

การศึกษาผลกระทบของอัตราการเย็นตัวและการเติมธาตุ Zr ต่อการ
เปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและการบ่มแข็งของโลหะผสม Al-Fe
EFFECT OF COOLING RATES AND Zr ADDITION ON
MICROSTRUCTURE EVOLUTION AND AGED HARDENING OF
Al-Fe ALLOYS

นายอนุชิต มาสทอง

MR. ANUCHIT MASTHONG

นางสาวอรณิชา พินผา

MS. ONNICHAPHUANPHA

นางสาวอริสา มะสุวรรณ

MS. ARISA MASUWAN

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

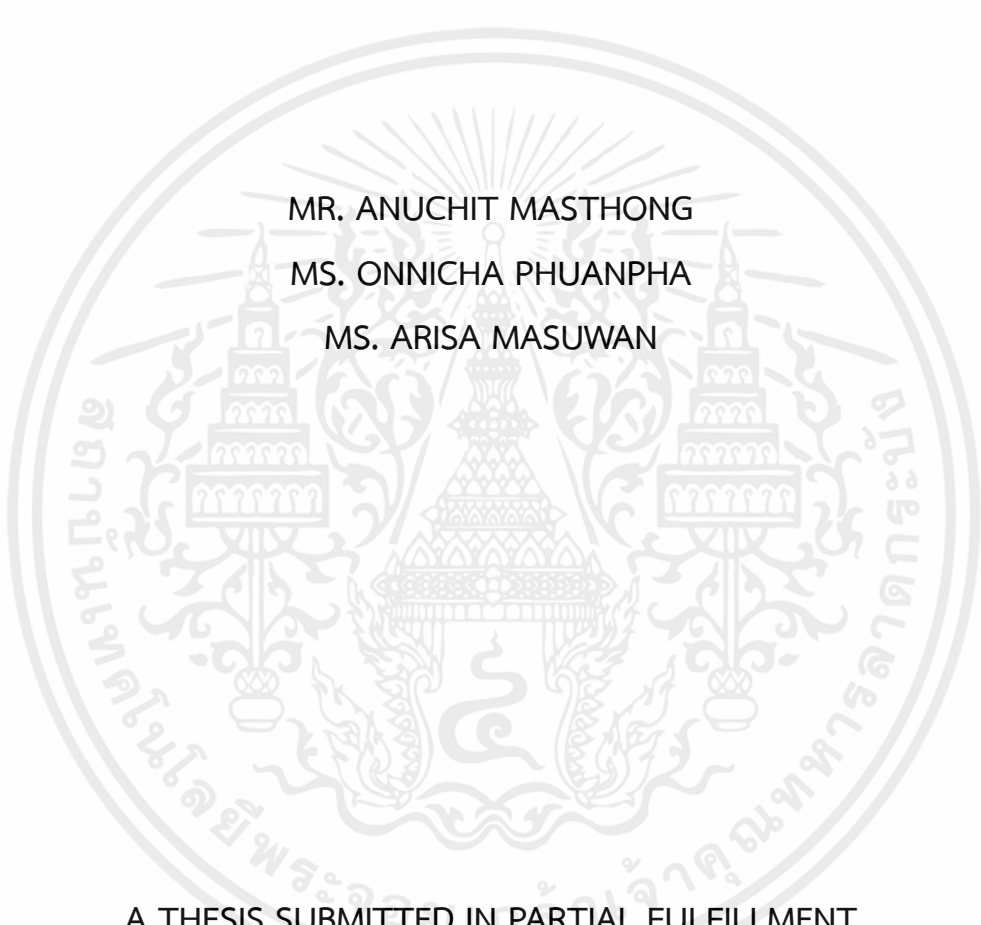
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECT OF COOLING RATES AND Zr ADDITION ON
MICROSTRUCTURE EVOLUTION AND AGED HARDENING
OF Al-Fe ALLOYS



MR. ANUCHIT MASTHONG
MS. ONNICHA PHUANPHA
MS. ARISA MASUWAN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2023

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์

การศึกษาผลกระทบของอัตราการเย็นตัวและการเติมธาตุ Zr ต่อ
การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและการบ่มแข็งของโลหะผสม
Al-Fe
EFFECT OF COOLING RATES AND Zr ADDITION ON
MICROSTRUCTURE EVOLUTION AND AGED HARDENING
OF Al-Fe ALLOYS

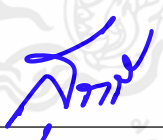
นักศึกษา

นายอนุชิต มาสทอง รหัสประจำตัว 63011040
นางสาวอรณิชา พันผา รหัสประจำตัว 63011054
นางสาวอริสา มะสุวรรณ รหัสประจำตัว 63011066

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์


(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวารี ชาญกิจมั่นคง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์

การศึกษาผลกระทบของอัตราการเย็นตัวและการเติมธาตุ Zr ต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและการบ่มแข็งของโลหะผสม Al-Fe

นักศึกษา

นายอนุชิต มาสทอง

นางสาวอรณิชา พันผา

นางสาวอริสา มะสุวรรณ

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา

2566

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวารี ชาญกิมั่นคง

บทคัดย่อ

โลหะผสมอลูมิเนียม-เหล็ก (Al-Fe Alloys) ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมต่างๆ เนื่องจากคุณสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิสูงและมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดี งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การศึกษาผลอิทธิพลของอัตราการเย็นตัวต่อโลหะผสม Al-Fe ที่ไฮโปยูเทคติก ยูเทคติก และไฮเปอร์ยูเทคติก พร้อมทั้งศึกษาผลของการเติมปริมาณของธาตุ Zr ที่ต่างกัน (0.00%, 0.05% และ 0.15%) โดยการศึกษาที่แสดงให้เห็นโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะผสม Al-Fe ที่มีความละเอียด และความสามารถในการละลายของเหล็กที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวเร็ว ซึ่งส่งผลต่อค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบที่มีอัตราการเย็นตัวเร็วจะให้ค่าความแข็งที่สูงขึ้น ผลการศึกษาการเติมปริมาณของ Zr ที่ส่งผลต่อการปรับแต่งโครงสร้างทางจุลภาคให้มีความละเอียดของโลหะผสม Al-Fe โดยงานวิจัยนี้ยังศึกษาผลของการบ่มแข็ง (Aging) ของชิ้นงานทดสอบโดยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 350 °C แสดงให้เห็นว่าอัตราการเย็นตัวเร็วและการเติมธาตุ Zr ในปริมาณที่ 0.15% ให้ค่าความแข็งสูงสุด นอกจากนี้ยังมีการศึกษาคุณสมบัติทางกลอื่นๆ เช่น คุณสมบัติการนำไฟฟ้า และความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนที่มีการเปรียบเทียบระหว่างโลหะผสม Al-Fe ก่อนทำการบ่มแข็ง (As-cast) และโลหะผสม Al-Fe หลังทำการบ่มแข็ง (As-aged)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและก๊อปปี้หรืออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Effect of Cooling Rates and Zr Addition on Microstructure Evolution and Aged Hardening of Al-Fe Alloys
Student	Mr. Anuchit Masthong Ms. Onnicha Phuanpha Ms. Arisa Masuwan
Degree	Bachelor of Engineering in Industrial Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year	2023
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Suwaree Chankitmunkong

ABSTRACT

The aluminum-iron (Al-Fe) alloys are extensively utilized in various industries due to their high-temperature capabilities and excellent corrosion resistance properties. This research focuses on studying the influence of cooling rates on the microstructure of aluminum-iron alloys at hypo-eutectic, eutectic, and hyper-eutectic compositions, as well as the effects of adding different amounts of Zr element (0.00%, 0.05%, and 0.15%). The study demonstrates the detailed microstructure of aluminum-iron alloys when the iron solubility increased of rapidly cooled specimens will get higher hardness values. Additionally, the investigation explores the modification of microstructural refinement in aluminum-iron alloys by varying Zr content. Furthermore, the research examines the aging process of test specimens at 350°C, indicating that the combination of rapid cooling and 0.15% Zr addition get the highest hardness values. Moreover, other properties such as electrical conductivity and corrosion resistance are also studied, comparing aluminum-iron alloys in as-cast and as-aged conditions.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การศึกษาผลกระทบของอัตราการเย็นตัวและการเติมธาตุเซอร์โคเนียม (Zr) ต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและการบ่มแข็งของโลหะผสมอลูมิเนียม-เหล็ก (Al-Fe alloys) เป็นส่วนหนึ่งในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ซึ่งสามารถสำเร็จไปด้วยดี กลุ่มผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้มีส่วนเกี่ยวข้องที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ และให้คำปรึกษาในปัญหาที่พบในระหว่างการทำนิพนธ์ ทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จเสร็จสิ้นไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวารี ชาญกิจมันคง อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาแก่ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ที่มีความกรุณาสละเวลาในการให้ความรู้ คำปรึกษา และคอยให้คำแนะนำช่วยเหลือในระหว่างการปฏิบัติงาน จนทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นไปอย่างเรียบร้อย ถูกต้อง และเสร็จสิ้นสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณะอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการปฏิบัติงาน อีกทั้งคอยดูแลระหว่างการปฏิบัติงานให้มีความปลอดภัยในระหว่างการทำนิพนธ์

ขอขอบพระคุณ นายธวัชชัย ตั้งสุขสันต์ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยให้คำปรึกษาแนะนำและช่วยเหลือตลอดการปฏิบัติงานจนปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ อุปกรณ์ ห้องปฏิบัติการ และเจ้าหน้าที่วิจัยที่คอยช่วยเหลือระหว่างการดำเนินงาน รวมถึงสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการทำนิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยสนับสนุนให้กำลังใจ ตลอดจนเพื่อนๆ ที่คอยให้คำปรึกษาแลกเปลี่ยนความรู้ในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ ทางคณะผู้ดำเนินงานหวังเป็นอย่างยิ่งว่าปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ จะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาด้านวัสดุ อุตสาหกรรม และเป็นแนวทางสำหรับการปรับแต่งคุณสมบัติที่เหมาะสมในการศึกษา เพื่อพัฒนางานวิจัยความสามารถในด้านวิศวกรรมวัสดุของประเทศให้มีความก้าวหน้าในอนาคตต่อไป

นายอนุชิต มาสทอง

นางสาวอรณิชา พันนา

นางสาวอริสา มะสุวรรณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและคํ้าองอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป.....	ซ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.6 แผนการดำเนินงาน.....	5

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อลูมิเนียม.....	6
2.2 การแบ่งกลุ่มของโลหะผสม Al-Fe	7
2.2.1 โลหะผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe	7
2.2.2 โลหะผสมยูเทคติก Al-Fe	9
2.2.3 โลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติก Al-Fe	9
2.3 กระบวนการแข็งตัวของโลหะเหลว.....	10
2.3.1 กลไกการเกิดของเกรน.....	10
2.3.2 การปรับแต่งเกรนละเอียด	11
2.3.3 แบบจำลองทางความร้อน.....	13
2.4 การทดสอบคุณสมบัติทางกล	14
2.4.1 ความแข็ง.....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
2.4.2 การกัดกร่อนของโลหะ.....	16
2.4.3 วิธีการทดสอบกัดกร่อนของโลหะ.....	19
2.4.4 การนำไฟฟ้าในโลหะ.....	21
2.5 หลักการเครื่องมือและเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	22
2.5.1 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง.....	22
2.5.2 วิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	23
2.5.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	26
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28
2.6.1 อิทธิพลของการเติมธาตุ Zr.....	28
2.6.2 อิทธิพลของอัตราการเย็นตัว.....	31
2.6.3 อิทธิพลของการบ่มแข็ง.....	31
2.6.4 ความสามารถในการนำไฟฟ้า.....	33
2.6.5 ความสามารถในการกัดกร่อน.....	34
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	
3.1 ขั้นตอนการเตรียมโลหะผสม Al-Fe และโลหะผสม Al-Fe-Zr.....	38
3.2 ขั้นตอนการวัดอัตราการเย็นตัว.....	41
3.3 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบ.....	42
3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบโครงสร้างทางมหภาค.....	42
3.3.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบโครงสร้างทางจุลภาค.....	43
3.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้างทางมหภาคและโครงสร้างทางจุลภาค.....	44
3.4.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้างทางมหภาค.....	44
3.4.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค.....	44
3.5 ขั้นตอนการบ่มแข็ง.....	44
3.6 ขั้นตอนการทดสอบคุณสมบัติทางกล.....	44
3.6.1 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์.....	44
3.6.2 การทดสอบการนำไฟฟ้า.....	45
3.6.3 การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อน.....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและจ้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน

4.1 อิทธิพลของอัตราการเย็นตัวต่อโลหะผสม Al-Fe	47
4.2 อิทธิพลของอัตราการเย็นตัวและการเติมธาตุ Zr ต่อโครงสร้างทางมหภาคและจุลภาคของโลหะผสม Al-Fe	48
4.2.1 อิทธิพลของอัตราการเย็นตัวและการเติมธาตุ Zr ต่อโครงสร้างทางมหภาคและจุลภาคของโลหะผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe	48
4.2.2 อิทธิพลของอัตราการเย็นตัวและการเติมธาตุ Zr ต่อโครงสร้างทางมหภาคและจุลภาคของโลหะผสมยูเทคติก Al-Fe	51
4.2.3 อิทธิพลของอัตราการเย็นตัวและการเติมธาตุ Zr ต่อโครงสร้างทางมหภาคและจุลภาคของโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติก Al-Fe	53
4.3 อิทธิพลของอัตราการเย็นตัวและการเติมธาตุ Zr ต่อการปรับแต่งเกรนของโลหะผสม Al-Fe	56
4.4 อิทธิพลของอัตราการเย็นตัวและการเติมธาตุ Zr ต่อค่าความแข็งของโลหะผสม Al-Fe	58
4.4.1 อิทธิพลของอัตราการเย็นตัวและการเติมธาตุ Zr ต่อค่าความแข็งของโลหะผสม Al-Fe ด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิต่างกัน	58
4.4.2 อิทธิพลของอัตราการเย็นตัวและการเติมธาตุ Zr ต่อค่าความแข็งของโลหะผสม Al-Fe ด้วยการบ่มแข็งที่เวลาแตกต่างกัน	59
4.5 การวิเคราะห์อิทธิพลของอัตราการเย็นตัวต่อการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบ	61
4.6 อิทธิพลของอัตราการเย็นตัวและการเติมธาตุ Zr ต่อสมบัติการนำไฟฟ้าของโลหะผสม Al-Fe ..	62
4.7 การวิเคราะห์ความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสม Al-Fe	64
4.8 อิทธิพลของการบ่มแข็งต่อการวิเคราะห์ความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสม Al-Fe.....	71

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง	75
5.2 ข้อเสนอแนะ	76

เอกสารอ้างอิง	77
----------------------------	-----------

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 การออกแบบการทดลอง	2
ตารางที่ 1.2 ตารางแผนการดำเนินงาน.....	5
ตารางที่ 3.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมี (% โดยน้ำหนัก) ของโลหะผสม Al-0.5Fe, Al-1.8Fe และโลหะผสม Al-3.0Fe ด้วยการเติมธาตุ 0.05%Zr และ 0.15%Zr โดยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์.....	39
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการกัดกร่อนทางเคมีไฟฟ้าของโลหะผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe ที่มีการเติมปริมาณ Zr ที่แตกต่างกัน.....	65
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการกัดกร่อนทางเคมีไฟฟ้าของโลหะผสมยูเทคติก Al-Fe ที่มีปริมาณ Zr ที่แตกต่างกัน	68
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการกัดกร่อนทางเคมีไฟฟ้าของโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติก Al-Fe ที่มีปริมาณ Zr ที่ต่างกัน	69
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบการกัดกร่อนทางเคมีไฟฟ้าของโลหะผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe ก่อนทำการบ่มแข็ง และหลังทำการบ่มแข็ง	71
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบการกัดกร่อนทางเคมีไฟฟ้าของโลหะผสมยูเทคติก Al-Fe ก่อนทำการบ่มแข็งและ หลังทำการบ่มแข็ง.....	72
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการกัดกร่อนทางเคมีไฟฟ้าของโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติก Al-Fe ก่อนทำการบ่ม แข็งและหลังทำการบ่มแข็ง	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	แผนภาพเฟสของระบบโลหะผสม Al-Fe.....	7
รูปที่ 2.2	โครงสร้างทางจุลภาคตามความยาวการหล่อแบบทิศทางเดียวของโลหะผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe... 8	8
รูปที่ 2.3	โครงสร้างทางจุลภาคของโลหะผสมยูเทคติก Al-Fe -Si ที่มีอัตราการเย็นตัวต่างกัน.....	9
รูปที่ 2.4	โครงสร้างทางจุลภาคไฮเปอร์ยูเทคติกของ Al-Fe และ Al-4Fe-0.3Zr	10
รูปที่ 2.5	แผนผังแสดงโครงสร้างเกรนในโลหะหล่อ.....	11
รูปที่ 2.6	ระยะเวลาในการกักเก็บต่อการปรับแต่งเกรนของตัวอย่างทดสอบ TP-1 ของอะลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์สูงที่มีการเติม Al-Ti-C แตกต่างกัน	12
รูปที่ 2.7	แผนผังแบบจำลองอัตราการเย็นของ Maxwell และ Hellawell.....	13
รูปที่ 2.8	แบบจำลองอธิบายกลไกเส้นโค้งการเย็นตัวของโลหะบริสุทธิ์.....	14
รูปที่ 2.9	การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์.....	15
รูปที่ 2.10	การกักร้อนในที่อับของแผ่นโลหะที่มีการย้าหมด.....	17
รูปที่ 2.11	การเรียงตัวของโครเมียมคาร์ไบด์บริเวณขอบเกรน.....	18
รูปที่ 2.12	การกักร้อนตามขอบเกรนของเหล็กกล้าไร้สนิม.....	18
รูปที่ 2.13	การเสียหายจากการปะทะของข้อต่อท่อไอน้ำความดันสูง.....	19
รูปที่ 2.14	เส้นโค้งโพลาริเซชันที่ได้จากทดสอบการกักร้อนด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า.....	20
รูปที่ 2.15	เครื่องทดสอบการนำไฟฟ้าวน.....	21
รูปที่ 2.16	กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง.....	22
รูปที่ 2.17	ตัวอย่างโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะผสมยูเทคติก Al-Fe ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง.....	23
รูปที่ 2.18	รังสีเอ็กซ์และการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าอื่นๆ.....	23
รูปที่ 2.19	แผนผังลักษณะการกำเนิดรังสี.....	24
รูปที่ 2.20	แผนผังเส้นหลักและการเปลี่ยนผ่านวงอิเล็กตรอน.....	25
รูปที่ 2.21	เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	25
รูปที่ 2.22	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	26
รูปที่ 2.23	ตัวอย่างโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe โหมด Secondary Electron.....	27
รูปที่ 2.24	ตัวอย่างโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe โหมด Backscattered Electron.....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือขึ้นต้นทางการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.25 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะผสมแบบหล่อ.....	29
รูปที่ 2.26 โครงสร้างทางจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและการวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDS ของโลหะผสมแบบหล่อ.....	30
รูปที่ 2.27 การแปรผันค่าความแข็งของโลหะผสม Al-Fe (หลังจาก 20 ชั่วโมง MA) ของชิ้นงานที่อุณหภูมิห้องและการอบอ่อนที่อุณหภูมิต่างกันเป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	31
รูปที่ 2.28 การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของโลหะผสม Al-9Ce ที่อุณหภูมิต่างกัน โดยมีระยะเวลาในการบ่มแข็งคงที่ 3 ชั่วโมง.....	32
รูปที่ 2.29 การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของโลหะผสม Al-9Ce หลังการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 350 °C โดยมีระยะเวลาในการบ่มแข็งต่างกัน.....	33
รูปที่ 2.30 การวัดค่า การนำความร้อน การนำไฟฟ้า ที่มีอัตราการเย็นตัวที่แตกต่างกัน ความสัมพันธ์ระหว่างการนำความร้อนและการนำไฟฟ้า และแผนผังของการก่อตัวของชิ้นตัวถูกละลาย.....	34
รูปที่ 3.1 แผนผังกระบวนการหลอมโลหะผสม Al-Fe และโลหะผสม Al-Fe-Zr.....	38
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนกระบวนการหลอมโลหะผสม Al-Fe และโลหะผสม Al-Fe-Zr.....	39
รูปที่ 3.3 การเติมฟลักซ์ และการไล่แก๊ส.....	40
รูปที่ 3.4 การเทโลหะผสมเหลวลงแม่พิมพ์ทองแดง แม่พิมพ์แกรไฟต์ และแม่พิมพ์เหล็ก ที่อุณหภูมิ 720 °C.....	40
รูปที่ 3.5 เครื่องวัดอัตราการเย็นตัว.....	41
รูปที่ 3.6 แผนผังการเตรียมชิ้นงานทดสอบโครงสร้างทางมหภาคและโครงสร้างจุลภาค.....	42
รูปที่ 3.7 การเตรียมชิ้นงานการทดสอบโครงสร้างทางมหภาค.....	43
รูปที่ 3.8 การเตรียมชิ้นงานการทดสอบโครงสร้างทางจุลภาค.....	43
รูปที่ 4.1 เส้นโค้งอัตราการเย็นตัวของความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเทียบกับเวลา ของโลหะผสม Al-Fe.....	48
รูปที่ 4.2 โครงสร้างทางมหภาคของโลหะผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe.....	48
รูปที่ 4.3 โครงสร้างทางจุลภาคของโลหะผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe.....	49
รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนโดยการใช้อ้างอิง (XRD) ที่อัตราการเย็นตัวและปริมาณการเติมธาตุ Zr ต่างกันโลหะของผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe.....	50
รูปที่ 4.5 โครงสร้างทางมหภาคของโลหะผสมยูเทคติก Al-Fe.....	51
รูปที่ 4.6 โครงสร้างทางจุลภาคของโลหะผสมยูเทคติก Al-Fe.....	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและ ฝัง อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนโดยการใช้อัตราการเย็นตัวและ ปริมาณการเติมธาตุ Zr ต่างกันของโลหะผสมยูเทคติก Al-Fe.....	52
รูปที่ 4.8 โครงสร้างทางมหภาคของโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติก Al-Fe.....	53
รูปที่ 4.9 โครงสร้างทางจุลภาคของโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติก Al-Fe	53
รูปที่ 4.10 ค่าเฉลี่ยของขนาดเฟสปฐมภูมิของเหล็กเปรียบเทียบระหว่างอัตราการเย็นตัวที่เร็วและช้า เมื่อมีการเติมธาตุ Zr ต่างกัน.....	54
รูปที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนโดยการใช้อัตราการเย็นตัวและ ปริมาณการเติมธาตุ Zr ต่างกันของโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติก Al-Fe.....	55
รูปที่ 4.12 โครงสร้างทางจุลภาค SEM ของโลหะผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe ที่มีปริมาณ Zr ต่างกัน.....	55
รูปที่ 4.13 โครงสร้างทางมหภาคของโลหะผสม Al-Fe ที่อัตราการเย็นตัวต่างกัน	56
รูปที่ 4.14 โครงสร้างทางมหภาคของโลหะผสม Al-Fe ที่เปลี่ยนแปลงไป จากการเติมธาตุ Zr	57
รูปที่ 4.15 โครงสร้างเกรนของโลหะผสม Al-Fe ที่อัตราการเย็นตัวและการเติมธาตุเซอร์โคเนียมต่างกัน	57
รูปที่ 4.16 ความแข็งของโลหะผสม Al-Fe ในอัตราการเย็นตัวเร็วและอัตราการเย็นตัวช้า	58
รูปที่ 4.17 ค่าความแข็งของ Al-0.5Fe ระหว่างการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 350 °C	59
รูปที่ 4.18 ค่าความแข็งของ Al-1.8Fe ระหว่างการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 350 °C.....	59
รูปที่ 4.19 ค่าความแข็งของ Al-3Fe ระหว่างการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 350 °C.....	60
รูปที่ 4.20 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุแบบจุดด้วยวิธี EDS ของโลหะผสม Al-0.5Fe	61
รูปที่ 4.21 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุแบบจุดด้วยวิธี EDS ของโลหะผสม Al-Fe-Zr.....	62
รูปที่ 4.22 ค่าการนำไฟฟ้าของโลหะผสม Al-0.5Fe ระหว่างการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 350 °C	63
รูปที่ 4.23 ค่าการนำไฟฟ้าของโลหะผสม Al-1.8Fe ระหว่างการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 350 °C	63
รูปที่ 4.24 ค่าการนำไฟฟ้าของโลหะผสม Al-3Fe ระหว่างการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 350 °C	64
รูปที่ 4.25 การเปรียบเทียบผลการทดสอบการกัดกร่อนทางเคมีไฟฟ้าของโลหะผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe ที่มีอัตราการเย็นตัวต่างกัน	65
รูปที่ 4.26 การเปรียบเทียบผลการทดสอบการกัดกร่อนทางเคมีไฟฟ้าของโลหะผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe และ การเติมธาตุ Zr ที่มีอัตราการเย็นตัวต่างกัน.....	66
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระยะห่างระหว่างแกนเดนไดรต์ทุติยภูมิ (SDAS) และค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) ของโลหะผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe.....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาแล ญ ึ่งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของสารประกอบเชิงโลหะของเหล็กในเฟสยูเทคติก และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) ของโลหะผสมยูเทคติก Al-Fe.....	68
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของสารประกอบเชิงโลหะของเหล็กใน Al-Fe ไฮเปอร์ยูเทคติก และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) ของโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติก Al-Fe	70
รูปที่ 4.30 การทดสอบอัตราการกัดกร่อนของโลหะผสม Al-Fe ที่ไม่มีการเติม Zr	73
รูปที่ 4.31 แสดงการทดสอบอัตราการกัดกร่อน ที่มีการเติม Zr	74



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและฉี้อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียด ขอบเขต และคำจำกัดความของงานวิจัยเรื่อง การศึกษาผลกระทบของอัตราการเย็นตัวและการเติมธาตุเซอร์โคเนียม (Zr) ต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและการบ่มแข็งของโลหะผสมอลูมิเนียม-เหล็ก (Al-Fe Alloys) ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา
2. วัตถุประสงค์การศึกษา
3. ขอบเขตของปริญญานิพนธ์
4. ขั้นตอนการดำเนินงาน
5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ
6. แผนการดำเนินงาน

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โลหะผสมอลูมิเนียม-เหล็ก (Al-Fe Alloys) เป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบา ได้รับความนิยสูงและมีการใช้งานที่แพร่หลายในหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมการบินและอวกาศ และอุตสาหกรรมไฟฟ้า เป็นต้น เนื่องจากการเติมเหล็กส่งเสริมให้เกิดสารประกอบเชิงโลหะของเหล็ก (Intermetallic) ในเนื้อพื้นอลูมิเนียมเมทริกซ์ นำไปสู่ความเสถียรทางความร้อนและความสามารถต้านทานการสึกกร่อนของผิววัสดุได้ดี ทำให้โลหะผสม Al-Fe มีการนำไปใช้งานมากขึ้น อย่างไรก็ตามโลหะผสม Al-Fe มีการก่อตัวของเฟสรูปร่างคล้ายเข็มที่อุดมไปด้วยเหล็ก (Fe-rich) ซึ่งทำให้เกิดความเครียดนำไปสู่การแตกร้าวของเนื้อพื้นอลูมิเนียมเมทริกซ์ นอกจากนี้การก่อตัวของเฟสที่อุดมไปด้วยเหล็ก แม้ว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณเหล็กโดยน้ำหนักจะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มสูงขึ้น [1] แต่เมื่อพิจารณาโครงสร้างทางจุลภาคพบว่าการเพิ่มปริมาณเหล็กในโลหะผสม Al-Fe มีผลต่อการก่อตัวของเฟสรูปร่างคล้ายเข็มที่มีใหญ่ขึ้นในเนื้อพื้นอลูมิเนียมเมทริกซ์ ส่งผลให้คุณสมบัติบางประการของวัสดุแย่ลง จึงมีการศึกษาเพื่อปรับปรุงไม่ให้เกิดโครงสร้างดังกล่าว เพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกลที่ดีขึ้น [2]

การเติมธาตุเซอร์โคเนียม (Zr) ในปริมาณที่เหมาะสมสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะผสม Al-Fe ที่ดีขึ้น โดยผ่านการปรับปรุงให้สารประกอบเชิงโลหะ Al_3Fe มีความละเอียดมากขึ้น รวมทั้งการส่งเสริมการตกตะกอนของแข็ง Al_3Zr ซึ่งการทบทวนวรรณกรรม Dai et al. (2022) ทำการศึกษาผลของการเติมสแกนเดียม (Sc) และ Zr (Zr) ที่ปริมาณ 0 ถึง 0.35 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ 0 ถึง 0.14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ ที่ส่งผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงและคุณสมบัติทางกลของโลหะผสม Al-Fe แสดงให้เห็นว่าการเติม Sc และ Zr ช่วยทำให้เฟส Al_3Fe ที่มีรูปร่างคล้ายเข็มขนาดใหญ่ให้มีความละเอียดมากขึ้น ส่งผลเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและ1ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength) ของชิ้นงานหลังจากการบ่มแข็ง (As-aged) จาก 160.8 MPa เป็น 233 MPa เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของธาตุ Sc และ Zr [2]

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราการเย็นตัวและการเติม Zr ในปริมาณที่ต่างกัน ที่มีผลต่อความสามารถในการบ่มแข็งของโลหะผสม Al-Fe การวิเคราะห์ที่ได้จากการศึกษานี้จะนำไปสู่ผลลัพธ์ของอัตราการเย็นตัวและปริมาณการเติม Zr ที่เหมาะสมต่อความสามารถในการบ่มแข็งของโลหะผสม Al-Fe ซึ่งจะเป็นประโยชน์สำหรับการปรับแต่งคุณสมบัติทางกลของวัสดุให้มีความเหมาะสมต่อการใช้งาน และการพัฒนางานวิจัยอนาคตต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา

1. ศึกษาผลของอัตราการเย็นตัวต่อโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Al-Fe
2. ศึกษาผลของการเติมธาตุ Zr ต่อคุณสมบัติทางกลและอัตราการเย็นตัวต่อโครงสร้างจุลภาคและความสามารถในการบ่มแข็งของโลหะผสม Al-Fe

1.3 ขอบเขตของปริิณญานิพนธ์

1. ศึกษาผลกระทบของอัตราการเย็นตัวและการเติม Zr ต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและการบ่มแข็งของโลหะผสม Al-Fe ด้วยเงื่อนไขที่แตกต่างกัน ดังนี้

ตารางที่ 1.1 การออกแบบการทดลอง

โลหะผสม	ปริมาณของ Zr (% โดยน้ำหนัก)	ประเภทของแม่พิมพ์	อุณหภูมิสำหรับการบ่มแข็ง (°C)
1. Al-0.5Fe	0.05% และ 0.15%	แม่พิมพ์เหล็ก แม่พิมพ์แกรไฟต์ และแม่พิมพ์ทองแดง	บ่มแข็งเป็นเวลา 10 ชั่วโมง โดยกำหนดอุณหภูมิที่ 300 °C, 350 °C, 400 °C และ 450 °C เพื่อศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสม
2. Al-1.8Fe			
3. Al-3.0Fe			

2. การหลอมโลหะผสมไฮโปยูเทคติก Al-0.5Fe โลหะผสมยูเทคติก Al-1.8Fe และโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติก Al-3.0Fe กับการเติมธาตุ Zr ที่ความเข้มข้น 0.05% และ 0.15%wt.Zr

3. ศึกษาอัตราการเย็นตัวผ่านการเทโลหะผสมใส่ในแม่พิมพ์ที่ทำจากวัสดุที่ต่างกัน ได้แก่ แม่พิมพ์ทองแดง แม่พิมพ์แกรไฟต์ และแม่พิมพ์เหล็ก เพื่อกำหนดเป็นอัตราการเย็นตัวเร็ว อัตราการเย็นตัวปานกลาง และอัตราการเย็นตัวช้า ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาแล²้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การวิเคราะห์ผลของการเติมธาตุ Zr ในโลหะผสม Al-Fe ที่อัตราการเย็นตัวที่ต่างกันต่อโครงสร้างทางมหภาคและโครงสร้างทางจุลภาค

6. ศึกษาผลของการเติมธาตุ Zr ต่อคุณสมบัติทางกลและอัตราการเย็นตัวต่อโครงสร้างจุลภาคและความสามารถในการบ่มแข็งของโลหะผสม Al-Fe

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. เตรียมโลหะผสม Al-Fe และ Al-Fe-Zr จากการหลอมโลหะอลูมิเนียมบริสุทธิ์ (Al 99.9 wt.%) โลหะแม่ Al-20 wt.% Fe และโลหะแม่ Al-10 wt.% Zr ด้วยเตาหลอมไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ

2. หล่อโลหะผสม Al-0.5 wt.%Fe ที่ไฮโปยูเทคติก (Hypoeutectic) โลหะผสม Al-1.8 wt.%Fe ที่ยูเทคติก (Eutectic) และโลหะผสม Al-3 wt.%Fe ที่ไฮเปอร์ยูเทคติก (Hypereutectic) เทใส่แม่พิมพ์ทองแดง แม่พิมพ์แกรไฟต์ และแม่พิมพ์เหล็ก ที่อุณหภูมิเท 740 °C

3. หล่อโลหะแม่อลูมิเนียม-เหล็ก (Al-Fe Master Alloys) ที่มีการเติมโลหะแม่อลูมิเนียม-เซอร์โคเนียม (Al-10wt.Zr Master Alloys) ความเข้มข้นที่ 0.05 wt.% Zr และ 0.15 wt.% Zr ลงในโลหะผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe, โลหะผสมยูเทคติก Al-Fe และโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติก Al-Fe เทใส่แม่พิมพ์ทองแดง, แม่พิมพ์แกรไฟต์ และแม่พิมพ์เหล็ก ที่อุณหภูมิเท 740 °C

4. ติดตั้งเครื่องบันทึกข้อมูลความเร็วสูง (HIOKI LR 8450 Memory Hilogger) เชื่อมต่อกับเครื่องเซ็นเซอร์ตรวจวัดแบบไร้สาย (HIOKI LR 8530 Wireless Voltage/Temp Unit) ที่ต่อกับเทอร์โมคัปเปิล เหนือโลหะผสมเหลวที่อุณหภูมิเท 740 °C ใส่แม่พิมพ์ กดเริ่มบันทึกข้อมูล รอจนกว่าโลหะผสมเย็นตัวลงในแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 300 °C แล้วจึงหยุดการบันทึกข้อมูล จะได้ข้อมูลอัตราการเย็นตัว (Cooling Rates) จะถูกบันทึกไว้รูปแบบของไฟล์ .txt จากเครื่องบันทึกข้อมูล จากนั้นสร้างกราฟเส้นโค้งการเย็นตัว (Cooling Curve) ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทำการทดลองซ้ำ ทั้งแม่พิมพ์เหล็ก แม่พิมพ์แกรไฟต์ และแม่พิมพ์ทองแดง เพื่อให้ได้ค่าอัตราการเย็นตัวของแต่ละแม่พิมพ์

5. นำโลหะผสมที่ได้จากกระบวนการหล่อโลหะผสม Al-Fe และ Al-Fe-Zr ตัดและเตรียมชิ้นงานด้วยวิธีทางโลหะวิทยา เพื่อใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างทางมหภาคและโครงสร้างทางจุลภาค

6. นำชิ้นงานมาศึกษาโครงสร้างทางมหภาค โดยการกัดกรด (Etching) ด้วย Poulton's Reagent และ Fluoroboric Acid สำหรับวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscopy; OM) และกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electronic Microscopy; SEM) จากนั้นศึกษาระบบการกระจายตัวของเฟสสารประกอบเชิงโลหะในสารละลาย Al-Fe ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer; XRD) และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโลหะผสมด้วยการวิเคราะห์ EDS ด้วย (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy; EDS)

7. นำชิ้นงานไปทำการบ่มแข็ง เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกล โดยทดสอบความแข็ง (Vickers Hardness Testing) และทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิคไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Corrosion Testing)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. อัตราการเย็นตัวที่ต่างกันส่งผลให้เกิดสารประกอบในโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Al-Fe แตกต่างกัน
2. การเติมธาตุ Zr ปริมาณที่ต่างกัน ส่งผลให้คุณสมบัติทางกลและอัตราการเย็นตัวต่อโครงสร้างจุลภาคและความสามารถในการบ่มแข็งของโลหะผสม Al-Fe แตกต่างกัน



1.6 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.2 ตารางแผนการดำเนินงาน

รายการ	พ.ศ. 2566					พ.ศ. 2567			
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1. ศึกษางานวิจัยเพื่อพิจารณาสำหรับกำหนดหัวข้อ ปริญญานิพนธ์									
2. ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับอัตราการเย็นตัวที่มี ผลการต่อปรับปรุงโครงสร้างทางจุลภาคและการบ่มแข็ง ของโลหะผสม Al-Fe-Zr									
3. รวบรวมวิเคราะห์ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการเติมธาตุ Zr อัตราการเย็นตัว และการบ่มแข็ง (Aging) เพื่อหาเงื่อนไขที่ เหมาะสมสำหรับการศึกษาและกำหนดขอบเขตของ ปริญญานิพนธ์									
4. วางแผนการหลอมโลหะตามขอบเขตของการทดลอง									
5. หลอมโลหะผสม Al-Fe เพื่อเตรียมชิ้นงานสำหรับการ ศึกษาวิจัย และวัดอัตราการเย็นตัว									
6. ทำการบ่มแข็งชิ้นงานเพื่อทำการศึกษา									
7. เตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบด้วยวิธีการดังนี้ - วิเคราะห์โครงสร้างทางมหภาคด้วยวิธีการกัดผิว - วิเคราะห์การกระจายตัวของเฟสสารประกอบเชิงโลหะ ในสารละลาย Al-Fe - วิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ แบบใช้แสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รวมทั้งวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโลหะผสมด้วย การวิเคราะห์ EDS - วิเคราะห์คุณสมบัติทางกลและคุณสมบัติความต้านทาน การกัดกร่อนของวัสดุ									
8. วิเคราะห์ผลที่ได้และสรุปผลการดำเนินงาน									
9. จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์									

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและ 5 ้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

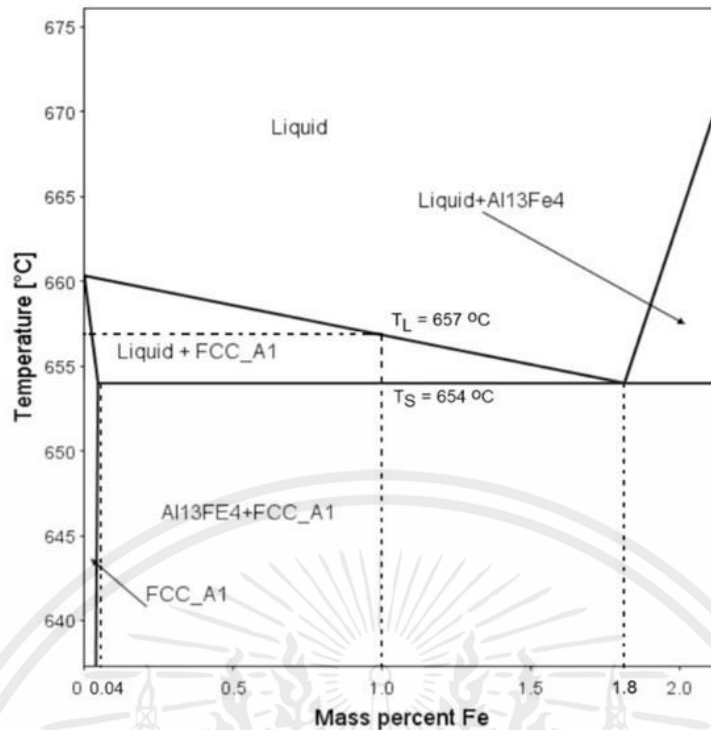
ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีที่มีความจำเป็นต่อการศึกษาเพื่อการพัฒนาอลูมิเนียมผสมเหล็ก รวมทั้งทฤษฎีที่มีความเกี่ยวข้องกับเครื่องมือและเทคนิคต่างๆ ที่มีประโยชน์ต่องานวิจัย ดังนี้

1. อลูมิเนียม
2. การแบ่งกลุ่มของโลหะผสม Al-Fe
3. กระบวนการแข็งตัวของโลหะเหลว
4. การทดสอบคุณสมบัติทางกล
5. หลักการเครื่องมือและเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง
6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อลูมิเนียม

อลูมิเนียมมีความหนาแน่นต่ำ (2.7 g/cm^3) มีความสามารถในการนำไฟฟ้าและนำความร้อนสูง ทนต่อการกัดกร่อน สะดวกต่อการนำไปตัดเฉือน (Machining) และการใช้แรงขึ้นรูป (Wrought Aluminum) เนื่องจากอลูมิเนียมมีจุดหลอมเหลวต่ำที่ประมาณ $660 \text{ }^\circ\text{C}$ จึงเป็นข้อจำกัดสำหรับนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูง การปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของอลูมิเนียม สามารถทำได้โดยการขึ้นรูปเย็นด้วยการเติมธาตุผสม เช่น ซิลิกอน แมกนีเซียม ทองแดง แมงกานีส และสังกะสี หรือทำสารละลายของแข็ง (Solid Solution) เพื่อให้เกิดการตกผลึกของสารประกอบเหล็กในเนื้อพื้นอลูมิเนียมเมทริกซ์ [3]

โลหะผสมอะลูมิเนียม-เหล็ก (Al-Fe Alloys) มีความสามารถในการประยุกต์ใช้ที่อุณหภูมิสูง เมื่อเทียบกับโลหะผสมอลูมิเนียมทั่วไป การปรับปรุงนี้เกิดจากการกระจายตัวของอนุภาคเฟสปฐมภูมิภายในโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะผสม Al-Fe [4][5]



รูปที่ 2.1 แผนภาพเฟสของระบบโลหะผสม Al-Fe [6]

2.2 การแบ่งกลุ่มของโลหะผสม Al-Fe

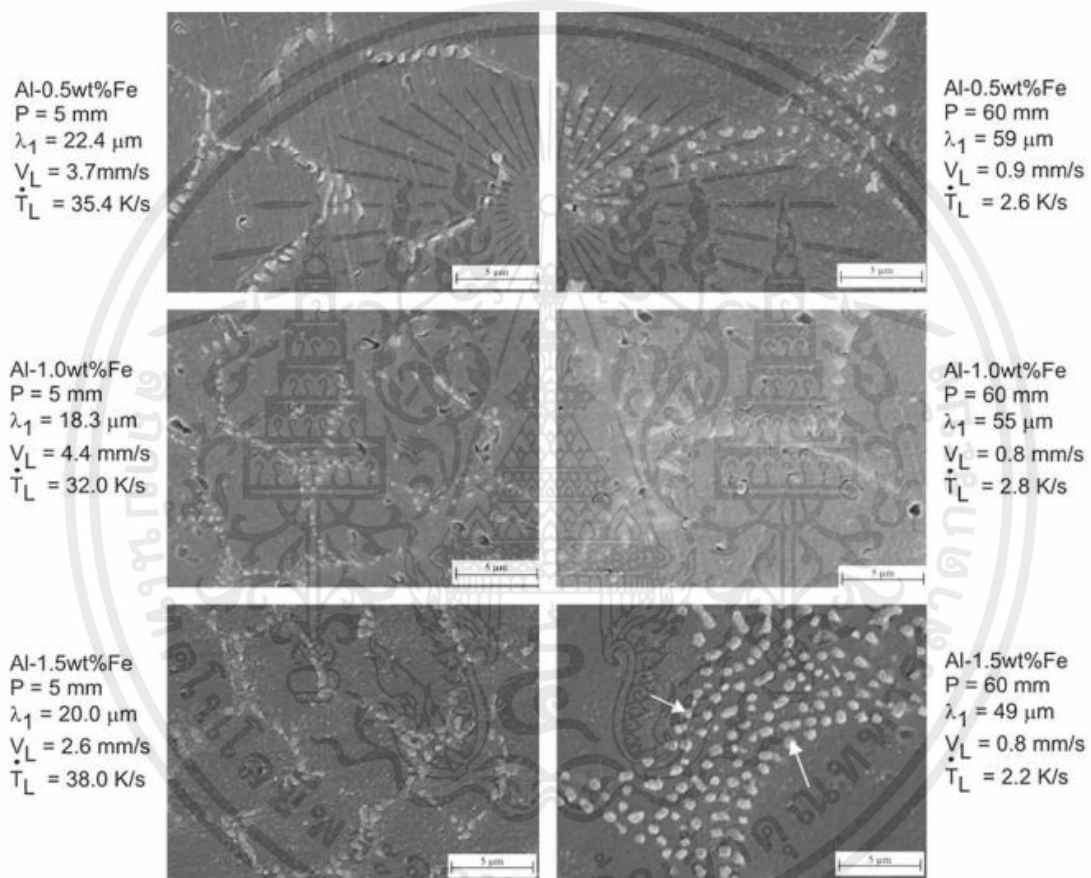
โลหะผสมอลูมิเนียม-เหล็ก (Al-Fe Alloys) เป็นการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของอลูมิเนียมให้มีความเสถียรต่อการใช้งานที่อุณหภูมิสูง และเพื่อลดการเกิดข้อบกพร่องที่อาจเกิดจากการหล่อขึ้นรูป ทั้งนี้ปริมาณของเหล็กมีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคของอลูมิเนียม ส่งผลให้คุณสมบัติของอลูมิเนียมที่มีการเติมเหล็กในปริมาณต่างกันเปลี่ยนแปลงไป [7] โดยในการศึกษาจะมีการแบ่งกลุ่มของโลหะผสม Al-Fe เป็น 3 ประเภท ดังนี้

2.2.1 โลหะผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe

โครงสร้างที่ได้จากการผสมเหล็กต่ำกว่าองค์ประกอบยูเทคติก หรือต่ำกว่า 1.8%Fe โดยกลไกการแข็งตัวของโลหะผสมไฮโปยูเทคติก เมื่อโลหะเหลวเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็ง อลูมิเนียมจะเริ่มแข็งตัวเป็นอันดับแรก ก่อนที่จะเกิดโครงสร้างแบบแผ่นบางซ้อนกันเป็นชั้น (Lamella) ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงเฟสพร้อมกันจากของเหลวกลายเป็นเฟสของแข็งของอลูมิเนียม และเฟสอลูมิเนียมเหล็กที่อุณหภูมิ 652 °C

Goulart et al. (2009) ทำการศึกษาสารประกอบเชิงโลหะในโลหะผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe ในเนื้อพื้นอลูมิเนียมเมทริกซ์ พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะผสมไฮโปยูเทคติก มีเฟสปฐมภูมิที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นแท่งสั้น เช่น อนุภาคของ Al_6Fe เมื่อเติมปริมาณของเหล็กมากขึ้นจะส่งผลทำให้มีสัดส่วนของเฟสปฐมภูมิของเหล็กเพิ่มมากขึ้น โดยเห็นได้ชัดเจนในโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะผสม Al-1.5 %Fe ที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อสาธารณะไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่ง 60 มิลลิเมตร (ตำแหน่งวัดจากด้านล่างสุดของแบบหล่อ) นอกจากนี้ยังอธิบายกลไกที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคว่า การเปลี่ยนแปลงของอัตราการเย็นตัวที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อการเติบโตของเกรนที่อยู่ในโลหะผสม โดยระยะห่างของเกรนจะแคบ สำหรับชิ้นงานในแบบหล่อที่ตำแหน่งด้านล่างสุดของแบบหล่อที่มีอัตราการเย็นตัวเร็ว เนื่องจากมีการสัมผัสกับส่วนที่โดนน้ำหล่อเย็นมากกว่า ในทางกลับกัน ระยะห่างระหว่างเกรนจะใหญ่ขึ้น สำหรับชิ้นงานด้านบนแบบการหล่อ ซึ่งมีอัตราการเย็นตัวที่ช้ากว่า โดยกลไกการขึ้นของระยะห่างของเกรนตามตำแหน่งในของแบบหล่อจากล่างขึ้นบนนี้เป็นผลมาจากการอัตราการคายความร้อนที่ต่างกันระหว่างการแข็งตัว [8] (ดังแสดงในรูปที่ 2.2)



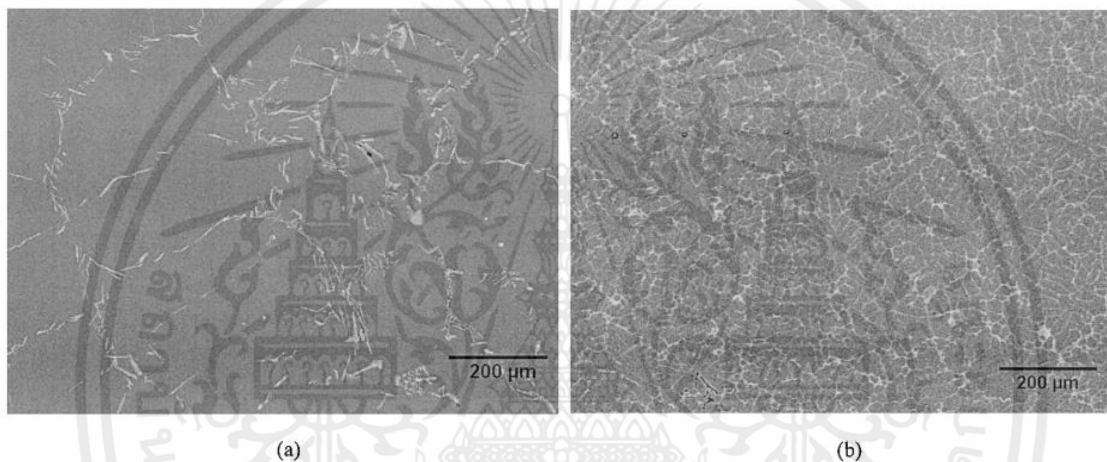
รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางจุลภาคตามความยาวการหล่อแบบทิศทางเดียวของโลหะผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe (P คือตำแหน่งเย็นตัวจากด้านล่าง λ_1 คือระยะห่างระหว่างเซลล์เฉลี่ย V_L คืออัตราการเติบโตของทิว และ T_L คืออัตราการเย็นตัว) [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาแล 8 ้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 โลหะผสมยูเทคติก Al-Fe

โลหะผสมยูเทคติก Al-Fe (Eutectic Al-Fe Alloys) จะมีปริมาณเหล็กผสม 1.8%Fe โดยกลไกการแข็งตัวของโลหะผสมยูเทคติกมีกระบวนการแข็งตัวพร้อมกันของเฟสอลูมิเนียม และเฟสอลูมิเนียมเหล็กพร้อมกัน ทำให้โลหะผสมยูเทคติกมีโครงสร้างแบบแผ่นบางซ้อนกันเป็นชั้น (Lamellar) ทัวทั้งชิ้นงาน

การทบทวนงานวิจัยของ Dutta และ Rettenmayr (2000) ที่มีการศึกษาผลกระทบของอัตราการเย็นตัวที่มีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะผสมเหล็กและซิลิกอน โดยอัตราการเย็นตัวที่ใช้ในการศึกษาอยู่ระหว่าง 0.04 K s^{-1} และ 3.5 K s^{-1} จากโครงสร้างทางจุลภาคแสดงถึงสัดส่วนยูเทคติกเพิ่มขึ้น และการลดลงของระยะห่างระหว่างแขนของเดนไดรต์ทุติยภูมิ (Secondary Dendrite Arm Spacing; SDAS) เมื่อเย็นตัวภายใต้อัตราการเย็นตัวเร็วขึ้น [9] ดังรูปที่ 2.3



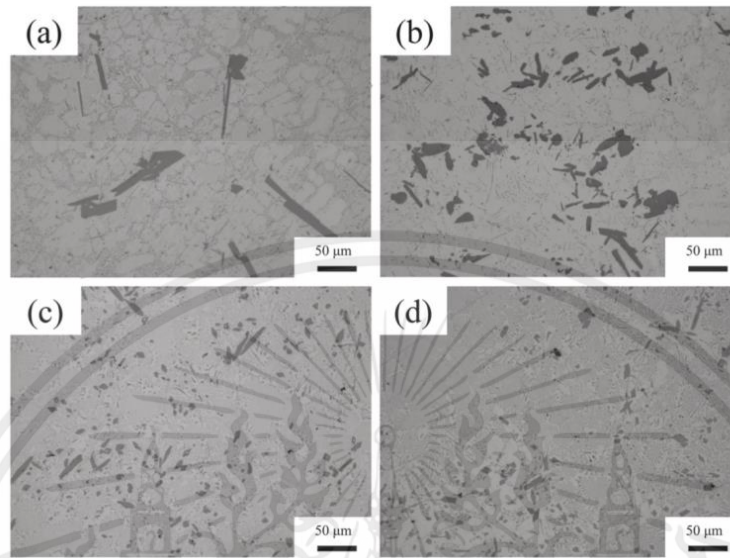
รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางจุลภาคของโลหะผสมยูเทคติก Al-Fe-Si ที่มีอัตราการเย็นตัวต่างกัน อัตราการเย็นตัวช้า และ (b) อัตราการเย็นตัวเร็ว [9]

2.2.3 โลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติก Al-Fe

โลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติก Al-Fe จะมีปริมาณเหล็กมากกว่า 1.8%Fe ระหว่างกระบวนการแข็งตัวโลหะเหลวจะเริ่มเปลี่ยนเฟสเป็นของแข็งอลูมิเนียมเหล็กก่อน จนกระทั่งถึงอุณหภูมิยูเทคติกที่ $652 \text{ }^{\circ}\text{C}$ โลหะเหลวจะเปลี่ยนเฟสเป็นของแข็งอลูมิเนียมและเฟสอลูมิเนียมเหล็กพร้อมกัน เกิดโครงสร้างแบบแผ่นบางซ้อนกันมีลักษณะเป็นชั้นแทรกตัวอยู่ในเฟสอลูมิเนียมเหล็ก

Chankitmunkong et al. (2020) ศึกษาโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติก Al-Fe-Zr และ Al-Ni-Zr ที่ผ่านกระบวนการอัลตราโซนิก โดยแสดงถึงโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติก ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งอธิบายว่า โครงสร้างทางจุลภาคหลักของโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติกส่วนใหญ่ จะประกอบด้วยสารประกอบเชิงโลหะปฐมภูมิและโคโลนียูเทคติก นอกจากนี้จากการศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างทางจุลภาคที่เปลี่ยนแปลงไป โดยแสดงให้เห็นว่าเฟสปฐมภูมิ Al_3Fe หรือ Al_3Ni ได้รับการปรับแต่งด้วยอัลตราโซนิก (USP) โดยสำหรับโลหะผสมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและ 9 อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Al-4Fe-0.3Zr กระบวนการอัลตราโซนิก ส่งผลต่อการลดลงของขนาดมากถึง 70% โดยลดขนาดเฉลี่ยจาก $159 \pm 2 \mu\text{m}$ เป็น $45 \pm 0.1 \mu\text{m}$ แต่ขนาดเฉลี่ยของของ Al_3Ni การเปลี่ยนแปลงลดลงจาก 39 ± 0.3 เป็น $34 \pm 0.3 \mu\text{m}$ [10]



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางจุลภาคไฮเปอร์ยูเทคติกของ Al-Fe และ Al-4Fe-0.3Zr [10]

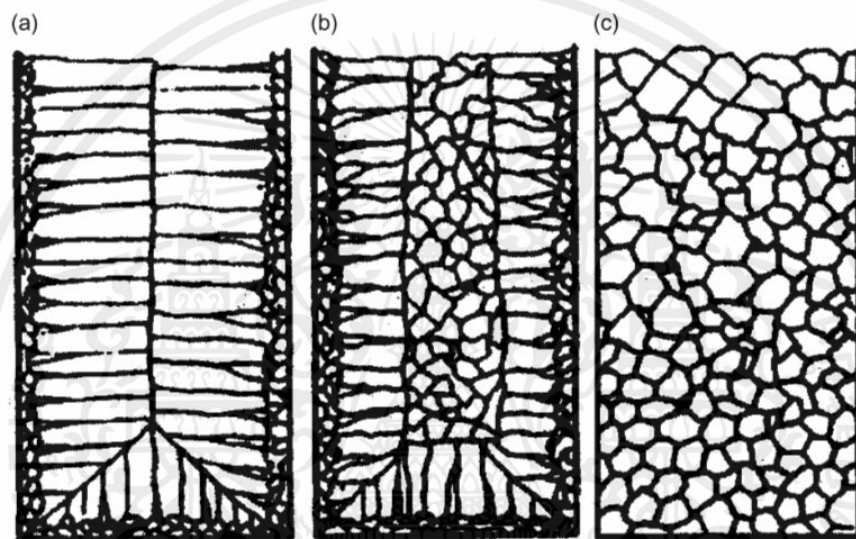
2.3 กระบวนการแข็งตัวของโลหะเหลว

ปัจจุบันการปรับปรุงเพื่อพัฒนาคุณสมบัติทางกลของโลหะผสมมีการศึกษาที่แพร่หลายมากขึ้น ซึ่งโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุเป็นหนึ่งในปัจจัยที่ได้รับการพิจารณา ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลที่ต่างกันด้วย โดยอิทธิพลหลักของโครงสร้างทางจุลภาค คือ กระบวนการแข็งตัวของวัสดุ (Solidification) โดยในระหว่างการแข็งตัวของโลหะผสม จะมีการก่อตัวของเกรนเกิดขึ้น โดยกลไกที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ดังนี้ [11]

2.3.1 กลไกการเกิดของเกรน

กลไกของการแข็งตัวของโลหะผสมหลังจากการหล่อโลหะเหลวใส่แบบหล่อ (Molds) โดยทั่วไป โครงสร้างจุลภาคจะมีการก่อตัวของเกรนเกิดขึ้นในวัสดุ แสดงการก่อตัวของเกรนเกิดโครงสร้างที่แตกต่างกัน ดังในรูปที่ 2.5 แสดงถึงโครงสร้างเกรนที่เกิดขึ้นในพื้นที่ที่ติดกับผนังของแบบหล่อ มีลักษณะเป็นเกรนละเอียด และมีการวางแผนผลึกศาสตร์แบบสุ่มตามขอบของผนังแม่พิมพ์ เรียกการเกิดเกรนลักษณะนี้ว่า เกรนละเอียด (Chill Zone) ดังรูปที่ 2.5(a) ซึ่งการเกิดเกรนในลักษณะนี้เกิดจากอัตราการเย็นตัวในระหว่างการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งอย่างรวดเร็ว จะเกิดขึ้นเมื่อโลหะผสมเหลวสัมผัสกับผนังแม่พิมพ์เย็น ในขณะที่น้ำโลหะเหลวจะเริ่มแข็งตัวไปยังจุดศูนย์กลางของแม่พิมพ์ โครงสร้างเกรนที่ปรากฏจะเป็นมีลักษณะเป็นแท่ง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาแล¹⁰องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยาว เรียกว่า เกรนแบบแท่ง (Columnar Zone) โดยการจัดเรียงตัวของเกรนที่มีการเปลี่ยนแปลงจากลักษณะของเกรนละเอียดไปยังเกรนแบบแท่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.5(a) แสดงลักษณะที่เกิดขึ้นในการแข็งตัวของโลหะบริสุทธิ์ (Pure Metals) สำหรับโลหะและโลหะผสมที่ไม่บริสุทธิ์ จะปรากฏลักษณะของเกรนแบบสม่ำเสมอ (Equiaxed Grain) ในระยะสุดท้ายของการแข็งตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.5(b) โครงสร้างเกรนที่มีลักษณะการรวมกันของเกรนสม่ำเสมอและเกรนแบบแท่งเป็นลักษณะที่ไม่พึงประสงค์ แต่การจัดเรียงตัวของเกรนที่มีลักษณะเกรนละเอียดกระจายสม่ำเสมอทั่วทั้งโครงสร้างของโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 2.5(c) เป็นโครงสร้างที่เป็นการต้องการให้เกิดขึ้นสำหรับการแข็งตัวของโลหะที่สามารถเกิดขึ้นได้ด้วยการเติมอนุภาคที่ก่อให้เกิดนิวเคลียสเข้าไปในของโลหะเหลว [11]



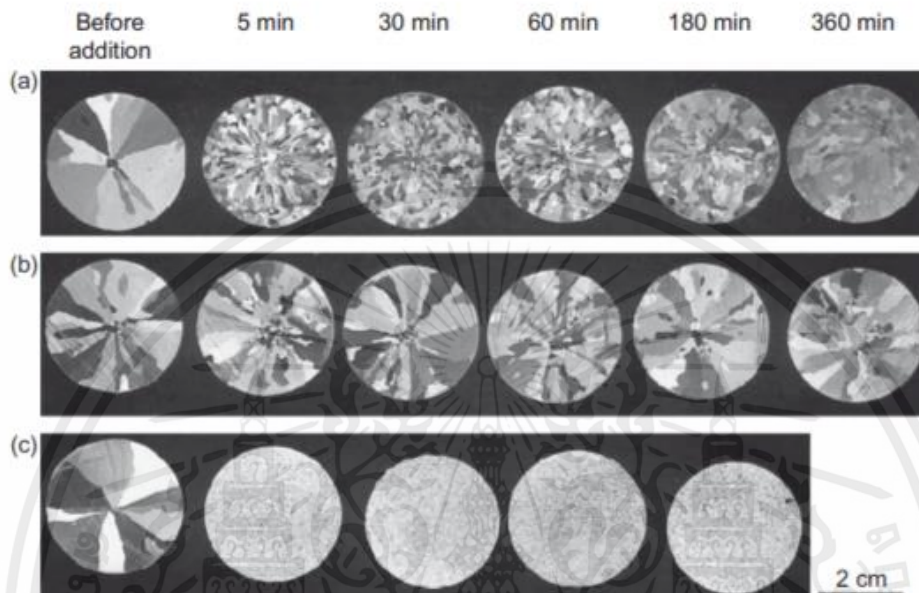
รูปที่ 2.5 แผนผังแสดงโครงสร้างเกรนในโลหะหล่อ (a) ช่วงเกรนละเอียด (Chill Zone) และการเติบโตของเกรนแบบแท่ง (Columnar Zone) (b) การเปลี่ยนแปลงของเกรนแบบแท่งไปยังเกรนละเอียดแบบสม่ำเสมอ (Equiaxed Grain) และ (c) เกรนสม่ำเสมอทั่วทั้งโครงสร้างของโลหะหล่อ [12]

2.3.2 การปรับแต่งเกรนละเอียด

การปรับแต่งเกรนละเอียด (Grain Refinement) มีความสำคัญอย่างมากสำหรับกระบวนการต่างๆ เช่น การหล่อเหล็กแท่งยาว DC (Direct Chill) สำหรับโลหะผสมที่ขึ้นรูป จะช่วยลดการแบ่งแยกทางมหภาค (Segregation) ป้องกันการแตกร้าว และทำให้ความเร็วการหล่อสูงขึ้น ซึ่งการปรับแต่งเกรนยังสำคัญในการปรับปรุงข้อบกพร่องการหล่อขึ้นรูปของโลหะ ที่จะช่วยเพิ่มความสามารถในการป้อน ลดขนาดของรูพรุน และลดปัญหาการฉีกขาดจากความร้อน โดยอิทธิพลของตัวปรับแต่งเกรนละเอียดที่เพิ่มเข้าไปในโลหะผสมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการอบชุบของชิ้นงาน (Heat Treatment) เป็นผลต่อการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลที่ดีขึ้นของวัสดุ ในกรณีของโลหะผสมที่ผ่านตัดขึ้นรูปที่ส่งผลเสียต่อโครงสร้างเกรน ทำให้คุณสมบัติทางกลลดลง สำหรับการปรับแต่งเกรนละเอียดจะช่วยลดผลกระทบที่เกิดขึ้นในกระบวนการหล่อและการแปรรูปในภายหลัง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาแล 11 อย่างเป็นทางการถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

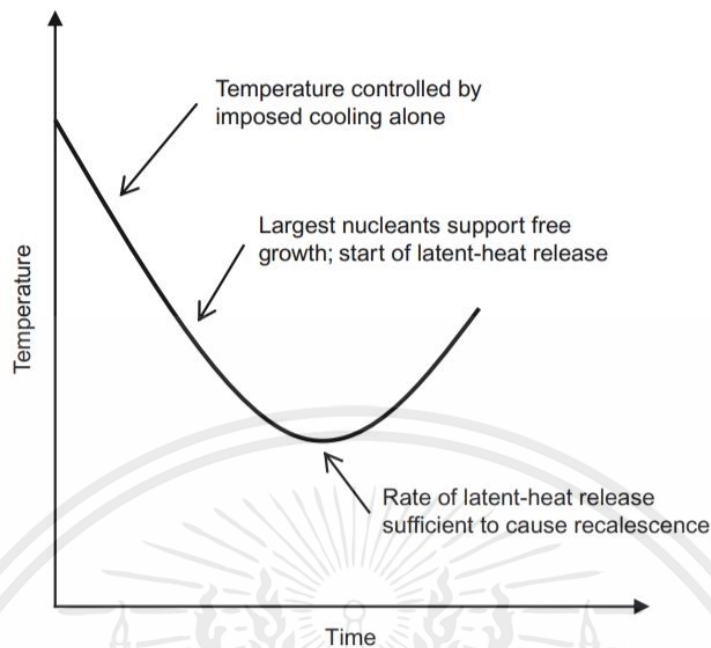
อีกทั้งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะของโครงสร้างทางจุลภาค โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับสารประกอบเชิงโลหะปฐุมภูมิ [13][14] กรณีของโลหะผสมยูเทคติกและไฮเปอร์ยูเทคติก Al-Si ตัวปรับแต่งเกรนที่หลอมละลายมีบทบาทในการปรับเปลี่ยนโครงสร้างทางจุลภาคของเฟสยูเทคติก [15] หรือทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยานิวเคลียสของซิลิคอนของระยะการแข็งตัวปฐุมภูมิ [11][16]



รูปที่ 2.6 ระยะเวลาในการกักเก็บต่อการปรับแต่งเกรนของตัวอย่างทดสอบ TP-1 ของอะลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์สูงที่มีการเติม Al-Ti-C แตกต่างกัน [17]

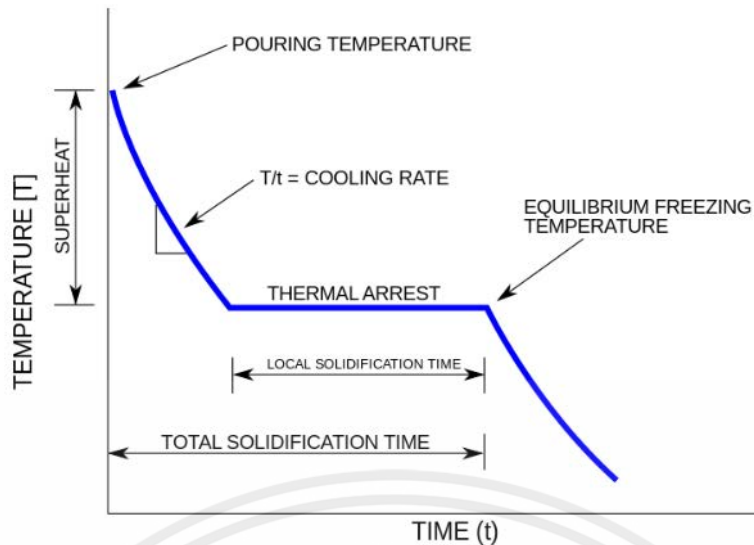
การศึกษาอิทธิพลการปรับแต่งเกรนส่วนใหญ่จะอาศัยการทดลองที่ใช้โลหะเหลวในปริมาณน้อย การทดสอบที่ใช้กันอย่างแพร่หลายอย่างหนึ่ง คือ การทดสอบ Alcan หรือ TP-1 ซึ่งใช้ปริมาณในการหลอมเหลวโลหะ เพื่อทดสอบเพียง 100 cm³ การทดสอบนี้แสดงให้เห็นถึงอัตราการเย็นตัว โดยทั่วไปจะอยู่ที่ประมาณ 3.5 K/s ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับที่พบในกระบวนการหล่อทางอุตสาหกรรม (Direct Chill) ข้อมูลขนาดเกรนที่แสดงในรูปที่ 2.6 ได้มาจากการทดสอบ TP-1 ในอะลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์ (99.999%) ที่ใส่ตัวปรับแต่งเกรน Al-Ti-C ในปริมาณต่างๆ จากการศึกษาข้างต้นชี้ให้เห็นถึงข้อมูลเชิงลึกที่แสดงให้เห็นผลของการปรับแต่งเกรนต่อโครงสร้างของวัสดุ ภายใต้สภาวะที่คล้ายคลึงกับกระบวนการหล่อทางอุตสาหกรรม [11][17]

2.3.3 แบบจำลองทางความร้อน



รูปที่ 2.7 แผนผังแบบจำลองอัตราการเย็นของ Maxwell และ Hellawell [18]

Maxwell และ Hellawell ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับอัตราการเย็นตัวของอลูมิเนียมในระหว่างที่หลอมว่ามีผลต่อการปรับแต่งเกรนของวัสดุ โดยอธิบายกลไกของการโตของจำนวนเกรนที่มากขึ้น ส่งผลต่ออัตราการคายความร้อนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้อุณหภูมิระหว่างการแข็งตัวเพิ่มขึ้น ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า รีคาเลเซนซ์ (Recalescence) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ที่จำกัดการเกิดขึ้นของนิวเคลียส จากการศึกษาของ Maxwell และ Hellawell แสดงให้เห็นถึงปัจจัยสำคัญมีผลต่อการควบคุมขนาดเกรน คือ จำนวนและประสิทธิภาพของอนุภาคนิวเคลียส ซึ่งอัตราการเย็นตัวที่ลดลงอย่างรวดเร็วจะส่งผลต่อการโตของขนาดเกรน และปริมาณตัวถูกละลาย (Solute) ในการหลอมละลาย เป็นปัจจัยที่จำกัดการโตของผลึก [18]



รูปที่ 2.8 แบบจำลองอธิบายกลไกเส้นโค้งการเย็นตัวของโลหะบริสุทธิ์ [19]

การแข็งตัวของโลหะบริสุทธิ์ เกิดขึ้นที่อุณหภูมิจุดหลอมเหลวของโลหะบริสุทธิ์ รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะของเส้นโค้งการเย็นตัว (Cooling Curve) ของโลหะบริสุทธิ์ กระบวนการแข็งตัวของโลหะที่อุณหภูมิคงที่ (T_m) ใช้ระยะเวลาช่วงหนึ่งจนโลหะแข็งตัวทั่วทั้งชิ้นงาน ซึ่งเป็นช่วงที่โลหะเหลวเกิดการคายความร้อนแฝงของการหลอมเหลว ถ่ายเทสู่สิ่งแวดล้อม หากรวมเวลาที่ใช้ตั้งแต่การเทโลหะเหลวลงแม่พิมพ์จนกระทั่งโลหะเหลวเกิดการแข็งตัวอย่างสมบูรณ์ จะได้เป็นเวลารวมการแข็งตัว เมื่อโลหะเกิดการแข็งตัวอย่างสมบูรณ์ โครงสร้างของโลหะจะไม่มีเปลี่ยนแปลง แต่จะยังคงถ่ายเทความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม จนกระทั่งโลหะมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิต่อ [19]

2.4 การทดสอบคุณสมบัติทางกล

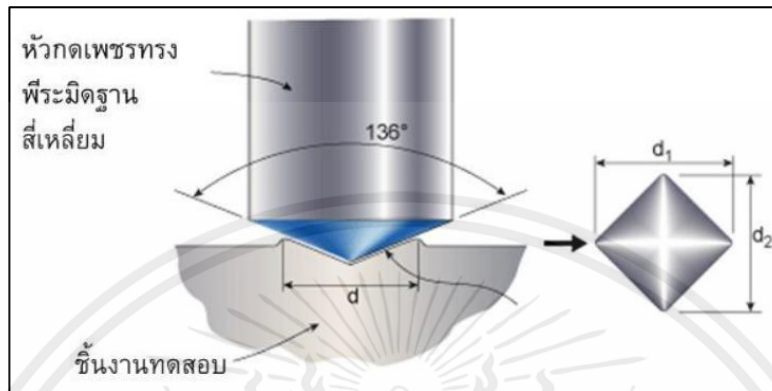
2.4.1 ความแข็ง

ความแข็ง (Hardness) เป็นปริมาณทางฟิสิกส์ที่แสดงถึงความสามารถในการคงรูปของวัสดุต่างๆ เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำกับวัตถุ โดยความแข็งเป็นปริมาณสัมพัทธ์ที่แตกต่างจากปริมาณทางฟิสิกส์อื่นๆ เช่น ระยะทาง เวลา ปริมาตร เป็นต้น ความแข็งจะไม่มีมาตรฐานที่แน่นอน แต่จะขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะทางกายภาพ จึงเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ รอยกัดที่ได้จากเครื่องทดสอบความแข็งจะบ่งบอกถึงความแข็งแรง ความยืดหยุ่น ลักษณะโครงสร้างหรือองค์ประกอบของชิ้นงาน [23]

การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์

เครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test) เป็นการวัดค่าความแข็งที่ใช้หัวกดเพชรทรงพีรามิดมุม 136 องศา ฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส กดลงบนผิวชิ้นงานทดสอบด้วยแรงกด F ซึ่งมีขนาดแรงตั้งแต่ 1 ถึง 120 กิโลกรัมแรง โดยกดตั้งฉากกับผิวของชิ้นงาน การเคลื่อนที่ของหัวกดที่กดลงบนชิ้นงานจะใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาแล 14

เวลาประมาณ 15 วินาที และจะคงค่าแรงกดไว้ระยะหนึ่งขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุ เช่น เหล็กกล้าจะคงแรงกดไว้ประมาณ 10 วินาที ในขณะที่วัสดุอ่อนจะคงแรงกดไว้นานกว่า เมื่อหัวกดถูกยกขึ้น รอยกดที่เกิดขึ้นจะถูกวัดขนาดโดยการวัดเส้นทแยงมุม d_1 และ d_2 ด้วยความละเอียดการวัด 0.002 มิลลิเมตร ดังรูป ค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุม (d) นำไปคำนวณค่าความแข็ง ดังสมการที่ 2.1



รูปที่ 2.9 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ [23]

$$\text{ความแข็งวิกเกอร์} = \frac{\text{แรงกด}}{\text{พื้นที่ผิวรอยกด}} = \frac{0.102F \times 2 \cos 22^\circ}{d^2} = \frac{0.189F}{d^2} \quad (2.1)$$

โดยหน่วยของความแข็งแบบวิกเกอร์ เป็น HV

ข้อดีของการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์

หัวกดมีขนาดเล็กและแรงกดที่ใช้กดต่ำ รอยกดจึงอาจมีขนาดเล็กกว่าขนาดเกรนของโลหะ จึงสามารถวัดระดับความแข็งได้ถึงระดับโครงสร้างจุลภาค เหมาะกับงานทดสอบที่ต้องการความละเอียดของค่าความแข็งสูง สามารถทดสอบได้ทั้งวัสดุอ่อนและวัสดุแข็ง

ข้อจำกัดของการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์

1. ความหนาของชิ้นงานทดสอบไม่ควรน้อยกว่า 1.2 เท่าของเส้นทแยงมุมรอยกด
2. ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางรอยกดกับขอบชิ้นงานทดสอบหรือขอบของรอยกด ควรมีความหนาไม่ต่ำกว่า 3 เท่าของความยาวเส้นทแยงมุมเฉลี่ยของรอยกด
3. ต้องเตรียมผิวชิ้นงานให้เรียบและสะอาดมากในระดับที่สามารถส่องดูผิวเรียบภายใต้กำลังขยาย 40 เท่าได้ และต้องไม่มีคราบจากการขีด รอยขีดข่วน หรือชั้นฟิล์มออกไซด์อยู่บนผิวของชิ้นงาน [23]

2.4.2 การกัดกร่อนของโลหะ

การกัดกร่อน คือ การเสื่อมสภาพของวัสดุจากปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical) ที่เกิดขึ้นที่ผิวโลหะ ทำให้เกิดความเสียหาย ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลและความสามารถในการใช้งานที่ลดลง แต่กระบวนการกัดกร่อน เช่น การกัดกรวด (Etching) ก็มีประโยชน์สำหรับการตรวจสอบและวิเคราะห์โครงสร้างทางมหภาคของโลหะ

วัสดุโลหะ มีกระบวนการกัดกร่อนแบบเคมีไฟฟ้า เกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างผิวของโลหะกับบรรยากาศโดยรอบ เมื่อโลหะมีการสูญเสียอิเล็กตรอน หรือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) โลหะจะสูญเสียอะตอมของโลหะ จนกระทั่งเนื้อโลหะสึกกร่อนหายไปเมื่อเวลาผ่านไป โดยรูปแบบของการกัดกร่อนในโลหะสามารถแบ่งได้ดังนี้ [3]

2.4.2.1 รูปแบบของการกัดกร่อนในโลหะ

1. การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ

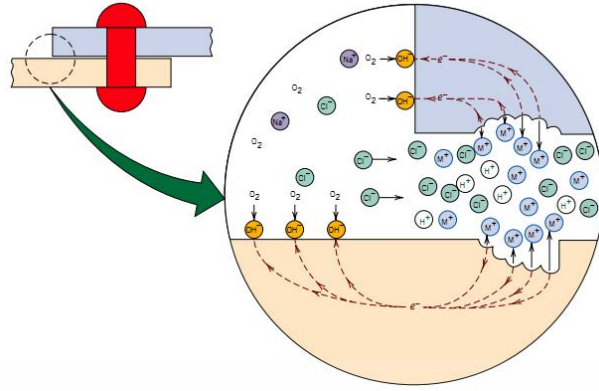
การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform Corrosion) เป็นรูปแบบของการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเท่ากันทั่วบริเวณผิวของโลหะ เมื่อโลหะสูญเสียอิเล็กตรอนจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่งผลให้สูญเสียเนื้อโลหะและเกิดขึ้นสนิมขึ้นมาแทน การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอสามารถเกิดขึ้นได้ทั่วไป

2. การกัดกร่อนแบบกัลวานิก

การกัดกร่อนแบบกัลวานิก (Galvanic Corrosion) เกิดขึ้นเมื่อสองวัสดุโลหะที่มีองค์ประกอบต่างกัน ส่งผลต่อความต่างศักย์ที่แตกต่างกัน เมื่อนำสองวัสดุโลหะมาสัมผัสกัน จะเกิดเป็นวงจรไฟฟ้าที่อิเล็กตรอนสามารถไหลจากวัสดุชิ้นหนึ่ง ไปยังโลหะอีกชิ้นหนึ่งได้ โดยวัสดุโลหะที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าจะเสียอิเล็กตรอนให้กับวัสดุโลหะที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่า ทำให้วัสดุที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำเกิดการกัดกร่อน เนื่องจากการสูญเสียเนื้อโลหะโดยกัดกร่อนแบบกัลวานิก พบว่าบริเวณที่มีการยึดสกรูด้วยวัสดุที่ต่างกันของสกรูและชิ้นงาน ทำให้เกิดการสูญเสียอิเล็กตรอน เกิดการกัดกร่อนแบบกัลวานิก โดยอัตรากัดกร่อนแบบกัลวานิก คำนวณจากความหนาแน่นของกระแสต่อพื้นที่ ซึ่งขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของความต่างศักย์ที่บริเวณพื้นผิวของวัสดุโลหะทั้งสอง หากมีความต่างศักย์ของวัสดุทั้งสองมาก ส่งผลให้การกัดกร่อนแบบกัลวานิกรุนแรงขึ้น

3. การกัดกร่อนในที่อับ

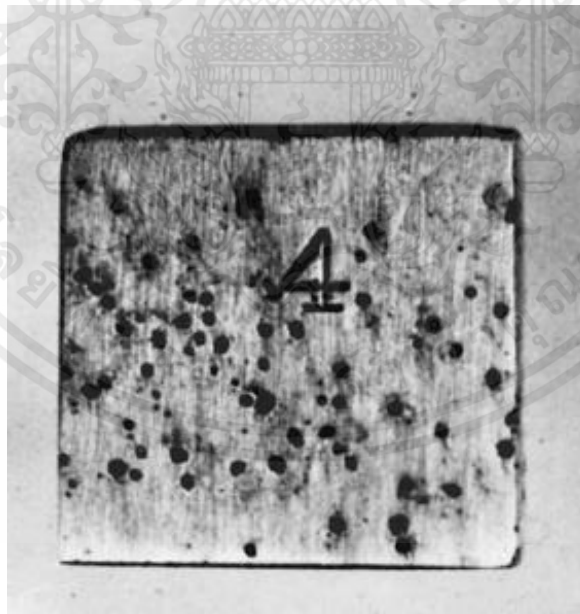
การกัดกร่อนในที่อับ (Crevice Corrosion) เป็นปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างของความเข้มข้นประจุระหว่างรอยต่อหรือรอยแยกของวัสดุโลหะ ซึ่งเป็นที่สะสมของสิ่งสกปรกหรือมีสารละลายขังอยู่ ทำให้บริเวณรอยต่อนี้มีปริมาณของออกซิเจนลดลง มีความเข้มข้นของประจุบวกมากขึ้น ส่งผลให้โลหะเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอน หรือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน สำหรับวิธีการป้องกันการกัดกร่อนในที่อับสามารถทำได้โดยใช้การเชื่อมแทนการยึดด้วยสกรู เพื่อลดการสะสมของสิ่งสกปรกต่างที่บริเวณใต้สกรูกับผิวโลหะ



รูปที่ 2.10 การกัดกร่อนในที่อับของแผ่นโลหะที่มีการย้ำหมุด [20]

4. การกัดกร่อนแบบรูเข็ม

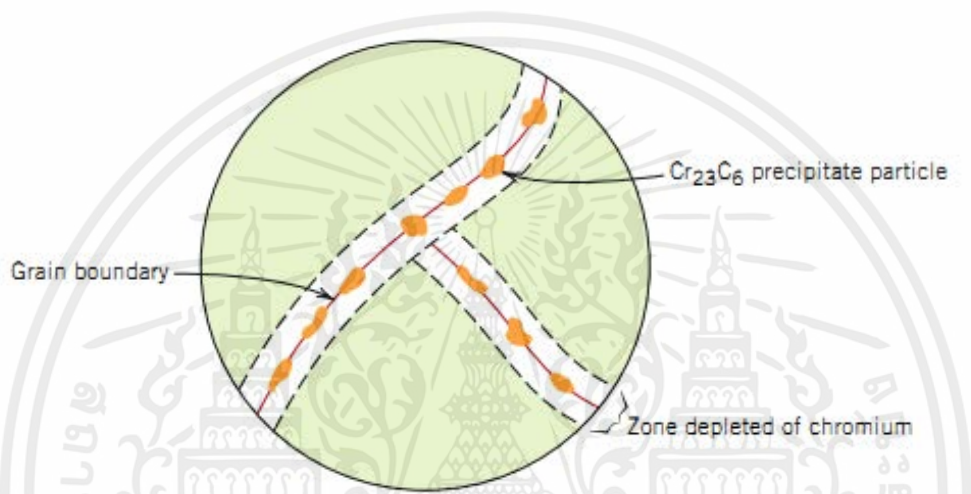
การกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting) เป็นการกัดกร่อนเฉพาะที่ ในลักษณะรูเล็กๆ ในแนวตั้งจากบนลงล่างของผิวโลหะซึ่งเป็นการกัดกร่อนที่รุนแรง เมื่อเวลาผ่านไปการกัดกร่อนในแนวตั้งลึกลงไปเนื้อโลหะ โลหะเกิดการสูญเสียเนื้อมากขึ้น จนอาจทำให้เกิดความเสียหายแบบฉับพลัน โดยกัดกร่อนรูปแบบนี้ เกิดขึ้นบริเวณผิวโลหะที่ขรุขระพร่อง เช่น รอยข่วน หรือบริเวณที่มีความแตกต่างขององค์ประกอบบริเวณผิวเพียงเล็กน้อย



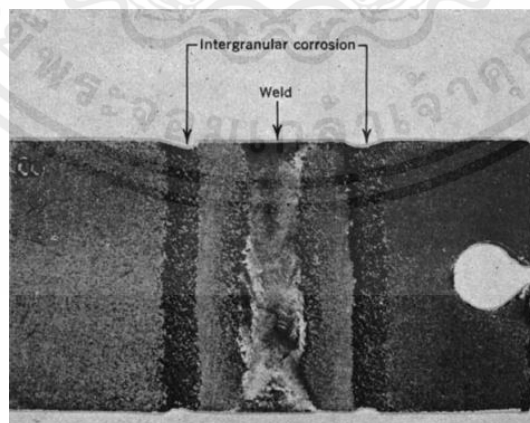
รูปที่ 2.11 การกัดกร่อนแบบรูเข็มของเหล็กกล้าโรสนิมด้วยสารละลายกรดคาร์บอกซิลิก [20]

5. การกัดกร่อนตามขอบเกรน

การกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular Corrosion) เป็นการกัดกร่อนที่เกิดตามบริเวณขอบเกรน ในระดับจุลภาค โดยขอบเกรนจะมีการสูญเสียอิเล็กตรอน ส่งผลให้สูญเสียเนื้อโลหะบริเวณขอบเกรน ซึ่งสามารถเกิดขึ้นกับเหล็กกล้าไร้สนิมบางชนิดเมื่อนำไปใช้งานไม่เหมาะสม เช่น การนำไปใช้ที่อุณหภูมิสูงมากกว่า 500-800 °C เป็นเวลานาน ส่งผลให้เกิดโครเมียมคาร์ไบด์ตามขอบเกรน (Cr_{23}C_6) จากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโครเมียมและคาร์บอนในเหล็กกล้าไร้สนิม โดยโครเมียมคาร์ไบด์จะเรียงตัวตามแนวขอบเกรน ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.11 การเรียงตัวของโครเมียมคาร์ไบด์บริเวณขอบเกรน [3]



รูปที่ 2.12 การกัดกร่อนตามขอบเกรนของเหล็กกล้าไร้สนิม [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาแล18องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. การสูญเสียส่วนผสมบางตัว

การสูญเสียส่วนผสมบางตัว (Selective Leaching) พบในสารละลายของแข็งของโลหะ ที่ทำให้มีธาตุหนึ่งถูกกำจัดออกจากโลหะผสมในกระบวนการกัดกร่อน เช่น การสลายสังกะสีของทองเหลือง โดยการสูญเสียส่วนผสมบางตัวนี้ สามารถเกิดขึ้นได้กับหลากหลายระบบโลหะผสม เช่น อลูมิเนียม เหล็ก โคบอล เป็นต้น

7. การกัดกร่อนแบบกัดเซาะ

การกัดกร่อนแบบกัดเซาะ (Erosion Corrosion) เกิดจากการรวมกันของปฏิกิริยาทางเคมีและทางกล เช่น การสึกหรอ หรือการไหลของของเหลว การกัดกร่อนแบบกัดเซาะสามารถพบได้ในข้อต่อท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางส่งผลความเร็วของของไหลเปลี่ยนไป



รูปที่ 2.13 การเสียหายจากการปะทะของข้อต่อท่อไอน้ำความดันสูง [20]

8. การกัดกร่อนเนื่องจากความเค้น

การกัดกร่อนเนื่องจากความเค้น (Stress Corrosion) เมื่อโลหะมีความเค้น จะเกิดเป็นรอยร้าวขนาดเล็ก ในทิศทางตั้งฉากกับความเค้น เป็นผลทำให้เกิดความเสียหายเกิดขึ้น การกัดกร่อนประเภทนี้พบในวัสดุที่มีความเปราะ รวมไปถึงโลหะผสมที่มีความเค้นสะสมจากกระบวนการขึ้นรูปโลหะ ซึ่งสามารถกำจัดความเค้นสะสมได้โดยการอบอ่อน (Annealing) เพื่อลดการเกิดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นเมื่อนำไปใช้งาน [3]

2.4.3 วิธีการทดสอบกัดกร่อนของโลหะ

การศึกษานี้ใช้การทดสอบการกัดกร่อนของวัสดุด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Technique) เป็นการจำลองกลไกการเกิดการกัดกร่อนของวัสดุด้วยการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันของโลหะ โดยการให้สารละลายสัมผัสกับผิวของชิ้นงานทดสอบ จากนั้นป้อนศักย์ไฟฟ้าเพื่อเร่งการกัดกร่อน โดยใช้เครื่องวิเคราะห์เคมีไฟฟ้า (Potentiostat) ในสถานะที่มีสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จะทำหน้าที่เป็นทางเดินของไอออน และเป็นการเชื่อมต่อเซลล์เคมีไฟฟ้า ซึ่งเซลล์เคมีไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบการกัดกร่อนของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาแล¹⁹องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โลหะประกอบด้วยผลที่ได้จากการทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า จะเป็นเส้นโค้งโพลาไรเซชัน (Polarization Curve) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion Potential; E_{corr}) และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion Current Density; I_{corr}) ดังรูปที่ 2. โดยค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน เป็นค่าศักย์ไฟฟ้าที่โลหะเริ่มเกิดการกัดกร่อน ถ้าโลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนต่ำ จะไวต่อการกัดกร่อนมากกว่าโลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนสูง ส่วนค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน แสดงถึงการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้า โดยหากมีค่าความหนาแน่นต่ำจะบ่งชี้ว่าโลหะชนิดนั้นเกิดการกัดกร่อนที่น้อยกว่า โดยสามารถนำมาคำนวณหาอัตราการกัดกร่อน (ต่อปี) ของตัวอย่างทดสอบได้ จากสมการ 2.2 คือ [22]

$$\text{อัตราการกัดกร่อน (Corrosion Rate)} = \frac{(0.13 \times I_{corr} \times EW)}{(A \times D)} \quad (2.2)$$

โดยมีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อปี (mm/year)

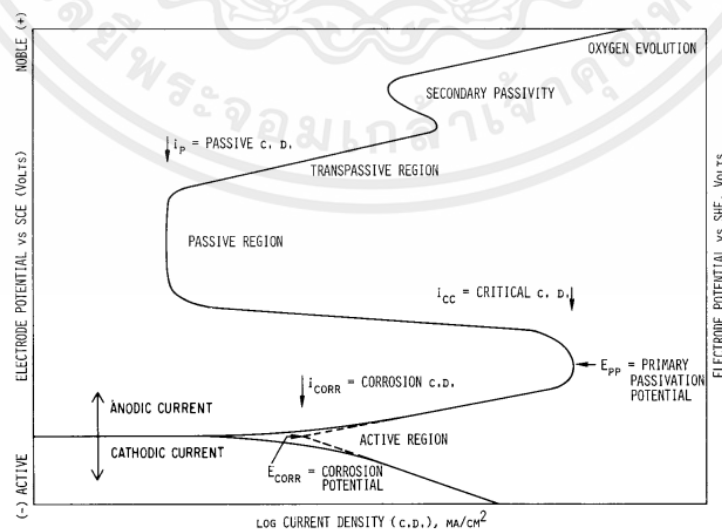
เมื่อ I_{corr} คือ ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (mA/cm^2)

EW คือ ค่ามวลสมมูลของโลหะตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบ

A คือ พื้นที่ผิวของโลหะตัวอย่าง (cm^2)

D คือ ความหนาแน่นของโลหะตัวอย่าง (g/cm^3)

ในกรณีของโลหะที่มีฟิล์มพาสซีฟ (Passive Film) ที่มีความสามารถในการสร้างชั้นฟิล์มเพื่อป้องกันการกัดกร่อนส่งผลให้ทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่หรือลดลง เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม สังเกตได้จากช่วง Passive Region [22] ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 เส้นโค้งโพลาไรเซชันที่ได้จากการทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า [23] เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาแล 20 ้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4 การนำไฟฟ้าในโลหะ

การนำไฟฟ้าในโลหะ (Electrical Conductivity) เนื่องจากวัสดุโลหะจะประกอบด้วยไอออนที่เรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบที่มีการล้อมรอบด้วยอิเล็กตรอน โดยอิเล็กตรอนชั้นนอกสุดจะมีความสำคัญที่ก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นในโลหะ พลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ที่ใช้ในการเคลื่อนที่อิเล็กตรอนหนึ่งไปยังอีกอิเล็กตรอนหนึ่งจะใช้พลังงานน้อยมาก ซึ่งค่าการนำไฟฟ้าของโลหะมีค่าสูงหากจำนวนอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่มีมากเท่ากับจำนวนอิเล็กตรอนในโลหะ

การจัดเรียงตัวของอะตอมที่เป็นระเบียบในโลหะ ส่งผลให้เกิดการต้านทานการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ต่ำ เมื่อสนามไฟฟ้าเข้าไปในโลหะ จึงทำให้การนำไฟฟ้าของโลหะดีขึ้น แต่การจัดเรียงตัวของโลหะโดยทั่วไปจะไม่เป็นระเบียบ ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนชั้นนอกสุด ทำให้ค่าต้านทานไฟฟ้าจำเพาะสูงขึ้น เป็นปัจจัยที่ทำให้การนำไฟฟ้าของโลหะลดลง

การได้รับความร้อนของโลหะ ส่งผลให้ไอออนในโลหะเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งสมดุล เป็นผลต่อการเคลื่อนที่อย่างอิสระของอิเล็กตรอนตัวนำ โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โอกาสในการที่ไอออนจะระกวนการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนตัวนำจะสูงขึ้น จึงทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ช้าลง ซึ่งค่าค่าความต้านทานจำเพาะจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น [24]

2.4.4.1 เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้าวน

เครื่องทดสอบการนำไฟฟ้าวน (Eddy Current Conductivity Tester) เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดค่าการนำไฟฟ้ากระแสสลับชนิดหนึ่งซึ่งออกแบบมาเพื่อการวัดคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของวัสดุ โดยใช้หลักการทดสอบแม่เหล็กไฟฟ้า [25]



รูปที่ 2.15 เครื่องทดสอบการนำไฟฟ้าวน (Eddy Current Conductivity Tester) TMD-102

2.4.4.2 ค่าการนำไฟฟ้า

ค่าการนำไฟฟ้า (International Annealed Copper Standard; IACS) คือ ค่าร้อยละเทียบกับค่าสภาพการต้านทานไฟฟ้าของทองแดงโดยมีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 100% โดย 100%IACS คิดเป็น 58 MS/m ซึ่งกรณีนี้สามารถแปลงการนำไฟฟ้าในหน่วย MS/m เป็น %IACS ดังสมการ

$$IACS = \frac{X}{X_{\text{Copper}}} \times 100 \quad (2.3)$$

เมื่อ X = ค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุที่ทดสอบ

X_{Copper} = ค่าการนำไฟฟ้าของทองแดง (58.34 MS/m) [26]

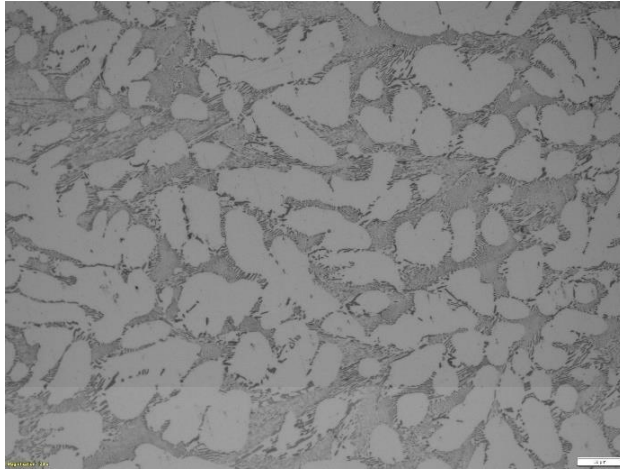
2.5 หลักการเครื่องมือและเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

2.5.1 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscopy; OM) โดยในการศึกษานี้มีการนำกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง รุ่น Olympus BX53M ดังแสดงในรูปที่ 2.16 เพื่อศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะผสมอลูมิเนียมเหล็ก โดยหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงนี้ จะอาศัยหลักการให้แสงวิ่งไปกระทบลงผิวของวัตถุและสะท้อนกลับเพื่อแสดงภาพ โดยการสำรวจภาพผ่านเลนส์ใกล้ตา (Eyepiece) [27] โดยภาพที่ได้ แสดงดังรูปที่ 2.17



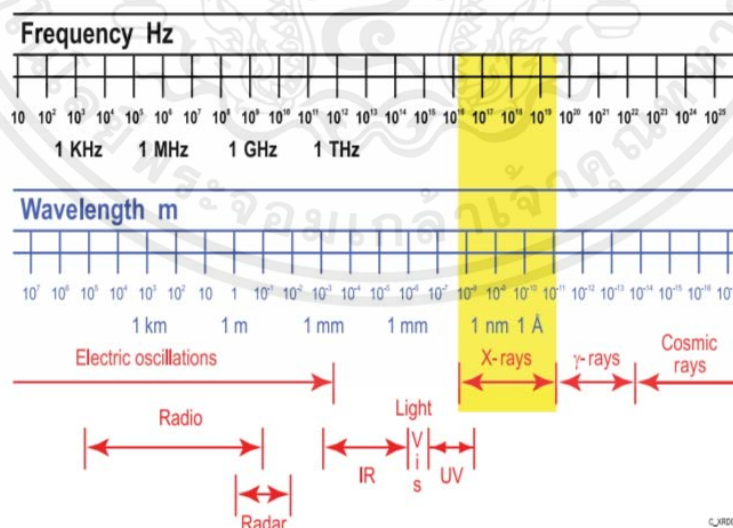
รูปที่ 2.16 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscopy; OM) รุ่น Olympus BX53M [24]



รูปที่ 2.17 ตัวอย่างโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะผสมยูเทคติก Al-Fe ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

2.5.2 วิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

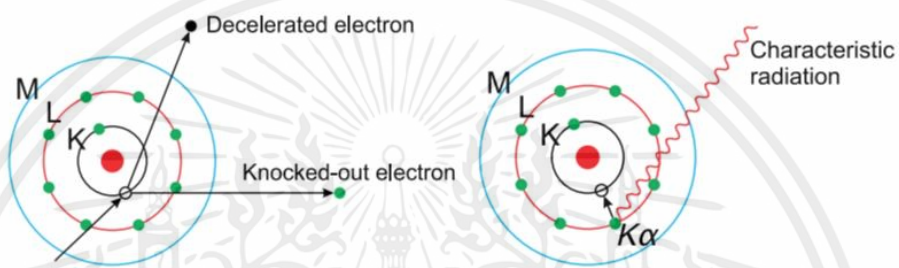
การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction Techniques; XRD) เป็นรังสีเอกซ์มีลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพลังงานสูงที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 10^{-8} ถึง 10^{11} นาโนเมตร ซึ่งใช้สำหรับการตรวจวัดคุณสมบัติของวัสดุต่างๆ ในตัวอย่างหลายประเภท ทั้งผง ของแข็ง และของเหลว โดยมีบทบาทสำคัญในการวิเคราะห์เฟสของวัสดุ การบ่งบอกคุณลักษณะของพื้นผิวผลึกศาสตร์ (Crystallographic Characterization) และการวัดความเค้นตกค้าง (Residual Stress) และอื่นๆได้ การนำไปประยุกต์เหล่านี้ใช้ทำให้ XRD กลายเป็นเทคนิคการวิเคราะห์ที่สำคัญในด้านวัสดุศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ [28]



รูปที่ 2.18 รังสีเอ็กซ์และการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าอื่นๆ [28]

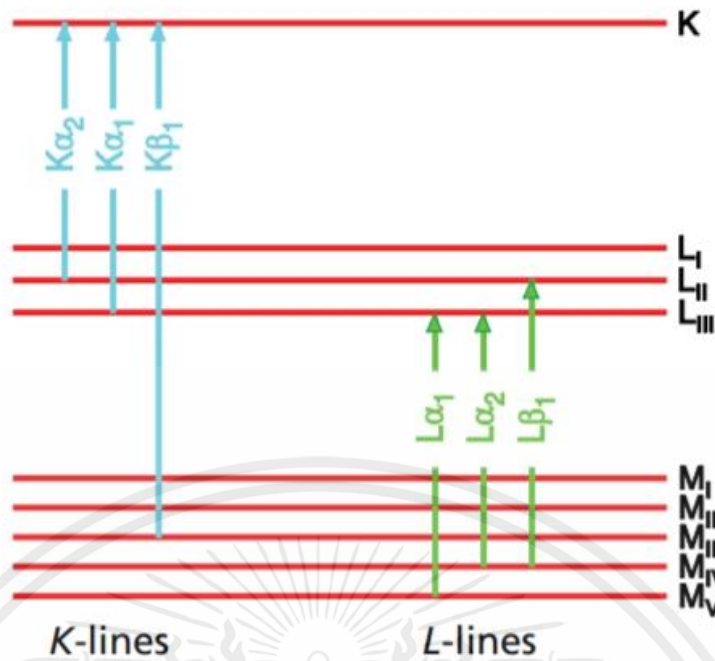
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและ 23 อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดขึ้นของรังสีเอ็กซ์อธิบายด้วย การแตกตัวเป็นไอออนของอะตอมภายในวัสดุ กระบวนการนี้ เกี่ยวข้องกับการถูกตีของอิเล็กตรอนออกจากวงอิเล็กตรอนชั้นใน (Inner Shells) เพื่อรักษาเสถียรภาพของ อะตอม ซึ่งทำให้อิเล็กตรอนจากวงชั้นนอกถูกดึงเข้ามาแทนที่ตำแหน่งที่ว่างนี้ ดังรูปที่ 2.19 เนื่องจากพลังงาน ของวงอิเล็กตรอนชั้นนอกที่เข้ามาแทนที่นั้น มีพลังงานที่สูงกว่าวงอิเล็กตรอนชั้นใน จึงส่งผลให้เกิดการปล่อย พลังงานของโฟตอน พลังงานที่ปล่อยออกมาจะแสดงลักษณะการแผ่รังสีที่เป็นลักษณะเฉพาะและขึ้นอยู่กับ ตำแหน่งเริ่มต้นและตำแหน่งสุดท้ายของอิเล็กตรอนภายในโครงสร้างอะตอม ซึ่งเป็นคุณสมบัติจำเพาะของแต่ละ วัสดุ [29] โดยรังสีเอ็กซ์ที่ถูกปลดปล่อยออกมาจะถูกตรวจจับเพื่อนำมาวิเคราะห์ โดยแสดงผลดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แผนผังลักษณะการกำเนิดรังสี [28]

จากรูปที่ 2.20 อธิบายว่าอะตอมประกอบด้วยนิวเคลียสที่ประกอบด้วยโปรตอนที่มีประจุบวกและ นิวตรอนที่เป็นกลางทางไฟฟ้า ล้อมรอบด้วยอิเล็กตรอนที่มีประจุลบซึ่งจัดเรียงตัวอยู่ในวงอิเล็กตรอน (Shell) โดยวงชั้นในสุดเรียกว่า K-shell ตามด้วย L-shell, M-shells แต่ละชั้นสามารถแบ่งออกเป็นวงอิเล็กตรอนชั้น ย่อย (Sub Shell) เพิ่มเติมได้ โดยแต่ละวงอิเล็กตรอนจะมีความจุสูงสุดสำหรับอิเล็กตรอน โดยพิจารณาจาก จำนวนอิเล็กตรอนที่สามารถกักเก็บได้ K-shell สามารถบรรจุอิเล็กตรอนได้สูงสุด 2 ตัว L-shell บรรจุ อิเล็กตรอนได้ 8 ตัว และ M-shells บรรจุอิเล็กตรอนได้ 18 ตัว [28]



รูปที่ 2.20 แผนผังเส้นหลักและการเปลี่ยนผ่านวงอิเล็กตรอน (Shell) [28]

ในการศึกษานี้มีการใช้งานเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ยี่ห้อ Rigaku รุ่น SmartLab แสดงดังรูปที่ 2.21 ซึ่งอาศัยหลักการตรวจจับการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่มีการฉายลงบนผิวของชิ้นงานทดสอบ โดยทำการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในมุมต่างๆ ซึ่งข้อมูลที่ได้จะบ่งบอกถึงโครงสร้างผลึก ชนิดของผลึก เพื่อนำมาวิเคราะห์ชนิดธาตุของธาตุดังประกอบได้ [24]



รูปที่ 2.21 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ยี่ห้อ Rigaku รุ่น SmartLab [30]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาแล 25 อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

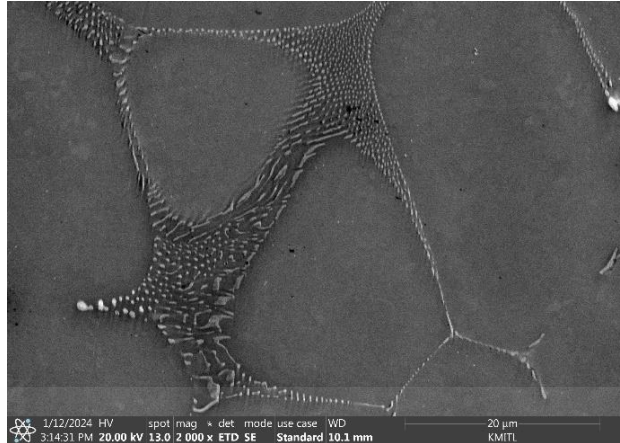
2.5.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 2.22 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ประเภท Field Emission (Field Emission Scanning Electron Microscope; FE-SEM) รุ่น Apreo S-Thermo Fisher Scientific [31]

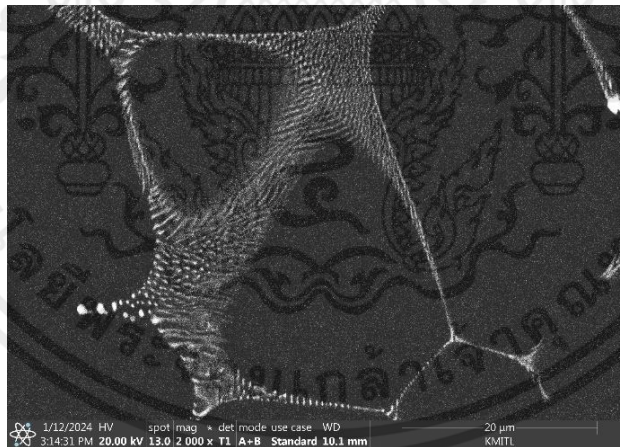
การศึกษานี้มีการใช้งานกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ประเภท Field Emission (Field Emission Scanning Electron Microscope; FE-SEM) โดยกล้องจุลทรรศน์ประเภทนี้ใช้สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคขนาดเล็กของวัสดุ ซึ่งสามารถให้กำลังขยายสูงสุดถึง 250,000 เท่า สามารถครอบคลุมการวิเคราะห์ในระดับนาโนได้และมี Resolution สูงถึง 1.0 nm ที่ 1 keV FE-SEM ลำเลียงอิเล็กตรอนด้วยระบบสุญญากาศแบบ Sputter-Ion Pump และใช้งาน Diffusion Pump ในส่วนของห้องชิ้นงาน (Sample Chamber) [32] โดยภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ประเภท Field Emission แบ่งออกได้ 2 ประเภทดังนี้ [33]

1. โหมด Secondary Electron (SE) เป็นภาพที่ถูกสร้างขึ้นจากพลังงานของ Secondary Electron ซึ่งเป็นพลังงานที่เกิดขึ้นจากการการหลุดตอกจากผิวของชิ้นงานเมื่อมีการชนของอิเล็กตรอน โดยจะแสดงภาพในที่เห็นเพียงแค่ลักษณะผิวของชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 ตัวอย่างโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe โหมด Secondary Electron (SE)

2. โหมด Backscattered Electron (BE) เป็นภาพที่ถูกสร้างขึ้นจากการสะท้อนของ Backscattered Electron จากผิวของชิ้นงาน ซึ่งภาพที่ได้จะมีลักษณะเข้มและสว่างไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับเลขอะตอม (Atomic Number; Z) โดยภาพจะแสดงให้เห็นลักษณะของเฟสที่แตกต่างกัน หรือความแตกต่างของบริเวณที่มีองค์ประกอบของธาตุต่างชนิดกันได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 ตัวอย่างโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe โหมด Backscattered Electron (BE)

นอกจากนี้ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ประเภท Field Emission ยังสามารถใช้วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy หรือ EDS โดยอาศัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาแล²⁷้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

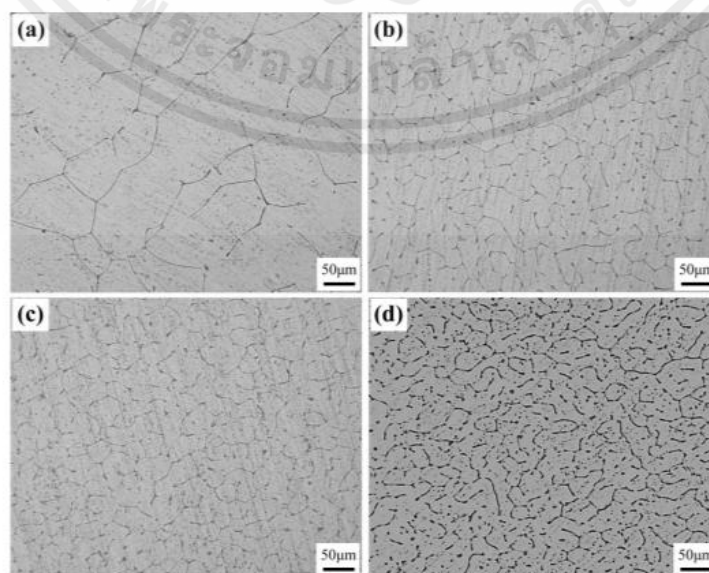
หลักการในการตรวจจับสนธิเอ็กซ์ที่เกิดขึ้นจากการปลดปล่อยพลังงานจากการเปลี่ยนชั้นพลังงานจากวงอิเล็กตรอนชั้นนอกไปยังวงอิเล็กตรอนชั้นใน ซึ่งจะให้ค่าพลังงานที่แตกต่างกันออกไปเฉพาะธาตุนั้นๆ [33]

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

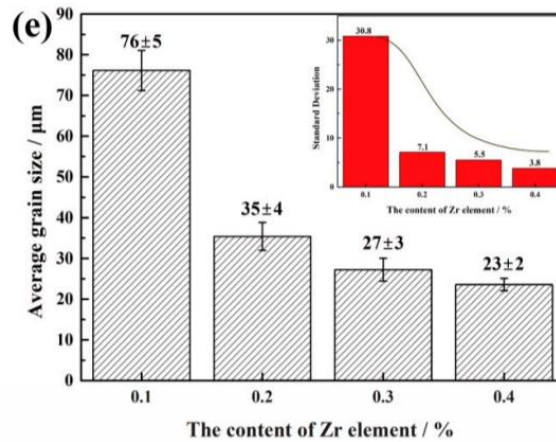
2.6.1 อิทธิพลของการเติมธาตุ Zr

Chankitmunkong et al. (2023) ทำการศึกษาผลอิทธิพลของการเติมธาตุเซอร์โคเนียม (Zr) และ สแกนเดียม (Sc) ต่อโลหะผสม Al-7 wt.% Fe (As-cast) โดยศึกษาผ่านการเติมธาตุ Zr 0.2% บ่งชี้ให้เห็นว่าการเติมธาตุ Zr ส่งผลต่อการลดลงของอนุภาคปฐมภูมิ Al_3Fe และเมื่อมีการการเติม Zr 0.15% และ Sc 0.15% เปลี่ยนสัณฐานวิทยาของสารประกอบปฐมภูมิ (Primary Intermetallic) จากรูปร่างที่มีลักษณะคล้ายเข็มไปเป็นรูปร่างคล้ายดอกไม้ โดยผลของการศึกษาการเติม Zr แสดงให้เห็นว่าไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนคุณสมบัติทางกลอย่างมีนัยสำคัญ แต่การเติมธาตุ Zr ร่วมกับ Sc สามารถเพิ่มความแข็งของโลหะผสม Al-Fe จาก 40 เป็น 80 HV สำหรับการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 450 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และสามารถเพิ่มความแข็งให้กับวัสดุได้สูงถึง 110 HV เมื่อได้รับการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 350 °C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง [34]

จากการทบทวนงานวิจัยของ Ye et al. (2020) ทำศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและคุณสมบัติทางกลของโลหะผสม Al-0.35Fe ที่มีการเติม Zr (Zr) ที่แตกต่างกันตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.4% โดยอธิบายว่าโครงสร้างของโลหะผสมจะแตกต่างกันไปตามปริมาณการเติมธาตุ Zr โดย Ye และคณะ อธิบายว่า โครงสร้างทางจุลภาคของโลหะผสม Al-0.35Fe ที่มีการเติมธาตุ Zr 0.1% แสดงให้เห็นโครงสร้างของเดนไดร์ที่หยาบ และได้มีการวัดขนาดเกรนเฉลี่ยของ α -Al เท่ากับ 76 ± 5 ไมครอน ซึ่งเมื่อมีการเติมธาตุ Zr เพิ่มขึ้นเป็น 0.2% แสดงให้เห็นถึงการลดลงของขนาดเกรน α -Al โดยวัดค่าได้เท่ากับ 35 ± 4 ไมครอน และเมื่อมีปริมาณของธาตุ Zr ที่เพิ่มขึ้น เป็น 0.3% และ 0.4% ส่งผลให้ขนาดเกรนลดลงตามการเพิ่มขึ้นของธาตุ Zr ตามลำดับ [35] ดังแสดงในรูปที่ 2.25



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและ 28 อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

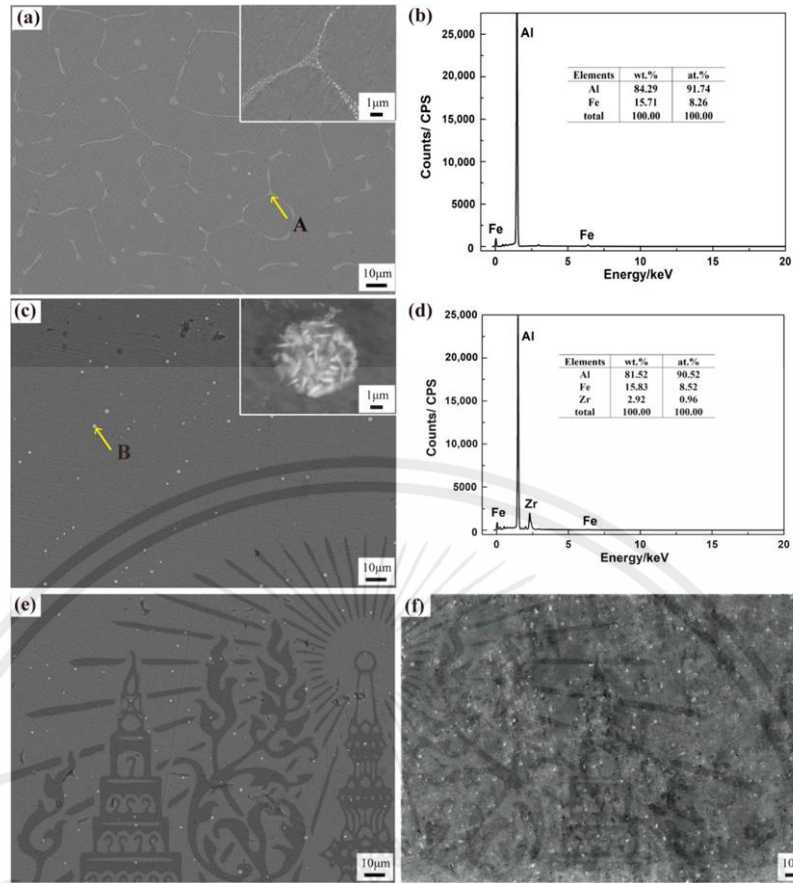


รูปที่ 2.25 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะผสมแบบหล่อ:

(a) Al-0.35Fe-0.1Zr (b) Al-0.35Fe-0.2Zr (c) Al-0.35Fe-0.3Zr

(d) Al-0.35Fe-0.4Zr และ (e) ขนาดเกรนเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของโลหะผสม [35]

นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่า ผลของการเติมธาตุ Zr ทำให้สัณฐานวิทยาของเฟสยูเทคติก Al_3Fe เปลี่ยนจากลักษณะคล้ายแท่งสั้นไปเป็นรูปร่างคล้ายแท่งที่ละเอียดขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.26 ซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานแรงดึงและจุดครากเมื่อมีปริมาณ Zr เพิ่มขึ้น [35]



รูปที่ 2.26 โครงสร้างทางจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและการวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDS ของโลหะผสมแบบหล่อ (a) โลหะผสม Al – 0.35Fe – 0.1Zr; (b) EDS Al–0.35Fe–0.1Zr (c) โลหะผสม Al–0.35Fe–0.2Zr (d) EDS โลหะผสมAl–0.35Fe–0.2Zr (e) โลหะผสม Al–0.35Fe–0.3Zr (f) โลหะผสม Al–0.35Fe–0.4Zr [35]

Mahmudi et al. (2006) ศึกษาผลของการเติมธาตุ Zr 0.15 % โดยน้ำหนักต่อคุณสมบัติทางกลและความต้านทานการสึกหรอ (Wear resistance) ของโลหะผสมอะลูมิเนียม A319 โดยศึกษาผ่านการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันและการเร่งบ่มในช่วงอุณหภูมิ 175 ถึง 235 °C สำหรับช่วงเวลาที่ต่างกัน สมบัติทางกลและพฤติกรรมการสึกหรอของวัสดุที่มี Zr ถูกเปรียบเทียบกับโลหะผสม A319 ในสภาวะทั้งแบบหล่อและผ่านการบ่มแข็ง แสดงให้เห็นว่าการเติมธาตุ Zr ส่งผลให้เกิดการตกตะกอนของอนุภาค Al_3Zr ในเนื้อพื้นอะลูมิเนียมแมทริกซ์ ซึ่งอนุภาคเหล่านี้จะเสถียรเมื่อได้รับความร้อนเนื่องจากมีความสามารถในการละลายต่ำของ Zr ในเนื้อพื้นอะลูมิเนียมแมทริกซ์ โดยการตกตะกอนของอนุภาค Al_3Zr ส่งผลต่อให้สามารถช่วยเพิ่มค่าความแข็งแรง และความต้านทานการสึกหรอของโลหะผสม A319 หลังจากผ่านการบ่มแข็งได้ [36]

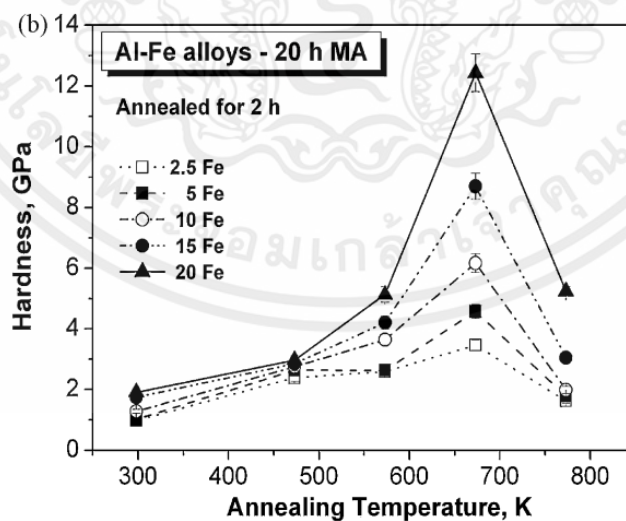
2.6.2 อิทธิพลของอัตราการเย็นตัว

Dutta และ Rettenmayr (2000) ศึกษาผลของอัตราการเย็นตัวต่อพฤติกรรมของการแข็งตัว (Solidifications) ของโลหะผสม Al-Fe-Si โดยทำการศึกษาคอร์สสร้างทางจุลภาคของการแข็งตัวของโลหะผสม Al-Fe-Si ที่ถูกทำให้แข็งตัวด้วยอัตราการเย็นตัวระหว่าง 0.04 ถึง 3.5 K s^{-1} อธิบายว่าคอร์สสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบที่อัตราการเย็นตัวต่างกันบ่งชี้ถึงการส่งผลต่อลักษณะที่แตกต่างกัน อาทิ อัตราส่วนปริมาตรของเฟสยูเทคติก ระยะห่างแขนของเดนไดรต์ (Dendrite Arm Spacing) ขนาดและรูปร่างของเฟสทุติยภูมิ ซึ่งผลของการศึกษานี้ อธิบายว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราการเย็นตัวจาก 0.04 – 3.5 K s^{-1} ส่งผลต่อการก่อตัวของปริมาณเฟสยูเทคติกที่เพิ่มขึ้นในโลหะผสม Al-Fe-Si [9]

2.6.3 อิทธิพลของการบ่มแข็ง

2.6.3.1 อิทธิพลอุณหภูมิของการบ่มแข็ง

จากการทบทวนงานวิจัยของ Nayak et al. (2010) ทำการศึกษาโลหะผสม Al-Fe ที่มีปริมาณของเหล็กแตกต่างกัน (2.5, 5, 10, 15 และ 20 %wt. Fe) ซึ่งอธิบายอิทธิพลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปต่อการบ่มแข็ง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความแข็งสูงสุดของโลหะผสม Al-Fe อยู่ที่อุณหภูมิ 673 เคลวิน เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 2.27 โดยความแข็งจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีปริมาณเหล็กที่มากขึ้น (เปรียบเทียบค่าความแข็งหลังจากการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 673 เคลวิน) โดยมีความแข็งสูงสุดที่ 12.4 GPa สำหรับโลหะผสม Al-20Fe เนื่องด้วยอิทธิพลในการก่อตัวของการมีอยู่อนุภาคของสารประกอบ $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ โดยเมื่อมีอุณหภูมิในการอบอ่อนที่ 773 เคลวิน ค่าความแข็งของวัสดุจะลดลง แต่จะมีค่าความแข็งของวัสดุยังคงสูงกว่าเมื่อเทียบกับชิ้นงานอบที่อุณหภูมิห้อง [37]

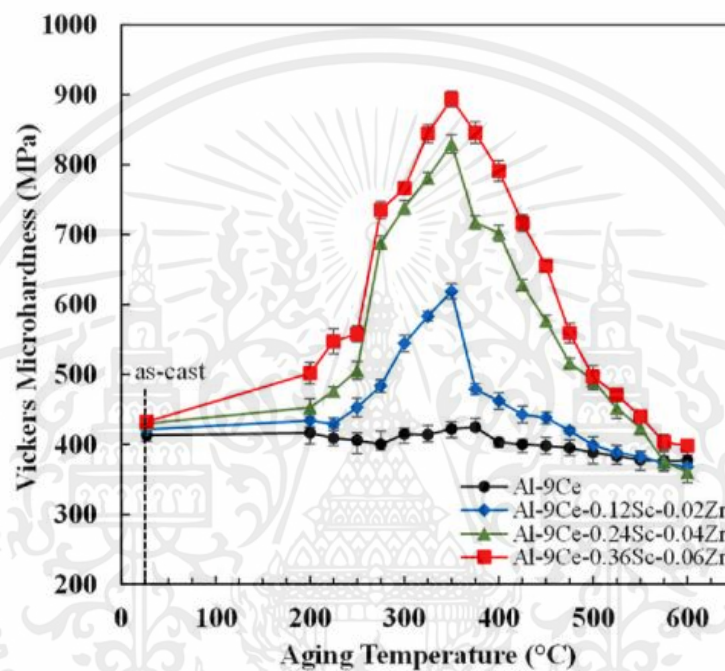


รูปที่ 2.27 การแปรผันค่าความแข็งของโลหะผสม Al-Fe (หลังจาก 20 ชั่วโมง MA) ของชิ้นงานที่อุณหภูมิห้อง และการอบอ่อนที่อุณหภูมิต่างกันเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แสดงให้เห็นการแข็งตัวสูงสุดหลังจากการบ่มแบบไอโซ

โครนัลที่อุณหภูมิ 673K [37]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและ 31 อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทบทวนงานวิจัยของ Mohammed et al. (2024) แสดงการวัดค่าความแข็งของโลหะผสม Al-9Ce ที่มีการเติมธาตุ Sc และ Zr ที่แตกต่างกัน หลังจากการบ่มแข็งเป็นเวลา 3 ชั่วโมงที่อุณหภูมิต่างกัน โดยแสดงให้เห็นว่าในโลหะผสม Al-9Ce ก่อนการบ่มแข็งแสดงค่าความแข็งต่ำสุดที่ 413 MPa ในขณะที่โลหะผสม Al-9Ce-0.36Sc-0.06Zr แสดงค่าสูงสุดที่ 432 MPa หลังจากการบ่มแข็งค่าความแข็งของโลหะผสม Al-9Ce จะคงที่จนกระทั่งถึงอุณหภูมิการบ่มแข็งที่ 600 °C ในทางตรงกันข้ามการเติม Sc และ Zr ส่งผลให้ความแข็งสูงสุดที่อุณหภูมิการบ่มแข็งประมาณ 350 °C เมื่อเกินอุณหภูมิ 375 °C ค่าความแข็งของโลหะผสมจะลดลงโดยเข้าใกล้ระดับที่ใกล้เคียงกับค่าความแข็งก่อนการบ่มแข็ง [38] ดังแสดงในรูปที่ 2.28

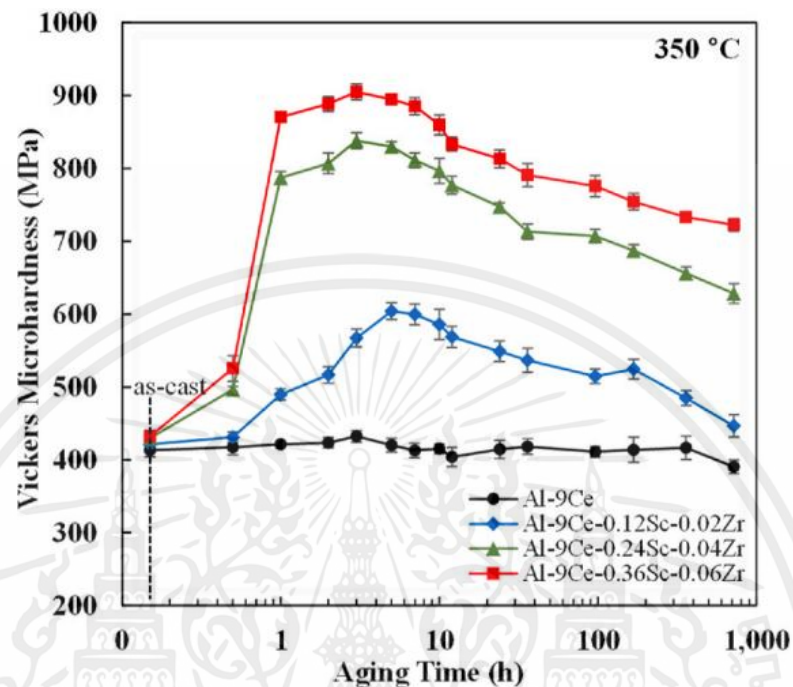


รูปที่ 2.28 การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของโลหะผสม Al-9Ce ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยมีระยะเวลาในการบ่มแข็งคงที่ 3 ชั่วโมง [38]

2.6.3.2 อิทธิพลระยะเวลาของการบ่มแข็ง

การทบทวนงานวิจัยของ Mohammed et al. (2024) แสดงค่าความแข็งของโลหะผสม Al-9Ce หลังจากการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 350 °C ซึ่งเลือกจากการทดสอบการบ่มแข็งแบบอุณหภูมิที่ต่างกัน โดยอุณหภูมิที่ 350 °C ให้ความสามารถในการเพิ่มความแข็งของวัสดุสูงสุด โดยการบ่มแข็งโลหะผสม Al-9Ce อุณหภูมิ 350 °C แสดงให้เห็นว่า ค่าความแข็งคงที่ตลอดระยะเวลาการทดสอบ ในทางกลับกันโลหะผสม Al-9Ce ที่มีการเติมธาตุ Sc และ Zr ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยสูงสุดหลังจากผ่านการบ่มแข็งเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง โลหะผสม Al-9Ce-0.12Sc-0.02Zr มีความแข็งสูงสุดประมาณ 600 MPa ต่อมาลดลงเหลือประมาณ 445 MPa หลังจาก 720 ชั่วโมง ซึ่งมีลักษณะเดียวกันกับโลหะผสม Al-9Ce-0.24Sc-0.04Zr และ Al-9Ce-0.36Sc-0.06Zr มีค่าความแข็งสูงสุดที่ 840 MPa และ 905 MPa ตามลำดับ ตามด้วย

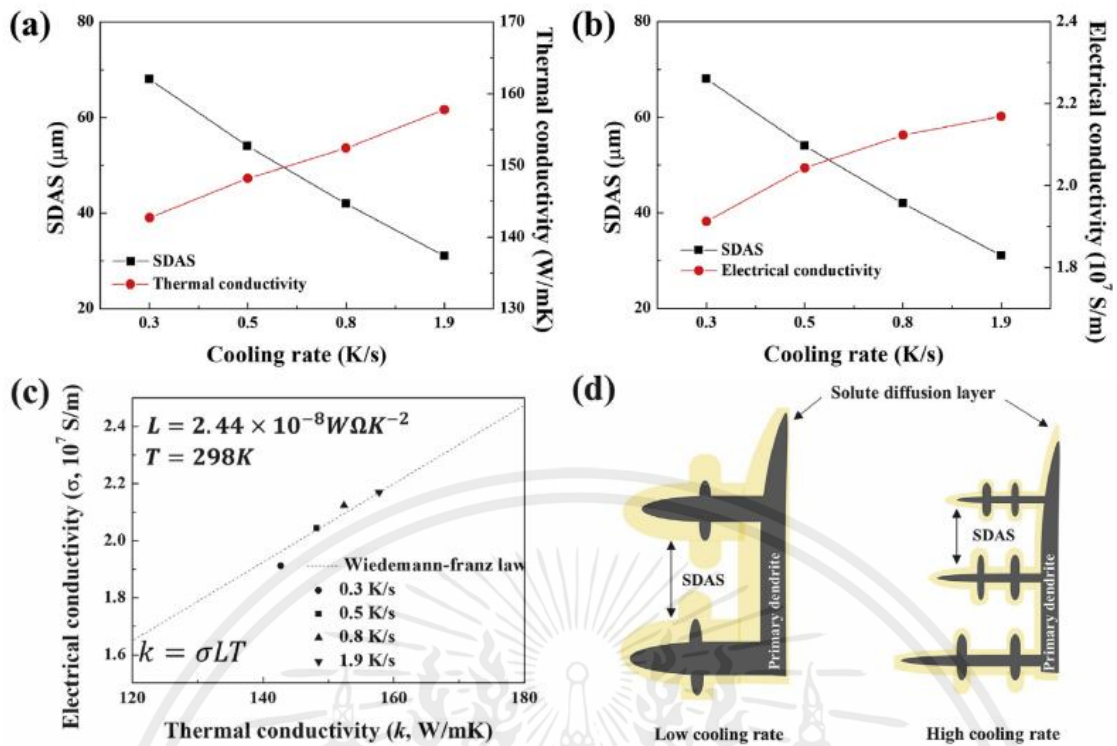
การลดลงเป็น 630 MPa และ 720 MPa หลังจาก 720 ชั่วโมง แม้ว่าค่าความแข็งของโลหะผสม Al-9Ce ที่เติมธาตุ Sc และ Zr จะลดลงหลังจากผ่านการบ่มแข็งไป 720 ชั่วโมง แต่ก็ยังมีค่าความแข็งยังคงสูงกว่าเมื่อเทียบกับก่อนการบ่มแข็ง [38] ดังแสดงในรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของโลหะผสม Al-9Ce หลังจากการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 350 °C โดยมีการบ่มแข็งในระยะเวลาในการบ่มแข็งต่างกัน [38]

2.6.4 ความสามารถในการนำไฟฟ้า

Jeon และ Bae (2019) ศึกษาผลของอัตราการเย็นตัวต่อต่อโครงสร้างจุลภาค ค่าการนำความร้อนและไฟฟ้าของโลหะผสม A356 ที่ผ่านกระบวนการหล่อทราย เพื่อประเมินผลของอัตราการเย็นตัวที่ต่างกัน ได้มีการใช้แม่พิมพ์ทรายที่มีความหนาตั้งแต่ 5–20 มิลลิเมตร และสังเกตโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบ (T6) พบว่าเมื่ออัตราการเย็นตัวเพิ่มขึ้น อุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาอุทกตกจะเปลี่ยนไปที่อุณหภูมิต่ำลงและความเย็นยิ่งยวดก็เพิ่มขึ้นด้วย เผยให้เห็นว่าอัตราการเย็นตัวเพิ่มขึ้นนั้นจะส่งผลต่อระยะห่างของแขนเดนไดรต์ทุติยภูมิที่ลดลง (Secondary Dendrite Arm Spacing: SDAS) โดยที่การศึกษานี้ อธิบายว่า การลดลงของ SDAS ส่งผลทำให้มีค่าการนำความร้อนและไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น [39] แสดงดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 การวัดค่า (a) การนำความร้อน (b) การนำไฟฟ้า ที่มีอัตราการเย็นตัวที่แตกต่างกัน (c) ความสัมพันธ์ระหว่างการนำความร้อนและการนำไฟฟ้า และ (d) แผนผังของการก่อตัวของชั้นตัวถูกละลาย (Solute Layers) [39]

G.L. Shuai et al. (2021) ศึกษาสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของโลหะผสม Al-Fe ที่ทำการอัดโลหะผ่านด้ายช่องว่างเท่ากันที่เอียงเป็นมุม (Equal-channel Angular Pressing; ECAP) ระหว่างอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิที่สูงขึ้น แสดงเกิดการตกตะกอนของ Al_3Fe and Al_6Fe ระดับไมครอน ซึ่งการอัดโลหะผสม Al-Fe ที่อุณหภูมิสูง มีความเครียดน้อย ส่งผลให้อะตอมของ Fe (ของแข็ง) ละลายกลับเข้าไปในสารเนื้อพื้น ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของอะตอมที่มีความหนาแน่นสูงและมีการปรับสภาพเกรนให้ละเอียดขึ้น มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่ค่าการนำไฟฟ้าลดลงในการอัดโลหะผสม Al-Fe ที่อุณหภูมิสูง [40]

2.6.5 ความสามารถในการกัดกร่อน

Dorin et al. (2015) ศึกษาอิทธิพลของอัตราการเย็นตัวต่อโครงสร้างจุลภาคและพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสม Al-Fe โดยทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบระหว่างการกัดกร่อนและโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Al-Fe ที่มีอัตราการเย็นตัวที่ 0.1 °C/s ถึง 500 °C/s โดยทำการศึกษการหล่อด้วยวิธีแบบ Direct Strip Casting ซึ่งจะให้อัตราการเย็นตัวที่รวดเร็ว และเปรียบเทียบกับอัตราการเย็นตัวช้า โดยใช้กระบวนการหล่อทราย ศึกษาการกัดกร่อนด้วยการแช่ในสารละลายเกลือผ่านการทดสอบแบบโพลาไรเซชัน แสดงให้เห็นว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและ 34

ความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสม Al-Fe ที่ดีขึ้นในชิ้นงานทดสอบที่ผ่านอัตราการเย็นตัวเร็ว เนื่องจากสาเหตุของขนาดและจำนวนของสารประกอบเชิงโลหะที่มี Fe ขนาดเล็กลง [41]

Ambat et al. (2006) ศึกษาผลของการอบชุบด้วยความร้อนต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสม Al-Fe ที่มีปริมาณเหล็ก (Fe) 0.04 ถึง 0.42 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยทำการศึกษากัดกร่อนด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า เมื่อเปรียบเทียบชิ้นทดสอบที่ผ่านการอบชุบและชุบแข็ง ที่นำมาผ่านการอบอ่อนเพื่อส่งเสริมการตกตะกอนของอนุภาคสารประกอบเชิงโลหะ Al_3Fe ซึ่งพบว่ากระบวนการอบอ่อนส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของปฏิกิริยาแคโทดและแอโนด อธิบายว่าปฏิกิริยาแคโทดที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการกระจายตัวของอนุภาคสารประกอบเชิงโลหะที่มีส่วนประกอบของเหล็ก ซึ่งทำหน้าที่เป็นผลให้เกิดการลดลงของออกซิเจนและไฮโดรเจน อนุภาคเหล่านี้ยังทำหน้าที่เป็นจุดเริ่มต้นของหลุมอีกด้วย นอกจากนี้ยังชี้ให้เห็นว่าการอบชุบส่งผลให้ปริมาณตัวถูกละลายในเนื้อพื้นอะลูมิเนียมเมทริกซ์ลดลง ส่งผลให้ปฏิกิริยาขั้วบวกเพิ่มขึ้น เมื่อเกิดการพังทลาย หลุมผลึกจะก่อตัวขึ้นด้วยเหลี่ยมมุม และพบว่ามือนุภาคของสารประกอบเชิงโลหะจำนวนมาก เส้นใยเหลี่ยมมุมละเอียดยังแผ่ออกมาจากขอบหลุมอีกด้วย ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการกัดกร่อนของอะลูมิเนียมเป็นผลมาจากอิทธิพลของการมีเหล็กในระดับต่ำ ซึ่งเป็นหนึ่งในสิ่งเจือปนหลัก และพฤติกรรมเคมีไฟฟ้าของอะลูมิเนียมสามารถควบคุมได้ด้วยการผ่านกระบวนการอบชุบ [42]

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

การศึกษาผลกระทบของอัตราการเย็นตัวและการเติมธาตุเซอร์โคเนียม (Zr) ต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและการบ่มแข็งของโลหะผสมอลูมิเนียม-เหล็ก (Al-Fe Alloys) มีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

ขั้นตอนการทดลอง

1. ขั้นตอนการเตรียมโลหะผสม Al-Fe และโลหะผสม Al-F-Zr
 - 1.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบโครงสร้างทางมหภาค
 - 1.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบโครงสร้างทางจุลภาค
2. ขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้างทางมหภาคและโครงสร้างทางจุลภาค
 - 2.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้างทางมหภาค
 - 2.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค
3. ขั้นตอนการบ่มแข็ง (Aging)
4. ขั้นตอนการทดสอบคุณสมบัติทางกล

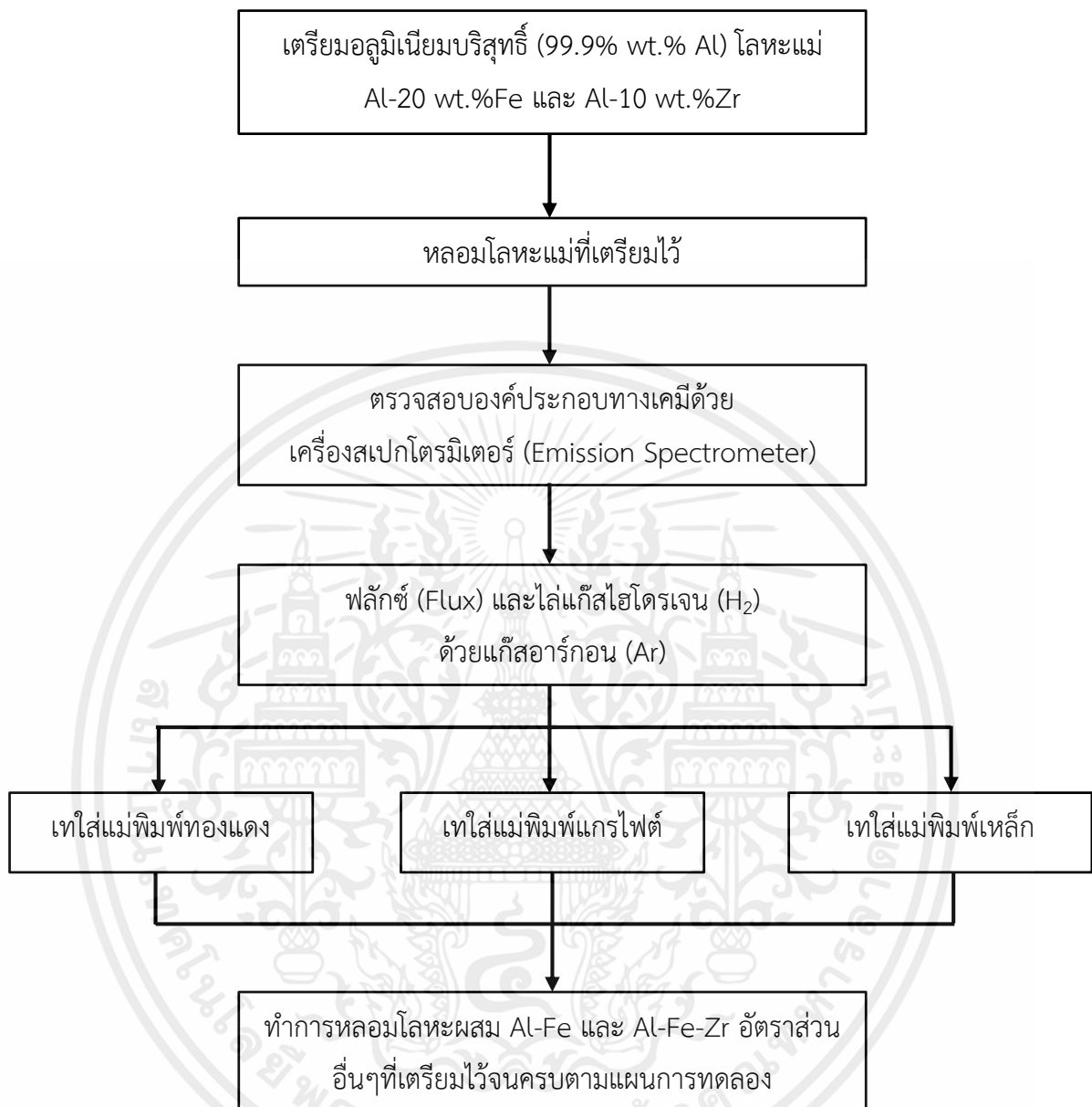
อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. แม่พิมพ์ทองแดง แม่พิมพ์แกรไฟต์ และแม่พิมพ์เหล็ก
2. เตาหลอม (Crucible)
3. ฟลักซ์ (Flux)
4. กระจกทรายเบอร์ 180, 240, 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200
5. แผ่นผ้าสักหลาดสำหรับขัดผิว
6. สารหล่อลื่น (Lubricant)
7. ผงเพชรขนาด 3 ไมครอน
8. ซิลิกาคอลลอยด์ (OP-S)
9. สารละลายกรดของ Poulton (Poulton's Reagent) และกรดฟลูออโรโบริก (Fluoroboric acid)
10. เอทานอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและ 36 อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. จานแก้ว (Plate)
12. ปีกเกอร์
13. เครื่องชั่งแบบดิจิตอล
14. เต้าหลอมไฟฟ้าชนิดเหนียวนำ
15. เต้าอบ
16. เทอร์โมคัปเปิลประเภท K (Thermocouple Type K)
17. เครื่องบันทึกข้อมูลความเร็วสูง (HIOKI LR 8450 Memory Hilogger)
18. เครื่องเซ็นเซอร์ตรวจวัดแบบไร้สาย (HIOKI LR 8530 wireless Voltage/Temp Unit)
19. เครื่องเลื่อยตัดชิ้นงาน (METKON SERVOCUT-M 250)
20. เครื่องขัดชิ้นงานกระดาษทรายแบบสายพาน
21. เครื่องขัดชิ้นงานกระดาษทรายแบบจานหมุน
22. เครื่องขัดชิ้นงานละเอียด
23. เครื่องตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี (Emission Spectrometer)
24. กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง รุ่น Olympus BX53M (Optical Microscopy; OM)
25. กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด รุ่น Apreo S-Thermo fisher Scientific (Scanning Electronic Microscopy; SEM)
26. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ Bruker D8 advance (X-ray Diffractometer; XRD)
27. เครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ รุ่น Mitutoyo HM-113 (Vickers Hardness Testing)

3.1 ขั้นตอนการเตรียมโลหะผสม Al-Fe และโลหะผสม Al-Fe - Zr



รูปที่ 3.1 แผนผังกระบวนการหลอมโลหะผสม Al-Fe และโลหะผสม Al-Fe-Zr

ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมโลหะผสม Al-Fe และ Al-Fe-Zr

เตรียมโลหะผสม Al-Fe และ Al-Fe-Zr ที่มีปริมาณเหล็ก 0.5, 1.8 และ 3.0 wt.%Fe จากนั้นเติม 0.05 และ 1.5 wt.%Zr โดยการหลอมด้วยโลหะแม่ดังนี้

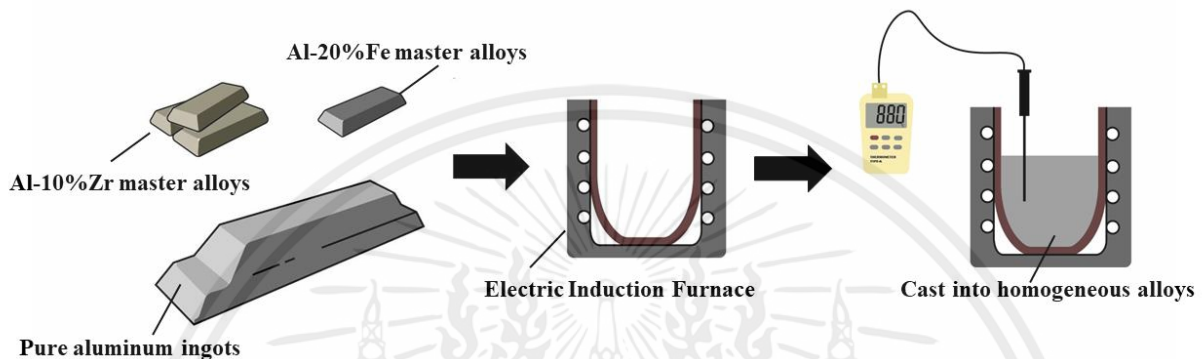
- อลูมิเนียมบริสุทธิ์ (99.9% wt.% Al)
- โลหะแม่ Al-20 wt.%Fe
- โลหะแม่ Al-10 wt.%Zr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและ 38 อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณอัตราส่วนของโลหะแม่ที่ต้องการหลอม เพื่อให้ได้องค์ประกอบทางเคมีที่ต้องการ โดยการหลอมโลหะแม่ผ่านเตาหลอมชนิดเหนี่ยวนำ (Electric Induction Furnace)

ขั้นตอนที่ 2 ตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี

เมื่อโลหะแม่หลอมเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว นำไปตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ เพื่อให้ได้องค์ประกอบตามแผนการทดลอง



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนกระบวนการหลอมโลหะผสม Al-Fe และโลหะผสม Al-Fe-Zr

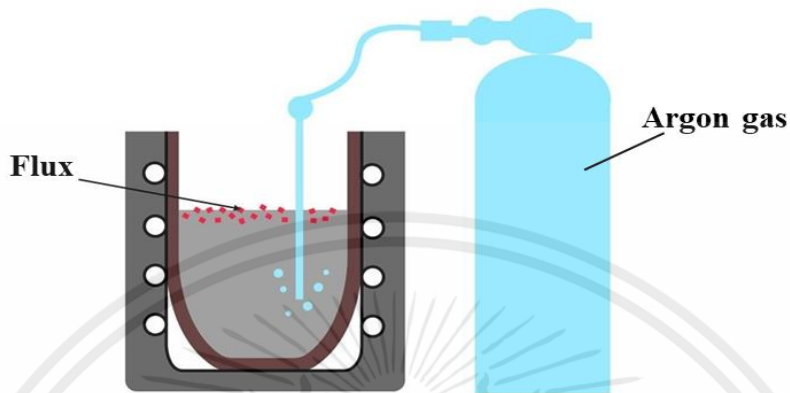
ตารางที่ 3.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมี (% โดยน้ำหนัก) ของโลหะผสม Al-0.5Fe, Al-1.8Fe และโลหะผสม Al-3.0Fe ด้วยการเติมธาตุ 0.05%Zr และ 0.15%Zr โดยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์

โลหะผสม	องค์ประกอบทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)		
	Zr	Fe	Al
1. Al-0.5Fe	-	0.53	Bal.
2. Al-1.8Fe	-	1.81	Bal.
3. Al-3Fe	-	3.01	Bal.
4. Al-0.5Fe-0.05Zr	0.05	0.54	Bal.
5. Al-1.8Fe-0.05Zr	0.05	1.79	Bal.
6. Al-3Fe-0.05Zr	0.05	3.04	Bal.
7. Al-0.5Fe-0.15Zr	0.15	0.57	Bal.
8. Al-1.8Fe-0.15Zr	0.17	1.80	Bal.
9. Al-3Fe-0.15Zr	0.16	3.01	Bal.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาแล³⁹องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 3 เติมฟลักซ์ และไล่แก๊ส

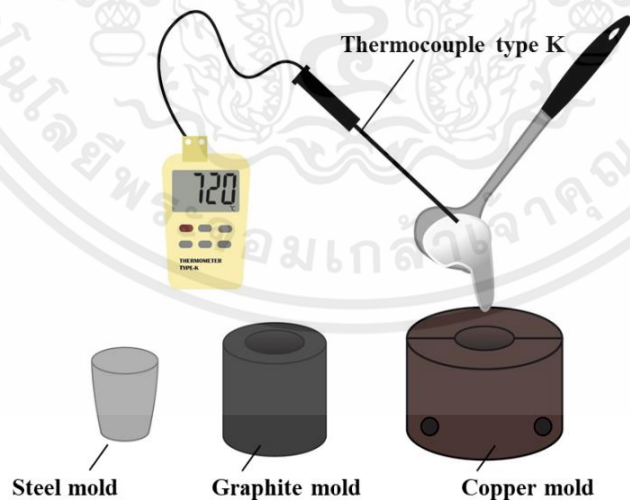
เมื่อได้องค์ประกอบทางเคมีตามที่ต้องการ จึงเติมฟลักซ์ และไล่แก๊สไฮโดรเจนด้วยแก๊สอาร์กอน เพื่อกำจัดตระกรัน (Dross)



รูปที่ 3.3 การเติมฟลักซ์ (Flux) และการไล่แก๊สไฮโดรเจน (H_2) ด้วยแก๊สอาร์กอน (Ar)

ขั้นตอนที่ 4 ใส่แม่พิมพ์ที่เตรียมไว้

ตักใส่แม่พิมพ์ที่เตรียมไว้ได้แก่ แม่พิมพ์เหล็ก แม่พิมพ์แกรไฟต์ และแม่พิมพ์ทองแดง วัดอุณหภูมิเท (Pouring Temperature; T_p) ด้วยเทอร์โมคัปเปิลประเภท K ที่ $720\text{ }^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 3.4 การเทโลหะผสมเหลวลงแม่พิมพ์ทองแดง แม่พิมพ์แกรไฟต์ และแม่พิมพ์เหล็ก ที่อุณหภูมิเท $720\text{ }^{\circ}\text{C}$

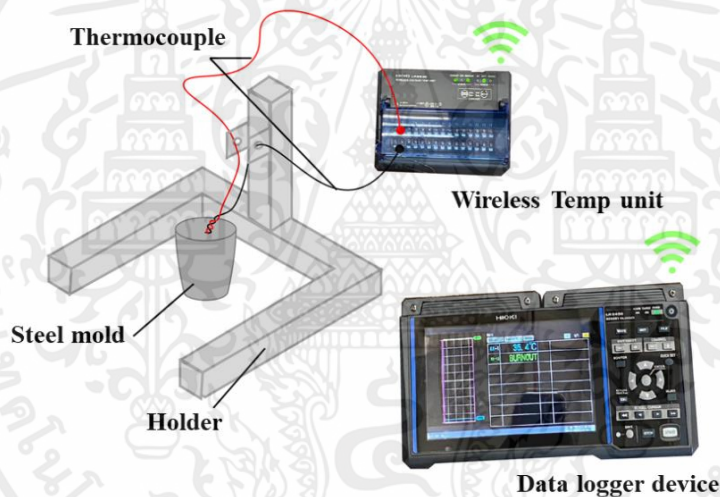
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและ 40 อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 5 ทำการนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์

หลังจากนั้นทำการหลอมโลหะผสมอัตราส่วนอื่นๆที่เตรียมไว้จนครบตามแผนการทดลอง (ในการหลอมโลหะผสมครั้งใหม่จำเป็นต้องเทน้ำโลหะเหลวที่เหลืออยู่ออกจากเบ้าหลอมก่อนให้หมด หรือทำการหลอมอลูมิเนียมบริสุทธิ์แล้วเทโลหะเหลวออก เพื่อป้องกันการผสมกันของโลหะผสมก่อนหน้า

3.2 ขั้นตอนการวัดอัตราการเย็นตัว

1. ต่อลวดขั้วบวก ขั้วลบด้านหัวกับเครื่องที่ต่อเทอร์โมคัปเปิล ส่วนด้านปลายนำมาต่อกันเป็นเกลียว
2. ใช้ตัวยึด (Holder) ในการจับลวดที่ต่อกันเป็นเกลียว ขณะเทใส่แม่พิมพ์ เพื่อให้ลวดเทอร์โมคัปเปิลอยู่ตรงกลางของแม่พิมพ์
3. ติดตั้งเครื่องบันทึกข้อมูลความเร็วสูง (HIOKI LR 8450 Memory Hilogger) เชื่อมต่อกับเครื่องเซ็นเซอร์ตรวจวัดแบบไร้สาย (HIOKI LR 8530 Wireless Voltage/Temp Unit) ที่ต่อกับเทอร์โมคัปเปิล

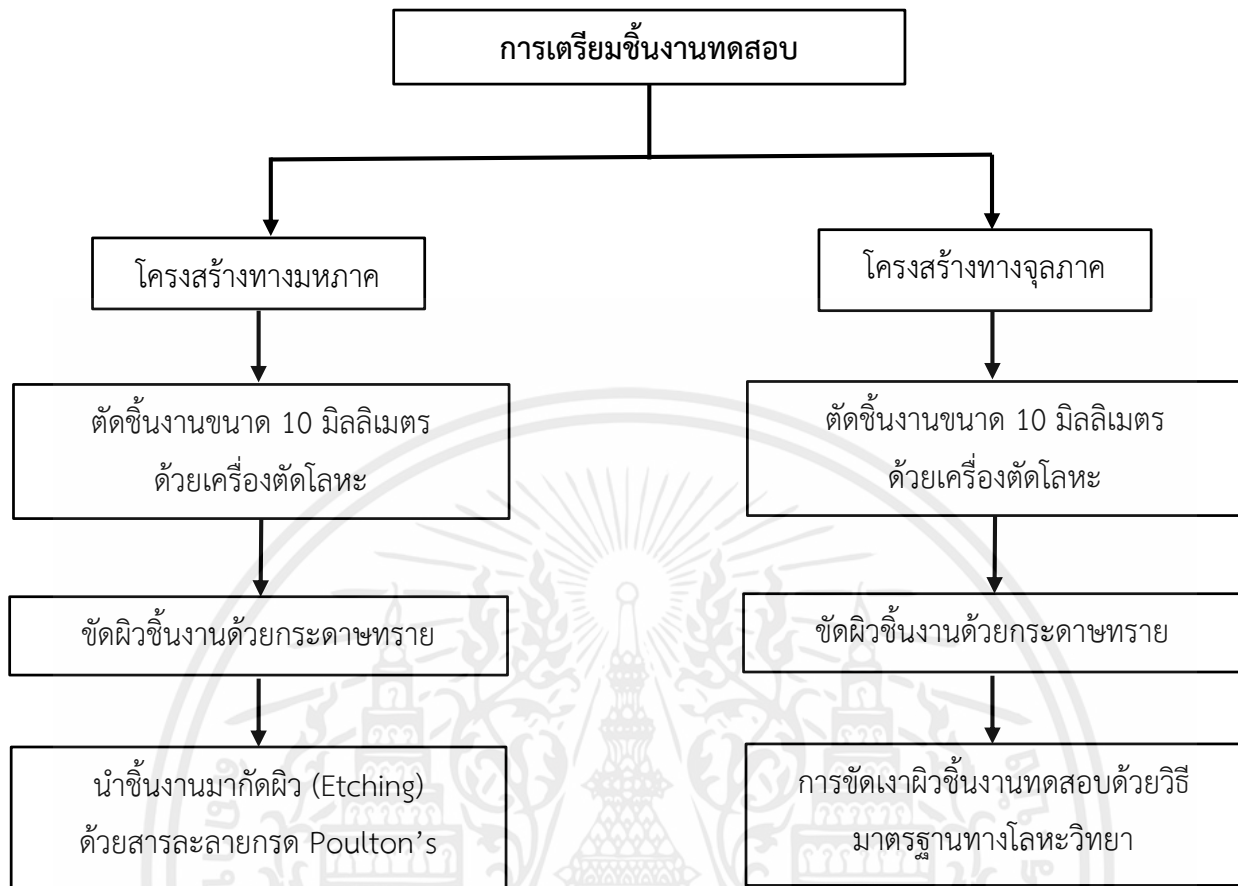


รูปที่ 3.5 เครื่องวัดอัตราการเย็นตัว (Cooling Rates)

4. เทน้ำโลหะผสมที่อุณหภูมิ 720 °C ใส่แม่พิมพ์ กดเริ่มบันทึกข้อมูล
5. รอจนกว่าโลหะผสมเย็นตัวลงในแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 300 °C แล้วจึงหยุดการบันทึกข้อมูล
6. ข้อมูลอัตราการเย็นตัวจะถูกบันทึกไว้รูปแบบของไฟล์ .txt จากเครื่องบันทึกข้อมูล แล้วจึงทำการสร้างกราฟของอัตราการเย็นตัวด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
7. ทำการทดลองซ้ำกันทั้งแม่พิมพ์เหล็ก แม่พิมพ์แกรไฟต์ และแม่พิมพ์ทองแดง เพื่อให้ได้กราฟของอัตราการเย็นตัวของทุกแม่พิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและ 41 อย่ าง อัง ถึง เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

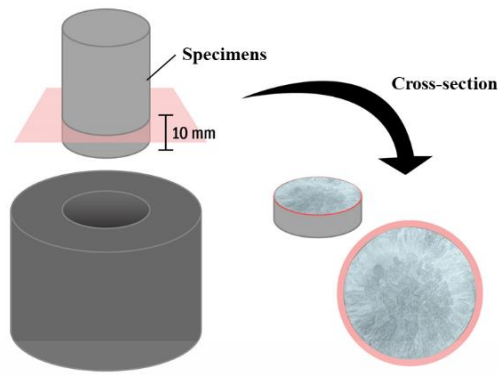
3.3 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 3.6 แผนผังการเตรียมชิ้นงานทดสอบโครงสร้างทางมหภาคและโครงสร้างจุลภาค

3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบโครงสร้างทางมหภาค

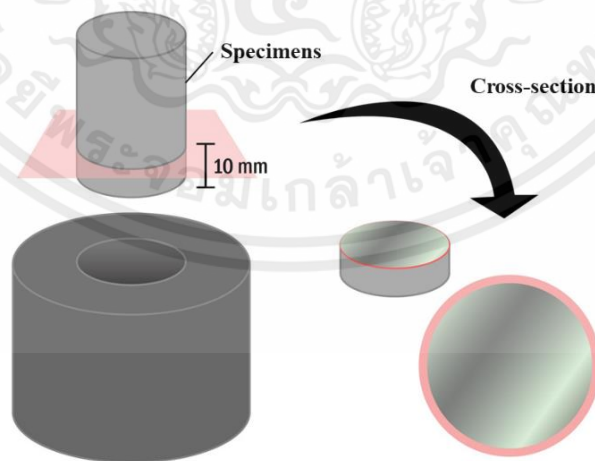
1. ตัดชิ้นงานขนาดความสูง 10 มิลลิเมตรจากด้านล่างของชิ้นงาน ด้วยเครื่องตัดโลหะ (METKON SERVOCUT-M 250)
2. ขัดผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทราย เบอร์ 180, 240, 320, 400, 600 และ 800 ตามลำดับ
3. นำชิ้นงานมากัดกรด (Etching) ด้วยสารละลายกรดของ Poulton (Poulton's Reagent)
4. นำชิ้นงานไปแสกนเพื่อบันทึกภาพผิวหลังจากขัดเกรน ด้วยเครื่องแสกนเอกสาร



รูปที่ 3.7 การเตรียมชิ้นงานการทดสอบโครงสร้างทางมหภาค

3.3.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบโครงสร้างทางจุลภาค

1. ตัดชิ้นงานขนาด 10 มิลลิเมตรจากกันแม่พิมพ์ ด้วยเครื่องตัดโลหะ (METKON SERVOCUT-M 250)
2. ขัดผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทราย เบอร์ 180, 240, 320, 400, 600, 800 และ 1200 ตามลำดับ
3. ขัดเงาชิ้นงานด้วยผงเพชร 3 ไมครอน และน้ำยาหล่อลื่น (Lubricant) จากนั้นขัดด้วยน้ำยา OP-S เป็นลำดับสุดท้าย



รูปที่ 3.8 การเตรียมชิ้นงานการทดสอบโครงสร้างทางจุลภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและ⁴³อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้างทางมหภาคและโครงสร้างทางจุลภาค

3.4.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้างทางมหภาค

นำชิ้นงานที่ผ่านการกัดกรด (Etching) ไปวิเคราะห์โครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ด้วยแสงโพลาไรซ์ (Polarized Light) และวัดขนาดเกรนด้วยโปรแกรม Image J

3.4.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค

1. นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดเงา ไปวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง และกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)

2. นำชิ้นงานที่ผ่านการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค มาวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค EDS

3. วิเคราะห์การกระจายตัวของสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic) ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ด้วยแหล่งกำเนิดรังสี $\text{Cu K}\alpha$

3.5 ขั้นตอนการบ่มแข็ง (Aging)

1. นำชิ้นที่ตัดมาบ่มแข็ง (Aging) เพื่อศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสม โดยกำหนดอุณหภูมิ 300, 350, 400 และ 450°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ด้วย Muffle Furnace (MF-14)

2. เมื่อครบ 10 ชั่วโมงนำชิ้นงานจุ่มน้ำทันที (Quenching)

3. วัดค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็ง (As-aged) ด้วยเครื่อง Mitutoyo HM-113 เพื่อหาอุณหภูมิที่ทำให้ค่าความแข็งสูงสุด

4. เลือกอุณหภูมิที่ให้ค่าความแข็งสูงสุดในการทำการบ่มแข็งชิ้นงาน เพื่อนำไปวัดค่าความแข็งของชิ้นงาน

5. ทำการบ่มแข็งชิ้นงานเพิ่มอีก 3 ชั่วโมง วัดค่าความแข็งของชิ้นงานเริ่มต้นที่ 3 ถึง 40 ชั่วโมง จึงถือว่าสิ้นสุด

3.6 ขั้นตอนการทดสอบคุณสมบัติทางกล

3.6.1 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์

1. เตรียมชิ้นงานทดสอบให้มีความระนาบ จากนั้นเตรียมผิวชิ้นงานด้วยการขัดกระดาษทรายเบอร์ 180, 240, 320, 400, 600, 800 และ 1200 และขัดเงาชิ้นงานด้วยผงเพชร 3 ไมครอน จากนั้นขัดด้วยน้ำยา OP-5 เป็นลำดับสุดท้าย

2. ทำการตั้งค่าเครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ เลือกชนิดของวัสดุเป็นวัสดุอ่อนและปรับขนาดแรงกดเป็น 0.1 กิโลกรัมแรง

3. วางชิ้นงานทดสอบเพื่อทำการวัดความแข็ง โดยปรับกล้องที่กำลังขยาย 10 เท่า และ 50 เท่า ให้ชิ้นงานมีความคมชัด คุณลักษณะของโครงสร้างเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและ 44 อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. หมุนกลิ้งเปลี่ยนเป็นหัวกดเพชร จากนั้นทำการกดชิ้นงานทดสอบ
5. รอประมาณ 15 วินาที จึงค่อยวัดขนาดของรอยกด เพื่อให้เครื่องคำนวณค่าความแข็ง
6. ทำการกดชิ้นงานให้ครบทั้ง 3 รอย เพื่อหาความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานทดสอบ จากนั้นจึงเปลี่ยนชิ้นงานทดสอบ

3.6.2 การทดสอบการนำไฟฟ้า

1. เตรียมชิ้นงานแบบหล่อให้ชิ้นงานมีความระนาบ หลังจากนั้นเตรียมผิวชิ้นงานด้วยการขัดกระดาษทรายเบอร์ 180, 240, 320, 400, 600, 800 และ 1200 แล้วขัดเงาชิ้นงานด้วยผงเพชร 3 ไมครอน จากนั้นขัดด้วยน้ำยา OP-S เป็นลำดับสุดท้าย

2. ทำการตั้งค่าเครื่องทดสอบการนำไฟฟ้ากระแสไฟฟ้าวน (Electrical Eddy Current Testing Equipment) โดยการตั้งค่ามาตรฐานการทดสอบของเครื่องโดยการวัดกระแสไฟฟ้าในอากาศและชิ้นงานมาตรฐาน

3. นำโพรบแตะที่ชิ้นงานทดสอบทั้งไว้ บันทึกค่าการนำไฟฟ้า และทำการทดสอบจุดอื่นๆ อย่างน้อย 5 จุด

4. นำชิ้นงานทดสอบไปบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 350 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงและนำมาวัดค่าการนำไฟฟ้าอีกครั้ง

5. ทำการบ่มแข็งชิ้นงานเพิ่มขึ้นที่ละ 3 ชั่วโมงและทำการวัดค่าทำไฟฟ้า จนถึง 40 ชั่วโมง จึงถือว่าสิ้นสุด

3.6.3 การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อน

การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Corrosion Testing) เทคนิคแบบ Potentiodynamic Polarization ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5% ด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตท (Poteniostat) มีขั้นตอนการทดสอบ ดังนี้

1. เตรียมชิ้นงานทดสอบแบบหล่อและชิ้นงานหลังจากผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 350 °C เป็นเวลา 21 ชั่วโมง โดยการตัดชิ้นงานควรคำนึงให้มีพื้นที่เพียงพอสำหรับการทดสอบคือ ให้มีพื้นที่มากกว่า 10X10 มม. ด้วยการขัดกระดาษทรายเบอร์ 180, 240, 320, 400, 600, 800 และ 1200 และขัดเงาชิ้นงานด้วยผงเพชร 3 ไมครอน จากนั้นขัดด้วยน้ำยา OP-S เป็นลำดับสุดท้าย

2. เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นที่มีความเข้มข้น 3.5%

3. จับยึดชิ้นงานสำหรับการทดสอบกับแท่นจับชิ้นงาน ล็อคให้แน่นเพื่อไม่ให้เกิดการรั่วไหลของสารละลายเกิดขึ้น

4. เทสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่เตรียมไว้ลงในแท่นสำหรับทดสอบและต่อขั้ว WE, ขั้ว CE และขั้ว RE

5. ทำการเปิดเครื่องโพเทนชิโอสแตท ซึ่งประมวลผลร่วมกับโปรแกรม NOVA 1.11 หลังจากนั้นกด Run (กำหนดให้ Open Circuit Potential หรือ OCP เท่ากับ 60 วินาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและ 45 อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เมื่อทดสอบเสร็จสิ้นแล้วให้ทำการเทสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ออกแล้วทำความสะอาดด้วยน้ำ Deionized และเปลี่ยนชิ้นงานทดสอบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาแล⁴⁶องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

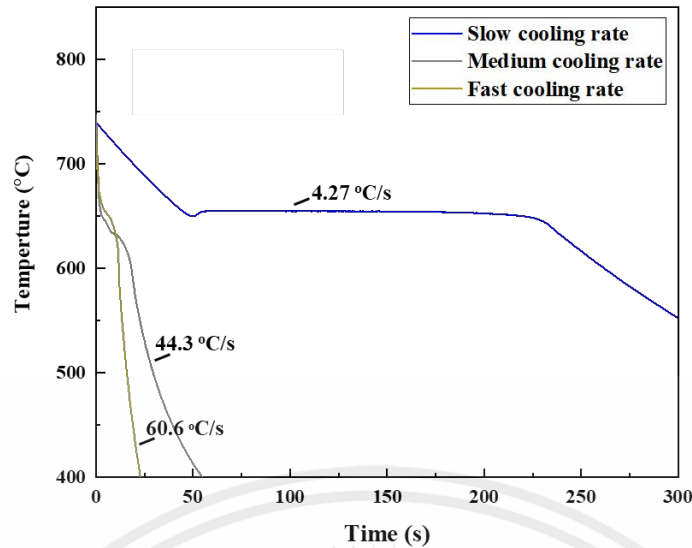
ผลการดำเนินงาน

จากการดำเนินการตามขั้นตอนการดำเนินงานของการศึกษาผลกระทบของอัตราการเย็นตัวและการเติม Zr ต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและการบ่มแข็งของโลหะผสม Al-Fe มีผลการดำเนินการ ดังนี้

1. อิทธิพลของอัตราการเย็นตัวต่อโลหะผสม Al-Fe
2. อิทธิพลของอัตราการเย็นตัวและการเติมธาตุ Zr ต่อโครงสร้างทางมหภาคและจุลภาคของโลหะผสม Al-Fe
3. อิทธิพลของอัตราการเย็นตัวและการเติมธาตุ Zr ต่อการปรับแต่งเกรนของโลหะผสม Al-Fe
4. อิทธิพลของ Zr ต่อค่าความแข็งของโลหะผสม Al-Fe
5. การวิเคราะห์อิทธิพลของอัตราการเย็นตัวต่อการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบ
6. อิทธิพลของอัตราการเย็นตัวและการเติมธาตุ Zr ต่อสมบัติการนำไฟฟ้าของโลหะผสม Al-Fe
7. การวิเคราะห์ความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสม Al-Fe
8. อิทธิพลของการบ่มแข็งต่อการวิเคราะห์ความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสม Al-Fe

4.1 อิทธิพลของอัตราการเย็นตัวต่อโลหะผสม Al-Fe

การศึกษาผลกระทบของอัตราการเย็นตัวต่อโลหะผสมอลูมิเนียม-เหล็ก โดย 3 วัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ ได้แก่ แม่พิมพ์ทองแดง แม่พิมพ์แกรไฟต์ และแม่พิมพ์เหล็ก ซึ่งวัดอัตราการเย็นตัวได้ดังนี้ 60.6 °C/s 44.3 °C/s และ 4.27 °C/s ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเส้นโค้งอัตราการเย็นตัว แสดงดังรูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของอุณหภูมิเทียบกับเวลา ที่เส้นโค้งอัตราการเย็นตัวเร็วของแม่พิมพ์ทองแดง อุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เกิดกระบวนการแข็งตัวของโลหะจากของเหลวเป็นของแข็งอย่างรวดเร็ว



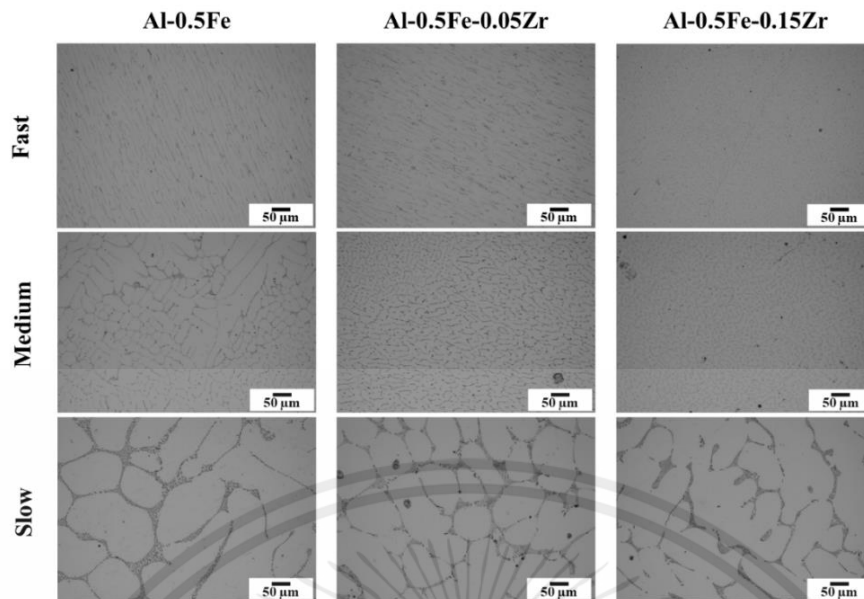
รูปที่ 4.1 เส้นโค้งอัตราการเย็นตัวของความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเทียบกับเวลา ของโลหะผสม Al-Fe โดย 3 วัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ ได้แก่ แม่พิมพ์ทองแดง แม่พิมพ์แกรไฟต์ และแม่พิมพ์เหล็ก

4.2 อิทธิพลของอัตราการเย็นตัวและการเติมธาตุ Zr ต่อโครงสร้างทางมหภาคและจุลภาคของโลหะผสม Al-Fe

4.2.1 อิทธิพลของอัตราการเย็นตัวและการเติมธาตุ Zr ต่อโครงสร้างทางมหภาคและจุลภาคของโลหะผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe



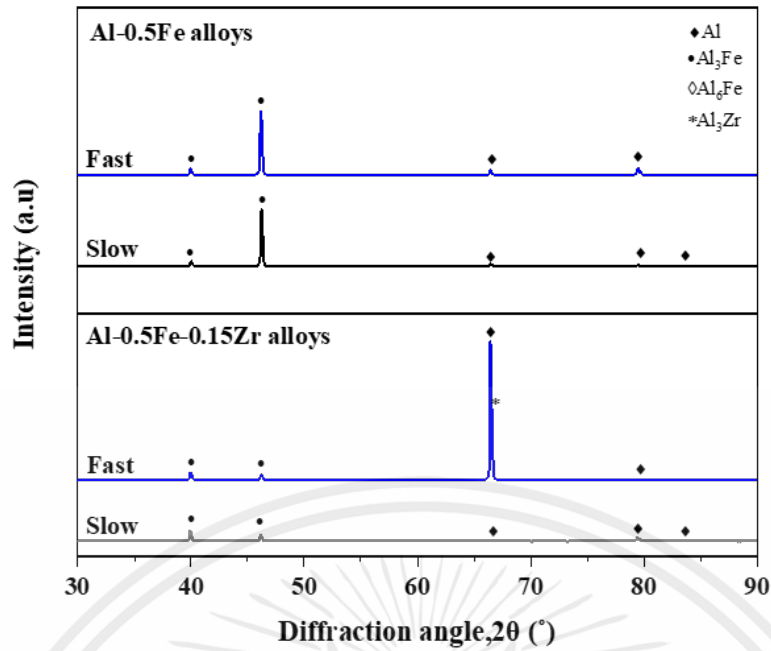
รูปที่ 4.2 โครงสร้างทางมหภาคของโลหะผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe



รูปที่ 4.3 โครงสร้างทางจุลภาคของโลหะผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe

จากการศึกษาโครงสร้างทางมหภาคของโลหะผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe พบว่าอัตราการเย็นตัวเร็ว มีลักษณะการเรียงตัวของเกรนรูปแท่ง (Columnar Grain) ที่ละเอียดกว่าจากขอบจนถึงศูนย์กลางของชิ้นงานทดสอบ เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่มีกระบวนการแข็งตัวช้าด้วยอัตราการเย็นตัวที่ช้ากว่า มีลักษณะเกรนแบบสม่ำเสมอ (Equiaxed Grain) หยาบเท่ากันทั่วทั้งเกรน และในโครงสร้างทางมหภาคของโลหะผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe ที่มีการเติมธาตุ Zr ซึ่งมีความสามารถในการปรับแต่งขนาดของเกรนให้ละเอียดขึ้น ส่งผลทำให้เกรนรูปแท่งของชิ้นงานที่มีการเติมธาตุ Zr มีความละเอียดมากขึ้น เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่เติม Zr และพบเกรนแบบสม่ำเสมอในอัตราการเย็นตัวเร็วและช้าของชิ้นงานที่มีการเติมธาตุ Zr แสดงดังรูปที่ 4.2

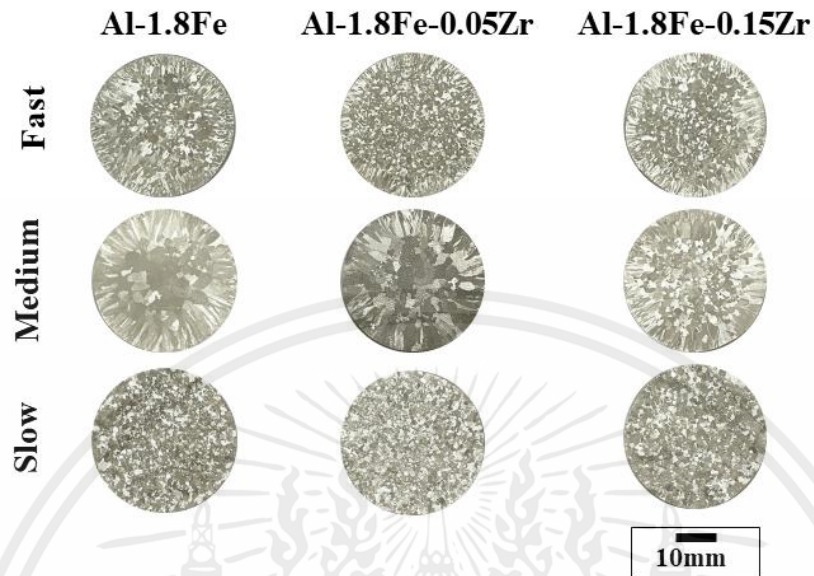
รูปที่ 4.3 โครงสร้างทางจุลภาคของโลหะผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe แสดงเฟสยูเทคติกตามแนวขอบเกรน ในเนื้ออลูมิเนียมเมทริกซ์ (α -Al) และเฟสยูเทคติกตามแนวขอบเกรน (Grain Boundary) เมื่ออัตราการเย็นตัวช้าลง จะส่งผลให้มีเดนไดรต์อลูมิเนียมเมทริกซ์หยาบขึ้น ในกรณีการเติม Zr ที่อัตราการเย็นตัวปานกลางและอัตราการเย็นตัวเร็ว แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าเฟสยูเทคติกละเอียดขึ้น แม้ว่าการเติมปริมาณ Zr เพิ่มขึ้นที่อัตราการเย็นตัวช้าไม่ได้ทำให้เดนไดรต์ของอลูมิเนียมมีขนาดลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน



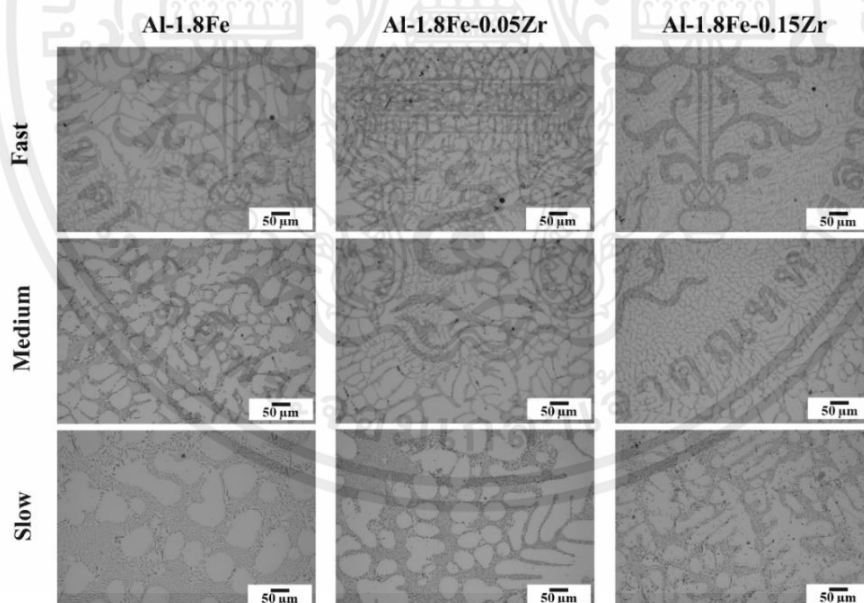
รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนโดยใช้รังสีเอ็กซ์ (XRD) ที่อัตราการเย็นตัวและปริมาณการเติมธาตุ Zr ต่างกันโลหะของผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe

ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนโดยใช้รังสีเอ็กซ์ของโลหะผสมไฮโปยูเทคติก ที่อัตราการเย็นตัวต่างกัน แสดงไว้ในรูปที่ 4.4 แสดงการมีอยู่ของเฟสเสถียร Al_3Fe และเฟสกึ่งเสถียร Al_6Fe ที่กระจายตัวทั่วชิ้นงาน ทั้งชิ้นงานที่ได้จากอัตราการเย็นตัวแบบเร็วและช้า นอกจากนี้อัตราการเย็นตัวของชิ้นงานที่มีการเติมธาตุ Zr พบจุดสูงสุดของเฟส Al_3Zr ที่แสดงการเกิดขึ้นของเฟส Al_3Zr

4.2.2 อิทธิพลของอัตราการเย็นตัวและการเติมธาตุ Zr ต่อโครงสร้างทางมหภาคและจุลภาคของโลหะผสมยูเทคติก Al-Fe



รูปที่ 4.5 โครงสร้างทางมหภาคของโลหะผสมยูเทคติก Al-Fe

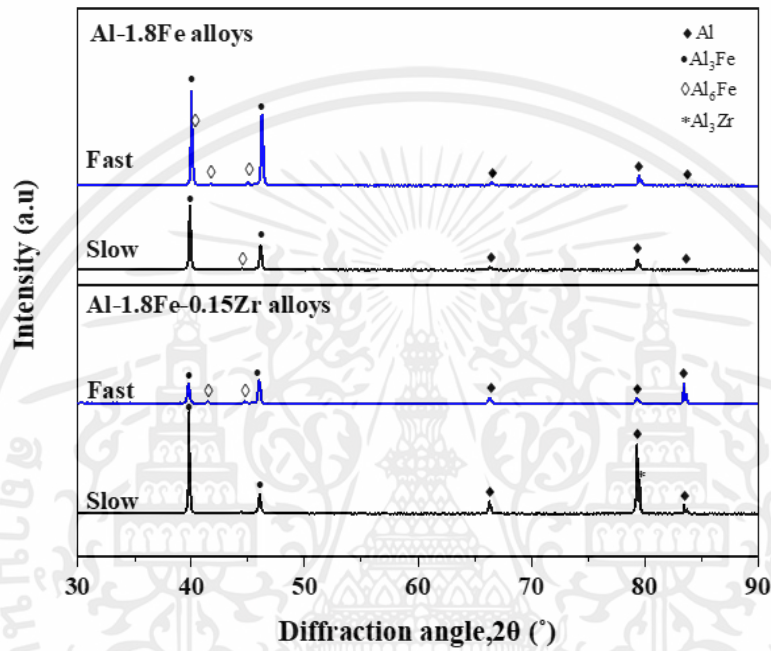


รูปที่ 4.6 โครงสร้างทางจุลภาคของโลหะผสมยูเทคติก Al-Fe

จากรูปที่ 4.5 แสดงโครงสร้างทางมหภาคของโลหะผสมยูเทคติก จากผลกระทบบัตราการเย็นตัวต่อกระบวนการแข็งตัว ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่คล้ายคลึงกับในโลหะผสมไฮโปยูเทคติก ที่มีเกรนรูปแท่งละเอียดบริเวณขอบชิ้นงาน และมีเกรนสม่ำเสมอมีขนาดเล็กมากขึ้นบริเวณศูนย์กลางชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวเร็วขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาแล⁵¹องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และที่อัตราการเย็นตัวปานกลาง จะมีเกรนสม่ำเสมอบริเวณศูนย์กลางชิ้นงานเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวปานกลางของไฮโปยูเทคติก ลักษณะของเกรนรูปแท่งจะถูกปรับแต่งให้เป็นเกรนแบบสม่ำเสมอ หรือถูกปรับแต่งให้มีความละเอียดขึ้นตามปริมาณการเติมธาตุ Zr

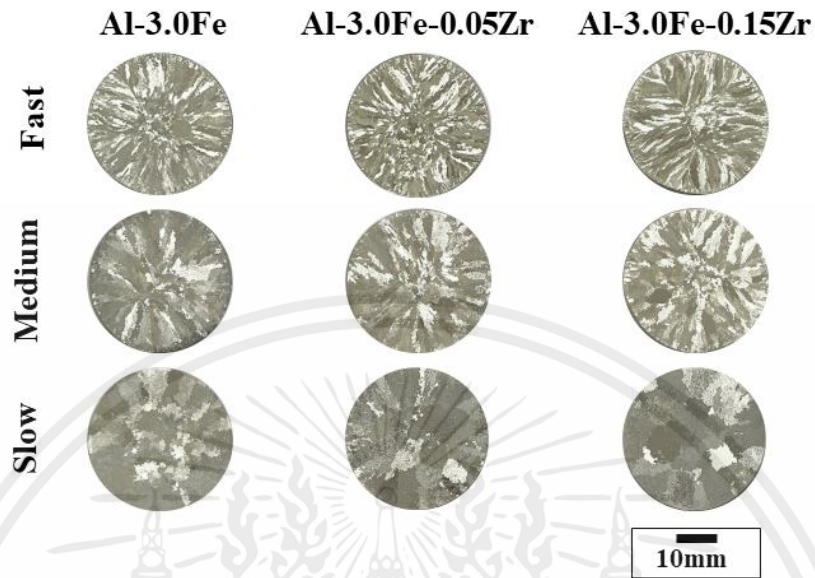
จากโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะผสมยูเทคติก Al-Fe แสดงในรูปที่ 4.6 แสดงการจัดเรียงเฟสยูเทคติก เมื่ออัตราการเย็นตัวที่เร็วขึ้น ส่งผลให้ได้ยูเทคติกและเดนไดรต์ละเอียดขึ้น และอัตราการเย็นตัวช้าจะพบเดนไดรต์หยาบ และเมื่อมีการเติมปริมาณธาตุ Zr มากขึ้น ส่งผลให้มีเฟสยูเทคติกและเดนไดรต์ละเอียดขึ้น



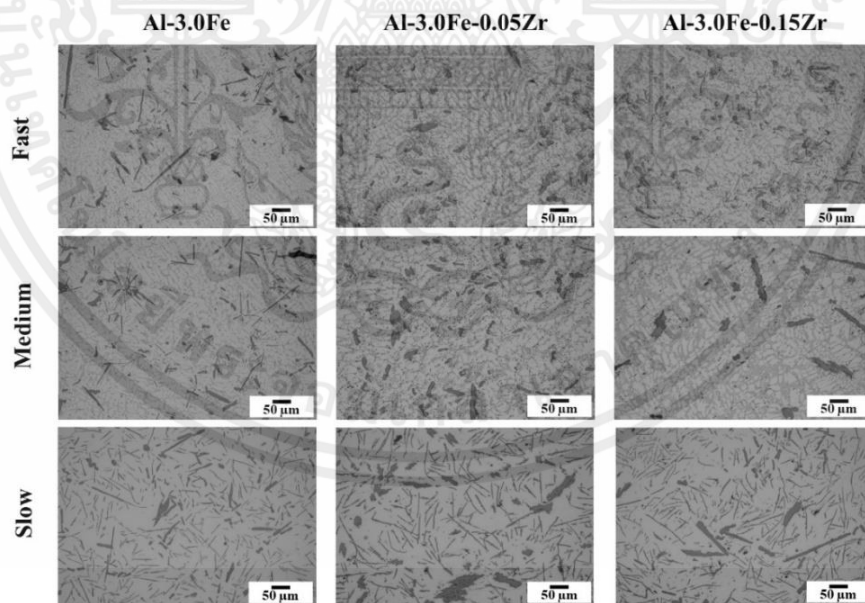
รูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนโดยการใช้อังสีกซ์ (XRD) ที่อัตราการเย็นตัวและ ปริมาณการเติมธาตุ Zr ต่างกันของโลหะผสมยูเทคติก Al-Fe

จากรูปที่ 4.7 แสดงผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนโดยการใช้อังสีกซ์ ของโลหะผสมยูเทคติก ที่อัตราการเย็นตัวต่างกัน มีการก่อตัวของเฟส Al, Al₃Fe และ เฟสกึ่งเสถียร Al₆Fe ที่กระจายทั่วชิ้นงาน ทั้งชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวเร็วและช้า นอกจากนี้ชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวช้า พบจุดสูงสุดของเฟสกึ่งเสถียรลดลง และพบจุดสูงสุดของเฟส Al₃Fe เพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงเฟส จากเฟสกึ่งเสถียรเป็นเฟสเสถียรที่อัตราการเย็นตัวช้า เมื่อโลหะผสมยูเทคติกมีการเติมปริมาณของธาตุ Zr เพิ่มขึ้น จะพบการก่อตัวของเฟส Al₃Zr

4.2.3 อิทธิพลของอัตราการเย็นตัวและการเติมธาตุ Zr ต่อโครงสร้างทางมหภาคและจุลภาคของโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติก Al-Fe



รูปที่ 4.8 โครงสร้างทางมหภาคของโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติก Al-Fe

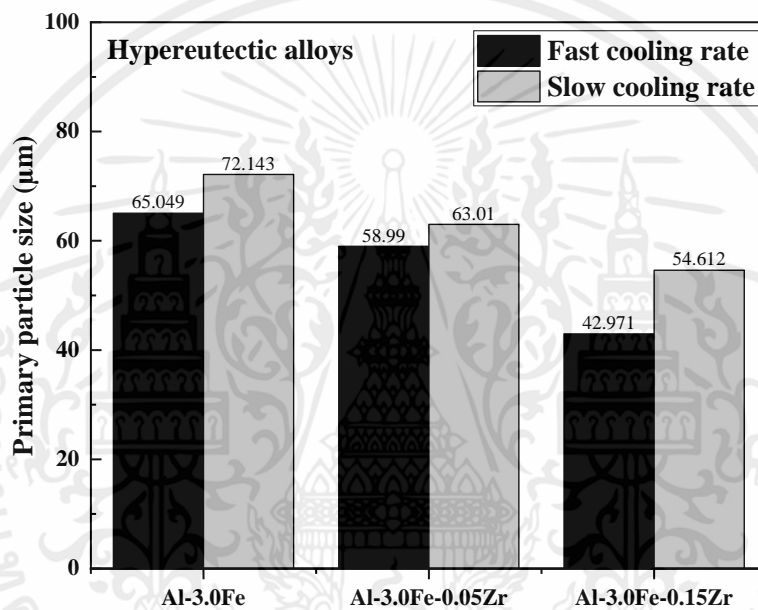


รูปที่ 4.9 โครงสร้างทางจุลภาคของโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติก Al-Fe

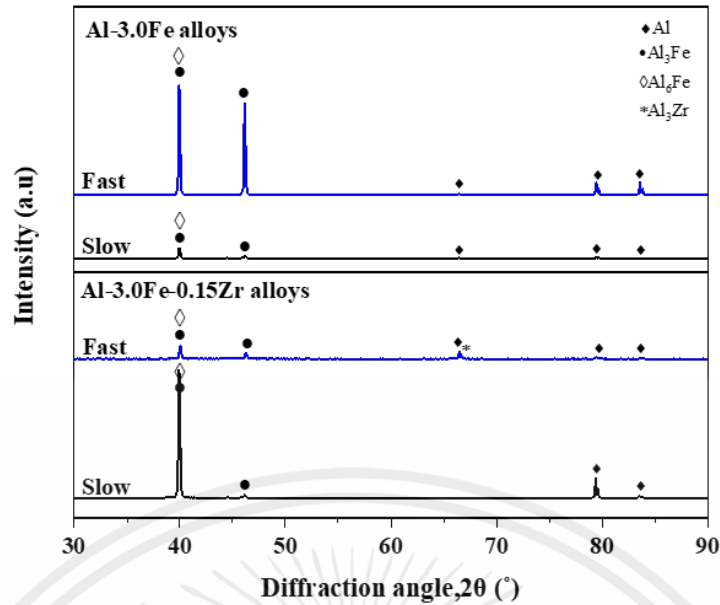
จากรูปที่ 4.8 แสดงโครงสร้างทางมหภาคของโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติก Al-Fe อัตราการเย็นตัวที่มีผลต่อกระบวนการแข็งตัวของโลหะ เมื่ออัตราการเย็นตัวเร็วจะส่งผลให้เกรนรูปแท่งหยาบ ตั้งแต่บริเวณขอบถึงใจกลางเป็นเอกลักษณ์สำหรับชิ้นงานเพื่อการศึกษานี้ เมื่อผู้รู้ได้เห็นภาพประกอบนี้แล้ว คงจะเข้าใจได้ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาแล 53 อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศูนย์กลางของชิ้นงาน และเมื่ออัตราการเย็นตัวช้าลง ทำให้เกิดการเรียงตัวของเกรนรูปแท่งแบบหยาบและเกรนสม่ำเสมอแบบหยาบ แต่การเติมธาตุ Zr ในปริมาณที่มากขึ้น ไม่แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างทางมหภาค

จากรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะผสมยูเทคติก Al-Fe พบยูเทคติกที่มีความละเอียดและเฟสปฐมภูมิของเหล็กในชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวเร็ว ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าเฟสปฐมภูมิของเหล็กในชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวช้า ดังแสดงในรูปที่ 4.10 แสดงค่าเฉลี่ยของขนาดเฟสปฐมภูมิของเหล็กเปรียบเทียบระหว่างอัตราการเย็นตัวที่เร็วและช้า เมื่อมีการเติมธาตุ Zr ต่างกัน นอกจากนี้ การเติมธาตุ Zr ยังมีความสามารถในการปรับแต่งรูปร่างของเฟสปฐมภูมิจากรูปร่างคล้ายเข็มเป็นรูปกล่อง

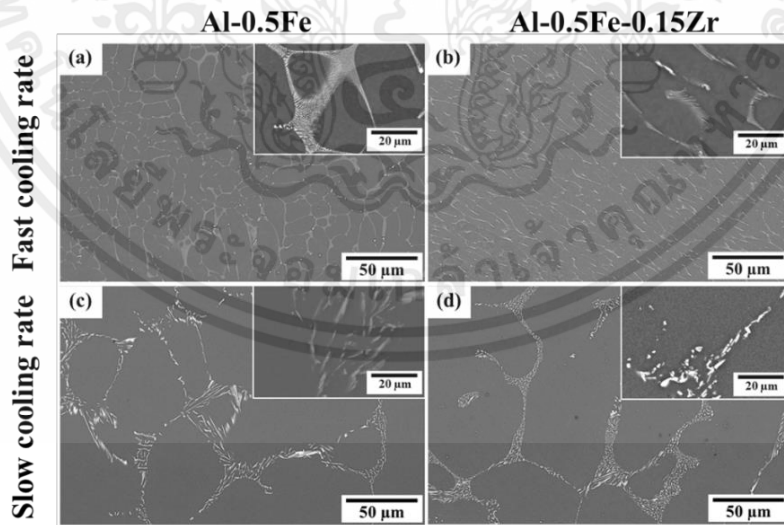


รูปที่ 4.10 ค่าเฉลี่ยของขนาดเฟสปฐมภูมิของเหล็กเปรียบเทียบระหว่างอัตราการเย็นตัวที่เร็วและช้า เมื่อมีการเติมธาตุ Zr ต่างกัน



รูปที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนโดยใช้รังสีเอกซ์ (XRD) ที่อัตราการเย็นตัวและ ปริมาณการเติมธาตุ Zr ต่างกันของโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติก Al-Fe

จากรูปที่ 4.11 แสดงผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนโดยใช้รังสีเอกซ์ ของโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติก Al-Fe โดยอัตราการเย็นตัวต่างกัน ที่อัตราการเย็นตัวเร็วกับช้าพบจุดสูงสุดของเฟส Al Al₃Fe และเฟสกิ่งเสถียร Al₆Fe และเมื่อมีการเติมธาตุ Zr ที่อัตราการเย็นตัวเร็ว พบจุดสูงสุดของเฟส Al₃Zr

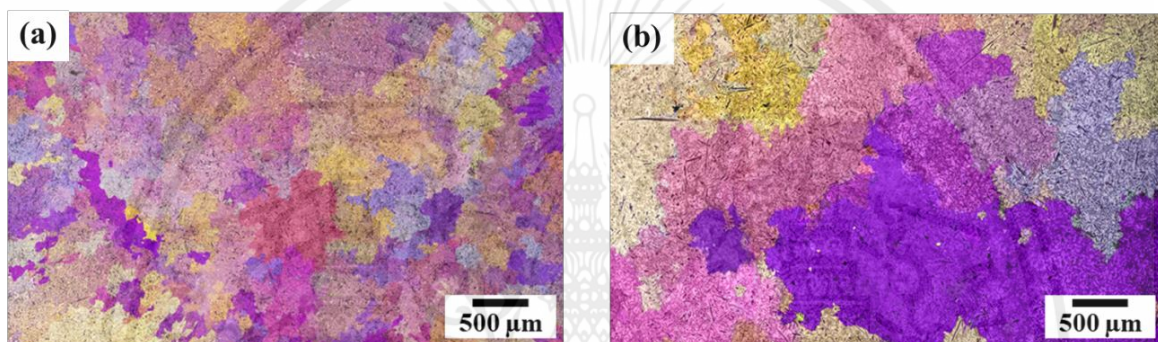


รูปที่ 4.12 โครงสร้างทางจุลภาค SEM ของโลหะผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe ที่มีปริมาณ Zr ต่างกันดังนี้ (a) โลหะผสม Al-0.5Fe อัตราเย็นตัวเร็ว (b) โลหะผสม Al-0.5Fe อัตราการเย็นตัวช้า (c) โลหะผสม Al-0.5Fe-0.15Zr อัตราการเย็นตัวเร็ว และ (d) Al-0.5Fe-0.15 Zr อัตราการเย็นตัวช้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาแล 55 อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

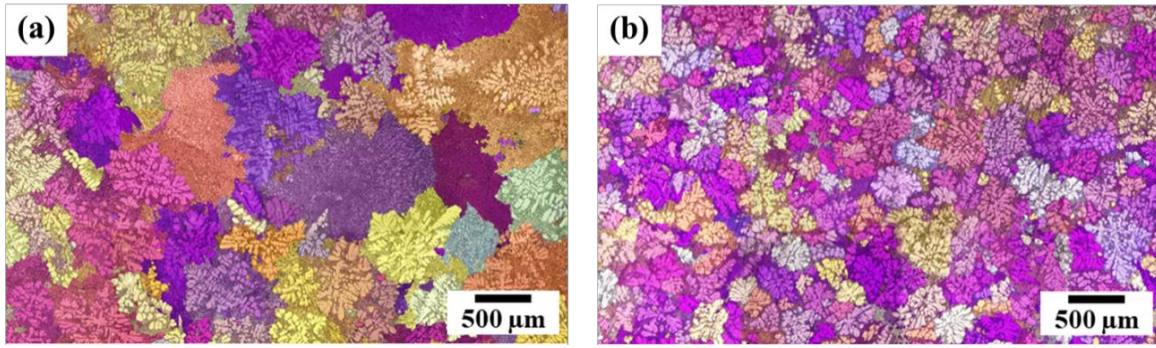
จากรูปที่ 4.12 แสดงโครงสร้างทางจุลภาค SEM แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเฟสยูเทคติกและเดนไดรต์อลูมิเนียม โดยอัตราการเย็นตัวมีผลทำให้การเติบโตของเกรนมีขนาดที่ต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างอัตราการเย็นตัวเร็วกับอัตราการเย็นตัวช้า ที่อัตราการเย็นตัวเร็วแสดงให้เห็นเฟสยูเทคติกละเอียดในเนื้อพื้นอลูมิเนียมแมทริกซ์ เมื่อเทียบกับอัตราการเย็นตัวช้าพบเฟสยูเทคติกรูปร่างเกล็ด นอกจากนี้อัตราการเย็นตัวช้ามีระยะห่างระหว่างเฟสยูเทคติกเพิ่มขึ้น ผลของการเติม Zr มีบทบาทสำคัญในการลดขนาดของเฟสยูเทคติกและเดนไดรต์อลูมิเนียม ที่อัตราการเย็นตัวเร็วพบเฟสยูเทคติกขนาดเล็กลงเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่มีการเติมธาตุ Zr

4.3 อิทธิพลของอัตราการเย็นตัวและการเติมธาตุ Zr ต่อการปรับแต่งเกรนของโลหะผสม Al-Fe



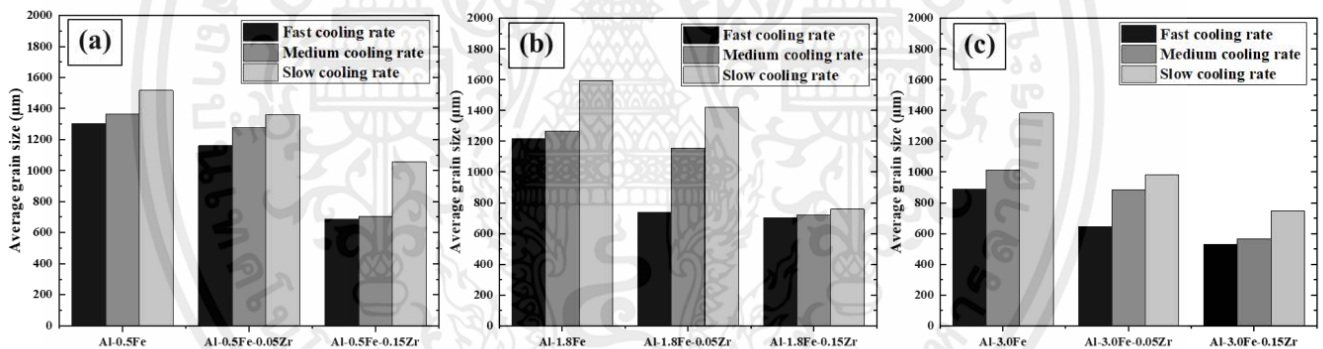
รูปที่ 4.13 โครงสร้างทางมหภาคของโลหะผสม Al-Fe ที่อัตราการเย็นตัวต่างกัน (a) อัตราการเย็นตัวเร็ว และ (b) อัตราการเย็นตัวช้า

พิจารณาจากรูปที่ 4.13 แสดงโครงสร้างเกรนของโลหะผสม Al-Fe ที่มีอัตราการเย็นต่างกัน รูปที่ 4.13 (a) แสดงโครงสร้างที่อัตราการเย็นตัวเร็ว และรูปที่ 4.13 (b) แสดงโครงสร้างที่อัตราการเย็นตัวช้า จากภาพแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของอัตราการเย็นตัวที่มีผลต่อการปรับแต่งขนาดของเกรน ในกรณีอัตราการเย็นตัวเร็ว พบโครงสร้างเกรนละเอียด และพบโครงสร้างเกรนหยาบขึ้นในอัตราการเย็นตัวช้าอย่างชัดเจน เมื่อเทียบโครงสร้างเกรนกับอัตราการเย็นตัวเร็ว



รูปที่ 4.14 โครงสร้างทางมหภาคของโลหะผสม Al-Fe ที่เปลี่ยนแปลงไป จากการเติมธาตุ Zr (a) Al-Fe ไม่มีการเติม Zr และ (b) Al-Fe เติม Zr

จากรูปที่ 4.14 แสดงผลของการเติมธาตุ Zr ที่มีผลต่อกระบวนการแข็งตัว โดยการเติมธาตุ Zr จะมีผลทำให้เกรนมีความละเอียดมากขึ้น [43] แสดงดังรูปที่ 4.14 โดยชิ้นงานที่ไม่เติมธาตุเซอร์โคเนียม ในรูปที่ 4.14 (a) พบเกรนหยาบ แต่ชิ้นงานที่มีการเติมธาตุ Zr พบเกรนละเอียด



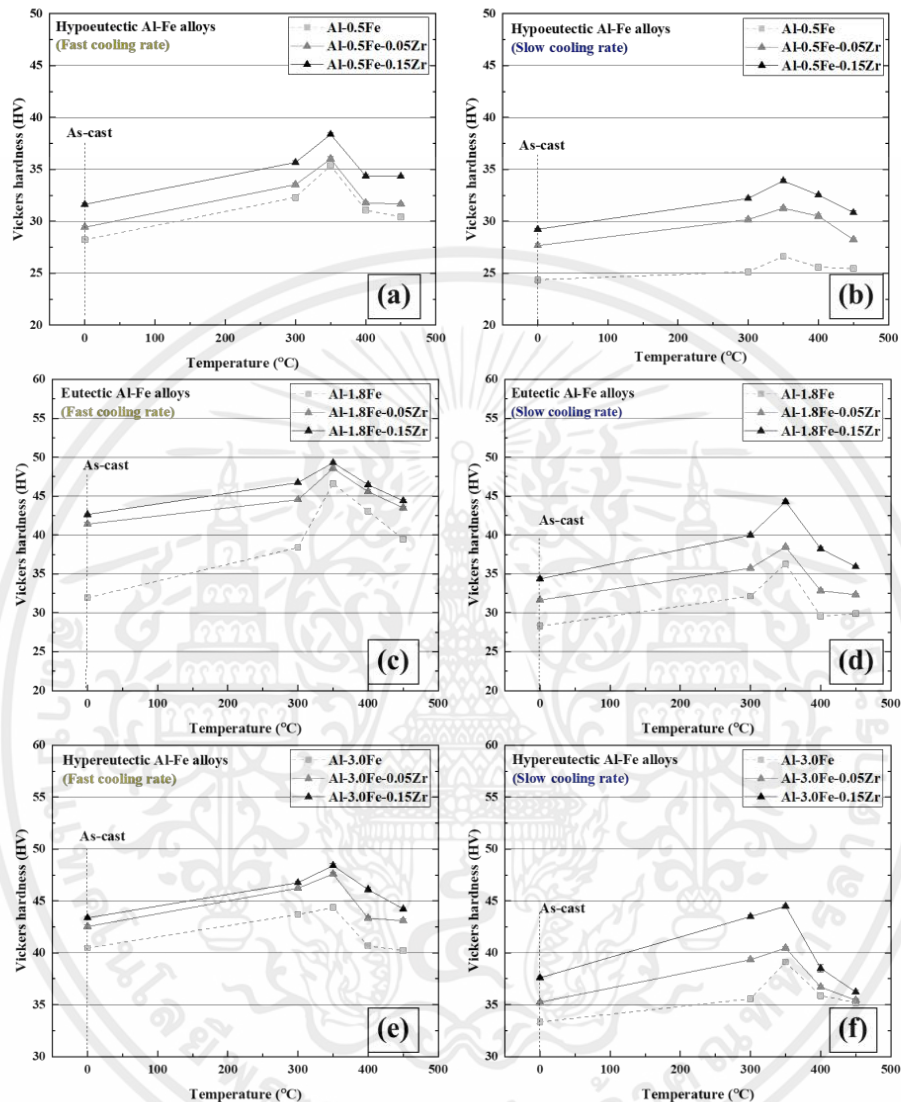
รูปที่ 4.15 โครงสร้างเกรนของโลหะผสม Al-Fe ที่อัตราการเย็นตัวและการเติมธาตุเซอร์โคเนียมต่างกัน (a) โลหะผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe (b) โลหะผสมยูเทคติก Al-Fe และ (c) โลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติก Al-Fe

จากรูปที่ 4.15 แสดงค่าเฉลี่ยขนาดเกรนของไฮโปยูเทคติก ยูเทคติก และไฮเปอร์ยูเทคติกของโลหะผสม Al-Fe ในอัตราการเย็นตัวที่ต่างกัน (60.6 °C/s, 44.3 °C/s และ 4.27 °C/s ตามลำดับ) จากการศึกษาอิทธิพลของการเติมธาตุ Zr 0.05% และ 0.15% และจากการวิเคราะห์ขนาดเกรนมีความสัมพันธ์กับอัตราการเย็นตัวที่ต่างกัน มีความคล้ายคลึงกันของโลหะผสม Al-Fe 3 ชนิด (ไฮโปยูเทคติก ยูเทคติก และไฮเปอร์ยูเทคติก) โดยอัตราการเย็นตัวเร็วเกรนจะมีขนาดเล็ก และเมื่ออัตราการเย็นตัวช้าลง จะส่งผลต่อขนาดเกรนให้มีขนาดใหญ่ขึ้น และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของการเติมธาตุ Zr ต่อขนาดของเกรน โดยการเติมธาตุ Zr ที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อขนาดเกรนที่เล็กลง ซึ่งการเติมธาตุ Zr ที่ 0.15% ให้ผลลัพธ์ของขนาดเกรนละเอียดอย่างเห็นได้ชัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาแล 57 ้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 อิทธิพลของอัตราการเย็นตัวและการเติมธาตุ Zr ต่อค่าความแข็งของโลหะผสม Al-Fe

4.4.1 อิทธิพลของอัตราการเย็นตัวและการเติมธาตุ Zr ต่อค่าความแข็งของโลหะผสม Al-Fe ด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิต่างกัน

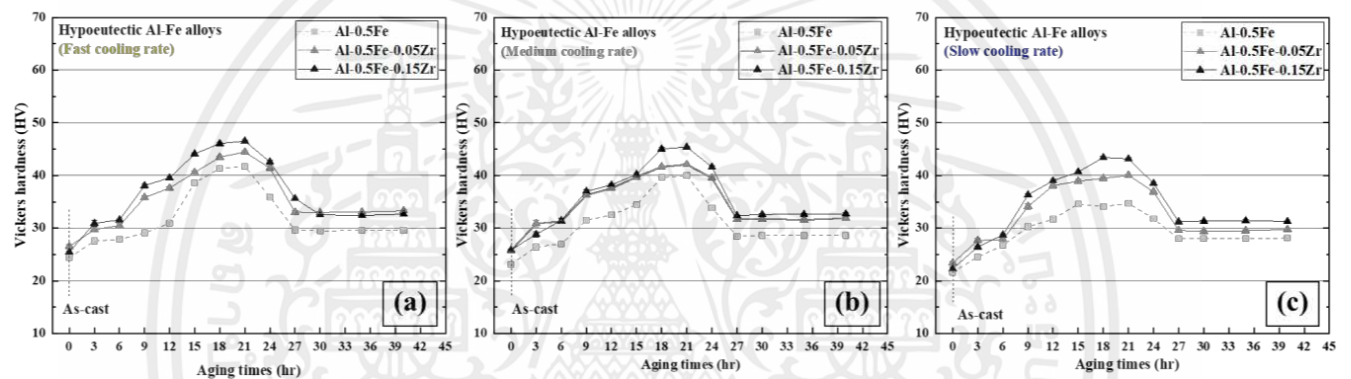


รูปที่ 4.16 ความแข็งของโลหะผสม Al-Fe ในอัตราการเย็นตัวเร็ว (a, b, c) และอัตราการเย็นตัวช้า (b, d, f) ซึ่งมีการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 300, 350, 400 และ 450 °C โดย (a, b) Al-0.5Fe (c, d) Al-1.8Fe และ (e, f) Al-3Fe

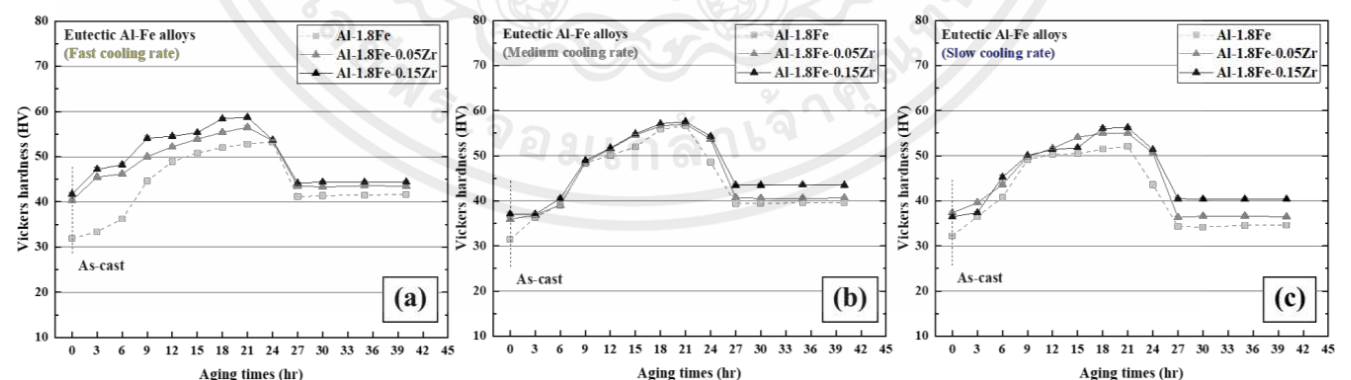
ความแปรผันของการบ่มแข็งที่เวลาเท่ากัน ด้วยอุณหภูมิต่างกัน (300, 350, 400 และ 450 °C) เป็นเวลา 10 ชั่วโมงของโลหะผสม 3 ชนิด ที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 4.16 ซึ่งรูปที่ 4.16(a) และ 4.16(b) เป็นโลหะผสมไฮโปยูเทคติก รูปที่ 4.16(c) และ 4.16(d) เป็นโลหะผสมยูเทคติก รูปที่ 4.16(e) และ 4.16(f) เป็นโลหะผสมยูเทคติก สำหรับรูปที่ 4.16 (a), (c) และ (e) แสดงค่าความแข็งของชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวเร็ว

และรูปที่ 4.16 (b), (d) และ (f) ที่อัตราการเย็นตัวช้า ความแข็งของสภาวะทั้งหมดมีแนวโน้มคล้ายกัน เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการเย็นตัวเร็วและอัตราการเย็นตัวช้า พบว่าอัตราการเย็นตัวเร็วบ่งบอกถึงความสามารถในการบ่มแข็งมากขึ้น เนื่องจากมีแนวโน้มของค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น และพบค่าความแข็งสูงสุดที่ 350 °C ในโลหะผสม Al-Fe ทุกกลุ่ม ก่อนที่ค่าความแข็งจะลดลงเรื่อย ๆ เมื่อใช้เวลาในการบ่มแข็งต่อไป ในกรณีมีการเติมปริมาณ Zr เพิ่มขึ้น ก็มีความสามารถในการบ่มแข็งมากขึ้นเช่นกัน จากค่าความแข็งที่มากกว่าชิ้นงานที่ไม่มีการเติม Zr ดังนั้นจากการพิจารณารูปแบบค่าความแข็งที่มีการบ่มแข็งที่เวลาเท่ากันสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการบ่มแข็งของโลหะผสม Al-Fe กลุ่มนี้อยู่ที่ 350 °C

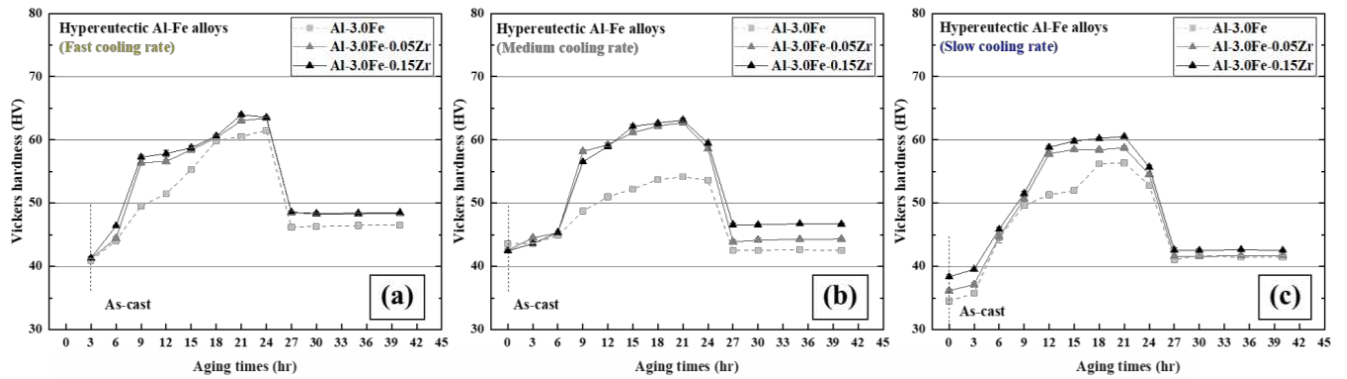
4.4.2 อิทธิพลของอัตราการเย็นตัวและการเติมธาตุ Zr ต่อค่าความแข็งของโลหะผสม Al-Fe ที่ทำการบ่มแข็งที่เวลาแตกต่างกัน



รูปที่ 4.17 ค่าความแข็งของ Al-0.5Fe ระหว่างการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 350 °C (a) อัตราการเย็นตัวเร็ว (b) อัตราการเย็นตัวปานกลาง และ (c) อัตราการเย็นตัวช้า



รูปที่ 4.18 ค่าความแข็งของ Al-1.8Fe ระหว่างการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 350 °C (a) อัตราการเย็นตัวเร็ว (b) อัตราการเย็นตัวปานกลาง และ (c) อัตราการเย็นตัวช้า



รูปที่ 4.19 ค่าความแข็งของ Al-3Fe ระหว่างการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 350 °C (a) อัตราการเย็นตัวเร็ว (b) อัตราการเย็นตัวปานกลาง และ (c) อัตราการเย็นตัวช้า

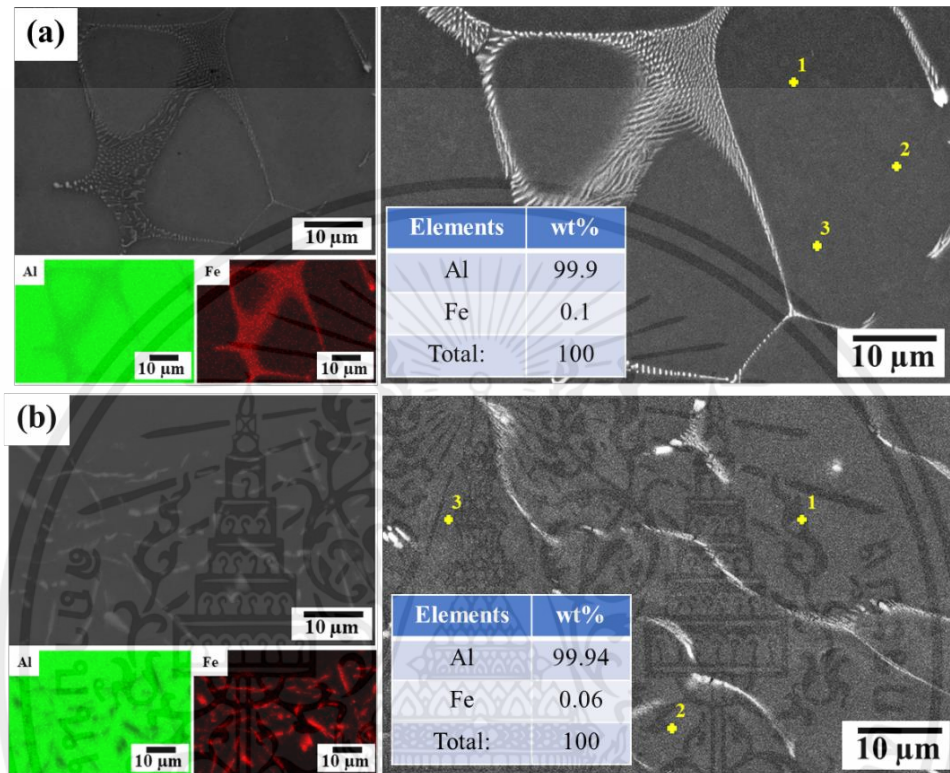
เมื่อพิจารณาค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ ก่อนทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 350 °C ของ Al-Fe ทั้ง 3 กลุ่ม ได้แก่ โลหะผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe โลหะผสมยูเทคติก Al-Fe และโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติก Al-Fe แสดงพฤติกรรมการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งในลักษณะที่คล้ายคลึงกัน โดยแสดงให้เห็นว่ามีการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งในชิ้นงานที่มีการเติมธาตุ Zr เนื่องจากความสามารถในการละลายของแข็ง (Solid solubility) ของ Zr ซึ่งสามารถช่วยเพิ่มความแข็งให้กับวัสดุได้ แต่เนื่องจากความสามารถในแพร่ได้ช้าของ Zr ในการละลายเข้าสู่ลุ่มิเนียมระหว่างการแข็งตัวในสภาวะไม่สมดุล จึงทำให้เกิดตะกอนความหนาแน่นสูงขึ้นของตะกอนที่มีขนาดเล็ก ส่งผลให้มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น และเมื่อทำการบ่มแข็งที่ให้อุณหภูมิ 350 °C แสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งเพิ่มขึ้น ตามระยะเวลาในการบ่มแข็ง อีกทั้งยังบ่งบอกอย่างเป็นนัยถึงการมีอยู่ของการตกตะกอนของแข็ง ซึ่งการเติมธาตุ Zr ในปริมาณที่มากขึ้น ส่งเสริมการตกตะกอนของแข็งแพร่กระจายทั่วทั้งลุ่มิเนียมพื้น ซึ่งมีรายงานจากการศึกษาก่อนหน้านี้ว่าการเติมธาตุ Zr พบการตกตะกอนของแข็ง Al_3Zr ซึ่งเป็นเหตุผลที่ทำให้ค่าความแข็งสามารถเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเติมปริมาณของ Zr เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ [36]

พิจารณาค่าความแข็งของ Al-Fe ทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ โลหะผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe , โลหะผสมยูเทคติก Al-Fe และโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติก Al-Fe เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการเติมปริมาณ Zr ที่ต่างกัน จะเห็นว่าวัสดุที่มีการเติมปริมาณของ Zr สูงสุดที่ 0.15%wt. จะให้ค่าความแข็งของวัสดุสูงที่สุด โดยค่าความแข็งจะลดลงตามการเติมปริมาณที่ลดลงของธาตุ Zr ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างอัตราการเย็นตัวที่ต่างกัน พบว่าความสามารถในการเพิ่มความแข็งของวัสดุด้วยอัตราการเย็นตัวเร็ว สามารถเพิ่มความแข็งของวัสดุสูงที่สุด โดยค่าความแข็งจะลดลงตามอัตราการเย็นตัวช้าลงตามลำดับ

พิจารณาค่าความแข็งของวัสดุหลังจากการบ่มแข็งจนกระทั่งได้ค่าความแข็งของวัสดุสูงสุด ที่ระยะเวลา 21 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างก่อนทำการบ่มแข็งกับหลังทำการบ่มแข็ง พบว่าหลังจากที่ทำการบ่มแข็งของวัสดุต่อกันในระยะเวลาที่นานขึ้นที่อุณหภูมิคงที่ จะทำให้ค่าความแข็งของวัสดุค่อยๆลดลงแล้วเริ่มคงที่ แต่ยังคงให้ค่าความแข็งของวัสดุที่สูงกว่าก่อนทำการบ่มแข็ง โดยหลังจากค่าความแข็งของวัสดุลดลง เมื่อเปรียบเทียบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาแล 60 องศาถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

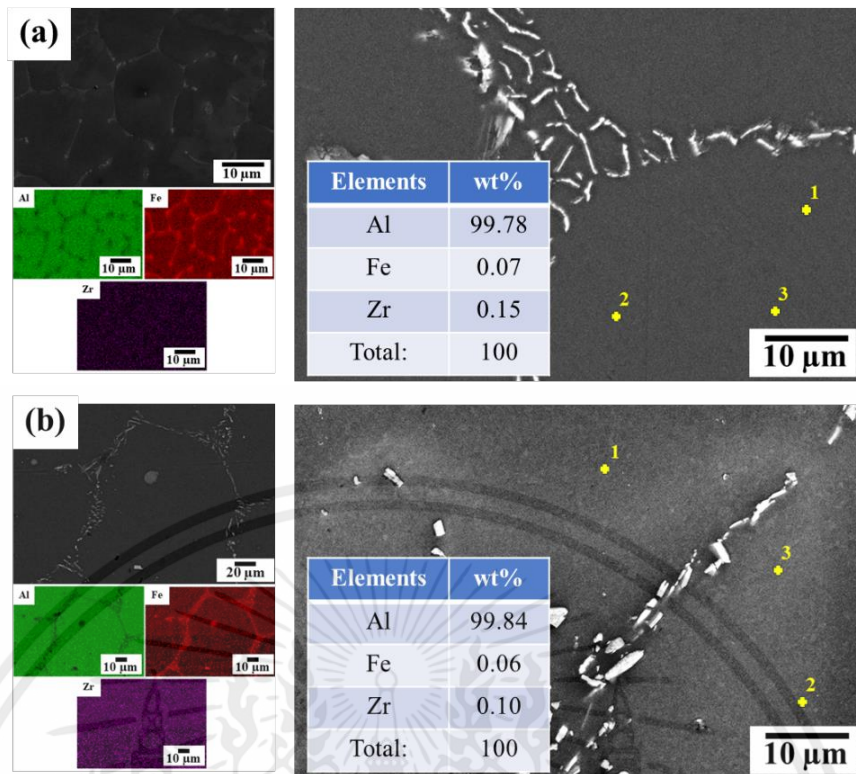
การเติมปริมาณ Zr ในปริมาณที่ต่างกัน จะเห็นได้ว่าค่าความแข็งของวัสดุที่มีการเติมปริมาณ Zr สูงสุดที่ 0.15%wt. ยังคงมีค่าความแข็งของวัสดุสูงที่สุด

4.5 การวิเคราะห์อิทธิพลของอัตราการเย็นตัวต่อการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบ



รูปที่ 4.20 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุแบบจุดด้วยวิธี EDS ของโลหะผสม Al-0.5Fe (a) Al-0.5Fe ที่อัตราการเย็นตัวเร็ว และ (b) Al-0.5Fe ที่อัตราการเย็นตัวช้า

รูปที่ 4.20 (a) แสดง EDS mapping ของชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวเร็ว และ รูปที่ 4.20 (b) อัตราการเย็นตัวช้า การวิเคราะห์ EDS เมื่อเปรียบเทียบระหว่างอัตราการเย็นตัวเร็วและอัตราการเย็นตัวช้า พบว่าอัตราการเย็นตัวมีบทบาทสำคัญต่อการกระจายตัวของเหล็กในเนื้อพื้นอลูมิเนียมที่ส่งผลต่อค่าความแข็ง โดยชิ้นงานที่ได้จากอัตราการเย็นตัวเร็วมีค่าเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเหล็กสูงกว่า จากการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุแบบจุดด้วยวิธี EDS ชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวเร็วมีปริมาณของเหล็ก 0.1 %wt. และปริมาณของเหล็ก 0.06 %wt. ของชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวช้า ส่งผลต่อค่าความแข็งที่ลดลงตามเปอร์เซ็นต์ปริมาณของเหล็กโดยน้ำหนักในเนื้ออลูมิเนียมที่ลดลง นอกจากนี้เมื่อมีการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 350 °C ส่งผลมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับค่าความแข็งก่อนการบ่มแข็งตามปริมาณของเหล็กในเนื้ออลูมิเนียม



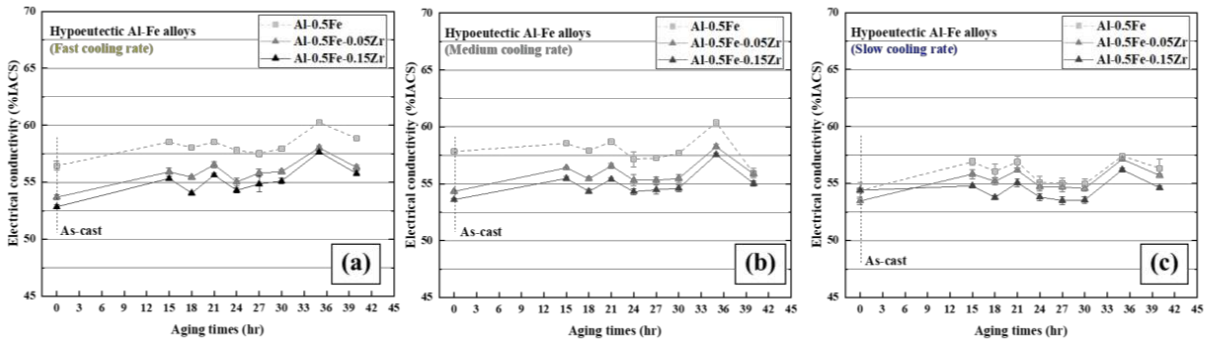
รูปที่ 4.21 การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบธาตุแบบจุดด้วยวิธี EDS ของโลหะผสม Al-Fe-Zr (a) Al-0.5Fe-0.15Zr ที่อัตราการเย็นตัวเร็ว และ (b) Al-0.5Fe-0.15Zr ที่อัตราการเย็นตัวช้า

จากรูปที่ 4.21 แสดงผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบธาตุแบบจุดด้วยวิธี EDS ของโลหะผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe ในเนื้ออลูมิเนียมของชิ้นงาน 2 ชิ้น ที่มีองค์ประกอบของเหล็กและ Zr เท่ากัน ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 5 และ 15 ขององค์ประกอบโลหะผสม Al-Fe ตามลำดับ ด้วยอัตราการเย็นตัวที่ต่างกัน โดยรูปที่ 4.21 (a) จากผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบธาตุแบบจุด พบว่าชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวเร็วมีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเหล็กและ Zr 0.07 และ 0.15 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวช้าที่มีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเหล็กและ Zr 0.06 และ 0.10 ในรูปที่ 4.21 (b) ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการแพร่ของธาตุเหล็กและธาตุ Zr ในการละลายในเนื้ออลูมิเนียมได้ไม่เท่ากันภายใต้สภาวะอัตราการเย็นต่างกัน โดยสภาวะการเย็นตัวเร็ว เหล็กและธาตุ Zr จะมีความสามารถในการละลายได้มากกว่าชิ้นงานภายใต้สภาวะอัตราการเย็นตัวช้า

4.6 อิทธิพลของอัตราการเย็นตัวและการเติมธาตุ Zr ต่อสมบัติการนำไฟฟ้าของโลหะผสม Al-Fe

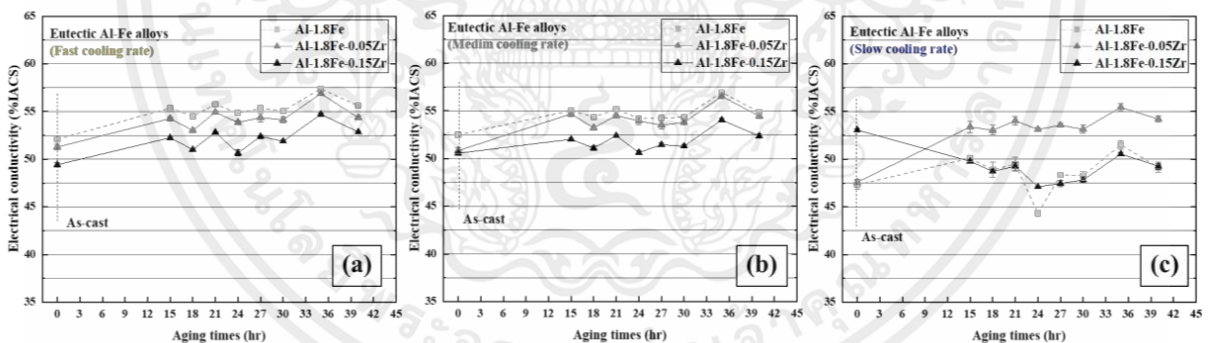
พิจารณาผลของอัตราการเย็นตัวต่อสมบัติการนำไฟฟ้าของโลหะผสม Al-Fe เมื่อเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้า (%IACS) ของโลหะผสมอลูมิเนียมแต่ละชนิด พบว่าทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 350 °C เป็นระยะเวลา 35 ชั่วโมง จะให้มีความสามารถในการนำไฟฟ้าสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาแล⁶²องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 ค่าการนำไฟฟ้าของโลหะผสม Al-0.5Fe ระหว่างการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 350 °C (a) อัตราการเย็นตัวเร็ว (b) อัตราการเย็นตัวปานกลาง และ (c) อัตราการเย็นตัวช้า

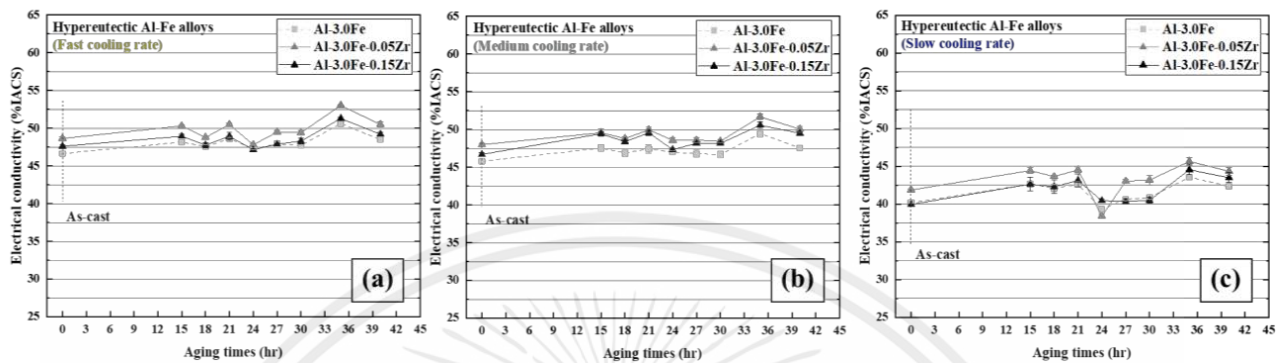
เมื่อพิจารณาผลของการนำไฟฟ้าของโลหะผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe ใช้ระยะเวลาบ่มแข็ง 35 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่าอัตราการเย็นตัวเร็วและปานกลางให้ค่าการนำไฟฟ้าที่เหมือนกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการนำไฟฟ้าที่อัตราการเย็นตัวช้า ส่งผลต่อความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ลดลง และเมื่อพิจารณาผลของการนำไฟฟ้าเมื่อมีการเติมธาตุ Zr พบว่าการเติม Zr ในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลต่อความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ลดลง



รูปที่ 4.23 ค่าการนำไฟฟ้าของโลหะผสม Al-1.8Fe ระหว่างการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 350 °C (a) อัตราการเย็นตัวเร็ว (b) อัตราการเย็นตัวปานกลาง และ (c) อัตราการเย็นตัวช้า

เมื่อพิจารณาผลของอัตราการเย็นตัวต่อค่าการนำไฟฟ้าของโลหะผสมยูเทคติกของอลูมิเนียมผสมเหล็ก ที่ผ่านการบ่มแข็งไป 35 ชั่วโมง มีลักษณะที่คล้ายกันกับโลหะผสมชนิดไฮโปยูเทคติก โดยอัตราการเย็นตัวเร็ว ส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างการนำไฟฟ้าที่อัตราการเย็นตัวปานกลางและอัตราการเย็นตัวช้าสุด เมื่อพิจารณาผลของการเติมธาตุ Zr ที่อัตราการเย็นตัวเร็วและอัตราการเย็นตัวปานกลาง บ่งชี้ให้เห็นว่าการเติม Zr ที่ปริมาณสูงขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าของโลหะผสมยูเทคติกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาแล⁶³องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Al-Fe ลดลง แต่เมื่อพิจารณาผลของการเติม Zr ที่อัตราการเย็นตัวช้าพบว่า เมื่อมีการเติมธาตุ 0.05%Zr จะให้ค่าการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น แต่หากมีการเติมธาตุ 0.15%Zr มีลักษณะเดียวกันกับอัตราการเย็นตัวเร็วและอัตราการเย็นตัวปานกลางที่ส่งผลต่อคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่ลดลง



รูปที่ 4.24 ค่าการนำไฟฟ้าของโลหะผสม Al-3Fe ระหว่างการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 350 °C (a) อัตราการเย็นตัวเร็ว (b) อัตราการเย็นตัวปานกลาง และ (c) อัตราการเย็นตัวช้า

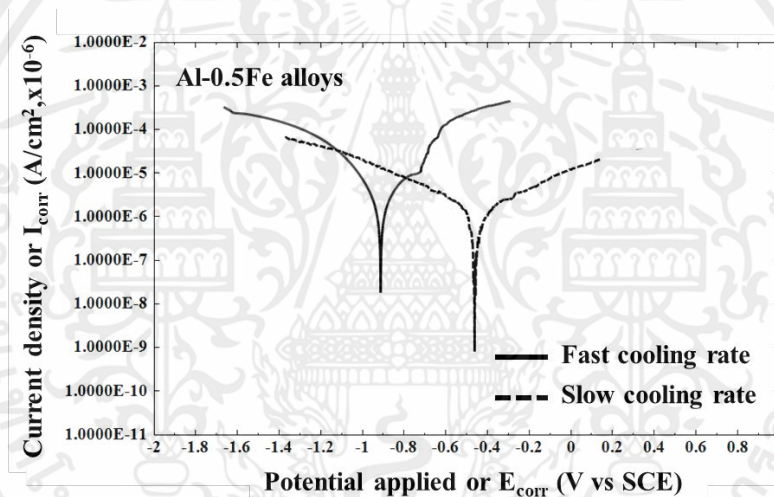
พิจารณาผลของการวิเคราะห์ค่าการนำไฟฟ้าของโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติก Al-Fe พบว่าอัตราการเย็นตัวเร็วส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้าโดยรวมที่สูงสุด และเมื่ออัตราการเย็นตัวลดลง ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟาลดลงตามไปด้วย นอกจากนี้เมื่อพิจารณาอิทธิพลของการเติมธาตุ Zr แสดงให้เห็นว่าการเติมธาตุ Zr ส่งผลให้มีการเพิ่มขึ้นของค่าการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น ซึ่งพบว่าการเติมในปริมาณ 0.05%Zr จะให้ค่าการนำไฟฟ้าที่ดีที่สุด (พิจารณาผลหลังจากทำการบ่มแข็งที่ 35 ชั่วโมง)

4.7 การวิเคราะห์ความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสม Al-Fe

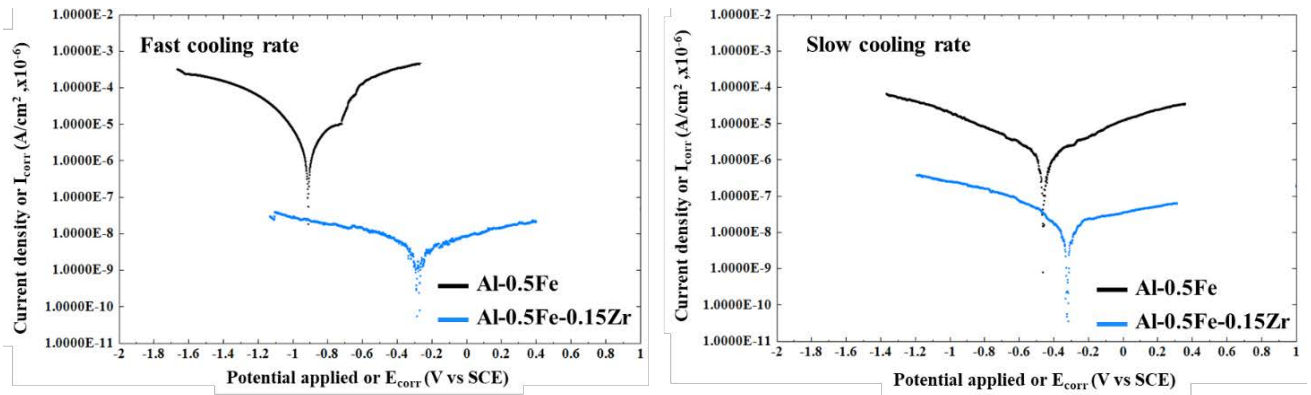
ในการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Corrosion Testing) ของโลหะผสม Al-Fe ที่มีการเติมปริมาณของธาตุ Zr ที่ต่างกัน ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 3.5% เพื่อศึกษาคุณสมบัติความต้านทานการกัดกร่อน ด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตท (Potentiostat) และเครื่องวิเคราะห์ทางเคมีสำหรับงานวิจัย (Potentiostat/Galvanostat) แสดงผลการทดสอบการกัดกร่อนเป็นกราฟเส้นโค้งโพลาไรเซชัน (Polarization Curve) ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) และค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) ของชิ้นงานทดสอบที่มีอัตราการเย็นตัวเร็วและอัตราการเย็นตัวช้าดังนี้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการกัดกร่อนทางเคมีไฟฟ้าของโลหะผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe ที่มีการเติมปริมาณ Zr ที่แตกต่างกัน

Alloys	Cooling rate (°C/s)	E_{corr} (V)	I_{corr} ($\text{A}/\text{cm}^2, \times 10^{-6}$)
Al-0.5Fe	60.6 (Fast)	-0.91431	0.725
	4.26 (Slow)	-0.46778	0.501
Al-0.5Fe-0.05Zr	60.6 (Fast)	-0.93406	0.512
	4.26 (Slow)	-0.20124	0.036
Al-0.5Fe-0.15Zr	60.6 (Fast)	-0.29308	0.008
	4.26 (Slow)	-0.32899	0.005

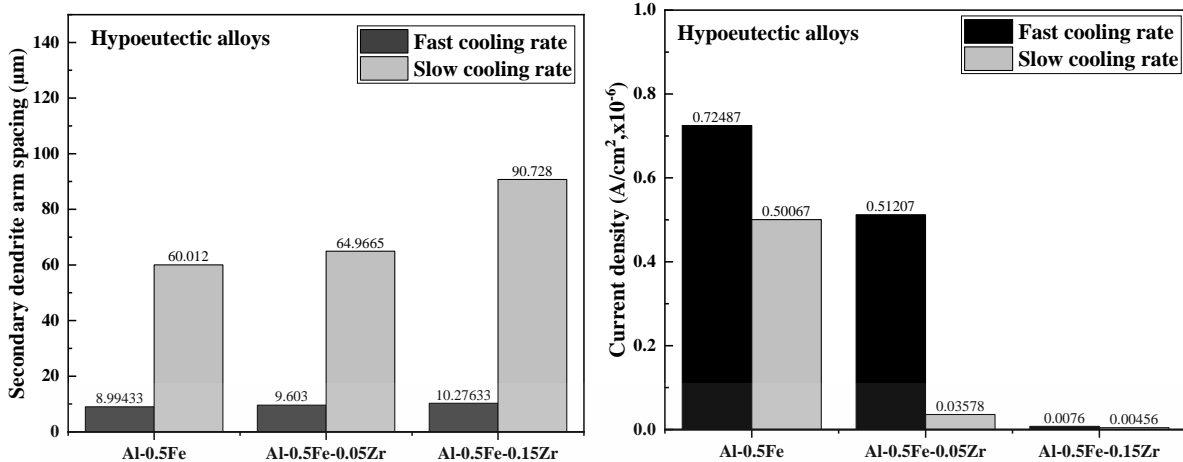


รูปที่ 4.25 การเปรียบเทียบผลการทดสอบการกัดกร่อนทางเคมีไฟฟ้าของโลหะผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe ที่มี อัตราการเย็นตัวต่างกัน



รูปที่ 4.26 การเปรียบเทียบผลการทดสอบการกัดกร่อนทางเคมีไฟฟ้าของโลหะผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe และการเติมธาตุ Zr ที่มีอัตราการเย็นตัวต่างกัน

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการกัดกร่อนทางเคมีไฟฟ้าของโลหะผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe ที่มีการเติมปริมาณ Zr ที่ต่างกัน การเปรียบเทียบระหว่างอัตราการเย็นตัวเร็วและอัตราการเย็นตัวช้า พบว่าอัตราการเย็นตัวเร็ว มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) สูงกว่าอัตราการเย็นตัวช้า ซึ่งรูปที่ 4.26 แสดงผลของอัตราการเย็นตัวที่ต่างกันต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) จากการเปรียบเทียบกราฟเส้นโค้งโพลาร์ไรเซชันของอัตราการเย็นตัวเร็วและอัตราการเย็นตัวช้า ชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวเร็วจะมีอัตราการกัดกร่อนมากกว่า จากการทดสอบผลกระทบบของการเติม 0.15%Zr แสดงให้เห็นถึงการมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) ต่ำที่สุด ตามด้วยการเติม 0.05%Zr ที่มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น ส่วนโลหะผสม Al-Fe ที่ไม่มีการเติมธาตุ Zr มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) สูงสุด แสดงถึงอัตราการกัดกร่อนมากที่สุด ดังนั้น Al-0.5Fe ที่ไม่มีการเติมธาตุเซอร์โคเนียมจึงมีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนต่ำที่สุด



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระยะห่างระหว่างแขนเดนไดรต์ทุติยภูมิ (SDAS) และค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) ของโลหะผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe

การพิจารณาความสัมพันธ์ระยะห่างระหว่างแขนเดนไดรต์ทุติยภูมิ (Secondary Dendrite Arm Spacing; SDAS) และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแขนเดนไดรต์ทุติยภูมิและอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานทดสอบ จากการศึกษาพบว่าอัตราการเย็นตัวเร็ว ทำให้เดนไดรต์มีเวลาโตน้อยลง ส่งผลให้เดนไดรต์มีขนาดเล็ก แขนของเดนไดรต์ทุติยภูมิจึงมีระยะห่างน้อย ส่งผลให้ SDAS มีค่าน้อยลง และชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวช้า เดนไดรต์มีเวลาโตมากขึ้น ส่งผลให้แขนของเดนไดรต์มีระยะห่างมากขึ้น ทำให้ SDAS มีค่าสูงขึ้น และในการทดสอบการกัดกร่อนทางเคมีไฟฟ้าของโลหะผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe แสดงให้เห็นว่า SDAS มีค่าสูงขึ้น จะทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนลดลง (I_{corr}) ดังนั้นชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวช้า มีค่า SDAS สูงขึ้น ทำให้มีสัดส่วนของอลูมิเนียมมากขึ้นซึ่งมีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนได้ดี ส่งผลให้ชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวช้า มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนได้ดีมากขึ้น จากการศึกษาผลของการเติมปริมาณ Zr ต่อค่า SDAS พบว่าการเติมปริมาณ 0.05%Zr และ 0.15%Zr ทำให้ค่าของ SDAS เพิ่มขึ้น มีค่าความหนาแน่นกระแสลดลง (I_{corr}) หรืออัตราการกัดกร่อนน้อยลง ดังนั้นการเติมปริมาณ Zr เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนที่เพิ่มขึ้นในโลหะผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe

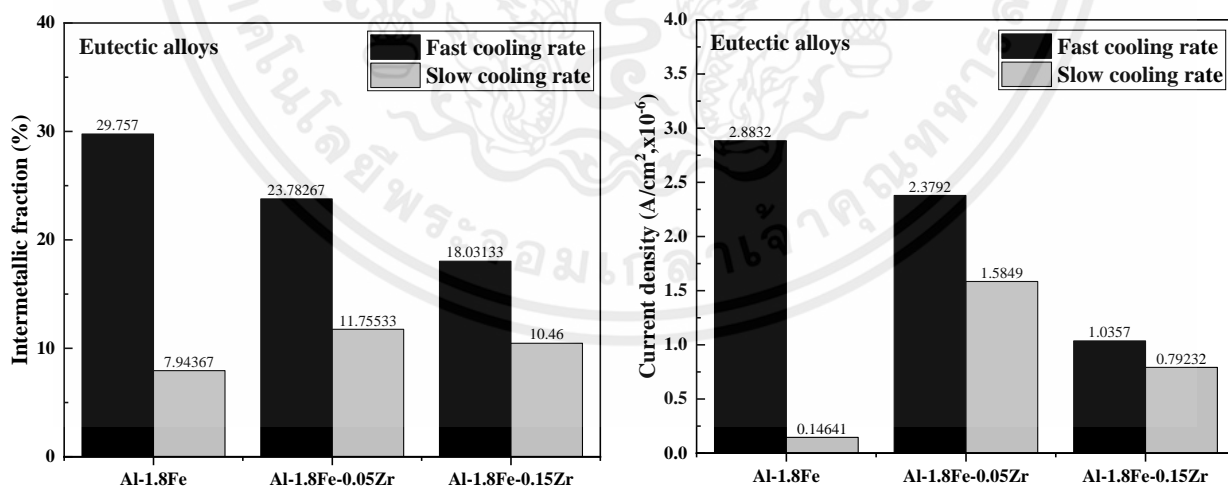
การทบทวนการศึกษาก่อนหน้าของ Osorio et al. (2006) ตรวจสอบผลกระทบบetweenระยะห่างแขนเดนไดรต์ทุติยภูมิกับคุณสมบัติทางกลของโลหะผสม Al-Si ผู้เขียนระบุความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างแขนเดนไดรต์ทุติยภูมิกับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ผลการวิจัยระบุว่าอัตราการเย็นตัวเร็ว ส่งผลให้ระยะห่างของแขนเดนไดรต์ทุติยภูมิมีค่าน้อยลง ในขณะที่อัตราการเย็นตัวที่ช้าจะส่งผลทำให้ระยะห่างของแขนเดนไดรต์ทุติยภูมิมีค่ามากขึ้น การศึกษาแสดงให้เห็นว่าระยะห่างระหว่างแขนเดนไดรต์ทุติยภูมิเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนลดลง ซึ่งบ่งชี้ถึงความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนที่สูงขึ้น [44]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาแล 67 ่องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการกัดกร่อนทางเคมีไฟฟ้าของโลหะผสมยูเทคติก Al-Fe ที่มีปริมาณ Zr ที่แตกต่างกัน

Alloys	Cooling rate (°C/s)	E_{corr} (V)	I_{corr} (A/cm ² ,x10 ⁻⁶)
Al-1.8Fe	60.6 (Fast)	-0.94102	2.883
	4.26 (Slow)	-0.23858	0.146
Al-1.8Fe-0.05Zr	60.6 (Fast)	-0.95133	2.379
	4.26 (Slow)	-0.9924	1.585
Al-1.8Fe-0.15Zr	60.6 (Fast)	-0.8964	1.036
	4.26 (Slow)	-0.92406	0.792

จากตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการกัดกร่อนทางเคมีไฟฟ้าของโลหะผสมยูเทคติก Al-Fe ที่มีปริมาณ Zr ที่ต่างกัน การเปรียบเทียบระหว่างอัตราการเย็นตัวเร็วและอัตราการเย็นตัวช้า พบว่าชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวช้า จะมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) น้อยกว่าชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวเร็ว แสดงถึงความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนที่ดีกว่าของชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวช้า และเมื่อพิจารณาการเติมปริมาณธาตุ Zr เพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนลดลง (I_{corr}) แสดงให้เห็นว่าธาตุ Zr มีความสามารถในการปรับปรุงการต้านทานการกัดกร่อนได้ ดังนั้นการเติม 0.15%Zr มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) ที่น้อยที่สุดของโลหะผสมยูเทคติก-เหล็กที่มีอัตราการเย็นตัวช้า



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของสารประกอบเชิงโลหะของเหล็กในเฟสยูเทคติก และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) ของโลหะผสมยูเทคติก Al-Fe

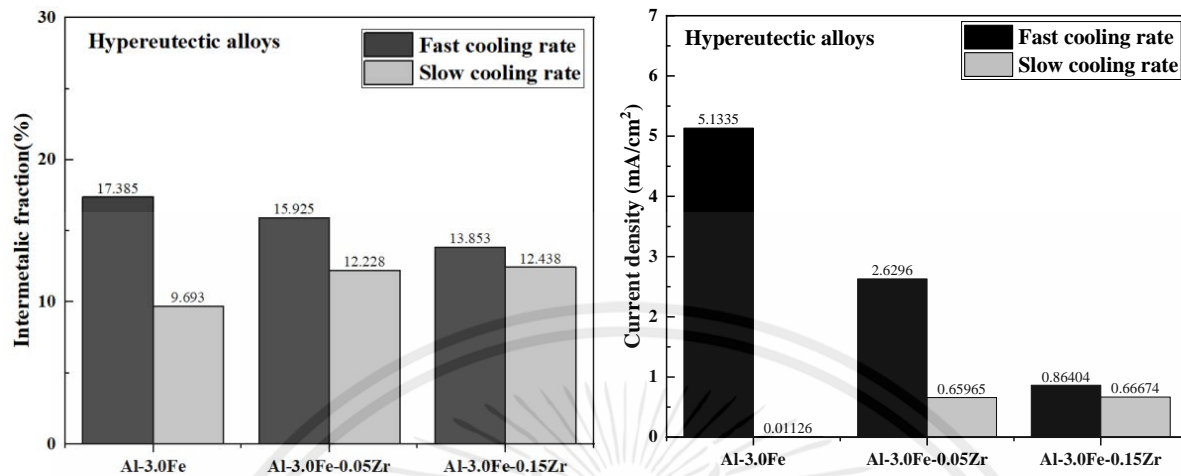
การพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของสารประกอบเชิงโลหะของเหล็ก (Fe) ภายในเฟสยูเทคติกและอัตราการเย็นตัวที่แตกต่างกัน พบว่าอัตราการเย็นตัวที่ช้าลงส่งผลต่อการเกิดสารประกอบเชิงโลหะของเหล็กภายในเฟสยูเทคติกที่น้อยลง และบ่งชี้ว่ามีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนลดลง ดังนั้นชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวช้าจึงมีความสามารถในการลดอัตราการกัดกร่อนได้ดีกว่าชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวเร็ว นอกจากนี้เมื่อพิจารณาอิทธิพลของการเติมปริมาณ Zr ที่ต่างกัน แสดงให้เห็นว่าการเติมปริมาณ Zr กับชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวเร็ว ส่งผลให้สัดส่วนของสารประกอบเชิงโลหะของเหล็กลดลง ดังนั้นการเติมธาตุ Zr จึงมีผลทำให้ชิ้นงานมีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนที่ดีขึ้น โดยพิจารณาจากความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) ของชิ้นงานที่มีการเติม Zr มีค่าลดลง อย่างไรก็ตามสำหรับชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวช้าและมีการเติมธาตุ Zr บ่งชี้ว่าอิทธิพลของการเติมธาตุ Zr ส่งผลให้สัดส่วนพื้นที่ของสารประกอบเชิงโลหะของเหล็กเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวช้าและมีการเติมธาตุ Zr มีอัตราการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาชิ้นงานที่ไม่มีการเติมธาตุ Zr แสดงสัดส่วนของสารประกอบเชิงโลหะของเหล็กที่ต่ำกว่าชิ้นงานที่มีการเติมธาตุ Zr ดังนั้นในโลหะผสมยูเทคติก-เหล็กที่อัตราการเย็นตัวช้าและไม่มีการเติม Zr จึงมีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนที่ดีที่สุด โดยพิจารณาจากค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) ที่มีค่าต่ำที่สุด

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการกัดกร่อนทางเคมีไฟฟ้าของโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติก Al-Fe ที่มีปริมาณ Zr ที่ต่างกัน

Alloys	Cooling rate (°C/s)	E_{corr} (V)	I_{corr} (A/cm ² , x10 ⁻⁶)
Al-3.0Fe	60.6 (Fast)	-0.908	5.134
	4.26 (Slow)	-0.94997	0.011
Al-3.0Fe-0.05Zr	60.6 (Fast)	-0.94915	2.630
	4.26 (Slow)	-0.35815	0.660
Al-3.0Fe-0.15Zr	60.6 (Fast)	-0.4573	0.864
	4.26 (Slow)	-0.42485	0.667

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการกัดกร่อนทางเคมีไฟฟ้าของโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติก Al-Fe ที่มีปริมาณ Zr ที่ต่างกัน การเปรียบเทียบระหว่างอัตราการเย็นตัวเร็วและอัตราการเย็นตัวช้าของโลหะผสม Al-Fe ที่ไม่มีการเติม Zr มีอัตราการกัดกร่อนน้อยสุด โดยพิจารณาจากค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) น้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบการเติมปริมาณของ Zr ที่ต่างกันของชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวเร็ว บ่งชี้ให้เห็นว่าโลหะผสมที่มีการเติมปริมาณของ Zr เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานมีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนที่ดีขึ้น โดยพิจารณาจากค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) ที่ลดลง ส่วนการเติม Zr ในชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวช้า พบว่ามีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) ไม่แตกต่างกัน ไม่ว่าจะเป็นกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาแล 69 ่องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นการเติม Zr ในชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวช้า ไม่มีผลต่อความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนของอลูมิเนียมผสมเหล็กกลุ่มนี้



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของสารประกอบเชิงโลหะของเหล็กใน Al-Fe ไฮเปอร์ยูเทคติก และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) ของโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติก Al-Fe

จากรูปที่ 4.29 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) ระหว่างชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวเร็ว กับชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวช้า พบว่าที่อัตราการเย็นตัวช้ามีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) น้อยกว่าชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวเร็ว โดยชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวเร็วจะมีสัดส่วนของสารประกอบเชิงโลหะมากกว่า ส่งผลให้ชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวเร็วมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนมากกว่าชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวช้า ซึ่งมีสัดส่วนของสารประกอบเชิงโลหะน้อยกว่า ทำให้สัดส่วนพื้นที่ที่ถูกกัดกร่อนน้อยกว่าชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวเร็ว ดังนั้นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) ของอัตราการเย็นตัวช้าจึงมีค่าน้อยกว่าชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวเร็ว และเมื่อพิจารณาการเติม Zr ในปริมาณเพิ่มขึ้นให้กับชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวเร็ว จะส่งผลทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนมีค่าลดลง ชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวเร็วและมีการเติม Zr จึงมีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนได้ดีขึ้น สำหรับชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวช้าและมีการเติม Zr ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเติม Zr ให้กับชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวช้า จะส่งเสริมการเพิ่มขึ้นสัดส่วนของสารประกอบเชิงโลหะเพิ่มขึ้น จึงทำให้ชิ้นงานมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น (I_{corr})

จากการวิเคราะห์ผลการกัดกร่อนทางไฟฟ้าเคมีของโลหะผสมยูเทคติกและโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติก แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนสัดส่วนของสารประกอบเชิงโลหะของเหล็กในเฟสยูเทคติกต่อค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน สอดคล้องกับการศึกษาของ Dorin et al. (2015) ศึกษาอิทธิพลของอัตราการเย็นตัวต่อโครงสร้างทางจุลภาคและพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสม Al-Fe โดยอธิบายไว้ว่า

การลดลงของขนาดและจำนวนของสารประกอบเชิงโลหะของเหล็กที่กระจายอยู่ภายในเฟสยูเทคติกเป็นเหตุผลของการลดลงของค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน (I_{corr}) ซึ่งเป็นผลต่อการปรับปรุงคุณสมบัติในการต้านทานการกัดกร่อนที่ดีขึ้น [41] แม้ว่าการศึกษานี้อัตราการเย็นตัวช้าจะแสดงการกระจายตัวสารประกอบของเหล็กที่น้อยกว่าอัตราการเย็นตัวเร็ว อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้ยังคงสอดคล้องกับประเด็นของการกระจายตัวของสารประกอบเชิงโลหะของเหล็กที่ลดลง แสดงให้เห็นค่ากระแสไฟฟ้ากัดกร่อนที่น้อยลงเช่นเดียวกัน

4.8 อิทธิพลของการบ่มแข็งต่อการวิเคราะห์ความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสม Al-Fe

การเปรียบเทียบการวิเคราะห์การทดสอบการกัดกร่อนทางเคมีไฟฟ้าของโลหะผสม Al-Fe ก่อนทำการบ่มแข็งและหลังทำการบ่มแข็งในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 3.5%NaCl สำหรับทั้งการวิเคราะห์ผลกระทบของอัตราการเย็นตัวและการเติมปริมาณธาตุ Zr ของชิ้นงานทดสอบทั้งหมด (ไฮโปยูเทคติก ยูเทคติก และไฮเปอร์ยูเทคติก)

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบการกัดกร่อนทางเคมีไฟฟ้าของโลหะผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe ก่อนทำการบ่มแข็งและหลังทำการบ่มแข็ง

Alloys	Cooling rate (°C/s)	As-cast		As-aged	
		E_{corr} (V)	I_{corr} ($A/cm^2, \times 10^{-6}$)	E_{corr} (V)	I_{corr} ($A/cm^2, \times 10^{-6}$)
Al-0.5Fe	60.6 (Fast)	-0.91431	0.725	-1.0848	4.070
	4.26 (Slow)	-0.46778	0.501	-1.0011	3.276
Al-0.5Fe-0.05Zr	60.6 (Fast)	-0.93406	0.512	-0.57823	0.001
	4.26 (Slow)	-0.20124	0.036	-0.91228	0.126
Al-0.5Fe-0.15Zr	60.6 (Fast)	-0.29308	0.008	-1.0332	1.271
	4.26 (Slow)	-0.32899	0.005	-0.74818	0.336

พิจารณาตารางที่ 4.4 จากกราฟเส้นโค้งโพลาริเซชันของโลหะผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe ก่อนทำการบ่มแข็งและหลังทำการบ่มแข็ง โดยชิ้นงานที่ไม่มีการเติมปริมาณ Zr เปรียบเทียบระหว่างอัตราการเย็นตัวเร็วกับอัตราการเย็นตัวช้า พบว่าที่อัตราการเย็นตัวช้ามีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) ต่ำส่งผลให้มีอัตราการกัดกร่อนน้อยลง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานที่มีการเติมปริมาณของ Zr กับชิ้นงานที่ไม่มีการเติมปริมาณของ Zr พบว่าชิ้นงานที่มีการเติม 0.05%Zr มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) ต่ำกว่า ทำให้ชิ้นงานที่มีการเติมปริมาณของ Zr มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น และชิ้นงานที่มีการเติมปริมาณของ 0.15%Zr กับชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวช้า มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) น้อยกว่าชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวเร็ว ดังนั้นการเติม 0.05%Zr กับชิ้นงานที่มีอัตราการกัดกร่อนนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาแล 71 ้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เย็นตัวเร็ว มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนที่ดีที่สุด เมื่อพิจารณาจากค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) ที่มีค่าน้อยที่สุดในโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติกชนิดนี้

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบการกัดกร่อนทางเคมีไฟฟ้าของโลหะผสมยูเทคติก Al-Fe ก่อนทำการบ่มแข็งและหลังทำการบ่มแข็ง

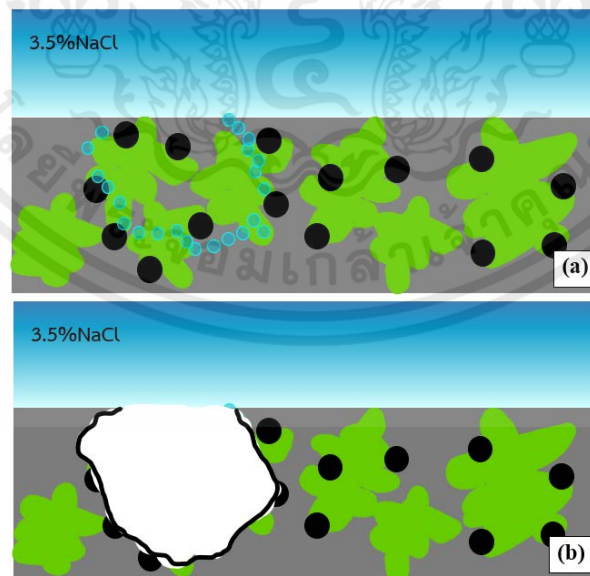
Alloys	Cooling rate (°C/s)	As-cast		As-aged	
		E_{corr} (V)	I_{corr} (A/cm ² ,x10 ⁻⁶)	E_{corr} (V)	I_{corr} (A/cm ² ,x10 ⁻⁶)
Al-1.8Fe	60.6 (Fast)	-0.94102	2.883	-0.67877	0.0004
	4.26 (Slow)	-0.23858	0.146	-0.79809	0.074
Al-1.8Fe-0.05Zr	60.6 (Fast)	-0.95133	2.379	-0.85448	0.134
	4.26 (Slow)	-0.9924	1.585	-0.79434	0.203
Al-1.8Fe-0.15Zr	60.6 (Fast)	-0.8964	1.036	-0.7847	0.462
	4.26 (Slow)	-0.92406	0.792	-0.74731	0.471

พิจารณาตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบการกัดกร่อนทางเคมีไฟฟ้าของโลหะผสมยูเทคติก Al-Fe ก่อนทำการบ่มแข็งและหลังทำการบ่มแข็ง พบว่าหลังทำการบ่มแข็งมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) ลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการบ่มแข็งมีส่วนทำให้ชิ้นงานมีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนที่ดีขึ้น นอกจากนี้อัตราการเย็นตัวต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) พบว่าทั้งอัตราการเย็นตัวเร็วและอัตราการเย็นตัวช้า ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) ลดลงหลังการบ่มแข็ง ทำให้ชิ้นงานหลังการบ่มแข็งมีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนที่ดีขึ้นในชิ้นงานโลหะผสมยูเทคติก Al-Fe และเมื่อพิจารณาการเติม Zr ที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) ที่มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเติมปริมาณของ Zr เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการตกตะกอนเพิ่มขึ้น โดยอิทธิพลของการเติมปริมาณของ Zr ต่ออัตราการกัดกร่อน แสดงให้เห็นว่าการเติมปริมาณของ Zr ที่เหมาะสมที่สุด คือ 0.05%Zr รองลงมาเป็นการเติมปริมาณของ 0.15%Zr และในชิ้นงานที่ไม่มีการเติม Zr มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนที่ดีที่สุด โดยพิจารณาจากค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) ต่ำที่สุด

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการกัดกร่อนทางเคมีไฟฟ้าของโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติก Al-Fe ก่อนทำการบ่มแข็งและหลังทำการบ่มแข็ง

Alloys	Cooling rate (°C/s)	As-cast		As-aged	
		E_{corr} (V)	I_{corr} (A/cm ² , x10 ⁻⁶)	E_{corr} (V)	I_{corr} (A/cm ² , x10 ⁻⁶)
Al-3.0Fe	60.6 (Fast)	-0.908	5.134	-0.19852	0.0003
	4.26 (Slow)	-0.94997	0.011	-0.74609	0.055
Al-3.0Fe-0.05Zr	60.6 (Fast)	-0.94915	2.630	-0.66236	0.002
	4.26 (Slow)	-0.35815	0.660	-0.76315	0.363
Al-3.0Fe-0.15Zr	60.6 (Fast)	-0.4573	0.864	-0.77576	0.195
	4.26 (Slow)	-0.42485	0.667	-0.7043	0.753

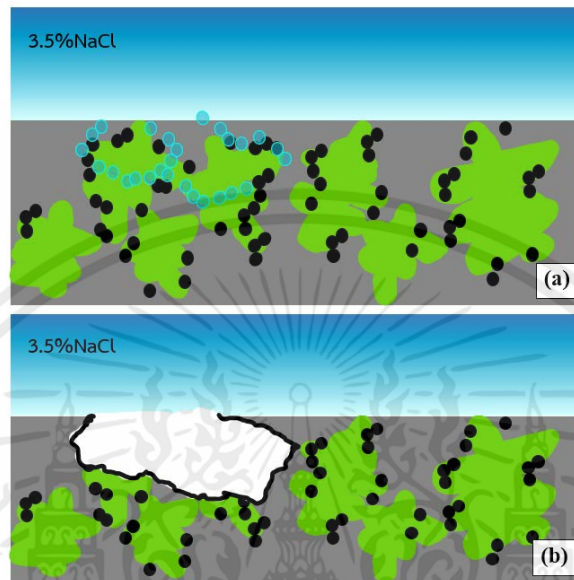
พิจารณาตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการกัดกร่อนทางเคมีไฟฟ้าของโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติก Al-Fe ก่อนทำการบ่มแข็งและหลังทำการบ่มแข็ง พบว่าหลังทำการบ่มแข็งมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) ลดลง แสดงให้เห็นว่าการบ่มแข็งมีส่วนทำให้อัตราการกัดกร่อนน้อยลง อิทธิพลของอัตราการเย็นตัวต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) เปรียบเทียบระหว่างอัตราการเย็นตัวช้าและอัตราการเย็นตัวเร็ว โดยอัตราการเย็นตัวเร็วมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนต่ำลง (I_{corr}) ส่งผลให้ชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวเร็ว ไม่มีการเติม Zr และผ่านการบ่มแข็งมีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนได้ดีที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับโลหะผสมยูเทคติก Al-Fe



รูปที่ 4.30 การทดสอบอัตราการกัดกร่อนของโลหะผสม Al-Fe ที่ไม่มีการเติม Zr (a) ก่อนการทดสอบการกัดกร่อน และ (b) หลังการทดสอบการกัดกร่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและ 73 อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการกัดกร่อนที่ลดลง หลังทำการบ่มแข็ง สามารถอธิบายผ่านกลไกการตกตะกอน การศึกษาก่อนหน้านี้ระบุว่า การก่อตัวของตะกอนจะเกิดขึ้นใกล้กับขอบเขตของเกรน การตกตะกอนที่จัดเรียงตามแนวขอบเขตของเกรนจะทำหน้าที่เป็นเกราะป้องกัน ยับยั้งการเกิดการกัดกร่อนและช่วยต้านทานการกัดกร่อน เนื่องจากการตกตะกอนจะป้องกันการกัดกร่อน ดังแสดงใน รูปที่ 4.30



รูปที่ 4.31 แสดงการทดสอบอัตราการกัดกร่อน ที่มีการเติม Zr (a) ก่อนการทดสอบการกัดกร่อน และ (b) หลังการทดสอบการกัดกร่อน

นอกจากนี้การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 350 °C ส่งเสริมการก่อตัวของตะกอนของแข็งเนื่องจากการเติมปริมาณของธาตุ Zr ที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งยังส่งผลให้เกิดการตกตะกอนที่ละเอียด โดยบ่งชี้ให้เห็นว่ากระจายตัวของตะกอนของแข็งที่ละเอียดนี้ส่งผลต่ออัตราการกัดกร่อนที่ลดลง ดังที่แสดงในรูปที่ 4.31

ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Fangfang Sun et al. (2017) แสดงให้เห็นว่าโลหะผสม Al-Cu-Mg ที่มีการเติม Sc และ Zr หลังทำการบ่มแข็ง พบว่าโครงสร้างจุลภาคที่มีการกระจายตัวของตะกอนละเอียดและไม่ต่อเนื่อง ส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนลดลงและมีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนมากขึ้น [45]

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้สำรวจผลกระทบของอัตราการเย็นตัวและการเติมธาตุ Zr ต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางจุลภาคและการบ่มแข็งของโลหะผสม Al-Fe มีศึกษาโลหะผสม Al-Fe ที่แตกต่างกันสามชนิด โดยจำแนกประเภทเป็นไฮโปยูเทคติก ยูเทคติก และไฮเปอร์ยูเทคติก โดยมีการเติมธาตุ Zr ที่แตกต่างกัน (0.05% และ 0.15%) บทนี้นำเสนอข้อค้นพบที่เป็นข้อสรุปซึ่งได้จากการวิเคราะห์ที่ครอบคลุมการทดสอบโครงสร้างทางจุลภาค ความแข็ง การนำไฟฟ้า และการกัดกร่อนทางเคมีไฟฟ้า

5.1 สรุปผลการทดลอง

- การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคและทางมหภาคของโลหะผสม Al-Fe แสดงถึงอิทธิพลของอัตราการเย็นตัวต่อโครงสร้างทางมหภาคภายใต้สภาวะอัตราการเย็นตัวที่ต่างกัน โดยที่อัตราการเย็นตัวที่ช้าลง ส่งผลให้เกิดเกรนหยาบมากขึ้น เมื่อพิจารณาการเติมธาตุ Zr ในปริมาณสูงจะส่งเสริมให้เกิดเกรนสม่ำเสมอที่มีความละเอียดมากขึ้น
- การศึกษาผลกระทบของอัตราการเย็นตัวต่อความสามารถในการละลายขององค์ประกอบทางเคมีในเนื้ออลูมิเนียมแมทริกซ์ พบว่าอัตราการเย็นตัวเร็ว ส่งผลทำให้เหล็กและ Zr สามารถละลายในเนื้ออลูมิเนียมได้ดีกว่า ส่งผลให้ชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวเร็วมีค่าความแข็งสูง
- จากการวิเคราะห์การนำไฟฟ้าในโลหะผสม Al-Fe และผลกระทบของอัตราการเย็นตัวต่อค่าการนำไฟฟ้าหลังจากการบ่มเป็นเวลา 35 ชั่วโมง พบว่าอัตราการเย็นตัวที่ช้าลงและผลของการเติมธาตุ Zr ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ลดลง
- การทดสอบการกัดกร่อนทางเคมีไฟฟ้าของโลหะผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe แสดงให้เห็นว่า อัตราการเย็นตัวช้า มีค่า SDAS สูงขึ้น มีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนที่ลดลง ส่งผลให้มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนได้ดีมากขึ้น โดยจากการศึกษาผลของการเติมธาตุ Zr เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนที่เพิ่มขึ้นในโลหะผสมไฮโปยูเทคติก Al-Fe เนื่องจากค่า SDAS เพิ่มขึ้น
- การวิเคราะห์ผลการกัดกร่อนทางไฟฟ้าเคมีของโลหะผสมยูเทคติกและโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติก แสดงให้เห็นว่าอัตราการเย็นตัวที่ช้าลงเป็นผลให้สารประกอบเชิงโลหะของเหล็กที่กระจายอยู่ในเฟสยูเทคติกมีสัดส่วนลดลง ทำให้วัสดุมีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนที่ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาแล⁷⁵องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การเปรียบเทียบการวิเคราะห์การทดสอบการกัดกร่อนทางเคมีไฟฟ้าของโลหะผสม Al-Fe หลังการบ่มแข็งพบว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนลดลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การศึกษาผลกระทบของอัตราการเย็นตัวและการเติมธาตุ Zr ต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและการบ่มแข็งของโลหะผสม Al-Fe ฉบับนี้เป็นการพัฒนาโลหะผสม Al-Fe ที่อัตราการเย็นตัวที่ต่างกันและมีการเติมปริมาณของธาตุ Zr เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกล ความสามารถต้านทานต่อการเสียรูปและการกัดกร่อนมาก สำหรับการพัฒนาของโลหะผสม Al-Fe ด้วยกระบวนการแบบอื่นๆ จำเป็นต้องศึกษาข้อมูลเพิ่มเติม โดยคำนึงถึงผลกระทบต่อด้านโครงสร้างทางจุลภาค คุณสมบัติทางกล ความสามารถในการต้านทานต่อการกัดกร่อน และความสามารถในการขึ้นรูป เพื่อการพัฒนาโลหะผสม Al-Fe ที่มีคุณภาพและเป็นที่ต้องการของภาคอุตสาหกรรมต่อไป

การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุทางเคมีที่มีการกล่าวถึงเกี่ยวกับปัจจัยที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งให้กับโลหะผสม Al-Fe ทั้ง 3 ชนิดนี้ ในการศึกษาครั้งนี้ได้ตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุทางเคมีในโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติก เพื่อสนับสนุนเหตุผล และกลไกในการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งเนื่องด้วยการกระจายตัวที่ดีขององค์ประกอบทางเคมี เพื่อยืนยันผลการทดลองสำหรับการกระจายตัวในโลหะผสมยูเทคติกและไฮเปอร์ยูเทคติก ให้สอดคล้องกับการอธิบายผลและหลักฐานจากการตรวจสอบองค์ประกอบธาตุในโลหะผสมไฮโปยูเทคติก ควรมีการตรวจสอบด้วยเทคนิค EDS นี้สำหรับ โลหะผสมยูเทคติก และไฮเปอร์ยูเทคติก ด้วย แต่เนื่องจากขอบเขตของปริญญานิพนธ์ครั้งนี้ มีเพียงการยืนยันผลของโลหะผสมไฮโปยูเทคติก ดังนั้นเพื่อให้บรรลุผลของการศึกษาสูงสุดงานวิจัยนี้ถือเป็นหนึ่งในหัวข้อที่น่าสนใจสำหรับการพัฒนางานวิจัยในระดับสูงและอนาคตต่อไป

การตรวจสอบค่าการนำไฟฟ้าในวัสดุโลหะผสม Al-Fe เพื่อให้ได้รับความแม่นยำสูงควรมีการวัดค่าการนำไฟฟ้าในอุณหภูมิบรรยากาศที่ใกล้เคียงกัน รวมทั้งอุณหภูมิของชิ้นงานที่อุณหภูมิที่เท่ากัน เนื่องจากอาจส่งผลต่อพฤติกรรมการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของค่าการนำไฟฟ้าที่แตกต่างกัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. X. Luo, et al. (2019). Crystallization inhibition and microstructure refinement of Al-5Fe alloys by addition of rare earth elements. Journal of Alloys and compounds. 789: p. 90-99.
- [2] Kun Dai, et al. (2022). Effects of Sc and Zr addition on the solidification and mechanical properties of Al-Fe alloys. Journal of Materials Research and Technology. 18: p. 112-121.
- [3] William D. Callister, et al. (2007). Materials science and engineering: an introduction. Vol. 7. John wiley & sons New York.
- [4] S. S. Nayak, B. S. Murty, and S. K. Pabi. (2008). Structure of nanocomposites of Al-Fe alloys prepared by mechanical alloying and rapid solidification processing. Bulletin of materials science. 31: p. 449-454.
- [5] F. H. Sam Froes, O. N. Senkov, and E. G. Baburaj. (2001). Synthesis of nanocrystalline materials—an overview. Materials Science and Engineering: A. 301(1): p. 44-53.
- [6] Bruno Silva Dantas, et al. (2022). Microstructural Patterns, Microsegregation, Porosity, and Mechanical Properties of Hypoeutectic Al-Fe Alloy, and its Dependency with Solidification Thermal Parameters. Materials Research. 25: p. e20220187.
- [7] Yu Fuxiao, et al. Microstructure and mechanical properties of Al-3Fe alloy processed by equal channel angular extrusion. IOP Publishing.
- [8] Pedro R. Goulart, et al. (2009). Investigation of intermetallics in hypoeutectic Al-Fe alloys by dissolution of the Al matrix. Intermetallics. 17(9): p. 753-761.
- [9] B. Dutta and M. Rettenmayr. (2000). Effect of cooling rate on the solidification behaviour of Al-Fe-Si alloys. Materials Science and Engineering: A. 283(1-2): p. 218-224.
- [10] Suwaree Chankitmunkong, Dmitry G. Eskin, and Chaowalit Limmaneevichitr. (2020). Structure refinement, mechanical properties and feasibility of deformation of hypereutectic Al-Fe-Zr and Al-Ni-Zr alloys subjected to ultrasonic melt processing. Materials Science and Engineering: A. 788: p. 139567.

- [11] K. F. Kelton and A. L. Greer. (2010). Chapter 13 - Solidification. in Pergamon Materials Series. K.F. Kelton and A.L. Greer, Editors., Pergamon. p. 461-510.
- [12] Richard W. Heine, Carl R. Loper, and Philip C. Rosenthal. (1980). Principles of metal casting.
- [13] M. W. Meredith, A. L. Greer, and P. V. Evans. (1998). The effect of grain-refining additions on intermetallic selection in dilute aluminium alloys. LIGHT METALS-WARRENDALE-. p. 977-982.
- [14] C. M. Allen, et al. (1999). The effect of vanadium and grain refiner additions on the nucleation of secondary phases in 1xxx Al alloys. Acta materialia. 47(17): p. 4387-4403.
- [15] S. C. Flood and J. D. Hunt. (1981). Modification of Al-Si eutectic alloys with Na. Metal science. 15(7): p. 287-294.
- [16] C. R. Ho and B. Cantor. (1995). Heterogeneous nucleation of solidification of Si in Al-Si and Al-Si-P alloys. Acta metallurgica et materialia. 43(8): p. 3231-3246.
- [17] M. Vandyoussefi, J. Worth, and A. L. Greer. (2000). Effect of instability of TiC particles on grain refinement of Al and Al-Mg alloys by addition of Al-Ti-C inoculants. Materials science and technology. 16(10): p. 1121-1128.
- [18] I. Maxwell and A. Hellawell. (1975). A simple model for grain refinement during solidification. Acta Metallurgica. 23(2): p. 229-237.
- [19] James Matchett Wilson, Raymond John Newcombe, and A. R. Denaro. (2013). Experiments in physical chemistry. Elsevier.
- [20] Mars Guy Fontana and Norbert D. Greene. (1967). Corrosion Engineering.
- [21] Herbert Henry Uhlig and Robert Winston Revie. (1985). Corrosion and corrosion control.
- [22] [ออนไลน์].เข้าถึงได้จาก: <https://www.tistr.or.th/tistrblog/?p=2701>.
- [23] G. Astm. G 3-89 (Reapproved 2004): Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing. ASTM International.
- [24] [ออนไลน์].เข้าถึงได้จาก: <http://www.cmit.kmitl.ac.th/x-ray-diffractometer/>.
- [25] Ltd TMTeck Instrument Co. อุปกรณ์ทดสอบกระแสไฟฟ้าวน. [ออนไลน์].เข้าถึงได้จาก: <https://thai.tmteck-ndt.com/quality-12611607-electrical-eddy-current-conductivity-test-tmd-102>.

- [26] ภูริจันทร์ วิวัฒน์ พิษญาภา เลิศฤทธิ, หัตยา วัฒนน้อย. (2564). การพัฒนาอลูมิเนียมผสมเหล็กโดยการเติมโลหะแม่อลูมิเนียม-เซอร์โคเนียม-ไทเทเนียมและกระบวนการอัลตราโซนิกในโลหะหลอมเหลว. กรุงเทพมหานคร: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [27] [ออนไลน์].เข้าถึงได้จาก: https://mic.eng.ku.ac.th/facilities-detail.php?id_sub=42&id=139.
- [28] Martin Ermrich and Detlef Opper. (2011). X-Ray powder diffraction. XRD for the Analyst, Getting Acquainted with the Principles. p. 63-85.
- [29] J. Epp. (2016). 4 - X-ray diffraction (XRD) techniques for materials characterization. in Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods. G. Hübschen, et al., Editors., Woodhead Publishing. p. 81-124.
- [30] [ออนไลน์].เข้าถึงได้จาก: <https://www.rigaku.com/products/xrd/smartlab?index=2>.
- [31] [ออนไลน์].เข้าถึงได้จาก: <https://www.thermofisher.com/th/en/home/electron-microscopy/products/scanning-electron-microscopes/apreo-sem.html>.
- [32] Field Emission Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-ray Spectrometer. [ออนไลน์].เข้าถึงได้จาก: <https://www.ie-kmitl.org/facilities>.
- [33] ศูนย์วิจัยทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์. [ออนไลน์].เข้าถึงได้จาก: <http://cste.sut.ac.th/lsu/images/doc/fe-sem.pdf>.
- [34] Suwaree Chankitmunkong, et al. (2023). Effect of Zr and Sc on Intermetallic Morphology and Hardening of an Al-Fe Alloy. Springer.
- [35] Jieyun Ye, et al. (2020). Effect of Zr Microalloying on the Microstructures and Strengthening Mechanism of As-Cast Al-Fe-Zr Alloys. Materials. 13(21): p. 4744.
- [36] R. Mahmudi, P. Sepehrband, and H. M. Ghasemi. (2006). Improved properties of A319 aluminum casting alloy modified with Zr. Materials Letters. 60(21-22): p. 2606-2610.
- [37] S. S. Nayak, et al. (2010). Nanocomposites and an extremely hard nanocrystalline intermetallic of Al-Fe alloys prepared by mechanical alloying. Materials Science and Engineering: A. 527(9): p. 2370-2378.
- [38] Abid A. Mohammed, et al. (2024). Enhancing ambient and elevated temperature performance of hypoeutectic Al-Ce cast alloys by Al₃(Sc,Zr) precipitate. Journal of Materials Research and Technology. 28: p. 1188-1197.
- [39] J. H. Jeon and D. H. Bae. (2019). Effect of cooling rate on the thermal and electrical conductivities of an A356 sand cast alloy. Journal of Alloys and Compounds. 808: p. 151756.

- [40] G. L. Shuai, et al. (2021). The mechanical property and electrical conductivity evolution of Al–Fe alloy between room temperature and elevated temperature ECAP. Vacuum. 183: p. 109813.
- [41] Thomas Dorin, et al. (2015). Influence of cooling rate on the microstructure and corrosion behavior of Al–Fe alloys. Corrosion Science. 100: p. 396-403.
- [42] Rajan Ambat, et al. (2006). Effect of iron-containing intermetallic particles on the corrosion behaviour of aluminium. Corrosion science. 48(11): p. 3455-3471.
- [43] Feng Wang, et al. (2013). The grain refinement mechanism of cast aluminium by zirconium. Acta materialia. 61(15): p. 5636-5645.
- [44] Wislei R. Osorio, et al. (2006). Effect of dendritic arm spacing on mechanical properties and corrosion resistance of Al 9 Wt Pct Si and Zn 27 Wt Pct Al alloys. Metallurgical and Materials Transactions A. 37: p. 2525-2538.
- [45] Fangfang Sun, et al. (2017). Effect of Sc and Zr additions on microstructures and corrosion behavior of Al-Cu-Mg-Sc-Zr alloys. Journal of materials science & technology. 33(9): p. 1015-1022.