

บทที่ 4

การประยุกต์ใช้

ในปัจจุบันการศึกษาเทคโนโลยีด้านการหล่อโลหะมีการวิจัยและพัฒนากันอย่างแพร่หลายในนานาประเทศ โดยกระบวนการหล่อโลหะแบบฉีด (Die Casting) เป็นกระบวนการที่นิยมใช้ในการขึ้นรูปในอุตสาหกรรมยานยนต์ และชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากมีความสะดวกและรวดเร็วในการผลิตผลิตภัณฑ์ แต่เนื่องจากกระบวนการหล่อแบบฉีดนั้นมีข้อจำกัดในการผลิต เนื่องจากพบข้อบกพร่องในชิ้นงาน คือ ชิ้นงานจะเกิดรูพรุน (Porosity) หรือโพรงอากาศ ซึ่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลของชิ้นงานลดลง และทำให้มีข้อจำกัดในการผลิตชิ้นส่วนที่ต้องรับแรงมากไม่ได้ แนวทางหนึ่งที่จะช่วยลดข้อบกพร่องดังกล่าวได้คือ การหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Casting) เนื่องจากการหล่อแบบนี้จะทำให้การไหลของโลหะกึ่งของแข็งมีการไหลแบบราบเรียบ จึงทำให้รูพรุนลดลง ดังนั้นกระบวนการหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็งจึงถูกพัฒนาขึ้น และในปัจจุบันได้มีการนำเทคโนโลยีนี้มาใช้มากขึ้นทั้งในอเมริกา ยุโรป เกาหลีใต้ และในประเทศไทยก็เริ่มมีการวิจัยและคิดค้นกระบวนการหล่อโลหะกึ่งของแข็ง เพื่อนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมภายในประเทศ

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้เทคนิค Rapid Quenching Mold ในการศึกษาต่าง ๆ เพื่อพัฒนากระบวนการหล่อ Semi-Solid Die Casting ในประเทศไทย ซึ่งการศึกษาต่าง ๆ มีขั้นตอนดังนี้

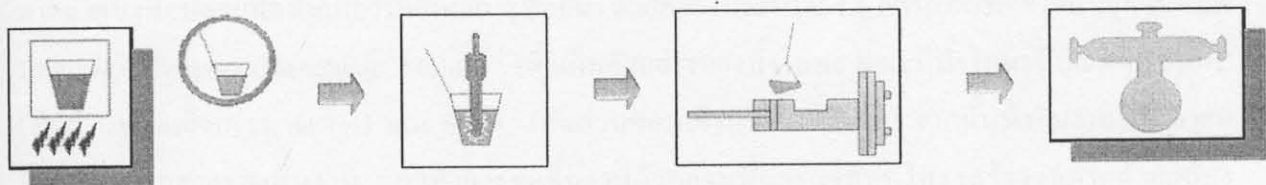
4.1 ขั้นตอนการวิจัย

4.1.1 การศึกษาสัดส่วนของแข็งและโครงสร้างจุลภาคภายใน Shot Sleeve เพื่อหาอุณหภูมิของ Shot Sleeve ที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปโลหะกึ่งของแข็งด้วยแม่พิมพ์ Die Casting

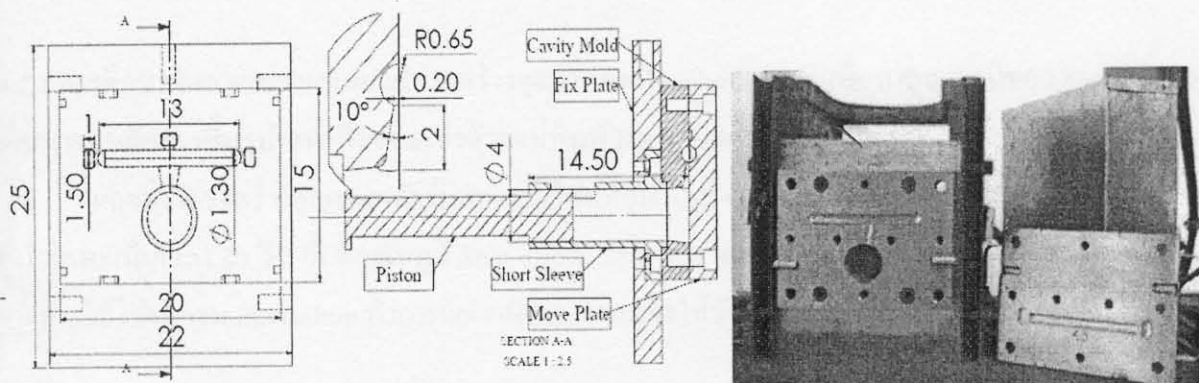
เพื่อให้ทราบถึงอุณหภูมิของ Shot Sleeve ที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปโลหะกึ่งของแข็งด้วยแม่พิมพ์ Die Casting จึงจำเป็นต้องศึกษาสัดส่วนของแข็งและโครงสร้างจุลภาคภายใน Shot Sleeve ซึ่งทำได้โดยนำน้ำโลหะปริมาณ 1 กิโลกรัมที่ผ่านกรรมวิธีผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยการปล่อยฟองแก๊สที่ 20 วินาที เทลงใน Shot sleeve ที่อุณหภูมิ 250 °C 300 °C และ 350 °C ตามลำดับ แล้วจุ่มแม่พิมพ์ทองแดง (Copper Quenching Mold) เพื่อเก็บตัวอย่างและเพื่อศึกษาผลของเวลาโลหะกึ่งของแข็งที่อยู่ใน Shot Sleeve ต่อโครงสร้างจุลภาคนอกจากนี้ได้ทำการทดลองโดยเทโลหะกึ่งของแข็งที่อุณหภูมิ Shot sleeve 350 °C ปล่อยน้ำโลหะทิ้งไว้เป็นเวลา 5 15 20 และ 25 วินาที ตามลำดับ แล้วจุ่มแม่พิมพ์ทองแดง (Copper Quenching Mold) เพื่อเก็บตัวอย่างขึ้นมาอีกครั้ง หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานที่ได้มาตัดบริเวณส่วนกลางของชิ้นงาน และทำการเตรียมตัวอย่างชิ้นงาน เพื่อใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscope)

4.1.2 การหล่อฉีดโลหะกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal Die Casting)

สำหรับการทดลองนี้เป็นการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค และพื้นผิวของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม ADC10 โดยการหล่อฉีดโลหะแบบกึ่งของแข็งของโลหะอะลูมิเนียมผสมซิลิกอนและทองแดง ซึ่งได้ทำการออกแบบแม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 4-2



รูปที่ 4-1 แสดงขั้นตอนการหล่อฉีดโลหะกึ่งของแข็ง



รูปที่ 4-2 แสดงลักษณะของแม่พิมพ์ Die Casting (หน่วยเซนติเมตร)

การศึกษากาการฉีดโลหะกึ่งของแข็งด้วยแม่พิมพ์ Die Casting และวิเคราะห์พื้นผิวของชิ้นงานหลังการหล่อขึ้นรูป โดยทำการเปรียบเทียบชิ้นงานที่หล่อแบบน้ำโลหะและหล่อแบบกึ่งของแข็ง ในการทดลองจะประกอบแม่พิมพ์เข้ากับเครื่องอัดไฮดรอลิกแล้วทำการหลอมโลหะที่อุณหภูมิ 640°C และผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยการจุ่มแท่งแกรไฟต์ที่อุณหภูมิ 610°C เป็นเวลา 9 วินาที จากนั้นเทน้ำโลหะและโลหะกึ่งของแข็งลงใน Shot sleeve ที่มีอุณหภูมิประมาณ 350°C แล้วทำการฉีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ประมาณ 300°C ซึ่งในการหล่อขึ้นงานแต่ละครั้งจะใช้โลหะประมาณ 250 กรัม หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปวิเคราะห์พื้นผิวของชิ้นงาน โครงสร้างจุลภาค และทำการทดสอบสมบัติเชิงกลโดยการทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile strength)

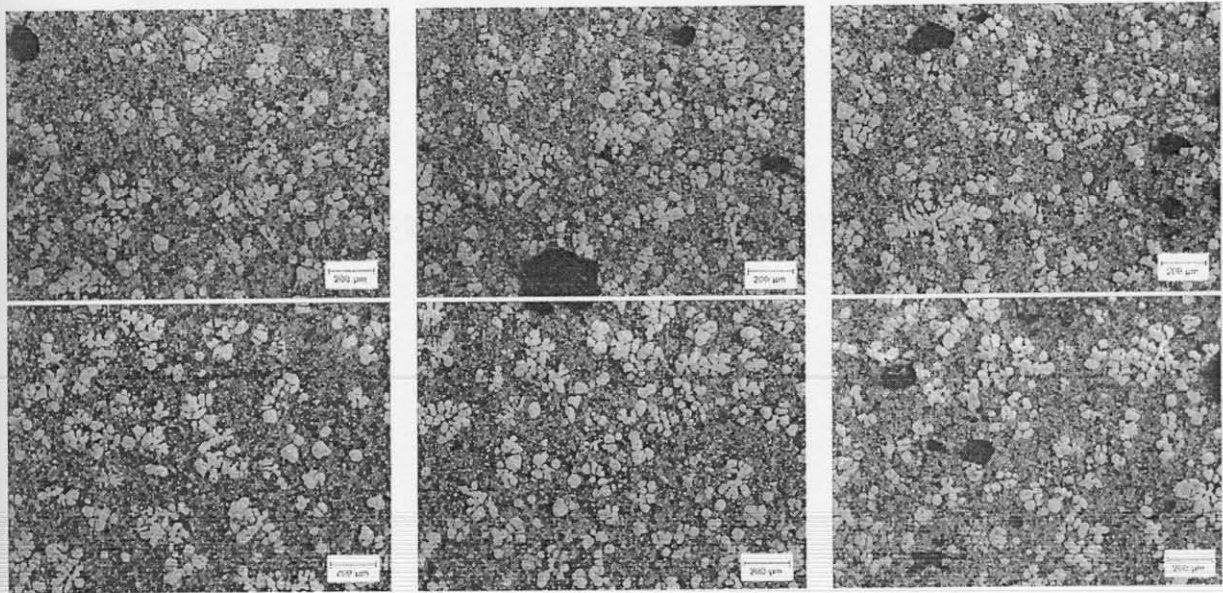
4.1.3 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีปล่อยฟองแก๊สระหว่างการแข็งตัว

เพื่อศึกษาผลของอัตราการเย็นตัวต่อ โครงสร้างจุลภาค และเพื่ออธิบายกลไกการเกิดเกรนก่อนกลมได้ทำการประยุกต์ใช้ Rapid Quenching Mold ในการศึกษา โดยทำการทดลองเริ่มด้วยการหลอมอะลูมิเนียม A356 ที่อุณหภูมิ 700°C กิโลกรัม จากนั้นจุ่มแท่งแกรไฟต์ลงไปในน้ำโลหะที่อุณหภูมิ 620°C และ 670°C ตามลำดับ เพื่อปล่อยฟองแก๊สอาร์กอนเล็ก ๆ ออกมา ด้วยอัตราประมาณ 4.5 ลิตรต่ออนาที จากนั้นจุ่มแม่พิมพ์ทองแดง (Copper Quenching Mold) เพื่อเก็บตัวอย่างของน้ำโลหะ ขณะที่น้ำโลหะมีอุณหภูมิ 610°C (สัดส่วนของแข็งประมาณ 7%) และ 608°C (สัดส่วนของแข็งประมาณ 11%) จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้มาตัดบริเวณส่วนกลางของชิ้นงาน แล้วทำการขัดชิ้นงานตัวอย่างเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscope)

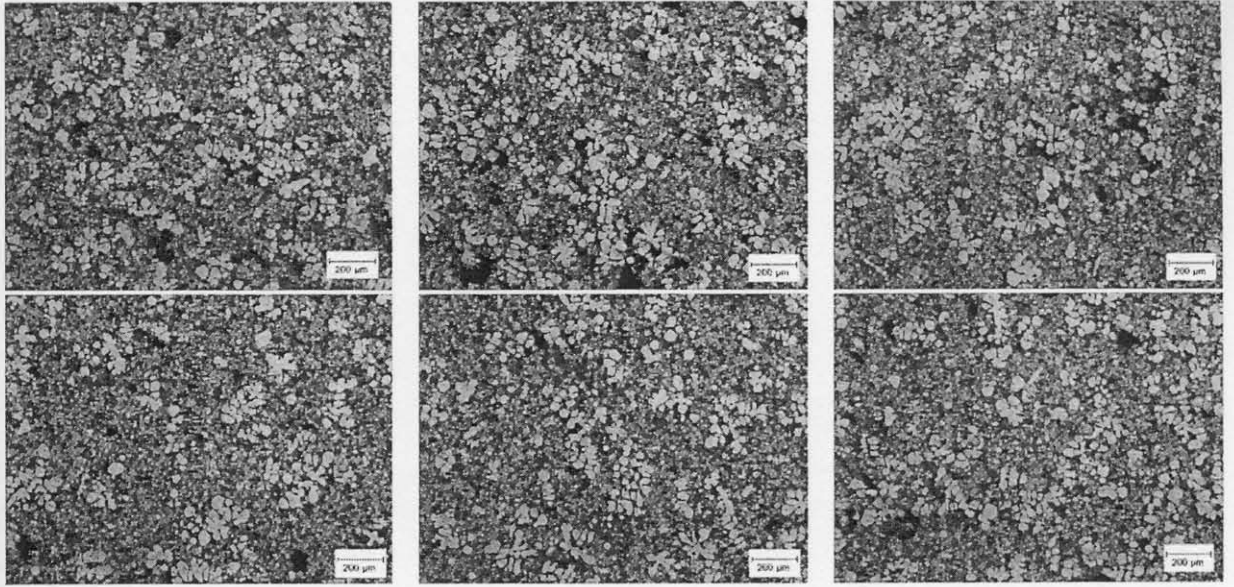
4.2 ผลการวิจัย

4.2.1 การศึกษาสัดส่วนของแข็งและโครงสร้างจุลภาคภายใน Shot Sleeve เพื่อหาอุณหภูมิของ Shot Sleeve ที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปโลหะกึ่งของแข็งด้วยแม่พิมพ์ Die Casting

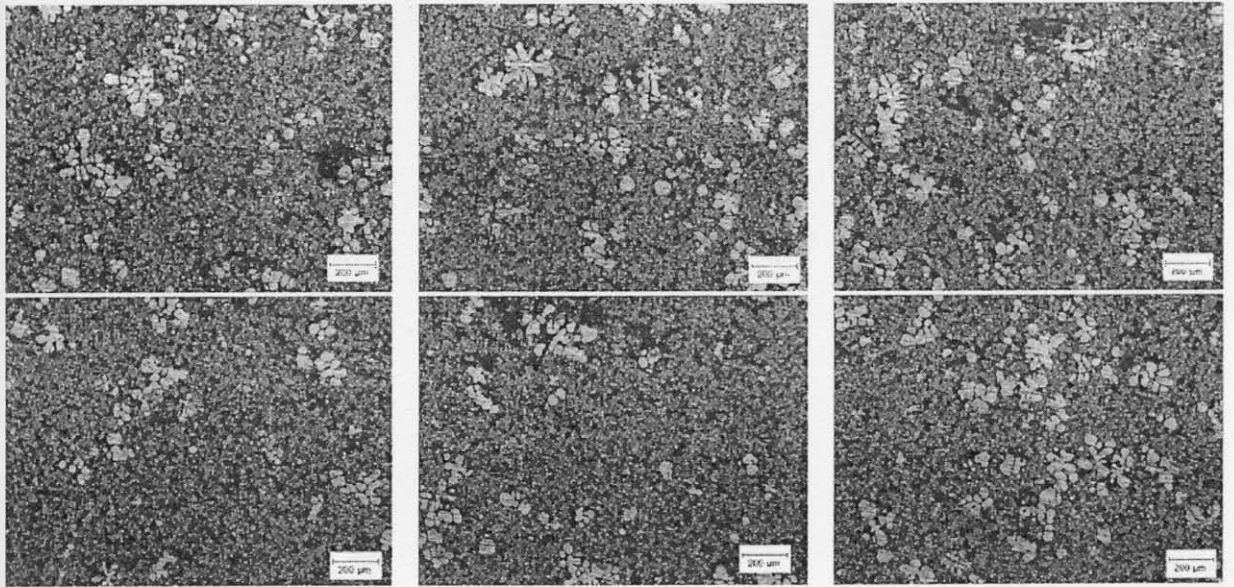
ผลของโครงสร้างจุลภาคหลังจุ่มแท่งแกรไฟต์ที่อุณหภูมิ 600°C แล้วปล่อยให้ฟองก๊าซเล็ก ๆ ไหลลงสู่น้ำโลหะเป็นเวลา 20 วินาที ที่อุณหภูมิ Shot sleeve 250, 300 และ 350°C แสดงในรูปที่ (4-3) – (4-5) ผลจากการใช้โปรแกรม Photoshop ทำการแยกเฟสของของแข็งให้ชัดเจนแสดงในรูปที่ (4-6) – (4-8)



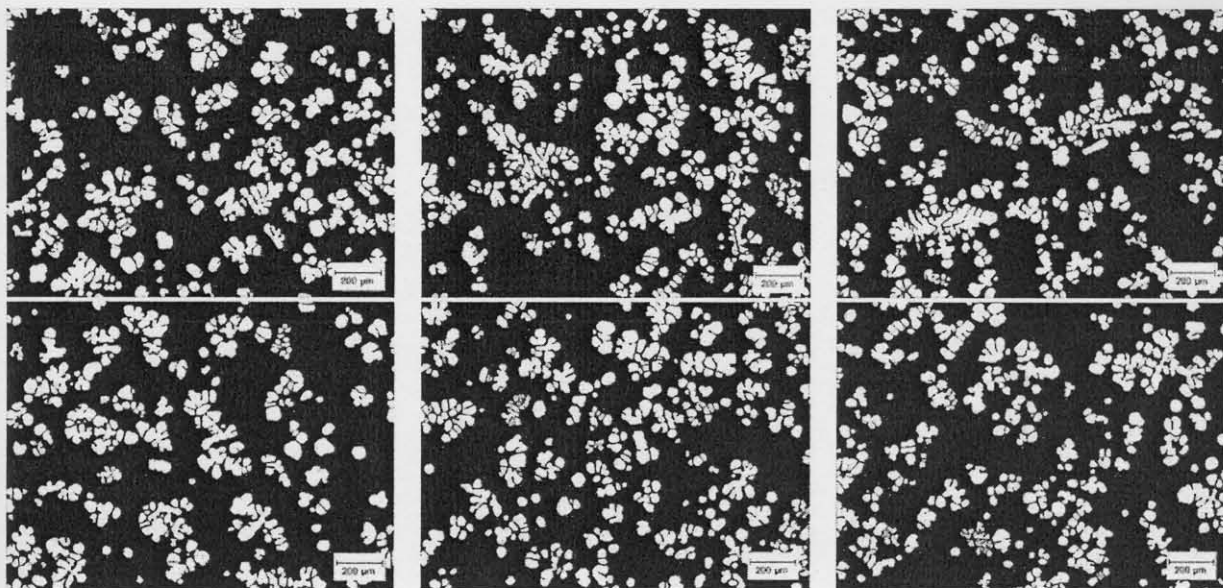
รูปที่ 4-3 โครงสร้างจุลภาคหลังจากจุ่มแท่งแกรไฟต์เป็นเวลา 20 วินาที ที่อุณหภูมิ Shot sleeve 250°C



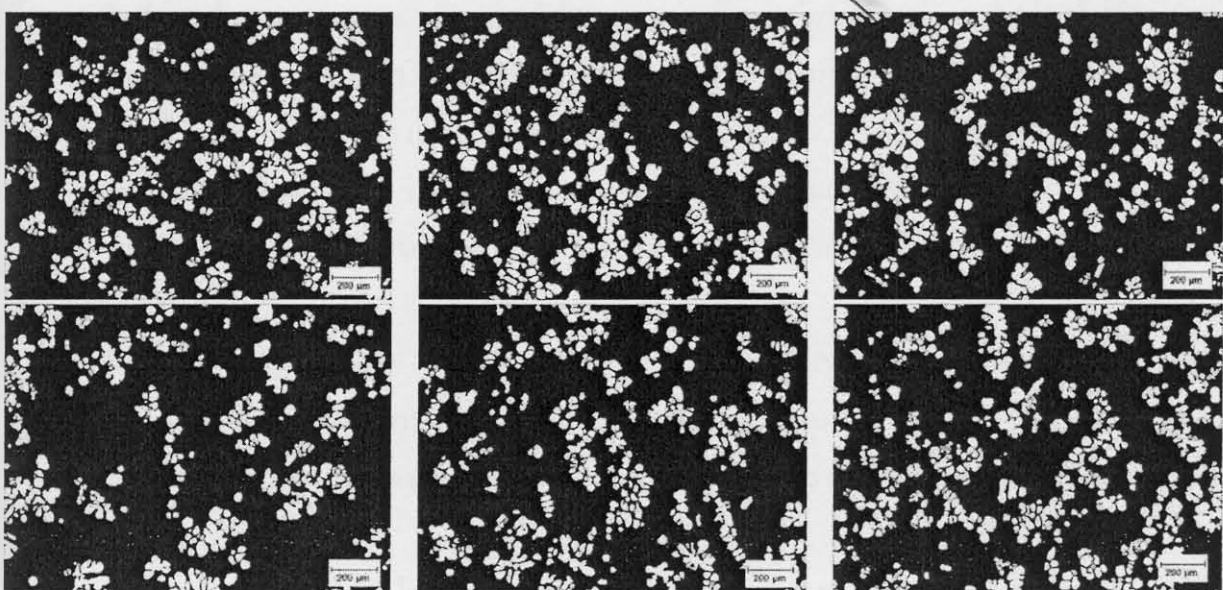
รูปที่ 4-4 โครงสร้างจุลภาคหลังจากจุ่มแท่งแกรไฟต์เป็นเวลา 20 วินาที ที่อุณหภูมิ Shot sleeve 300°C



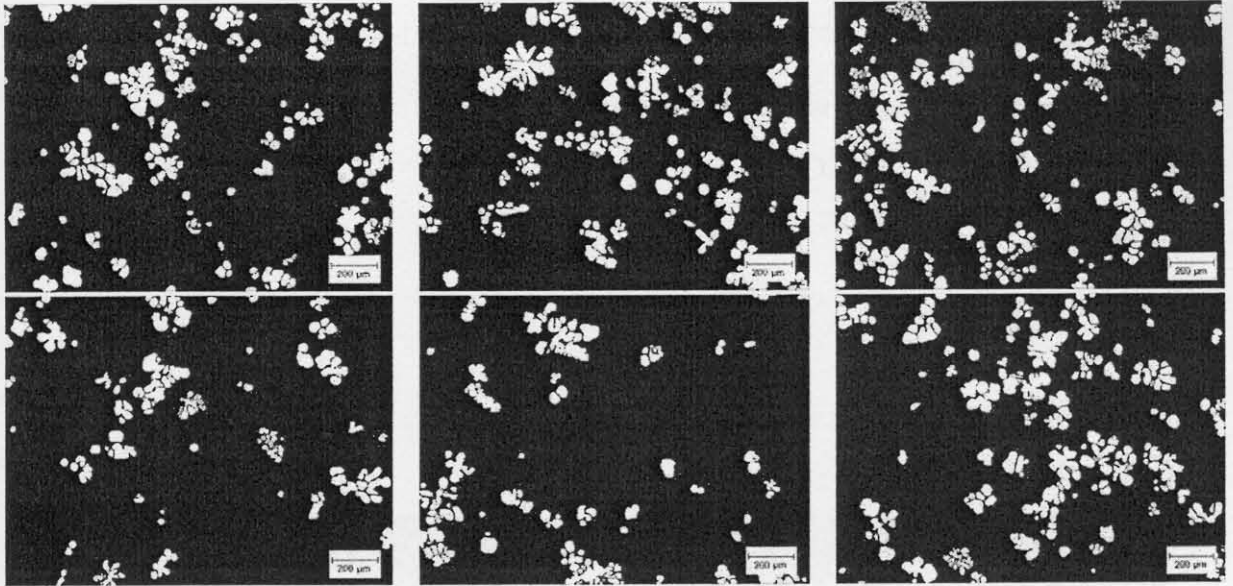
รูปที่ 4-5 โครงสร้างจุลภาคหลังจากจุ่มแท่งแกรไฟต์เป็นเวลา 20 วินาที ที่อุณหภูมิ Shot sleeve 350°C



รูปที่ 4-6 โครงสร้างจุลภาคหลังจากจุ่มแท่งแกรไฟต์เป็นเวลา 20 วินาที ที่อุณหภูมิ Shot sleeve 250°C



รูปที่ 4-7 โครงสร้างจุลภาคหลังจากจุ่มแท่งแกรไฟต์เป็นเวลา 20 วินาที ที่อุณหภูมิ Shot sleeve 300°C



รูปที่ 4-8 โครงสร้างจุลภาคหลังจากจุ่มแท่งแกรไฟต์เป็นเวลา 20 วินาที ที่อุณหภูมิ Shot sleeve 350°C

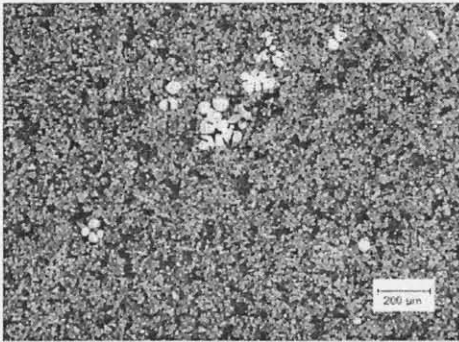
ผลการวิเคราะห์หาสัดส่วนของแข็งโดยใช้โปรแกรม Image Tool จากโครงสร้างจุลภาคของโลหะกึ่งของแข็งที่เทลงใน Shot sleeve ที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่าหลังจากที่เริ่มจุ่มแท่งกราไฟต์ลงไปอุณหภูมิ 600°C แล้วปล่อยให้ฟองก๊าซเล็ก ๆ ไหลลงสู่น้ำโลหะเป็นเวลา 20 วินาที ที่อุณหภูมิ Shot sleeve 250, 300 และ 350°C จะได้สัดส่วนของแข็ง (Solid fraction) 22.57, 19.90 และ 12.26 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4-1 ซึ่งพบว่าเมื่ออุณหภูมิ Shot sleeve ก่อนการเทสูง สัดส่วนของแข็งจะมีน้อยกว่า จะเห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิ Shot sleeve ให้สูงขึ้นก่อนการเท ทำให้อัตราการเย็นตัว (Cooling rate) ของโลหะต่ำลง ทำให้การเติบโตของเกรนช้าลง

ที่อุณหภูมิ Shot sleeve เท่ากันแต่เวลาในการรอต่างกันจะทำให้โครงสร้างเกรนก้อนกลม (Spheroidal grain) มีจำนวนเพิ่มมากขึ้นและจะขยายใหญ่ขึ้นเมื่อเวลาในการรอมากขึ้นดังรูปที่ 4-9 เวลาในการรอที่เพิ่มขึ้นทำให้มีการแพร่ของอะตอมมากขึ้นส่งผลให้เกรนมีรูปร่างที่กลมขึ้นจากกระบวนการ Grain Coarsening

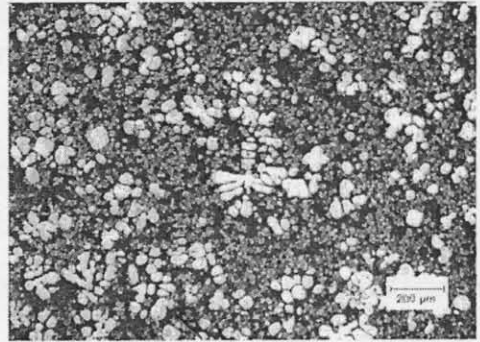
จากผลการทดลองที่ได้ทำให้ทราบถึงผลเบื้องต้นของอุณหภูมิของ Shot sleeve หรืออัตราการเย็นตัวของโลหะกึ่งของแข็งใน Shot sleeve ที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค และสัดส่วนของแข็งที่เกิดขึ้น ซึ่งผลการทดลองนี้จะเป็นแนวทางในการศึกษาเพิ่มเติมต่อไปในอนาคต

ตารางที่ 4-1 แสดงผลสัดส่วนของแข็งที่ได้จากอุณหภูมิ Shot sleeve

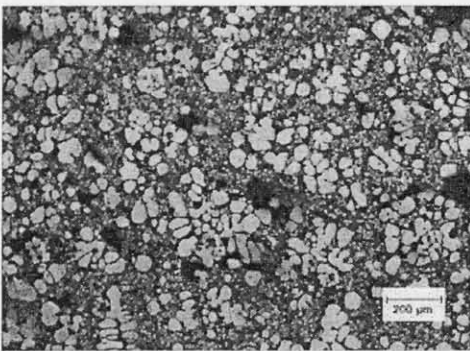
Test	อุณหภูมิเริ่มปล่อยก๊าซ (° C)	เวลาในการปล่อย ก๊าซ (sec)	อุณหภูมิ Shot sleeve (° C)	สัดส่วนของแข็ง (Solid fraction)
1	600	20	250	22.57
2	600	20	300	19.90
3	600	20	350	12.26



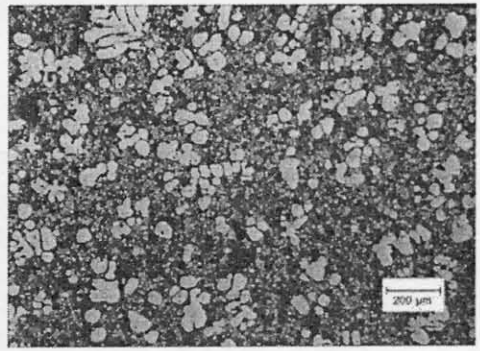
(ก)



(ข)



(ค)



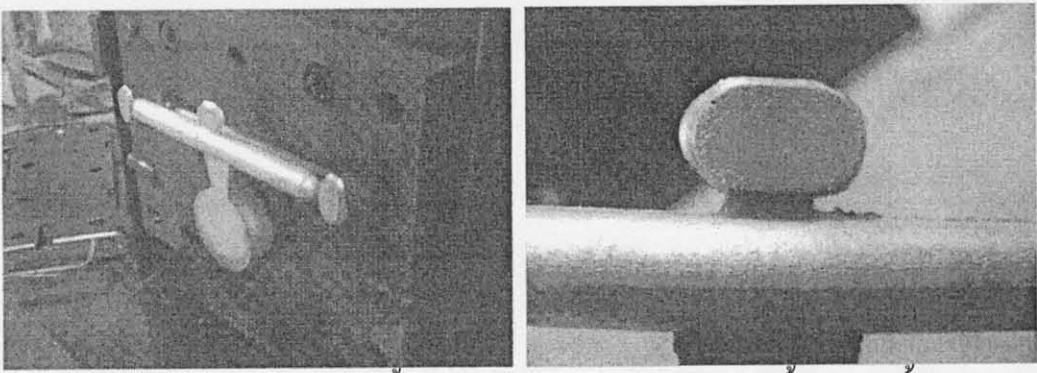
(ง)

รูปที่ 4-9 โครงสร้างจุลภาคของโลหะอะลูมิเนียมผสม ADC10 ในกระบวนการหล่อโลหะกึ่งของแข็งที่อุณหภูมิ Shot sleeve เท่ากัน (50x) (ก) รอ 5 วินาที (ข) รอ 15 วินาที (ค) รอ 20 วินาที (ง) รอ 25 วินาที

4.2.2 การหล่อฉีดโลหะกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Die Casting)

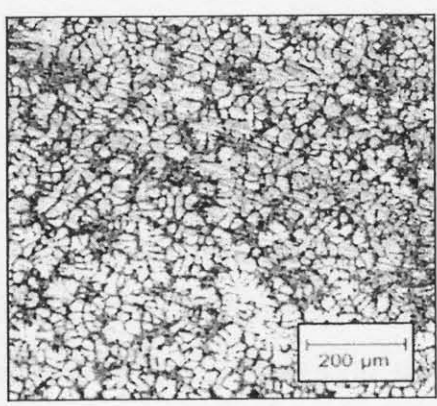
การศึกษาการขึ้นรูปโลหะกึ่งของแข็งด้วยแม่พิมพ์ Die Casting และวิเคราะห์พื้นผิวของชิ้นงานหลังการฉีดขึ้นรูป ชิ้นงานจากการฉีดขึ้นรูปโลหะทั้งแบบโลหะกึ่งของแข็งและแบบน้ำโลหะทั่วไปแสดงในรูปที่ 4-38 ซึ่งจะเห็นว่าชิ้นงานที่หล่อได้จากกระบวนการฉีดโลหะแบบกึ่งของแข็งจะปรากฏเส้นการไหล (Flow line)

เพียงเล็กน้อยหรืออาจไม่ปรากฏเลย ทั้งนี้ตัวแปรที่สำคัญคือความเร็วที่ใช้ในการฉีด และอุณหภูมิของแม่พิมพ์ (Mold Temperature)

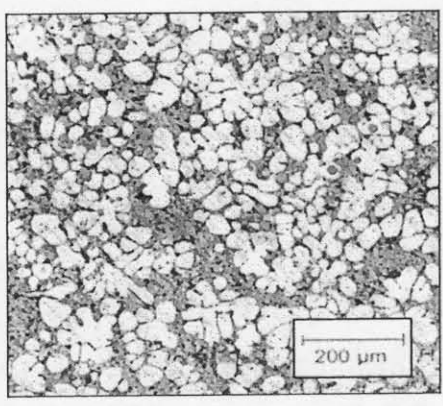


รูปที่ 4-10 แสดงลักษณะของชิ้นงานโลหะหลังการหล่อฉีด และพื้นผิวของชิ้นงาน

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผลิตจากน้ำโลหะและโลหะกึ่งของแข็ง แสดงในรูปที่ 4-39 ซึ่งจะเห็นว่าชิ้นงานที่ได้มีโครงสร้างก่อนกลมเพียงเล็กน้อยซึ่งเป็นเพราะขณะหล่อโลหะมีสัดส่วนของแข็งน้อย และมีอัตราการเย็นตัวค่อนข้างสูงทำให้เกรนก่อนกลมบางส่วนได้แตกกลับไปเป็นเดนไดรต์ (Dendrite) อีกครั้ง ผลการทดลองทำให้ทราบว่าสามารถขึ้นรูปโลหะกึ่งของแข็งแบบฉีด (Die Casting) ได้แต่ต้องควบคุมตัวแปรให้มากขึ้นเช่นอุณหภูมิของแม่พิมพ์และสัดส่วนของของแข็งเป็นต้น



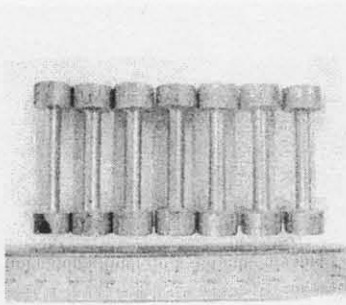
(ก)



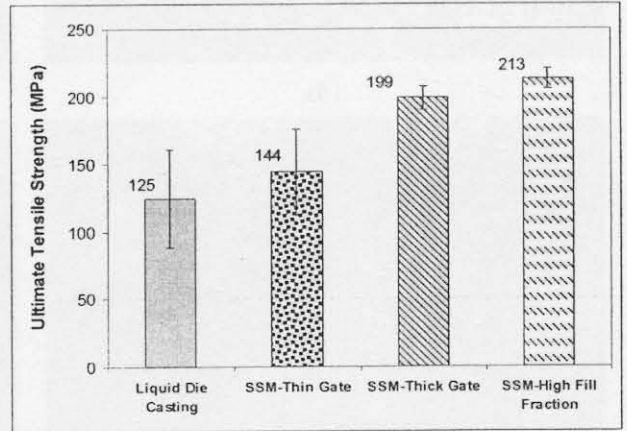
(ข)

รูปที่ 4-11 โครงสร้างจุลภาคของโลหะอะลูมิเนียมผสม ADC10 ในกระบวนการขึ้นรูปแบบฉีด (Die Casting) (100x) (ก) โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อฉีดน้ำโลหะทั่วไป (ข) โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อฉีดน้ำโลหะแบบกึ่งของแข็ง

เมื่อนำชิ้นงานโลหะที่ผ่านกระบวนการหล่อฉีด (Die Casting) มาทดสอบความแข็งแรงดึงจะพบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการหล่อแบบกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Die Casting) มีค่าความแข็งแรงสูงเฉลี่ยกว่า (213 ± 9) และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่แคบกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4-13 ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการฉีดโลหะกึ่งของแข็งจะช่วยลดค่าหาค่า (Defect) ที่เกิดจากรูพรุนในเนื้อชิ้นงานลงได้



รูปที่ 4-12 ชิ้นงานตัวอย่าง

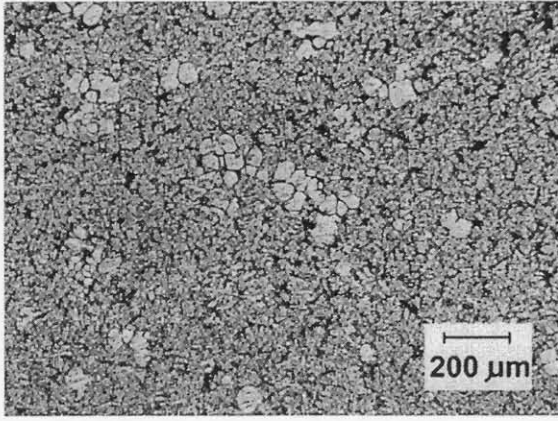


รูปที่ 4-13 ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงาน

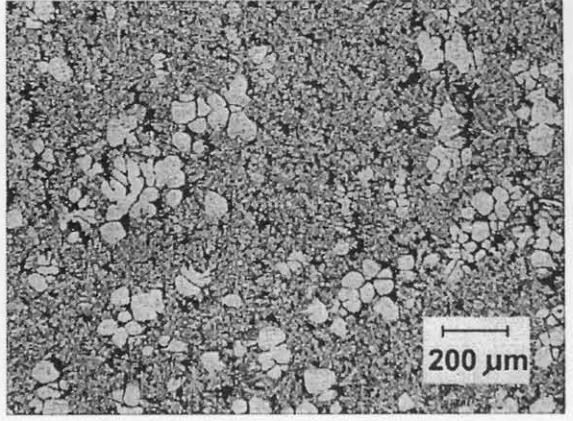
4.2.3 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีปล่อยฟองแก๊สระหว่างการแข็งตัว

โดยนำภาพโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้อง Optical Microscope และใช้โปรแกรม Photoshop ทำการแยกเฟสของของแข็งให้ชัดเจน จากนั้นใช้โปรแกรม Image Tool วิเคราะห์ขนาดอนุภาคเฉลี่ย และจำนวนอนุภาคเฉลี่ย

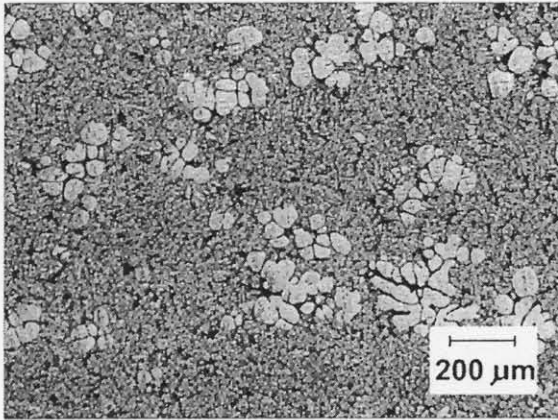
จากผลของขนาดอนุภาคเฉลี่ยและจำนวนอนุภาคเฉลี่ย โดยเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิจุ่ม 620°C และจุ่มถึงอุณหภูมิ 610°C (สัดส่วนของแข็ง 7%) และอุณหภูมิ 608°C (สัดส่วนของแข็ง 11%) พบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก $43.62 \mu\text{m}$ เป็น $50.42 \mu\text{m}$ แต่จำนวนอนุภาคเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก คือ จาก $47 \text{ particle}/\text{mm}^2$ เพิ่มเป็น $86 \text{ particle}/\text{mm}^2$ ซึ่งอธิบายได้ว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นเกิดจากการเติบโตของอนุภาคตามเวลา และสัดส่วนของแข็งที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นไปตามหลักของการ coarsening และเติบโต ส่วนจำนวนอนุภาคที่เพิ่มขึ้นอย่างมากมานั้นอาจเกิดจากการที่แท่งกราไฟต์เย็น ทำให้เกิดการนิวคลีเอชันของอนุภาคขนาดเล็กจำนวนมาก และอนุภาคขนาดเล็กนี้อาจจะแตกตัวเพราะอัตราการไหลของแก๊สทำให้เกิดการพา (Convection) ขึ้น หรือจำนวนอนุภาคที่เพิ่มขึ้นอาจเกิดจากการที่จำนวนอนุภาคขนาดเล็กดังกล่าวถูกผลักออกจากพื้นผิวของแท่งกราไฟต์ เนื่องจากแก๊สและเกิดการนิวคลีเอชันใหม่ที่ผิวอีกครั้ง จึงทำให้จำนวนอนุภาคเพิ่มขึ้น



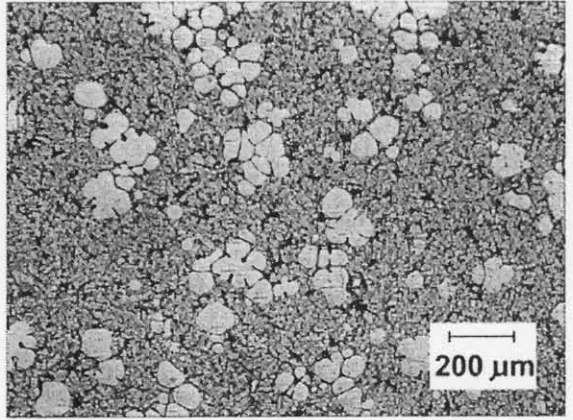
(a)



(b)



(c)



(d)

รูปที่ 4-14 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ได้จากการปล่อยให้เย็นตัวในแม่พิมพ์ทองแดง ภายหลังจากการปล่อยฟองแก๊สด้วยอัตรา 4.5 ลิตร/นาที ที่อุณหภูมิจุ่มและอุณหภูมิยก ที่แตกต่างกัน

(a) 620-610°C (b) 620-608°C (c) 670-610°C (d) 670-608°C

ตารางที่ 4-2 แสดงผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณ จากชิ้นงานที่ได้จากแม่พิมพ์ทองแดง

การทดลอง	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (μm)	จำนวนอนุภาคเฉลี่ย (particle/ mm^2)	เวลาในการแข็งตัว (sec)
QG2F45-2010-C	43.62	47	35
QG2F45-2008-C	50.42	86	42
QG2F45-7010-C	53.87	40	40
QG2F45-7008-C	56.71	55	55

เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิจุ่ม 670°C เมื่อจุ่มแท่งแกรไฟต์อุณหภูมิ 610°C (สัดส่วนของแข็ง 7%) และอุณหภูมิ 608°C (สัดส่วนของแข็ง 11%) พบว่า ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 53.87 μm เป็น 56.71 μm และจำนวนอนุภาคเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 40 particle/ mm^2 เป็น 55 particle/ mm^2 ขนาดอนุภาคที่เติบโตขึ้น

เป็นไปตามหลักของการ coarsening และเคิบโต ส่วนจำนวนอนุภาคที่เพิ่มขึ้นแต่ไม่มากนัก เนื่องจากอัตราการเย็นตัวในช่วงตัวกล่าวมีค่าต่ำ จึงทำให้อนุภาคเริ่มต้นที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่ จึงทำให้การแตกหักของกิ่งเดนไดรต์เป็นไปได้ยาก จำนวนอนุภาคจึงเพิ่มขึ้น ไม่มากนัก หรือถ้าอธิบายในทฤษฎีของการนิวคลีเอชัน ก็สามารถอธิบายได้ว่าเนื่องจากแท่งแกรไฟต์มีความร้อนมากขึ้น ภายหลังจากที่สร้างสัดส่วนของแข็ง 7% แล้ว ทำให้อันเดอ์กูลิงมีค่าต่ำ จึงทำให้อัตราการเกิดนิวคลีเอชันที่แท่งแกรไฟต์ต่ำลงไปด้วย