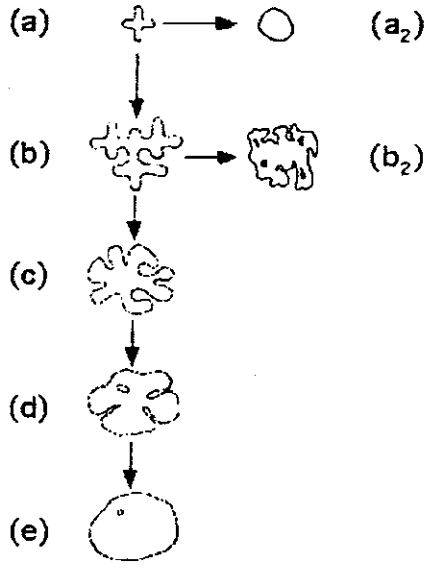
บทที่ 1
ทฤษฎี หลักการ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.1 ทฤษฎีและหลักการ

1.1.1 ขั้นตอนการเจริญเติบโต และการ Coarsening ของอนุภาคของแข็ง

แม้ว่าในขั้นตอนการเกิดอนุภาคของแข็งยังไม่เป็นที่สรุปแน่นอน แต่เป็นที่ยอมรับกันว่าการสร้างจำนวน "นิวเคลียส" เริ่มต้นที่มีขนาดเล็กและมีจำนวนมาก จะใช้ระยะเวลาในการเกิดเกรนแบบก้อนกลมที่สั้น เพราะการเกิดจะเกิดได้โดยตรงจากเกรนแบบ Equiaxed ซึ่งแสดงตามเส้นทาง (a)-(a_2) ในรูปที่ 1-5 ในทางตรงกันข้ามหากขนาด "นิวเคลียส" เริ่มต้นที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่ ซึ่งอาจเกิดจากอัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะที่ช้า จะทำให้เกิดโครงสร้างแบบก้อนกลมที่มีขนาดใหญ่ ดังแสดงตามเส้นทาง (a)-(e) โดยเส้นทางนี้จะใช้เวลาในการเกิดที่ยาวนานกว่า และหากจำนวน "นิวเคลียส" ที่เกิดขึ้นมีจำนวนไม่เพียงพอโครงสร้างที่ได้ก็จะไม่เป็นก้อนกลม แม้จะใช้เวลานานก็ตาม ดังแสดงตามเส้นทาง (a)-(b_2)



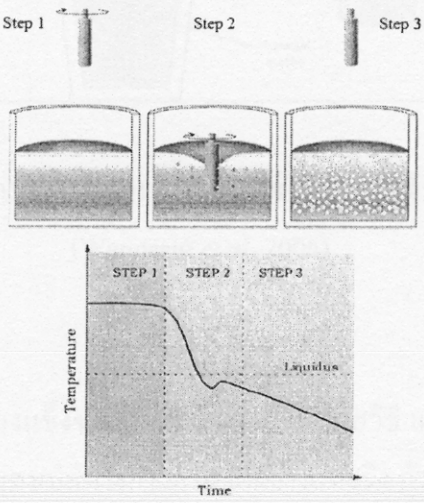
รูปที่ 1-5 แสดงเส้นทางการเติบโต (Growth) และ
การ Coarsening ของอนุภาคของแข็ง
(Flemings and Johnson, 2002)

1.1.2 กระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยการหล่อแบบรีโอแคสติง

ในปัจจุบันมีหลากหลายกระบวนการที่สามารถทำให้โครงสร้างสุดท้ายมีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบไม่เป็นกิ่งไม้ เช่น กรรมวิธีการกวนทางกล (Mechanical Stirring) การกวนด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Stirring) การสั่นด้วยอุลตราโซนิค (Ultrasonic Vibrations) ซึ่งกรรมวิธีดังกล่าวล้วนอาศัยตัวกลางเพื่อให้เกิดการไหลวน (Agitation) ทั้งสิ้น โดยในกรรมวิธีการกวนทางกลจะใช้ใบพัดหรือแท่งทรงกระบอกเพื่อให้เกิดการไหลวน กรรมวิธีการกวนด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าอาศัยแรงทางไฟฟ้าเป็นตัวพาให้เกิดการไหลวนของของเหลว ส่วนการสั่นก็เป็นวิธีการทำให้เกิดการไหลวนด้วยเช่นกัน แต่กระบวนการดังที่กล่าวมาข้างต้นก็มีข้อเสียหลายประการ เช่น ราคาที่สูง และการเกิดแมคโครเซกกริเกรชันเนื่องจากการกวนที่สัดส่วนของแข็งสูง ๆ

หากมองย้อนไปดูหลักการเกิดโครงสร้างแบบไม่เป็นกิ่งไม้ เป็นที่ชัดเจนว่าหากต้องการให้เกิดการแตกตัวของกิ่งเดนไดรต์ จะต้องทำให้เกิดการไหลวนในช่วงก่อนที่จะมีการแข็งตัวเท่านั้น ซึ่งเป็นช่วงที่กิ่งของเดนไดรต์มีขนาดเล็กมากและอยู่ในสถานะที่ไม่เสถียรเนื่องจากอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมีค่าสูง

ด้วยหลักการดังกล่าว ทำให้เมื่อไม่นานมานี้ Martinez และ Flemings ได้แสดงให้เห็นว่าหากจุ่มและหมุนแท่งโลหะเย็นลงไปในน้ำโลหะที่อุณหภูมิเหนือจุดหลอมเหลว โดยใช้เวลาในการหมุนแท่งโลหะเพียงเล็กน้อย จนเริ่มมีสัดส่วนของแข็งเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย จึงยกแท่งโลหะขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 1-6 จะพบว่าโครงสร้างของโลหะภายหลังการเย็นตัวจะมีลักษณะเป็นแบบก้อนกลม โดยพวกเขาเรียกกระบวนการผลิตนี้ว่า Semi-solid Rheocasting (SSR)



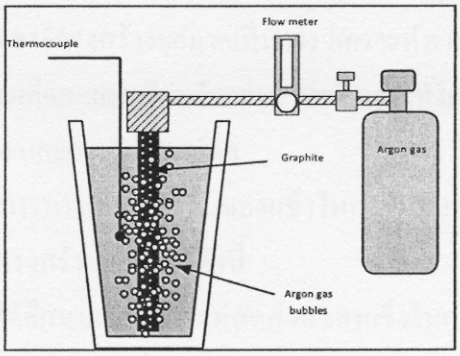
รูปที่ 1-6 แสดงขั้นตอนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธี Semi-solid Rheocasting (SSR) (Martinez, 2004)

ซึ่งต่อมา Martinez (Martinez, 2004) ได้แสดงให้เห็นในวิทยานิพนธ์ปริญญาเอกของเขา ว่าการสร้างโลหะกึ่งของแข็งสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพจากการกวนน้ำโลหะเฉพาะจุดและเกิดจากการระบายความร้อนจากน้ำโลหะเฉพาะจุดอย่างรวดเร็ว (Rapid Localized Heat Extraction)

แม้ว่ากระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีดังกล่าวจะสามารถผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ก็ประสบปัญหาหลายประการในขั้นตอนของการผลิต เช่น การต่อระบบให้ความเย็นด้วยน้ำและระบบเซ็นเซอร์เข้ากับแท่งที่หมุนซึ่งเป็นวิธีที่สลับซับซ้อนและยากต่อการติดตั้ง นอกจากนี้ระหว่างที่วัตถุหมุนจะทำให้เกิดการไหลวนของน้ำโลหะ ซึ่งอาจเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นได้ในขั้นตอนนี้

1.1.3 การผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีปล่อยฟองแก๊สระหว่างการแข็งตัว

ในกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีปล่อยฟองแก๊สระหว่างการเข็งตัวนั้น ใช้หลักการการเคลื่อนย้ายของน้ำโลหะและการดูดความร้อนเฉพาะจุด ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น โดยในวิธีการนี้ฟองแก๊สจะเป็นตัวกลางในการกวน และแท่งกราไฟต์พรุนจะเป็นตัวดูดระบายความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 1-7



รูปที่ 1-7 แสดงภาพอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีปล่อยฟองแก๊สระหว่างการแข็งตัว (Wannasin *et al*, 2006)

1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิเคราะห์หาสัดส่วนของแข็งของโลหะมีด้วยกันหลายวิธี แต่จะมีเทคนิคใดที่จะวิเคราะห์หาสัดส่วนของแข็งหรือผลลัพท์ของคุณสมบัติทางกายภาพได้อย่างแท้จริง ตัวอย่างวิธีในการวิเคราะห์มีดังนี้

1) การใช้ข้อมูลทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Utilization of thermodynamic data)
2) การวิเคราะห์เชิงปริมาณของโครงสร้างจุลภาค (Quantitative metallography on microstructures quenched from the semi-solid state)

3) เทคนิควิเคราะห์ทางความร้อน (Thermal analysis techniques)

4) การวัดคลื่นอัลตราโซนิค (Ultrasonic monitoring)

5) การวัดความต้านทานไฟฟ้า หรือการนำแม่เหล็ก (Measurement of electrical resistance/magnetic permeability)

6) การวัดเชิงกล (Measurement of mechanical response)

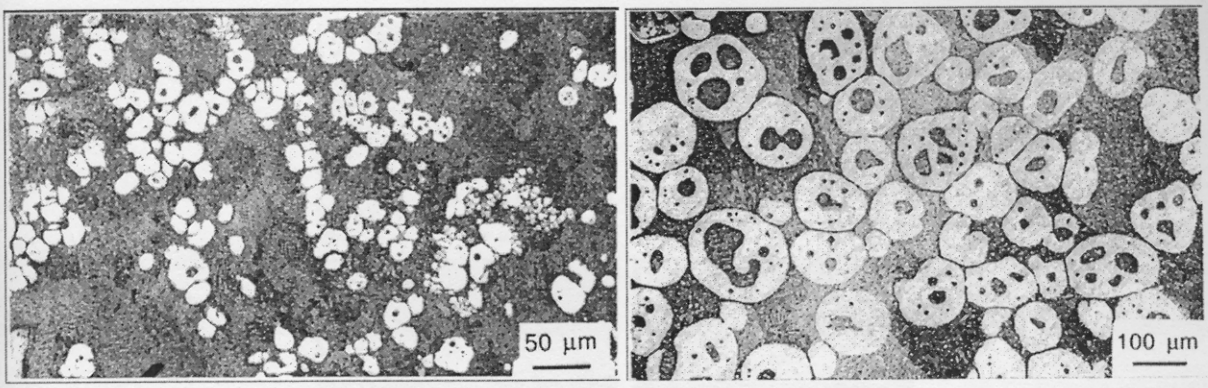
3 วิธีที่ได้กล่าวมาข้างต้นไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง เนื่องจากต้องมีการเทียบมาตรฐาน ไม่มีลักษณะคล้ายคลึงระหว่างปัจจัยของมาตรฐานในการวัด (ultrasonic wave velocity ratio, average electrical resistance and resistance to deformation respectively) และปริมาตรสัดส่วนของแข็ง ในการวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermal Analysis) เป็นเทคนิคที่สามารถบอกอุณหภูมิ Liquidus และ Solidus หรือ Eutectic ได้ แต่ในอุตสาหกรรมก็ยังไม่สามารถบอกได้อย่างชัดเจน แม้ข้อมูลทางอุณหพลศาสตร์เป็นข้อมูลที่อาจใช้ในการประมาณค่าต่าง ๆ ได้ แต่ผลของการทดลองก็ยังเป็นสิ่งจำเป็นในการยืนยันความถูกต้องของข้อมูล

การวิเคราะห์เชิงปริมาณของโครงสร้างจุลภาคจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของโลหะกึ่งของแข็งของเหลวจึงเป็นเทคนิคที่สำคัญ การเย็นตัวอย่างรวดเร็วเปรียบได้กับการแช่เย็น (Freeze) ของโครงสร้างทางจุลภาค การวิเคราะห์เชิงปริมาณของโครงสร้างจุลภาคเป็นการวิเคราะห์หาสัดส่วนของแข็ง ซึ่งการวิเคราะห์จะแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ การเลือกและเตรียมตัวอย่าง, การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค, การคำนวณและตรวจนับจำนวนโครงสร้างจุลภาค และการวิเคราะห์ผล

งานวิจัยที่ศึกษาวิวัฒนาการการเกิดสัดส่วนของแข็งในกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง ซึ่งใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงปริมาณของโครงสร้างจุลภาค มีดังนี้

de Figueredo et al [11] ได้ศึกษาและวิเคราะห์สัดส่วนของแข็งในการเย็นตัวของสเลอร์รีกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมผสมที่เจือด้วยซิลิกอนและแมกนีเซียม (A357) โดยกระบวนการ Rheocast โดยการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วจากอุณหภูมิช่วงของแข็งของเหลว และวิเคราะห์หาสัดส่วนของแข็งโดยการวิเคราะห์เชิงปริมาณของโครงสร้างจุลภาค จากนั้นนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับ Thermo-Calc

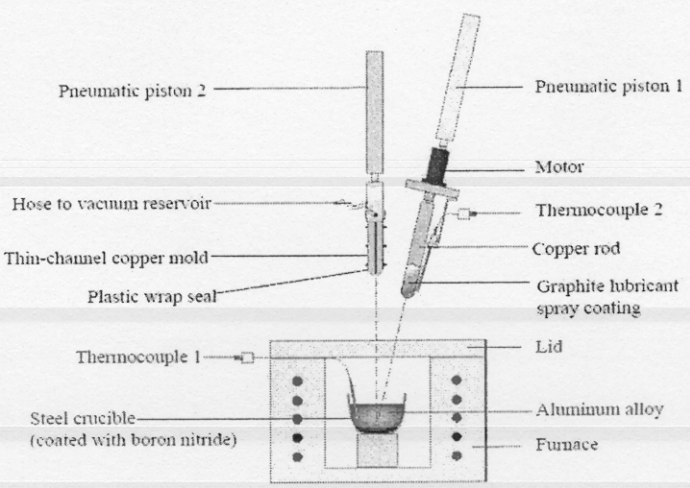
Tzimas and Zavaliangos [12] ได้ทำการวิเคราะห์ 3 วิธีด้วยกัน ซึ่งมีวิธีการวิเคราะห์เชิงปริมาณของโครงสร้างจุลภาครวมอยู่ด้วย โดยศึกษาสัดส่วนของแข็งจากอุณหภูมิของอะลูมิเนียมผสมในกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง ซึ่งโลหะที่ได้ทำการศึกษาคือ 2014 Al-4wt%Cu และ Al-7wt%Si โดยให้ความร้อนกับชิ้นงานที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน และทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในอ่าง Sn-Pb alloy การวิเคราะห์หาสัดส่วนของแข็งโดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงปริมาณของโครงสร้างจุลภาค ซึ่งจากการทดลองแสดงให้เห็นเฟสของแข็งและของเหลวที่สัดส่วนของแข็งต่ำ ๆ และปานกลาง ดังรูปที่ 1-8 ในงานวิจัยนี้พบว่า การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคหลังจากการเย็นตัว สิ่งที่จำเป็นในการวิเคราะห์ผลการทดลอง คือ เงื่อนไขในการเย็นตัว และขนาดตัวอย่าง



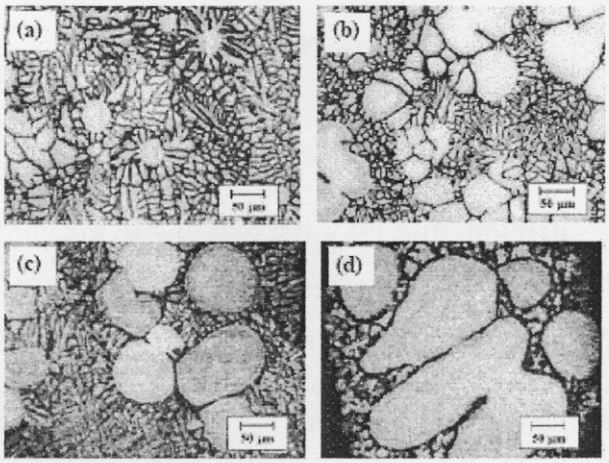
(a) (b)

รูปที่ 1-8 โครงสร้างจุลภาคของ Al-Cu alloys จากการเย็นตัวในสภาพกึ่งของแข็งของเหลว: (a) 2014 ที่มีสัดส่วนของแข็ง 25%; (b) Al-4wt.%Cu ที่มีสัดส่วนของแข็ง 50%

Martinez and Flemings ได้ศึกษาการเกิดโครงสร้างแบบก้อนกลมของอะลูมิเนียมผสม Al-4.5 wt% Cu ด้วย 2 วิธีการคือ การ Reheat เกรนของเดนไดรต์ละเอียด (Equiaxed Grain) และการจุ่มแท่งเย็นพร้อมการกวนเหนืออุณหภูมิหลอมเหลวเล็กน้อย ดังรูปที่ 1-9 โดยเขาพบว่า โครงสร้างแบบก้อนกลมสามารถเกิดขึ้นได้ในการ Reheat เกรนของเดนไดรต์ละเอียด โดยใช้เวลาที่สั้นมากคือ น้อยกว่า 5 วินาที เพื่อให้ได้โครงสร้างแบบก้อนกลมที่มีขนาดของเกรน 30μm สำหรับการจุ่มแท่งเย็นพร้อมกวนเหนืออุณหภูมิหลอมเหลวนั้นเขาพบว่าสามารถสร้างเกรนจำนวนมาก และเติบโตไปเป็นโครงสร้างแบบก้อนกลมได้อย่างรวดเร็ว ในงานวิจัยนี้พบว่าสามารถสังเกตเห็นโครงสร้างแบบก้อนกลมได้ตั้งแต่ 5 วินาที หลังจากน้ำโลหะเริ่มแข็งตัว (สัดส่วนของแข็งประมาณ 5%) โดยที่โครงสร้างไม่มีรอยยูเทกติกตกค้างอยู่ภายในโครงสร้างของเกรนก้อนกลมที่ได้ทั้ง 2 วิธีมีลักษณะการเติบโตเป็นไปตามหลักการของการ Coarsening ดังรูปที่ 1-10



รูปที่ 1-9 ภาพการออกแบบและสร้างอุปกรณ์การทดลองของ Martinez and Flemings



รูปที่ 1-10 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียม Al-4.5%Cu ภายหลังการกวนแท่งเย็นที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวเป็นเวลา (a) 5 วินาที (b) 20 วินาที (c) 60 วินาที (d) 9 นาที

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาข้างต้น ไม่มีการศึกษาอะลูมิเนียมผสมซิลิกอนและทองแดง และการศึกษาส่วนใหญ่จะใช้วิธีการให้ความร้อนชิ้นงานโลหะกึ่งของแข็งของเหลว และทำให้เย็นตัวที่สัดส่วนของแข็งสูง ๆ วิธีวิจัยที่เหมาะสม คือวิธีที่ใช้ในงานของ Martinez และ Flemings แต่เนื่องจากงานวิจัยของ Martinez และ Flemings ไม่ได้ใช้เทคนิคนี้ในการศึกษาวิวัฒนาการการเกิดสัดส่วนของแข็ง งานวิจัยนี้จึงได้ประยุกต์และพัฒนาวิธีนี้ในการศึกษาวิวัฒนาการการเกิดสัดส่วนของแข็งในสเลอร์รีกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมผสมที่เจือด้วยซิลิกอนและทองแดง