายผลการทดลอง

จากผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะพื้นอะลูมิเนียม (356 aluminum) จะประกอบไปด้วยเฟสอะลูมิเนียมปฐมภูมิและเฟสยูเทคติกซิลิคอน ซึ่งโดยทั่วไปการกระจายตัวของยูเทคติกซิลิคอนมักจะพบอยู่บริเวณระหว่างแขนของเดรนไดรต์ (Inter dendritic boundaries) ส่วนลักษณะการกระจายตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์ ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีการฉีดผสมหล่อขึ้นรูป (Particulate - injection casting process) พบว่าการกระจายตัวของอนุภาคเสริมแรงมีลักษณะการกระจายที่ไม่สม่ำเสมอในโลหะพื้น บางตำแหน่งมีการจับกลุ่มของอนุภาค ซึ่งการกระจายตัวของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในโลหะพื้นอะลูมิเนียมผสมจะเริ่มจากสภาวะ Inhomogeneous เข้าสู่สภาวะ Homogeneous กล่าวคือ เมื่อวัสดุเชิงประกอบพื้นโลหะผสมถูกทำให้อยู่ในสภาวะกึ่งแข็ง และเริ่มเข้าสู่กลไกการแข็งตัวของวัสดุเชิงประกอบ พื้นอะลูมิเนียมผสมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์จะถูกผลักออกมาอยู่บริเวณ Freezing front ของแอลฟาอะลูมิเนียมเดรนไดรต์ ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดการแข็งตัวช้าที่สุด ในขั้นตอนนี้นักจะมีการสะสมแก๊สไฮโดรเจนซึ่งทำให้มีโอกาสเกิดรูพรุนขึ้นได้ง่าย จากข้อมูลงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่าระหว่างกระบวนการหลอมเหลวโลหะผสม ที่ถูกล้อมรอบไปด้วยบรรยากาศของแก๊สต่าง ๆ และความชื้นในบรรยากาศซึ่งแก๊สไฮโดรเจนมีความสามารถในการแพร่และละลายสู่น้ำโลหะได้ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิด

จุดบกพร่อง (Deflect) ในชิ้นงานหล่อ (Ravi et al., 2008) ดังนั้นในการทดลองครั้งนี้จึงได้ทำการฉีดผสมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ด้วยแก๊สอาร์กอนผ่านท่อแกรไฟต์ลงในอะลูมิเนียมหล่อเหลว โดยกำหนดอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน คือ 5 และ 10 ลิตรต่อนาที ซึ่งจากผลการทดลอง พบว่าการใช้กระบวนการกำจัดแก๊ส (Hydrogen degassing) ในน้ำโลหะอะลูมิเนียมที่ไม่มีการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ที่อัตราการไหลของอาร์กอนแก๊สที่ 10 ลิตรต่อนาที ทำให้ปริมาณรูพรุนในชิ้นงานลดลง แต่ในตัวอย่างที่มีการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ลงในน้ำอะลูมิเนียมผสม ผลพบว่าการเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนจะทำให้ชิ้นงานมีรูพรุนเพิ่มขึ้น ซึ่งโดยทั่วไป ในโลหะเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมจะพบว่าปริมาณรูพรุนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมอนุภาคเสริมแรง (Aioqbodion and Hassan, 2007) และเนื่องด้วยงานวิจัยครั้งนี้ได้มีการใช้กระบวนการกำจัดแก๊สโดยใช้แก๊สอาร์กอนช่วยในกระบวนการฉีดผสมอนุภาคเสริมแรง ดังนั้นการเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนอาจส่งผลทำให้ชิ้นงานมีปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคเสริมแรงจะทำหน้าที่เป็นตัวกั้นขัดขวางการเคลื่อนที่ของฟองแก๊สในน้ำโลหะพื้นสู่บริเวณผิวหน้าของน้ำโลหะพื้น ดังนั้นการกำจัดฟองแก๊สในน้ำโลหะผสมของวัสดุเชิงประกอบ ด้วยการใช้ Standard fluxing และ Degassing method จึงทำได้ยากกว่าโลหะผสมทั่วไป (Monolithic alloy) แต่เมื่อพิจารณาใช้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่เท่ากัน การเพิ่มขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส ปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานจะน้อยกว่าการเพิ่มขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส เนื่องจากการที่อุณหภูมิต่ำเมื่อน้ำโลหะเริ่มแข็งตัวจะทำให้ฟองแก๊สถูกกักไว้และถ่ายเทออกมาไม่สมบูรณ์ ได้ง่ายกว่าการเพิ่มขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส จากผลการศึกษาของงานวิจัยอื่นยังพบว่าปริมาณรูพรุนลดลงในน้ำโลหะผสมจะทำให้ความหนืดของน้ำโลหะเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเติมเฟสของแข็งให้มีสัดส่วนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้อ่อนภาคเสริมแรงที่เติมไปยังเป็นอุปสรรคต่อการไหลตัว (Fluidity) ของน้ำโลหะระหว่างเข้าสู่กระบวนการแข็งตัว ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิการเพิ่มขึ้นรูปเป็น 680 องศาเซลเซียส จึงทำให้ความหนืดของน้ำโลหะลดลง และเพิ่มประสิทธิภาพการไหลเติมของน้ำโลหะในระหว่างกระบวนการแข็งตัว ซึ่งส่งผลให้เกิด รูพรุนในชิ้นงานน้อยกว่าการเพิ่มขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส

สำหรับผลการวิเคราะห์สมบัติความแข็งของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมผสมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ซึ่งเป็นค่าความต้านของผิววัสดุต่อการเกิดรอยกด หรือกล่าวได้ว่าเป็นความต้านทานต่อแรงเค้นที่ทำให้เกิดรอยกดบนพื้นผิววัสดุ ซึ่งหากทำการเปรียบเทียบกับค่าความแข็งทางทฤษฎี โดยสามารถคำนวณด้วยกฎการผสม (Rule of mixture) ดังสมการที่ 2 และ 3 (Kim, 2000)

$$\overline{H}_{up} = V_h H_h + V_s H_s \quad (3)$$

$$\overline{H}_{low} = (V_h / H_h + V_s / H_s)^{-1} \quad (4)$$

โดยที่ H_h และ H_s คือ ค่าความแข็งของเฟสแข็ง (Hard value of hard phase) และ ค่าความแข็งของเฟสอ่อน (Hard value of soft phase) V_h และ V_s คือ สัดส่วนเชิงปริมาตรของเฟสแข็ง และ สัดส่วนเชิงปริมาตรของเฟสอ่อน $\overline{H}_{up}$ คือ ขอบเขตของค่าความแข็งที่สูงที่สุดของวัสดุเชิงประกอบ และ $\overline{H}_{low}$ คือ ขอบเขตของค่าความแข็งที่ต่ำที่สุดของวัสดุเชิงประกอบ

พบว่าค่าความแข็งแรงจากการคำนวณทางทฤษฎีจะมีค่าสูงกว่าค่าความแข็งแรงที่ได้จากการทดสอบเมื่อเติมซิลิคอนคาร์ไบด์ แต่หากพิจารณาที่ขอบเขตค่าความแข็งแรงต่ำสุดของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมค่าความแข็งแรงที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบชิ้นงาน ซึ่งอาจเนื่องจากค่าความแข็งแรงที่ได้ส่วนมากใกล้เคียงกับค่าความแข็งแรงของวัสดุพื้นหลัก อีกทั้งส่วนหนึ่งเป็นผลจากรูพรุนในชิ้นงาน ซึ่งการปรากฏอยู่ของรูพรุนนี้ส่งผลทำให้เกิดผลกระทบต่อการพฤติกรรมการเสีรูปของวัสดุเชิงประกอบอย่างมาก เนื่องจากค่าความแข็งแรงของวัสดุพื้นและวัสดุเสริมแรงมีความแตกต่างกันมากจึงทำให้การเสีรูปได้รับอิทธิพลจากวัสดุพื้น อย่างไรก็ตามค่าความแข็งแรงที่ได้มักขึ้นอยู่กับลักษณะ และขนาดของรอยกด บางครั้งอาจไม่ใช่ค่าที่ใช้อธิบายปัญหาที่เกิดขึ้นได้ชัดเจน สำหรับงานวิจัยนี้พบว่าค่าความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเกิดเนื่องจากการกระจายตัวของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ยังไม่ดีเท่าที่ควร ซึ่งจะเห็นได้จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค ที่ได้แสดงก่อนหน้านี้ ซึ่งจะพบกลุ่มของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ กลุ่มของรูพรุนขนาดใหญ่กระจายอยู่ทั่วไป จากการศึกษาบทความวิจัยอื่น ๆ พบว่าค่าความแข็งแรงของวัสดุทั่วไปรวมทั้งวัสดุเชิงประกอบ โดยส่วนมากค่าความแข็งแรงจะเป็นค่าตามตำแหน่งหรือบริเวณใดบริเวณหนึ่งเท่านั้น และความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบที่เพิ่มขึ้นโดยส่วนมากจะถูกควบคุมโดยสัดส่วนของอนุภาคเสริมแรงที่เติมเข้าไป แต่อย่างไรก็ดีค่าความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบที่ได้จะขึ้นอยู่กับหลาย ๆ ปัจจัย เช่น ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคเสริมแรง เป็นต้น (Singla et al., 2009)

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช)

6. บรรณานุกรม

- Aigbodion, V.S., and Hassan, S.B. (2007). **Effects of silicon carbide reinforcement on microstructure and properties of cast Al-Si-Fe/SiC particulate composites.** *Materials Science and Engineering*. A 447: 355-360
- Akhlaghi, F., Lajevardi, A., and Maghanaki, H.M. (2004). **Effects of casting temperature on the microstructure and wear resistance of compocast A356/SiCp composites.** *Journal of Materials Processing Technology*. 155-156: 1874-1880
- Hashim, J., Looney, L., and Hashmi, M.S.J. (2001). **The wettability of SiC particles by molten aluminum alloy.** *Journal of Materials Processing Technology*. 119: 324-328
- Hashim, J., Looney, L., and Hashmi, M.S.J. (2001). **The enhancement of wettability of SiC particles in cast aluminum matrix composites.** *Journal of Materials Processing Technology*. 119: 329-335

- Hull, D., and Clyne, T.W. (1996). **An Introduction to Composite Materials. Second Edition.** New York: Cambridge University Press.
- Kim, H. S. (2000). **On the rule of mixtures for the hardness of particle reinforced composites.** Materials Science & Engineer. A 289: 30-33
- Ravi, K.R., Pillai, R.M., Amaranathan, K.R., Pai, B.C. and Chakraborty, M. (2008). **Fluidity of aluminum alloys and composites: A review.** Journal of Alloys and Compounds. 456: 201-210
- Singla, M., Dwivedi, D.D., Singh, L., and Chawla, V. (2009). **Development of Aluminium Based Silicon Carbide Particulate Metal Matrix Composite.** Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering. 455-467