



การพัฒนาระบบผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยการพ่นฟองแก๊สขณะแข็งตัว
Development of the Gas Induced Semi-Solid Metal Processing System

รอมฎอน บุระพา
Romadorn Burapa

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Materials Engineering
Prince of Songkla University**

2552

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

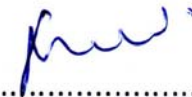
(1)


ชื่อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาระบบผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยการพันฟองแก๊สขณะแข็งตัว
ผู้เขียน นายรอมฎอน บุระพา
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก


.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา วรรณสินธุ์)

คณะกรรมการสอบ


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยชัย ปลุกผล)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริกุล วิสุทธิเมฆางกูร)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา วรรณสินธุ์)


..... กรรมการ
(ดร.ประภาศ เมืองจันทร์บุรี)


..... กรรมการ
(ดร.พงษ์ศักดิ์ ดุลยประพันธ์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	การพัฒนากระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง โดยการพันฟองแก๊สขณะแข็งตัว
ผู้เขียน	นายรอมฎอน บุระพา
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
ปีการศึกษา	2552

บทคัดย่อ

กระบวนการที่ใช้ในการผลิตโลหะกึ่งของแข็งได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและมีการคิดค้นวิธีการใหม่ ๆ เพื่อให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น รวมถึงช่วยลดต้นทุนต่าง ๆ ของกระบวนการผลิตได้ ซึ่งหนึ่งในกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งที่ช่วยลดต้นทุนดังกล่าวได้ คือ กระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยการพันฟองแก๊สเข้าไปในน้ำโลหะขณะแข็งตัว (กระบวนการ GISS) กระบวนการนี้ได้ถูกพัฒนาและนำไปใช้งานกับอะลูมิเนียมผสมเกรดต่าง ๆ ในระดับห้องปฏิบัติการ อย่างไรก็ตามการพัฒนากระบวนการ GISS ให้สามารถประยุกต์ใช้งานได้ในระดับอุตสาหกรรม จำเป็นต้องศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิต รวมถึงชิ้นงานที่ผลิตได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงผลของเวลาที่ใช้ในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพันฟองแก๊ส อุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ อัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะ อุณหภูมิของแท่งกราไฟต์ก่อนการจุ่มลงไป ในน้ำโลหะ และผลของปริมาณน้ำโลหะที่ใช้ในกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งที่มีต่อปริมาณสัดส่วนของแข็งเริ่มต้น และ โครงสร้างจุลภาคที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ผลจากการวิจัยแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา และปริมาณของน้ำโลหะที่ใช้ในการจุ่มแท่งกราไฟต์ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกระบวนการ GISS คือ การใช้อุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ที่ต่ำกว่า และใช้เวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพันฟองแก๊สที่นานขึ้น ร่วมกับการใช้อัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เกิดสัดส่วนของแข็งเพิ่มขึ้น และเฟส α อะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นแบบก้อนกลมเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย โดยเฟส α อะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 60 - 80 μm . และมีค่าความกลมเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.65 - 0.75 นอกจากนี้ด้วยการใช้สเลอรี่กึ่งของแข็งที่ผลิตได้ด้วยกระบวนการ GISS ร่วมกับการหล่อฉีดไดคาสติงและหลังจากทำการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแล้ว (T6) ทำให้สมบัติทางกลของชิ้นงานดีขึ้น โดยมีค่าความต้านแรงดึงสูงสุดอยู่ที่ 293.3 MPa. และมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวอยู่ที่ 10.2 %

Thesis Title Development of the Gas Induced Semi-Solid Metal Processing System
Author Mr.Romadorn Burapa
Major Program Materials Engineering
Academic Year 2009

Abstract

A new semi-solid metal processing technique has been developed to produce semi-solid slurry with more effectiveness and efficiency at lower costs for the rheocasting process. This technique is called the Gas Induced Semi-Solid (GISS) process. The GISS process has been successfully used in laboratory settings to process several aluminum alloys, including cast and wrought alloys. However, to develop this technique for commercial applications in industrial settings, it is important to determine the optimized processing conditions in order to control the resulting solid fraction and microstructure of the alloys. In this work, the effects of rheocasting times, rheocasting temperatures, diffuser surface area per melt volume (S/V Ratio), graphite diffuser temperatures and metal weights on the resulting solid fraction and microstructure of A356 aluminum alloy were investigated. Results of experiments show the relationship of the processing parameters rheocasting temperature, rheocasting time and amount of metal used in the GISS process. In summary, the results indicate the suitable conditions of the GISS process are lower rheocasting temperature and longer rheocasting time with the diffuser surface area per melt volume is increased. These conditions result in the solid fraction is increased and the formation of fine and uniform globular structure of the primary α - Al phase. The primary α - Al presented in mean particle diameter of 60 - 80 μm and shape factor of 0.65 - 0.75, and by using semi-solid slurry prepared by the GISS process with die casting component after T6 heat treatment can improve mechanical properties such as ultimate tensile strength of 293.3 MPa and elongation of 10.2%.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ข้าพเจ้าต้องขอขอบคุณ โครงการสมอง ไหลกลับ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัย

ขอขอบคุณ โครงการทุนค่าเล่าเรียนและโครงการทุนผู้ช่วยสอน ของนักศึกษา ระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้ให้การสนับสนุนเงิน ค่าลงทะเบียนเรียนในการศึกษาระดับปริญญาโท

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.เจษฎา วรรณสินธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ โอกาสในการทำวิจัยและมอบความไว้วางใจให้ข้าพเจ้าเป็นผู้ช่วยวิจัยในหลายๆ โครงการ ทำให้ ข้าพเจ้าได้รับประสบการณ์และความรู้อันมีประโยชน์อย่างมากมาในการทำวิจัย ตลอดจนให้ คำแนะนำและกำลังใจที่ดีเสมอมา

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชัชชัย ปลุกผล รศ.ดร.ศิริกุล วิสุทธิ์เมธางกูร ดร.ประกาศ เมืองจันทร์บุรี และ ดร.พงษ์ศักดิ์ คุลยประพันธ์ ที่ได้เสียสละเวลามาเป็นคณะกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์และให้ข้อเสนอแนะที่ดีในครั้งนี้ ซึ่งทำให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และ บุคลากรทุกท่านที่ให้การสนับสนุนด้านสถานที่ งบประมาณ และคำแนะนำต่างๆ ซึ่งทำให้การ ดำเนินงานเป็นไปได้อย่างราบรื่น

นอกจากนี้วิทยานิพนธ์เล่มนี้จะสำเร็จไปไม่ได้เลย หากไม่ได้รับความช่วยเหลือ จากทีมงาน Innovative Metal Technology (IMT) ทุกคน ซึ่งได้ให้ความช่วยเหลืออย่างเต็มที่ในการ ทดลองครั้งนี้

และสุดท้าย ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ที่คอยดูแลเอาใจใส่ตั้งแต่ เล็กจนโตและเป็นกำลังใจให้ตลอดมา

รอมฎอน บุระพา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(11)
รายการรูป	(13)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(19)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.5 ทฤษฎี สมมุติฐาน หรือกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย	4
1.5.1 การหล่อ โลหะแบบกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal Casting)	4
1.5.2 เทคโนโลยีการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง	6
1.5.3 กรรมวิธี Rheocasting แบบต่าง ๆ ที่ใช้ในอุตสาหกรรม	7
1.5.4 กรรมวิธีการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง โดยการพ่นฟองแก๊สขณะ แข็งตัว (Gas Induced Semi-Solid, GISS Process)	10
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	11
2. วิธีการวิจัย	19
2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	19
2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	20
2.2.1 เตาหลอม (Melting Furnace)	20
2.2.2 เป้าหลอมโลหะ (Crucible)	20
2.2.3 เครื่องผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยการพ่นฟองแก๊สขณะแข็งตัว (GISS Version 1.0)	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.4 เครื่องหล่ออัดฉีดสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานของอะลูมิเนียม (Die Casting Machine)	22
2.3 ขั้นตอนการวิจัย	22
2.3.1 พัฒนาและสร้างเครื่องต้นแบบที่ใช้ในการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง	22
2.3.2 การวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermal Analysis) ของโลหะที่ใช้ในการทำวิจัย	22
2.3.3 การประมาณค่าสัดส่วนของแข็งด้วยแบบจำลองของไซล์ (Scheil Model)	23
2.3.4 การศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยการพันฟองแก๊สขณะแข็งตัว	23
2.3.5 การประยุกต์ใช้ระบบผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยการพันฟองแก๊สขณะแข็งตัว (GISS Process) ร่วมกับกระบวนการหล่อแบบไดคาส (Die Casting)	24
2.4 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานเพื่อการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค	24
2.5 ขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure)	25
2.5.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานและการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	25
2.5.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้างเชิงปริมาณ (Quantitative Image Analysis)	26
2.6 ขั้นตอนการหาค่าความหนาแน่นและเปอร์เซ็นต์โพรงอากาศภายในเนื้อชิ้นงานตัวอย่าง	28
2.7 ขั้นตอนการปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ด้วยกระบวนการทางความร้อน (Heat Treatment)	29
2.8 ขั้นตอนการทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) ของโลหะอะลูมิเนียมผสม A356	29
3. ผลและการอภิปรายผล	30
3.1 การพัฒนาและสร้างเครื่องต้นแบบที่ใช้ในการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง	30

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 การวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermal analysis) ของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด A356	35
3.3 ผลของอุณหภูมิน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ (Rheocasting Temperature) และ เวลาที่ใช้ในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊ส (Rheocasting Time)	38
3.3.1 ผลของอุณหภูมิน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์และเวลาที่ใช้ใน การจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊สที่มีต่ออุณหภูมิของสเลอรัรี กึ่งของแข็ง (Slurry Temperature) อัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะ ในระหว่างการจุ่มแท่งกราไฟต์ (Cooling Rate) และปริมาณ สัดส่วนของแข็งเริ่มต้น (Initial Solid Fraction)	38
3.3.2 ผลของอุณหภูมิน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์และเวลาที่ใช้ใน การจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊สที่มีต่อโครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure) ของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด A356	42
3.4 ผลของอัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะ (S/V Ratio)	47
3.4.1 ผลของอัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำ โลหะ ที่มีต่ออุณหภูมิของสเลอรัรีกึ่งของแข็ง (Slurry Temperature) และปริมาณสัดส่วนของแข็งเริ่มต้น (Initial Solid Fraction)	48
3.4.2 ผลของอัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำ โลหะ ที่มีต่อโครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure) ของโลหะ อะลูมิเนียมผสมเกรด A356	50
3.5 ผลของอุณหภูมิแท่งกราไฟต์ก่อนการจุ่มลงไปใต้น้ำโลหะ (Graphite Diffuser Temperature)	52
3.5.1 ผลของอุณหภูมิแท่งกราไฟต์ก่อนการจุ่มลงไปใต้น้ำโลหะ ที่มี ต่ออุณหภูมิของสเลอรัรีกึ่งของแข็ง (Slurry Temperature) และ ปริมาณสัดส่วนของแข็งเริ่มต้น (Initial Solid Fraction)	53

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5.2 ผลของอุณหภูมิน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊สที่มีต่อโครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure) ของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด A356	54
3.6 ผลของปริมาณน้ำโลหะ (Metal Weight) ที่ใช้ในกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งที่มีต่อเวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊ส	57
3.7 ผลของการประยุกต์ใช้ระบบผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยการพ่นฟองแก๊สขณะแข็งตัว (GISS Process) ร่วมกับกระบวนการหล่อแบบไดคาสติง (Die Casting)	61
3.7.1 ผลของการฉีดขึ้นงานตัวอย่างจากอุตสาหกรรมด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็ง	62
3.7.2 ผลการทดสอบความหนาแน่นและเปอร์เซ็นต์โพรงอากาศของอะลูมิเนียมเกรด A356	64
3.7.3 การทดสอบ Blister ที่เกิดขึ้นของชิ้นงานตัวอย่างที่ผลิตได้	65
3.7.4 การทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานตัวอย่างที่ผลิตได้ด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็ง	66
3.7.5 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่างที่ผลิตได้ด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็ง	68
4. บทสรุปและข้อเสนอแนะ	70
4.1 บทสรุป	70
4.1.1 ผลของอุณหภูมิน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์และเวลาที่ใช้จุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊ส	70
4.1.2 ผลของอัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะ	71
4.1.3 ผลของอุณหภูมิแท่งกราไฟต์ก่อนการจุ่มลงไปในน้ำโลหะ	71
4.1.4 ผลของปริมาณน้ำโลหะที่ใช้ในกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง	72

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.5 ผลของการประยุกต์ใช้ระบบผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยการพัน ฟองแก๊สขณะแข็งตัวร่วมกับกระบวนการหล่อแบบไดคาสติง	72
4.2 ข้อเสนอแนะ	73
บรรณานุกรม	74
ภาคผนวก	77
ก. ลักษณะเฉพาะของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356-T6 ในงานหล่อแบบพิมพ์ถาวร (Permanent Mold Casting)	78
ข. ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ที่ใช้ใน งานวิจัยครั้งนี้	81
ประวัติผู้เขียน	86

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสม A356 ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้	19
2.2	แสดงค่าความหนาแน่นอ้างอิง (Reference Density, D_{Ref}) ของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้	28
3.1	แสดงค่าสัดส่วนของแข็งที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของโลหะอะลูมิเนียมผสม A356 ที่คำนวณได้ด้วยสมการของไฮล์ (Scheil Equation)	36
3.2	ผลของอุณหภูมิเสถียรที่แข็งของแข็ง อัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะในระหว่างการจุ่มแท่งกราไฟต์ และปริมาณสัดส่วนของแข็งที่เกิดขึ้นหลังจากการจุ่มแท่งกราไฟต์ที่อุณหภูมิของน้ำโลหะและเวลาที่ใช้ในการพ่นฟองแก๊สที่แตกต่างกัน	39
3.3	สรุปผลของรูปร่าง ขนาด และค่าความกลมของเฟส α อะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นภายใต้อุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ 620°C แต่เวลาที่ใช้ในการจุ่มแท่งกราไฟต์แตกต่างกัน	43
3.4	สรุปผลของรูปร่าง ขนาด และค่าความกลมของเฟส α อะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นภายใต้เวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์ 5 วินาที แต่อุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์แตกต่างกัน	46
3.5	ผลของพื้นที่ผิวแท่งกราไฟต์ที่ใช้จุ่มลงไปใต้น้ำโลหะและปริมาตรของน้ำโลหะที่ใช้ที่มีต่ออัตราส่วนของพื้นที่ผิวแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะที่แตกต่างกัน	47
3.6	สรุปผลของอุณหภูมิเสถียรที่แข็งของแข็งและปริมาณสัดส่วนของแข็งที่เกิดขึ้นภายใต้อัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะที่ใช้แตกต่างกัน	49
3.7	สรุปผลของรูปร่าง ขนาด และค่าความกลมของเฟส α อะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นภายใต้เวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์ 20 วินาทีพร้อมกับอุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ที่ 620°C แต่ใช้อัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะที่แตกต่างกัน	51

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
3.8	สรุปผลของอุณหภูมิเสลดรีกิ้งของแข็ง และปริมาณสัดส่วนของแข็งที่เกิดขึ้นภายใต้อุณหภูมิของแท่งกราไฟต์ก่อนการจุ่มลงไปใต้น้ำโลหะที่แตกต่างกัน	54
3.9	สรุปผลของรูปร่าง ขนาด และค่าความกลมของเฟส α อะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นภายใต้เวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์ 5 และ 20 วินาที ร่วมกับอุณหภูมิน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ที่ 620°C แต่อุณหภูมิของแท่งกราไฟต์ก่อนการจุ่มลงไปใต้น้ำโลหะที่ใช้แตกต่างกัน	56
3.10	สรุปผลของรูปร่าง ขนาด และค่าความกลมของเฟส α อะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นภายใต้อุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ที่ 620°C แต่ใช้ปริมาณน้ำโลหะและเวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊สที่แตกต่างกัน	59
3.11	แสดงค่า UTS และค่า % EI ที่ได้จากการทดสอบแรงดึง	67
ก.1	แสดงสมบัติต่าง ๆ ของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356-T6 ในงานหล่อแบบพิมพ์ถาวร	79

รายการรูป

รูปที่		หน้า
1.1	แผนภาพสมมูลภาคแสดงช่วงอุณหภูมิของโลหะที่อยู่ในสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลว	5
1.2	เปรียบเทียบโครงสร้างและการไหลระหว่างการหล่อด้วยน้ำโลหะกับโลหะกึ่งของแข็ง (Wannasin, 2006)	5
1.3	เปรียบเทียบกระบวนการ Thixocasting และ Rheocasting (Wannasin, 2006)	7
1.4	กรรมวิธี New Rheo Casting process (NRC TM)	8
1.5	กรรมวิธี Sub Liquidus Casting (SLC TM) (Jorstad et al., 2004)	8
1.6	กรรมวิธี Rheocasting ของ Hitachi (Kaneuchi et al., 2002)	9
1.7	กรรมวิธี Semi-Solid Rheocasting (SSR TM) (Yurko et al., 2004)	9
1.8	กรรมวิธีผลิตโลหะกึ่งของแข็งแบบใหม่ด้วยกระบวนการ Gas Induced Semi-Solid (GISS Process) และโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลมที่ผลิตได้ (Wannasin et al., 2006)	10
1.9	(ก) แสดงการแตกตัวของกลุ่มเดนไดรต์ (ข) แสดงเส้นทางวิวัฒนาการการเติบโตของ Solid Particles แบบแฉก (Rosettes) และแบบก้อนกลม (Spheroids) (Martinez, 2004)	12
1.10	(ซ้าย) แสดงภาพจำลองกระบวนการ Rheo-Diecasting (RDC) และ (ขวา) โครงสร้างเกรนแบบก้อนกลมของ Al alloy A357 ที่ผลิตได้จากวิธี RDC (Fan, 2005)	14
1.11	(ซ้าย) แสดงภาพจำลองวิธี Low Superheat Pouring with Shearing Field (LSPSF) และ (ขวา) โครงสร้างเกรนแบบก้อนกลมของ Wrought Al alloy 2024 ที่ผลิตได้จากวิธี LSPSF (GUO Hong-min et al., 2007)	17
2.1	แสดงแท่งอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้	19
2.2	แสดงเตาหลอมไฟฟ้าแบบใช้สวดความต้านทานที่ใช้ในการทดลอง (ซ้าย) เตาหลอมที่ใช้ในการศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง (ขวา) เตาหลอมที่ใช้ร่วมกับเครื่องฉีดไดคาสติง	20
2.3	แสดงเบ้าหลอมโลหะที่ใช้ในงานวิจัยนี้	21

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.4	แสดงเครื่องผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยการพ่นฟองแก๊สขณะแข็งตัวที่มีชื่อว่า GISS Version 1.0	21
2.5	เครื่องหล่อฉีดไดคาสติงขนาด 80 ตัน และแม่พิมพ์สำหรับการหล่อฉีดขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็ง	22
2.6	แสดงตำแหน่งที่ใช้พาย (Spatula) ผ่าก้อนโลหะกึ่งของแข็ง	25
2.7	แสดงบริเวณของชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure)	25
2.8	แสดงภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคที่นำไปปรับแต่งด้วยโปรแกรม Photoshop	27
2.9	แสดงการวิเคราะห์โครงสร้างเชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) ด้วยโปรแกรม Image Tool	27
2.10	แสดงภาพขนาดของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบแรงดึง (หน่วย: mm.)	29
3.1	แสดงชุดอุปกรณ์ผลิตโลหะกึ่งของแข็งระดับ Lab-Scale ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ	30
3.2	แสดงเครื่องต้นแบบที่ใช้ในการผลิตโลหะกึ่งของแข็งที่มีชื่อว่า GISS Version 1.0	32
3.3	แสดงการวัดอุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊สด้วยตัววัดอุณหภูมิ (Thermocouple)	32
3.4	แสดงการนำเบ้าสแตนเลสที่ตักน้ำโลหะจากเตาหลอมมาจุ่มแท่งกราไฟต์และปล่อยฟองแก๊สเพื่อผลิตโลหะกึ่งของแข็งตามปริมาณสัดส่วนของแข็งที่ต้องการ	33
3.5	แสดงการใช้พายในการตัดก้อนโลหะกึ่งของแข็งที่มีสัดส่วนของแข็งประมาณ 45% ของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ที่ผลิตได้จากเครื่อง GISS Version 1.0	33
3.6	แสดงการเปรียบเทียบลักษณะของเนื้อโลหะและโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 (ก) ไม่ผ่านกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งและมีการแข็งตัวแบบทั่วไป และ (ข) ผ่านกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกระบวนการ GISS	34

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.7	แสดงเส้นกราฟของการเย็นตัว (Cooling Curves) ของโลหะอะลูมิเนียมผสม A356 ที่นำมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้	35
3.8	แสดงเส้นกราฟสัดส่วนของแข็ง (Solid Fraction Curves) ของโลหะอะลูมิเนียมผสม A356 ที่นำมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้	36
3.9	แสดงเส้นกราฟการเย็นตัวและวิธีการหาอุณหภูมิของสเลอร์รี่กึ่งของแข็ง ในขณะที่ทำการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกระบวนการ GISS	37
3.10	ผลของอุณหภูมิน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์และเวลาที่ใช้ในการจุ่มแท่งกราไฟต์ เพื่อพ่นฟองแก๊สที่มีต่ออุณหภูมิของสเลอร์รี่กึ่งของแข็ง	40
3.11	ผลของอุณหภูมิน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์และเวลาที่ใช้ในการจุ่มแท่งกราไฟต์ เพื่อพ่นฟองแก๊สที่มีต่อปริมาณสัดส่วนของแข็ง	41
3.12	ผลของอุณหภูมิน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์และเวลาที่ใช้ในการจุ่มแท่งกราไฟต์ เพื่อพ่นฟองแก๊สที่มีต่ออัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะในระหว่างการจุ่มแท่งกราไฟต์	41
3.13	โครงสร้างจุลภาคของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ภายใต้อุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ที่อุณหภูมิ 620°C แต่เวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์แตกต่างกัน (ก) 5 วินาที (ข) 12 วินาที และ (ค) 20 วินาที ตามลำดับ	42
3.14	ผลของเวลาที่ใช้ในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊สที่มีต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและค่าความกลมของเฟส α อะลูมิเนียม ภายใต้อุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ 620°C	44
3.15	โครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ภายใต้อุณหภูมิในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊สที่เวลา 5 วินาที แต่อุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์แตกต่างกัน (ก) 650°C (ข) 635°C และ (ค) 620°C ตามลำดับ	45
3.16	ผลของอุณหภูมิน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊สที่มีต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและค่าความกลมของเฟส α อะลูมิเนียม ภายใต้อุณหภูมิในการจุ่มแท่งกราไฟต์ 5 วินาที	46

รายการรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.17	แสดงการจำลองของการจุ่มแท่งกราไฟต์ลงไปใต้น้ำโลหะด้วยอัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะที่แตกต่างกัน (ก) 0.15 (ข) 0.22 (ค) 0.28 และ (ง) 0.35	48
3.18	ผลของอัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะที่แตกต่างกันที่มีต่ออุณหภูมิเสถียรที่แข็งและปริมาณสัดส่วนของแข็งที่เกิดขึ้น	49
3.19	โครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ภายใต้เวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊สที่เวลา 20 วินาที ร่วมกับอุณหภูมิน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ที่ 620°C แต่ใช้อัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะที่แตกต่างกัน (ก) 0.15 (ข) 0.22 (ค) 0.28 และ (ง) 0.35 ตามลำดับ	50
3.20	ผลของอัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะที่มีต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและค่าความกลมของเฟส α อะลูมิเนียม ภายใต้เวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์ 20 วินาที ร่วมกับอุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ที่ 620°C	52
3.21	โครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ภายใต้เวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊สที่เวลา 5 วินาที ร่วมกับอุณหภูมิน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ที่ 620°C แต่ใช้อุณหภูมิของแท่งกราไฟต์ก่อนการจุ่มลงไปใต้น้ำโลหะที่แตกต่างกัน (ก) 40°C และ (ข) 100°C ตามลำดับ	54
3.22	โครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ภายใต้เวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊สที่เวลา 20 วินาที ร่วมกับอุณหภูมิน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ที่ 620°C แต่ใช้อุณหภูมิของแท่งกราไฟต์ก่อนการจุ่มลงไปใต้น้ำโลหะที่แตกต่างกัน (ก) 40°C และ (ข) 100°C ตามลำดับ	55

รายการรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.23	ผลของอุณหภูมิแท่งกราไฟต์ก่อนการจุ่มลงไปใต้น้ำโลหะที่มีต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและค่าความกลมของเฟส α อะลูมิเนียม ภายใต้เวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์ 5 และ 20 วินาที ร่วมกับอุณหภูมิน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ที่ 620°C	56
3.24	ผลของปริมาณน้ำโลหะที่ใช้ในกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งที่มีต่อเวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊ส	57
3.25	โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ภายใต้อุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ที่ 620°C แต่ใช้ปริมาณน้ำโลหะและเวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊สที่แตกต่างกัน (ก) 500 กรัม – 20 วินาที (ข) 1,000 กรัม – 40 วินาที และ (ค) 1,000 กรัม – 50 วินาทีตามลำดับ	58
3.26	ผลของปริมาณน้ำโลหะที่มีต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและค่าความกลมของเฟส α อะลูมิเนียม ภายใต้อุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ที่ 620°C แต่ใช้ปริมาณน้ำโลหะและเวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊สที่แตกต่างกัน	60
3.27	แสดงการฉีดขึ้นงานตัวอย่างจากอุตสาหกรรมด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็ง	61
3.28	แสดงชิ้นงานของอะลูมิเนียมเกรด A356 ที่ฉีดขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็ง	62
3.29	แสดงชิ้นงานของอะลูมิเนียมเกรด ADC10 ที่ฉีดขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็ง	62
3.30	แสดงชิ้นงานของอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ที่ฉีดขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็ง	62
3.31	แสดงชิ้นงานของอะลูมิเนียมเกรด LM6 ที่ฉีดขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็ง	63
3.32	แสดงชิ้นงานของอะลูมิเนียมเกรด A5052 ที่ฉีดขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็ง	63

รายการรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.33	แสดงชิ้นงานของอะลูมิเนียมเกรด A6061 ที่ฉีดขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีโลหะ กึ่งของแข็ง	63
3.34	แสดงชิ้นงานของอะลูมิเนียมเกรด A7075 ที่ฉีดขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีโลหะ กึ่งของแข็ง	63
3.35	แสดงความหนาแน่นของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด A356	64
3.36	แสดงเปอร์เซ็นต์โพรงอากาศของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด A356	64
3.37	แสดงผิวของชิ้นงานที่ผ่านการหล่อฉีดขึ้นรูปด้วยน้ำโลหะแบบธรรมดา ภายหลังจากการนำชิ้นงานไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 520°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	65
3.38	แสดงผิวของชิ้นงานที่ผ่านการหล่อฉีดขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็ง ภายหลังจากการนำชิ้นงานไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 520°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	66
3.39	แสดงการเปรียบเทียบค่า UTS และค่า % EI ที่ได้จากการทดสอบแรงดึงของ ชิ้นงานตัวอย่างของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ที่ผลิตได้	67
3.40	แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 (ก) ผ่านการ หล่อฉีดขึ้นรูปด้วยน้ำโลหะแบบปกติ (Liquid Die Casting) (ข) ผ่านการหล่อ ฉีดขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็ง (GISS Die Casting)	68
3.41	แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC10 (GISS Die Casting)	68
3.42	แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 (ก) ผ่าน การหล่อฉีดขึ้นรูปด้วยน้ำโลหะแบบปกติ (Liquid Die Casting) (ข) ผ่านการ หล่อฉีดขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็ง (GISS Die Casting)	69

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

A	พื้นที่ของอนุภาคก้อนกลม (Area)
Al	อะลูมิเนียม (Aluminium)
ART	Advanced Rheo-diecasting Technique
Cu	ทองแดง (Copper)
d	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคก้อนกลม (Particle Equivalent Diameter)
D_B	ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานตัวอย่าง (Samples Density)
$D_{Ref.}$	ค่าความหนาแน่นอ้างอิง (Reference Density)
El	Elongation
EMS	Electromagnetic Stirring
F	ค่าความกลมของอนุภาค (Shape Factor)
f_s	สัดส่วนของแข็ง (Solid Fraction)
GISS	Gas Induced Semi-Solid
HPDC	High Pressure Die Casting
LSPSE	Low Superheat Pouring with Shearing Field
M_p	น้ำหนักชิ้นงานที่อบแห้ง (Dry Mass of Samples)
Mg	แมกนีเซียม (Magnesium)
M_w	น้ำหนักชิ้นงานที่ชั่งในน้ำ (Mass of Samples Suspended in Water)
NRC	New Rheo Casting
P	เส้นรอบวงของอนุภาคก้อนกลม (Perimeter)
Pb	ตะกั่ว (Lead)
RDC	Rheo-Diecasting
SLC	Sub Liquidus Casting
Sn	ดีบุก (Tin)
SoD	Slurry On Demand
SSM	Semi-Solid Metal
SSR	Semi-Solid Rheocasting

S/V Ratio	อัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราฟไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะ
T_E	อุณหภูมิที่จุดยูเทกติก (Eutectic Temperature)
T_L	อุณหภูมิที่เส้นของเหลว (Liquidus Temperature)
UTS	Ultimate Tensile Strength
YS	Yield Strength
Zn	สังกะสี (Zinc)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ในปัจจุบันนี้ เทคโนโลยีการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal Processing, SSM) กำลังเป็นที่สนใจของนักวิจัยและอุตสาหกรรมทั่วโลกทั้งในอเมริกา ญี่ปุ่น ยุโรป เกาหลีใต้ ออสเตรเลีย หรือแม้กระทั่ง จีน ในการนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับกระบวนการหล่อแบบต่างๆ โดยเฉพาะในกระบวนการหล่อแบบไดคาสติง (Die Casting) เพื่อเพิ่มคุณภาพของชิ้นงานหล่อและประสิทธิภาพในการผลิต เนื่องมาจากการหล่อแบบไดคาสติงทั่วไปนั้นเป็นการฉีดขึ้นรูปน้ำโลหะเข้าไปในแม่พิมพ์ด้วยความดันและความเร็วสูง ซึ่งทำให้เกิดปัญหาและข้อจำกัดหลายอย่าง เช่น การเกิดโพรงอากาศภายในชิ้นงานหล่อจากการที่น้ำโลหะไหลเข้าแม่พิมพ์อย่างปั่นป่วน (Turbulent Flow) ชิ้นงานที่ผลิตได้จึงมีสมบัติเชิงกลที่ต่ำกว่าการหล่อโดยวิธีอื่นๆ อีกทั้งการใช้น้ำโลหะที่มีอุณหภูมิสูงในการหล่อฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน ทำให้แม่พิมพ์มีอายุการใช้งานที่สั้น เป็นผลให้ต้นทุนในการผลิตเพิ่มขึ้นมาก นอกจากนี้การแข่งขันในอุตสาหกรรมการหล่อแบบไดคาสติงที่มีมากขึ้นทั้งภายในและภายนอกประเทศ เป็นสิ่งที่ทำให้ผู้ประกอบการทั่วโลกต้องแข่งขันกันด้วยการลดต้นทุนของการผลิต โดยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีใหม่ๆ เพื่อเพิ่มคุณภาพและประสิทธิภาพในการผลิต ซึ่งหนึ่งในเทคโนโลยีที่มีศักยภาพในการช่วยลดต้นทุนของการผลิตในการหล่อแบบไดคาสติง และกำลังได้รับความสนใจอย่างมากในปัจจุบัน คือ เทคโนโลยีการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง เนื่องจากเป็นกระบวนการผลิตที่ทำให้โลหะมีโครงสร้างเกรนที่ไม่เป็นแบบกิ่งไม้ (Non-Dendritic Grain) หรือที่เรียกว่าโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม (Spheroidal Grain) โลหะกึ่งของแข็งที่ไม่มีโครงสร้างเกรนกิ่งไม้นี้ ทำให้เกิดลักษณะเด่นในแง่ของกระบวนการผลิต เช่น ลดการเกิดกับดักอากาศ (Air Entrapment) เนื่องจากมีการไหลเข้าแม่พิมพ์ที่ราบเรียบกว่า (Laminar Flow) ลดการเกิดโพรงหดตัวในตอนสุดท้าย (Shrinkage) และเนื่องจากใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าในการขึ้นรูป อายุการใช้งานของแม่พิมพ์จึงยาวนานขึ้น เป็นต้น อีกทั้งยังทำให้เกิดลักษณะเด่นในแง่ของผลิตภัณฑ์ เช่น มีสมบัติเชิงกลที่สูงขึ้น เกิดโพรงอากาศภายในชิ้นงานน้อยมาก และโครงสร้างของเกรนมีความสม่ำเสมอตั้งแต่บริเวณผิวจนถึงภายในชิ้นงาน เป็นต้น (Wannasin, 2006) ซึ่งในช่วงแรกของการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการผลิตโลหะกึ่งของแข็งในกระบวนการหล่อแบบไดคาสติงนั้นจะใช้กรรมวิธี Thixocasting (Flemings and Johnson, 2002) อย่างไรก็ตาม ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้น เช่น ต้นทุนใน

การซื้อเครื่องจักรและอุปกรณ์ที่มีราคาสูง ประกอบกับแท่งวัตถุดิบที่ใช้ (Billet) มีราคาแพงกว่าอินกอต (Ingot) ของโลหะที่ใช้ในการหล่อทั่วไป และการที่ชิ้นส่วนที่เป็น Runner และ Overflow หรือ Reject ต่างๆ ไม่สามารถนำมาหลอมใช้ใหม่ในโรงงานได้ เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้กรรมวิธี Thixocasting ไม่ได้มีการใช้อย่างแพร่หลาย จากข้อจำกัดของกรรมวิธี Thixocasting ทำให้การวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง ในกระบวนการหล่อแบบไดคาสติงเปลี่ยนไปเป็นกรรมวิธีแบบ Rheocasting แทน ซึ่งเป็นการผลิตโลหะกึ่งของแข็งในโรงงานหล่อโดยตรง และสามารถนำชิ้นส่วนที่เป็น Runner และ Overflow หรือ Reject ต่างๆ มาทำการหลอมและผลิตเป็นโลหะกึ่งของแข็งเพื่อใช้ใหม่ได้อีก ซึ่งทำให้ต้นทุนในการผลิตต่ำลงอย่างมาก จึงมีการพัฒนากรรมวิธี Rheocasting แบบต่างๆ ขึ้นมาหลายวิธี ซึ่งกรรมวิธี Rheocasting ที่มีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมแล้วนั้น เช่น กรรมวิธี New Rheo Casting (NRC™) โดยบริษัท UBE Machineries (ญี่ปุ่น) กรรมวิธี Sub Liquidus Casting (SLC™) ของบริษัท THT Presses (อเมริกา) กรรมวิธี Slurry On Demand (SoD) โดย Mercury Marine (อเมริกา) กระบวนการของ Honda โดยบริษัท Honda (ญี่ปุ่น) และกระบวนการ Semi-Solid Rheocasting (SSR™) โดยนักวิจัยที่ MIT (อเมริกา) นอกจากนี้ยังมีอีกหลายวิธีที่อยู่ระหว่างการวิจัยและพัฒนาไปสู่การใช้เชิงพาณิชย์ในอุตสาหกรรม เช่น กระบวนการ CSIR (แอฟริกาใต้) และกระบวนการ Advanced Rheo-diecasting Technique (ART) (เกาหลีใต้)

ในประเทศไทย เริ่มมีการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีแบบใหม่เพื่อประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมภายในประเทศ ที่นำโดย ผศ.ดร.เจษฎา วรณสินธุ์ อาจารย์และนักวิจัยจากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ โดยมีที่ปรึกษาจากสหรัฐอเมริกาหลายคน รวมทั้ง Prof. Merton Flemings จาก MIT กำลังวิจัยและพัฒนากรรมวิธี Rheocasting แบบใหม่ ภายใต้การสนับสนุนทุนวิจัยของโครงการสมองไหลกลับ สวทช. โดยกรรมวิธี Rheocasting แบบใหม่นี้จะใช้วิธีการพ่นฟองแก๊สเฉื่อยผ่านแท่งกราไฟต์พอร์นในปริมาณที่น้อยมากให้ไหลลงไปในน้ำโลหะเพื่อผลิตโลหะกึ่งของแข็ง และเรียกกรรมวิธี Rheocasting แบบใหม่นี้ว่าวิธี Gas Induced Semi-Solid (GISS) ซึ่งผลจากการวิจัยและพัฒนากระบวนการที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าเทคนิคนี้สามารถผลิตโลหะกึ่งของแข็งที่มีโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลมได้ และที่ผ่านมาก็มีวิจัยได้มีการออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์ผลิตโลหะกึ่งของแข็งระดับ lab-scale ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการขึ้น เพื่อศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง และกลไกการเกิดขึ้นของโครงสร้างแบบก้อนกลม แต่เนื่องจากกระบวนการ GISS นี้ยังอยู่ในช่วงของการวิจัยและพัฒนา ซึ่งยังไม่ได้นำไปประยุกต์ใช้เชิงพาณิชย์ในอุตสาหกรรมจริง ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นที่จะพัฒนาระบบและสร้างเครื่อง

ผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการพ่นพองแก๊สขณะแข็งตัว (GISS System) ในระดับอุตสาหกรรม (Industrial Scale) เพื่อความสะดวกง่ายต่อการนำไปใช้งาน และสามารถผลิตโลหะกึ่งของแข็งได้อย่างมีประสิทธิภาพ และที่สำคัญต้องมีราคาไม่แพงสามารถนำไปใช้งานได้จริงร่วมกับกระบวนการหล่อแบบต่างๆ โดยเฉพาะกระบวนการหล่อแบบไดคาสติง ซึ่งน่าจะทำให้มีการประยุกต์ใช้กระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งร่วมกับกระบวนการหล่อแบบไดคาสติง เพื่อผลิตชิ้นงานต่างๆ มากยิ่งขึ้น และช่วยให้ผู้ประกอบการลดต้นทุนในการผลิตได้ นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มคุณภาพและสมบัติเชิงกลของชิ้นงานหล่อ ลดเวลาในการผลิตต่อชิ้น (Cycle Time) ลดของเสีย (Reject Parts) เพิ่มอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ และลดต้นทุนในกระบวนการอบชุบทางความร้อน เป็นต้น เพื่อให้ได้รับประโยชน์จากการใช้กระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งอย่างเต็มที่ การพัฒนาระบบผลิตโลหะกึ่งของแข็งที่มีราคาถูกลง สามารถผลิตโลหะกึ่งของแข็งที่มีประสิทธิภาพและใช้งานร่วมกับเครื่องหล่อชนิดไดคาสต์ทั่วไปได้ จึงเป็นสิ่งสำคัญและมีความท้าทายเป็นอย่างยิ่ง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อพัฒนาระบบผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยการพ่นพองแก๊สขณะแข็งตัว ที่สามารถผลิตโลหะกึ่งของแข็งของโลหะผสมเกรดต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยการพ่นพองแก๊สขณะแข็งตัว ได้แก่
 - เวลาที่ใช้ในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นพองแก๊ส
 - อุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นพองแก๊ส
 - อุณหภูมิของแท่งกราไฟต์ก่อนการจุ่มลงไปใต้น้ำโลหะ
 - อัตราส่วนของพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะ
 - ปริมาณของน้ำโลหะที่ใช้
- 1.2.3 เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้ระบบผลิตโลหะกึ่งของแข็ง โดยการพ่นพองแก๊สขณะแข็งตัวร่วมกับกระบวนการหล่อแบบต่างๆ โดยเฉพาะกระบวนการหล่อแบบไดคาสติง

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การพัฒนาระบบและสร้างเครื่องผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยการพ่นพองแก๊สในระหว่างการแข็งตัวของน้ำโลหะ ที่สามารถผลิตโลหะกึ่งของแข็งของโลหะผสมต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีความง่ายในการนำไปใช้ ราคาต่อเครื่องไม่แพง และสามารถนำไปใช้งานได้จริงร่วมกับกระบวนการหล่อแบบต่างๆ โดยเฉพาะกระบวนการหล่อแบบไดคาสติง

ซึ่งจะต้องทำการพัฒนาออกแบบและสร้างเครื่องผลิตโลหะกึ่งของแข็งให้สามารถควบคุมเวลาในการผลิตต่อชิ้นได้ตามที่กำหนด สามารถตรวจวัดและควบคุมอุณหภูมิของน้ำโลหะในกระบวนการผลิตได้ เพื่อเป็นตัวกำหนดสัดส่วนของแข็ง (Solid Fraction) ของโลหะกึ่งของแข็งที่ผลิตได้ โดยจะมีการศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง โดยการพันฟองแก๊สขณะแข็งตัว ก่อนที่จะนำโลหะกึ่งของแข็งที่ผลิตได้นี้ไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อแบบไดคาสติงเพื่อผลิตชิ้นงานต่อไป

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

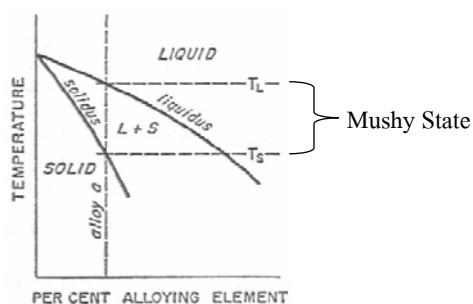
- 1.4.1 ได้เครื่องผลิตโลหะกึ่งของแข็งที่สามารถผลิตโลหะกึ่งของแข็งของโลหะผสมต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- 1.4.2 สามารถควบคุมตัวแปรต่างๆ ที่สำคัญต่อกระบวนการผลิตและทำให้ทราบถึงสถานะของตัวแปรที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยการพันฟองแก๊สในระหว่างการแข็งตัวของน้ำโลหะ
- 1.4.3 ทำให้มีการประยุกต์ใช้กระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งร่วมกับกระบวนการหล่อโลหะแบบต่างๆ โดยเฉพาะในกระบวนการหล่อแบบไดคาสติงเพื่อผลิตชิ้นงานต่างๆ มากยิ่งขึ้น
- 1.4.4 ทำให้เป็นแนวทางเพื่อการพัฒนาและการนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ของการผลิตโลหะกึ่งของแข็งนี้

1.5 ทฤษฎี สมมุติฐาน หรือกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

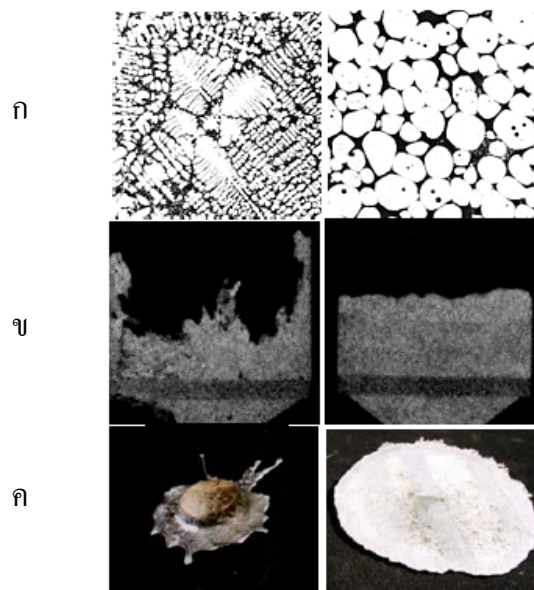
1.5.1 การหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal Casting)

การหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal Casting) จากในอดีตที่มีการค้นพบเป็นครั้งแรกในช่วงต้นปี 1970 โดย Spencer และ Flemings ที่สถาบันเทคโนโลยีแห่งรัฐแมสซาชูเซตส์ (Massachusetts Institute of Technology, MIT) (Spencer, 1971) จนถึงปัจจุบันก็นับเป็นเวลาเกือบ 40 ปีแล้วที่ได้มีการวิจัยและพัฒนากันมาตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา โดยการหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็งนี้เป็นการขึ้นรูปโลหะด้วยการหล่อในขณะที่โลหะอยู่ในสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลว (Mushy State) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ซึ่งโลหะจะมีการแข็งตัวเป็นบางส่วน โดยโลหะส่วนที่แข็งตัวแล้วจะมีโครงสร้างเกรนไม่เป็นแบบเดนไดรต์ (Non-Dendritic Grain) หรือบางที่เรียกว่าเกรนแบบก้อนกลม (Spheroidal หรือ Globular Grain) ดังรูปที่ 1.2-ก (รูปขาว) ซึ่งเกรนก้อนกลมที่ลอยอยู่ในน้ำโลหะนี้

จะทำให้โลหะกึ่งของแข็ง มีความหนืดมากกว่าน้ำโลหะทั่วไปหลายเท่า ทำให้การไหลเข้าแม่พิมพ์ไม่เป็นแบบปั่นป่วน (Non-Turbulent หรือ Laminar Flow) รูปที่ 1.2-ข แสดงการไหลเปรียบเทียบระหว่างน้ำโลหะทั่วไป (รูปซ้าย) และโลหะกึ่งของแข็ง (รูปขวา) และรูปที่ 1.2-ค เปรียบเทียบการไหลของน้ำโลหะทั่วไปที่มีโครงสร้างเกรนแบบเดนไดรต์ (รูปซ้าย) กับโลหะในสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลวที่มีโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม (รูปขวา) ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่าโลหะกึ่งของแข็งมีการไหลที่ราบเรียบกว่ามาก (Wannasin, 2006)



รูปที่ 1.1 แผนภาพสมดุลภาคแสดงช่วงอุณหภูมิของโลหะที่อยู่ในสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลว



รูปที่ 1.2 เปรียบเทียบโครงสร้างและการไหลระหว่างการหล่อด้วยน้ำโลหะกับโลหะกึ่งของแข็ง

(Wannasin, 2006)

1.5.2 เทคโนโลยีการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal Processing Technology)

วิธีการผลิตโลหะกึ่งของแข็งที่สามารถใช้ได้ ในอุตสาหกรรมมีอยู่สองวิธี ได้แก่ กรรมวิธี Thixocasting และกรรมวิธี Rheocasting โดยในช่วงแรกของการประยุกต์ใช้โลหะกึ่งของแข็งในอุตสาหกรรมไดคาสติง จะทำโดยกรรมวิธี Thixocasting ซึ่งเริ่มจากการผลิตแท่งอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างเกรนแบบ equiaxed ที่ละเอียดมากโดยการหล่อแบบต่อเนื่อง (Continuous Casting) ที่มีการกวนน้ำโลหะขณะแข็งตัวด้วย จากนั้นโรงงานผลิตชิ้นงานไดคาส จะซื้อแท่งอะลูมิเนียม (Billet) นี้ และตัดเป็นท่อนๆ แล้วนำมาให้ความร้อนโดยใช้ Induction Heating เพื่อให้อุณหภูมิแท่ง Billet อยู่ในช่วงกึ่งแข็งกึ่งเหลวอย่างรวดเร็ว โดยโครงสร้างเกรนแบบ Equiaxed ที่ละเอียดมากนี้จะเติบโตและ Coarsen เป็นเกรนแบบก้อนกลมในเวลาอันสั้น จากนั้นแท่งอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งหรือที่เรียกว่า Slug นี้ก็จะถูกอัดเข้าไปในแม่พิมพ์ แสดงดังรูปที่ 1.3 (บน) ชิ้นส่วนที่ผลิตด้วยกรรมวิธี Thixocasting สามารถนำไปอบชุบเพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกล ทำให้ชิ้นงานอะลูมิเนียมเหล่านี้สามารถนำไปใช้แทนเหล็กหล่อในรถยนต์ได้ (Wannasin, 2006)

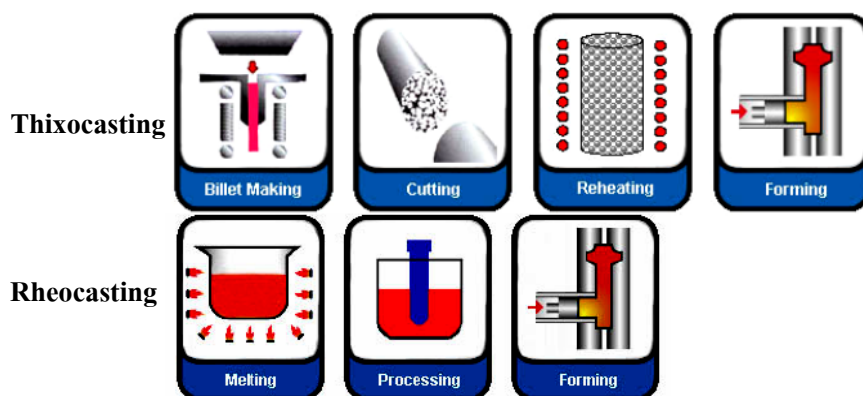
ถึงแม้ว่าเทคโนโลยีการหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็งจะมีการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง แต่การประยุกต์ใช้กระบวนการ Thixocasting ในอุตสาหกรรมก็ยังมีอยู่จำกัดมาก โดยมีการผลิตแค่ประมาณ 20,000 – 25,000 ตันของชิ้นส่วนอะลูมิเนียม ในปี 2001 (de Figueredo, 2001) สาเหตุสำคัญที่ทำให้ Thixocasting ไม่ได้มีการใช้อย่างแพร่หลายมีดังนี้

1. ต้องการการลงทุนสูงในการซื้ออุปกรณ์ต่างๆ เช่น อุปกรณ์ตัดแท่งอะลูมิเนียม ชุดให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ (Induction Heating Cell) อุปกรณ์ที่ใช้ย้ายแท่ง Slug และต้องลงทุนในการแก้ไขเครื่อง Die Casting หรือต้องซื้อเครื่องใหม่เพื่อให้ใช้กับแท่ง Slug ได้

2. ราคาของแท่งอะลูมิเนียม (Billet) ที่มีราคาแพงกว่าอะลูมิเนียมอินกอต (Ingot) ที่ใช้ในการหล่อทั่วไป ประมาณ 35 – 40% (DasGupta, 2004) ทำให้ราคาของชิ้นส่วนที่ผลิตด้วย Thixocasting มีราคาสูงและไม่คุ้มค่ากับการผลิตชิ้นส่วนหลายชนิด นอกจากราคาของแท่ง Billet ที่สูงแล้ว การที่ชิ้นส่วนที่เป็น Runner และ Overflow หรือ Reject ต่างๆ ไม่สามารถนำมาหลอมใช้ใหม่ในโรงงานได้ ทำให้ราคาต้นทุนของวัตถุดิบสูงขึ้นด้วย

ด้วยข้อจำกัดของกรรมวิธี Thixocasting เป็นที่เห็นได้ชัดในอุตสาหกรรมและในกลุ่มนักวิจัย โดยในช่วงประมาณ 10 ปีที่ผ่านมา การวิจัยและพัฒนาเปลี่ยนไปเป็นการมุ่งใช้กรรมวิธี Rheocasting แทน ซึ่งกรรมวิธี Rheocasting เป็นการผลิตโลหะกึ่งของแข็งในโรงงานหล่อโดยตรง (รูปที่ 1.3 ล่าง) โดยสามารถผลิตจากแท่งอินกอตของโลหะที่ใช้กันทั่วไปและสามารถนำชิ้นส่วนที่เป็น Runner และ Overflow หรือ Reject ต่างๆ มาหลอมและผลิตเป็นโลหะกึ่งของแข็งเพื่อใช้ใหม่

ได้อีก ซึ่งทำให้ต้นทุนในการผลิตต่ำลงอย่างมาก ทำให้กรรมวิธี Rheocasting มีศักยภาพที่จะใช้ผลิตชิ้นส่วนต่างๆ ได้อย่างไม่จำกัด (Wannasin, 2006)



รูปที่ 1.3 เปรียบเทียบกระบวนการ Thixocasting และ Rheocasting (Wannasin, 2006)

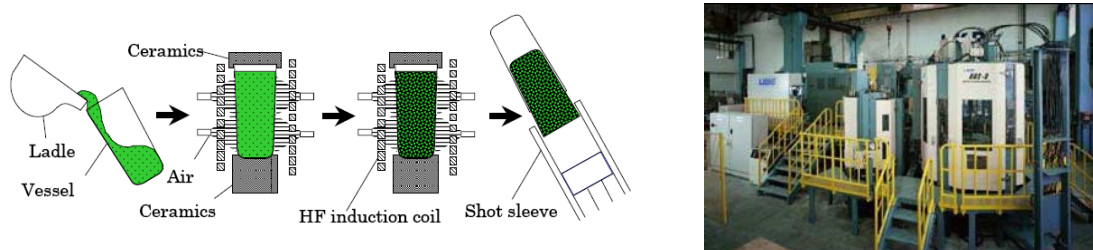
1.5.3 กรรมวิธี Rheocasting แบบต่างๆ ที่ใช้ในอุตสาหกรรม

ปัจจุบันกรรมวิธีที่ใช้ในการผลิตโลหะกึ่งของแข็งมีหลากหลายวิธี โดยทุกวิธีการของ Rheocasting จะต้องมีการสร้าง Solid Particles ในปริมาณที่พอเหมาะในขณะที่โลหะกำลังแข็งตัว ซึ่งสามารถทำได้หลายๆ วิธี แต่ส่วนใหญ่แล้วก็จะมีการทำให้เกิดการไหลเคลื่อนที่ของน้ำโลหะ (Forced Convection) ในขณะที่โลหะกำลังแข็งตัว เพื่อให้มีการแตกตัวของเดนไดรต์หรือมีการเกิด Nucleation มากขึ้น ซึ่งการทำให้เกิด Forced Convection นั้น ทำได้หลายวิธี ตั้งแต่การใช้วัตถุแข็งรูปร่างเหมือนไม้พายกวนน้ำโลหะ (Mehrabian and Flemings, 1972) การใช้พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า (Electro-Magnetic หรือ EM) การเทน้ำโลหะเพื่อให้เกิดการไหลเคลื่อนที่ (Xia and Tausig, 1998) การใช้การสั่นโดยแรงอัลตราโซนิก (Ultrasonic Vibration) (Jian, 2005) เป็นต้น นอกจากการใช้ Forced Convection ขณะที่โลหะกำลังแข็งตัวแล้ว การใส่สารที่เพิ่มการเกิด Nucleation (Grain Refinement) หรือการอบโลหะที่อุณหภูมิในช่วงกึ่งแข็งกึ่งเหลวเป็นเวลานาน ก็ทำให้เกิดโลหะกึ่งของแข็งได้เช่นกัน (de Figueredo, 2001)

กระบวนการที่ใช้ผลิตโลหะแบบกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีแบบ Rheocasting ในปัจจุบันมีอยู่หลายกระบวนการที่สำคัญๆ ซึ่งมีใช้ในอุตสาหกรรมแล้วมีดังนี้

- **The New Rheo Casting process (NRCTM)** เป็นกรรมวิธี Rheocasting วิธีแรก ที่ประดิษฐ์ขึ้นโดยบริษัท UBE Machinery (ญี่ปุ่น) (UBE Machinery, Inc.) โดยใช้วิธีการเทน้ำโลหะที่อุณหภูมิต่ำลงในเบ้า (Vessel) และควบคุมการเติบโตของของแข็ง โดยการควบคุมการถ่ายเทความร้อน และทะอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งลงใน shot sleeve และอัดเข้าแม่พิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 1.4 เครื่อง NRC

สามารถผลิตอะลูมิเนียมแข็งได้หลายชิ้นในเวลาอันสั้นโดยการมี vessel หลายชิ้นหมุนเวียนกันผลิตอะลูมิเนียมแข็งของแข็ง

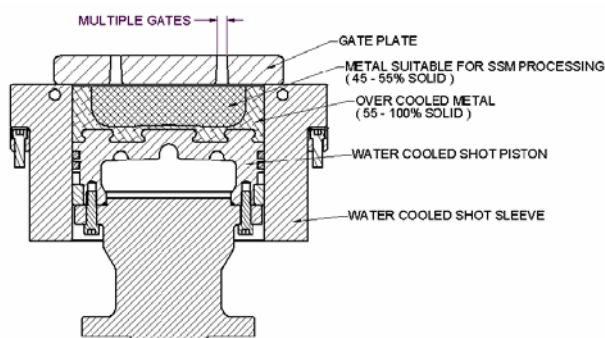


รูปที่ 1.4 กรรมวิธี New Rheo Casting process (NRC™)

(UBE Machinery, Inc. <http://www.ubemachinery.com/diecasting.html>)

กระบวนการ NRC ได้ถูกนำมาใช้ผลิตชิ้นงานในอุตสาหกรรมรถยนต์โดยหลายบริษัททั่วโลก แต่ก็ยังไม่ได้ใช้กันอย่างแพร่หลายซึ่งข้อจำกัดคือ ราคาของเครื่อง NRC ที่สูงถึงมากกว่า 80 ล้านบาท (Yurko, 2005) ทำให้ต้องผลิตชิ้นงานที่มี Profit Margin สูง อีกข้อจำกัดคือกระบวนการผลิตที่ซับซ้อนประกอบด้วยหลายขั้นตอนทำให้ต้องมีการควบคุมกระบวนการผลิตอย่างรอบคอบด้วยผู้ที่มีความชำนาญ

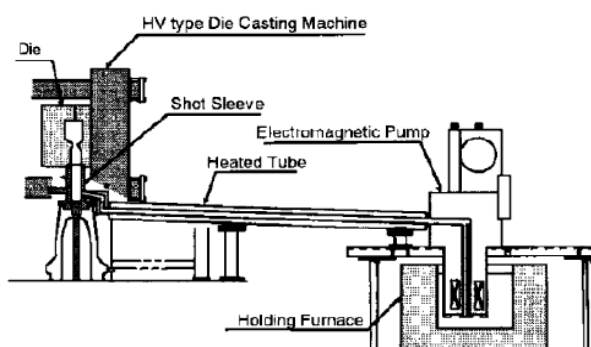
- *The Sub Liquidus Casting (SLC™)* เป็นเทคโนโลยีของบริษัท THT Presses (อเมริกา) ซึ่งหลักการของเครื่อง SLC คือการเทน้ำโลหะที่มีอุณหภูมิใกล้จุดหลอมเหลวและมีการเติม Grain Refiner ในน้ำโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 1.5 เครื่อง SLC มีราคาประมาณ 50 ล้านบาท (Jorstad et al., 2004)



รูปที่ 1.5 กรรมวิธี Sub Liquidus Casting (SLC™) (Jorstad et al., 2004)

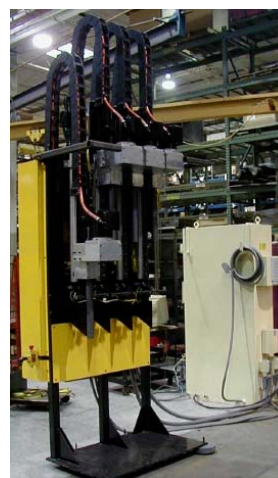
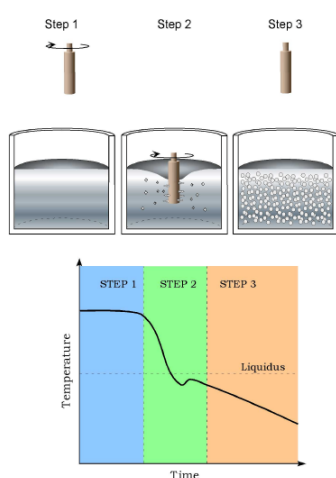
- *The Slurry-On-Demand process (SoD)* ของ Mercury Casting (อเมริกา) ใช้แรงแม่เหล็กไฟฟ้าจากมอเตอร์ในการกวนน้ำโลหะขณะที่กำลังแข็งตัวในเบ้ากราไฟต์ ซึ่ง Mercury Casting ใช้เทคโนโลยีนี้ในการผลิตชิ้นส่วนต่างๆภายในบริษัท (Kopper et al., 2005)

- *The Hitachi process* (ญี่ปุ่น) ผลิต SSM โดยการใช้แรงแม่เหล็กไฟฟ้าในการกวนน้ำโลหะในขณะที่กำลังแข็งตัว ซึ่งกระทำใน shot sleeve ดังแสดงในรูปที่ 1.6 (Kaneuchi et al., 2002)



รูปที่ 1.6 กรรมวิธี Rheocasting ของ Hitachi (Kaneuchi et al., 2002)

- *The Semi-Solid Rheocasting (SSRTM)* เป็นผลจากการวิจัยของนักวิจัยที่ MIT โดยการใช้แท่งกราไฟต์ทำหน้าที่ระบายความร้อนลงในน้ำโลหะในเวลาอันสั้น เพื่อสร้างเกรนแบบก้อนกลมอย่างมีประสิทธิภาพ (รูปที่ 1.7) เครื่อง SSR สามารถนำไปติดตั้งไว้ใกล้ๆเครื่องไดคาสติงเพื่อผลิตโลหะกึ่งของแข็ง เครื่อง SSR มีราคาประมาณ 10 ล้านบาท (Yurko et al., 2004)



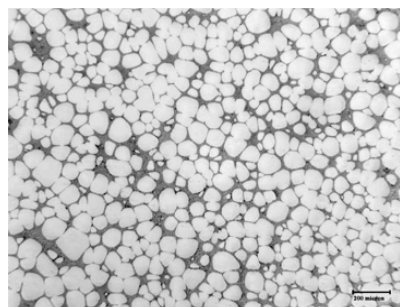
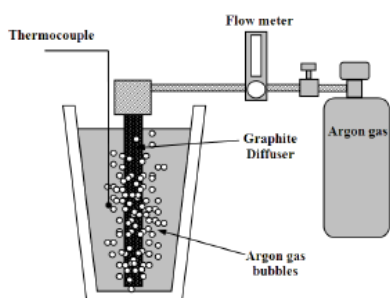
รูปที่ 1.7 กรรมวิธี Semi-Solid Rheocasting (SSRTM) (Yurko et al., 2004)

- *The Honda process* (ญี่ปุ่น) ผลิต SSM โดยใช้แท่งของแข็งหมุนในน้ำโลหะเพื่อให้เกิดการกววน โดย Honda พัฒนาเทคโนโลยีนี้เพื่อใช้ผลิตภายในบริษัท โดยเมื่อปี 2005 ได้ผลิตเสื้อสูบเครื่องยนต์ดีเซลของรถ Honda Accord ที่ขายในยุโรป (Kuroki et al., 2004)

นอกจากนี้ยังมีอีกหลายวิธีที่อยู่ในระหว่างการวิจัยและพัฒนาไปสู่การใช้เชิงพาณิชย์ในอุตสาหกรรม เช่น กระบวนการ CSIR (อัฟริกาใต้) ที่ใช้แรงแม่เหล็กไฟฟ้าในการกววน (Govender et al., 2006) และกระบวนการ Advanced Rheo-diecasting Technique (ART) (เกาหลีใต้) ซึ่งใช้แรงแม่เหล็กไฟฟ้าในการกววนเช่นกัน (Hong and Kim, 2006)

1.5.4 กรรมวิธีการผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยการฟุ้งฟองแก๊สของแข็งตัว (Gas Induced Semi-Solid, GISS Process)

ปัจจุบันมีการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตโลหะกึ่งของแข็งแบบใหม่ขึ้นในประเทศไทย นำโดย ผศ.ดร. เจษฎา วรรณสินธุ์ อาจารย์และนักวิจัยจากภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ โดยมีที่ปรึกษาจากสหรัฐอเมริกาหลายคน รวมทั้ง Prof. Merton Flemings จาก MIT กำลังวิจัยและพัฒนากรรมวิธี Rheocasting แบบใหม่ ภายใต้การสนับสนุนของโครงการสมองไหลกลับ สวทช. ซึ่งได้ยื่นจดสิทธิบัตรในประเทศไทยและในต่างประเทศแล้ว โดยกระบวนการนี้จะใช้การฟุ้งฟองแก๊สเฉื่อย เช่น แก๊สอาร์กอนหรือไนโตรเจน ผ่านแท่งกราไฟต์พรมในปริมาณที่น้อยมากให้ไหลลงไปใต้น้ำโลหะเพื่อผลิตโลหะกึ่งของแข็ง โดยใช้หลักการการเคลื่อนย้ายของน้ำโลหะและการดูดความร้อนเฉพาะจุด ซึ่งวิธีการนี้ฟุ้งแก๊สจะเป็นตัวกลางในการกววนและแท่งกราไฟต์พรมจะเป็นตัวดูดระบายความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 1.8 และเรียกกรรมวิธีแบบใหม่นี้ว่ากระบวนการ Gas Induced Semi-Solid หรือที่เรียกสั้นๆ ว่า กระบวนการ GISS ซึ่งผลจากการวิจัยและพัฒนากระบวนการที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าเทคนิคนี้สามารถผลิตโลหะกึ่งของแข็งที่มีโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลมได้



รูปที่ 1.8 กรรมวิธีการผลิตโลหะกึ่งของแข็งแบบใหม่ด้วยกระบวนการ Gas Induced Semi-Solid (GISS process) และ โครงสร้างเกรนแบบก้อนกลมที่ผลิตได้ (Wannasin et al., 2006)

ด้วยวิธีการนี้ เนื่องจากแท่งกราไฟต์ไม่ต้องมีการหมุนจึงก่อให้เกิดประโยชน์หลายด้าน เช่น ทำให้เราสามารถต่อระบบหล่อเย็น (Cooling) และระบบเซนเซอร์เข้าไปกับระบบทั้งหมดของกระบวนการได้อย่างง่ายไม่ซับซ้อน และเนื่องจากจะไม่เกิดกระแสวนในน้ำโลหะ ดังนั้นจะไม่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพิ่มขึ้น (Wannasin et al., 2006)

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

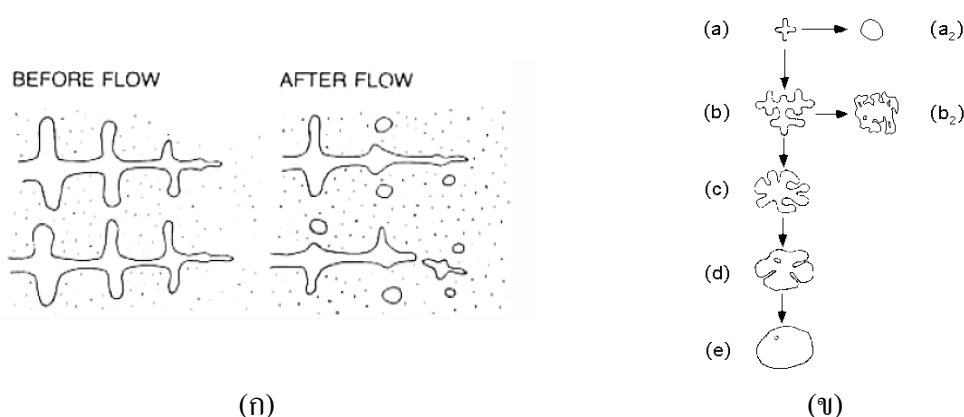
S. Ji และคณะ (2001) ศึกษากระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งของโลหะผสม Sn-15wt.% Pb และ Mg-30wt.% Zn ด้วยกรรมวิธี Twin – Screw Rheomoulding โดยได้ทำการศึกษาถึงลักษณะการไหลของของเหลว (Fluid Flow) และวิวัฒนาการเกิดโครงสร้างทางจุลภาค (Microstructural Evolution) ในระหว่างกระบวนการนี้ ผลที่ได้จากการทดลองของ Rheomoulding ของโลหะผสม Sn-15wt.%Pb และ Mg-30wt.%Zn แสดงให้เห็นว่า การไหลของของเหลวในกระบวนการนี้จะมีลักษณะเฉพาะที่เกิดจากอัตราการเฉือนสูง (High Shear Rate) และความรุนแรงของการไหลแบบปั่นป่วนที่สูง (High Intensity of Turbulence) และยังพบว่าการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยวิธีนี้ จะมีความสามารถในการทำให้เกิดอนุภาคของแข็ง (Solid Particles) ที่มีขนาดเล็กและเกือบจะเป็นอนุภาคเดี่ยวๆ กระจุกกระจายอยู่ในโครงสร้างเกรนอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีนี้กับกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งแบบวิธีอื่นๆ ที่มีอยู่ พบว่ากรรมวิธีนี้มีข้อดีก็คือ ทำให้เกิดอนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็ก และเป็นก้อนกลมที่เกือบจะเป็นอนุภาคเดี่ยวๆ กระจุกกระจายอยู่ในโครงสร้างเกรนอย่างสม่ำเสมอ ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานก็มีความสม่ำเสมอ สามารถควบคุมปริมาตรของสัดส่วนของแข็งในช่วงกว้างได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ชิ้นงานที่ผลิตได้จากกรรมวิธีนี้จะมีราคาถูกกว่า เนื่องมาจากราคาของ Feedstock Materials ที่ต่ำและเวลาในการผลิตที่สั้นกว่า (Shorter Cycle Time)

D.N. Li และคณะ (2002) ทำการศึกษกรรมวิธี Rheocasting ในการผลิตโลหะกึ่งของแข็งของโลหะแมกนีเซียมผสมเกรด AZ91D (AZ91D Magnesium Alloy) ด้วยวิธีการกวนน้ำโลหะเชิงกล (Mechanical Stirring) พวกเขาได้ศึกษาถึงผลกระทบของอุณหภูมิเท (Pouring Temperature) ของแมกนีเซียมหลอมเหลว อุณหภูมิ Preheat ของตัว Barrel ของ Screw Mixer และอัตราการเฉือน (Shear Rate) ต่อโครงสร้างที่แข็งตัวของ Slurry ของโลหะกึ่งของแข็ง โดยในการหล่อจะมีการใช้แม่พิมพ์ที่มีผนังบางเพื่อทำการเก็บตัวอย่าง Slurry ของโลหะกึ่งของแข็งที่เสียนไขตัวแปรต่างๆ กัน ผลที่ได้ชี้ให้เห็นว่า ตัวแปรสำคัญที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ Mechanical Stirring คือ อุณหภูมิเทของแมกนีเซียมหลอมเหลวที่เหมาะสมอยู่ที่ 610-620°C และอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการ Preheat ของตัว Barrel อยู่ที่ 575-590°C ส่วนอัตราการเฉือนที่เหมาะสมอยู่ที่ 4,100-6840 s⁻¹ โดยกำหนด

แรงดันในการฉีด (Injection Pressure) ของ Slurry ของโลหะกึ่งของแข็งในเครื่องฉีดไดคาสไว้ที่ 40 MPa. จากการทดลองทั้งหมดทำให้พวกเขาสรุปได้ว่าปริมาณสัดส่วนของแข็งของโครงสร้างเกรนไม่เป็นแบบเดนไดรต์จะเพิ่มมากขึ้น ด้วยการลดอุณหภูมิเทของแมกนีเซียมและการลดอุณหภูมิ Preheat ของตัว Barrel ของ Screw Mixer ให้ต่ำลง ซึ่งจะทำให้ขนาดเกรนของ Primary α - Phase ลดลงด้วย โดยมีค่าเฉลี่ยของ Grain Size อยู่ที่ 30-50 μm .

J.A. Yurko. และคณะ (2004) ได้ทำการศึกษาการขึ้นรูปโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธี SSR ของโลหะผสมหลายชนิด โดยเขาพบว่ากรรมวิธี SSR สามารถผลิตโลหะกึ่งของแข็งจากน้ำโลหะอะลูมิเนียมโดยใช้เวลาไม่มากนัก โดยใช้หลักการของการเย็นตัวเฉพาะจุดด้วยแท่งกวนเย็น โดยจุ่มเหนืออุณหภูมิหลอมเหลวเพียงเล็กน้อย ซึ่งการขึ้นรูปสามารถกระทำได้ที่ปริมาณสัดส่วนของแข็งต่ำ ๆ และทำให้คุณสมบัติของชิ้นงานดีขึ้นคือ มีปริมาณรูอากาศ (Porosity) น้อยลง เกรนที่ได้มีความละเอียดมากขึ้น และมีปริมาณออกไซด์ที่ตกค้างน้อย นอกจากนี้ยังช่วยทำให้อายุการใช้งานของแม่พิมพ์สูงขึ้น และใช้เวลาในการผลิตน้อยลง

R.A. Martinez (2004) ได้เสนอว่าการเคลื่อนย้ายของเหลว (Convection) ซึ่งเกิดจากการกวนระหว่างการแข็งตัวของโลหะทำให้แขนของกิ่งไม้หรือที่เรียกว่าเดนไดรต์ (Dendrite) “ละลาย” หรือ “แตกหัก” ออกจากกิ่งเดนไดรต์หลัก (Mother Dendrite) ซึ่งทำให้แขนของกิ่งไม้เหล่านี้เป็นเหมือน “นิวเคลียสที่สอง (Secondary Dendrite)” ดังแสดงในรูปที่ 1.9 (ก) และการที่มีปริมาณของอนุภาคเหล่านี้มากขึ้นจะทำให้เมื่อเกรนขยายโตขึ้นจะมีโครงสร้างแบบไม่เป็นกิ่งไม้ (Non-Dendritic Grain) หรือบางที่เรียกว่าเกรนแบบก้อนกลม (Spheroidal หรือ Globular Grain)



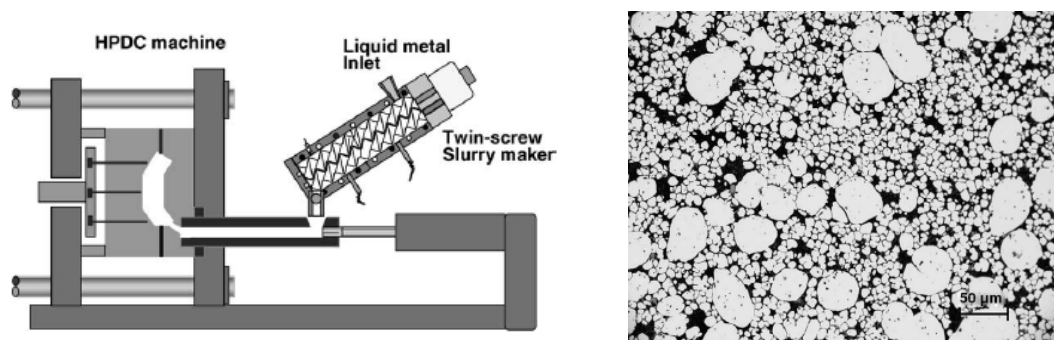
รูปที่ 1.9 (ก) แสดงการแตกตัวของกลุ่มเดนไดรต์ (ข) แสดงเส้นทางวิวัฒนาการการเติบโตของ Solid Particles แบบแจก (Rosettes) และแบบก้อนกลม (Spheroids) (Martinez, 2004)

โดยในงานวิจัยนี้ แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่ามีสองแนวทางที่แตกต่างกันในการเกิดโครงสร้างของโลหะกิ่งของแข็งที่เกิดจากแกนของกิ่งไม้ โดยแนวทางแรกเกิดขึ้นจากอนุภาคของแข็งที่เกิดเริ่มแรกแตกออกมาจากแกนโครงสร้าง โดยหากอนุภาคของแข็งนั้นมีขนาดเล็กมากและปริมาณมากพอ เกรนแบบก้อนกลมก็จะเกิดได้โดยตรงจากเกรนแบบ Equiaxed ดังแสดงในเส้นทาง a-a₂ ในรูปที่ 1.9(ข) แต่หากขนาดอนุภาคนั้นใหญ่เกินไป ก็จะมีการเติบโตจากแกนแต่ละแกน ดังรูปที่ 1.9(ข)(b) โดยต่อมาก็จะเติบโตต่อไปดังแสดงในเส้นทางการเติบโต ดังรูปที่ 1.9(ข)(b)-(e) ซึ่งโครงสร้างที่มีลักษณะดังรูปที่ 1.9(ข)(c) และ 1.9(ข)(d) บางครั้งเรียกว่า “โครงสร้างแบบแฉก (Rosette)” โครงสร้างดังกล่าวนี้จะมีสภาพการไหลที่ไม่ดี และมีการเกิดเซกริเกชัน (Segregation) มากกว่าโครงสร้างที่มีลักษณะทรงกลมดังแสดงในรูปที่ 1.9(ข)(a₂) และ 1.9(ข)(e) และหากกระบวนการเกิดอนุภาคไม่เหมาะสม รูปแบบการเติบโตของอนุภาคจะเป็นไปตามเส้นทางดังรูป 1.9(ข)(a)-(b₂)

L. Ivanchev และคณะ (2004) ทำการพัฒนาอุปกรณ์ เครื่องมือและกระบวนการสำหรับการผลิตสเลอร์รี่กิ่งของแข็งให้สามารถทำงานร่วมกับเครื่องฉีดไดคาสติงด้วยความดันสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยในการทดลองได้มีการผลิตแท่ง Billet ของสเลอร์รี่กิ่งของแข็งของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ที่มีน้ำหนักตั้งแต่ 500 g. จนถึง 4 kg. โดยมีการควบคุมการเย็นตัวและการให้ความร้อนในการกวนน้ำโลหะภายในเบ้าทรงกระบอกที่ทำจาก Stainless Steel ผลที่ได้พบว่าแท่ง Billet ของสเลอร์รี่กิ่งของแข็งของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 mm. และมีความยาวเท่ากับ 200 mm. จะมีขนาดเกรนเฉลี่ยเท่ากับ 68 μm . และมีค่าความกลมอยู่ที่ 1.43 ส่วนแท่ง Billet ของสเลอร์รี่กิ่งของแข็งของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 90 mm. และมีความยาวเท่ากับ 200 mm. จะมีขนาดเกรนเฉลี่ยเท่ากับ 85 μm . และมีค่าความกลมอยู่ที่ 1.52 นอกจากนี้เมื่อนำชิ้นงานที่ได้จากการหล่อฉีดขึ้นรูปของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ด้วยกระบวนการที่พัฒนาขึ้นมาพบว่า หลังจากนำชิ้นงานไปอบชุบด้วยกระบวนการทางความร้อน (T6) ทำให้ Yield Strength มีค่าเท่ากับ 286 MPa. ส่วนค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) มีค่าเท่ากับ 334 MPa. และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงานที่ผลิตได้มีค่าอยู่ที่ 6.2% ตามลำดับ

Z. Fan และคณะ (2005) ได้นำเสนอกรรมวิธี Rheocasting แบบใหม่ในการผลิตโลหะกิ่งของแข็ง นั่นคือ กระบวนการ Rheo-Diecasting (RDC) และได้ทำการศึกษาผลของกระบวนการ RDC ที่มีต่อโครงสร้างและสมบัติเชิงกลของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรดต่างๆ เช่น A357, A380, 2014 และ Al-6Si-2Mg โดยเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการ RDC จะประกอบไปด้วย 2 ส่วนที่สำคัญคือ 1) Twin-Screw Slurry Maker เป็นส่วนที่จะเปลี่ยนสภาพน้ำโลหะให้เป็น Slurry ของ

โลหะกึ่งของแข็งที่มีคุณภาพสูงทุกๆ 30 วินาที และ 2) Standard Cold Chamber HPDC Machine เป็นส่วนที่ใช้ในการฉีด Slurry ของโลหะกึ่งของแข็ง เพื่อทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 1.10 (ซ้าย) โดยในขั้นตอนของการทดลองก็จะทำการหลอมโลหะที่อุณหภูมิเหนือจุดหลอมเหลวของโลหะนั้น 50°C แล้วทำการป้อน Slurry ของโลหะกึ่งของแข็งนี้ที่อุณหภูมิ 30°C เหนือจุดหลอมเหลวไปยังทางเข้าของ Shot Sleeve ของเครื่อง HPDC Machine เพื่อผลิตชิ้นงานตัวอย่าง ซึ่งผลที่ได้จากกระบวนการ RDC จะให้เห็นว่าชิ้นงานที่ผลิตได้มีรูพรุน (Porosity) น้อยมาก และโครงสร้างที่ได้จะปรากฏให้เห็น Primary Particles เป็นก้อนกลมที่ละเอียดและมีความสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 1.10(ขวา) ซึ่งเป็นผลมาจากการ Nucleation และ Growth ในระหว่างการแข็งตัวของ Slurry ของโลหะกึ่งของแข็งภายใต้อัตราการเย็นที่สูงและความรุนแรงของการปั่นป่วนที่สูง (High Intensity of Turbulence) นอกจากนี้พวกเขายังได้นำชิ้นงาน A357 ที่ได้จากกระบวนการ RDC นี้ไปผ่านกระบวนการอบชุบทางความร้อน (Heat Treatment) โดยทำ Solution Treatment (T4) ที่อุณหภูมิ 540°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นตัวในน้ำ จากนั้นจึงทำ Aging สำหรับทั้ง T5 และ T6 ที่อุณหภูมิ 165°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ผลที่ได้จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า กระบวนการ RDC ช่วยปรับปรุงให้ค่า Tensile Strength และค่า Elongation เพิ่มสูงขึ้นได้ เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการไดคาสต์ทั่วไปและกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งวิธีอื่นๆ



รูปที่ 1.10 (ซ้าย) แสดงภาพจำลองกระบวนการ Rheo-Diecasting (RDC) และ (ขวา) โครงสร้างเกรนแบบก้อนกลมของ Al Alloy A357 ที่ผลิตได้จากวิธี RDC (Fan, 2005)

J. Wannasin และคณะ (2006) ได้นำเสนอเทคนิคใหม่ในการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง โดยใช้หลักการของ Martinez และ Flamings ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มีการค้นพบว่า หากมีการส่งฟองแก๊สให้ไหลผ่านวัตถุแข็งลงไปในตัวโลหะผสม เราจะได้โลหะกึ่งของแข็งซึ่งมีโครงสร้างเกรนแบบไร้กิ่งไม้ โดยในวิธีการนี้ฟองแก๊สจะเป็นตัวก่อให้เกิดการเคลื่อนย้ายของน้ำโลหะเฉพาะจุดอย่างแรงและการดูกระจายความร้อนเฉพาะจุดด้วย นอกจากนี้ การใช้วัตถุแข็งที่เย็นยังช่วยให้เกิดการดูกระจาย

ความร้อนเพิ่มเติมขึ้นอีกด้วย โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้อะลูมิเนียมผสม A357 ในการทดลอง โดยการใช้อัตราการไหลของแก๊ส ที่ 1 และ 2 ลิตร/นาที ตามลำดับและใช้สัดส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะ ที่ 0.14 และ 0.20 โดยทำการทดลองที่สัดส่วนของแก๊ส 2 ค่า คือ ที่ 5% และ 10 % ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าอัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะเพิ่มขึ้น และเมื่อต้องการสัดส่วนของแก๊สที่เพิ่มมากขึ้นก็จำเป็นต้องใช้เวลาในการปล่อยฟองแก๊สมากขึ้นเช่นกัน งานวิจัยนี้ยังชี้ให้เห็นว่าการควบคุมอัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะ และสัดส่วนปริมาตรของพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะที่เหมาะสม จะช่วยทำให้โครงสร้างของโลหะกิ่งของแก๊สที่ได้มีลักษณะที่ไม่เป็นแบบเดนไดรต์ นั่นก็คือมีโครงสร้างเป็นก้อนกลมที่มีความสม่ำเสมอตลอดทั้งชิ้นงาน

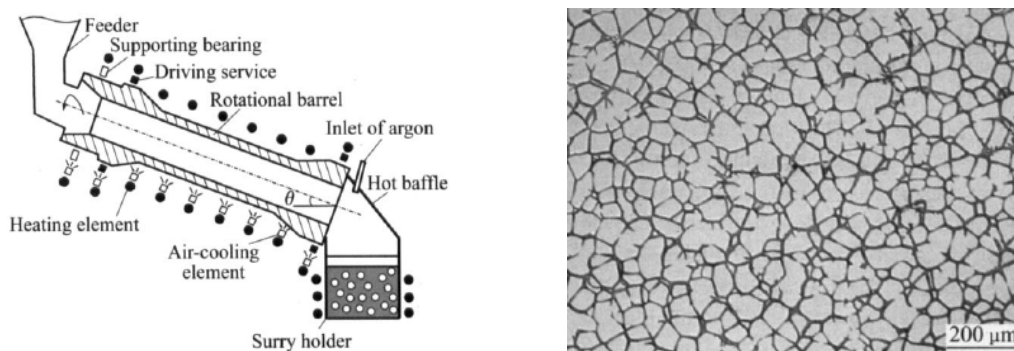
R.A. Martinez และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาถึงโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะกิ่งของแก๊สด้วยกรรมวิธี Semi-Solid Rheocasting (SSR) ของโลหะผสม Al-4.5wt%Cu โดยได้ทำการศึกษาถึงการเกิดขึ้นของโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลมและศึกษาถึงกรรมวิธีการผลิตเพื่อให้ได้โครงสร้างดังกล่าว ซึ่งตัวแปรที่ได้มีการศึกษาในงานวิจัยนี้คือ Grain Density, Cooling Rate, และ Solid Fraction ที่มีผลต่อความเสถียรหรือความสม่ำเสมอของโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม โดยได้ทำการผลิตโลหะกิ่งของแก๊สที่ Solid Fraction (f_s) 0.25, 0.45, และ 0.63 ด้วยอัตราการเย็นตัว (Cooling Rate) ต่างๆ กันในช่วงระหว่าง 1°C/s ถึง 50°C/s แล้วเปรียบเทียบผลที่ได้กับ Particle Stability Model ที่ใช้ทำนายความสัมพันธ์ระหว่าง Initial Solid Fraction และ Maximum Cooling Rate ที่ยังคงทำให้บริเวณอินเตอร์เฟซของโครงสร้างแบบก้อนกลมที่มีความเสถียร (Stable Spheroidal) ผลจากการทดลองพบว่า ความหนาแน่นของเกรนที่มาก (High Grain Density) สัดส่วนของแก๊สที่สูงกว่า (High Solid Fraction) และอัตราการเย็นตัวที่ต่ำ (Low Cooling Rate) จะมีการเติบโตของโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลมที่ยังคงทำให้บริเวณอินเตอร์เฟซของโครงสร้างแบบก้อนกลมมีความเสถียรและสามารถรักษาความกลมของโครงสร้างไว้ได้

S. Nafisi และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะผสม Al-Si-Fe ที่ผ่านกระบวนการผลิตโลหะกิ่งของแก๊สด้วยกรรมวิธี EMS (Electromagnetic Stirring) โดยได้ศึกษาถึงตัวแปรของอัตราการเย็นตัว (Cooling Rate) และ อุณหภูมิเท (Superheat) โดยมีอุณหภูมิที่แตกต่างกันคือ 690°C 660°C และ 630°C โดยจากการทดลองทำให้พบว่า กระบวนการผลิตโลหะกิ่งของแก๊สด้วยกรรมวิธี EMS ช่วยลดขนาดของอนุภาค โดยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเท แต่การกวนส่งผลต่อการลดขนาดของอนุภาคมากกว่าอุณหภูมิเท อุณหภูมิเทที่ต่ำทำให้เกิดอนุภาคขนาดเล็กของนิวเคลียสจำนวนมากยังคงอยู่และกระจายทั่วตลอดทั้งชิ้นงาน ซึ่งแตกต่างกับการเทที่อุณหภูมิสูงที่นิวเคลียสเหล่านั้นถูกหลอมและหายไปก่อนที่จะเกิดการแข็งตัว อุณหภูมิเทที่ต่ำและอัตราการเย็น

ตัวที่สูงจะทำให้เกิดอนุภาคที่มีขนาดเล็กแบบคอลัมน์ (Columnar-Equiaxed) ในทางกลับกันหากมีอุณหภูมิเทสูงก็จะทำให้เกิดโครงสร้างแบบคอลัมน์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

C.P. Hong และ J.M. Kim (2006) ได้ทำการพัฒนากระบวนการ Advanced Rheocasting Process ที่มหาวิทยาลัย Yonsei ในประเทศเกาหลีใต้ เพื่อใช้ในการผลิตโลหะแข็งของแข็ง โดยอาศัยหลักการของการเกิดนิวเคลียส (Nucleation) ที่ซึ่งนิวเคลียส (Nuclei) ของเฟส α ที่ฟอร์มตัวขึ้นมาในน้ำโลหะขณะกำลังจะแข็งตัว จะถูกขัดขวางไม่ให้เกิดการเติบโตไปเป็นโครงสร้างแบบเดนไดรต์ แต่นิวเคลียสที่เกิดขึ้นเหล่านี้จะเติบโตไปเป็นอนุภาคก่อนกลมที่มีขนาดเล็กละเอียด ซึ่งส่งผลให้เกิดเสถียรที่แข็งขึ้นมา ผลที่ได้จากกระบวนการนี้พบว่า จำนวนนิวเคลียสที่เพิ่มมากขึ้น จะทำให้เกิดโครงสร้างจุลภาคที่มีลักษณะเป็นแบบก่อนกลมที่มีขนาดเล็กละเอียดและมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังได้มีการนำเอากระบวนการดังกล่าว มาประยุกต์ใช้สำหรับการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 และ ADC10 ผลที่ได้พบว่า กระบวนการดังกล่าวนี้ช่วยทำให้ชิ้นงานมีสมบัติทางกลที่เพิ่มสูงขึ้น

GUO Hong-min และคณะ (2007) ได้ทำการศึกษาวิธีการเตรียม Slurry ของโลหะแข็งของแข็งที่มีอนุภาคแบบก่อนกลมและละเอียดสำหรับโลหะผสม Wrought Aluminum Alloy 2024 ด้วยกรรมวิธีแบบใหม่ของ Rheocasting นั่นคือกระบวนการ Low Superheat Pouring with Shearing Field (LSPSF) ดังแสดงในรูปที่ 1.11(ซ้าย) กระบวนการ LSPSF เป็นกระบวนการที่มีการควบคุมการเกิด Nucleation และจำกัดการ Growth ซึ่งเป็นผลมาจากการควบคุมอัตราการเกิดนิวเคลียส (Nucleation Rate) ด้วยการ Passive Mixing และการเย็นตัวเฉพาะจุดอย่างรวดเร็ว (Localized Rapid Cooling) ใกล้กับอุณหภูมิของของเหลว (Liquidus Temperature) ในช่วงของการแข็งตัวเริ่มต้น ทำให้การเติบโตของเดนไดรต์ถูกจำกัด ซึ่งผลจากการทดลองพบว่า อุณหภูมิและความเร็วในการหมุนของตัว Barrel มีผลต่อการเกิดการเปลี่ยนแปลงในการเติบโตของ Primary α (Al) จากเดนไดรต์แบบหยาบ (Coarse-Dendritic) ไปสู่อนุภาคแบบหยาบ (Coarse-Particles) และสุดท้ายกลายเป็นอนุภาคแบบก่อนกลมที่ละเอียด (Fine-Globular Particles) ดังแสดงในรูปที่ 1.11(ขวา) นอกจากนี้พวกเขาได้ใช้โลหะแข็งของแข็งของโลหะผสม Wrought Aluminum Alloy 2024 ที่เตรียมได้โดยวิธี LSPSF ในการขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วน Cup-Shape ด้วยการหล่อแบบ Direct Squeeze Casting เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลกับการหล่อด้วยน้ำโลหะทั่วไปพบว่า โลหะแข็งของแข็งของโลหะผสม Wrought Aluminum Alloy 2024 ที่เตรียมได้โดยวิธี LSPSF ช่วยทำให้ค่า Yield Strength เพิ่มขึ้นจาก 143 MPa เป็น 198 MPa. ค่า Ultimate Tensile Strength เพิ่มขึ้นจาก 260 MPa เป็น 306 MPa. และค่า Elongation เพิ่มขึ้นจาก 6.9% เป็น 10.4% ตามลำดับ



รูปที่ 1.11 (ซ้าย) แสดงภาพจำลองวิธี Low Superheat Pouring with Shearing Field (LSPSF) และ (ขวา) โครงสร้างเกรนแบบก่อนกลมของ Wrought Al Alloy 2024 ที่ผลิตได้จากวิธี LSPSF (GUO Hong-min et al., 2007)

S.W. Oh และคณะ (2007) ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของการกวนน้ำโลหะในขณะที่กำลังแข็งตัวด้วยการใช้พลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Stirring, EMS) ที่มีต่อขนาดของเกรนของโลหะผสม A6061 และ A7075 Wrought Al Alloy โดยพวกเขาจะนำ Billets ของ A6061 และ A7075 มาหลอมและทำให้เป็น Slurry ของโลหะกึ่งของแข็ง ด้วยวิธี Electromagnetic Stirring (EMS) ภายใต้เงื่อนไขความแตกต่างของกระแสที่ใช้ในการกวน (Stirring Current) เวลาที่ใช้ในการกวน (Stirring Time) และอุณหภูมิเท จากนั้นจึงทำการศึกษาโครงสร้างของโลหะผสมที่ได้ และ Cooling Curves ที่ได้จากการเย็นตัวโดยตรงจากสถานะของเหลว (Liquid State) ไปสู่สถานะกึ่งของแข็งกึ่งของเหลว (Mushy State) ในระหว่างการกวน ซึ่งผลจาก Cooling Curves และโครงสร้างที่ได้ จะเป็นตัวกำหนดเวลาในการขึ้นรูป (Forming Time) และเวลาในการกวนที่ต้องการเพื่อให้ได้โครงสร้างที่เหมาะสม โดยพวกเขาพบว่า การใช้อุณหภูมิที่ต่ำในช่วง 650-730°C และการใช้กระแสในการกวนที่สูงกว่า จะนำไปสู่การเกิดโครงสร้างเกรนที่ละเอียดของ Primary- α (Al) Phase ทั้งในโลหะผสม A7075 และ A6061 ส่วนผลของเวลาในการกวนพบว่า เวลาในการกวนที่ 20 วินาที และ 40 วินาที ยังคงมีโครงสร้างแบบเดนไดรต์ปรากฏอยู่ และเมื่อใช้เวลาในการกวนที่นานขึ้น โดยการกวนที่ 60 วินาที จะนำไปสู่การเกิดโครงสร้างเกรนที่ละเอียดของ Primary- α (Al) Phase ทั่วทั้งชิ้นงาน

J. Wannasin และคณะ (2007) ได้ทำการศึกษาวิธีการประเมินตรวจสอบวัดความสะอาดของโลหะในการหล่อแบบไดคาสติง ซึ่งวิธีที่ใช้ในการประเมินคุณภาพของน้ำโลหะนั้นมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน แต่มีเพียงบางวิธีเท่านั้นที่เหมาะสมกับงานหล่อไดคาสติง โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวิธีประเมินความสะอาดของน้ำโลหะ 3 วิธีด้วยกัน คือ การทดสอบแบบ เค-โมลด์ (K-MOLD) การทดสอบสมบัติเชิงกล และการทดสอบการไหลผ่านตัวกรองด้วยเครื่อง PoDFA ซึ่งผลจากการ

ทดลองชี้ให้เห็นว่าแต่ละวิธีของการประเมินจะเหมาะกับการวิเคราะห์แต่ละแบบ เช่น การทดสอบแบบ เค-โมลด์ เป็นวิธีที่เร็วและง่ายที่สามารถแสดงให้เห็นถึงสารฝังใน (Inclusion) เฉพาะที่มีขนาดใหญ่ให้เห็นได้ชัดเจน ดังนั้นการทดสอบแบบ เค-โมลด์ จึงเหมาะสมกับงานที่ไม่ต้องการสมบัติเชิงกลที่สูงมาก ส่วนการประเมินความสะอาดของน้ำโลหะด้วยการทดสอบสมบัติเชิงกลนั้นสามารถบอกข้อมูลในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพของน้ำโลหะได้ดี ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความยืด (Elongation) เป็นค่าที่เหมาะสมกว่าค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ในการบ่งบอถึงปริมาณของสารฝังใน อย่างไรก็ตามในการนำวิธีนี้ไปใช้งานควรทำการปรับแต่งแม่พิมพ์เพื่อลดการเกิดโพรงหดตัว สุดท้ายคือการประเมินความสะอาดของน้ำโลหะด้วยการทดสอบการไหลผ่านตัวกรองด้วยเครื่อง PoDFA เป็นเครื่องมือที่ดีในการบ่งชี้ถึงชนิดของสารฝังในที่สำคัญที่มีอยู่ในน้ำโลหะ แต่ในการนำไปใช้งานจริงนั้น ควรจะมีการปรับแก้กระบวนการทดสอบ เพื่อให้สามารถใช้ได้กับขนาดของตัวอย่างที่ต่างกัน

จากงานวิจัยที่ได้ทบทวนข้างต้น จะเห็นได้ว่ามีกระบวนการที่ใช้ในการผลิตโลหะกึ่งของแข็งแบบ Rheocasting ในปัจจุบันอยู่หลายวิธี ซึ่งส่วนใหญ่อีกจะใช้วิธีการสร้าง Solid Particles ในปริมาณที่พอเหมาะในขณะที่โลหะกำลังแข็งตัวด้วยการทำให้เกิดการไหลเคลื่อนที่ของน้ำโลหะ (Forced Convection) ในขณะที่โลหะกำลังแข็งตัว ทำให้ได้โครงสร้างของเกรนแบบก้อนกลมและช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลให้สูงขึ้น แต่หลายๆ วิธีนี้ยังไม่ได้มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องราคาของเครื่องผลิตโลหะกึ่งของแข็งที่มีราคาสูงมาก ทำให้ต้องผลิตชิ้นงานที่มี Profit Margin สูง อีกข้อจำกัดอย่างหนึ่งก็คือ กระบวนการผลิตที่ซับซ้อนประกอบด้วยหลายขั้นตอน ทำให้ต้องมีการควบคุมกระบวนการผลิตอย่างรอบคอบด้วยผู้ที่มีความชำนาญ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นที่จะพัฒนาระบบและสร้างเครื่องผลิตโลหะกึ่งของแข็ง โดยได้เลือกใช้กรรมวิธีการพ่นฟองแก๊สขณะแข็งตัว (GISS) เนื่องจากเป็นกรรมวิธี Rheocasting แบบใหม่ที่คิดค้นขึ้นโดยคนไทย นักวิจัยไทย และเนื่องจากที่ผ่านมาได้มีการใช้กรรมวิธีนี้เฉพาะในระดับ Lab-Scale ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ผู้วิจัยจึงต้องการที่จะพัฒนาระบบและสร้างเครื่องผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการพ่นฟองแก๊สขณะแข็งตัวในระดับอุตสาหกรรม (Industrial Scale) เพื่อความสะดวกง่ายต่อการนำไปใช้งาน และสามารถผลิตโลหะกึ่งของแข็งที่มีคุณภาพสม่ำเสมอ และที่สำคัญต้องมีราคาไม่แพงสามารถนำไปใช้งานได้จริงร่วมกับกระบวนการหล่อแบบต่างๆ โดยเฉพาะกระบวนการหล่อแบบไดคาสติง

บทที่ 2

วิธีการวิจัย

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงวิธีวิจัย ซึ่งประกอบไปด้วย วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย ขั้นตอนการวิจัย ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานเพื่อการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค ขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค และขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้างเชิงปริมาณ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

โลหะที่นำมาใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้ คือ อะลูมิเนียมผสม A356 โดยในการศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยการพ่นพองแก่สภาวะแข็งตัวจะใช้ อะลูมิเนียมผสม A356 ที่เป็น Secondary Alloys ส่วนในการศึกษาการประยุกต์ใช้ระบบผลิตโลหะกึ่งของแข็ง โดยการพ่นพองแก่สภาวะแข็งตัวร่วมกับกระบวนการหล่อแบบไดคาสติง จะใช้ อะลูมิเนียมผสม A356 ที่เป็น Primary Alloys ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีแสดงในตารางที่ 2.1 (วิเคราะห์ด้วย Optical Emission Spectrometer, OES)

ตารางที่ 2.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสม A356 ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้

อะลูมิเนียมผสม	ส่วนผสมทางเคมี (%)									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Ni	Sr	Al
A356										
Primary alloy	6.86	0.09	0.04	0.01	0.38	0.01	0.12	0.01	0.03	Bal.
Secondary alloy	6.90	0.41	0.05	0.04	0.42	0.01	0.10	0.01	-	Bal.



รูปที่ 2.1 แสดงแท่งอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้

2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

2.2.1 เตาหลอม (Melting Furnace)

เตาหลอมที่ใช้เป็นเตาไฟฟ้าแบบใช้ลวดความต้านทาน (Electric Resistance Furnace) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยสามารถควบคุมอุณหภูมิในการหลอมได้ด้วยตัวควบคุม (Controller) ซึ่งสามารถหลอมโลหะที่อุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน $1,000^{\circ}\text{C}$ เตาหลอมในรูปที่ 2.2(ซ้าย) สามารถหลอมอะลูมิเนียมได้สูงสุด 10 กิโลกรัมต่อครั้งและใช้สำหรับการศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง ส่วนเตาหลอมในรูปที่ 2.2(ขวา) สามารถหลอมอะลูมิเนียมได้สูงสุด 120 กิโลกรัมต่อครั้งและเป็นเตาหลอมที่ใช้ร่วมกับเครื่องฉีดไดคาสติง



รูปที่ 2.2 แสดงเตาหลอมไฟฟ้าแบบใช้ลวดความต้านทานที่ใช้ในการทดลอง (ซ้าย) เตาหลอมที่ใช้ในการศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง (ขวา) เตาหลอมที่ใช้ร่วมกับเครื่องฉีดไดคาสติง

2.2.2 เบ้าหลอมโลหะ (Crucible)

เบ้าหลอมที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเบ้าหลอมชนิด Graphite-Clay Base ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เบ้าหลอมชนิดนี้จะไม่ทำให้เกิดการละลายของเหล็กปนเข้าสู่โลหะคังเช่นการใช้เบ้าเหล็กเหนียวหรือเบ้าเหล็กหล่อ และยังสามารถทำความสะอาดได้ง่ายหลังการใช้งาน



รูปที่ 2.3 แสดงเบ้าหลอมโลหะที่ใช้ในงานวิจัยนี้

2.2.3 เครื่องผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยการพ่นฟองแก๊สขณะแข็งตัว (GISS Version 1.0)

เครื่องต้นแบบที่ใช้ในการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยการพ่นฟองแก๊สขณะแข็งตัว ประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ที่สำคัญดังนี้ 1. แท่งกราไฟต์ (Graphite Diffuser) 2. ตัววัดอุณหภูมิของน้ำโลหะและอุณหภูมิของแท่งกราไฟต์ (Thermocouples) 3. ระบบควบคุมอัตราการไหลของลมและแก๊ส (Control System for Air Cooling and Inert Gas Flow Rate) 4. ระบบหล่อเย็นและทำความสะอาดของแท่งกราไฟต์ (Cooling and Cleaning System) 5. ชุดควบคุมระบบผลิตโลหะกึ่งของแข็ง (Central Control Unit) ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงเครื่องผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยการพ่นฟองแก๊สขณะแข็งตัว ที่มีชื่อว่า GISS Version 1.0

2.2.4 เครื่องหล่ออัดฉีดสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานของอะลูมิเนียม (Die Casting Machine)

เครื่องหล่ออัดฉีดที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาดของ Locking Force เท่ากับ 80 ตัน พร้อมแม่พิมพ์ที่ใช้ในการหล่ออัดฉีดขึ้นรูปชิ้นงานอะลูมิเนียมด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 เครื่องหล่ออัดฉีดไดคาสติงขนาด 80 ตัน และแม่พิมพ์สำหรับการหล่ออัดฉีดขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็ง

2.3 ขั้นตอนการวิจัย

2.3.1 พัฒนาและสร้างเครื่องต้นแบบที่ใช้ในการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง

ทำการรวบรวมข้อมูลต่างๆ จากการเรียนรู้ในขณะทำการทดสอบชุดอุปกรณ์ผลิตโลหะกึ่งของแข็งระดับ Lab-Scale ในห้องปฏิบัติการและจากการทดสอบชุดอุปกรณ์ผลิตโลหะกึ่งของแข็งระดับ Lab-Scale กับเครื่องไดคาสติง (Die Casting) เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบที่ใช้ในการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง ซึ่งหลายตัวแปรอาจจะต้องมีการปรับเปลี่ยนเพื่อให้มีความเหมาะสมกับกระบวนการผลิตจริง จึงต้องทำการศึกษาถึงตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยเครื่องต้นแบบในหัวข้อถัดไป

2.3.2 การวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermal Analysis) ของโลหะที่ใช้ในการทำวิจัย

การวิเคราะห์ทางความร้อนของโลหะที่ใช้ในการทำวิจัย เริ่มต้นจากการนำอะลูมิเนียมผสม A356 ที่ตัดและเตรียมไว้ใส่ลงในเบ้าหลอม จากนั้นจึงทำการหลอมโดยใช้เตาหลอมไฟฟ้าชนิดขดลวดความต้านทาน ทำการหลอมที่อุณหภูมิ 710°C เมื่อโลหะหลอมละลายจึงเติมฟลักซ์ (Flux) เพื่อทำความสะอาดน้ำโลหะและดักดรอส (Dross) ออกจากน้ำโลหะ จากนั้นตักน้ำโลหะประมาณ

500 กรัม จากเตาหลอมด้วยเบ้าสแตนเลสซึ่งเคลือบด้วยเซรามิกทนไฟ แล้วนำไปจุ่มเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) เพื่อวัดอุณหภูมิของน้ำโลหะ และทำการบันทึกอุณหภูมิโดยปล่อยให้โลหะเย็นตัวลงอย่างช้าๆ เพื่อทำการสร้างกราฟแสดงอัตราการเย็นตัว (Cooling Curves) กราฟที่ได้จะแสดงให้เห็นถึงอุณหภูมิที่จุดหลอมเหลว (Liquidus Temperature) และอุณหภูมิที่จุดยูเทกติก (Eutectic Temperature) ของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ที่นำมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

2.3.3 การประมาณค่าสัดส่วนของแข็งด้วยแบบจำลองของไซล์ (Scheil Model)

การวิเคราะห์ของไซล์ (Scheil) คือ ความสมดุลของมวล (Mass Balance) ของปริมาณ Solute Rejected โดยความแตกต่างของปริมาณของแข็งร่วมกับผลของความเข้มข้นของตัวละลายที่เพิ่มขึ้นในสภาพแวดล้อมของเหลว แบบจำลองของไซล์ สมมติให้มีการแพร่ในเฟสของเหลวอย่างสมบูรณ์ แต่ไม่มีการแพร่ในเฟสของแข็ง และเมื่อสมมติให้เส้นของของเหลว (Liquidus) เป็นเส้นตรง ดังนั้นสัดส่วนของของแข็ง (Solid Fraction) นี้สามารถคำนวณได้ด้วยสมการของ Scheil ดังนี้ (Martinez, 2004)

$$f_s = 1 - \left(\frac{T_p - T}{T_p - T_L} \right)^{\frac{1}{(1-k)}} \quad (2.1)$$

เมื่อ T_p คือ จุดหลอมเหลวของอะลูมิเนียมบริสุทธิ์, T_L คือ อุณหภูมิของของเหลวของโลหะที่วัดได้จากการทดลอง, T คือ อุณหภูมิที่ต้องการหาสัดส่วนของของแข็ง, k คือ ค่าสัมประสิทธิ์เฉพาะในแต่ละโลหะผสม

2.3.4 การศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยการพ่นฟองแก๊สขณะแข็งตัว

ทำการศึกษาถึงตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยการพ่นฟองแก๊สขณะแข็งตัว (GISS Process) ดังต่อไปนี้

1. ศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการจุ่มแท่งกราฟไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊ส (Rheocasting Time) ที่มีต่อปริมาณสัดส่วนของแข็งเริ่มต้น (Initial Solid Fraction) และโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356

2. ศึกษาผลของอุณหภูมิน้ำโลหะก่อนการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊ส (Rheocasting Temperature) ที่มีต่อปริมาณสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นและโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356
3. ศึกษาผลของอัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะ (S/V Ratio) ที่มีต่อปริมาณสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นและโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสม A356
4. ศึกษาผลของอุณหภูมิแท่งกราไฟต์ก่อนการจุ่มลงไปใต้น้ำโลหะ (Graphite Diffuser Temperature) ที่มีต่อปริมาณสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นและโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356
5. ศึกษาผลของปริมาณน้ำโลหะที่ใช้ (Metal Weight) ในกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งที่มีต่อเวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊สและโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356

2.3.5 การประยุกต์ใช้ระบบผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยการพ่นฟองแก๊สขณะแข็งตัว (GISS Process) ร่วมกับกระบวนการหล่อแบบไดคาสติง (Die Casting)

เพื่อเป็นการแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยการพ่นฟองแก๊สขณะแข็งตัว (GISS Process) จึงต้องทำการฉีดขึ้นรูปอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ร่วมกับเครื่องฉีดไดคาสติงและเครื่องต้นแบบที่ใช้ในการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้

1. ทดลองฉีดขึ้นรูปอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ร่วมกับเครื่องไดคาสติงและเครื่องต้นแบบที่ใช้ในการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง
2. วิเคราะห์ผลเปรียบเทียบกันระหว่างชิ้นงานที่ได้จากการหล่อฉีดแบบทั่วไปกับการหล่อฉีดแบบโลหะกึ่งของแข็ง

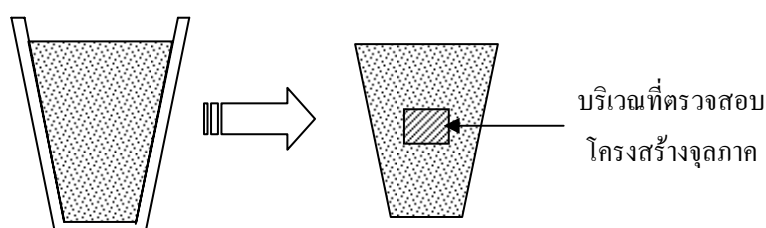
2.4 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานเพื่อการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค

ในแต่ละการทดลอง หลังจากทำการจุ่มแท่งกราไฟต์ตามเวลาที่กำหนดแล้ว จึงทำการย้ายเข้าสแตนเลสมาจุ่มเทอร์โมคัปเปิลเปิดอีกครั้ง เพื่อวัดอุณหภูมิและทำการตรวจสอบอุณหภูมิของสเลอรี่กึ่งของแข็ง (Semi-Solid Slurry) ที่ได้จากกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง แล้วปล่อยให้สเลอรี่กึ่งของแข็งเย็นตัวในอากาศ จนกระทั่งอุณหภูมิลดลงมาอยู่ที่ 580°C (จะมีสัดส่วนของแข็งประมาณ 45%) จึงคว่ำเข้าสแตนเลสเพื่อนำชิ้นงานออกมา แล้วจึงใช้พาย (Spatula) ผ่าก้อนโลหะกึ่งของแข็งในตำแหน่งตรงกลาง ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และนำไปทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในน้ำเพื่อใช้ในการ

ตรวจสอบและวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของโลหะต่อไป ชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จะถูกนำมาตัดบริเวณกึ่งกลางของชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.7 แล้วนำชิ้นงานมาขัดหยาบด้วยกระดาษทรายน้ำ และขัดละเอียดด้วยผงขัดอะลูมินา จากนั้นจึงนำชิ้นงานตัวอย่างไปกัดด้วยสารละลาย Keller แล้วจึงนำไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงต่อไป



รูปที่ 2.6 แสดงตำแหน่งที่ใช้พาย (Spatula) ผ่าก้อนโลหะกึ่งของแข็ง



รูปที่ 2.7 แสดงบริเวณของชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure)

2.5 ขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure)

2.5.1 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างชิ้นงานและการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของโลหะกึ่งของแข็งที่ได้จากการทดลอง เมื่อตัดชิ้นงานตามขั้นตอนที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น จากนั้นชิ้นงานดังกล่าวจะถูกนำไปเตรียมเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค โดยมีวิธีการดังต่อไปนี้

- 1) ขึ้นรูปชิ้นงานแบบร้อน (Hot Mounting) โดยใช้ผงเบกาไลต์ (Bakelite) ใส่ลงไปแบบอัดแล้วใช้ความร้อนและความดันเพื่อให้ผงเบกาไลต์ มีการแข็งตัวติดกับชิ้นงานตัวอย่าง

- 2) ทำการขัดหยาบ (Grinding) ด้วยกระดาษทราย (SiC Paper) เบอร์ P320 P600 P800 P1000 และ P1200 ตามลำดับ
- 3) ต่อจากนั้นจึงทำการขัดละเอียด (Polishing) ชิ้นงาน โดยเริ่มต้นการขัดละเอียดด้วยผ้าหยาบ (Cloth Pad) ร่วมกับผงขัดอะลูมินาขนาด 5 μm . เมื่อรอยขัดจากกระดาษทรายหมดไปแล้ว จึงทำการขัดโดยใช้ผงขัดอะลูมินาขนาด 1, 0.3 และ 0.05 μm . ตามลำดับ
- 4) ทำการกัดผิวหน้าของชิ้นงานโดยใช้น้ำยากัดผิวซึ่งมีชื่อเรียกว่า Keller's Reagent โดยประกอบไปด้วย กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ความเข้มข้น 48% ในปริมาณ 1 มิลลิลิตร กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (HCl) 1.5 มิลลิลิตร กรดไนตริก (HNO_3) 2.5 มิลลิลิตร ผสมในน้ำกลั่น 95 มิลลิลิตร โดยนำชิ้นงานมาจุ่มลงในสารละลาย Keller เป็นเวลาประมาณ 8 วินาที จากนั้นจึงนำชิ้นงานมาล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วเป่าให้แห้งด้วยไคท์เป่าผม
- 5) นำชิ้นตัวอย่างที่ได้มาส่องดูโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แล้วถ่ายรูปเพื่อนำมาวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองและทำการวิเคราะห์โครงสร้างเชิงปริมาณต่อไป

2.5.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้างเชิงปริมาณ (Quantitative Image Analysis)

เมื่อได้ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคแล้ว จะนำโครงสร้างทางจุลภาคดังกล่าว ไปวิเคราะห์โครงสร้างเชิงปริมาณ ซึ่งสามารถทำได้โดยนำภาพถ่ายที่ได้ไปปรับแต่งด้วยโปรแกรม Photoshop ดังแสดงในรูปที่ 2.8 จากนั้นจึงนำภาพที่ปรับแต่งแล้วไปใช้เพื่อการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Image Tool ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative Image Analysis) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย

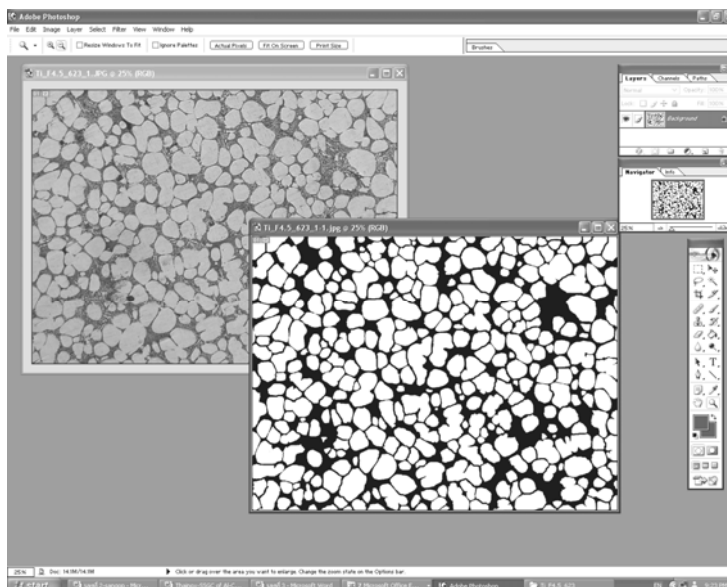
- เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคก้อนกลม (Particle Equivalent Diameter, d) ซึ่งสามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ 2.2 (Fan et al., 2005)

$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (2.2)$$

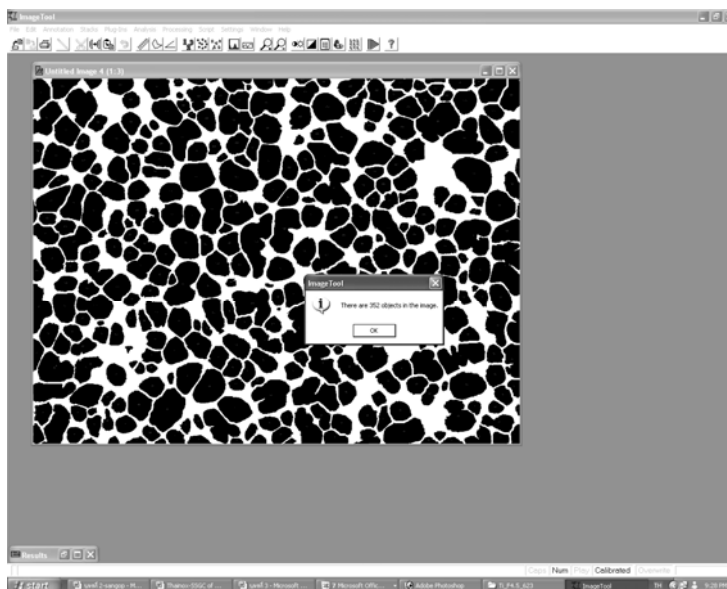
- ค่าความกลมของอนุภาคก้อนกลม (Shape Factor, F) ซึ่งคำนวณได้ด้วยสมการที่ 2.3 (Fan et al., 2005)

$$F = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (2.3)$$

โดยที่ A คือพื้นที่ (Area) ของอนุภาคก้อนกลม และ P คือเส้นรอบวงของอนุภาคก้อนกลม (Perimeter) โดยค่า Shape Factor ที่คำนวณได้จะมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 โดยค่าความกลมสูงสุดมีค่าเท่ากับ 1



รูปที่ 2.8 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคที่นำไปปรับแต่งด้วยโปรแกรม Photoshop



รูปที่ 2.9 แสดงการวิเคราะห์โครงสร้างเชิงปริมาณ (Quantitative Analysis)

ด้วยโปรแกรม Image Tool

2.6 ขั้นตอนการหาค่าความหนาแน่นและเปอร์เซ็นต์โพรงอากาศภายในเนื้อชิ้นงานตัวอย่าง

ความหนาแน่นของชิ้นงานจะใช้หลักการของอาร์คิมิดีส (Archimedes's Method) เพื่อหาค่าความหนาแน่นอ้างอิง (Reference Density, D_{Ref}) ของโลหะ โดยสามารถหาได้ด้วยการชั่งน้ำหนักชิ้นงานที่อบแห้ง (Dry Mass of Samples) และน้ำหนักชิ้นงานที่ชั่งในน้ำ (Mass of Samples Suspended in Water) ของโลหะผสมที่จะใช้หลอมเพื่อฉีดขึ้นรูปเป็นชิ้นงานตัวอย่าง ซึ่งผลของค่าความหนาแน่นอ้างอิงของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าความหนาแน่นอ้างอิง (Reference Density, D_{Ref}) ของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

Aluminum Alloys	Density (g/cm ³)
A356	2.667

ส่วนค่าความหนาแน่นของชิ้นงานตัวอย่าง (Samples Density, D_B) สามารถหาได้โดยการชั่งน้ำหนักชิ้นงานที่อบแห้งและน้ำหนักชิ้นงานที่ชั่งในน้ำ ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 2.4

$$D_B = \frac{M_D}{V} \quad (2.4)$$

โดย M_D คือ น้ำหนักชิ้นงานที่อบแห้ง (Dry Mass of Samples) และ V คือ ปริมาตรของชิ้นงานตัวอย่าง ซึ่งสามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ 2.5

$$V = \frac{M_D - M_W}{\rho_W} \quad (2.5)$$

โดย M_W คือ น้ำหนักชิ้นงานที่ชั่งในน้ำ (Mass of Samples Suspended in Water) และ ρ_W คือ ความหนาแน่นของน้ำ (Density of Water)

ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์โพรงอากาศภายในเนื้อชิ้นงานตัวอย่าง (%Porosity) สามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ 2.6

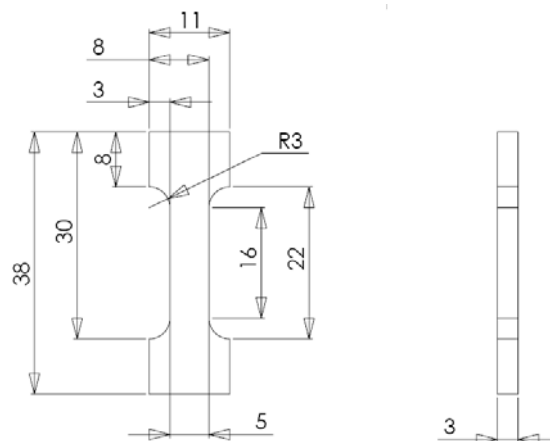
$$\% Porosity = \left(1 - \frac{D_B}{D_{Ref.}} \right) \times 100 \quad (2.6)$$

2.7 ขั้นตอนการปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ด้วยกระบวนการทางความร้อน (Heat Treatment)

กระบวนการทางความร้อน (Heat Treatment) ที่ใช้ในการปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 นั้นจะกระทำที่สภาวะ T6 โดยทำการอบละลาย (Solution Heat Treated) ที่อุณหภูมิ 540°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง เพื่อช่วยให้ธาตุผสมละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับธาตุหลักมากยิ่งขึ้น จากนั้นจึงนำชิ้นงานไปทำการชุบเย็นในน้ำ (Quenching) เพื่อให้ชิ้นงานเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะช่วยให้ธาตุผสมถูกกักอยู่ภายในเนื้อของธาตุหลัก ก่อนนำชิ้นงานไปบ่ม (Artificially Aged) ที่อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ช่วยเร่งให้เกิดการฟอร์มของเฟสใหม่เร็วขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างและช่วยปรับปรุงสมบัติทางกลของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปให้ดีขึ้น

2.8 ขั้นตอนการทดสอบสมบัติทางกล (Mechanical Properties) ของโลหะอะลูมิเนียมผสม A356

สมบัติทางกลของโลหะที่สำคัญ ได้แก่ การทนทานต่อแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength, UTS) การยืดตัว ณ จุดขาดของชิ้นงาน (Elongation) ซึ่งค่าเหล่านี้สามารถวัดได้ด้วยการดึงชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมไว้ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 และทำการดึงชิ้นงานด้วยอัตราการดึงที่คงที่ด้วยเครื่องทดสอบที่เรียกว่า “Universal Testing Machine” ค่าที่วัดได้จากการทดสอบจะเป็นค่าแรงดึงที่แปรผันตามระยะของการยืดของชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ



รูปที่ 2.10 แสดงภาพขนาดของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบแรงดึง (หน่วย: mm.)

บทที่ 3

ผลและการอภิปรายผล

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและการอภิปรายผล ซึ่งจะประกอบไปด้วยผลของการพัฒนาและสร้างเครื่องต้นแบบที่ใช้ในการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง (GISS Version 1.0) ที่สามารถผลิตโลหะกึ่งของแข็งของโลหะผสมเกรดต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลของการวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermal Analysis) ของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยการพ่นฟองแก๊สขณะแข็งตัว ได้แก่ ผลของเวลาที่ใช้ในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊ส (Rheocasting Time) ผลของอุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊ส (Rheocasting Temperature) ผลของอัตราส่วนของพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะ (S/V Ratio) ผลของอุณหภูมิของแท่งกราไฟต์ก่อนการจุ่มลงไปใต้น้ำโลหะ (Graphite Diffuser Temperature) ผลของปริมาณน้ำโลหะที่ใช้ในแต่ละครั้ง (Metal Weight) และผลของการประยุกต์ใช้ระบบผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยการพ่นฟองแก๊สขณะแข็งตัวร่วมกับกระบวนการหล่อแบบไดคาสติง (Die Casting) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 การพัฒนาและสร้างเครื่องต้นแบบที่ใช้ในการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง

ในการพัฒนาและสร้างเครื่องต้นแบบที่ใช้ในการผลิตโลหะกึ่งของแข็งนั้น ผู้วิจัยและทีมวิจัยได้ทำการรวบรวมข้อมูลต่าง ๆ จากการเรียนรู้ในขณะทำการทดสอบชุดอุปกรณ์ผลิตโลหะกึ่งของแข็งระดับ Lab-Scale ในห้องปฏิบัติการและจากการทดสอบร่วมกับเครื่องฉีดไดคาส (Die Casting) ณ สำนักพัฒนาอุตสาหกรรมสนับสนุน (BSID) ดังรูปที่ 3.1 แสดงชุดอุปกรณ์ผลิตโลหะกึ่งของแข็งระดับ Lab-Scale ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 3.1 แสดงชุดอุปกรณ์ผลิตโลหะกึ่งของแข็งระดับ Lab-Scale ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

ผลที่ได้จากการทดสอบชุดอุปกรณ์ผลิตโลหะกึ่งของแข็งระดับ Lab-Scale ในช่วงเวลาที่ผ่านมา ช่วยทำให้ผู้วิจัยและทีมวิจัยสามารถออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบที่ใช้ในการผลิตโลหะกึ่งของแข็งขึ้นมาได้สำเร็จเป็นเครื่องแรก โดยทางทีมวิจัยได้ตั้งชื่อเครื่องต้นแบบที่ใช้ในการผลิตโลหะกึ่งของแข็งนี้ว่า GISS Version 1.0 ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ที่สำคัญดังนี้

1) แท่งกราไฟต์ (Graphite Diffuser) ทำหน้าที่เป็นตัวพ่นฟองแก๊สเนื้อเล็ก ๆ ให้ไหลเข้าไปในน้ำโลหะและยังช่วยทำให้เกิดการกระจายความร้อนออกจากน้ำโลหะเพิ่มเติมขึ้นอีกด้วย

2) ตัววัดอุณหภูมิของน้ำโลหะและอุณหภูมิของแท่งกราไฟต์ (Thermocouples) ทำหน้าที่ตรวจวัดอุณหภูมิของน้ำโลหะและอุณหภูมิของแท่งกราไฟต์ในขณะที่เครื่อง GISS ทำงาน

3) ระบบควบคุมอัตราการไหลของลมและแก๊ส (Control System for Air Cooling and Inert Gas Flow Rate) ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของลมในระบบหล่อเย็น และควบคุมอัตราการไหลของแก๊สเนื้อภายในแท่งกราไฟต์

4) ระบบหล่อเย็นและทำความสะอาดของแท่งกราไฟต์ (Cooling and Cleaning System) ทำหน้าที่หล่อเย็นเพื่อลดอุณหภูมิของตัวแท่งกราไฟต์หลังจากการจุ่มลงไป ในน้ำโลหะ ด้วยการใช้ลมฉีดพ่นไปยังบริเวณรอบ ๆ แท่งกราไฟต์ นอกจากนี้ยังช่วยทำความสะอาดผิวของแท่งกราไฟต์และช่วยกำจัดเศษโลหะที่อาจจะติดค้างอยู่บนผิวของตัวแท่งกราไฟต์ให้หลุดออกไปได้อีกด้วย

5) ชุดควบคุมระบบผลิตโลหะกึ่งของแข็ง (Central Control Unit) ทำหน้าที่ควบคุมระบบผลิตโลหะกึ่งของแข็งทั้งหมด เช่น การเปิด-ปิดเครื่อง ระบบไฟฟ้า ระบบหล่อเย็น เวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์ และการควบคุมอุณหภูมิของน้ำโลหะและอุณหภูมิของแท่งกราไฟต์

เมื่อทีมวิจัยได้นำส่วนประกอบต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างเครื่องต้นแบบสำหรับผลิตโลหะกึ่งของแข็งนี้มาประกอบเข้าด้วยกันแล้ว และทำการทดสอบระบบการทำงานต่าง ๆ ของเครื่องเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ผลที่ได้ทำให้ทีมวิจัยสามารถสร้างเครื่องต้นแบบที่ใช้ในการผลิตโลหะกึ่งของแข็งได้สำเร็จเป็นเครื่องแรก ดังแสดงในรูปที่ 3.2

ในส่วนของขั้นตอนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยเครื่อง GISS Version 1.0 จะเริ่มต้นจากการใช้เบ้าสแตนเลส (Stainless Steel Cup) ที่ทาเคลือบด้วยเซรามิกทนไฟ (Ceramic Coating) ตักน้ำโลหะจากเตาหลอม (ในที่นี้ใช้โลหะอะลูมิเนียมผสม A356) แล้วนำเข้ามาวัดอุณหภูมิของน้ำโลหะด้วยตัววัดอุณหภูมิ (Thermocouple) ที่ติดตั้งไว้ในตำแหน่งด้านหน้าของเครื่อง ดังแสดงในรูปที่ 3.3 เมื่ออุณหภูมิของน้ำโลหะลดลงจนถึงอุณหภูมิที่ผู้ใช้กำหนดไว้ หลอดไฟสีส้มก็จะสว่างขึ้นเพื่อแสดงสถานะว่าพร้อมปล่อยฟองแก๊สแล้ว (Ready for Bubbling) และจึงทำการย้ายเบ้าสแตนเลสมาจุ่มแท่งกราไฟต์อย่างรวดเร็วพร้อมกับการปล่อยฟองแก๊สเนื้อเล็ก ๆ ออกมา ซึ่งอัตราการไหลของแก๊สเนื้อที่ใช้จะขึ้นอยู่กับปริมาณของน้ำโลหะที่ใช้ในแต่ละครั้ง โดยจะทำการจุ่มแท่งกราไฟต์

เพื่อฟองแก๊สเหล่านี้เป็นเวลาตามที่ผู้ใช้กำหนดไว้เช่นกัน เพื่อให้สามารถผลิตโลหะกึ่งของแข็งได้ตามปริมาณสัดส่วนของแข็งที่ผู้ใช้งานต้องการ เพื่อใช้ในการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานต่าง ๆ ต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.2 แสดงเครื่องต้นแบบที่ใช้ในการผลิตโลหะกึ่งของแข็งที่มีชื่อว่า GISS Version 1.0

และหลังจากทำการจุ่มแท่งกราไฟต์ไว้เป็นเวลาตามที่กำหนดแล้ว หลอดไฟสีเขียวก็จะสว่างขึ้นเพื่อแสดงสถานะว่าเสร็จสิ้นการปล่อยฟองแก๊ส (Finish Bubbling) จากนั้นระบบหล่อเย็นและทำความสะอาดของแท่งกราไฟต์ (Cooling and Cleaning System) ก็จะทำงาน โดยหลอดไฟสีขาวจะสว่างขึ้น เพื่อแสดงสถานะว่าระบบหล่อเย็นได้ทำการฉีดพ่นลมเพื่อหล่อเย็นแท่งกราไฟต์อยู่ (Cooling On) สำหรับการเตรียมพร้อมในรอบต่อไปของการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง



รูปที่ 3.3 แสดงการวัดอุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อฟองแก๊สด้วยตัววัดอุณหภูมิ (Thermocouple)



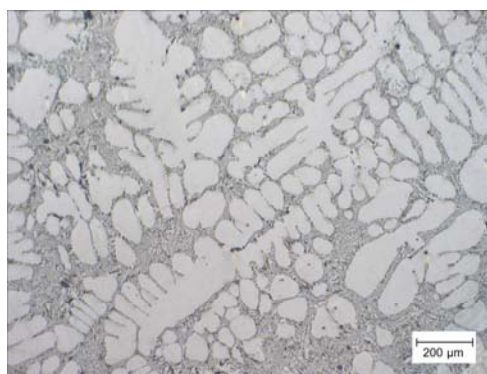
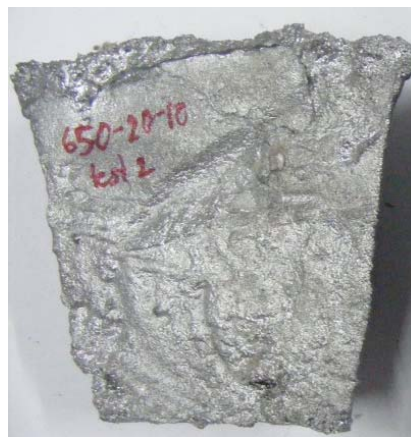
รูปที่ 3.4 แสดงการนำเข้าสู่เตาเผาที่ตักน้ำโลหะจากเตาหลอมมาจุ่มแท่งกราฟไฟต์และปล่อยฟองแก๊สเพื่อผลิตโลหะกึ่งของแข็งตามปริมาณสัดส่วนของแข็งที่ต้องการ

รูปที่ 3.5 แสดงก้อนโลหะกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal) ที่มีสัดส่วนของแข็ง (Solid Fraction) ประมาณ 45% (ที่อุณหภูมิ 580°C) ของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ที่ผลิตได้จากเครื่อง GISS Version 1.0 ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายไอศกรีมและสามารถทดสอบลักษณะของโลหะกึ่งของแข็งนี้ได้ด้วยการใช้พาย (Spatula) ในการตัดทดสอบดูความละเอียดของเนื้อโลหะกึ่งของแข็งที่ผลิตได้ด้วยเครื่อง GISS Version 1.0 และรูปที่ 3.6 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะของเนื้อโลหะและโครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 พบว่าโดยทั่วไปแล้วเมื่อปล่อยให้ น้ำโลหะที่หลอมเหลวอยู่มีอุณหภูมิลดลงและมีการแข็งตัวแบบทั่วไป จะทำให้เกิดโครงสร้างทางจุลภาคที่มีลักษณะเป็นแบบเดนไดรต์ (Dendritic Structure)

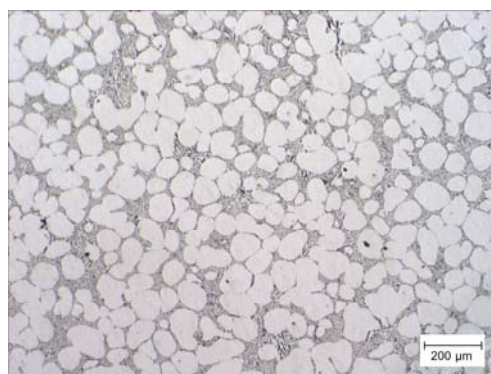


รูปที่ 3.5 แสดงการใช้พายในการตัดก้อนโลหะกึ่งของแข็งที่มีสัดส่วนของแข็งประมาณ 45% ของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ที่ผลิตได้จากเครื่อง GISS Version 1.0

และเมื่อทดลองใช้พายในการตัดก้อนโลหะในระหว่างการแข็งตัวที่อุณหภูมิ 580°C พบว่าเนื้อของโลหะมีลักษณะที่หยาบมากและทำการตัดได้ยากกว่าก้อนโลหะกึ่งของแข็ง ดังรูปที่ 3.6(ก) ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าโลหะที่กำลังแข็งตัวนี้ เกิดโครงสร้างแบบเดนไดรต์ที่มีลักษณะเหมือนกิ่งไม้ นั่นเอง ส่วนในกรณีของก้อนโลหะกึ่งของแข็งที่ผ่านกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยการพ่นฟองแก๊สในขณะการแข็งตัว (GISS Process) พบว่าเนื้อโลหะกึ่งของแข็งที่ได้จะมีความเนียนคล้ายกับเนื้อของไอศกรีมและทำการตัดในระหว่างการแข็งตัวได้ง่ายกว่าก้อนโลหะทั่วไป ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าในระหว่างกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งนั้น จะมีกลไกในการทำให้แขนหรือกิ่งก้านของเดนไดรต์ที่กำลังเกิดขึ้นแตกหักออกจากเดนไดรต์หลัก เกิดเป็นอนุภาคของแข็งที่มีลักษณะเป็นแบบก้อนกลม (Globular Structure) ขนาดเล็ก ๆ กระจายไปทั่วทั้งชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.6(ข)



(ก)

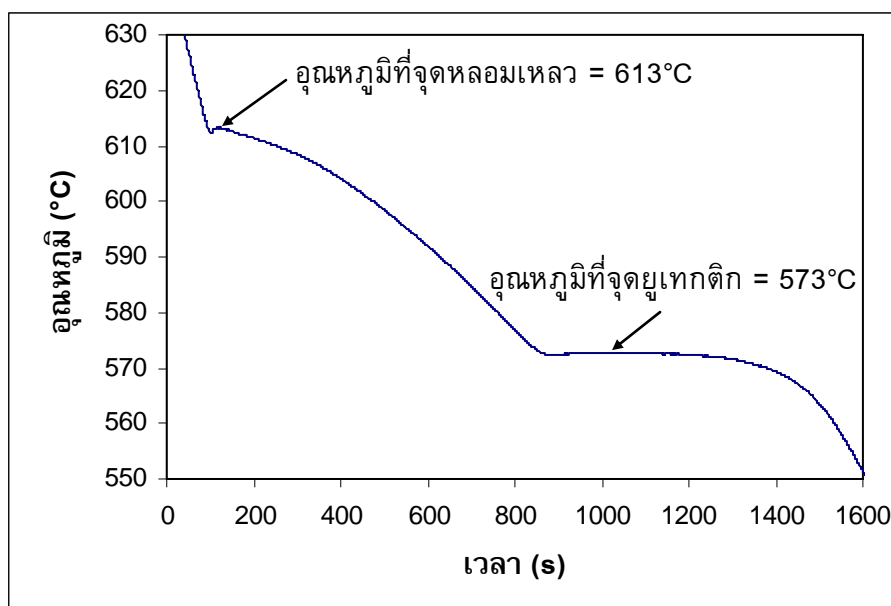


(ข)

รูปที่ 3.6 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะของเนื้อโลหะและโครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 (ก) ไม่ผ่านกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งและมีการแข็งตัวแบบทั่วไป และ (ข) ผ่านกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกระบวนการ GISS

3.2 การวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermal Analysis) ของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด A356

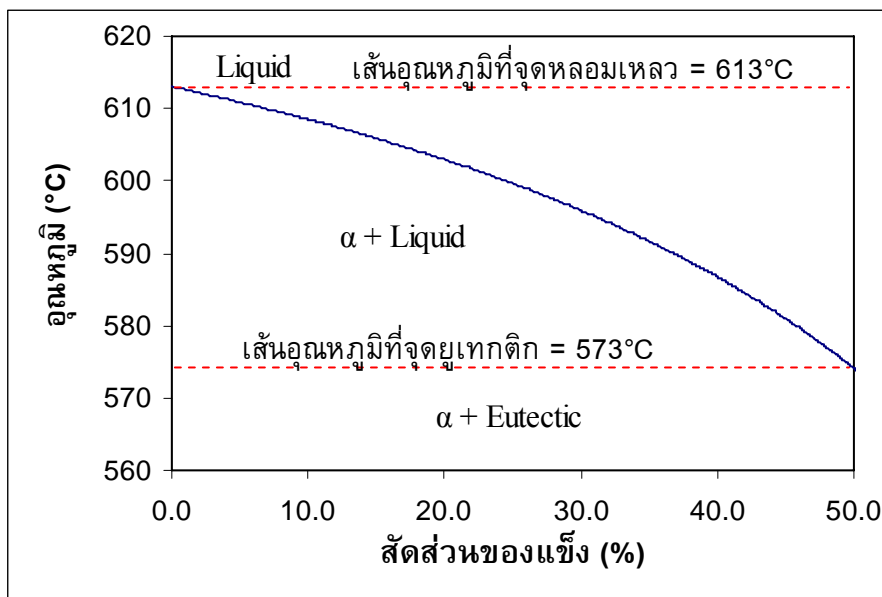
จากการทดลองพบว่า ผลของอุณหภูมิและเวลาที่เปลี่ยนไปในระหว่างการแข็งตัวของน้ำโลหะ สามารถแสดงได้จากเส้นกราฟของการเย็นตัว (Cooling Curves) ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ผลจากการวิเคราะห์ทางความร้อนพบว่าเส้นกราฟของการเย็นตัวของโลหะอะลูมิเนียมผสม A356 สามารถแสดงให้เห็นถึงจุดเริ่มต้นของกระบวนการแข็งตัวของน้ำโลหะที่อุณหภูมิของของเหลว (Liquidus Temperature, T_L) เท่ากับ 613°C และอุณหภูมิที่จุดยูเทกติก (Eutectic Temperature, T_E) อยู่ที่ 573°C



รูปที่ 3.7 แสดงเส้นกราฟของการเย็นตัว (Cooling Curves) ของโลหะอะลูมิเนียมผสม A356 ที่นำมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางความร้อนและค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง สามารถใช้ในการคำนวณหาค่าสัดส่วนของแข็ง (Solid Fraction, f_s) ของโลหะผสมนี้ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้ ด้วยการใส่สมการของไซล์ (Scheil Equation) โดยที่อุณหภูมิที่จุดหลอมเหลวของโลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ (T_M) มีค่าเท่ากับ 660°C อุณหภูมิของของเหลวของโลหะอะลูมิเนียมผสม A356 (T_L) ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้มีค่าเท่ากับ 613°C และสัมประสิทธิ์เฉพาะสำหรับโลหะอะลูมิเนียมผสม A356 (k) มีค่าเท่ากับ 0.13 ซึ่งผลจากการคำนวณดังสมการที่ 2.1 ทำให้สามารถสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและปริมาณสัดส่วนของแข็งที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 พบว่าบริเวณเหนือเส้นอุณหภูมิที่จุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 613°C อะลูมิเนียมผสมเกรด A356 จะมีสภาพเป็นเฟสของเหลวทั้งหมด (Liquid Phase) และเมื่ออุณหภูมิของน้ำโลหะลดลงปริมาณสัดส่วน

ของแข็งจะเพิ่มมากขึ้น โลหะผสมนี้จะมีสภาพเป็นทั้งเฟสของแข็งและของเหลวรวมกัน ($\alpha + \text{Liquid}$) จนกระทั่งเกิดปฏิกิริยาเยือกตก (Eutectic Reaction) ที่อุณหภูมิคงที่ที่ 573°C โลหะผสมนี้จะมีสภาพเป็นเฟสของแข็งและเฟสของปฏิกิริยาเยือกตกรวมกัน ($\alpha + \text{Eutectic}$) ตารางที่ 3.1 แสดงค่าสัดส่วนของแข็งที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของโลหะอะลูมิเนียมผสม A356 ที่คำนวณได้ด้วยสมการของไซล์



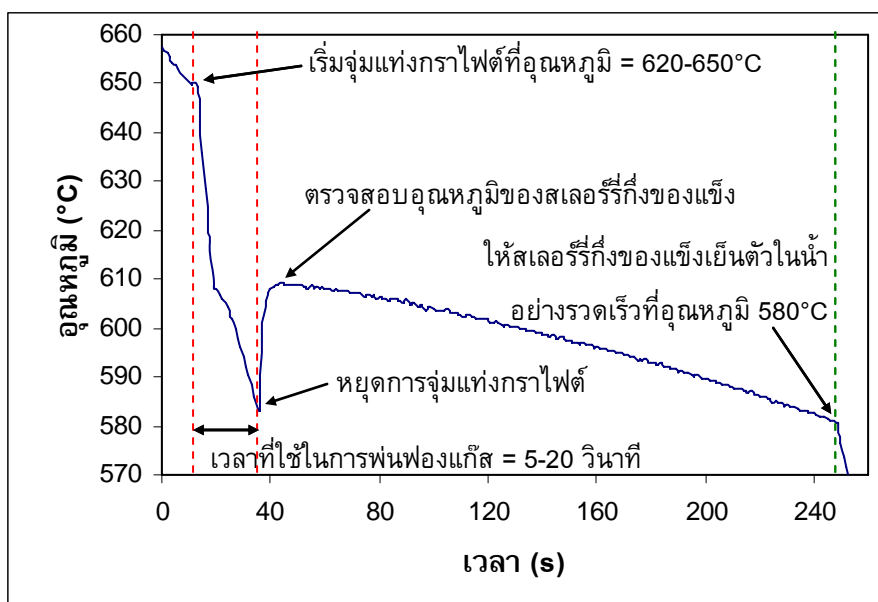
รูปที่ 3.8 แสดงเส้นกราฟสัดส่วนของแข็ง (Solid Fraction Curves) ของโลหะอะลูมิเนียมผสม A356 ที่นำมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าสัดส่วนของแข็งที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของโลหะอะลูมิเนียมผสม A356 ที่คำนวณได้ด้วยสมการของไซล์ (Scheil Equation)

Temperature (°C)	Solid Fraction (%)	Temperature (°C)	Solid Fraction (%)	Temperature (°C)	Solid Fraction (%)
613.0	0.00	609.5	7.92	606.0	14.75
612.5	1.21	609.0	8.96	605.5	15.65
612.0	2.39	608.5	9.98	605.0	16.53
611.5	3.55	608.0	10.97	604.5	17.39
611.0	4.68	607.5	11.94	604.0	18.24
610.5	5.78	607.0	12.90	603.5	19.07
610.0	6.87	606.5	13.83	603.0	19.89

Temperature (°C)	Solid Fraction (%)	Temperature (°C)	Solid Fraction (%)	Temperature (°C)	Solid Fraction (%)
602.5	20.69	600.0	24.47	597.5	27.94
602.0	21.47	599.5	25.19	597.0	28.59
601.5	22.24	599.0	25.89	596.5	29.24
601.0	23.00	598.5	26.59	596.0	29.87
600.5	23.74	598.0	27.27	595.5	30.50

ผลของการวิเคราะห์ทางความร้อน ในขณะที่ทำการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยวิธีการพ่นฟองแก๊ส (Gas Induced Semi-Solid, GISS) แสดงดังรูปที่ 3.9 กราฟที่ได้แสดงให้เห็นถึงขั้นตอนต่าง ๆ ในระหว่างกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง ตั้งแต่เริ่มจุ่มแท่งกราไฟต์ ณ อุณหภูมิที่กำหนด พร้อมกับการพ่นฟองแก๊สในโตรเจนตามเวลาที่กำหนด และตำแหน่งที่ทำการตรวจสอบอุณหภูมิของสเลอรรี่กึ่งของแข็งหลังจากหยุดการจุ่มแท่งกราไฟต์ผ่านไป 5 วินาที จนกระทั่งถึงการเก็บตัวอย่างของสเลอรรี่กึ่งของแข็ง (Semi-Solid Slurry) ที่อุณหภูมิ 580°C แล้วทำให้เย็นตัวในน้ำอย่างรวดเร็ว เพื่อนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ผลที่ได้ต่อไป



รูปที่ 3.9 แสดงเส้นกราฟการเย็นตัวและวิธีการหาอุณหภูมิของสเลอรรี่กึ่งของแข็งในขณะที่ทำการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกระบวนการ GISS

ซึ่งในการทดลองทุกครั้งจะใช้กราฟที่มีลักษณะดังรูปที่ 3.9 เป็นตัวตรวจสอบอุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ เวลาที่ใช้ในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊ส และอุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างของสเลอรี่คิงของแข็ง ว่าเป็นไปตามที่กำหนดไว้ในแต่ละการทดลองหรือไม่ และยังใช้เป็นตัวตรวจสอบอุณหภูมิของสเลอรี่คิงของแข็งที่ได้ออกมาจากระบวนการ GISS หลังจากการหยุดจุ่มแท่งกราไฟต์ผ่านไปไม่เกิน 5 วินาที เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาปริมาณสัดส่วนของแข็งที่เกิดขึ้นสำหรับการวิเคราะห์ผลในหัวข้อต่อไป

3.3 ผลของอุณหภูมิน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ (Rheocasting Temperature) และเวลาที่ใช้ในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊ส (Rheocasting Time)

3.3.1 ผลของอุณหภูมิน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์และเวลาที่ใช้ในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊สที่มีต่ออุณหภูมิของสเลอรี่คิงของแข็ง (Slurry Temperature) อัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะในระหว่างการจุ่มแท่งกราไฟต์ (Cooling Rate) และปริมาณสัดส่วนของแข็งเริ่มต้น (Initial Solid Fraction)

สิ่งสำคัญที่สุดในการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกระบวนการ GISS คือการใช้แท่งกราไฟต์เป็นตัวดูระบายความร้อนเฉพาะจุดออกจากน้ำโลหะอย่างรวดเร็ว ไปพร้อมกับการพ่นฟองแก๊ส เพื่อให้ไหลผ่านแท่งกราไฟต์เพื่อทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำโลหะ เป็นผลทำให้อุณหภูมิของน้ำโลหะลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นการถ่ายเทความร้อนระหว่างแท่งกราไฟต์กับน้ำโลหะ ที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของ 2 ปัจจัย คือ อุณหภูมิน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์และเวลาที่ใช้ในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊ส โดยการถ่ายเทความร้อนระหว่างแท่งกราไฟต์กับน้ำโลหะในงานวิจัยนี้ถูกวัดออกมาเป็นอุณหภูมิของสเลอรี่คิงของแข็ง ซึ่งอุณหภูมิของสเลอรี่คิงของแข็งในที่นี้คือ อุณหภูมิที่ลดลงหลังจากการหยุดจุ่มแท่งกราไฟต์ผ่านไปเป็นเวลาไม่เกิน 5 วินาที

ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์และเวลาที่ใช้ในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊ส มีผลอย่างมากต่ออุณหภูมิของสเลอรี่คิงของแข็งที่ได้ออกมาและปริมาณสัดส่วนของแข็งที่เกิดขึ้นจากกระบวนการ GISS ดังแสดงในรูปที่ 3.10 และ 3.11 ซึ่งพบว่าที่อุณหภูมิน้ำโลหะ 650°C เมื่อทำการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊สเป็นเวลา 5 วินาที 12 วินาที และ 20 วินาที ทำให้อุณหภูมิของสเลอรี่คิงของแข็งที่ได้ออกมามีอุณหภูมิอยู่ที่ 615.9°C 611.8°C และ 609.3°C ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำอุณหภูมิของสเลอรี่คิงของแข็งนี้มาคำนวณหาค่าสัดส่วนของแข็งที่เกิดขึ้นของโลหะผสมนั้นที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วยสมการของไชลด์ (Scheil Equation) ทำให้สามารถวิเคราะห์หาปริมาณสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นที่เกิดขึ้นได้ โดยในกรณีนี้จะ

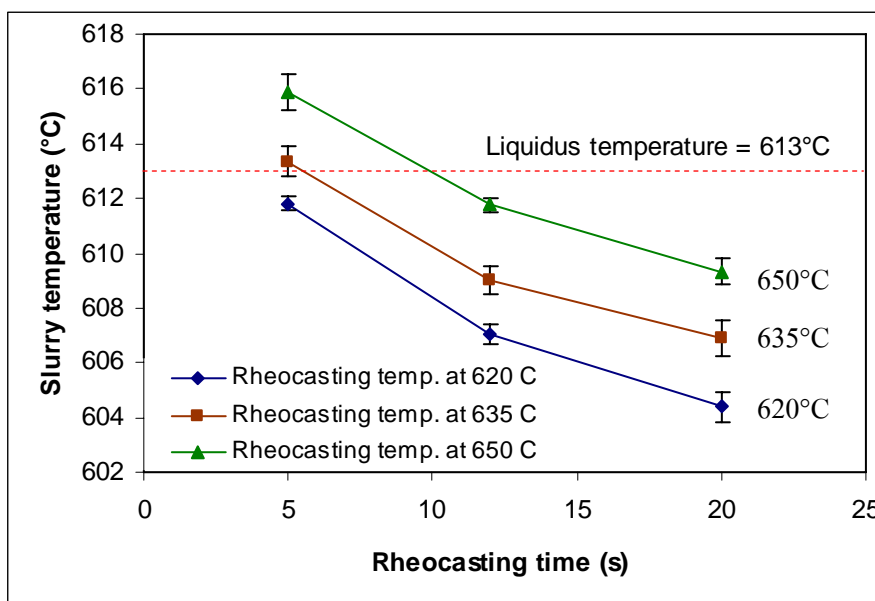
มีสัดส่วนของแข็งเท่ากับ 0% 2.86% และ 8.34% ตามลำดับ ที่อุณหภูมิน้ำโลหะ 635°C เมื่อทำการจุ่มแท่งกราไฟต์เป็นเวลา 5 วินาที 12 วินาที และ 20 วินาที ทำให้อุณหภูมิของสเลอร์รี่กึ่งของแข็งที่ได้ออกมาเมื่ออุณหภูมิอยู่ที่ 613.4°C 609°C และ 606.9°C ตามลำดับ โดยมีสัดส่วนของแข็งเท่ากับ 0% 8.96% และ 13.09% ตามลำดับ ที่อุณหภูมิน้ำโลหะ 620°C เมื่อทำการจุ่มแท่งกราไฟต์เป็นเวลา 5 วินาที 12 วินาที และ 20 วินาที ทำให้อุณหภูมิของสเลอร์รี่กึ่งของแข็งที่ได้ออกมาเมื่ออุณหภูมิอยู่ที่ 611.8°C 607°C และ 604.4°C ตามลำดับ โดยมีสัดส่วนของแข็งเท่ากับ 2.86% 12.90% และ 17.56% ตามลำดับ โดยตารางที่ 3.2 ได้สรุปผลของอุณหภูมิสเลอร์รี่กึ่งของแข็ง อัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะ ในระหว่างการจุ่มแท่งกราไฟต์ และปริมาณสัดส่วนของแข็งที่เกิดขึ้นหลังจากการจุ่มแท่งกราไฟต์ที่อุณหภูมิของน้ำโลหะและเวลาที่ใช้ในการพ่นฟองแก๊สที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 3.2 ผลของอุณหภูมิสเลอร์รี่กึ่งของแข็ง อัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะในระหว่างการจุ่มแท่งกราไฟต์ และปริมาณสัดส่วนของแข็งที่เกิดขึ้นหลังจากการจุ่มแท่งกราไฟต์ที่อุณหภูมิของน้ำโลหะและเวลาที่ใช้ในการพ่นฟองแก๊สที่แตกต่างกัน

Test No.	Rheocasting temperature (°C)	Rheocasting time (s)	Slurry temperature (°C)	Cooling rate of metal during the GISS process (°C/s)	Initial solid fraction (%)
1	620	5	611.8	1.64	2.86
2	620	12	607.0	1.08	12.90
3	620	20	604.4	0.78	17.56
4	635	5	613.4	4.32	-
5	635	12	609.0	2.17	8.96
6	635	20	606.9	1.41	13.09
7	650	5	615.9	6.82	-
8	650	12	611.8	3.18	2.86
9	650	20	609.3	2.04	8.34

ซึ่งอธิบายได้ว่าที่อุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์เท่ากัน เมื่อใช้เวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊สนานขึ้น แท่งกราไฟต์จะมีเวลาในการดูระบายความร้อนออกจากน้ำโลหะพร้อมกับการเคลื่อนย้ายของน้ำโลหะเฉพาะจุดได้มากขึ้น ทำให้อัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะในระหว่างการจุ่มแท่งกราไฟต์มีค่าลดต่ำลง ดังแสดงในตารางที่ 3.2 และรูปที่ 3.12 ส่งผลให้

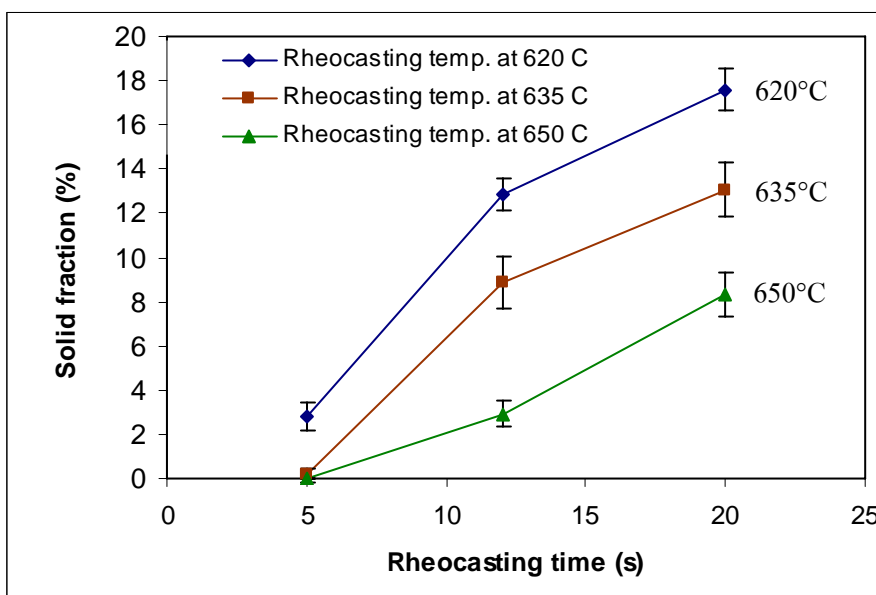
อุณหภูมิของสเลอรัรีกึ่งของแข็งลดลงตามลำดับ และทำให้เกิดสัดส่วนของแข็งเพิ่มมากขึ้นด้วย ในทางกลับกันเมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นพองแก๊สที่เท่ากัน แต่อุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์แตกต่างกันพบว่า น้ำโลหะที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจะส่งผลให้สเลอรัรีกึ่งของแข็งที่ได้ออกมา มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าและจะมีสัดส่วนของแข็งที่เกิดขึ้นมากกว่าด้วย



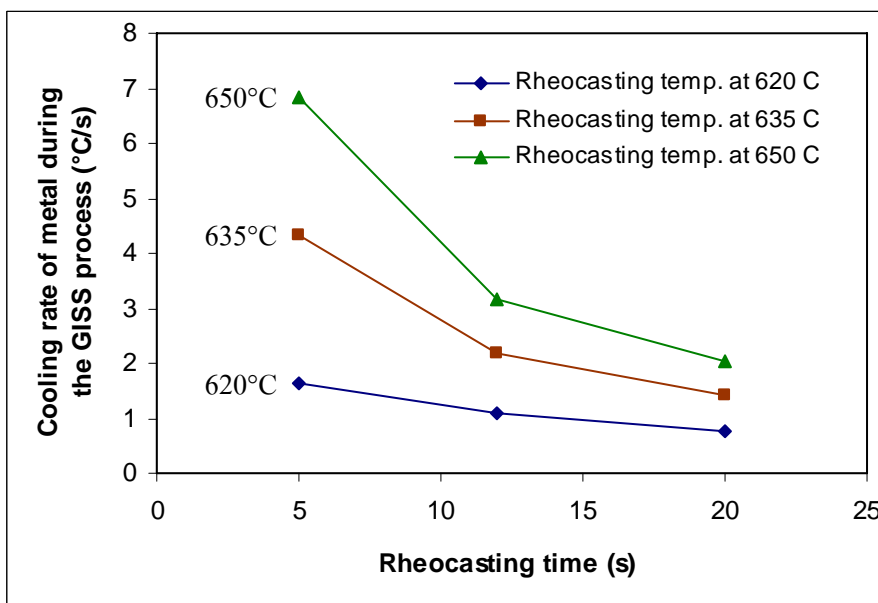
รูปที่ 3.10 ผลของอุณหภูมิน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์และเวลาที่ใช้ในการจุ่มแท่งกราไฟต์ เพื่อพ่นพองแก๊สที่มีต่ออุณหภูมิของสเลอรัรีกึ่งของแข็ง

นอกจากนี้กราฟที่ได้แสดงในรูปที่ 3.10 พบว่ากรณีที่จุ่มแท่งกราไฟต์ที่อุณหภูมิน้ำโลหะ 650°C เป็นเวลา 5 วินาที อุณหภูมิของสเลอรัรีกึ่งของแข็งที่ได้ออกมา ยังมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่จุดหลอมเหลวที่ 613°C อธิบายได้ว่าในกรณีนี้จะลุ่มนิยมนิยมผสมที่ใช้ในการทดลองยังคงมีสภาพเป็นเฟสของเหลวทั้งหมด และยังไม่มีการฟอร์มของนิวคลีโอ (Nuclei) เพื่อเกิดเป็นอนุภาคของแข็ง (Solid Particle) ก่อนที่จะเริ่มเกิดการแข็งตัวต่อไป ทำให้ไม่มีสัดส่วนของแข็งเกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.11 และในกรณีของการจุ่มแท่งกราไฟต์ที่อุณหภูมิน้ำโลหะ 635°C เป็นเวลา 5 วินาทีเช่นกัน ผลของอุณหภูมิของสเลอรัรีกึ่งของแข็งที่ได้ออกมา มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่จุดหลอมเหลวมาก ทำให้ในบางครั้งของการทดลองก็อาจมีการฟอร์มของนิวคลีโอเพื่อเกิดเป็นอนุภาคของแข็งในปริมาณน้อยมากได้เช่นกัน ส่วนในกรณีอื่นๆ ของการทดลอง จะเห็นว่าอุณหภูมิของสเลอรัรีกึ่งของแข็งที่ได้ออกมา มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิที่จุดหลอมเหลวและมีสัดส่วนของแข็งเกิดขึ้นแตกต่างกันออกไป ดังแสดงในรูปที่ 3.10 และ 3.11 ปริมาณสัดส่วนของแข็งที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลมาจากอิทธิพลของอุณหภูมิ

น้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์และเวลาที่ใช้ในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊สดังที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้อันแล้ว นอกจากนี้อิทธิพลดังกล่าวยังส่งผลโดยตรงต่อลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของ อะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ซึ่งจะได้กล่าวไว้ในลำดับถัดไป



รูปที่ 3.11 ผลของอุณหภูมิน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์และเวลาที่ใช้ในการจุ่มแท่งกราไฟต์ เพื่อพ่นฟองแก๊สที่มีต่อปริมาณสัดส่วนของแข็ง

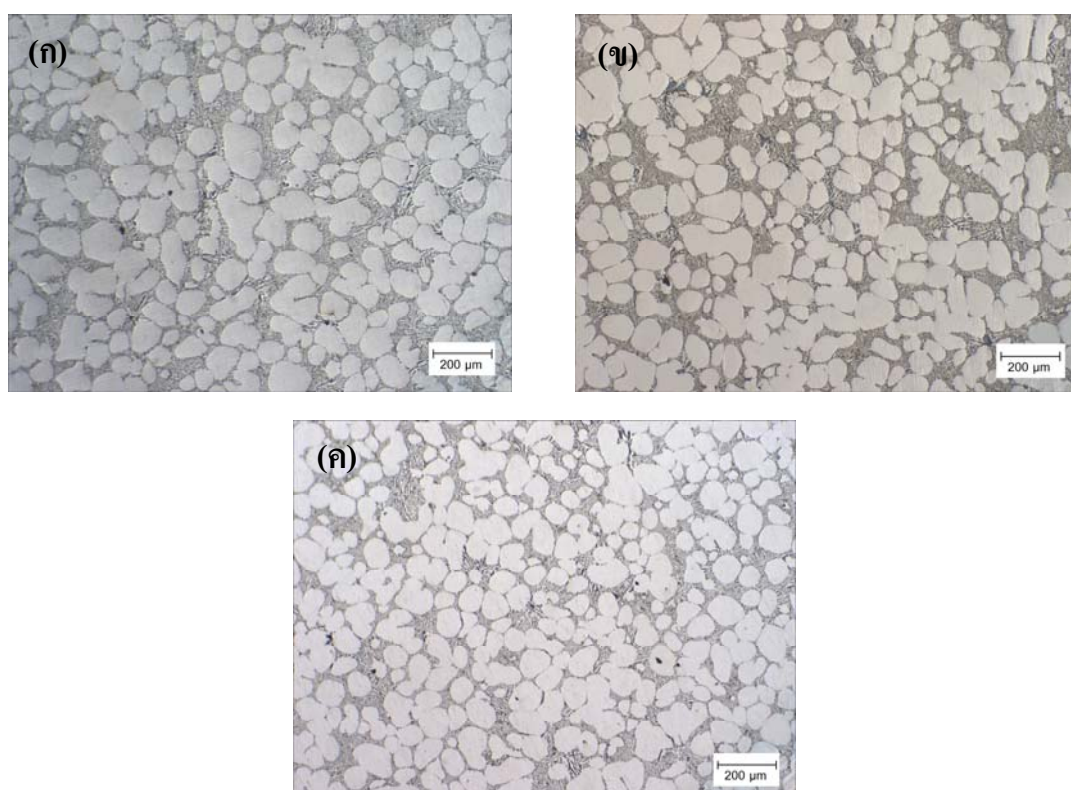


รูปที่ 3.12 ผลของอุณหภูมิน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์และเวลาที่ใช้ในการจุ่มแท่งกราไฟต์ เพื่อพ่นฟองแก๊สที่มีต่ออัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะในระหว่างการจุ่มแท่งกราไฟต์

ผลที่ได้จากการทดลองในหัวข้อนี้ทำให้เราสามารถกำหนดเวลาที่ใช้ในการจุ่มแท่งกราไฟต์ เพื่อฟ้นฟองแก๊ส ร่วมกับอุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ที่แตกต่างกัน เพื่อให้ได้ปริมาณ สัดส่วนของแข็งเป็นไปตามที่ต้องการ ยกตัวอย่างเช่น หากต้องการปริมาณสัดส่วนของแข็งที่ 5% จะต้องใช้เวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อฟ้นฟองแก๊สประมาณ 7 วินาที 9 วินาที และ 15 วินาที เมื่อ อุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์อยู่ที่ 620°C 635°C และ 650°C ตามลำดับ

3.3.2 ผลของอุณหภูมิน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์และเวลาที่ใช้ในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อฟ้นฟอง แก๊สที่มีต่อโครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure) ของโลหะอะลูมิเนียมผสมแมกเนต A356

ผลที่ได้จากการทดลองพบว่า ลักษณะรูปร่างของเฟส α อะลูมิเนียม (α - Al Phase) ซึ่งก็คืออนุภาคของแข็งที่เกิดขึ้น จะแปรเปลี่ยนไปตามสภาวะการแข็งตัว (Solidification) จากรูปร่าง แบบเดนไดรต์หยาบ (Coarse Dendritic) เปลี่ยนเป็นรูปร่างแบบแฉก (Rosette-like) และสุดท้าย กลายเป็นรูปร่างแบบก้อนกลม (Globular) ดังแสดงในรูปที่ 3.13 และ 3.14



รูปที่ 3.13 โครงสร้างจุลภาคของโลหะอะลูมิเนียมผสมแมกเนต A356 ภายใต้อุณหภูมิของน้ำโลหะ ก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ที่อุณหภูมิ 620°C แต่เวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์แตกต่างกัน

(ก) 5 วินาที (ข) 12 วินาที และ (ค) 20 วินาที ตามลำดับ

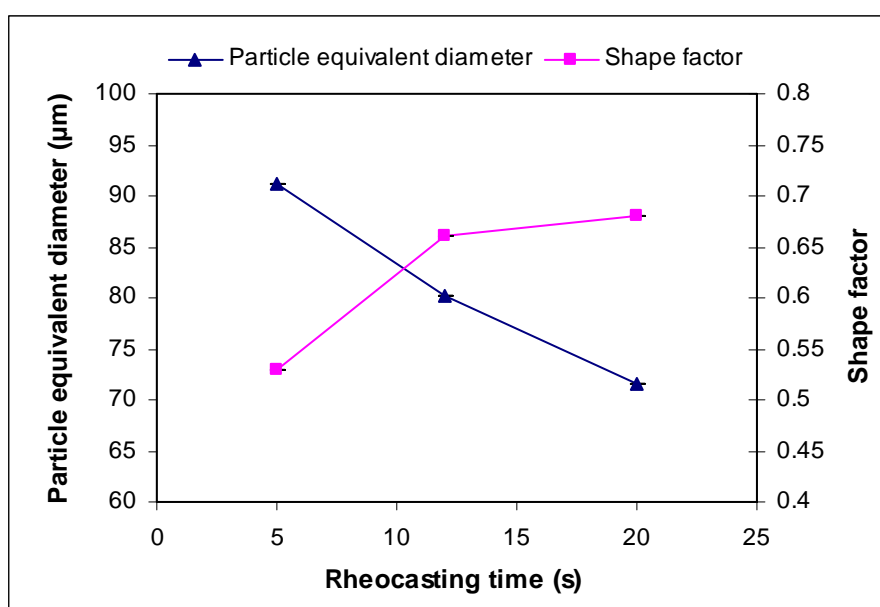
รูปที่ 3.13 แสดงผลโครงสร้างจุลภาคของโลหะอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมเกรด A356 ภายใต้การจุ่มแท่งกราไฟต์ที่อุณหภูมิของน้ำโลหะเท่ากันที่ 620°C แต่เวลาที่ใช้ในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊สแตกต่างกัน (ก) 5 วินาที (ข) 12 วินาที และ (ค) 20 วินาที ตามลำดับ ผลที่ได้ชี้ให้เห็นว่า เวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์มีอิทธิพลต่อปริมาณและลักษณะรูปร่างของเฟส α อะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นในระหว่างการแข็งตัว โดยบริเวณพื้นที่สีขาว คือเฟสของ α อะลูมิเนียม (α - Al Phase) และบริเวณพื้นที่มีสีเข้มเป็นเฟสที่เกิดจากปฏิกิริยายูเทกติก (Eutectic Phase)

รูปที่ 3.13(ก) และ (ข) ภายใต้เวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์ 5 วินาที และ 12 วินาที ตามลำดับ จะปรากฏเฟสของ α อะลูมิเนียมที่มีลักษณะเป็นแบบแฉกผสมกับก้อนกลม และภายใต้เวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์ 20 วินาที เฟสของ α อะลูมิเนียมจะมีลักษณะเป็นแบบก้อนกลมกระจายอยู่ทั่วทั้งโครงสร้าง และเมื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างเชิงปริมาณพบว่า ภายใต้เวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์ 5 วินาที อุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์อยู่ที่ 620°C เฟสของ α อะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 91.2 μm และมีค่าความกลมเฉลี่ยอยู่ที่ 0.53 ภายใต้เวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์ 12 วินาที อุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์อยู่ที่ 620°C เฟสของ α อะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 80.1 μm และมีค่าความกลมเฉลี่ยอยู่ที่ 0.66 และภายใต้เวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์ 20 วินาที อุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์อยู่ที่ 620°C เฟสของ α อะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 71.6 μm และมีค่าความกลมเฉลี่ยอยู่ที่ 0.68 ดังแสดงในตารางที่ 3.3 และรูปที่ 3.14

ตารางที่ 3.3 สรุปผลของรูปร่าง ขนาด และค่าความกลมของเฟส α อะลูมิเนียมที่เกิดขึ้น ภายใต้อุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ 620°C แต่เวลาที่ใช้ในการจุ่มแท่งกราไฟต์แตกต่างกัน

Test No.	Rheocasting time (s)	Rheocasting temperature (°C)	Primary α - Al morphology	Particle diameter of primary α - Al (μm)	Shape factor of primary α - Al
1	5	620	Globular + rosette-like	91.2	0.53
2	12	620	Globular + rosette-like	80.1	0.66
3	20	620	Globular	71.6	0.68

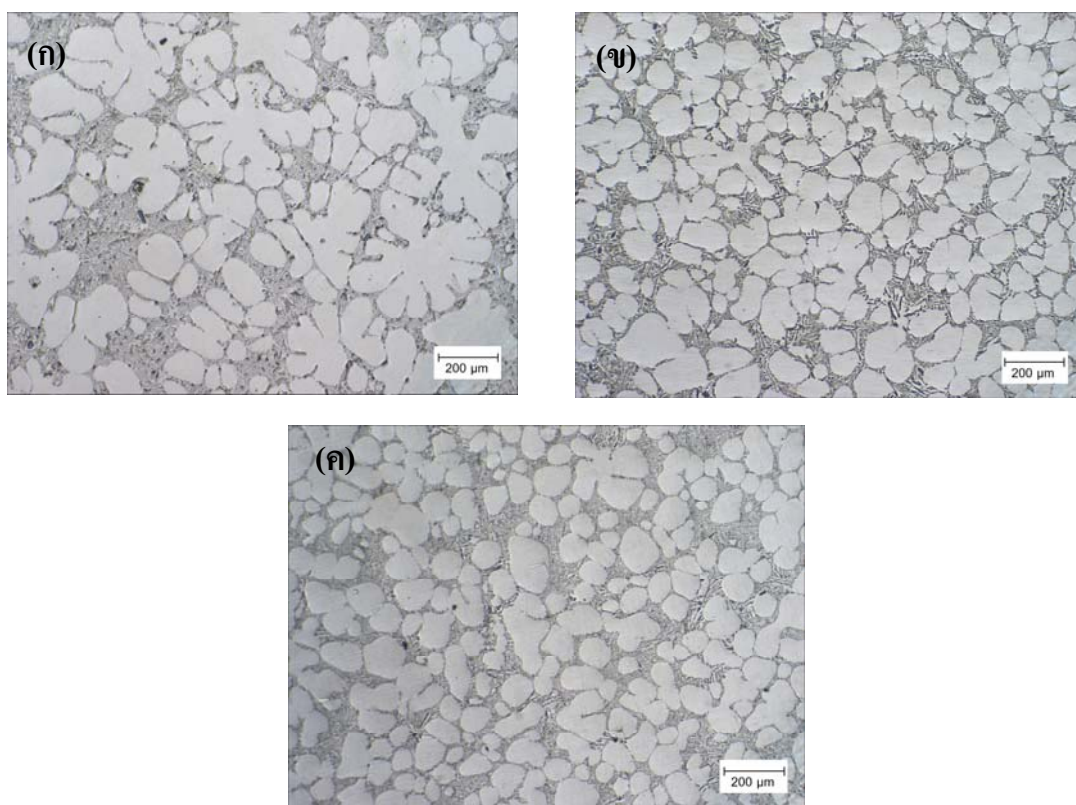
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลของโครงสร้างเชิงปริมาณแล้วนั้น พบว่าภายใต้เวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์ 20 วินาที เฟสของ α อะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นจะมีขนาดที่เล็กละเอียดกว่าและมีค่าความกลมสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับภายใต้เวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์ 5 และ 12 วินาที ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากแท่งกราไฟต์ทำให้เกิดการดูดความร้อนจากน้ำโลหะ ทำให้น้ำโลหะเกิดการเย็นตัวเฉพาะจุดเป็นเวลาที่ยาวนานขึ้น ทำให้เกิดอนุภาคของแข็งขนาดเล็กจำนวนมากขึ้น ประกอบกับแก๊สเฉื่อยที่ไหลผ่านแท่งกราไฟต์ช่วยทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายของน้ำโลหะหรือที่เรียกว่าการพาซึ่งทำให้เกิดการแตกหักของแขนเดนไดรต์และเกิดเป็นอนุภาคของแข็งจำนวนมากขึ้น เมื่ออนุภาคของแข็งเหล่านี้ขยายโตขึ้น จึงทำให้โครงสร้างจุลภาคที่ได้มีลักษณะเป็นก้อนกลมที่ละเอียดกว่า



รูปที่ 3.14 ผลของเวลาที่ใช้ในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊สที่มีต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและค่าความกลมของเฟส α อะลูมิเนียม ภายใต้อุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ 620°C

รูปที่ 3.15 แสดงโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ภายใต้เวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์ 5 วินาที ที่อุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์แตกต่างกันพบว่า ที่อุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ 650°C จะปรากฏเฟส α อะลูมิเนียมที่มีลักษณะเป็นแจกขนาดใหญ่ แต่ที่อุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ 635°C และ 620°C จะปรากฏเฟส α อะลูมิเนียมที่มีลักษณะเป็นแจกผสมกับก้อนกลม ดังแสดงในรูปที่ 3.15(ข) และรูปที่ 3.15(ค) ตามลำดับ และเมื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างเชิงปริมาณพบว่า ภายใต้เวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์ 5 วินาที โดยที่กำหนดให้อุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์อยู่ที่ 620°C เฟสของ α อะลูมิเนียมที่เกิดขึ้น

จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ $91.2 \mu\text{m}$ และมีค่าความกลมเฉลี่ยอยู่ที่ 0.53 ภายใต้ อุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์อยู่ที่ 635°C เฟสของ α อะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นจะมีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ $106.4 \mu\text{m}$ และมีค่าความกลมเฉลี่ยอยู่ที่ 0.50 และภายใต้อุณหภูมิของ น้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์อยู่ที่ 650°C เฟสของ α อะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ $126 \mu\text{m}$ และมีค่าความกลมเฉลี่ยอยู่ที่ 0.46 ดังแสดงในตารางที่ 3.4 และรูปที่ 3.16 ซึ่งอธิบายได้ว่า อุณหภูมิของน้ำโลหะที่สูงขึ้นจะทำให้เกิดอัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะใน ระหว่างการจุ่มแท่งกราไฟต์ที่สูงกว่า และจะเกิดอนุภาคของแข็งที่มีขนาดใหญ่กว่า อนุภาคเหล่านี้จึง เติบโตต่อไปเกิดเป็น โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นแกนขนาดใหญ่ขึ้นเอง

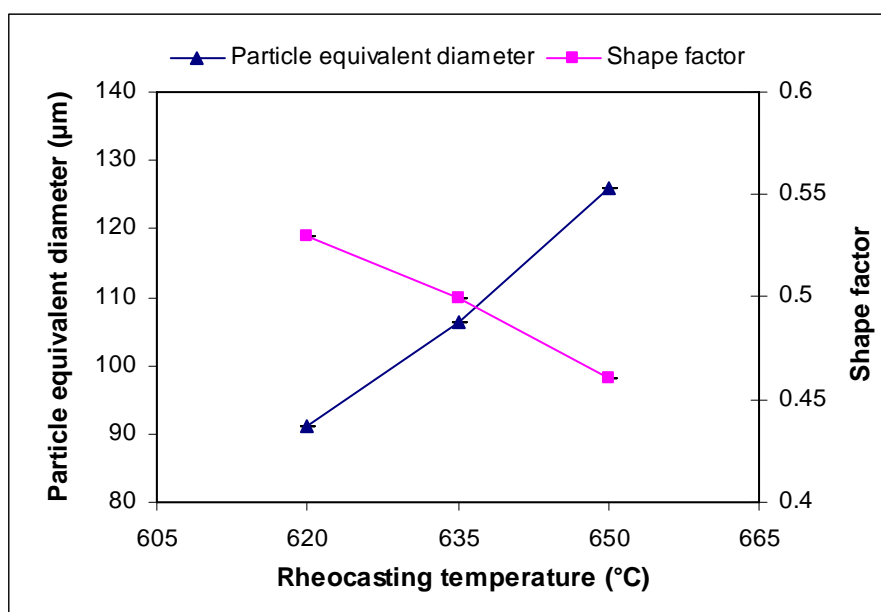


รูปที่ 3.15 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ภายใต้เวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์ เพื่อพ่นฟองแก๊สที่เวลา 5 วินาที แต่อุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์แตกต่างกัน

(ก) 650°C (ข) 635°C และ (ค) 620°C ตามลำดับ

ตารางที่ 3.4 สรุปผลของรูปร่าง ขนาด และค่าความกลมของเฟส α อะลูมิเนียมที่เกิดขึ้น ภายใต้เวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์ 5 วินาที แต่อุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์แตกต่างกัน

Test No.	Rheocasting temperature (°C)	Rheocasting time (s)	Primary α - Al morphology	Particle diameter of primary α - Al (μm)	Shape factor of primary α - Al
1	650	5	Rosette-like	126.0	0.46
2	635	5	Globular + rosette-like	106.4	0.50
3	620	5	Globular + rosette-like	91.2	0.53



รูปที่ 3.16 ผลของอุณหภูมิน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อฟองแก๊สที่มีต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและค่าความกลมของเฟส α อะลูมิเนียม ภายใต้เวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์ 5 วินาที

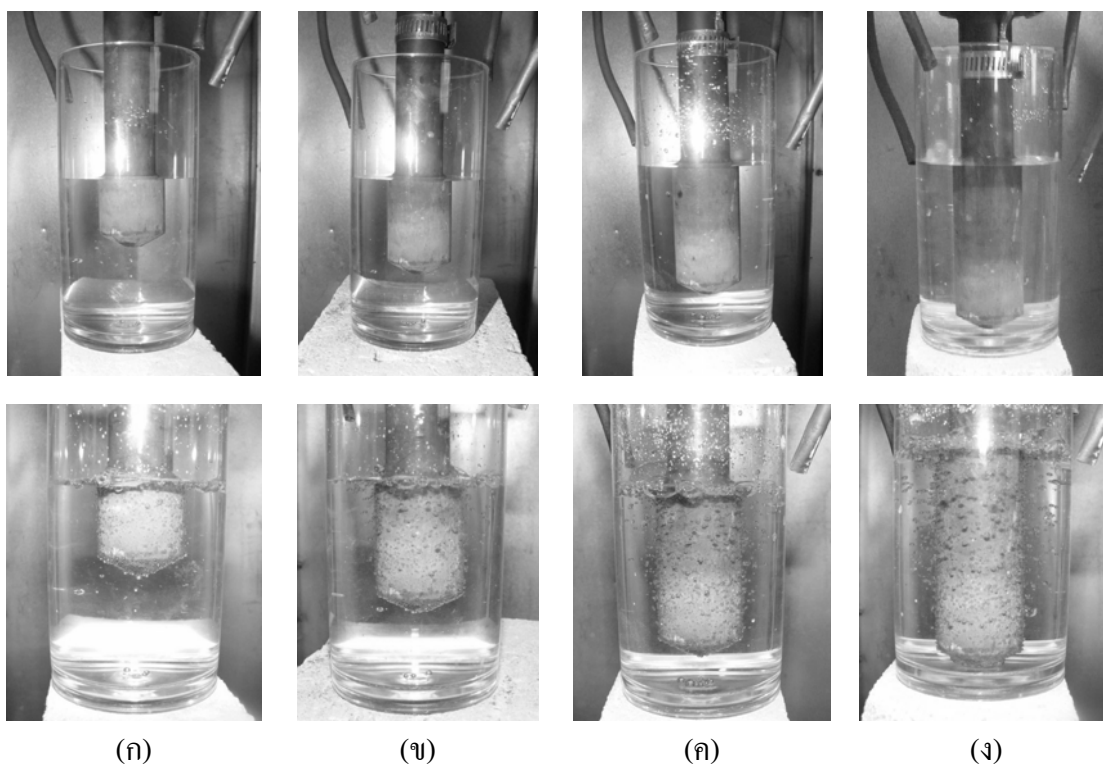
3.4 ผลของอัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะ (S/V Ratio)

ในการทดลองนี้ เพื่อให้ได้อัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะ (S/V Ratio) ที่แตกต่างกัน สามารถทำได้โดยการกำหนดปริมาณของน้ำโลหะ (Metal Weight) ที่ใช้ในแต่ละครั้งเท่ากับ 500 กรัม ซึ่งในกรณีนี้โลหะที่ใช้คือ อะลูมิเนียมผสม A356 มีค่าความหนาแน่น (Density) ประมาณ 2.67 g/cm^3 ดังนั้นปริมาตรของน้ำโลหะ (Metal Volume, V) ที่ใช้ในแต่ละครั้งมีค่าเท่ากับ 187.3 cm^3 ส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ (Surface Area, S) ที่ใช้จุ่มลงไปในน้ำโลหะ จะสามารถคำนวณได้จากระยะความยาวของแท่งกราไฟต์ในส่วนที่ถูกจุ่มลงไปในน้ำโลหะที่แตกต่างกัน คือ 3 cm 4.5 cm 6 cm และ 7.5 cm ทำให้ได้พื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ที่ใช้จุ่มลงไปมีค่าเท่ากับ 29 cm^2 40.98 cm^2 52.94 cm^2 และ 64.91 cm^2 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำค่าพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ที่ใช้จุ่มลงไปและปริมาตรของน้ำโลหะที่ใช้ในแต่ละครั้งนี้มาคำนวณ ทำให้สามารถหาค่าอัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะที่แตกต่างกันได้ ดังแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ผลของพื้นที่ผิวแท่งกราไฟต์ที่ใช้จุ่มลงไปและปริมาตรของน้ำโลหะที่ใช้ ที่มีต่ออัตราส่วนของพื้นที่ผิวแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะที่แตกต่างกัน

Test No.	Metal weight (g)	Metal volume, V (cm^3)	Immersion level of graphite diffuser (cm)	Surface area of graphite diffuser, S (cm^2)	S/V ratio
1	500	187.3	3.0	29.00	0.15
2	500	187.3	4.5	40.98	0.22
3	500	187.3	6.0	52.94	0.28
4	500	187.3	7.5	64.91	0.35

ดังนั้นผลของอัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะที่ใช้ในการทดลองนี้ จะมีอยู่ด้วยกัน 4 ระดับ คือ อัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะที่ 0.15 0.22 0.28 และ 0.35 ตามลำดับ รูปที่ 3.17 แสดงให้เห็นถึงการจำลองของการจุ่มแท่งกราไฟต์ลงไปใต้น้ำโลหะด้วยการใช้น้ำธรรมดาแทนน้ำโลหะและใช้แก้วใสแทนเบ้าสแตนเลสที่ใช้ตักน้ำโลหะในการทดลองจริง ซึ่งจากรูปก็จะเห็นความแตกต่างของระดับการจุ่มแท่งกราไฟต์ลงไปใต้น้ำเมื่อใช้อัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะที่แตกต่างกัน



รูปที่ 3.17 แสดงการจำลองของการจุ่มแท่งกราไฟต์ลงไปใต้น้ำโลหะด้วยอัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะที่แตกต่างกัน (ก) 0.15 (ข) 0.22 (ค) 0.28 และ (ง) 0.35

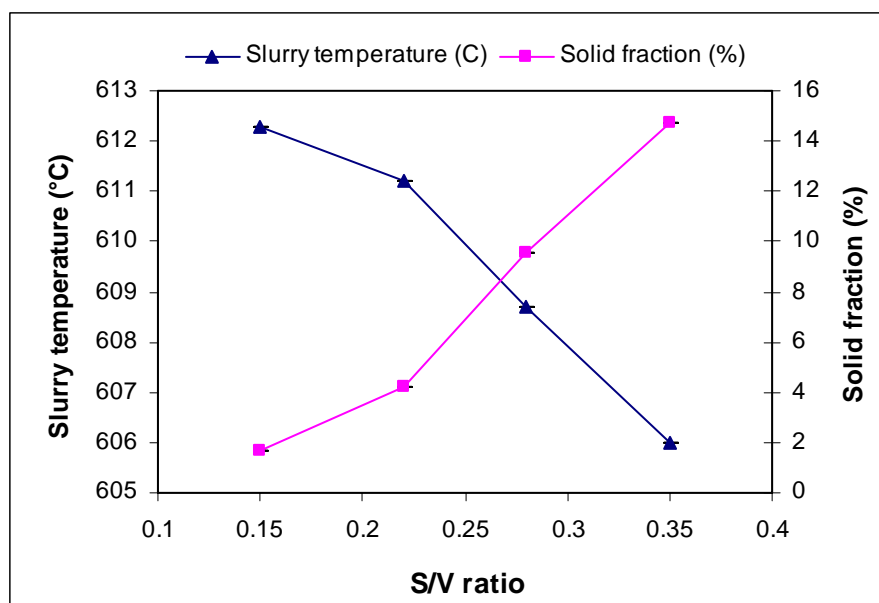
3.4.1 ผลของอัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะ ที่มีต่ออุณหภูมิของสเลอรี่กิ้งของแข็ง (Slurry Temperature) และปริมาณสัดส่วนของแข็งเริ่มต้น (Initial Solid Fraction)

ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะที่ใช้ในการผลิตโลหะกิ้งของแข็งด้วยกระบวนการ GISS มีผลอย่างมากต่ออุณหภูมิของสเลอรี่กิ้งของแข็งที่ได้ออกมาและปริมาณสัดส่วนของแข็งที่เกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.18 ซึ่งพบว่าที่อัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะที่ 0.15 0.22 0.28 และ 0.35 เมื่อทำการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊สเป็นเวลา 20 วินาที ที่อุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์อยู่ที่ 620°C จะทำให้อุณหภูมิของสเลอรี่กิ้งของแข็งที่ได้ออกมามีอุณหภูมิอยู่ที่ 612.3°C 611.2°C 608.7°C และ 606°C ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำอุณหภูมิของสเลอรี่กิ้งของแข็งนี้มาคำนวณหาค่าสัดส่วนของแข็งที่เกิดขึ้นของโลหะผสมนั้นที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วยสมการของไซล์ (Scheil Equation) ทำให้สามารถวิเคราะห์หาปริมาณสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นที่เกิดขึ้นได้ โดยในกรณีนี้จะมีสัดส่วนของแข็งเท่ากับ 1.68% 4.23% 9.57% และ 14.75% ตามลำดับ โดยตารางที่ 3.6 ได้สรุปผลของ

อุณหภูมิเคลือบที่แข็ง และปริมาณสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นที่เกิดขึ้น ภายใต้อัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราฟไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะที่ใช้แตกต่างกัน

ตารางที่ 3.6 สรุปผลของอุณหภูมิเคลือบที่แข็งและปริมาณสัดส่วนของแข็งที่เกิดขึ้น ภายใต้อัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราฟไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะที่ใช้แตกต่างกัน

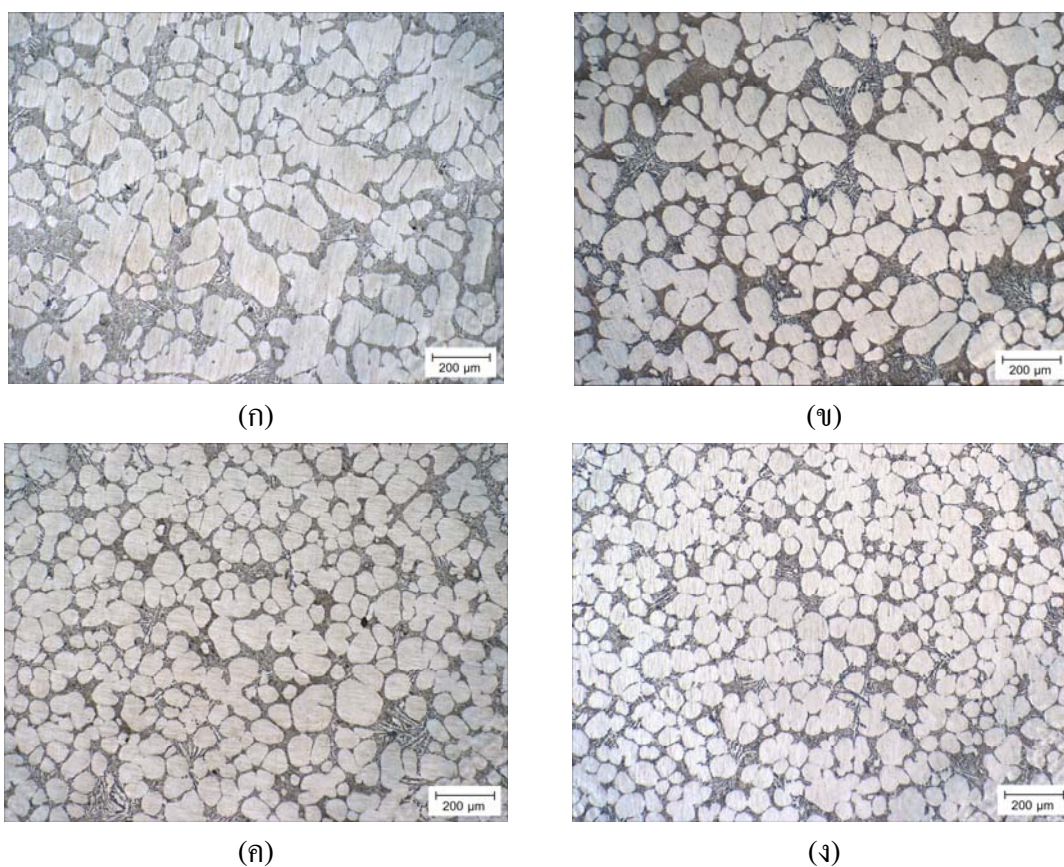
Test No.	S/V ratio	Rheocasting temperature (°C)	Rheocasting time (s)	Slurry temperature (°C)	Initial solid fraction (%)
1	0.15	620	20	612.3	1.68
2	0.22	620	20	611.2	4.23
3	0.28	620	20	608.7	9.57
4	0.35	620	20	606.0	14.75



รูปที่ 3.18 ผลของอัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราฟไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะที่แตกต่างกัน ที่มีต่ออุณหภูมิเคลือบที่แข็งและปริมาณสัดส่วนของแข็งที่เกิดขึ้น

3.4.2 ผลของอัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะ ที่มีต่อโครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure) ของโลหะอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม A356

ผลที่ได้จากการทดลองพบว่า อัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะที่ใช้ในการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกระบวนการ GISS มีผลอย่างมากต่อลักษณะรูปร่างของเฟส α อะลูมิเนียม (α - Al Phase) ซึ่งรูปร่างของเฟส α อะลูมิเนียมนี้จะเปลี่ยนจากรูปร่างแบบเดนไดรต์หยาบ (Coarse Dendritic) เป็นรูปร่างแบบแฉก (Rosette-like) และสุดท้ายกลายเป็นรูปร่างแบบก้อนกลม (Globular) เมื่ออัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.19



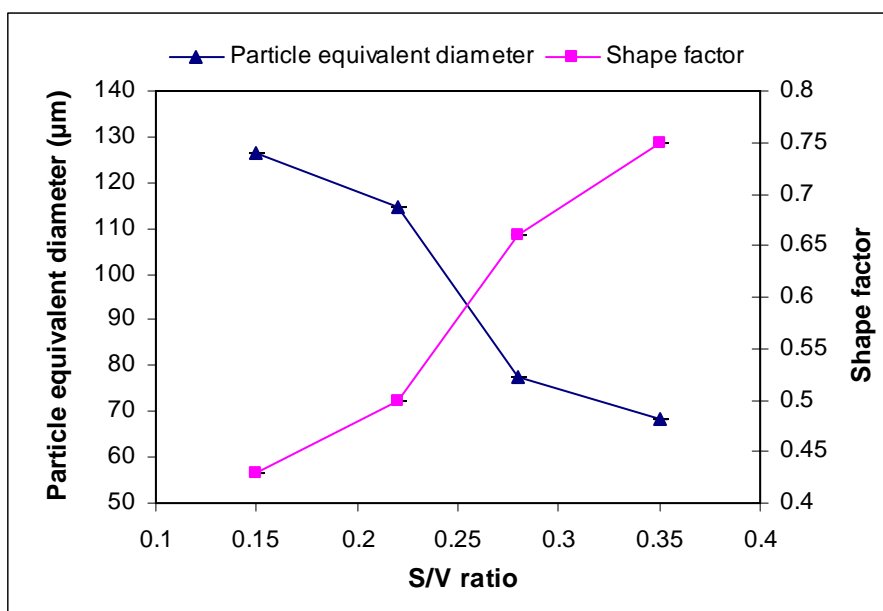
รูปที่ 3.19 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม A356 ภายใต้อุณหภูมิในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อฟองแก๊สเป็นเวลา 20 วินาที ร่วมกับอุณหภูมิน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ที่ 620°C แต่ใช้อัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะที่แตกต่างกัน

(ก) 0.15 (ข) 0.22 (ค) 0.28 และ (ง) 0.35 ตามลำดับ

รูปที่ 3.19 แสดงโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ภายใต้อุณหภูมิในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊สที่เวลา 20 วินาที ร่วมกับอุณหภูมิน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ที่ 620°C แต่กำหนดให้อัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะที่ใช้แตกต่างกัน พบว่า อัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะที่ 0.15 จะปรากฏเฟส α อะลูมิเนียมที่มีลักษณะเป็นแฉกขนาดใหญ่ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 126.5 μm และมีค่าความกลมเฉลี่ยอยู่ที่ 0.43 ดังแสดงในรูปที่ 3.19(ก) และเมื่อกำหนดให้อัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะอยู่ที่ 0.22 จะปรากฏเฟส α อะลูมิเนียมที่มีลักษณะเป็นแบบแฉกผสมกับก้อนกลม โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 114.5 μm และมีค่าความกลมเฉลี่ยอยู่ที่ 0.50 ดังแสดงในรูปที่ 3.19(ข) นอกจากนี้เมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะให้สูงขึ้นเป็น 0.28 และ 0.35 ผลของโครงสร้างที่ได้จะปรากฏเฟส α อะลูมิเนียมที่มีลักษณะเป็นแบบก้อนกลมกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 3.19(ค) และรูปที่ 3.19(ง) ตามลำดับ และเมื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างเชิงปริมาณพบว่า เฟสของ α อะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 77.5 μm และ 68.3 μm ส่วนค่าความกลมเฉลี่ยจะอยู่ที่ 0.66 และ 0.75 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.7 และรูปที่ 3.20 ซึ่งอธิบายได้ว่า อัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะที่เพิ่มสูงขึ้น จะทำให้เกิดปริมาณสัดส่วนของแข็งที่มากกว่า และอนุภาคของแข็งที่เกิดขึ้นจะมีขนาดที่เล็กละเอียดกว่า ทำให้อนุภาคของแข็งเหล่านี้เติบโตต่อไปเกิดเป็น โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นแบบก้อนกลมขนาดเล็กกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอในโครงสร้างของอะลูมิเนียม

ตารางที่ 3.7 สรุปผลของรูปร่าง ขนาด และค่าความกลมของเฟส α อะลูมิเนียมที่เกิดขึ้น ภายใต้อุณหภูมิในการจุ่มแท่งกราไฟต์ 20 วินาที ร่วมกับอุณหภูมิน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ที่ 620°C แต่ใช้อัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะที่แตกต่างกัน

S/V ratio	Rheocasting temperature (°C)	Rheocasting time (s)	Primary α - Al morphology	Particle diameter of primary α - Al (μm)	Shape factor of primary α - Al
0.15	620	20	Rosette-like	126.5	0.43
0.22	620	20	Globular + rosette-like	114.5	0.50
0.28	620	20	Globular	77.5	0.66
0.35	620	20	Globular	68.3	0.75



รูปที่ 3.20 ผลของอัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะที่มีต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและค่าความกลมของเฟส α อะลูมิเนียม ภายใต้เวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์ 20 วินาที ร่วมกับอุณหภูมิน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ที่ 620°C

ผลที่ได้จากการทดลองในหัวข้อนี้ ซึ่งให้เห็นถึงอัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะที่เหมาะสมในการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกระบวนการ GISS เพื่อให้ได้ปริมาณสัดส่วนของแข็งและโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมตามที่ต้องการ ซึ่งจะมีความสำคัญมากในการออกแบบระบบผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกระบวนการ GISS ว่าจะต้องกำหนดระยะเวลาของแท่งกราไฟต์ที่จะใช้จุ่มลงไปใต้น้ำโลหะให้อยู่ในระดับความลึกที่เหมาะสม เพื่อให้ได้อัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด

3.5 ผลของอุณหภูมิแท่งกราไฟต์ก่อนการจุ่มลงไปใต้น้ำโลหะ (Graphite Diffuser Temperature)

เมื่อทำการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกระบวนการ GISS ร่วมกับกระบวนการหล่อขึ้นรูปขึ้นงาน โดยเฉพาะในกระบวนการหล่อฉีดอะลูมิเนียมที่สามารถฉีดขึ้นรูปอะลูมิเนียมเป็นขึ้นงานตามที่ต้องการได้อย่างรวดเร็ว โดยใช้เวลาในการผลิตต่อชิ้น (Cycle Time) ไม่ถึงหนึ่งนาที (ขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงานหล่อด้วย) ซึ่งตรงจุดนี้เองที่เป็นสาเหตุให้ผู้วิจัยและทีมวิจัยต้องออกแบบระบบการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกระบวนการ GISS ให้ใช้เวลาในการผลิตโลหะกึ่งของแข็งต่อครั้งน้อยที่สุด นั่นคือต้องควบคุมกระบวนการ GISS ให้มีเวลา Cycle Time สั้นที่สุด และยังคงผลิต

โลหะกึ่งของแข็งได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งหนึ่งในตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อเวลาในการผลิตโลหะกึ่งของแข็งต่อครั้งด้วยกระบวนการ GISS นี้ก็คือ อุณหภูมิของแท่งกราไฟต์ก่อนการจุ่มลงไปใต้น้ำโลหะ (Graphite Diffuser Temperature) เนื่องจากการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกระบวนการ GISS โดยทั่วไปแล้วจะมีการควบคุมอุณหภูมิของแท่งกราไฟต์ก่อนการจุ่มลงไปใต้น้ำโลหะให้อยู่ที่อุณหภูมิไม่เกิน 40°C โดยหลังจากที่ทำการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊สเป็นเวลาตามที่กำหนดแล้ว แท่งกราไฟต์ก็จะมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเกินค่าที่กำหนดไว้ ระบบของเครื่อง GISS ก็จะทำการหล่อเย็น (Cooling) แท่งกราไฟต์ด้วยการฉีดพ่นลมไปยังรอบ ๆ บริเวณของแท่งกราไฟต์ เพื่อให้แท่งกราไฟต์เย็นตัวและลดอุณหภูมิลงมาให้อยู่ต่ำกว่าอุณหภูมิของแท่งกราไฟต์ที่กำหนดไว้ เพื่อเตรียมความพร้อมในรอบต่อไปของการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง แต่เนื่องจากเมื่อนำกระบวนการ GISS มาใช้ร่วมกับกระบวนการหล่อฉีดอะลูมิเนียม พบว่าการหล่อเย็นแท่งกราไฟต์ให้มีอุณหภูมิไม่เกิน 40°C หลังจากจุ่มแท่งกราไฟต์เป็นเวลา 5 ถึง 20 วินาที ต้องใช้เวลาในการหล่อเย็นแท่งกราไฟต์เป็นเวลา 40 ถึง 80 วินาที ซึ่งถือว่าเป็นเวลา Cycle Time ที่นานมากสำหรับกระบวนการหล่อฉีดอะลูมิเนียม ทำให้เวลาที่ใช้ในการผลิตโลหะกึ่งของแข็งต่อครั้งไม่สัมพันธ์กับเวลาที่ใช้ในการหล่อฉีดอะลูมิเนียม วิธีแก้ปัญหาดังที่กล่าวมาแล้ว สามารถทำได้ด้วยการกำหนดอุณหภูมิของแท่งกราไฟต์ก่อนจุ่มน้ำโลหะให้เพิ่มสูงขึ้น ด้วยการควบคุมอุณหภูมิของแท่งกราไฟต์ก่อนการจุ่มลงไปใต้น้ำโลหะให้อยู่ที่อุณหภูมิไม่เกิน 100°C ก็จะสามารถช่วยลดเวลาที่ใช้ในการหล่อเย็นแท่งกราไฟต์ให้น้อยลงได้

3.5.1 ผลของอุณหภูมิแท่งกราไฟต์ก่อนการจุ่มลงไปใต้น้ำโลหะ ที่มีต่ออุณหภูมิของสเลอรรี่กึ่งของแข็ง (Slurry Temperature) และปริมาณสัดส่วนของแข็งเริ่มต้น (Initial Solid Fraction)

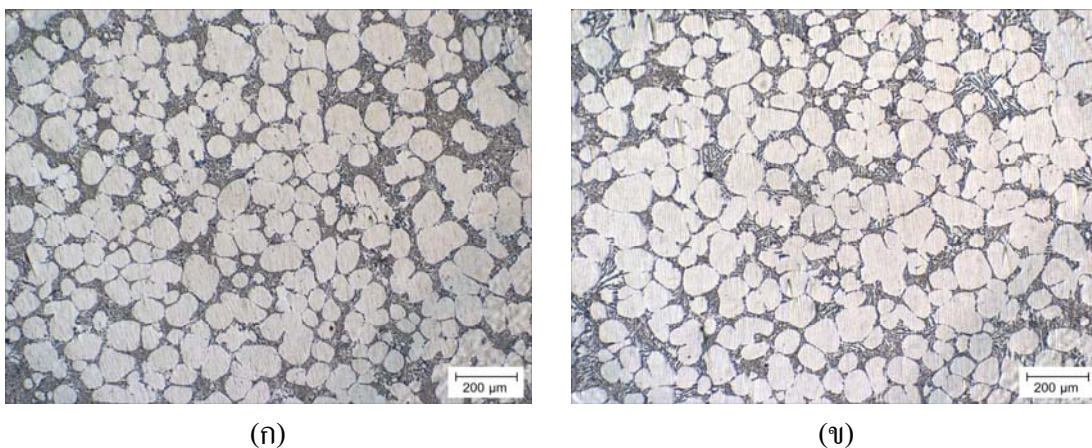
ผลจากการทดลองพบว่า เมื่อกำหนดให้อุณหภูมิของแท่งกราไฟต์ก่อนการจุ่มลงไปใต้น้ำโลหะให้อยู่ที่ 40°C และ 100°C ภายใต้เวลาที่ใช้ในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊ส 5 วินาที และอุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์อยู่ที่ 620°C ทำให้อุณหภูมิของสเลอรรี่กึ่งของแข็งที่ได้ ออกมามีอุณหภูมิอยู่ที่ 612 และ 612.6°C ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำอุณหภูมิของสเลอรรี่กึ่งของแข็งนี้ มาคำนวณหาค่าสัดส่วนของแข็งที่เกิดขึ้นของโลหะผสมนั้นที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วยสมการของไซล์ (Scheil Equation) ทำให้สามารถวิเคราะห์หาปริมาณสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นที่เกิดขึ้นได้ โดยในกรณีนี้จะมีสัดส่วนของแข็งเท่ากับ 2.39% และ 0.97% ตามลำดับ โดยตารางที่ 3.8 ได้สรุปผลของอุณหภูมิสเลอรรี่กึ่งของแข็ง และปริมาณสัดส่วนของแข็งที่เกิดขึ้น ภายใต้อุณหภูมิของแท่งกราไฟต์ก่อนการจุ่มลงไปใต้น้ำโลหะที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 3.8 สรุปผลของอุณหภูมิเสถียรที่แข็งของแข็ง และปริมาณสัดส่วนของแข็งที่เกิดขึ้น
ภายใต้อุณหภูมิของแท่งกราไฟต์ก่อนการจุ่มลงไปใต้น้ำโลหะที่แตกต่างกัน

Test No.	Graphite diffuser temperature (°C)	Rheocasting time (s)	Rheocasting temperature (°C)	Slurry temperature (°C)	Initial solid fraction (%)
1	40	5	620	612.0	2.39
2	100	5	620	612.6	0.97
3	40	20	620	606.0	14.75
4	100	20	620	608.4	10.18

3.5.2 ผลของอุณหภูมิน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นพองแก๊สที่มีต่อโครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure) ของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด A356

ผลจากการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิของแท่งกราไฟต์ก่อนการจุ่มลงไปใต้น้ำโลหะที่ 40°C และ 100°C ภายใต้เวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นพองแก๊สที่เวลา 5 วินาที ร่วมกับอุณหภูมิน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ที่ 620°C จะปรากฏเฟส α อะลูมิเนียมที่มีลักษณะรูปร่างเป็นแบบแฉกผสมกับก้อนกลม โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 84.3 μm และ 88 μm ตามลำดับ ส่วนค่าความกลมเฉลี่ยอยู่ที่ 0.68 และ 0.66 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.21

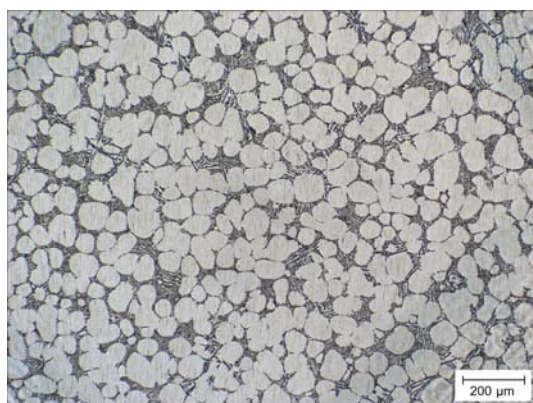


รูปที่ 3.21 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ภายใต้เวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นพองแก๊สที่เวลา 5 วินาที ร่วมกับอุณหภูมิน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ที่ 620°C แต่ใช้อุณหภูมิของแท่งกราไฟต์ก่อนการจุ่มลงไปใต้น้ำโลหะที่แตกต่างกัน

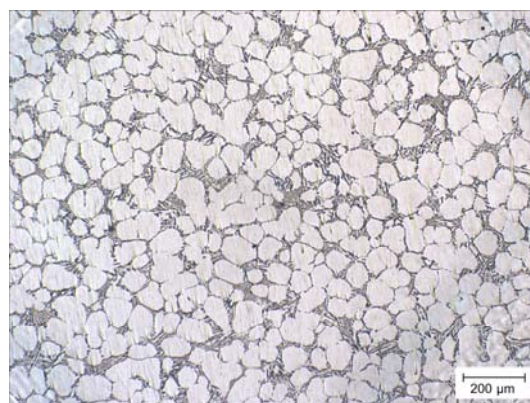
(ก) 40°C และ (ข) 100°C ตามลำดับ

และในกรณีที่อุณหภูมิของแท่งกราไฟต์ก่อนการจุ่มลงไปใต้น้ำโลหะที่ 40°C และ 100°C ภายใต้เวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊สที่เวลา 20 วินาที ร่วมกับอุณหภูมิน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ที่ 620°C จะปรากฏเฟส α อะลูมิเนียมที่มีลักษณะรูปร่างเป็นแบบก้อนกลมกระจายอยู่ทั่วทั้งโครงสร้าง โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 68.5 μm และ 69.4 μm ตามลำดับ ส่วนค่าความกลมเฉลี่ยอยู่ที่ 0.75 และ 0.74 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.22 ซึ่งพบว่าทั้งสองการทดลองให้ผลที่ไม่แตกต่างกัน ดังจะสังเกตได้ว่าลักษณะรูปร่างของเฟส α อะลูมิเนียมมีลักษณะคล้ายกันคือมีลักษณะเป็นแบบก้อนกลมกระจายอยู่ทั่วทั้งโครงสร้าง นอกจากนี้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยและค่าความกลมเฉลี่ยของเฟส α อะลูมิเนียมก็มีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังแสดงในรูปที่ 3.23 และตารางที่ 3.9 ได้สรุปผลของรูปร่าง ขนาด และค่าความกลมของเฟส α อะลูมิเนียมที่เกิดขึ้น ภายใต้เวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์ 5 และ 20 วินาที ร่วมกับอุณหภูมิน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ที่ 620°C แต่อุณหภูมิของแท่งกราไฟต์ก่อนการจุ่มลงไปใต้น้ำโลหะที่ใช้แตกต่างกัน

ผลที่ได้จากการทดลองในหัวข้อนี้ แสดงให้เห็นว่า เราสามารถกำหนดอุณหภูมิของแท่งกราไฟต์ก่อนการจุ่มลงไปใต้น้ำโลหะได้สูงถึง 100°C โดยที่ยังคงสามารถผลิตโลหะกึ่งของแข็งได้อย่างมีประสิทธิภาพ และช่วยทำให้เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็นของแท่งกราไฟต์ลดลง ทำให้สามารถผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกระบวนการ GISS ได้ทันเวลากับกระบวนการหล่อฉีดอะลูมิเนียม



(ก)



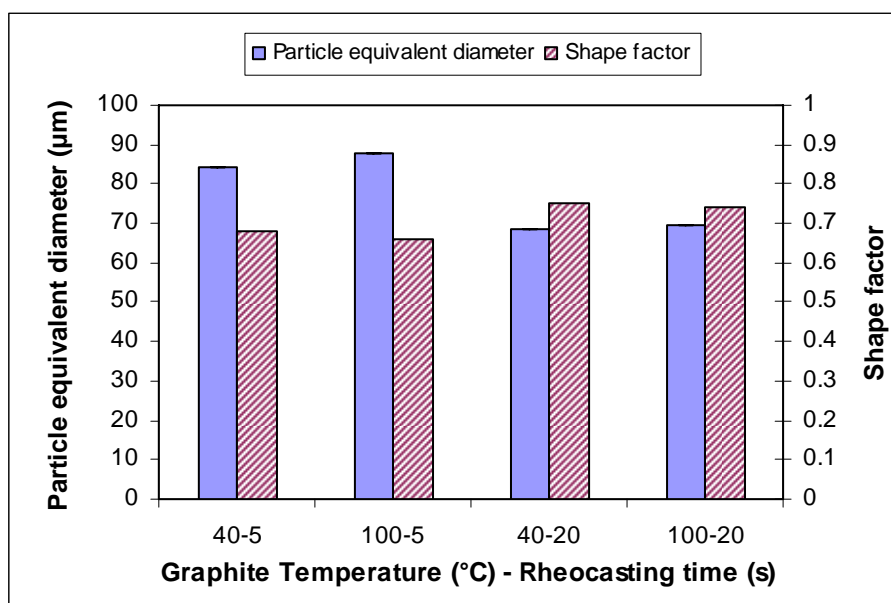
(ข)

รูปที่ 3.22 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ภายใต้เวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊สที่เวลา 20 วินาที ร่วมกับอุณหภูมิน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ที่ 620°C แต่ใช้อุณหภูมิของแท่งกราไฟต์ก่อนการจุ่มลงไปใต้น้ำโลหะที่แตกต่างกัน

(ก) 40°C และ (ข) 100°C ตามลำดับ

ตารางที่ 3.9 สรุปผลของรูปร่าง ขนาด และค่าความกลมของเฟส α อะลูมิเนียมที่เกิดขึ้น ภายใต้เวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์ 5 และ 20 วินาที ร่วมกับอุณหภูมิน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ที่ 620°C แต่อุณหภูมิของแท่งกราไฟต์ก่อนการจุ่มลงไปน้ำโลหะที่ใช้แตกต่างกัน

Graphite temperature (°C)	Rheocasting temperature (°C)	Rheocasting time (s)	Primary α - Al morphology	Particle diameter of primary α - Al (μm)	Shape factor of primary α - Al
40	5	620	Globular + rosette-like	84.3	0.68
100	5	620	Globular + rosette-like	88.0	0.66
40	20	620	Globular	68.5	0.75
100	20	620	Globular	69.4	0.74

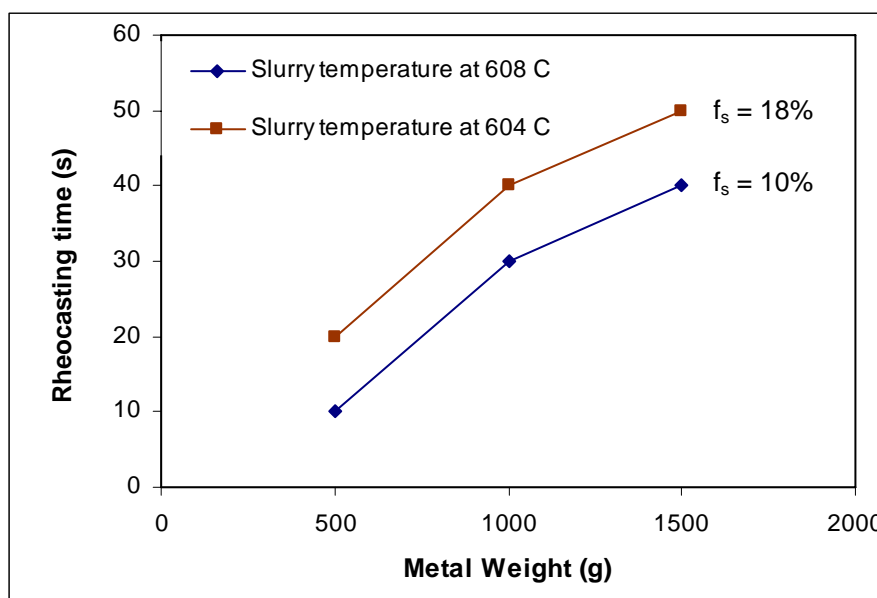


รูปที่ 3.23 ผลของอุณหภูมิแท่งกราไฟต์ก่อนการจุ่มลงไปน้ำโลหะที่มีต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และค่าความกลมของเฟส α อะลูมิเนียม ภายใต้เวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์ 5 และ 20 วินาที ร่วมกับอุณหภูมิน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ที่ 620°C

3.6 ผลของปริมาณน้ำโลหะ (Metal Weight) ที่ใช้ในกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งที่มีต่อเวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นพองแก๊สและโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356

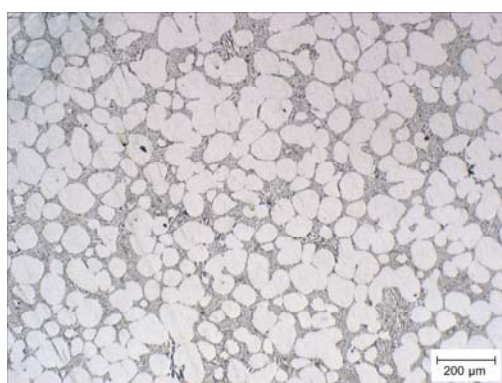
ผลจากการทดลอง เมื่อเรากำหนดอุณหภูมิน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ให้อยู่ที่ 620°C และทำการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นพองแก๊สจนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำโลหะลดลงมาถึงอุณหภูมิที่กำหนดไว้ คือ 608°C และ 604°C ซึ่งที่อุณหภูมินี้จะมีปริมาณสัดส่วนของแข็งเกิดขึ้นประมาณ 10% และ 18% ตามลำดับ จากนั้นจึงทำการตรวจสอบว่าต้องใช้เวลากี่วินาทีในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นพองแก๊ส จึงจะทำให้อุณหภูมิน้ำโลหะลดลงมาถึงอุณหภูมิต่างที่กำหนดไว้

ซึ่งผลจากการทดลองพบว่า ที่ปริมาณน้ำโลหะ 500 กรัม เมื่อกำหนดปริมาณสัดส่วนของแข็งที่ต้องการให้อยู่ที่ประมาณ 10% และ 18% ต้องใช้เวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์เป็นเวลา 10 และ 20 วินาที ตามลำดับ ที่ปริมาณน้ำโลหะ 1,000 กรัม เมื่อกำหนดปริมาณสัดส่วนของแข็งที่ต้องการให้อยู่ที่ประมาณ 10% และ 18% ต้องใช้เวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์เป็นเวลา 30 และ 40 วินาที ตามลำดับ และที่ปริมาณน้ำโลหะ 1,500 กรัม เมื่อกำหนดปริมาณสัดส่วนของแข็งที่ต้องการให้อยู่ที่ประมาณ 10% และ 18% ต้องใช้เวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์เป็นเวลา 40 และ 50 วินาที ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.24

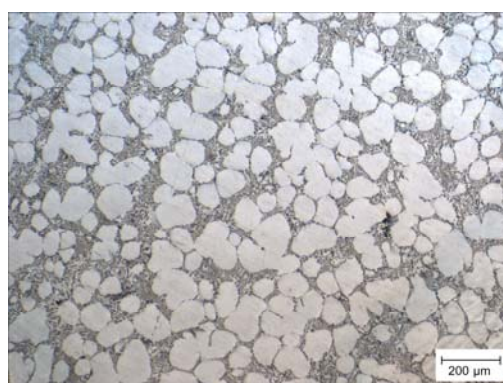


รูปที่ 3.24 ผลของปริมาณน้ำโลหะที่ใช้ในกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งที่มีต่อเวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นพองแก๊ส

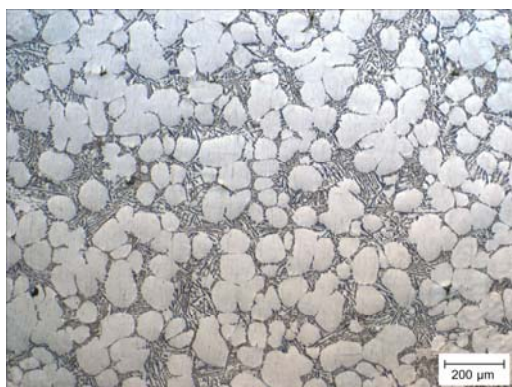
ซึ่งอธิบายได้ว่าเมื่อกำหนดอุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์เท่ากัน และทำการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊สจนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำโลหะลดลงมาถึงอุณหภูมิที่กำหนดไว้คือ 608°C และ 604°C ซึ่งที่อุณหภูมินี้จะมีปริมาณสัดส่วนของแข็งเกิดขึ้นประมาณ 10% และ 18% ตามลำดับ แต่ปริมาณของน้ำโลหะที่ใช้ในแต่ละครั้งไม่เท่ากัน ส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊สในแต่ละครั้งไม่เท่ากันด้วย กล่าวคือเมื่อเราใช้น้ำโลหะในปริมาณที่มากกว่าแท่งกราไฟต์จะมีความสามารถในการดูดซับความร้อนออกจากน้ำโลหะได้ลดลง ส่งผลให้ต้องใช้เวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์นานขึ้นเพื่อที่จะทำให้อุณหภูมิของน้ำโลหะลดลงมาถึงอุณหภูมิที่กำหนดไว้ และทำให้ได้สัดส่วนของแข็งในปริมาณที่ต้องการ ที่จะนำไปใช้ในการขึ้นรูปต่อไป



(ก)



(ข)



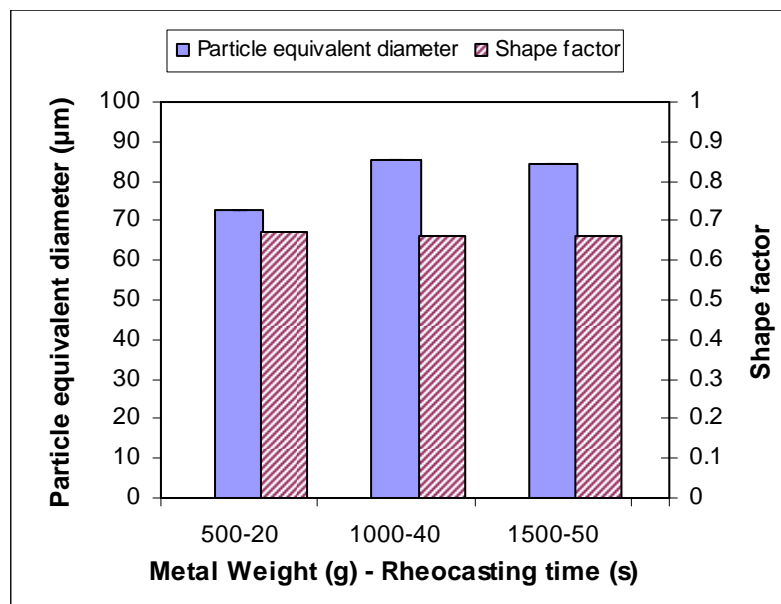
(ค)

รูปที่ 3.25 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ภายใต้อุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ที่ 620°C แต่ใช้ปริมาณน้ำโลหะและเวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊สที่แตกต่างกัน (ก) 500 กรัม – 20 วินาที (ข) 1,000 กรัม – 40 วินาที และ (ค) 1,000 กรัม – 50 วินาทีตามลำดับ

ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ภายใต้อุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ที่ 620°C แต่ใช้ปริมาณน้ำโลหะและเวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊สที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่อเราใช้น้ำโลหะในปริมาณที่มากขึ้นคือ 500 กรัม 1000 กรัม และ 1500 กรัม แท่งกราไฟต์จะมีความสามารถในการดูดระบายความร้อนออกจากน้ำโลหะได้ลดลง ส่งผลให้ต้องใช้เวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์นานขึ้นเป็นเวลา 20 วินาที 40 วินาที และ 50 วินาที ตามลำดับ เพื่อที่จะทำให้อุณหภูมิของน้ำโลหะลดลงมาจนถึงอุณหภูมิที่กำหนดไว้คือ 604°C ซึ่งที่อุณหภูมินี้จะมีปริมาณสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นเกิดขึ้นประมาณ 18% และโครงสร้างที่ได้ก็จะมีลักษณะคล้ายกัน โดยจะปรากฏเฟส α อะลูมิเนียมที่มีลักษณะเป็นแบบก้อนกลมกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 3.25 และเมื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างเชิงปริมาณพบว่า เฟสของ α อะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 72.6 μm 85.4 μm และ 84.3 μm ส่วนค่าความกลมเฉลี่ยจะอยู่ที่ 0.67 0.66 และ 0.66 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.10 และรูปที่ 3.26

ตารางที่ 3.10 สรุปผลของรูปร่าง ขนาด และค่าความกลมของเฟส α อะลูมิเนียมที่เกิดขึ้น ภายใต้อุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ที่ 620°C แต่ใช้ปริมาณน้ำโลหะ และเวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊สที่แตกต่างกัน

Metal Weight (g)	Rheocasting temperature (°C)	Rheocasting time (s)	Primary α - Al morphology	Particle diameter of primary α - Al (μm)	Shape factor of primary α - Al
500	620	20	Globular	72.6	0.67
1000	620	40	Globular + rosette-like	85.4	0.66
1500	620	50	Globular + rosette-like	84.3	0.66



รูปที่ 3.26 ผลของปริมาณน้ำโลหะที่มีต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและค่าความกลมของเฟส α อะลูมิเนียม ภายใต้อุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราฟไฟต์ที่ 620°C แต่ใช้ปริมาณน้ำโลหะ และเวลาในการจุ่มแท่งกราฟไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊สที่แตกต่างกัน

3.7 ผลของการประยุกต์ใช้ระบบผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยการพ่นฟองแก๊สขณะแข็งตัว (GISS Process) ร่วมกับกระบวนการหล่อแบบไดคาสติง (Die Casting)

ทำการหล่อขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่าง โดยใช้กระบวนการฉีดด้วยความดันสูงแบบวิธีการปกติที่ใช้ในการผลิตปัจจุบันซึ่งใช้อะลูมิเนียมหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 660 - 680°C เปรียบเทียบกับการฉีดอะลูมิเนียมในสภาวะกึ่งของแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่า 610°C สำหรับอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 (สัดส่วนของแข็งประมาณ 7-10%) ดังแสดงในรูปที่ 3.27 และรูปที่ 3.28

นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองฉีดอะลูมิเนียมในสภาวะกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียม เกรด ADC10 ADC12 LM6 A5052 A6061 และ A7075 เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสามารถของการฉีดขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็ง



รูปที่ 3.27 แสดงการฉีดขึ้นรูปงานตัวอย่างจากอุตสาหกรรมด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็ง

3.7.1 ผลของการฉีดขึ้นงานตัวอย่างจากอุตสาหกรรมด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็ง

จากการทดลองฉีดขึ้นงานตัวอย่างด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็ง พบว่ากระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งแบบนี้ (Gas Induced Semi-Solid, GISS Process) สามารถผลิตขึ้นงานอะลูมิเนียมได้หลากหลายเกรด ทั้งในกลุ่มของ Cast Alloys และ Wrought Alloys ดังแสดงในรูปที่ 3.28 ถึงรูปที่ 3.34



รูปที่ 3.28 แสดงขึ้นงานของอะลูมิเนียมเกรด A356 ที่ฉีดขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็ง



รูปที่ 3.29 แสดงขึ้นงานของอะลูมิเนียมเกรด ADC10 ที่ฉีดขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็ง



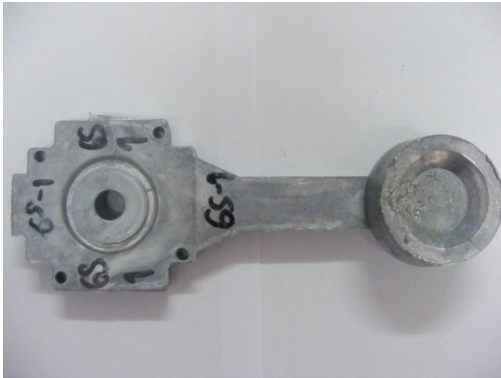
รูปที่ 3.30 แสดงขึ้นงานของอะลูมิเนียมเกรด ADC12 ที่ฉีดขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็ง



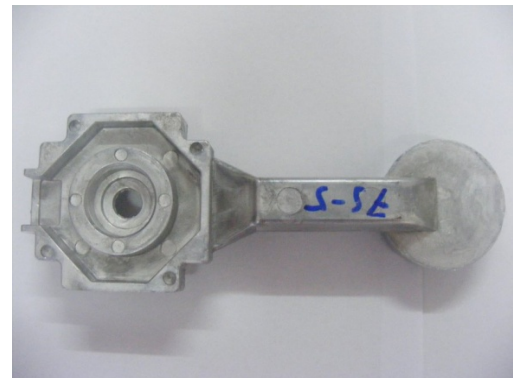
รูปที่ 3.31 แสดงชิ้นงานของอะลูมิเนียมเกรด LM6 ที่ผลิตขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็ง



รูปที่ 3.32 แสดงชิ้นงานของอะลูมิเนียมเกรด A5052 ที่ผลิตขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็ง



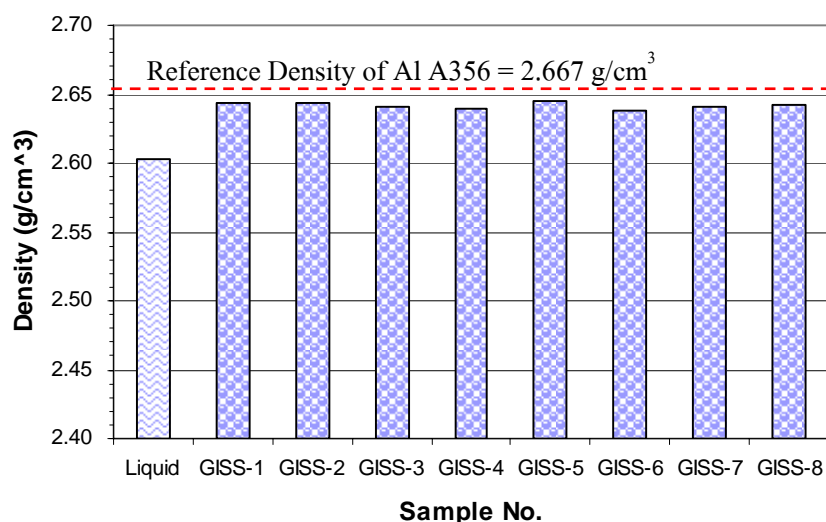
รูปที่ 3.33 แสดงชิ้นงานของอะลูมิเนียมเกรด A6061 ที่ผลิตขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็ง



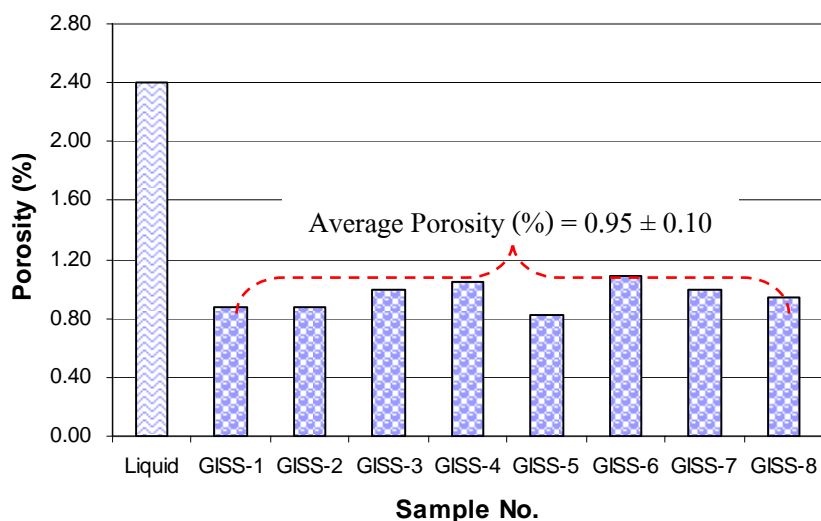
รูปที่ 3.34 แสดงชิ้นงานของอะลูมิเนียมเกรด A7075 ที่ผลิตขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็ง

3.7.2 ผลการทดสอบความหนาแน่นและเปอร์เซ็นต์โพรงอากาศของอะลูมิเนียมเกรด A356

จากการคำนวณหาความหนาแน่นของชิ้นงานที่ผลิตขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็งเปรียบเทียบกับความหนาแน่นอ้างอิง (Reference Density) ของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.667 g/cm^3 และความหนาแน่นของชิ้นงานที่ผลิตขึ้นรูปด้วยน้ำโลหะแบบปกติ ดังในรูปที่ 3.35 และรูปที่ 3.36 แสดงเปอร์เซ็นต์รูพรุนของชิ้นงานอะลูมิเนียมเกรด A356 ซึ่งผลที่ได้พบว่าการผลิตขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็ง ทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นสูงกว่าและมีเปอร์เซ็นต์โพรงอากาศภายในชิ้นงานที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตขึ้นรูปด้วยน้ำโลหะแบบปกติ



รูปที่ 3.35 แสดงความหนาแน่นของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด A356



รูปที่ 3.36 แสดงเปอร์เซ็นต์โพรงอากาศของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด A356

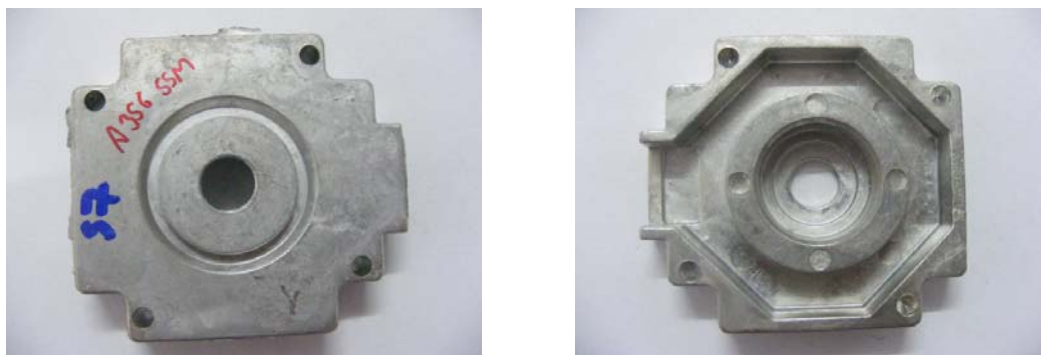
3.7.3 การทดสอบ Blister ที่เกิดขึ้นของชิ้นงานตัวอย่างที่ผลิตได้

ในการทดสอบ Blister ที่เกิดขึ้น ทำได้โดยการนำชิ้นงานไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 520°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่าชิ้นงานที่ผลิตขึ้นรูปด้วยน้ำโลหะแบบปกติ เมื่อสังเกตที่ผิวของชิ้นงานจะพบมีจุดพอง (Blister) เกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ดังแสดงในรูปที่ 3.37 เนื่องจากชิ้นงานมีโพรงอากาศที่อยู่บริเวณผิวและภายในเนื้อของชิ้นงานเป็นจำนวนมาก ดังนั้นเมื่อชิ้นงานได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงจึงทำให้เนื้อชิ้นงานขยายตัวเกิดเป็นจุดพองและทำให้ผิวแตกเป็นสะเก็ดได้ นั่นจึงเป็นเหตุผลสำคัญที่ทำให้ชิ้นงานที่ผลิตขึ้นรูปด้วยน้ำโลหะแบบปกติไม่สามารถนำไปเพิ่มความแข็งแรงโดยการอบชุบทางความร้อน (Heat Treatment) หรือใช้ในงานเชื่อมได้



รูปที่ 3.37 แสดงผิวของชิ้นงานที่ผ่านการหล่อผลิตขึ้นรูปด้วยน้ำโลหะแบบธรรมดา ภายหลังจากการนำชิ้นงานไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 520°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

สำหรับชิ้นงานที่ผลิตขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็ง พบว่าเมื่อสังเกตที่ผิวของชิ้นงานจะมีจุดพอง (Blister) เกิดขึ้นน้อยมากหรือไม่เกิดขึ้นเลย ดังแสดงในรูปที่ 3.38 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากว่าชิ้นงานที่ผลิตขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็งมีความหนาแน่นสูงกว่าและมีเปอร์เซ็นต์รูพรุนภายในชิ้นงานที่ต่ำกว่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตขึ้นรูปด้วยน้ำโลหะแบบปกติ



รูปที่ 3.38 แสดงผิวของชิ้นงานที่ผ่านการหล่อฉีดขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็ง ภายหลังจากการนำชิ้นงานไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 520°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

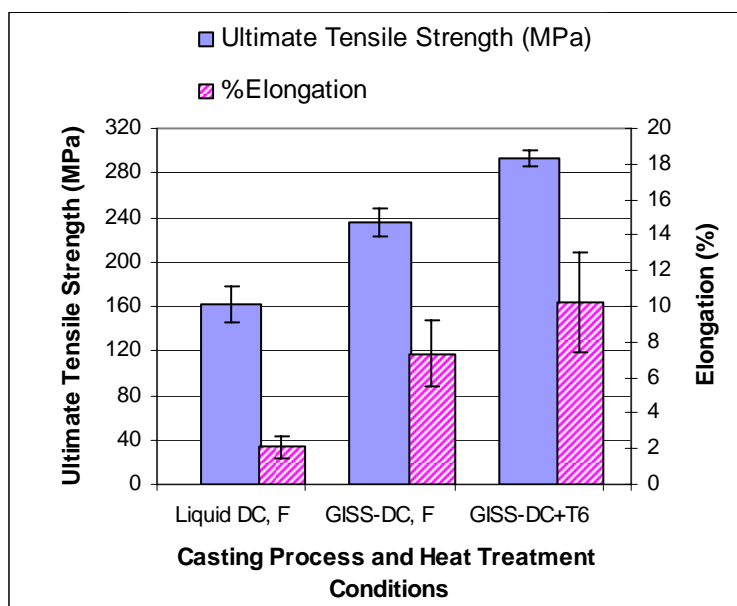
3.7.4 การทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานตัวอย่างที่ผลิตได้ด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็ง

ชิ้นงานตัวอย่างที่ผลิตได้จะถูกนำมาตัดและกัด (Milling) เป็นชิ้นงานทดสอบแรงดึง เพื่อหาค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength, UTS) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Elongation, %EI) ซึ่งผลการทดสอบสมบัติทางกลด้วยการทดสอบแรงดึง พบว่าชิ้นงานโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ที่ฉีดขึ้นรูปด้วยน้ำโลหะแบบปกติ (As-Cast) จะมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (UTS) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%EI) เฉลี่ยเท่ากับ 162.1 ± 16.6 MPa และ $2.08 \pm 0.65\%$ ตามลำดับ ส่วนชิ้นงานที่ฉีดขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 (As-Cast) จะมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (UTS) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%EI) เฉลี่ยเท่ากับ 235.3 ± 13.1 MPa และ $7.35 \pm 1.83\%$ ตามลำดับ

นอกจากนี้เมื่อนำชิ้นงานที่ฉีดขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ไปทำการอบชุบด้วยกระบวนการทางความร้อนในสถานะ T6 (Heat Treatment, T6) โดยทำ Solution Treated ที่อุณหภูมิ 540°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วจึงลดอุณหภูมิของชิ้นงานลงอย่างรวดเร็วด้วยการชุบเย็นในน้ำ หลังจากนั้นจึงทำ Artificially Aged ที่อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง พบว่าชิ้นงานจะมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (UTS) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%EI) เพิ่มขึ้นอีก โดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 293.3 ± 7.7 MPa และ $10.21 \pm 2.8\%$ ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.11 และรูปที่ 3.39

ตารางที่ 3.11 แสดงค่า UTS และค่า %EI ที่ได้จากการทดสอบแรงดึง

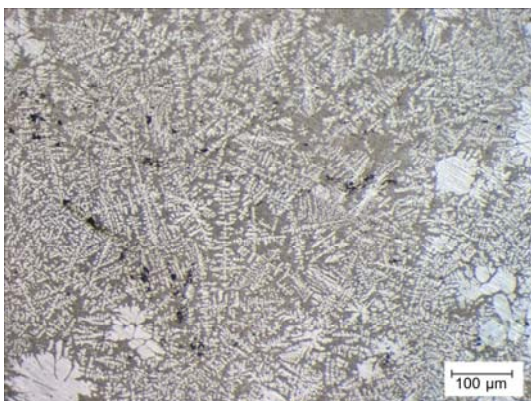
Processing conditions	Heat Treat	UTS (MPa)	Elongation (%)
Liquid DC	As-Cast (F)	162.1 ± 16.6	2.08 ± 0.65
GISS-DC	As-Cast (F)	235.3 ± 13.1	7.35 ± 1.83
GISS-DC	T6	293.3 ± 7.7	10.21 ± 2.80



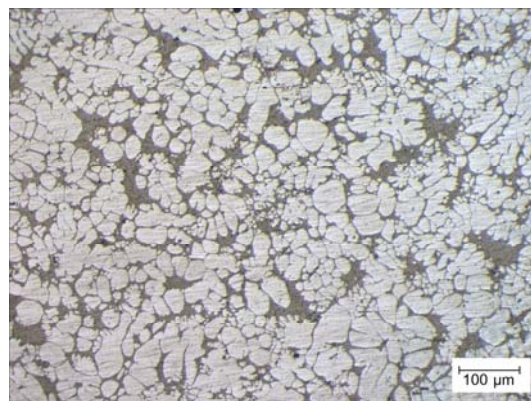
รูปที่ 3.39 แสดงการเปรียบเทียบค่า UTS และค่า %EI ที่ได้จากการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานตัวอย่างของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ที่ผลิตได้

3.7.5 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่างที่ผลิตได้ด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็ง

ชิ้นงานที่ฉีดขึ้นรูปด้วยน้ำโลหะแบบปกติ (Liquid Die Casting) ของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ADC10 และ ADC12 เมื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคจะพบว่า โครงสร้างที่ได้มีลักษณะเป็นแบบกิ่งไม้ (Dendritic) และเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ฉีดขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็ง (GISS Die Casting) พบว่าชิ้นงานจะมีลักษณะโครงสร้างที่ไม่เป็นเดนไดรต์ นั่นก็คือมีโครงสร้างเป็นก้อนกลมที่มีความสม่ำเสมอและกระจายอยู่ทั่วทั้งชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.40 3.41 และ 3.42



(ก)

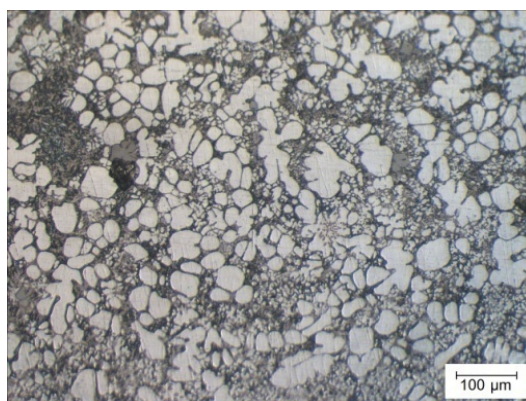


(ข)

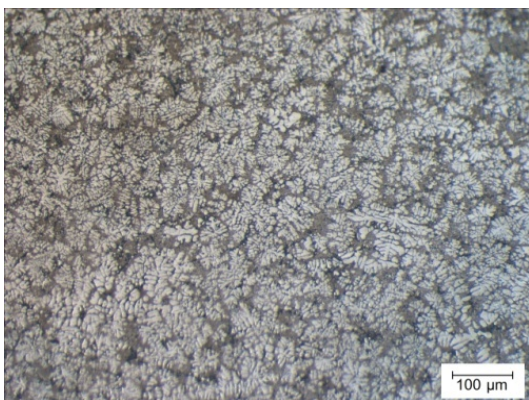
รูปที่ 3.40 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด A356

(ก) ผ่านการหล่อฉีดขึ้นรูปด้วยน้ำโลหะแบบปกติ (Liquid Die Casting)

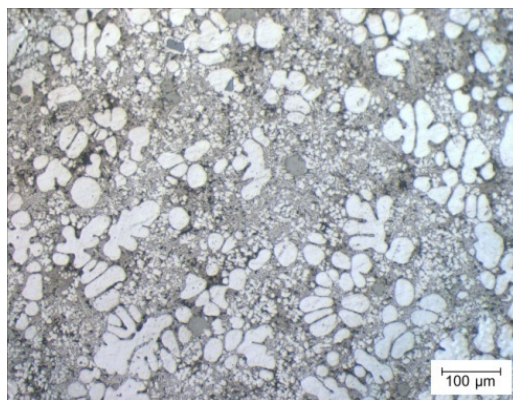
(ข) ผ่านการหล่อฉีดขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็ง (GISS Die Casting)



รูปที่ 3.41 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC10 (GISS Die Casting)



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.42 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12

(ก) ผ่านการหล่อฉีดขึ้นรูปด้วยน้ำโลหะแบบปกติ (Liquid Die Casting)

(ข) ผ่านการหล่อฉีดขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็ง (GISS Die Casting)

บทที่ 4

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

4.1 บทสรุป

ผลจากการพัฒนาระบบและสร้างเครื่องต้นแบบที่ใช้ในการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยการพ่นฟองแก๊สในระหว่างการแข็งตัวของน้ำโลหะ (GISS Process) แสดงให้เห็นว่า เครื่องต้นแบบที่ใช้ในการผลิตโลหะกึ่งของแข็งนี้สามารถผลิตโลหะกึ่งของแข็งได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับเครื่องหล่อฉีดไดคาสติงในระดับอุตสาหกรรมได้ และการศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกระบวนการ GISS สามารถสรุปได้ดังนี้

4.1.1 ผลของอุณหภูมิน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์และเวลาที่จุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊ส

ผลจากการศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งในครั้งนี้ ทำให้ได้รับข้อมูลที่สำคัญในกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง เพื่อนำข้อมูลเหล่านี้ไปใช้ในการออกแบบและการพัฒนาระบบการทำงานของกระบวนการ GISS ให้สามารถควบคุมเวลาที่ใช้ในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊สที่เหมาะสมกับอุณหภูมิของน้ำโลหะที่ใช้ก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ในแต่ละครั้ง เพื่อให้ได้ปริมาณสัดส่วนของแข็งตามที่ต้องการในกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง และไม่ต้องเสียเวลาในการรอให้อุณหภูมิของน้ำโลหะที่ตกมาจากเตาหลอมต้องลดอุณหภูมิลงมาถึง 620°C จึงจะเริ่มจุ่มแท่งกราไฟต์ แต่จะสามารถจุ่มแท่งกราไฟต์ลงไปในน้ำโลหะที่อุณหภูมิใดก็ได้ ด้วยเวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์ที่เหมาะสมกับอุณหภูมิของน้ำโลหะในขณะนั้น ซึ่งก็จะทำให้สามารถผลิตโลหะกึ่งของแข็งให้มีปริมาณสัดส่วนของแข็งตามที่กำหนดได้ ผลจากการศึกษาในหัวข้อดังกล่าวสามารถสรุปได้ดังนี้

1. อุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ที่ต่ำลงและเวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊สที่นานขึ้น ส่งผลให้อัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะในระหว่างกระบวนการจุ่มแท่งกราไฟต์ลดต่ำลง ทำให้เกิดสัดส่วนของแข็งเพิ่มมากขึ้น
2. โครงสร้างจุลภาคของเฟส α อะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นภายใต้อุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ที่ต่ำลงและเวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊สที่นานขึ้น จะทำให้เฟส α อะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นแบบก้อนกลมเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยัง

ทำให้เฟส α อะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นมีขนาดเฉลี่ยที่เล็กลงและมีค่าความกลมเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้นอีกด้วย

3. ผลการวิจัยในครั้งนี้สามารถนำไปใช้เป็นส่วนหนึ่งในการออกแบบเครื่องผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีแบบ GISS ให้มีระบบการทำงานที่เป็นแบบอัตโนมัติ ซึ่งผู้ใช้งานจะกำหนดปริมาณสัดส่วนของแข็งที่เหมาะสมกับวิธีการหล่อแบบต่างๆ และเมื่อตักน้ำโลหะที่ผ่านการวัดอุณหภูมิก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์แล้ว ระบบของเครื่อง GISS ก็จะสามารถแสดงเวลาที่ใช้ในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊สเป็นเวลาตามอุณหภูมิของน้ำโลหะที่วัดได้ในแต่ละครั้ง เพื่อให้ได้ปริมาณสัดส่วนของแข็งตามที่กำหนดไว้

4.1.2 ผลของอัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะ

อัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะที่เหมาะสมในการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกระบวนการ GISS มีความสำคัญมากในการออกแบบระบบผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกระบวนการ GISS ว่าจะต้องกำหนดระยะเวลาความยาวของแท่งกราไฟต์ที่จะใช้จุ่มลงไปใต้น้ำโลหะให้อยู่ในระดับความลึกที่เหมาะสม เพื่อให้ได้อัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด และเพื่อให้ได้ปริมาณสัดส่วนของแข็งและโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมตามที่ต้องการ ซึ่งผลจากการศึกษาในหัวข้อดังกล่าวสามารถสรุปได้ดังนี้

1. อัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะที่เพิ่มมากขึ้น จะทำให้เกิดสัดส่วนของแข็งเพิ่มมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์และเวลาที่ใช้ในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊สเท่ากัน
2. โครงสร้างจุลภาคของเฟส α อะลูมิเนียมที่เกิดขึ้น ภายใต้อุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์และเวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊สที่เท่ากัน เมื่ออัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะเพิ่มมากขึ้น จะทำให้เฟส α อะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นแบบก้อนกลมเพิ่มมากขึ้น ทำให้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่เล็กลงและมีค่าความกลมเฉลี่ยที่เพิ่มสูงขึ้นอีกด้วย

4.1.3 ผลของอุณหภูมิแท่งกราไฟต์ก่อนการจุ่มลงไปใต้น้ำโลหะ

เมื่อกำหนดให้อุณหภูมิของแท่งกราไฟต์ก่อนการจุ่มลงไปใต้น้ำโลหะอยู่ที่ 40 และ 100°C ภายใต้อุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนจุ่มแท่งกราไฟต์ เวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อพ่นฟองแก๊สและอัตราส่วนพื้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ต่อปริมาตรของน้ำโลหะที่เท่ากัน จะทำให้เกิดโครงสร้างของ

เฟส α อะลูมิเนียมที่มีลักษณะรูปร่างคล้ายกัน โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยและค่าความกลมเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกันมาก

4.1.4 ผลของปริมาณน้ำโลหะที่ใช้ในกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง

ปริมาณน้ำโลหะที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ต้องใช้เวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์นานขึ้น จึงจะทำให้อุณหภูมิของน้ำโลหะลดลงมาจนถึงอุณหภูมิที่กำหนดไว้ และทำให้ได้สัดส่วนของแข็งในปริมาณที่ต้องการ

4.1.5 ผลของการประยุกต์ใช้ระบบผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยการฟั่นฟองแก๊สขณะแข็งตัวร่วมกับกระบวนการหล่อแบบไดคาสติง

ผลจากการทำวิจัยในครั้งนี้แสดงให้เห็นว่า เครื่องต้นแบบที่ใช้ในการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง (GISS Version 1.0) นี้สามารถผลิตโลหะกึ่งของแข็งได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับเครื่องหล่อฉีดไดคาสติงในระดับอุตสาหกรรมได้ ซึ่งผลจากการศึกษาในหัวข้อดังกล่าวสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การฉีดขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็ง ทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นสูงกว่า และมีเปอร์เซ็นต์โพรงอากาศภายในชิ้นงานที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการฉีดขึ้นรูปด้วยน้ำโลหะแบบปกติ
2. ชิ้นงานที่ฉีดขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็ง สามารถนำไปเพิ่มความแข็งแรงด้วยการอบชุบทางความร้อน (Heat Treatment) ได้ โดยไม่ทำให้ชิ้นงานเกิดจุดพอง (Blister) ขึ้นที่ผิวของชิ้นงาน
3. การฉีดขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็ง ทำให้ชิ้นงานมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (UTS) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%EI) เพิ่มสูงขึ้นกว่าการฉีดขึ้นรูปด้วยน้ำโลหะแบบปกติ
4. ชิ้นงานที่ฉีดขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็ง จะทำให้ชิ้นงานมีลักษณะโครงสร้างที่ไม่เป็นแบบเดนไดรต์ นั่นก็คือมีโครงสร้างเป็นแบบก้อนกลมที่มีความสม่ำเสมอและกระจายอยู่ทั่วทั้งชิ้นงาน

4.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในขณะที่ทำการหลอมและหล่อโลหะควรสวมใส่อุปกรณ์ป้องกันน้ำโลหะและความร้อนทุกครั้งปฏิบัติงาน ได้แก่ การสวมใส่ถุงมือกันความร้อน หน้ากากป้องกันน้ำโลหะและความร้อน เป็นต้น
2. สิ่งที่มีความสำคัญมากสำหรับการหลอมโลหะคือ การมีอุปกรณ์และเครื่องมือในการหลอมที่ดี ใช้เทคนิคการหลอมที่ถูกต้อง องค์ประกอบทั้งสองนี้จะมีผลทำให้ชิ้นงานที่ได้มีความสมบูรณ์ในทุกด้าน
3. ในการหลอมโลหะอะลูมิเนียมผสมควรหลีกเลี่ยงการหลอมน้ำโลหะที่ระดับอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิหลอมละลายมาก หลีกเลี่ยงการกวนน้ำโลหะ พร้อมทั้งหลีกเลี่ยงการปล่อยเข้าน้ำโลหะที่ระดับอุณหภูมิดังกล่าวเป็นระยะเวลายาวนานเกินความจำเป็น
4. เมื่อสิ้นสุดการหลอมในแต่ละวัน ควรทำความสะอาดภายในเตาด้วยท่อนไม้ ในขณะที่ตัวเตายังคงมีอุณหภูมิสูงอยู่ โดยทำการขูด dross และเศษโลหะที่เกาะติดผิวเตาออกไป ซึ่งจะช่วยป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายกับตัวเตา อย่างไรก็ตามการขูดเตาควรจะทำอย่างระมัดระวัง เนื่องจากการทำความสะอาดเตาควรจะทำในขณะที่เตายังร้อนแดงจัดอยู่ การกระทบกระเทือนอย่างรุนแรงอาจทำให้เตาแตกเสียหายได้

บรรณานุกรม

- DasGupta R. 2004. *Proceedings of the 8th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*, Limassol, Cyprus, September 21–23.
- de Figueredo A. 2001. *Ed. Science and Technology of Semi-Solid Metal Processing*, The North American Die Casting Association.
- Fan, Z., Fang, X., and Ji, S. 2005. Microstructure and mechanical properties of rheo-diecast (RDC) aluminium alloys. *Materials Science and Engineering A* 412: 298-306.
- Flemings, M.C., and Johnson, W.L. 2002. High Viscosity Liquid and Semi-Solid Metal Casting: Processes and Products, plenary lecture, *World Foundry Conference*, KynogJu, Korea, Oct. 20-24.
- Govender, G., Ivanchev, L., Jahaheeah, N., and Bean, R. 2006. *Solid State Phenomena* Vols. 116-117: 501-504.
- GUO Hong-mim and YANG Xiang-jie. 2007. Preparation of semi-solid containing fine and globular particles for wrought aluminum alloy 2024. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* Vols. 17: 799-804.
- Hong, CP., and Kim, JM. 2006. *Solid State Phenomena* Vols. 116-117: 44.
- Ivanchev, L., Wilkins, D., and Govender, G. 2004. Method and Apparatus for Rheo-Processing of Semi-Solid Metal Alloys. *Proceeding of the 8th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*, Limassol, Cyprus, September 21–23.
- Ji, S., Fan, Z., and Bevis, M.J. 2001. Semi-solid processing of engineering alloys by a twin-screw rheomoulding process. *Materials Science and Engineering A*: 210-217.
- Jian, X., Xu, X., Meek, TT., and Han Q. 2005. *Materials Letters* 59: 190.
- Jorstad, J., Thieman, M., and Kamm, R. 2004. Fundamental Requirements for Slurry Generation in the Sub Liquidus Casting Process and the Economics of SLC™ Processing. *Proceeding of the 8th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*, Limassol, Cyprus, September 21–23.
- Kaneuchi, T., Shibata, R., and Ozawa, M. 2002. *Proceedings of the 7th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*, Tsukuba, Japan, September 2002.

- Kopper, A., Donahue, R., Olson, D., and Midson, S. 2005. Case Studies of Large Components Produced by High-Pressure Die Casting and Slurry-on-Demand Casting. *SAE 2005 World Congress & Exhibition*, Detroit, MI, USA, April 11-14.
- Kuroki, K., Suenaga, T., Tanikawa, H., Masaki, T., Suzuki, A., Umemoto, T., and Yamazaki, M. 2004. Establishment of a Manufacturing Technology for the High Strength Aluminum Cylinder Block in Diesel Engines Applying a Rheocasting Process. *Proceeding of the 8th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*, Limassol, Cyprus, September 21–23.
- Li, D.N., Luo, J.R., Wu, S.S., Xiao, Z.H., Mao, Y.W., Song, X.J., and Wu, G.Z. 2002. Study on the semi-solid rheocasting of magnesium alloy by mechanical stirring. *Journal of Materials Processing Technology* Vols. 129: 431-434.
- Martinez, R.A. 2004. Formation and Processing of Rheocast Microstructure. Ph.D. Thesis, Professor M.C. Flemings advisor, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA.
- Martinez, R.A., Karma, A., and Flemings, M.C. 2006. Spheroidal Particle Stability in Semi-Solid Processing. *Metallurgical and Materials Transactions A* Vol. 37A (September): 2807-2815.
- Mehrabian, R., and Flemings, M.C. 1972. *Transaction of AFS*, 80: 173.
- Nafisi, S., and Ghomashchi, R. 2006. Effect of stirring on solidification pattern and alloy distribution during semi-solid metal casting. *Materials Science and Engineering A* 437: 388-395.
- Oh, S.W., Bae, J.W., and Kang, C.G. 2007. Effect of electromagnetic stirring conditions on grain size characteristics of wrought aluminum for rheo-forging. *Journal of Materials Engineering and Performance* Vol. 17(1) (February): 57-63.
- Spencer, D.B. 1971. Rheology of Liquid-Solid Mixtures of Lead Tin. Ph.D. Thesis, Professor M.C. Flemings advisor, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, (June).
- Wannasin, J., Martinez, R.A., and Flemings, M.C. 2006. A Novel Technique to Produce Metal Slurries for Semi-Solid Metal Processing. *Solid State Phenomena* Vols. 116-117: 366-369.

- Wannasin, J. 2006. Semi-Solid Die Casting Technology. *Proceeding of the Third Thai Foundry Conference*, Bitec Bangna, Bangkok, Thailand, November 23.
- Wannasin, J., Schwam, D., and Wallace, J.F. 2007. Evaluation of methods for metal cleanliness assessment in die casting. *Journal of Materials Processing Technology* Vols. 191: 242-246.
- Xia, K., and Tausig, G. 1998. *Materials Science and Engineering*, 246A.
- Yurko J.A., Martinez, R.A., and Flemings, M.C. 2004. SSRTM: The Spheroidal Growth Route to Semi-Solid Forming. *Proceeding of the 8th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*, Limassol, Cyprus, September 21–23.
- Yurko, J.A. 2005. Private Communication.
- Thai Patent Application. “Method to Prepare Metal Structure Suitable for Semi-Solid Metal Processing.” by Wannasin J, Martinez RA, and Flemings MC. Filed in 2006.
- US Provisional Patent. “Method to Prepare Metal Structure Suitable for Semi-Solid Metal Processing.” by Wannasin J, Martinez RA, and Flemings MC. Filed in 2006.
- UBE Machinery, Inc. <http://www.ubemachinery.com/diecasting.html>

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

**ลักษณะเฉพาะของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356-T6 ในงานหล่อแบบพิมพ์ถาวร
(Permanent Mold Casting)**

ตารางที่ ก.1 แสดงสมบัติต่าง ๆ ของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356-T6 ในงานหล่อแบบพิมพ์ถาวร

Description	Unit	Value
Physical Properties		
Density	g/cm ³	2.68
Mechanical Properties		
Hardness (500g load; 10 mm ball)	Brinell	65.0 - 95.0
Ultimate Tensile Strength	MPa	≥ 228
Tensile Yield Strength	MPa	≥ 152
Elongation at Break	%	≥ 3.00
Modulus of Elasticity	GPa	72.4
Compressive Yield Strength	MPa	185
Poisson Ratio	-	0.33
Fatigue Strength	MPa	90.0 (of Cycles 5.00e+8)
Thermal Properties		
Heat of Fusion	J/g	389
Specific Heat Capacity	J/g-°C	0.963
Thermal Conductivity	W/m-K	151
Melting Point Temperature	°C	557.2 – 612.8
Solidus Temperature	°C	557.2
Liquidus Temperature	°C	612.8
Processing Properties		
Melting Temperature	°C	667 – 816
Solution Temperature	°C	535 – 540.6
Aging Temperature	°C	152 – 157
Casting Temperature	°C	677 – 788

Description	Unit	Value
Components Properties		
Aluminum, Al	%	90.1 – 93.3
Copper, Cu	%	≤ 0.25
Iron, Fe	%	≤ 0.60
Magnesium, Mg	%	0.2 – 0.45
Manganese, Mn	%	≤ 0.35
Silicon, Si	%	6.5 – 7.5
Titanium, Ti	%	≤ 0.25
Zinc, Zn	%	≤ 0.35
Other, each	%	≤ 0.05
Other, total	%	≤ 0.15

(ที่มา: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatID=9934>)

ภาคผนวก ข.

ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
 ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110
Scientific Equipment Center, Prince of Songkla University
 Central Academic Administrator Bld. Hat-Yai Campus, Songkhla 90110 Tel.0 7428 6904-7 Fax.0 7421 2813

F-RES-0031/E Rev. 5 29/05/52

No. 2218/52 Page 1/2

TEST REPORT

Client Name and Address : Dr.Jessada Wannasin
 Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, PSU.

Test Request Form No.: 2369/52

Test item(s) received Date : August 31,2009

Test Request Date : August 31,2009

Analyst : Mr. Sutee Padungkul

Test performed Date : September 2,2009

Test Method Used : Refer to WI-RES-OES-001: Work Instruction of Optical Emission Spectrometer Operation

Test Equipment : Optical Emission Spectrometer (ARL 3460)

Test Technique: Spark Optical Emission Vacuum Spectrometer in Argon

Test Condition : Vacuum 25 μ m of mercury or below.
 Temperature 38 °C

Test item(s) description : Aluminium **Quantity :** 2 **Samples**

1. Primary alloy (AA236)
2. Secondary alloy (AA237)

Test Results :

Sample	Concentration (%)				
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg
Primary alloy	6.8559	0.0899	0.0382	0.0064	0.3807
Standard Deviation	0.0238	0.0023	0.0015	0.0001	0.0082
Primary alloy	Zn	Ti	Ni	Sr	
	0.0037	0.1221	0.0056	0.0272	
Standard Deviation	0.0001	0.0001	0.0001	0.0007	

Remark This Test report is valid only for the tested sample.

This test report shall not be reproduced except in full, without written approval of the Scientific Equipment Center.



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
 ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110
Scientific Equipment Center, Prince of Songkla University
 Central Academic Administrator Bld. Hat-Yai Campus, Songkhla 90110 Tel.0 7428 6904-7 Fax.0 7421 2813

F-RES-003I/E Rev. 5 29/05/52

No. 2218/52 Page 2/2

Sample	Concentration (%)				
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg
Secondary alloy	6.9024	0.4149	0.0471	0.0414	0.4222
Standard Deviation	0.0703	0.0179	0.0001	0.0007	0.0010
Secondary alloy	Zn	Ti	Cr	Ni	Pb
	0.0085	0.1023	0.004	0.0069	0.004
Standard Deviation	0.0001	0.0024	0.0001	0.0001	0.0001

- As shown as the detail document of each sample.

(Mrs. Roosanee Kulvijitra)

Inspector

Remark This Test report is valid only for the tested sample.

This test report shall not be reproduced except in full, without written approval of the Scientific Equipment Center.

2/9/2009 10:28:2 Sample: AA236 1
 Program: ALSICU Task: ALSICU

Run	Si4	Fe7	Cu9	Mn3	Mg1	Zn5	Ti4	Cr1
1>	6.86387	0.08955	0.04327	0.00652	0.37319	0.00523	0.12339	0.00221
2>	6.72763	0.08658	0.04064	0.00640	0.36679	0.00372	0.12416	0.00219
3>	6.88372	0.09041	0.04043	0.00648	0.38037	0.00401	0.12460	0.00212
4>	6.95331	0.08857	0.03682	0.00644	0.38104	0.00354	0.11843	0.00221
5>	6.93543	0.08625	0.03520	0.00643	0.37295	0.00331	0.12024	0.00212
Avg	6.87279	0.08827	0.03927	0.00645	0.37487	0.00396	0.12217	0.00217
Sd	0.08899	0.00182	0.00323	0.00005	0.00592	0.00076	0.00270	0.00005
Sd%	1.29482	2.06104	8.23297	0.70866	1.57936	19.06810	2.20685	2.17031

	Ni6	Pb6	Sn5	Sr	AL%
1>	0.00569	0.00054	(-0.00072	0.02820	92.4591
2>	0.00547	0.00032	(-0.00098	0.02671	92.6104
3>	0.00568	0.00033	(-0.00105	0.02868	92.4342
4>	0.00549	0.00016	(-0.00126	0.02750	92.3778
5>	0.00542	-0.00000	(-0.00134	0.02734	92.4067
Avg	0.00555	0.00027	(-0.00107	0.02769	92.4576
Sd	0.00012	0.00020	0.00025	0.00077	0.0906
Sd%	2.22184	75.11918	-22.89954	2.77086	0.0980

2/9/2009 10:32:28 Sample: AA236 2
 Program: ALSICU Task: ALSICU

Run	Si4	Fe7	Cu9	Mn3	Mg1	Zn5	Ti4	Cr1
1>	7.05813	0.09409	0.04047	0.00655	0.39201	0.00410	0.11756	0.00220
2>	6.86693	0.09623	0.03867	0.00653	0.38914	0.00383	0.12239	0.00223
3>	6.57865	0.08648	0.03593	0.00626	0.36023	0.00364	0.12664	0.00219
4>	6.71181	0.09090	0.03782	0.00647	0.38411	0.00379	0.12368	0.00214
5>	6.97986	0.09005	0.03257	0.00639	0.38062	0.00323	0.11987	0.00210
Avg	6.83908	0.09155	0.03709	0.00644	0.38122	0.00372	0.12203	0.00218
Sd	0.19532	0.00377	0.00301	0.00012	0.01253	0.00032	0.00349	0.00005
Sd%	2.85589	4.11516	8.11997	1.84894	3.28802	8.59450	2.86111	2.37987

	Ni6	Pb6	Sn5	Sr	AL%
1>	0.00598	0.00050	(-0.00086	0.02832	92.2509
2>	0.00585	0.00050	(-0.00117	0.02588	92.4430
3>	0.00539	0.00009	(-0.00124	0.02680	92.7689
4>	0.00568	0.00034	(-0.00113	0.02658	92.6078
5>	0.00531	(-0.00003	(-0.00162	0.02600	92.3557
Avg	0.00564	(0.00028	(-0.00120	0.02671	92.4853
Sd	0.00029	0.00024	0.00028	0.00097	0.2055
Sd%	5.10936	85.97941	-22.86718	3.64952	0.2222

2/9/2009 10:37:16 Sample: AA237 1
 Program: ALSICU Task: ALSICU

Run	Si4	Fe7	Cu9	Mn3	Mg1	Zn5	Ti4	Cr1
1>	6.78841	0.39740	0.05078	0.04024	0.43182	0.01006	0.10366	0.00386
2>	6.93145	0.45038	0.04897	0.04297	0.42624	0.00858	0.10014	0.00378
3>	6.88675	0.42828	0.04631	0.04185	0.42705	0.00814	0.10405	0.00385
4>	7.01380	0.41567	0.04286	0.04078	0.37105	0.00761	0.10048	0.00364
5>	7.13985	0.44574	0.04674	0.04331	0.45865	0.00828	0.09447	0.00378
Avg	6.95205	0.42749	0.04713	0.04183	0.42296	0.00854	0.10056	0.00378
Sd	0.13280	0.02181	0.00299	0.00133	0.03191	0.00093	0.00384	0.00009
Sd%	1.91030	5.10234	6.34699	3.18822	7.54552	10.84172	3.82015	2.38337

	Ni6	Pb6	Sn5	Sr	AL%
1>	0.00750	0.00383	(-0.00083	0.00245	92.1608
2>	0.00682	0.00356	(-0.00071	0.00231	91.9755
3>	0.00717	0.00376	(-0.00113	0.00224	92.0417
4>	0.00573	0.00254	(-0.00124	0.00204	91.9951
5>	0.00737	0.00431	(-0.00096	0.00237	91.7461
Avg	0.00692	0.00360	(-0.00097	0.00228	91.9838
Sd	0.00071	0.00065	0.00022	0.00016	0.1511
Sd%	10.28831	18.17500	-22.06643	6.87336	0.1643

2/9/2009 10:41:8 Sample: AA237 2
 Program: ALSICU Task: ALSICU

Run	Si4	Fe7	Cu9	Mn3	Mg1	Zn5	Ti4	Cr1
1>	6.96561	0.40661	0.05020	0.04097	0.40634	0.00892	0.10515	0.00370
2>	6.88484	0.43458	0.04688	0.04084	0.38850	0.00843	0.10665	0.00379
3>	6.71734	0.36962	0.04564	0.03949	0.41039	0.00805	0.10398	0.00370
4>	7.03305	0.41111	0.04549	0.04116	0.44215	0.00823	0.09960	0.00380
5>	6.66243	0.38919	0.04730	0.04063	0.46030	0.00870	0.10466	0.00374
Avg	6.85265	0.40222	0.04710	0.04062	0.42154	0.00847	0.10401	0.00375
Sd	0.15877	0.02438	0.00190	0.00066	0.02904	0.00035	0.00265	0.00005
Sd%	2.31690	6.06254	4.03621	1.61615	6.88955	4.14492	2.55122	1.25115

	Ni6	Pb6	Sn5	Sr	AL%
1>	0.00655	0.00342	(-0.00078	0.00223	92.0011
2>	0.00634	0.00309	(-0.00086	0.00210	92.0748
3>	0.00635	0.00321	(-0.00111	0.00206	92.2913
4>	0.00741	0.00397	(-0.00106	0.00222	91.9029
5>	0.00733	0.00384	(-0.00107	0.00218	92.2708
Avg	0.00679	0.00351	(-0.00098	0.00216	92.1082
Sd	0.00053	0.00039	0.00015	0.00008	0.1693
Sd%	7.82711	11.01697	-14.91548	3.56412	0.1838

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายรอมฎอน บุระพา	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5010120143	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2550

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

- ทุนผู้ช่วยนักวิจัย โครงการสมองไหลกลับ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)
- ทุนค่าเล่าเรียน ของนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- ทุนผู้ช่วยสอน ของนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

รอมฎอน บุระพา รังสิณี แคนยุกต์ และ เจษฎา วรรณสินธุ์. 2552. การพัฒนากระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง โดยการพ่นฟองแก๊สขณะแข็งตัวสำหรับอะลูมิเนียมผสมเกรด A356. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 7. วันที่ 21-22 พฤษภาคม. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

Burapa, R., Junudom, S., Canyook, R. and Wannasin, J. 2009. Rheocasting of Aluminum Alloys by the Gas Induced Semi-Solid (GISS) Process. The 3rd Thailand Metallurgy Conference, Bangkok, Thailand, October 26-27.