

อิทธิพลของการบ่มแข็งสองครั้งที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งเกรด 2024

Influence of Double Artificial Aging on Microstructure and Mechanical Properties of Semi Solid Aluminium Alloy 2024

สิริพร ขันทองคำ¹ สมศักดิ์ ศิวคำรณพงษ์^{1*} และธวัชชัย ปูลูกพล²

Siriporn Khantongkum¹ Somsak Siwadamrongpong^{1*} and Thawatchai Plookphon²

Received: May 1, 2019; Revised: September 17, 2019; Accepted: September 26, 2019

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือศึกษาผลของการบ่มแข็งแบบหนึ่งครั้งและสองครั้งที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งเกรด 2024 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนแบบ T6 โดยอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 505 °C นาน 4 ชั่วโมง ตามด้วยการชุบน้ำที่อุณหภูมิห้อง และในการบ่มแข็งหนึ่งครั้งจะบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 6 9 12 15 และ 18 ชั่วโมง ตามลำดับ ในขณะที่การบ่มแข็งสองครั้งจะบ่มแข็งครั้งแรกที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และบ่มแข็งครั้งที่สองที่อุณหภูมิ 170 °C เป็นเวลา 0.5 1 1.5 2 2.5 3 3.5 และ 4 ชั่วโมง ตามลำดับ และศึกษาผลที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคภายหลังการบ่มแข็งด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง รวมถึงศึกษาผลที่มีต่อสมบัติทางกลด้วยการทดสอบค่าความแข็งแบบร็อคเวลล์สเกลบี และทดสอบสมบัติความต้านแรงดึงสูงสุดด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างจุลภาคภายหลังการบ่มแข็งนั้นประกอบด้วยเฟสยูเทคติกที่มีการกระจายตัวตามขอบเกรนของเฟสแอลฟาอะลูมิเนียมที่มีลักษณะเป็นเกรนก่อนกลม และในการบ่มแข็งหนึ่งครั้งให้ค่าความแข็งสูงสุดที่เวลาในการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 15 ชั่วโมง ให้ค่าความแข็งและค่าความต้านแรงดึงสูงสุด 82.7 HRB และ 395.3 MPa ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันการบ่มแข็งสองครั้งที่เงื่อนไขการบ่มแข็งครั้งแรกที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และบ่มแข็งครั้งที่สองที่อุณหภูมิ 170 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ให้ค่าความแข็งและค่าความต้านแรงดึงสูงสุด 108 HRB และ 415.70 MPa ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อนำค่าสมบัติทางกล ทั้งค่าความแข็งและค่าความต้านแรงดึงสูงสุดมาเปรียบเทียบกับระหว่างการบ่มแข็งหนึ่งครั้งกับการบ่มแข็งสองครั้งพบว่า การบ่มแข็งสองครั้งให้ค่าสมบัติทางกลที่ดีกว่าและใช้เวลาในการบ่มแข็งน้อยกว่า

คำสำคัญ : การบ่มแข็ง; อะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง; อะลูมิเนียมเกรด 2024; เฟสยูเทคติก; เฟสแอลฟาอะลูมิเนียม

¹ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

² คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา

¹ School of Engineering, Suranaree University of Technology

² Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla

* Corresponding Author E - mail Address: somsaksi@sut.ac.th

Abstract

The purpose of this research was to study the influence of one step artificial aging and two step aging on microstructure and mechanical properties of semi-solid aluminium alloy 2024. The samples were taken in solution heat treatment at 505 °C for 4 hours followed by quenching in the water at room temperature. The one step aging was carried out at 190 °C for 6, 9, 12, 15 and 18 hours, respectively. While, two step aging were initially aged at 110 °C for 8 h (first aging step) and then aged at 170 °C for 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5 and 4 hours (second aging step), respectively. The microstructure of the samples was examined using the optical microscopy (OM). Hardness test (Rockwell scale B) and ultimate tensile strength were to evaluate mechanical properties. The results showed that at after artificial aging process the microstructure of semi-solid aluminium alloy 2024 consist of eutectic phase which distributed at the grain boundary of globular alpha-aluminium grain (α -Al). The one step aging at 190 °C for 15 hours provided both maximum hardness and ultimate tensile strength of 82.7 HRB and 395.3 MPa, respectively. As the same time, two step aging at initially on aged at 110 °C for 8 hours and then aged at 170 °C for 1 hour yielded both maximum hardness and ultimate tensile strength of 108 HRB and 415.70 MPa, respectively. It was obvious that both hardness and ultimate tensile strength of two step aging were higher than that of one step aging with and lesser time for artificial aging.

Keywords: Artificial Aging; Semi-Solid Aluminium Alloy; Aluminium Alloy 2024; Eutectic Phase; Alpha-Aluminium

บทนำ

เนื่องจากความต้องการในการใช้ผลิตภัณฑ์โลหะผสมอะลูมิเนียมที่เพิ่มมากขึ้น รวมถึงความต้องการในการเพิ่มประสิทธิภาพของชิ้นส่วนต่าง ๆ เพื่อการใช้งานของอุปกรณ์ เครื่องมือ เครื่องจักร โครงสร้างทางวิศวกรรม ชิ้นส่วนยานยนต์ หรือแม้แต่ชิ้นส่วนอากาศยาน โลหะผสมอะลูมิเนียมจึงเป็นโลหะที่มีการนำมาใช้ประโยชน์เป็นอันดับสองรองจากเหล็ก เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นหลายประการด้วยกัน เช่น มีน้ำหนักเบา แข็งแรงทนทาน ยึดตัวได้ง่าย มีความเหนียวสูง ทนต่อการเกิดสนิมและการกัดกร่อน นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี ง่ายต่อการขึ้นรูป และที่สำคัญคือไม่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ ส่งผลให้โลหะผสมอะลูมิเนียมเป็นวัสดุหลักของการออกแบบเพื่อการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมหลายประเภท ได้แก่ อุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ อุตสาหกรรมโครงสร้าง อุตสาหกรรมชิ้นส่วนอากาศยาน อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ชิ้นส่วนหรือส่วนประกอบต่าง ๆ ที่เคยถูกผลิตจากโลหะในกลุ่มเหล็กซึ่งมีน้ำหนักมากกำลังถูกพิจารณาเปลี่ยนเป็นผลิตจากโลหะผสม โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลุ่มโลหะที่มีความหนาแน่นต่ำ โลหะผสมอะลูมิเนียมจึงเป็นโลหะที่มีความเป็นไปได้มากที่สุดที่ถูกนำไปใช้

งานในหลายอุตสาหกรรมมากเป็นอันดับต้น ๆ และมีแนวโน้มสูงขึ้น [1] อีกทั้งสามารถขึ้นรูปได้หลายวิธี เช่น การหล่อขึ้นรูป (Casting) การทุบขึ้นรูป (Forging) การรีดขึ้นรูป (Rolling) การอัดรีดขึ้นรูป (Extrusion) เป็นต้น เพื่อสามารถนำไปใช้ในสภาวะงานที่ต้องการและงานที่เหมาะสม และที่สำคัญ อะลูมิเนียมสามารถรวมตัวกับโลหะอื่นเป็นโลหะผสมทำให้สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อน [2] จึงทำให้มีความต้องการในการใช้โลหะผสมอะลูมิเนียมในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เพิ่มขึ้นอย่างมาก และในขณะเดียวกันเมื่อมีการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อน จะส่งผลให้สามารถนำไปใช้ในสภาวะงานที่ต้องการและงานที่เหมาะสมได้มากขึ้น ดังนั้นการปรับปรุงสมบัติทางกลเพื่อให้ได้สมบัติที่เหมาะสมต่อการใช้งาน ด้วยกรรมวิธีทางความร้อนเป็นทางเลือกหนึ่งในการปรับปรุงสมบัติของโลหะผสมอะลูมิเนียม

การปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนของโลหะผสมอะลูมิเนียมที่เป็นที่นิยมเพื่อเพิ่มสมบัติทางกลคือ กรรมวิธีทางความร้อนแบบ T6 ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอน Solution Treat, Quenching และ Artificial Aging แต่ทั้งนี้ในขั้นตอนของการบ่มแข็ง (Artificial Aging) มักใช้เวลานานในการบ่มแข็งเพื่อให้ได้สมบัติทางกลที่ดีขึ้น โดยโลหะผสมอะลูมิเนียมที่สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลได้ด้วยกรรมวิธีทางความร้อนคือ Wrought Aluminium โดยเฉพาะอะลูมิเนียมผสมทองแดง เกรด 2024-T6 มีนักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาวิจัยเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลและการเปรียบเทียบกระบวนการทางความร้อนด้วยการศึกษาอิทธิพลของการบ่มแข็งที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติของโลหะผสมอะลูมิเนียมด้วยวิธีการที่มีการบ่มแข็งหนึ่งครั้งและมากกว่าหนึ่งครั้ง เช่น [3] ได้ศึกษาผลของการบ่มแข็งที่มีต่อสมบัติทางกลของชิ้นส่วนอากาศยาน เกรด 2024 โดยกรรมวิธีทางความร้อนแบบ T6 โดยสภาวะที่ทำให้ค่าสมบัติทางกลดีที่สุดคือ อบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 505 °C นาน 1 ชั่วโมง บ่มแข็งที่อุณหภูมิ 190 °C นาน 12 ชั่วโมง [4] ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการทางความร้อนที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียม 2024 ที่ได้จากการขึ้นรูปแบบกึ่งของแข็ง พบว่าสภาวะอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 480 °C นาน 14 ชั่วโมง และบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 175 °C นาน 36 ชั่วโมง มีความแข็งแรงสูงสุดที่ 77.7 HRB [5] ได้บ่มแข็งโลหะผสมอะลูมิเนียม-สังกะสี-แมกนีเซียม โดยใช้การบ่มแข็งสองขั้นตอนที่อุณหภูมิ 70 และ 135 °C ที่เวลาต่างกัน ซึ่งจะนำโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 7020 มาอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 475 °C นาน 24 ชั่วโมง และชุบเย็นใน 3 ตัวกลาง ได้แก่ น้ำแข็ง น้ำเย็น และอากาศ จากนั้นบ่มแข็งตามธรรมชาติเป็นเวลา 84 ชั่วโมง ผลปรากฏว่าการชุบในน้ำเย็นจะทำให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดหลังการบ่มแข็งหนึ่งครั้งที่อุณหภูมิ 135 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ชิ้นงานมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัว 18.82 เปอร์เซ็นต์ ค่าความแข็งแรงครากเท่ากับ 362.32 MPa และเฟสพรีซิพิตมีขนาดเล็ก ส่วนการบ่มแข็งสองขั้นตอนที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 135 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง มีปริมาณสัดส่วนของเฟสพรีซิพิตที่สูงขึ้น ค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นเท่ากับ 392.78 MPa และชิ้นงานมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัว 18.60 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งยังคงความเหนียวไว้ เฟสพรีซิพิตมีความหนาแน่นสูงทำให้การเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันต่ำและความแข็งแรงดึงสูงสุดที่ได้จากการบ่มแข็งสองขั้นตอนมีค่ามากกว่าการบ่มครั้งเดียว และในปี ค.ศ. 2007 [6] ได้ศึกษาผลของการบ่มแข็ง 3 ครั้งของโลหะผสมอะลูมิเนียม โดยในการบ่มแข็งครั้งที่หนึ่งและครั้งที่สองเพื่อปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรง โดยครั้งที่หนึ่งบ่มแข็งที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 °C ช่วงเวลาระหว่าง 10 นาทีถึง 8 ชั่วโมง และการบ่มแข็งครั้งที่สองบ่มที่อุณหภูมิต่ำกว่า 70 °C โดยใช้เวลานาน 7 วัน จากนั้นบ่มแข็งครั้งที่สามเพื่อให้เกิดเฟส S (Al_2CuMg)

(Laths) โดยใช้อุณหภูมิเดียวกับการบ่มแข็งครั้งที่หนึ่ง ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเป็น 153 HV ภายหลังการบ่มแข็งครั้งที่สาม ปี ค.ศ. 2009 [7] ได้ทำการเปรียบเทียบการบ่มแข็งสองขั้นตอน (Double Aging) กับ Thermo Mechanical ของโลหะผสมอะลูมิเนียมอัดขึ้นรูปเกรด 7075 ขนาด $5.08 \times 0.635 \text{ cm}^2$ โดยการนำชิ้นงานทุกชิ้นมาอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 490°C เป็นเวลา 30 นาที และชุบเย็นในน้ำ สำหรับการบ่มแข็งสองขั้นตอนจะบ่มแข็งครั้งแรกที่อุณหภูมิ 121°C เป็นเวลา 4 - 420 นาที และชุบเย็นในน้ำ จากนั้นบ่มแข็งครั้งที่สองที่อุณหภูมิ 177°C ที่เวลาต่าง ๆ กัน สำหรับ Thermo Mechanical จะบ่มแข็งสองขั้นตอนและรีดให้เปลี่ยนรูปที่ 5 25 และ 50 % ผลปรากฏว่าที่อุณหภูมิ 121°C การเพิ่มเวลาการบ่มแข็งช่วงแรกเป็น 55 นาที จะได้ค่าความแข็งสูงสุด 191 HV ส่วนอิทธิพลของ Thermo Mechanical จะมีค่าความแข็งแรงดึงมากกว่าการบ่มแข็งเดียวหรือการบ่มสองขั้นตอนเนื่องมาจากการรีดเย็น อย่างไรก็ตามถึงแม้การบ่มแข็งสองขั้นตอนจะมีความแข็งที่จุดครากและความทนแรงดึงต่ำกว่า แต่ให้ค่าความเหนียวสูงสุด ต่อมาในปี ค.ศ. 2015 [8] ได้ศึกษาผลของการบ่มแข็งสองขั้นตอนที่มีต่อสมบัติทางกลของโลหะผสมอะลูมิเนียม 2219 สำหรับการบ่มแข็งเพียงครั้งเดียวเริ่มจากการอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 540°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และชุบเย็นในน้ำ รวมถึงการให้เย็นตัวในอากาศและบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 190°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง สำหรับสภาวะที่มีการบ่มแข็งสองครั้งนั้นมีการอบละลายเฟสที่อุณหภูมิและเวลาเดียวกัน โดยการเย็นตัวในอากาศตามด้วยการบ่มแข็งครั้งแรกที่อุณหภูมิ $80 - 120^\circ\text{C}$ ช่วงเวลา 16 - 120 ชั่วโมง และบ่มแข็งครั้งที่สองที่อุณหภูมิ 190°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่าสภาวะการบ่มแข็งครั้งแรกที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 36 ชั่วโมง ตามด้วยการบ่มแข็งครั้งที่สองอุณหภูมิ 190°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยการเย็นตัวในอากาศให้สมบัติทางกลซึ่งประกอบด้วย ค่าความแข็ง ค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก ค่าความต้านแรงดึงสูงสุด ซึ่งทั้งหมดได้สรุปว่าการบ่มแข็งมากกว่าหนึ่งครั้งส่งผลให้สมบัติทางกลดีขึ้น

ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรมพบว่ายังไม่มีนักวิจัยท่านใดศึกษาถึงอิทธิพลของการบ่มแข็งสองขั้นตอนที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งเกรด 2024 อีกทั้งอะลูมิเนียมหล่อเกรด 2024 มีสมบัติทางกลที่ดีและมีการใช้งานในอุตสาหกรรมหลายประเภท รวมถึงสามารถปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ อีกทั้งอะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งเมื่อนำมาปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนจะให้สมบัติทางกลที่ดีกว่าอะลูมิเนียมหล่อแบบดั้งเดิม ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เล็งเห็นความสำคัญในการศึกษาอิทธิพลของการบ่มแข็งสองขั้นตอนที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งเกรด 2024

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้ใช้โลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 2024 เป็นวัสดุที่นำมาใช้ในการทดลองซึ่งมีส่วนผสมของธาตุต่าง ๆ ดังตารางที่ 1 จากตารางพบว่ามีทองแดง (Cu) เป็นธาตุผสมหลักและแมกนีเซียม (Mg) เป็นธาตุผสมรองลงมา ธาตุเหล่านี้จะช่วยให้อะลูมิเนียมเกรดดังกล่าว มีความแข็งแรงสูง (High Strength) โลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 2024 ที่ใช้ในการทดลองผ่านการขึ้นรูปด้วยเทคนิคกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง โดยกรรมวิธีการปล่อยฟองแก๊ส (Gas Induced Semi-Solid; GISS) เทคนิคดังกล่าวเป็นกระบวนการหล่อโลหะกึ่งของแข็งแบบ Rheocasting เทคนิคการผลิตโลหะกึ่งของแข็งแบบ GISS นั้น จะหลอมอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 700°C และรออุณหภูมิของน้ำโลหะลดลงถึง 648°C จากนั้นใช้แก๊สไนโตรเจน

ผ่านแท่งกราฟไฟต์พูน ซึ่งใช้ความดันแก๊ส 4 บาร์ และอัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 3 ลิตร/นาที เพื่อสร้างโลหะกึ่งของแข็งที่เป็นเกรนแบบก้อนกลมที่เกิดจากการนิวคลีเอชันหรือเกิดการแตกหักของเดนไดรต์เนื่องจากกระแสไหลวนของน้ำโลหะ แล้วจึงนำสเลอรี่กึ่งของแข็งที่มีอุณหภูมิ 639 °C เทลงสู่แม่พิมพ์ โดยมีอุณหภูมิของแม่พิมพ์ 270 °C แล้วอัดขึ้นรูปโดยใช้ความดัน 80 MPa ชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปโดยใช้เทคนิค GISS มีขนาด $100 \times 100 \times 20 \text{ mm}^3$ ดังแสดงในรูปที่ 1(ก) และโครงสร้างเกรนก้อนกลมที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการผลิตโลหะกึ่งของแข็งแบบ GISS แสดงดังรูปที่ 1(ข)

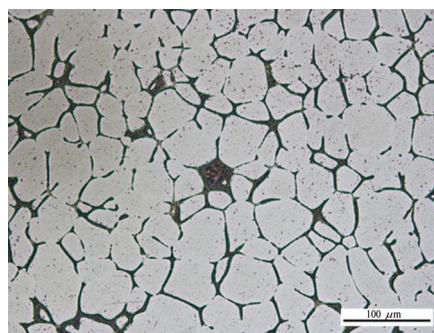
ตารางที่ 1 ส่วนผสมของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 2024 (wt%)

ส่วนผสม	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Al
ปริมาณ	5.09	1.67	0.63	0.4	0.33	0.04	Bal.

โลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 2024 ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธี GISS นั้นมีขนาด $100 \times 100 \times 20 \text{ (mm)}^3$ จะถูกตัดขอบของชิ้นงานออกด้านละ 5 mm เนื่องจากการเย็นตัวที่ขอบนั้นมีการเย็นตัวไม่สม่ำเสมอ จากนั้นนำมาตัดด้วยเครื่องเลื่อยสายพานแนวนอนให้มีขนาด $15 \times 22 \times 20 \text{ (mm)}^3$ โดยที่ชิ้นงาน 1 ชิ้นภายหลังจากกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธี GISS นั้น สามารถแบ่งได้เป็น 24 ชิ้น เพื่อนำไปเป็นชิ้นงานทดสอบความแข็งและตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง



(ก) ลักษณะชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูป

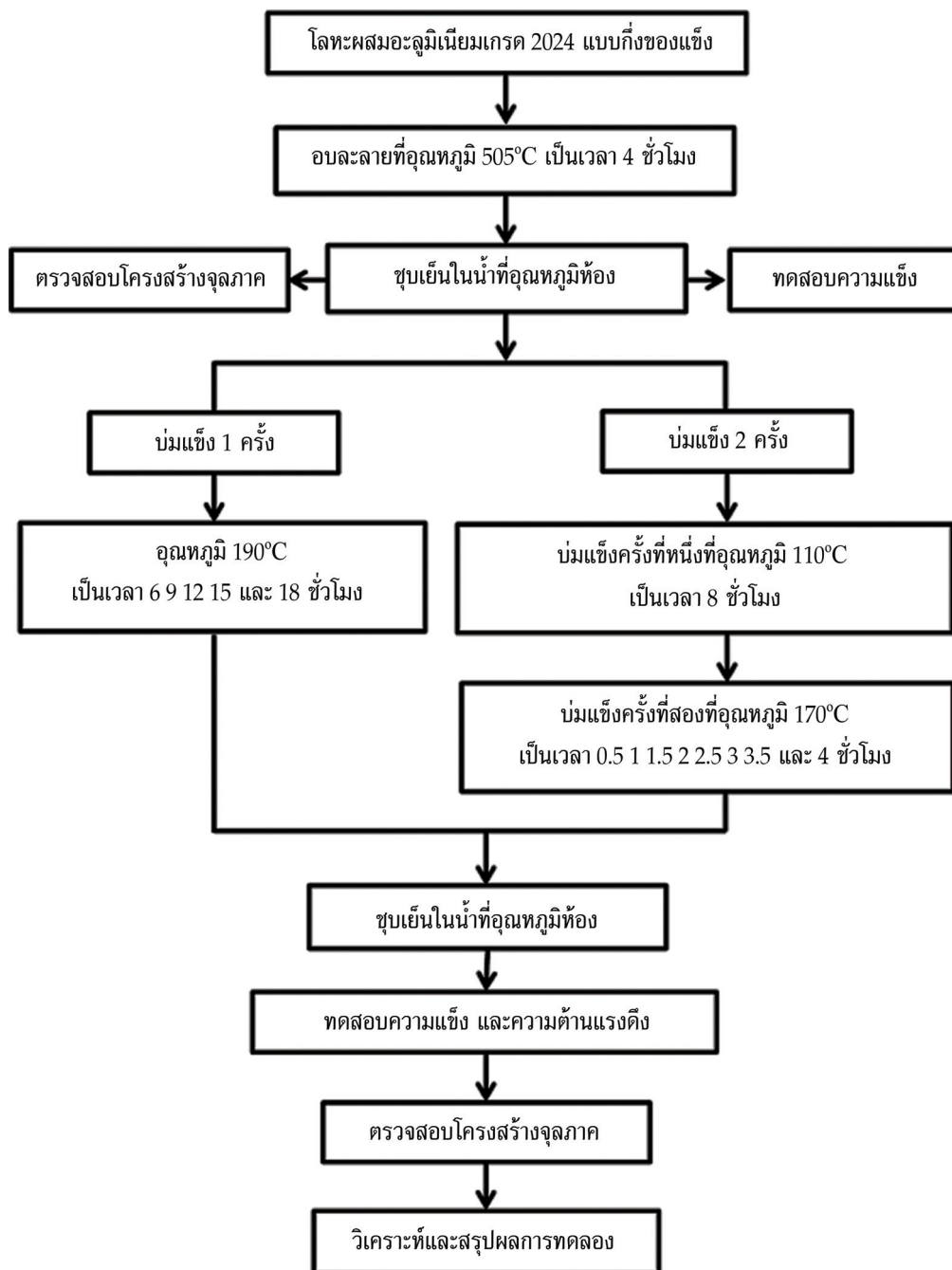


(ข) โครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม

รูปที่ 1 โลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 2024 ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยเทคนิค GISS

ชิ้นตัวอย่างจะถูกปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบ T6 ประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอน คือ การอบละลายเฟส (Solution Heat Treatment) การชุบเย็น (Quenching) และการบ่มแข็ง (Aging) โดยชิ้นตัวอย่างจะถูกอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 505 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และนำชิ้นงานออกจากเตาเผาเพื่อชุบเย็นในน้ำที่อุณหภูมิห้อง นำชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายเฟสและชุบเย็นในน้ำไปบ่มแข็ง โดยในการบ่มแข็งหนึ่งครั้งนั้นจะบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 6 9 12 15 และ 18 ชั่วโมง สำหรับการบ่มแข็งสองครั้งนั้น จะบ่มแข็งครั้งที่หนึ่งที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบ่มแข็งครั้งที่สองที่อุณหภูมิในการบ่มแข็ง 170 °C เป็นเวลานาน 0.5 1 1.5 2 2.5 3 3.5 และ 4 ชั่วโมง เมื่อชิ้นงานผ่านกระบวนการอบละลายเฟสและบ่มแข็งแล้ว นำชิ้นงานไปขัดด้วยกระดาษทราย

เพื่อปรับผิวหน้าชิ้นงานให้เรียบก่อนนำไปวัดค่าความแข็งแบบร็อคเวลล์ สเกลบี และขัดละเอียดด้วยผงลูมินาเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และทดสอบสมบัติการต้านแรงดึงเพื่อหาค่าความต้านแรงดึงสูงสุดแสดงดังรูปที่ 2

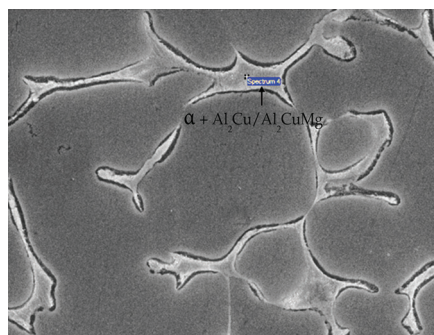
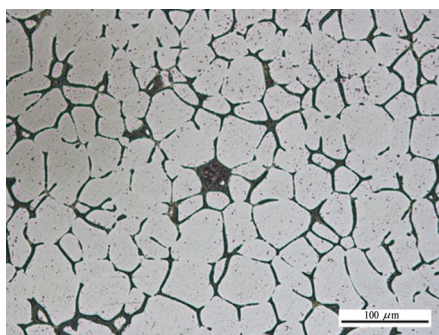


รูปที่ 2 แผนลำดับขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

โครงสร้างทางจุลภาคชิ้นงานในสภาวะหล่อขึ้นรูป (As-Cast)

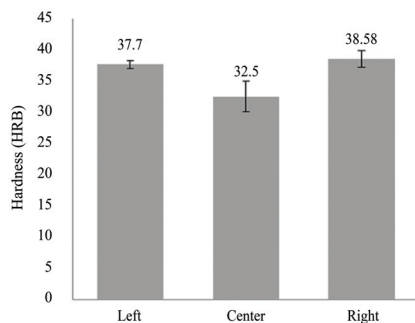
ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบที่หล่ออัดในสภาวะกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Squeeze Casting) จากรูปที่ 3(ก) แสดงให้เห็นถึงความชัดเจนของโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบที่หล่ออัดในสภาวะกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Squeeze Casting) โดยพบว่าชิ้นงานทดสอบที่หล่ออัดในสภาวะกึ่งของแข็งมีลักษณะเกรนแบบก้อนกลม (Globular Structure) โดยมีเฟสยูเทคติก (Eutectic Phase) อยู่บริเวณโดยรอบของขอบเกรน ซึ่งสอดคล้องกับการวิจัย [9] - [11] โดยที่ในขั้นตอนของการหลอมอะลูมิเนียมนั้น จะเกิดนิวเคลียสของเฟส $\text{Al-}\alpha$ ขึ้นในอะลูมิเนียมหลอมเหลว เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงทำให้เฟส $\text{Al-}\alpha$ โตขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิของอะลูมิเนียมหลอมเหลวต่ำกว่าอุณหภูมิยูเทคติก (Eutectic Temperature) ของเหลวจะแข็งตัวและฟอร์มเป็นเฟสยูเทคติก ซึ่งจากการศึกษาอะลูมิเนียมหล่ออัดในสภาวะกึ่งของแข็งเกรด 2024 พบว่าเฟสยูเทคติกประกอบไปด้วย $\alpha + \text{Al}_2\text{Cu}/\text{Al}_2\text{CuMg}$ ดังแสดงในรูปที่ 3(ข)



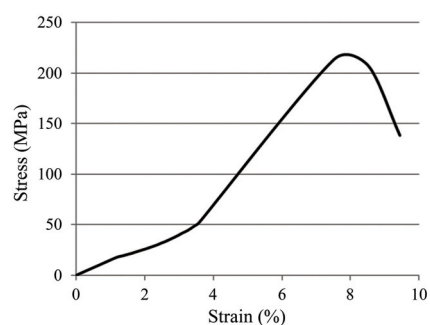
(ก) โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อขึ้นรูป
(ข) เฟสยูเทคติก $\alpha + \text{Al}_2\text{Cu}/\text{Al}_2\text{CuMg}$
รูปที่ 3 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานสภาวะหล่อขึ้นรูปกึ่งของแข็งแบบก้อนกลม

สมบัติทางกลของชิ้นงานในสภาวะหล่อขึ้นรูป (As-Cast)

จากการทดสอบวัดค่าความแข็ง (Hardness) ของชิ้นงานในสภาวะหล่อขึ้นรูปในบริเวณต่าง ๆ ของชิ้นงานจำนวน 6 จุด พบว่าค่าความแข็งของชิ้นงานบริเวณกึ่งกลางชิ้นงานหล่ออัดและบริเวณขอบด้านซ้าย-ขวา มีความแตกต่างกันเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยมีค่าความแข็งเฉลี่ยคือ 36.26 HRB ในขณะที่ความต้านแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (% Elongation) ของชิ้นงานในสภาวะหล่อขึ้นรูปมีค่าเป็น 213.61 MPa และ 9.44 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4



(ก) ความแข็งในบริเวณขอบซ้าย-ขวา

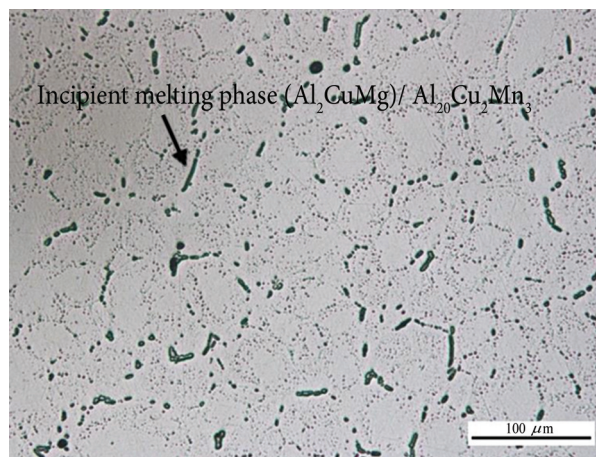


(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด

และตรงกลาง

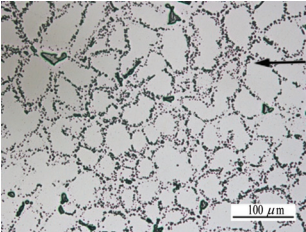
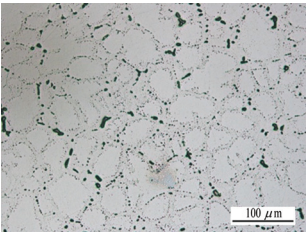
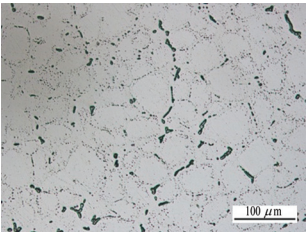
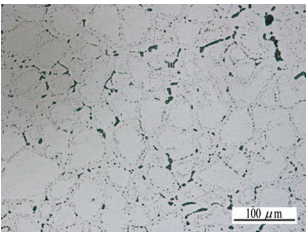
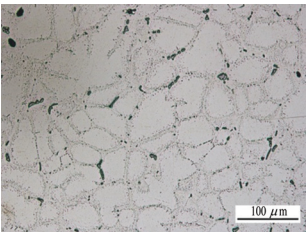
รูปที่ 4 ค่าสมบัติทางกลของชิ้นงานสภาวะหล่อขึ้นรูป (As-Cast)

โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนแบบ T6 โดยการบ่มแข็งหนึ่งครั้ง จากการทดลองพบว่าชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนแบบ T6 โดยการบ่มแข็งหนึ่งครั้งนั้น พบว่าโครงสร้างจุลภาคภายหลังจากกระบวนการอบละลายเฟสและเย็นตัวอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิห้อง ประกอบด้วยเนื้อเมตริกซ์ คือ เฟส Al- α (บริเวณสีขาว) และเฟสยูเทคติกของทองแดง คือ บริเวณที่มีรูปร่างเป็นแผ่นเล็ก ๆ กระจายตามขอบเกรนของเฟส Al- α การเปลี่ยนแปลงรูปร่างลักษณะของเฟสยูเทคติก หลังจากการอบละลายเฟสแสดงให้เห็นว่ามีการแพร่ของอะตอมทองแดงออกจากเฟสยูเทคติกและละลายเข้าสู่เมตริกซ์ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 505 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

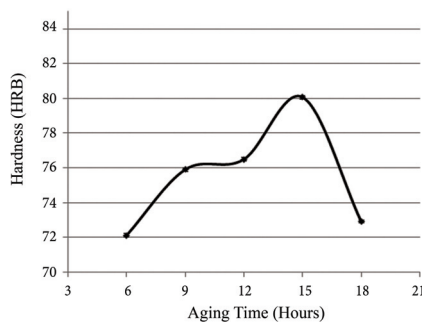
ตารางที่ 2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายเฟสและการบ่มแข็งที่อุณหภูมิคงที่เวลาแตกต่างกัน

เวลาในการบ่มแข็ง (ชั่วโมง)	โครงสร้างจุลภาค (Microstructure)
6	 Precipitate
9	
12	
15	
18	

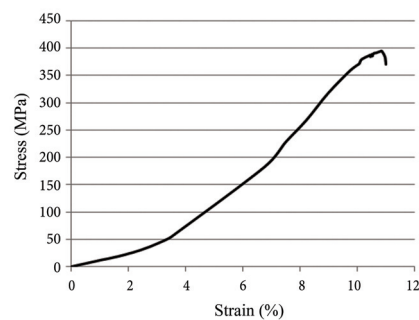
เมื่อนำชิ้นงานภายหลังการอบละลายเฟสไปทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 6 9 12 15 และ 18 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่าที่อุณหภูมิการบ่มแข็งที่คงที่ ในขณะที่เวลาในการบ่มแข็งเพิ่มขึ้นนั้น ความหนาแน่นของพรีซิพิต (Precipitate) จะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการบ่มแข็งเพิ่มขึ้นในช่วงแรก จนถึงจุดที่ทำให้เกิดความแข็งแรงสูงสุด จากนั้นพบว่าความแข็งแรงของชิ้นงานจะลดลงเมื่อเพิ่มเวลาในการบ่มแข็ง ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของโครงสร้างจุลภาคที่พบ คือ พรีซิพิต (Precipitate) มีขนาดโตขึ้นและความหนาแน่นลดลง เพื่อที่จะลดพลังงานอินเตอร์เฟสของระบบลง [12] ดังแสดงในตารางที่ 2

สมบัติทางกลของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนแบบ T6 โดยการบ่มแข็งหนึ่งครั้ง

จากรูปที่ 6(ก) เมื่อพิจารณาค่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่บ่มแข็งที่อุณหภูมิต่างกัน พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งที่เวลานานกว่าจะมีค่าความแข็งแรงที่สูงกว่าชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งที่เวลาน้อยกว่า แต่เมื่อเพิ่มเวลาในการบ่มแข็งมากขึ้นจนกระทั่งเลยจุดที่มีความแข็งแรงสูงสุด (Optimum Aging) แล้ว ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานจะมีค่าลดลง เนื่องจากจำนวนของพรีซิพิตที่เกิดขึ้นลดจำนวนลง เนื่องจากเฟส θ' มี Al_2Cu มากกว่าเฟส θ ทำให้ Al_2Cu แปรจาก θ' ไปยัง θ ทำให้ Al_2Cu ของเฟส θ' ลดลง ส่งผลให้เฟส θ' มีขนาดเล็กลง แต่ในขณะเดียวกันเฟส θ ก็จะโตขึ้นแต่มีจำนวนน้อยลง ในขณะที่ผลการทดสอบแรงดึงพบว่าค่าความต้านแรงดึง ดังแสดงในรูปที่ 6(ข) เท่ากับ 395.3 MPa และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเท่ากับ 10.84 % แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายเฟสและบ่มแข็งที่เวลานานกว่าจะให้ค่าความต้านแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่สูงกว่า เกิดจากเวลาในการบ่มแข็งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคและสัมพันธ์กับผลของค่าความแข็งแรง



(ก) ค่าความแข็งแรงของชิ้นงาน



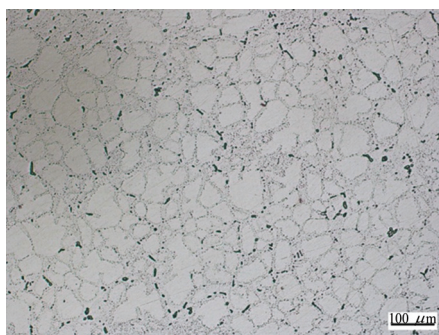
(ข) ค่าความต้านแรงดึงของชิ้นงาน

รูปที่ 6 ค่าการทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายเฟสและการบ่มแข็งหนึ่งครั้งที่อุณหภูมิ 190 °C ที่เวลา 6 9 12 15 และ 18 ชั่วโมง

โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนแบบ T6 โดยการบ่มแข็งสองครั้ง

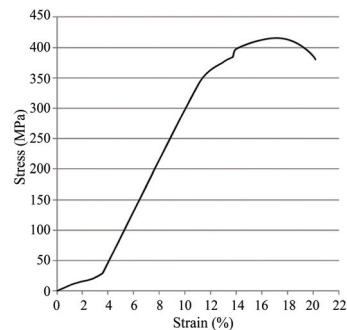
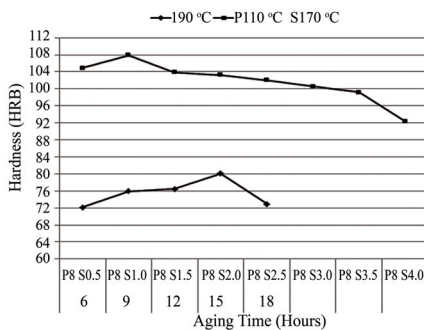
โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนแบบ T6 โดยมีการบ่มแข็งสองครั้ง โดยหลังจากการบ่มแข็งครั้งที่หนึ่ง 110 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง พบว่าเฟสยูเทคติกของทองแดงมีการละลายและแพร่ไปยังเฟสเมตริกซ์ของอะลูมิเนียม ส่งผลให้เฟสยูเทคติกจะมีขนาดเล็กลงและมีการกระจายอย่างทั่วถึงในบริเวณของขอบเกรนดังแสดงในรูปที่ 7(ก) และเมื่อนำไปบ่มแข็งครั้งที่สองที่อุณหภูมิ 170 °C ที่เวลาต่าง ๆ พบว่าเฟสยูเทคติกมีลักษณะที่เล็กลงยิ่งยั้งขึ้นมากกว่าการบ่มแข็งเพียงครั้งเดียวดังแสดงในรูปที่ 7(ข) จากภาพโครงสร้างจุลภาค สามารถอธิบายได้ว่า อนุภาคขนาดใหญ่ (สีดำเข้ม) ตามขอบเกรนคือ อนุภาค

ของ T เฟส ($\text{Al}_{20}\text{Cu}_2\text{Mn}_3$) เป็นเฟสที่ไม่สามารถละลายได้ในขั้นตอนของการอบละลายเฟส ซึ่งประกอบด้วย อะลูมิเนียม ทองแดง เหล็ก และแมงกานีส ในขณะที่อุณหภูมิขนาดเล็กคือ เฟส θ' (Al_2CuMg)



(ก) ครึ่งที่หนึ่งที่อุณหภูมิ 110 °C เวลา 8 ชั่วโมง (ข) ครึ่งที่สองที่อุณหภูมิ 170 °C เวลา 1 ชั่วโมง
รูปที่ 7 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งครึ่งที่หนึ่ง และครึ่งที่สอง

สมบัติทางกลของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนแบบ T6 โดยการบ่มแข็งสองครั้ง ผลของกระบวนการทางความร้อนที่มีการบ่มแข็งสองครั้งเมื่อเปรียบเทียบกับ การบ่มแข็งหนึ่งครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่าค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งหนึ่งครั้งจะให้ค่าความแข็งสูงสุดเท่ากับ 82.7 HRB ที่อุณหภูมิและเวลาในการบ่มแข็ง 190 °C นาน 15 ชั่วโมง ตามลำดับ ในขณะที่การบ่มแข็งสองครั้งนั้นให้ค่าความแข็งสูงสุดเท่ากับ 108 HRB โดยบ่มแข็งครึ่งที่หนึ่งที่อุณหภูมิ 110 °C นาน 8 ชั่วโมง (P110 °C P8) และบ่มแข็งครึ่งที่สองที่อุณหภูมิ 170 °C นาน 1 ชั่วโมง (S170 °C S1.0) และเมื่อเวลาในการบ่มแข็งครึ่งที่สองเพิ่มขึ้นค่าความแข็งจากการบ่มแข็งครึ่งที่สองก็จะลดลงอย่างเห็นได้ชัด แต่ในขณะที่ค่าความแข็งจากการบ่มแข็งครึ่งที่สองลดลงนั้นเมื่อดูจากกราฟค่าความแข็งก็พบว่า ค่าความแข็งจากการบ่มแข็งครึ่งที่สองก็ยังคงสูงกว่าค่าความแข็งสูงสุดของการบ่มแข็งหนึ่งครั้ง เนื่องจากว่าการบ่มแข็งหนึ่งครั้งเป็นการบ่มที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของการเกิดเฟสพรีซิพิตเฟสแรก (GP Zone) ทำให้พรีซิพิตเจ็พโซนไม่เกิดหรือเกิดขึ้นน้อย ซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของการเกิดเฟสพรีซิพิตในเฟสถัดไปเมื่อเวลาในการบ่มแข็งเพิ่มขึ้น ในทางตรงข้ามกับการบ่มแข็งสองครั้ง โดยที่มีการบ่มแข็งครึ่งที่หนึ่งที่อุณหภูมิต่ำส่งผลให้เกิดเฟสพรีซิพิตเฟสแรกคือ เฟสเจ็พโซน (GP-Zone) [9] และเมื่อมีการเย็นตัวที่อุณหภูมิห้องเฟสพรีซิพิตดังกล่าวก็ยังคงกระจายอยู่ในอะลูมิเนียมเมทริกซ์ และพร้อมที่จะเปลี่ยนเป็นเฟสพรีซิพิตเฟสต่อไปเมื่อได้รับพลังงาน ซึ่งเมื่อมีการบ่มแข็งครึ่งที่สองที่อุณหภูมิสูงขึ้นคือที่อุณหภูมิ 170 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิเริ่มการเปลี่ยนเฟสพรีซิพิตจากเฟสเจ็พโซนไปเป็นเฟส θ'' [10] เมื่อเวลาในการบ่มแข็งเพิ่มขึ้นและทำให้เฟส θ'' สามารถเปลี่ยนเฟสเป็นเฟส θ' ได้มากจึงส่งผลให้ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งสองครั้งนั้นสูงกว่าการบ่มแข็งเพียงครั้งเดียว และเวลาโดยรวมในการบ่มแข็งสองครั้งนั้นใช้เวลาที่สั้นกว่า และเมื่อเวลาในการบ่มแข็งครึ่งที่สองเพิ่มขึ้นพบว่าค่าความแข็งก็จะลดลงเนื่องจากการเปลี่ยนเฟสพรีซิพิตจาก θ' ไปเป็นเฟส θ ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นในขณะที่ปริมาณของเฟสพรีซิพิตดังกล่าวมีปริมาณน้อยลง จึงส่งผลให้ค่าความแข็งลดลงดังกล่าว



(ก) ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งสองครั้ง

(ข) ค่าความต้านแรงดึงของชิ้นงาน

เปรียบเทียบกับบ่มแข็งหนึ่งครั้งที่อุณหภูมิ 190 °C

รูปที่ 8 ค่าความแข็งและค่าความต้านแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งสองครั้งที่อุณหภูมิ 110 °C และ 170 °C

สรุปผลการดำเนินงาน

โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งเกรด 2024 ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 โดยมีการบ่มแข็งเพียงหนึ่งครั้งและสองครั้งนั้น มีลักษณะเกรนเป็นแบบก้อนกลมกระจายสม่ำเสมอ โดยเกรนลักษณะดังกล่าว ส่งผลให้มีสมบัติทางกลที่ดีขึ้น รวมถึงจำนวนครั้งในการบ่มแข็งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงเฟสซึ่งมีผลต่อสมบัติทางกล

ผลจากการบ่มแข็งของอะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง เกรด 2024 ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 โดยที่การบ่มแข็งหนึ่งครั้งให้ค่าความแข็งสูงสุดที่การบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 15 ชั่วโมง ค่าความแข็งและค่าความต้านแรงดึงสูงสุดที่ 82.7 HRB และ 395.3 MPa ตามลำดับ ในขณะที่การบ่มแข็งสองครั้งโดยการบ่มแข็งครั้งที่หนึ่งที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และบ่มแข็งครั้งที่สองที่อุณหภูมิ 170 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ให้ค่าความแข็งและค่าความต้านแรงดึงสูงสุดที่ 108 HRB และ 415.70 MPa ตามลำดับ และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 โดยที่การบ่มแข็งสองครั้งจะให้ความมากกว่าการบ่มแข็งหนึ่งครั้งคือ 20.19 และ 10.99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

จากผลการวิจัยดังกล่าวจึงสรุปได้ว่าการบ่มแข็งสองครั้งให้สมบัติทางกลที่ดีกว่าการบ่มแข็งเพียงหนึ่งครั้ง และเวลาโดยรวมในการบ่มแข็งสองครั้งนั้นใช้เวลาในการบ่มแข็งสั้นกว่า หากมีการนำไปใช้งานในภาคอุตสาหกรรมจะเป็นประโยชน์ในแง่ของได้สมบัติทางกลตามที่ต้องการ สามารถลดเวลาและลดพลังงานได้อีกด้วย

References

- [1] Iron and Steel Institute of Thailand. (2014). **Survey Status of Industry for Non-Ferrous Metals**. Bangkok: Iron and Steel Institute of Thailand (in Thai)

- [2] Wijit, P. (1999). **Melting and Heat Treatment of Aluminium Technology Casting**. National Metal and Materials Technology Center (in Thai)
- [3] Reis, D., Couto, A., Domingues, N., Hirschmann, A., Zepka, S., and Moura, C. (2012). Effect of Artificial Aging on the Mechanical Properties of an Aerospace Aluminum Alloy 2024. **Defect and Diffusion Forum**. Vol. 326-328, pp. 193-198. DOI: 10.4028/www.scientific.net/DDF.326-328.193
- [4] Siriwan, P., Sirikul, W., Thawatchai, P., and Jessada, W. (2011). Microstructure Evolution During Solution Heat Treatment of Semisolid Cast 2024 Aluminum Alloy. **Advanced Materials Research**. Vol. 339, pp. 714-717. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.339.714
- [5] Chemingui, M., Khitouni, M., Jozwiak, K., Mesmacque, G., and Kolsi, A. (2010). Characterization of the Mechanical Properties Changes in an Al-Zn-Mg Alloy After a Two-Step Ageing Treatment at 70° and 135 °C. **Journal of Material and Design**. Vol. 31, Issue 6, pp. 3134-3139. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.12.033
- [6] Gao, N., Starink, M., Kamp, N., and Sinclair, I. (2007). Application of Uniform Design in Optimization of Three Stage Ageing of Al-Cu-Mg Alloys. **Journal of Materials Science**. Vol. 42, pp. 4398-4405. DOI: 10.1007/s10853-006-0659-6
- [7] Emani, S., Benedyk, J., Nash, J., and Chan, D. (2009). Double Aging and Thermo Mechanical Heat Treatment of AA7075 Aluminum Alloy Extrusion. **Journal of Materials Science**. Vol. 44, pp. 6384-6391. DOI:10.1007/s10853-009-3879-8
- [8] Elgallad, E., Zhang, Z., and Chen, X. (2015). Effect of Two-Step Aging on the Mechanical Properties of AA2219 Dc Cast Alloy. **Materials Science and Engineering**. Vol. 625, pp. 213-220. DOI: 10.1016/j.msea.2014.12.002
- [9] Jessada, W. (2011). **Technology of Semi-Solid**. National Metal and Materials Technology Center, Thai Foundry Association. pp. 48-53 (in Thai)
- [10] Romadorn, B., Rangsinee, C., and Jessada, W. (2009). Development of the Gas Induced Semi-Solid Metal Processing for A356 Aluminum Alloy. **The 7th PSU Education Conference “Higher Education for All: Surviving in Times of Change**. Prince of Songkla University. pp. 549-554 (in Thai)
- [11] Siriporn, K., Sirikul, W., Thawatchai, P., and Jessada, W. (2009). Influence of Heat Treatment Processing Parameters on the Hardness and the Microstructure of Semi-Solid Aluminum Alloy A356. **Journal of Metals, Materials and Minerals**. Vol. 18, No. 2, pp. 93-97
- [12] Sirikul, W. (2000). **Physical Metallurgy**. Department of Mechanical Engineering Faculty of Engineering, Prince of Songkla University (in Thai)