

## กระบวนการและกลไกการเกิดโครงสร้างที่ไม่เป็นเดนไดรต์ใน กระบวนการหล่อกึ่งแข็งของโลหะอะลูมิเนียม

### The Process and Mechanisms of Non-Dendritic Structure Formation in Semi-Solid Processing of Aluminum

ชัยวัฒน์ พีรทัตสุวรรณ<sup>1</sup> ไพร่พินาศ พิมพิสาร<sup>2</sup>  
ชาตินักรบ แสงสว่าง<sup>2</sup> ศิวกร สุขประเสริฐชัย<sup>2</sup> และ อีร์ เชาวนนทปัญญา<sup>2\*</sup>  
Chaiyawat Peeratatsuan<sup>1</sup>, Phaireepinas Phimpisan<sup>2</sup>,  
Chatnugrob Sangsawang<sup>2</sup>, Siwakorn Sukprasertchai<sup>2</sup>  
and Thee Chowwanonthapunya<sup>2\*</sup>

Received: 12 February 2025

Revised: 2 September 2025

Accepted: 21 January 2026

#### บทคัดย่อ

กระบวนการหล่อกึ่งแข็งของอะลูมิเนียม (Semi-solid casting) เป็นเทคโนโลยีการผลิตที่ได้รับความนิยมสูงอย่างมากในช่วงไม่กี่ทศวรรษที่ผ่านมา เนื่องจากเป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะในสถานะกึ่งของแข็ง (Semi-solid state) ซึ่งมีทั้งเฟสของแข็งและของเหลวอยู่ร่วมกันทำให้สามารถควบคุมโครงสร้างจุลภาคของโลหะได้ดียิ่งขึ้น ลดการเกิดโพรงอากาศ เพิ่มความแม่นยำของขนาดชิ้นงาน และช่วยให้ชิ้นงานที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น ในปัจจุบันเทคโนโลยีการหล่อกึ่งแข็งที่ได้รับความนิยมมากที่สุด ได้แก่ กระบวนการหล่อแบบทิโซคาสติง (Thixocasting) และกระบวนการหล่อแบบรีโอคาสติง (Rheocasting) โดยกระบวนการหล่อแบบทิโซคาสติงเป็นกระบวนการที่นำแท่งโลหะที่ผ่านการเตรียมให้มีโครงสร้างเป็นอนุภาคกลม (Globular microstructure) มาให้ความร้อนจนถึงสถานะกึ่งของแข็งก่อนทำการฉีดขึ้นรูป ในขณะที่การหล่อแบบรีโอ

---

<sup>1</sup> คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ประเทศไทย 30000

<sup>1</sup> Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhonratchasima, Thailand 30000

<sup>2</sup> คณะพาณิชยศาสตร์และการบัญชี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ชลบุรี ประเทศไทย 20230

<sup>2</sup> Faculty of International Maritime Studies, Kasetsart University, Chonburi, Thailand 20230

\* ผู้เขียนที่ประสานงาน (Corresponding author) e-mail: thee.c@ku.th

การขึ้นรูปเป็นกระบวนการที่ทำให้โลหะเปลี่ยนไปสู่สถานะกึ่งของแข็งโดยตรงจากโลหะหลอมเหลว ก่อนนำไปขึ้นรูป ซึ่งช่วยให้สามารถลดข้อบกพร่องทางโลหะวิทยาและเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานได้ บทความนี้กล่าวถึงภาพรวมของกระบวนการหล่อกึ่งแข็งของอะลูมิเนียม กลไกของการเกิดโครงสร้างที่ไม่เป็นกิ่งก้าน และตัวแปรที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาค สมบัติเชิงกล และคุณภาพของชิ้นงาน ข้อมูลดังกล่าวมีความสำคัญในการพัฒนากระบวนการหล่อกึ่งแข็งของอะลูมิเนียมทั้งในงานวิจัยและในอุตสาหกรรมงานหล่อของโลหะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตโลหะผสมอะลูมิเนียม

**คำสำคัญ:** การหล่อโลหะ โครงสร้างที่ไม่เป็นเดนไดรต์ สถานะกึ่งของแข็ง

## ABSTRACT

In recent decades, semi-solid casting of aluminum has received significant attention as one of advanced manufacturing technologies. This process involves forming metal in a semi-solid state, where both solid and liquid phases coexist. Producing aluminum alloys in this condition enables the better microstructural control, reduces porosity, enhance dimensional accuracy, and improves the mechanical properties of the final product. Currently, the most commonly used semi-solid forming techniques are Thixocasting and Rheocasting. Thixocasting involves reheating aluminum feed stocks containing a globular microstructure to a semi-solid state and then injecting it into the mold. In contrast, Rheocasting directly transforms molten aluminum into a semi-solid state before shaping. Both sophisticated methods effectively minimize defects and enhance the strength and quality of the final product. This review article provides an overview of the semi-solid casting process of aluminum, the mechanisms of non-dendritic structure formation, and the significant parameters that influence microstructure, mechanical properties, and product quality. The knowledge presented is crucial for the development of semi-solid casting processes in both research and industrial applications, particularly in the field of aluminum alloy casting.

**Keywords:** Casting; Non-Dendritic Structure; Semi-Solid State

## บทนำ

กระบวนการหล่อกึ่งแข็ง (Semi-Solid casting) เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะที่ได้รับความนิยมสูงอย่างมากในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา เนื่องจากสามารถผสมผสานข้อดีของกระบวนการหล่อโลหะ และกระบวนการขึ้นรูปโลหะได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยหลักการของกระบวนการนี้คือการควบคุมโลหะให้อยู่ในช่วงอุณหภูมิที่มีทั้งของแข็งและของเหลวอยู่ร่วมกัน ซึ่งช่วยปรับปรุงโครงสร้างจุลภาค ลดโครงสร้างเดนไดรต์ (Dendritic structure) ลดปริมาณพองอากาศ และเพิ่มสมบัติเชิงกลของชิ้นงานให้สูงขึ้นเมื่อเทียบกับกระบวนการหล่อแบบดั้งเดิม (Conventional casting) [1, 2]

กระบวนการหล่อกิ่งแข็งถูกค้นพบครั้งแรกในปี 1971 โดย Flemings แห่ง Massachusetts Institute of Technology (MIT) [3] ซึ่งพบว่ากระบวนการหล่อที่ก่อกำเนิดขึ้นสามารถทำให้เกิดโครงสร้างที่ไม่เป็นเดนไดรต์ซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความทนทานของชิ้นงาน โดยการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างของโลหะในสภาวะกิ่งของแข็งให้เกิดโครงสร้างที่ไม่เป็นเดนไดรต์สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การกวนด้วยแรงทางกล การเทที่อุณหภูมิต่ำ การผ่านร่างหล่อเย็น เป็นต้น [4] ในปัจจุบันกระบวนการหล่อกิ่งแข็งที่สำคัญนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 กระบวนการนั่นคือ กระบวนการหล่อแบบทึบโครงสร้างและกระบวนการหล่อแบบรีโอคาสต์ [4, 5] โดยกระบวนการหล่อแบบทึบโครงสร้างเป็นกระบวนการที่ใช้แท่งโลหะที่ผ่านการควบคุมโครงสร้างให้เป็นอนุภาคกลม แล้วนำมาให้ความร้อนก่อนฉีดขึ้นรูป [6, 7] สำหรับกระบวนการหล่อแบบรีโอคาสต์นั้นเป็นกระบวนการที่เปลี่ยนโลหะหลอมเหลวไปสู่สถานะกิ่งของแข็งโดยตรงก่อนขึ้นรูป ซึ่งช่วยลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต [8, 9] กระบวนการหล่อกิ่งแข็งสำหรับโลหะผสมอะลูมิเนียมได้ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนที่มีน้ำหนักเบาและมีความแข็งแรงสูง เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์และอากาศยาน เนื่องจากสามารถช่วยลดน้ำหนักของชิ้นส่วน เพิ่มสมบัติเชิงกล และปรับปรุงกระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น [10, 11] อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้ยังมีความท้าทายในด้านต้นทุนเริ่มต้นที่สูง และความซับซ้อนของกระบวนการ [12] ดังนั้นความเข้าใจในกระบวนการหล่อกิ่งแข็งโดยเฉพาะอย่างยิ่งหลักการของโลหะกิ่งแข็ง โลหะขึ้นต้น (Feed stock) อิทธิพลของตัวแปรที่ส่งผลต่ออะลูมิเนียมผสมในสภาวะกิ่งแข็ง และกลไกที่ก่อให้เกิดโครงสร้างแบบไม่ใช่เดนไดรต์ (Non-dendritic structure) จึงมีความสำคัญอย่างมากต่ออุตสาหกรรมการผลิตโลหะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมงานหล่อ

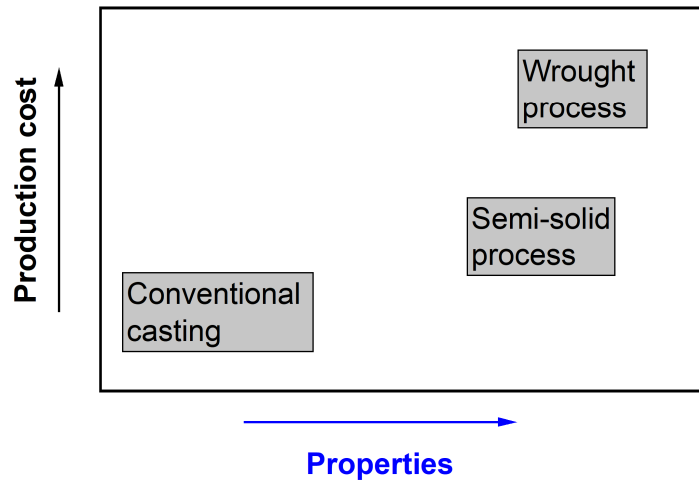
จากความสำคัญดังกล่าวบทความนี้นำเสนอภาพรวมของกระบวนการหล่อกิ่งแข็งของอะลูมิเนียม เช่น กระบวนการหล่อแบบทึบโครงสร้างและรีโอคาสต์ กลไกของการเกิดโครงสร้างที่ไม่เป็นเดนไดรต์ และตัวแปรที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาค สมบัติเชิงกล และคุณภาพของชิ้นงาน โดยข้อมูลในบทความนี้มีความสำคัญและสามารถนำไปใช้เพื่อการพัฒนากระบวนการหล่อกิ่งแข็งของอะลูมิเนียม โดยเฉพาะในแง่ของการประยุกต์ใช้งานทั้งในงานวิจัยและอุตสาหกรรมการหล่อโลหะ ซึ่งเป็นอีกหนึ่งอุตสาหกรรมที่มีบทบาทสำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจและการเติบโตของประเทศ

## ภาพรวมของกระบวนการหล่อกิ่งแข็ง

### 1. ข้อเปรียบเทียบการหล่อแบบกิ่งแข็งกับกระบวนการผลิตแบบปกติ

กระบวนการหล่อกิ่งแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียมเป็นการขึ้นรูปโลหะในช่วงที่น้ำโลหะมีเฟสของแข็งและเฟสของเหลวอยู่ร่วมกัน โดยการเทน้ำโลหะที่มีอุณหภูมิอยู่ระหว่างเส้นลิกควิดัสและโซลิดัสเข้าสู่แม่พิมพ์ [12, 13] โครงสร้างที่ได้เป็นอนุภาคของแข็งที่ไม่เป็นเดนไดรต์กระจายตัวอยู่ในโลหะที่เป็นของเหลว ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกระบวนการหล่อกิ่งแข็งกับกระบวนการหล่อแบบปกติ พบว่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิเทกับอุณหภูมิที่โลหะเหลวเริ่มมีเฟสของแข็งเกิดขึ้นในกระบวนการหล่อกิ่งแข็งนั้นมีค่าน้อย ดังนั้นจึงเป็นการประหยัดพลังงานในการผลิตชิ้นงานหล่อ [13-15] นอกจากนี้โลหะหลอมเหลวในสภาวะกิ่งแข็งนั้นมีความหนืดสูง จึงทำให้ลดการดูดซับอากาศอันเป็นสาเหตุของการเกิดรูพรุนและสารประกอบออกไซด์ ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตมาจากกระบวนการหล่อกิ่งแข็งจึงมีสมบัติที่ดีกว่า [16, 17] อย่างไรก็ตามกระบวนการหล่อแบบกิ่งแข็งนั้นมีต้นทุนสูงกว่ากระบวนการหล่อแบบปกติ [17, 18] และเมื่อเปรียบเทียบกระบวนการหล่อกิ่งแข็งกับการขึ้นรูปโลหะแบบรีด

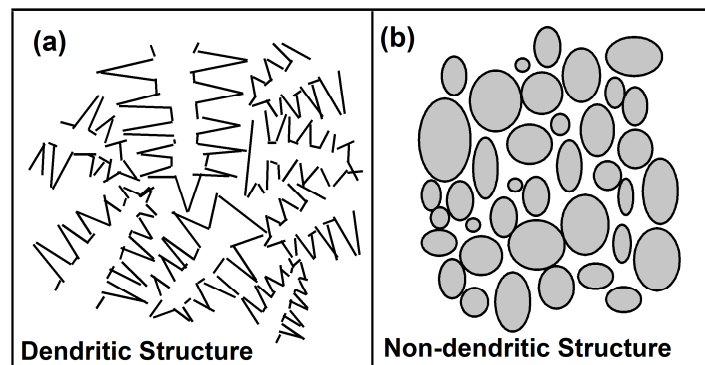
โดยพบว่ากระบวนการขึ้นรูปโลหะในสภาวะกึ่งแข็งมีต้นทุนการผลิตต่ำกว่าและสมบัติที่ได้ใกล้เคียงกัน [19, 20] โดยการเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตและสมบัติของกระบวนการผลิตทั้ง 3 กระบวนการแสดงในรูปที่ 1



**Figure 1** Comparison of production cost and properties of Semi-solid, conventional casting and wrought process [20]

## 2. กระบวนการผลิตขึ้นรูปโลหะในสภาวะกึ่งแข็งของแข็ง

ในการผลิตขึ้นรูปโลหะในสภาวะกึ่งแข็งของแข็งนั้น โลหะจะถูกเตรียมผลิตให้อยู่ระหว่างอุณหภูมิเริ่มและสิ้นสุดการแข็งตัว (Solidus-liquidus temperature) ซึ่งในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว โลหะจะประกอบไปด้วยเฟสของแข็งและเฟสของเหลวเรียกว่า “สารละลายกึ่งแข็ง (Slurry)” [20, 21] ในขั้นตอนการเตรียมสารละลายกึ่งแข็งนั้นต้องควบคุมลักษณะรูปร่างของเฟสของแข็งให้มีขนาดที่เล็กละเอียดหรือเล็กกว่า 100  $\mu\text{m}$  โดยมีลักษณะกลม (Globular) หรือมีลักษณะคล้ายดอกกุหลาบ (Rosette) [21, 22] โดยสารละลายกึ่งแข็งในอุดมคตินั้นต้องมีโครงสร้างที่สม่ำเสมอและไม่มียอดหรือสารปนเปื้อนต่างๆ และนำไปใช้ในการขึ้นรูปต่อไป [23] ดังนั้นกระบวนการผลิตสารละลายกึ่งแข็งที่ดีนั้นมีความสำคัญอย่างมากในการเตรียมโลหะกึ่งแข็งให้เกิดโครงสร้างที่ไม่เป็นเดนไดรต์และคอนข้างกลม โดยโครงสร้างลักษณะดังกล่าวทำให้โลหะมีความสามารถในการไหลที่ดี ซึ่งทำให้ความหนืดของโลหะในระหว่างการขึ้นรูปลดลง [23, 24] โดยโลหะที่อยู่ในสภาวะกึ่งแข็งนั้นสามารถแสดงพฤติกรรมทั้งในแบบที่เป็นของเหลวและของแข็ง เช่น โลหะสามารถรักษาลักษณะรูปร่างได้เหมือนของแข็ง แต่สามารถไหลได้เหมือนของเหลวภายใต้สภาวะที่มีอัตราการขึ้นรูปที่สูง โดยการที่โลหะอยู่ในสภาวะกึ่งแข็งจะสามารถทำให้การไหลตัวเป็นแบบราบเรียบ (Laminar flow) ทำให้การไหลของโลหะนั้นสม่ำเสมอ [25] โดยการไหลตัวของโลหะกึ่งแข็งในแบบราบเรียบช่วยลดปัญหาการเกิดก๊าซตกค้าง (Entrapment) ซึ่งเป็นสาเหตุของรูพรุน (Porosity) [26] ดังนั้นชิ้นงานที่ผ่านการผลิตโดยกระบวนการหล่อแบบกึ่งแข็งจึงมีสมบัติเชิงกลที่ดี โดยรูปที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมที่ผลิตจากกระบวนการหล่อแบบเดิมและจากการผลิตในสภาวะกึ่งแข็ง



**Figure 2** The sketch of structure of metal obtained form (a) Conventional casting and (b) Semi-solid process[27]

โดยโครงสร้างที่ไม่เป็นกิ่งก้านจากกระบวนการหล่อแบบกึ่งแข็งทำให้ผลิตภัณฑ์มีจำนวนโพรงหดตัวและรูพรุนที่น้อยกว่าการหล่อแบบดั้งเดิม [27] โดยกระบวนการหล่อแบบกึ่งแข็งนั้นมีการเติมโลหะที่มีอุณหภูมิต่ำนั้นจึงทำอายุการใช้งานของแม่พิมพ์นั้นยาวนานขึ้นและผลิตภัณฑ์มีขนาดเท่าที่กำหนดจากการออกแบบ ซึ่งสามารถลดขั้นตอนการปรับแต่งและทำให้ลดต้นทุนในการผลิตลง [23-25] จากข้อดีของกระบวนการผลิตดังกล่าวจึงทำให้เกิดการพัฒนากระบวนการหล่อโลหะกึ่งแข็งอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ [28]

ในปัจจุบันกระบวนการหล่อแบบกึ่งแข็งนั้นสามารถแบ่งได้สองได้ 2 กระบวนการ [28, 29] คือ กระบวนการหล่อแบบทีโซคาสติงและกระบวนการหล่อแบบรีโอคาสติง โดยการเตรียมสารละลายของแข็งในกระบวนการหล่อแบบทีโซคาสติงนั้นจะทำการให้ความร้อนแก่โลหะขั้นต้น (Feed stock) จากสภาพของแข็งสู่สภาพกึ่งของแข็งแล้วป้อนโลหะเข้าสู่แม่พิมพ์เพื่อขึ้นรูปในขั้นตอนต่อไป โดยการเตรียมโลหะขั้นต้นในกระบวนการหล่อแบบทีโซคาสติงนั้นสามารถเตรียมได้ทั้งจากโลหะในสภาพของแข็งและในสภาพหลอมเหลว [30] และสำหรับกระบวนการหล่อแบบรีโอคาสติงนั้นจะทำการเตรียมสารละลายของแข็งจากโลหะหลอมเหลวโดยตรงแล้วป้อนเข้าสู่แม่พิมพ์เพื่อทำการหล่อขึ้นรูป [31] โดยรูปที่ 3 แสดงกระบวนการเตรียมสารละลายของแข็งของกระบวนการหล่อแบบทีโซคาสติงและกระบวนการหล่อแบบรีโอคาสติง

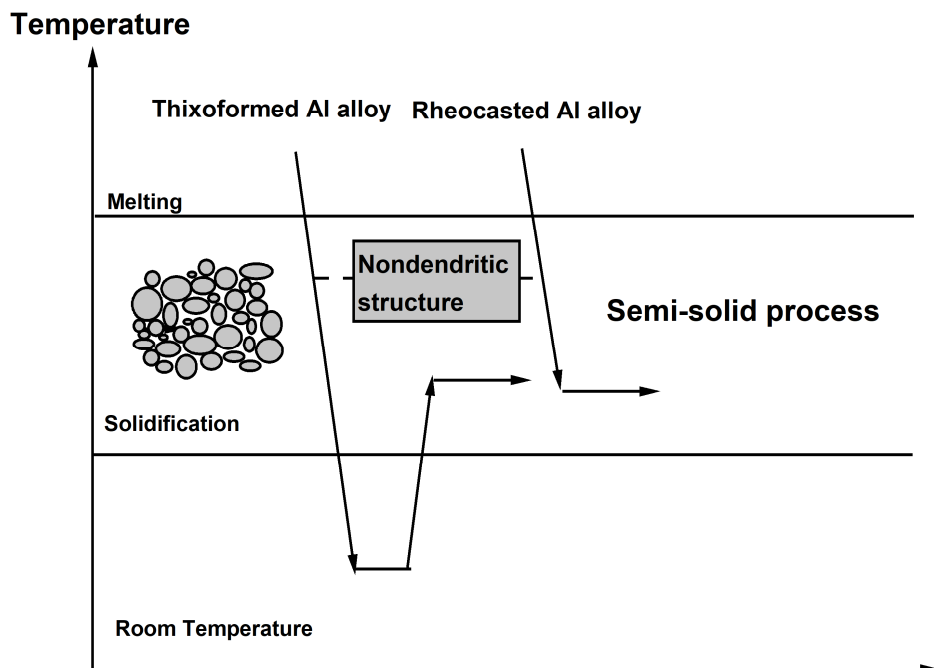


Figure 3 Schematic diagram exhibiting the feed preparation of semi-solid process [32]

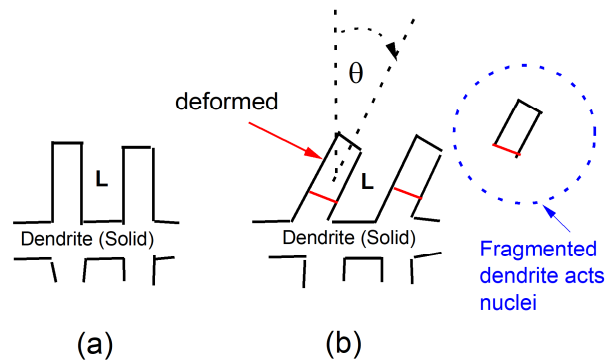
### กลไกการเกิดโครงสร้างที่ไม่เป็นเดนไดรต์

ในกระบวนการหล่อแบบกึ่งแข็งนั้น การเตรียมโครงสร้างของโลหะในขณะกึ่งแข็งให้มีลักษณะค่อนข้างกลมหรือไม่เป็นเดนไดรต์นั้นเป็นกระบวนการที่สำคัญ พบว่าการเกิดอนุภาคของแข็งที่ไม่เป็นเดนไดรต์นั้นมีความสัมพันธ์กับการแตกหักของอนุภาคที่แข็งตัวตามปกติซึ่งมีรูปร่างคล้ายเดนไดรต์ [31, 32] โดยการแตกหักของอนุภาคแบบเดนไดรต์ส่งผลให้อนุภาคเล็กๆ จำนวนมากในน้ำโลหะ [33] ซึ่งอนุภาคเล็กๆ ดังกล่าวจะแข็งตัวในรูปแบบที่ค่อนข้างกลมและไม่เป็นเดนไดรต์ โดยในปัจจุบันการพัฒนาระบบการหล่อกึ่งแข็งทั้งในงานวิจัยและอุตสาหกรรมจะอ้างอิงกลไกดังต่อไปนี้

#### 1. กลไกการเกิดโครงสร้างที่มีลักษณะไม่เป็นเดนไดรต์

ในกระบวนการหล่อแบบปกติเมื่อโลหะหลอมเหลวมีอุณหภูมิต่ำลงจนถึงจุดเริ่มแข็งตัวนั้น จะมีการฟอร์มตัวของนิวเคลียสของอนุภาคของแข็ง โดยอนุภาคของแข็งจะเติบโตในลักษณะแบบเดนไดรต์ โดย Fleming et al [34] อธิบายว่าการเกิดแรงเฉือนในขณะโลหะหลอมเหลวอยู่ในสภาวะกึ่งแข็งจะเกิดผลกระทบต่อการเติบโตของอนุภาคของแข็งแบบเดนไดรต์ ซึ่งนำมาสู่รูปร่างของอนุภาคที่เปลี่ยนไปจากเดนไดรต์ไปเป็นรูปแบบอื่น เช่น ดอกกุหลาบ หรือ แบบค่อนข้างกลม Vogel et al. [35] ได้อธิบายว่าการให้แรงเฉือนกับน้ำโลหะส่งผลให้แขนของโครงสร้างเดนไดรต์เกิดความเครียดและความเค้นและเกิดการดัดงอ เมื่อมุมของการดัดงอแขนของเดนไดรต์มากขึ้น ทำให้พลังงานที่ขอบเกรนมากกว่าพลังงานผิวสัมผัสระหว่างเฟสของแข็งกับของเหลว ส่งผลให้แขนของโครงสร้างเดนไดรต์หลุดออกจากขอบเกรน โดยแขนที่แตกหักออกจากโครงสร้างเดนไดรต์จะกลายเป็นนิวเคลียสและเกิดการเติบโตเป็นอนุภาคของแข็งที่มีรูปร่างค่อนข้างกลมและไม่มีโครงสร้าง

แบบกิ่งก้าน โดยรูปที่ 4 แสดงถึงกลไกการแตกหักของอนุภาคของแข็งที่มีรูปร่างแบบเดนไดรต์ และการเกิดนิวเคลียสเนื่องจากอนุภาคที่แตกหักซึ่งนำไปสู่การเกิดอนุภาคกลมในโลหะกึ่งแข็ง



**Figure 4** Fragmentation of solidified dendrite leading to the formation of nuclei in semi-solid casting [35]

## 2. กลไกการเกิดนิวเคลียสจากเคลื่อนที่ของโลหะหลอมเหลว

ในการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลวในวิธีการหล่อแบบปกติ โลหะหลอมเหลวจะเกิดการแข็งตัวที่ผนังแบบหล่อ โดยการแข็งตัวจะเป็นแบบเดนไดรต์ โดยทิศทางการแข็งตัวจะเริ่มจากผนังแบบหล่อเข้าไปสู่ใจกลางแบบหล่อ Hellawell et al. [36] เสนอว่าในการเตรียมสารละลายของแข็งให้มีอนุภาคที่มีลักษณะกลมและไม่มีรูปร่างแบบเดนไดรต์สามารถเกิดขึ้นได้จากการไหลวนของโลหะหลอมเหลวซึ่งเกิดขึ้นได้จากการเทโลหะหลอมเหลว ความแตกต่างของอุณหภูมิของโลหะหลอมเหลว และการกวนโลหะหลอมเหลว ถึงแม้ว่าอนุภาคของแข็งที่มีรูปร่างเป็นเดนไดรต์ซึ่งเติบโตมาจากผนังแบบหล่อจะมีความเหนียว การไหลวนจะก่อให้เกิดการหลอมเฉพาะจุด (Local recalescence) และนำไปสู่การแตกหักของอนุภาคดังกล่าว โดยอนุภาคที่แตกหักมาจากโครงสร้างเดนไดรต์จะมีขนาดเล็กและจนถึงสภาวะที่เหมาะสมจะเกิดการแข็งตัวในรูปร่างอนุภาคกลมและไม่เป็นเดนไดรต์ โดยเมื่อระดับของการไหลวนมากขึ้น การเกิดการแตกหักจะเกิดมากขึ้น และอนุภาคที่เป็นนิวเคลียสจะมากขึ้น โดยระดับการไหลวนนั้นเพิ่มได้จากการสั่นสะเทือนทางกล การใช้คลื่นอัลตราโซนิค (Ultrasonic) และ การเหนียวนำโดยสนามแม่เหล็ก

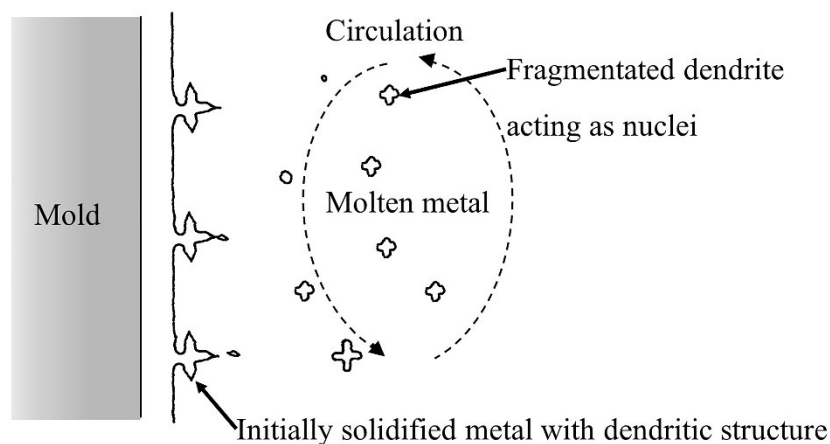


Figure 5 Circulation causing fragmented dendrite particles acting as nuclei [37]

### 3.การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของอนุภาคของแข็งในสารละลายกึ่งแข็ง

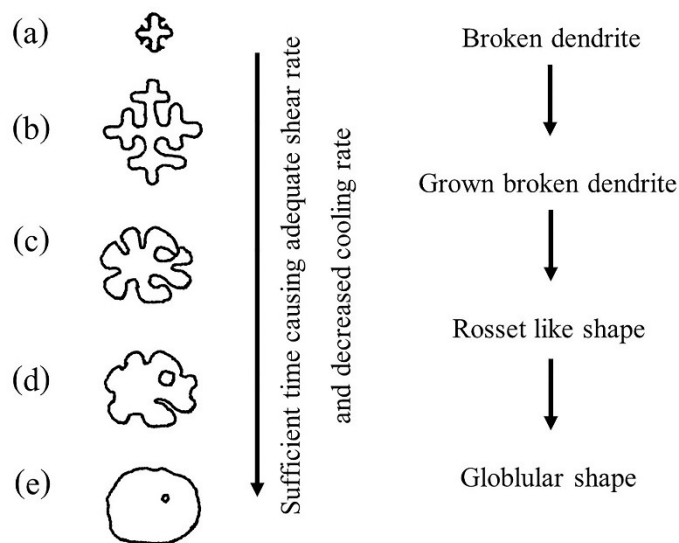


Figure 6 Transformation of shape particle due to the increase of time [34]

Fleming et al [34] ได้อธิบายการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของอนุภาคของแข็งที่เกิดขึ้นในกระบวนการหล่อแบบกึ่งแข็งว่า ในระหว่างการแข็งตัวของโลหะอยู่ภายใต้การไหลวนที่มากขึ้นจะก่อให้เกิดแรงเฉือนที่มากขึ้น โดยถ้าระบบดังกล่าวมีการลดอัตราการเย็นตัว อนุภาคของแข็งที่มีโครงสร้างเป็นกิ่งก้านจะมีแนวโน้มจะเปลี่ยนเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะกลมมากขึ้น เนื่องจากอนุภาคที่เกิดจากการแตกหักของโครงสร้างกิ่งก้านจะ

โตขึ้นเรื่อยๆ โดยแรงเฉือนที่กระทำจะส่งผลให้อนุภาคดังกล่าวมีโครงสร้างแบบ “ดอกกุหลาบ” และถ้าการกวนเป็นเวลาที่พอเหมาะที่นำไปสู่อัตราการเฉือนที่เพียงพอและการเย็นตัวที่นานเพียงพอ นั้น ทำให้ได้อนุภาคของแข็งเป็นแบบกลมและไม่มีเดนไดรต์ โดยรูปที่ 6 แสดงการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างอนุภาคจากเดนไดรต์เป็นอนุภาครูปร่างเหมือนกุหลาบและอนุภาคกลม

#### 4. กลไกการเกิดโครงสร้างลักษณะกลมบนรางหล่อเย็น

กระบวนการหล่อแบบกึ่งแข็งนั้นได้มีการใช้เทคนิคเพิ่มเติม เช่น การเทน้ำโลหะผ่านรางหล่อเย็น เมื่อโลหะหลอมเหลวถูกเทลงในรางหล่อเย็น โลหะหลอมเหลวนั้นจะสูญเสียความร้อนไปตามผนังรางหล่อเย็น ส่งผลให้เกิดนิวเคลียสที่บริเวณผิวสัมผัสของผิวหน้าระหว่างน้ำโลหะกับรางหล่อเย็น ซึ่งนำไปสู่กลไกการแยกตัวของนิวเคลียส [38] แต่เนื่องจากอิทธิพลของการไหลของน้ำโลหะ นิวเคลียสที่แยกตัวจะกลับเข้าไปรวมกับน้ำโลหะอีกครั้ง [39] นอกจากนี้อุณหภูมิของน้ำโลหะที่บริเวณปลายรางก่อนไหลเข้าสู่แม่พิมพ์มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของการเป็นของเหลว ซึ่งส่งผลให้โลหะกึ่งแข็งนั้นมีปริมาณสัดส่วนของของแข็งที่สูง [39, 40] ดังนั้นชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อกึ่งแข็งแบบการเทน้ำโลหะผ่านรางหล่อเย็นจะมีขนาดของเกรนที่เล็กกว่าเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการหล่อแบบกึ่งแข็งปกติ [39-41] รูปที่ 7 แสดงการเกิดอนุภาคของแข็งในโลหะกึ่งแข็งเมื่อใช้กระบวนการหล่อกึ่งแข็งแบบการเทน้ำโลหะผ่านรางหล่อเย็น

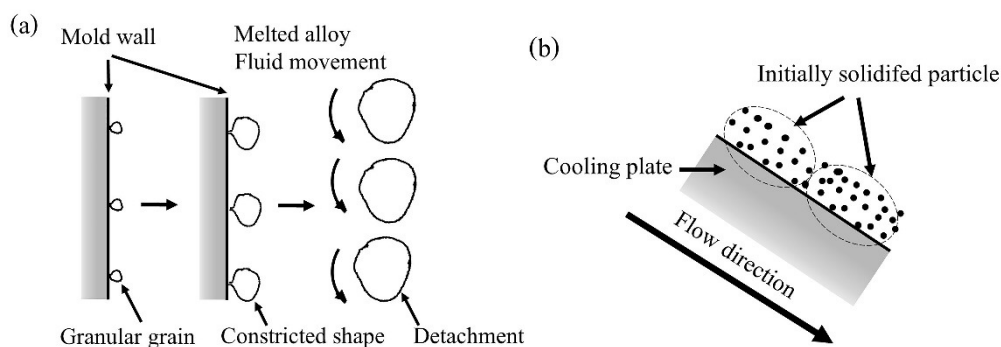


Figure 7 The particle formation in semi-solid casting with the cooling slope [41]

#### การเตรียมสารละลายแข็งโดยกระบวนการหล่อแบบกึ่งแข็ง

การเตรียมสารละลายแข็งนั้นเป็นขั้นตอนที่สำคัญ โดยเป็นการเตรียมสารละลายกึ่งแข็งให้อนุภาคที่ไม่เป็นเดนไดรต์ สำหรับวิวัฒนาการของการเตรียมสารละลายกึ่งแข็งเริ่มจากการกวนโลหะขณะแข็งด้วยแรงทางกลและปรับเปลี่ยนมาใช้ในการใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า [42] สำหรับการพัฒนาโลหะผสมอะลูมิเนียม ในปัจจุบันได้มีการนำเทคนิคการปรับสภาพเกรนละเอียด (Grain refining) โดยการเติมธาตุผสมการสร้างความเครียดเพื่อให้เกิดผลึกใหม่ (Strain induced melt activation) และการเทโลหะหลอมเหลวผ่านรางหล่อเย็น (Cooling slope) เข้ามาใช้ในการหล่อแบบกึ่งแข็ง ซึ่งในปัจจุบันได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมขนส่งที่โลหะอะลูมิเนียมผสมเป็นอีกหนึ่งในโลหะที่ได้รับการใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบาและในอะลูมิเนียมหลายเกรดสามารถเพิ่มแข็งแรงได้โดยวิธีอบชุบ [43]

## 1.การปรับปรุงสภาพเกรนละเอียดด้วยการเติมธาตุผสม

ในปัจจุบันการปรับปรุงสภาพเกรนละเอียดด้วยการเติมธาตุผสมเป็นเทคนิคที่ใช้กันแพร่หลายในอุตสาหกรรมอะลูมิเนียม โดยธาตุที่นิยมเติมเพื่อปรับปรุงสภาพเกรนคือ ธาตุไทเทเนียมและโบรอน โดยธาตุทั้งสองเมื่อทำการหล่อโลหะอะลูมิเนียมจะเกิดสารประกอบไทเทเนียมโบรด์และไทเทเนียมอะลูไมด์ [44, 45] สารประกอบทั้งสองจะอยู่ในสภาพของแข็งปะปนอยู่ในโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลว ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสเทียมให้กับอะลูมิเนียมหลอมเหลวทำให้ได้เกรนที่ละเอียดและสม่ำเสมอ โดย Nafisi et al. [46] ทำการปรับปรุงสภาพเกรนละเอียดในโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอนเกรด A356 ด้วยการเติมไทเทเนียมและโบรอน (Al5Ti1B) และดัดแปลงโครงสร้างด้วยสตรอนเชียม ( $Al_{10}Sr$ ) พบว่าการเติมไทเทเนียมและโบรอนทำให้โครงสร้างอะลูมิเนียมปฐมภูมิ (Primary  $\alpha-Al$ ) มีขนาดลดลงและมีลักษณะกลม สำหรับการเติมสตรอนเชียมช่วยทำให้เกรนมีลักษณะกลมมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมไทเทเนียมโบรอนและสตรอนเชียมทำให้โลหะมีพฤติกรรมเกรนไสลในสภาพกึ่งของแข็งดีขึ้น โดยการเติมสตรอนเชียมช่วยลดแรงตึงผิวระหว่างเฟสของเหลวและโครงสร้างอะลูมิเนียมปฐมภูมิส่งผลให้พฤติกรรมเกรนไสลในสภาพกึ่งของแข็งดีขึ้น Rao และ Murty [47] ศึกษาผลกระทบของเซอร์โคเนียมและสารมลทินในการปรับปรุงสภาพเกรนละเอียดพบว่า การเติมธาตุเซอร์โคเนียมทำให้เกรนมีความละเอียดมากขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการเกิดอนุภาค  $Al_3Zr$  ที่เป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดผลึก สำหรับเหล็กและซิลิกอนมีส่วนทำให้ประสิทธิภาพในการปรับปรุงสภาพเกรนละเอียดลดลง และการเติมไทเทเนียมและโบรอนร่วมกับเซอร์โคเนียมไม่เกิดผลที่ดีต่อการปรับปรุงสภาพเกรนละเอียด ซึ่งอาจเกิดจากการรวมตัวของสารประกอบอะลูไมด์ที่ส่งผลในการทำลายอนุภาคการเกิดผลึกของอนุภาค  $TiAl_3$  และ  $TiB_2$  โดยผลกระทบของธาตุต่างๆ ในการหล่ออะลูมิเนียม Makhmudov และคณะ [48] ศึกษาผลของธาตุแมกนีเซียมและธาตุสตรอนเชียมที่มีต่อคุณสมบัติของโลหะอะลูมิเนียม พบว่าเมื่อผสมแมกนีเซียมไปทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจากเดิมระหว่าง 26.5-100 HB แต่สตรอนเชียมที่ผสมไปไม่มีผลต่อความแข็งแรง และพบว่าเมื่อผสมแมกนีเซียมร้อยละ 5.0 ถึงร้อยละ 7.0 โดยน้ำหนักทำให้โลหะอะลูมิเนียมจะมีความต้านทานการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น Yin et al. [49] ศึกษาคุณสมบัติโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียมที่ผสมแมกนีเซียมร้อยละ 5 โดยน้ำหนักด้วยการผสมธาตุสแกนเดียมและธาตุเซอร์โคเนียม โดยนำไปอบให้โครงสร้างเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenization) ที่อุณหภูมิ 470 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 13 ชั่วโมง แล้วรีดร้อนให้เหลือความหนา 4 มิลลิเมตร พบว่ากรณีที่เติมธาตุเซอร์โคเนียมร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนักทำให้เกิดอนุภาค  $Al_3Zr$  โดยในขณะหล่อโลหะหลอมเหลวเกิดการแข็งตัวช่วยทำให้ขนาดเกรนของโลหะลดลงโดยบทบาทของธาตุที่เติมลงในโลหะผสมอะลูมิเนียมแสดงในตารางที่ 1

1

2 **Table 1** Effects of Elements and Their Combinations in Aluminum Alloys

| Element                        | Effects on Aluminum Alloys                                                                           | Reference |
|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Titanium (Ti)                  | Promotes fine-grained structure and enhances mechanical properties                                   | 44,45,46  |
| Boron (B)                      | Assists in grain refinementwhen combined with Ti                                                     | 44,45,46  |
| Strontium (Sr)                 | Modifies eutectic silicon, improves mechanical properties, enhances fluidity in the semi-solid state | 46,50     |
| Magnesium (Mg)                 | Increases hardness and strength, improves corrosion resistance when used in the right proportion     | 44        |
| Scandium (Sc)                  | Refines grain structure, increases strength, improves corrosion resistance                           | 49,51     |
| Zirconium (Zr)                 | Acts as a nucleation site, refines grain, prevents grain growth at high temperatures                 | 47,52     |
| Iron (Fe)                      | Can negatively impact grain refinement, forms intermetallic compounds reducing ductility             | 47        |
| Silicon (Si)                   | Essential in Al-Si alloys, but excess Si can form brittle intermetallic compounds                    | 47        |
| Titanium + Boron               | Enhances grain refinement, improves mechanical properties by refining primary aluminum phase         | 44,45,46  |
| Scandium + Zirconium           | Prevents grain growth at high temperatures, improves thermal stability                               | 49        |
| Magnesium + Strontium          | Increases hardness and corrosion resistance, enhances fluidity                                       | 48        |
| Iron + Silicon                 | Forms intermetallic compounds, reducing ductility and mechanical properties                          | 47        |
| Titanium + Boron+<br>Zirconium | Reduces grain refinement performance                                                                 | 47        |

3

### 2.การสร้างความเครียดเพื่อช่วยให้หลอมละลาย

เทคนิคการสร้างความเครียดเพื่อให้เกิดการหลอมละลายเป็นการเตรียมโลหะขั้นต้นในสภาพของแข็ง วิธีการนี้ทำโดยการสร้างความเครียดให้เกิดขึ้นในโลหะที่อยู่ในสภาพของแข็งด้วยการขึ้นรูปเย็น เมื่อนำไปให้ความร้อนสู่สภาพกึ่งของแข็งจะทำให้เกิดผลึกใหม่เนื่องจากความเครียด และเกิดการหลอมละลายบางส่วน บริเวณขอบเกรนและเกิดการแตกหักของโครงสร้าง Primary บริเวณขอบเกรน ซึ่งลักษณะดังกล่าวจะทำให้ได้โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นอนุภาคที่กลม [53] โดย Yu et al. [54] ศึกษาสมบัติทางกลและโครงสร้างของอะลูมิเนียมเกรด 2618 ที่เกิดจากเฟส  $Al_3(Sc,Zr)$  โดยทำการขึ้นรูปเย็นจากอินกอต (Ingot) ให้เป็นแผ่นหนา 2 มิลลิเมตร นำไปอบที่ 423-773 K เป็นเวลา 1 ชั่วโมง รักษาอุณหภูมิในเตาเกลือ 783-788 K นาน 30 นาที ทำการชุบในน้ำ เมื่อนำมาตรวจสอบโครงสร้างด้วย SEM และ TEM ทำการวิเคราะห์ผล พบว่าชิ้นงานที่มีสแกนเดียมและเซอร์โคเนียมทำให้เกิดการปรับสภาพเกรนละเอียดและอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่จะสูงกว่าเกรด 2618 มากกว่า 200 K อนุภาค  $Al_3(Sc,Zr)$  ยังเป็นตัวขัดขวางการเกิดผลึกใหม่และจำกัดการโตของเกรน Horikawa et al. [55] ศึกษาผลของการเกิดการแตกร้าวระหว่างเกรนที่เกิดจากธาตุผสมปริมาณเล็กน้อยในโลหะผสม Al-5.5% Mg เมื่อผสมธาตุ Na, Ca และ Sr ในปริมาณต่างๆ แล้วทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าทั้งธาตุ Na, Ca และ Sr ที่ผสมในปริมาณตั้งแต่ 2 ppm ขึ้นไปจะทำให้โลหะผสม Al-5.5% Mg เกิดการแตกร้าวแบบผ่าเกรนต่อเนื่องไปจนถึงขอบเกรน

### 3.การเทโลหะหลอมเหลวผ่านรางเทหล่อเย็น

เทคนิคนี้ทำให้โลหะหลอมเหลวที่ไหลผ่านรางเทหล่อเย็นเกิดการแข็งตัวบางส่วนหรืออยู่ในสภาพกึ่งของแข็งแล้วไหลเข้าสู่แบบหล่อด้วยแรงโน้มถ่วง ซึ่งสภาวะดังกล่าวทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของโลหะหลอมเหลวในระหว่างเกิดกระบวนการแข็งตัว จึงเกิดนิวเคลียสจากการสัมผัสเย็นและเกิดกลไกการแตกหักของแกนของโครงสร้างเดนไดรต์ [56] การเตรียมโลหะขั้นต้นด้วยวิธีนี้มีการเตรียมเครื่องมือง่าย ต้นทุนการผลิตจึงต่ำ และสามารถเปลี่ยนแปลงขนาดรูปร่างของโลหะขั้นต้นได้ง่ายตามความต้องการ [56, 57] ถ้าออกแบบเครื่องมือเหมาะสมจะสามารถเตรียมโลหะขั้นต้นได้จำนวนหลายชิ้นต่อการเทโลหะหลอมเหลวครั้งเดียว [56-58] ทำให้โครงสร้างจุลภาคที่มีเกรนลักษณะกลมและมีขนาดเกรนที่เล็กกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำ

## อิทธิพลของตัวแปรที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติของโลหะอะลูมิเนียมผสมในสภาวะกึ่งแข็ง

กระบวนการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็งสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติทางกลและลดข้อบกพร่องจากการหล่อแบบดั้งเดิม โดยการควบคุมตัวแปรต่างๆ เช่น อุณหภูมิเท มุมเอียงของรางเทหล่อเย็น และอุณหภูมิของแม่พิมพ์ ซึ่งมีผลโดยตรงต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติของโลหะอะลูมิเนียมผสม [59, 60] ดังนั้นความเข้าใจเกี่ยวกับอิทธิพลของตัวแปรเหล่านี้จึงมีความสำคัญในการปรับปรุงกระบวนการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ลดต้นทุนการผลิต และตอบสนองความต้องการของอุตสาหกรรมต่างๆที่ใช้โลหะอะลูมิเนียมผสมเป็นส่วนประกอบสำคัญ

### 1. อุณหภูมิเหนื้โลหะ

ในกระบวนการหล่อขึ้นรูปโลหะแบบกึ่งแข็งนั้นปัจจัยที่สำคัญคืออุณหภูมิเท โดยอุณหภูมิที่เทโลหะหลอมเหลวนั้นส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคของโลหะ โดยพบว่าอุณหภูมิเทต่ำทำให้โครงสร้างที่ได้รับมีเฟสอัลฟาอะลูมิเนียมที่มีลักษณะกลมและอนุภาคนาขนาดเล็กซึ่งส่งผลดีต่อสมบัติทางกลของชิ้นงาน เช่น ความแข็งแรงและความต้านทานแรงดึง สำหรับงานวิจัยที่ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิเทต่อโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 เช่น Liu et al. [60] ศึกษาผลของอุณหภูมิเทโดยการเหนื้โลหะที่อุณหภูมิ 615, 630, และ 650 องศาเซลเซียส พบว่าการเทที่อุณหภูมิสูงทำให้เฟสอัลฟาอะลูมิเนียมมีลักษณะคล้ายดอกกุหลาบและเกรนหยาบ แต่เมื่อเหนื้โลหะที่อุณหภูมิต่ำทำให้ได้เกรนที่เล็กลงและลักษณะกลมขึ้น Haga et al. [61] พบว่าเมื่อเหนื้โลหะที่อุณหภูมิต่ำทำให้เฟสอัลฟาอะลูมิเนียมมีลักษณะกลมเนื่องจากการเกิดนิวคลีโอไที่ผนังแม่พิมพ์ซึ่งมีขนาดที่พอเหมาะและไม่หลอมละลายกลับเข้าสู่โลหะ โดยนิวคลีโอเหล่านี้จะเติบโตและเมื่อแข็งตัวเกรนจะมีลักษณะกลม Guo et al. [62] ศึกษาผลของอุณหภูมิเทและความเร็วการหมุนของท่อทรงกระบอกโดยพบว่าเมื่ออุณหภูมิเทต่ำกว่า 670 องศาเซลเซียสเกรนที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะกลมและกระจายตัวสม่ำเสมอส่งผลให้ความหนาแน่นของเกรนสูงและสามารถปรับปรุงรูปร่างของเกรนให้เล็กลงได้ ทั้งนี้เกิดจากการผสมกันอย่างรุนแรงในช่วงแรกของการแข็งตัวส่งเสริมให้เกิดนิวคลีโอที่ผนังแม่พิมพ์ซึ่งช่วยให้โครงสร้างในสภาวะกึ่งของแข็งมีความละเอียดและสมบูรณ์

### 2. รางเทหล่อเย็น

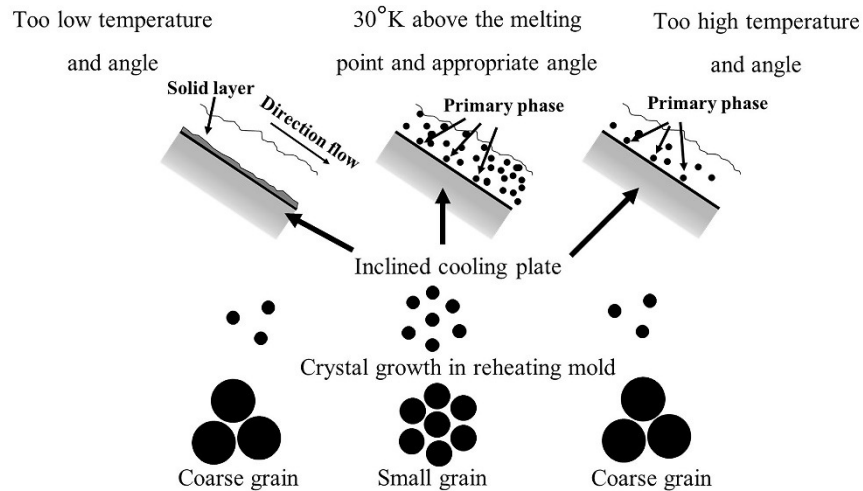
ในปัจจุบันกระบวนการหล่อแบบกึ่งแข็งแบบใช้รางเทหล่อเย็นได้รับความนิยมและได้ใช้กันอย่างแพร่หลาย [63] เนื่องจากการเตรียมเครื่องมือง่าย ต้นทุนการผลิตต่ำ และสามารถผลิตโลหะขึ้นต้นได้หลายชิ้นต่อการเทโลหะหลอมเหลวครั้งเดียว โดยตัวแปรที่ส่งผลต่อกระบวนการหล่อแบบกึ่งแข็งแบบใช้รางเทหล่อเย็น เช่น อุณหภูมิเท มุมของราง และความยาวของราง มีผลต่อโครงสร้างของผลิตภัณฑ์

#### 2.1 อุณหภูมิเท

อุณหภูมิเทของโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำกว่านั้นส่งผลทำให้ชิ้นงานภายหลังจากการหล่อนั้นมีโครงสร้างเป็นเกรนกลมและเล็กกว่าการเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูงกว่า ดังนั้นสมบัติทางกลจึงสูงกว่า โดย Toshio et al. [64] เสนอว่าการเหนื้โลหะที่อุณหภูมิต่ำกว่า โลหะหลอมเหลวจะมีอัตราการเย็นตัวของสูงกว่าซึ่งทำให้เกรนที่เกิดขึ้นมีลักษณะที่เล็กกว่าและส่งผลต่อสมบัติทางกลที่ดีขึ้น

#### 2.2 มุมเอียง

ในปัจจุบันมีมุมเอียงของรางเทหล่อเย็นยังได้รับการศึกษาอย่างต่อเนื่อง เช่น การศึกษาผลกระทบของโครงสร้างจากอุณหภูมิเทและความชันของราง Motegi et al. [65] พบว่าเมื่อเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิเทต่ำเกินไปและมุมของรางหล่อเย็นต่ำ ส่งผลให้โลหะหลอมเหลวนั้นไหลช้าและอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูงซึ่งจะทำให้เกิดเปลือกของแข็ง (Solid shell) ขึ้นบนรางเทหล่อเย็นอย่างรวดเร็ว และเมื่อการเทโลหะอย่างต่อเนื่องจะทำให้เปลือกของแข็งหนาขึ้น ซึ่งทำให้การแยกตัวของโครงสร้างกึ่งก้นเกิดได้ยากขึ้น ส่งผลให้เกิดนิวเคลียสในการเกิดโครงสร้างที่ไม่เป็นเดนไดรต์น้อยลงอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตามการเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูงเกินไปและมุมของรางหล่อเย็นสูง ส่งผลให้โลหะหลอมเหลวไหลเร็วเกินไป ส่งผลให้การเกิดของนิวเคลียสบนผิวรางหล่อเย็นเป็นไปได้ยาก โดยทั้งสองกรณีส่งผลเกรนของชิ้นงานมีขนาดใหญ่ รูปที่ 8 แสดงภาพรวมของผลของอุณหภูมิเทของโลหะหลอมเหลวและมุมเอียงของกระบวนการหล่อแบบกึ่งแข็งแบบใช้รางเทหล่อเย็น



**Figure 8** The sketch of semi-solid casting with cooling slope, showing the effects of pouring temperature and plate angle [65]

Kund และ Dutta [66] ศึกษาอุณหภูมิของรางเทหล่อเย็นและอุณหภูมิเทน้ำโลหะโดยศึกษากับ อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม A356 โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของรางเทหล่อเย็นเป็น 30, 45 และ 60 องศา ผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิเทน้ำโลหะเดียวกันเมื่ออุณหภูมิของรางเทหล่อเย็นมากขึ้นส่งผลให้ความเร็วการไหลของน้ำโลหะสูงขึ้น สัดส่วนของแข็งบริเวณปลายรางเทจะน้อยลง นั่นคืออุณหภูมิที่ปลายรางเทสูงขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานมีขนาดเกรนที่ใหญ่ Guan et al. [67] ศึกษาอุณหภูมิของรางเทหล่อเย็นและอุณหภูมิเทน้ำโลหะที่เหมาะสมกับรางหล่อเย็นที่ได้ปรับปรุงขึ้นเพื่อใช้ในการเตรียมโลหะ A1-3 wt% Mg กึ่งแข็งโดยปรับปรุงให้ผิวของรางหล่อเย็นมีลักษณะเป็นลูกคลื่นที่มีรัศมีความโค้งเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 8 โดยอุณหภูมิของรางหล่อเย็นที่ศึกษามีมุม  $\theta$  เท่ากับ 30, 45 และ 60 องศา อุณหภูมิเทน้ำโลหะที่ใช้ได้แก่ 650-700 องศาเซลเซียส โดยผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของรางหล่อเย็นและอุณหภูมิเทจะส่งผลให้อุณหภูมิของโลหะผสมที่ทางออกของรางหล่อเย็นสูงขึ้นตามด้วย ซึ่งทำให้ช่วงเวลาการแข็งตัวของชิ้นงานในแบบหล่อนานขึ้นส่งผลให้โครงสร้างที่ได้มีขนาดเกรนที่ใหญ่ และเมื่ออุณหภูมิของรางหล่อเย็นเพิ่มขึ้นความเร็วของน้ำโลหะที่ทางออกของรางหล่อเย็นก็จะเพิ่มขึ้น ทำให้การไหลของน้ำโลหะเข้าสู่แม่พิมพ์เป็นลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งน้ำโลหะกึ่งแข็งจะมีการจับเอาอากาศเข้าไปและเมื่อไหลเข้าสู่แม่พิมพ์จะทำให้ชิ้นงานสำเร็จมีรูพรุนมากกว่าชิ้นงานที่ได้จากการเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิของรางหล่อเย็นต่ำกว่า และสำหรับการเตรียมโลหะ A1-3 wt% Mg กึ่งแข็งให้ได้คุณภาพที่ตรงตามความต้องการของรางหล่อเย็นที่เหมาะสมควรมีมุม  $\theta = 45$  องศา

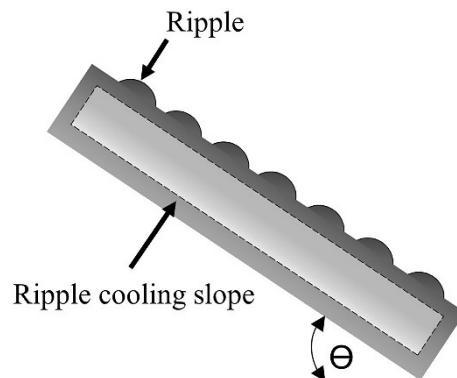


Figure 9 The sketch of semi-solid casting with rippled cooling slope [68]

Taghavi และ Ghassemi [68] ศึกษาผลของมุมเอียงของรางเทหล่อเย็นต่อโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียม A356 พบว่าเมื่อเทน้ำโลหะผ่านรางเทหล่อเย็นที่ทำมุม 30 องศากระนาบพื้นพบโครงสร้างเดนไดรต์ที่มีขนาดละเอียด แต่เมื่อเพิ่มมุมของรางเทหล่อเย็นเป็น 40 และ 50 องศา พบว่าโครงสร้างเดนไดรต์สามารถเปลี่ยนเป็นโครงสร้างลักษณะกลมได้ แต่เมื่อเพิ่มมุมของรางเทหล่อเย็นเป็น 60 องศาพบว่าโครงสร้างมีลักษณะกลมแต่ขนาดของเฟสปฐมภูมิหยาบกว่าที่มุม 40 และ 50 องศา เนื่องจากการเพิ่มมุมจาก 30 องศาเป็น 40 และ 50 องศาทำให้อัตราการเฉือน (Shear Rate) และการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้จำนวนของนิวเคลียสที่เกิดบนรางเทหล่อเย็นมีมากขึ้นด้วยจึงทำให้โครงสร้างสุดท้ายที่ได้มีลักษณะกลมและละเอียด แต่เมื่อเพิ่มเป็นมุม 60 องศาเวลาการเฉือนน้ำโลหะบนรางเทหล่อเย็นและการถ่ายเทความร้อนลดลงทำให้จำนวนนิวเคลียสเกิดขึ้นลดลงด้วย ดังนั้นโครงสร้างสุดท้ายของชิ้นงานที่ได้มีเกรนใหญ่และมีความกลมมีค่าต่ำ

### 2.3 ความยาวรางเท

ความยาวของรางเทหล่อเย็นมีผลต่อปริมาณนิวเคลียสที่เกิดขึ้นในโลหะเหลวกึ่งแข็ง โดยจากการศึกษาของ Toshio et al. [69] แสดงถึงผลของความยาวของรางเทหล่อเย็นที่มีความยาวต่างกัน โดยได้ทดลองกับความยาว 100 และ 300 มิลลิเมตรและพบว่ารางเทหล่อเย็นที่มีความยาว 300 มิลลิเมตรจะทำให้ได้ชิ้นงานที่มีสมบัติทางกลที่ดีกว่าชิ้นงานที่ได้จากการเทผ่านรางหล่อเย็นที่มีความยาว 100 มิลลิเมตร เนื่องจากการไหลของน้ำโลหะบนรางเทหล่อเย็นที่มีความยาว 300 มิลลิเมตรจะทำให้เกิดนิวเคลียสบนผิวของรางหล่อเย็นที่มากกว่ารางหล่อเย็นที่ยาว 100 มิลลิเมตรส่งผลให้โครงสร้างสุดท้ายที่ได้มีลักษณะโครงสร้างเกรนกลมที่ละเอียดกว่า

### 3. อุณหภูมิแม่พิมพ์

เนื่องจากโลหะกึ่งแข็งจะทำการเย็นตัวในแม่พิมพ์ ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนจากโลหะกึ่งแข็งเพื่อเกิดการแข็งตัวจึงมีความสำคัญต่อโครงสร้างและสมบัติทางกลของชิ้นงาน Ohno et al. [70] พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์ ชิ้นงานจะมีขนาดเกรนที่ใหญ่ขึ้นเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนช้าลงและโลหะมีอัตราการเย็นตัวน้อยระหว่างกระบวนการแข็งตัว นอกจากนี้ผลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ต่อค่าความแข็งชิ้นงานพบว่าความแข็งของชิ้นงานลดลงเมื่ออุณหภูมิแม่พิมพ์สูงขึ้น เนื่องจากการเย็นตัวน้อยระหว่างกระบวนการ

แข็งตัว Maleki et al. [71] ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ต่อโครงสร้างจุลภาคของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด LM13 พบว่าเมื่อลดอุณหภูมิแม่พิมพ์ขนาดเฉลี่ยของเฟสยูเทคติกลดลง ผลการศึกษาของ Awedaet al [72] อธิบายว่า การลดอุณหภูมิแม่พิมพ์ส่งผลให้เวลาในการแข็งตัว (Solidification Time) ของโลหะลดลงและเป็นการเพิ่มอัตราการเย็นตัวของชิ้นงาน ดังนั้นโลหะกึ่งแข็งที่เย็นตัวในแม่พิมพ์ที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ต่ำกว่าจะมีสมบัติทางกลที่สูงกว่าทำให้สามารถควบคุมโครงสร้างจุลภาคของโลหะและสมบัติทางกลได้ดี

## สรุป

กระบวนการหล่อกึ่งแข็งของโลหะถือเป็นการปฏิบัติการขึ้นรูปโลหะแบบหนึ่ง กล่าวคือเป็นกระบวนการขึ้นรูปของโลหะในสถานะกึ่งของแข็งหรือมีทั้งเฟสของแข็งและของเหลวอยู่ร่วมกัน โดยกระบวนการหล่อกึ่งแข็งของโลหะ เช่น อะลูมิเนียมผสม เมื่อมีการควบคุมตัวแปรต่างๆ เช่น อุณหภูมิเท มุม และความยาวรางเท อุณหภูมิแม่พิมพ์ และอัตราการเย็นตัวให้เหมาะสม จะสามารถปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของโลหะผสมหล่อได้ดี โดยมีงานวิจัยต่างๆ แสดงผลของตัวแปร เช่น การใช้อุณหภูมิเทต่ำทำให้ได้อนุภาคของแข็งในสารละลายของเหลวที่มีลักษณะกลม และชิ้นงานจากกระบวนการหล่อกึ่งแข็งจะมีเกรนที่เล็ก ซึ่งช่วยเพิ่มสมบัติทางกลของชิ้นงาน นอกจากนี้การเติมธาตุผสม เช่น ไทเทเนียม โบรอน และสตรอนเชียม ยังช่วยในการปรับสภาพเกรนให้ละเอียดและเพิ่มความสามารถในการไหลของโลหะในสภาวะกึ่งแข็ง ทำให้กระบวนการหล่อมีประสิทธิภาพและสามารถลดข้อบกพร่อง เช่น การเกิดรูพรุนได้

ถึงแม้ว่ากระบวนการหล่อกึ่งแข็งจะมีข้อได้เปรียบหลายประการ เช่น การลดการเกิดรูพรุนและเพิ่มสมบัติทางกล แต่อย่างไรก็ตามข้อเสียเปรียบของกระบวนการนี้ เช่น ต้นทุนการผลิตที่สูงและความซับซ้อนของการควบคุมกระบวนการนั้นจำกัดการนำไปใช้ในบางอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามการพัฒนากระบวนการหล่อกึ่งแข็ง เช่น กระบวนการหล่อแบบที่โซคาสต์และกระบวนการหล่อแบบรีโอคาสต์ได้แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มในการผลิตโลหะอะลูมิเนียมที่มีสมบัติสูงด้วยต้นทุนที่ต่ำลงแต่ประสิทธิภาพที่สูงขึ้น โดยการทำควาเข้าใจในอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติของโลหะอะลูมิเนียมเป็นสิ่งสำคัญที่จะช่วยให้กระบวนการหล่อกึ่งแข็งมีการพัฒนาและขยายการใช้งานในอนาคตอย่างมีประสิทธิภาพ

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะพาณิชย์นาวิชาตินมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา สำหรับเงินสนับสนุนสำหรับกลุ่มวิจัยวัสดุศาสตร์การกัดกร่อนและการวิเคราะห์เชิงวิศวกรรม (MCEA)

## References

- [1] Midson, S. P. (2018). Semisolid Metal Casting. In Anderson, K., et al. (Eds.). *ASM Handbook: Aluminum Science and Technology* (Vol. 2A, p. 400–408). ASM International.
- [2] Ji, S., et al. (2022). An Overview on the Process Development and the Formation of Non-Dendritic Microstructure in Semi-Solid Processing. *Metals*, 12, 1044.
- [3] Flemings, M. C., et al. (1976). Rheocasting. *Materials Science and Engineering*, 25, 103–117.
- [4] Jarfors, A. E. W. (2020). A Comparison Between Semisolid Casting Methods for Aluminium Alloys. *Metals*, 10, 1368.

- [5] Binesh, B., et al. (2018). Microstructure and Properties of Semi-Solid Aluminum Alloys: A Literature Review. *Metals*, 8, 181.
- [6] Balan, T., et al. (2017). A New Route for Semi-Solid Steel Forging. *CIRP Annals*, 66(1), 297–300.
- [7] Aisman, D., et al. (2016). Semi-Solid Processing and Its As Yet Unexplored Potential. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 118, 012020.
- [8] Li, G., et al. (2020). Current Progress in Rheoforming of Wrought Aluminum Alloys: A Review. *Metals*, 10, 238.
- [9] Kaufmann, H., et al. (2001). Fundamentals of the New Rheocasting Process for Magnesium Alloys. *Advanced Engineering Materials*, 3(12), 963–967.
- [10] Fan, Z., et al. (2002). Semisolid Metal Processing. *International Materials Reviews*, 47(2), 49–85.
- [11] Rodjanakid, K., et al. (2024). A Case Study of Thermodynamics and Electrochemical Corrosion Behavior of Al 6061-T6. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 14(40), 26–37.
- [12] Salleh, M. S., et al. (2013). An Overview of Semisolid Processing of Aluminium Alloys. *ISRN Materials Science*, 2013, 679820.
- [13] Chang, Z., et al. (2021). Review on Criteria for Assessing the Processability of Semisolid Alloys. *Materials Letters*, 282, 128835.
- [14] Tamayo, D. V., et al. (2022). The Thixoforming Process Window for Al-Si-Zn Alloys Using the Differentiation Method: The Role of Si, Heating Rate and Sample Mass. *Metals*, 12, 734.
- [15] Zhang, D., et al. (2016). What Is the Process Window for Semi-Solid Processing? *Metallurgical and Materials Transactions A*, 47, 1–5.
- [16] Côté, P., et al. (2019). Case Study: Engine Bracket Made by Rheocasting Using the Seed Process. *Solid State Phenomena*, 285, 441–445.
- [17] Atkinson, H. V., et al. (2012). Alloys for Semi-Solid Processing. *Solid State Phenomena*, 192-193, 16–27.
- [18] Wannasin, J., et al. (2019). Principle and Applications in Die Casting. *Solid State Phenomena*, 285, 470–475.
- [19] Mohammed, M. N. (2014). An Overview of Semi-Solid Metal Processing. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 8(19), 369–373.
- [20] Salleh, M. S., et al. (2014). Microstructure and Mechanical Properties of Thixoformed A319 Aluminium Alloy. *Materials & Design*, 64, 142–152.
- [21] Kopp, R., et al. (2001). Different Concepts of Thixoforging and Experiments for Rheological Data. *Journal of Materials Processing Technology*, 111, 48–52.
- [22] Hirt, G., et al. (2009). *Thixoforming*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

- 
- [23] Pola, A. (2018). Microstructure and Properties of Semi-Solid Aluminum Alloys: A Literature Review. *Metals*, 8, 181.
- [24] Apelian, D. (2002). Semi-Solid Processing Routes and Microstructure Evolution. In *The 7<sup>th</sup> International Conference on Advanced Semi-Solid Processing of Alloys and Composites* (p. 25–30). 24–28 September, 2002, Tsukuba, Japan.
- [25] Terzi, S., et al. (2010). In Situ Microtomography Investigation of Microstructural Evolution in Al-Cu Alloys During Holding in Semi-Solid State. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20, 734–738.
- [26] Chowwanonthapunya, T., et al. (2016). Hot Tearing in Metal Casting Alloys: A Review. *Journal of Advanced Development in Engineering and Science*, 6(17), 1–12. (in Thai)
- [27] Das, A., et al. (2002). Morphological Development of Solidification Structures Under Forced Fluid Flow: A Monte-Carlo Simulation. *Acta Materialia*, 50, 4571–4585.
- [28] Chen, G., et al. (2015). Microstructure Evolution and Tensile Mechanical Properties of Thixoformed High Performance Al-Zn-Mg-Cu Alloy. *Metals and Materials International*, 21, 897–906.
- [29] Curle, U. A., et al. (2019). Semi-Solid Casting of Pure Magnesium. *Solid State Phenomena*, 285, 464–469.
- [30] Peeratatsuan, C., et al. (2021). Microstructure and Rheological Properties of a Semisolid A356 Alloy With Erbium Addition. *Journal of Rare Earths*, 40, 1148–1155.
- [31] Mao, W. M., et al. (2013). Preparation and Rheo-Die Casting of Semi-Solid A356 Aluminum Alloy Slurry Through a Serpentine Pouring Channel. *Solid State Phenomena*, 192–193, 404–409.
- [32] Govender, G., et al. (2005). Near Net Shape Forming Using Semi-Solid Metal Forming. In *The 6<sup>th</sup> Annual International Conference on Rapid Product Development* (p. 35). 25–28 October, 2005, CSIR International Convention Centre, Pretoria, South Africa.
- [33] Ruvalcaba, D., et al. (2007). In Situ Observations of Dendritic Fragmentation Due to Local Solute-Enrichment During Directional Solidification of an Aluminum Alloy. *Acta Materialia*, 55, 4287–4292.
- [34] Flemings, M. C. (1991). Behavior of Metal Alloys in the Semisolid State. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 22, 957–981.
- [35] Vogel, A., et al. (1979). Stir-Cast Microstructure and Slow Crack Growth. In *International Conference on Solidification* (p. 581). 18–21, July, 1979, London, UK.
- [36] Hellawell, A., et al. (1996). Grain Evolution in Conventional Rheocasting. In *The 4<sup>th</sup> International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*. 19–21 June, 1996, Sheffield, UK.
- [37] Stefanescu, D. M. (2015). *Science and engineering of casting solidification* (3<sup>rd</sup> ed.). Springer.

- 
- [38] Haga, T., et al. (2001). Casting of Aluminum Alloy Ingots for Thixoforming Using a Cooling Slope. *Journal of Materials Processing Technology*, 118(1-3), 169–172.
- [39] Mohammed, M. N., et al. (2013). Semisolid Metal Processing Techniques for Nondendritic Feedstock Production. *The Scientific World Journal*, 2013, 752175.
- [40] Qi, M., et al. (2020). Microstructures Refinement and Mechanical Properties Enhancement of Aluminum and Magnesium Alloys by Combining Distributary-Confluence Channel Process for Semisolid Slurry Preparation With High Pressure Die-Casting. *Journal of Materials Processing Technology*, 285, 116800.
- [41] Motegi, T., et al. (2004). New Semi-Solid Casting of Copper Alloys Using an Inclined Cooling Plate. In *The 8th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*. 21–23 September, 2004, Limassol, Cyprus.
- [42] Kirkwood, D. H. (1994). Semisolid Metal Processing. *International Materials Reviews*, 39, 173–189.
- [43] Wu, S., et al. (2012). Microstructure and Property of Rheocasting Aluminum-Alloy Made With Indirect Ultrasonic Vibration Process. *Materials Letters*, 73, 150–153.
- [44] Peeratatsuwan, C., et al. (2024). Effects of Mg Content and Recycled Time on the Microstructure and Mechanical Properties of A356 Aluminum Casting Alloy Originally Refined by Al-5Ti-1B. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 34(16), 17163-17171.
- [45] Chowwanonthapunya, T. (2023). The Influence of Fe on Grain Refinement of Recycled A356 Alloy Initially Refined by Al-5Ti-1B Master Alloy. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 20(1), 6393.
- [46] Nafisi, S., et al. (2006). Microstructure and Rheological Behavior of Grain Refined and Modified Semi-Solid A356 Al-Si Slurries. *Acta Materialia*, 54, 3503–3511.
- [47] Rao, A. A., et al. (2012). Role of Zirconium and Impurities in Grain Refinement of Aluminium With Al-Ti-B. *Materials Science and Technology*, 13(9), 769–777.
- [48] Makhmudov, M., et al. (2003). Effects of Additions of Magnesium and Strontium on the Properties of Aluminum. *Materials Characterization*, 27(10), 587–589.
- [49] Yin, Z., et al. (2000). Effect of Minor Sc and Zr on the Microstructure and Mechanical Properties of Al-Mg Based Alloys. *Materials Science and Engineering A*, 280, 151–155.
- [50] Samuel, A. M., et al. (2017). A Metallographic Study of Grain Refining of Sr-Modified 356 Alloy. *International Journal of Metalcasting*, 11, 305–320.
- [51] Wongkhuenkaew, N. (2024). Enhancing Electrochemical Corrosion Resistance in Al-6Ni Alloys Through Trace Sc Additions. *Journal of Materials Research and Technology*, 30, 3066–3078.
- [52] Shabestari, S. G. (2022). Effect of Al-5Ti-1B and Zr Grain Refiners on the Solidification Characteristics and Microstructure of Al-6Mg Alloy Studied Through Thermal Analysis.

- Thermochimica Acta*, 711, 179200.
- [53] Yu, K. (2004). Mechanical Properties and Microstructure of Aluminium Alloys 2618 With Al<sub>3</sub>(Sc,Zr) Phases. *Materials Science and Engineering A*, 368, 88–93.
- [54] Horikawa, K., et al. (2001). Intergranular Fracture Caused by Trace Impurities in an Al-5.5% Mg Alloy. *Acta Materialia*, 49, 3981–3989.
- [55] Birol, Y. (2007). A357 Thixoforming Feedstock Produced by Cooling Slope Casting. *Journal of Materials Processing Technology*, 186, 94–101.
- [56] Langlais, J., et al. (2006). The SEED Technology for Semi-Solid Processing of Aluminum Alloys: A Metallurgical and Process Overview. *Solid State Phenomena*, 116-117, 472–477.
- [57] Tzimas, E., et al. (2000). Evolution of Near-Equiaxed Microstructure in the Semisolid State. *Materials Science and Engineering A*, 289, 228–240.
- [58] Wannasin, J., et al. (2008). Development of a Semi-Solid Metal Processing Technique for Aluminium Casting Applications. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 30, 215–220.
- [59] Canyook, R., et al. (2012). Characterization of the Microstructure Evolution of a Semi-Solid Metal Slurry During the Early Stages. *Acta Materialia*, 60, 3501–3510.
- [60] Liu, D., et al. (2003). Microstructural Evolution and Tensile Mechanical Properties of Thixoformed High Performance Aluminium Alloys. *Materials Science and Engineering A*, 361, 213–224.
- [61] Haga, T., et al. (2002). Simple Rheocasting Processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 130–131, 594–598.
- [62] Guo, H. M. (2006). Rheocasting of A356 Alloy by Low Superheat Pouring With a Shearing Field. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 19(5), 328–334.
- [63] Khosravi, H., et al. (2015). Comparison of Microstructure and Wear Resistance of A356–SiCp Composites Processed Via Compocasting and Vibrating Cooling Slope. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 25, 2490–2498.
- [64] Toshio, H. (2002). Simple Rheocasting Processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 130-131, 594–598.
- [65] Motegi, T., et al. (2004). New Semi-Solid Casting of Copper Alloys Using an Inclined Cooling Plate. In *The 8<sup>th</sup> International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites (S2P)* (Session 16-04). 21–23 September, 2004, Limassol, Cyprus.
- [66] Kund, N. K. (2010). Numerical Simulation of Solidification of Liquid Aluminium Alloy Flowing on Cooling Slope. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20(3), 898–905.
- [67] Guan, R., et al. (2007). Three-Dimensional Analysis of the Modified Sloping Cooling/Shearing Process. *Journal of University of Science and Technology Beijing*,

- 14(2), 146–150.
- [68] Taghavi, F., et al. (2009). Study on the Effects of the Length and Angle of Inclined Plate on the Thixotropic Microstructure of A356 Aluminum Alloy. *Materials & Design*, 30(5), 1762–1767.
- [69] Toshio, H., et al. (2001). Casting of Aluminum Alloy Ingots for Thixoforming Using a Cooling Slope. *Journal of Materials Processing Technology*, 118(1-3), 169–172.
- [70] Ohno, A., et al. (1980). *Grain Size Control in Castings*. The Metals Society, University of Warwick.
- [71] Maleki, A., et al. (2009). Effects of Squeeze Casting Parameters on the Microstructure of LM13 Alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(8), 3790–3797.
- [72] Aweda, J. O., et al. (2009). Determination of Temperature Distribution in Squeeze Cast Aluminium Using the Semi-Empirical Equations' Method. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(17), 5751–5759.